



การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง สำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และ กองพล อารีรักษ์
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับ การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง เนื่องจากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีดังกล่าว เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของบทความนี้ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blockset: PSB) ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวใช้แบบจำลองของวงจรรอกกำลังแอกทีฟสองรูปแบบด้วยกัน คือ แบบจำลองของวงจรรอกกำลังแอกทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสจุดมิตที่ชดเชยฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ และแบบจำลองของวงจรรอกกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งแบบจำลองในลักษณะนี้ใกล้เคียงกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับการใช้งานจริง นอกจากนี้ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวรวมถึงการอภิปรายผล ได้นำเสนอไว้ในบทความนี้ด้วยเช่นกัน

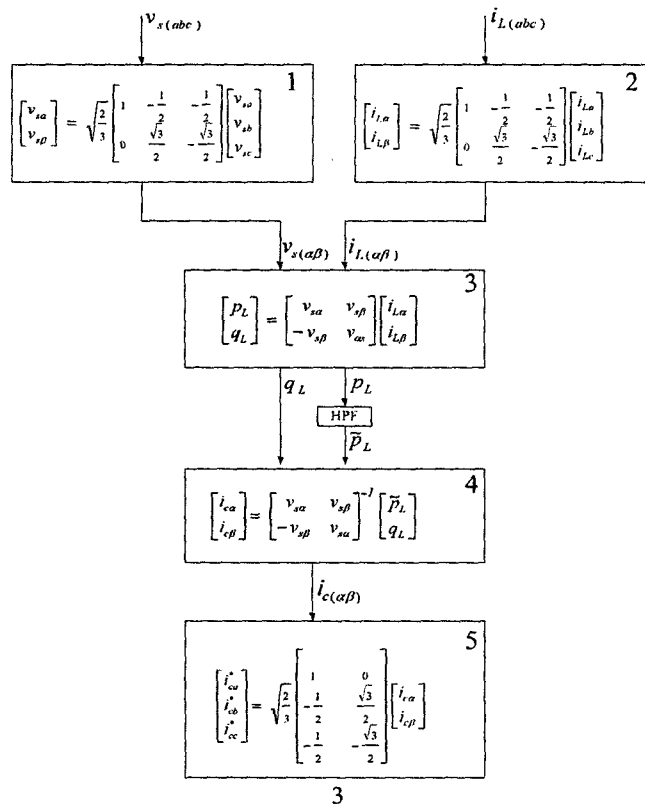
คำสำคัญ การตรวจจับฮาร์มอนิก, วงจรรอกกำลังแอกทีฟ

บทนำ

ระบบไฟฟ้ากำลังที่ต่อเข้ากับโหลดที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะก่อให้เกิดฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นปัญหาหรือมลพิษทางไฟฟ้าที่สำคัญอย่างหนึ่ง ปัญหาดังกล่าวจะก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่สายส่ง และกำลังงานสูญเสียภายในตัวอุปกรณ์ไฟฟ้า อีกทั้งยังทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ มีการทำงานผิดพลาดและมีอายุการใช้งานสั้นลง[1] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกให้หมดไปหรือลดน้อยลง เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณภาพทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การกำจัดฮาร์มอนิกในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้วงจรรอกกำลังพาสซีฟ[2] การใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟ[3] และการใช้วงจรรอกกำลังไฮบริดจ์[4] แต่ในบทความนี้ นำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากวงจรรอกกำลังแอกทีฟมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง อีกทั้งยังไม่ประสบปัญหาจากสถานะเรโซแนนซ์ การตรวจจับฮาร์มอนิกที่ได้นำเสนอในบทความนี้ใช้วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง[5] เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพสูงในการตรวจจับฮาร์มอนิก นอกจากนี้ในบทความยังได้นำเสนอวิธีการควบคุมการทำงานของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธีฮิสเทอรีซิส[6] ที่สามารถควบคุมการผิดกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟอย่างได้ผล การจำลองสถานการณ์ ผลการจำลองสถานการณ์ รวมถึงการอภิปรายผล ได้ถูกนำเสนอไว้ในบทความนี้ด้วยเช่นกัน

การตรวจจับสนร่มนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง

การตรวจจับสนร่มนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ใช้หลักการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ซึ่งการคำนวณดังกล่าวแสดงไว้ดังรูปที่ 1 ดังนี้



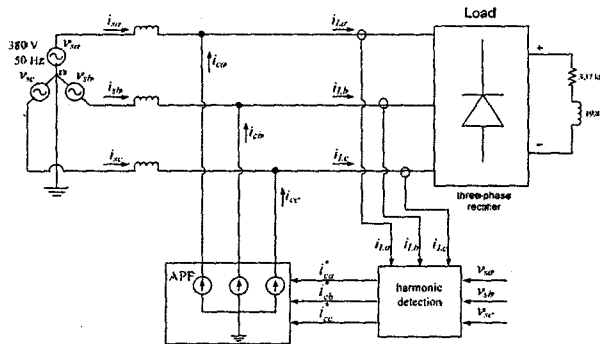
รูปที่ 1 แผนภาพการคำนวณการตรวจจับสนร่มนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง

จากรูปที่ 1 เริ่มต้นจากการแปลงแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย (v_s) และกระแสไฟฟ้าทางด้านโหลด (i_L) จากปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสเป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ดังบล็อกที่ 1 และ 2 จากนั้นคำนวณหาค่ากำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งทางด้านโหลด (p_L) และค่ากำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งทางด้านโหลด (q_L) จากสมการในบล็อกที่ 3 สำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบสามารถทำได้โดยการใช้วงจรกรองกำลังรีแอกทีฟ (Active Power Filter: APF) ที่อาศัยสัญญาณกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับระบบ โดยสัญญาณกระแสอ้างอิงดังกล่าวบนแกน $\alpha\beta$ คำนวณได้จากสมการในบล็อกที่ 4 (\bar{p}_L คือปริมาณทางกระแสไฟฟ้ากระแสสลับของ p_L ซึ่งใช้วงจรกรองผ่านสูง (High Pass Filter: HPF) กรองสัญญาณเพื่อให้ได้ส่วนที่เป็นกระแสสลับผ่านเท่านั้น) และขั้นตอนสุดท้ายทำการแปลงสัญญาณกระแสอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ กลับไปเป็นกระแสอ้างอิงสามเฟส ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) ดังบล็อกที่ 5

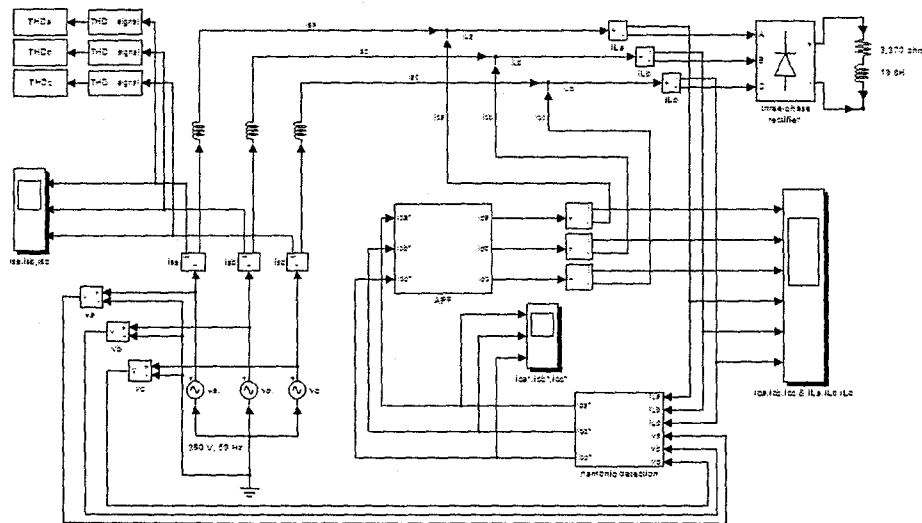


การจำลองสถานการณ์กรณีแบบจำลองของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ

การจำลองสถานการณ์กรณีแบบจำลองของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ใช้สำหรับการทดสอบวงจรรอกผ่านสูงชนิดต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของการระบอบเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ซึ่งระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์ และแผนภาพการจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นจาก ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังแสดงได้ดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ



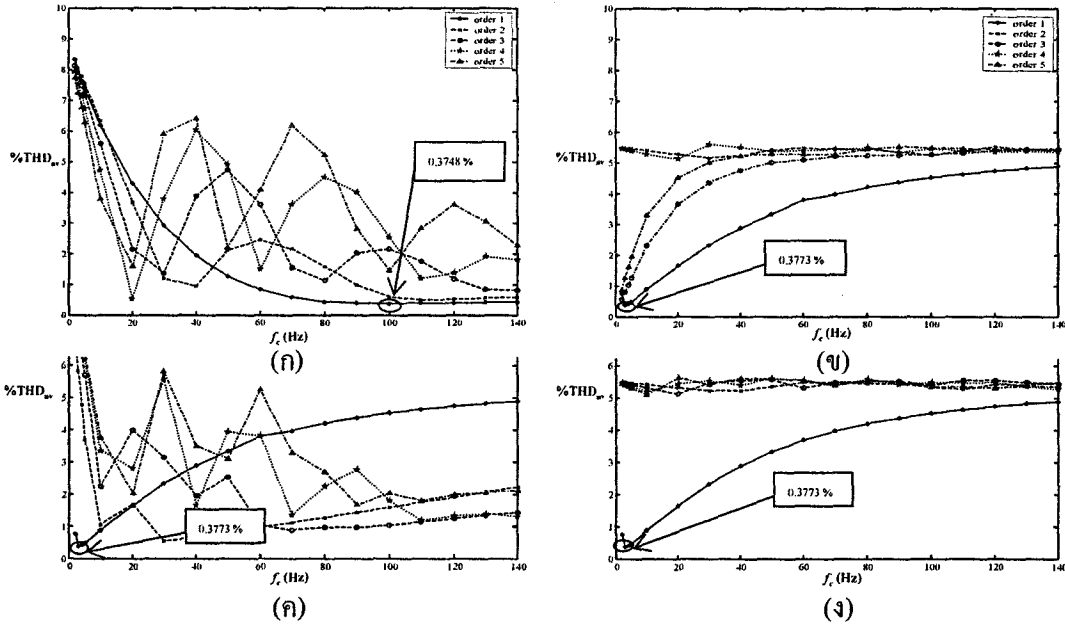
รูปที่ 2 ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์



รูปที่ 3 แผนภาพการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง

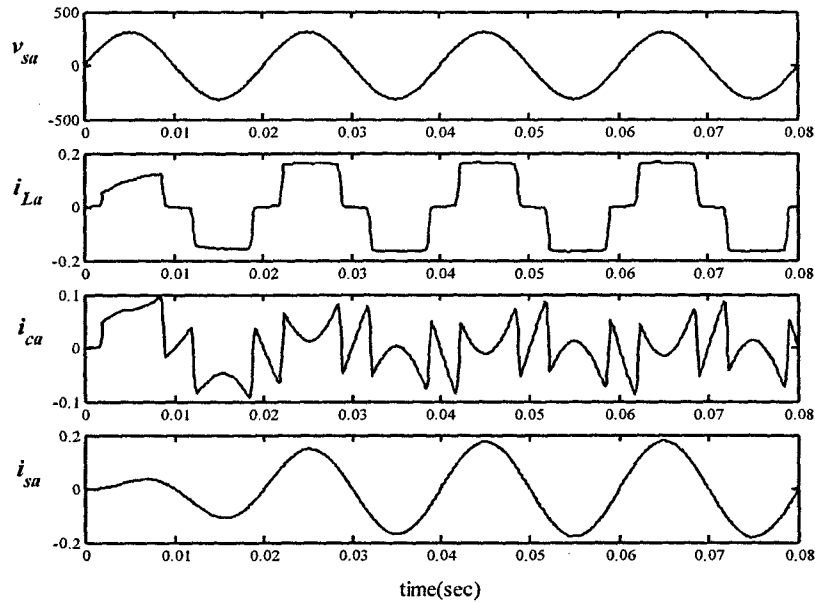
การทดสอบวงจรรอกผ่านสูงในส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ทำการทดสอบทั้งหมด 4 ชนิด คือ ชนิด Butterworth ชนิด Chebyshev I ชนิด Chebyshev II และชนิด Elliptic การทดสอบดังกล่าวจะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเฉลี่ยทั้งสามเฟส (%THD_{av}) ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชย ซึ่งมีสูตรการการคำนวณเป็นไปตามสมการที่ (1) โดยผลการทดสอบวงจรรอกผ่านสูงชนิดต่าง ๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 4

$$\%THD_{av} = \sqrt{\frac{\sum_{k=a,b,c} \%THD_k^2}{3}} \quad (1)$$



รูปที่ 4 (ก) ผลการทดสอบ HPF ชนิด Butterworth (ข) ผลการทดสอบ HPF ชนิด Chebyshev I
 (ค) ผลการทดสอบ HPF ชนิด Chebyshev II (ง) ผลการทดสอบ HPF ชนิด Elliptic

จากรูปที่ 4 สังเกตได้ว่าค่า $\%THD_{av}$ หลังการชดเชยที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ที่ใช้วงจรกรองผ่านสูงชนิด Butterworth อันดับวงจรกรองที่ 1 ที่ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 100 Hz ในการตรวจจับฮาร์มอนิก ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักหลังการชดเชยมีค่า $\%THD_{av}$ น้อยที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 0.3748 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่าวงจรกรองผ่านสูงชนิดดังกล่าวให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวในกรณีเฟส α ดูได้จากรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส a

จากรูปที่ 5 สังเกตได้ว่ารูปสัญญาณกระแสทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (i_{sa}) จะเข้าสู่สภาวะคงตัวในช่วงเวลาประมาณ 0.05 วินาที ทั้งนี้เนื่องจากผลของวงจรกรองผ่านสูงที่ทำให้รูปสัญญาณกระแสดังกล่าวมีเวลาประวิงเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปหลัง 0.05 วินาที พบว่ารูปสัญญาณกระแสดังกล่าวเริ่มคงที่ที่ค่ากระแสสูงสุดประมาณ 0.18 แอมแปร์ ซึ่งค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักทั้งสามเฟสแสดงไว้ดังตารางที่ 1 ดังนี้

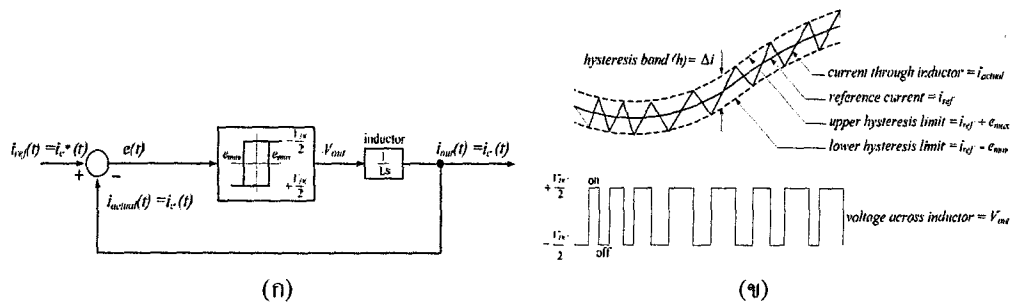
ตารางที่ 1 ค่า %THD ของการจำลองสถานการณ์กรณี APF เป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ

%THD ของกระแสไฟฟ้า	เฟส			%THD _{av}
	a	b	c	
%THD ก่อนการชดเชย	25.5063	25.4145	25.5798	25.5003
%THD หลังการชดเชย	0.3822	0.3806	0.3613	0.3748

การจำลองสถานการณ์กรณีแบบจำลองของวงจรกรองกำลังแยกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์

1 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีฮิสเตอร์ซิส

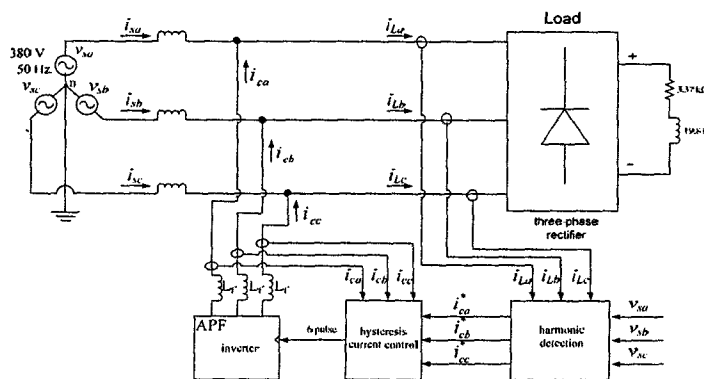
การควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีฮิสเตอร์ซิส มีโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการควบคุมรูปคลื่นสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 6 ดังนี้



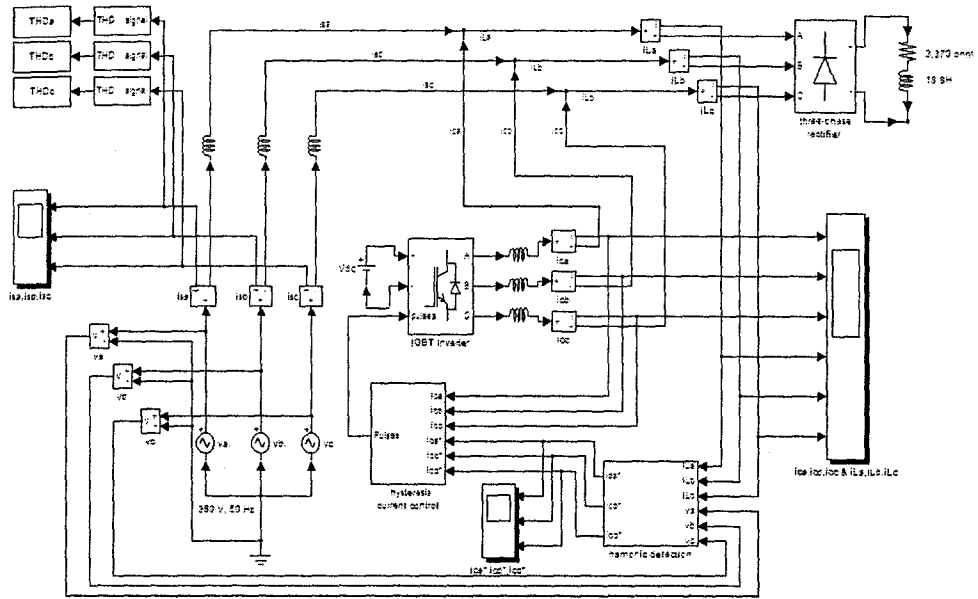
รูปที่ 6 (ก) โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีฮิสเทอรีซิส
(ข) ลักษณะการควบคุมรูปคลื่นสัญญาณด้วยวิธีฮิสเทอรีซิส

จากรูปที่ 6 (ก) ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณทางด้านอินพุต ($e(t)$) คือ ผลต่างระหว่างค่ากระแสอ้างอิง ($i_{ref}(t)$) กับค่ากระแสชดเชยจริง ($i_{actual}(t)$) ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะนำไปใช้สำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นำมาสร้างเป็นวงจรมอเตอร์ เพื่อฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบกำลังไฟฟ้า ค่าแถบฮิสเทอรีซิส (h) คือ ผลต่างระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นสัญญาณสูงสุด (e_{max}) กับค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นสัญญาณต่ำสุด (e_{min}) โดยหลักการทำงานของ การควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีฮิสเทอรีซิส คือ เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณมีค่าเท่ากับค่าขอบเขตบนของฮิสเทอรีซิส (upper hysteresis limit) สวิตช์จะหยุดนำกระแส (off) ทำให้ค่ากระแสชดเชยนั้นตกลง และเมื่อค่ากระแสชดเชยนั้นตกลงจนถึงค่าขอบเขตล่างของฮิสเทอรีซิส (lower hysteresis limit) สวิตช์ก็จะนำกระแส (on) ทำให้ค่ากระแสชดเชยเพิ่มขึ้นจนไปถึงค่าขอบเขตบนของฮิสเทอรีซิสอีกครั้งหนึ่ง โดยจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดการทำงานซึ่ง อธิบายได้ดังรูปที่ 6 (ข)

2 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

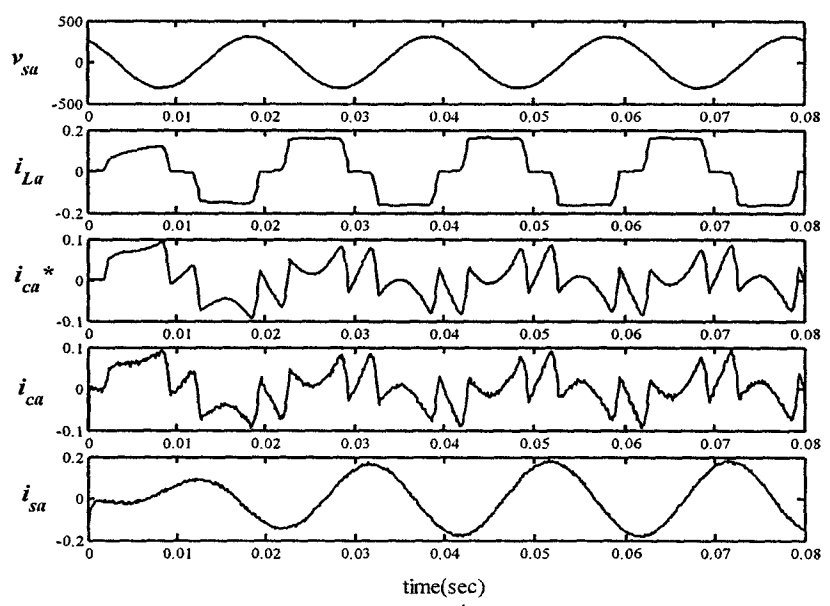


รูปที่ 7 ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์เมื่อ APF เป็นอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 8 แผนภาพการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังเมื่อ APF เป็นอินเวอร์เตอร์

ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์กรณีสวิตจกรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7 ใช้การควบคุมการทำงานของสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีฮิสเทรีซิส จากระบบดังกล่าวเมื่อนำมาสร้างโดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังจะแสดงได้ดังรูปที่ 8 โดยส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิกใช้วงจรกรองผ่านสูงชนิด Butterworth จากการทดสอบในหัวข้อที่ 3 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีเฟส α ดูได้จากรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส α เมื่อ APF เป็นอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 9 สังเกตได้ว่า ลักษณะรูปสัญญาณของกระแสชดเชยจริง (i_{ca}) ที่จ่ายโดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ เป็นไปตามลักษณะรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิง (i_{ca}^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ซึ่งส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไฟฟ้าหลัก (i_{sa}) เป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักทั้งสามเฟสแสดงไว้ดังตารางที่ 2 ซึ่งค่า %THD ภายหลังการชดเชยเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 2 ค่า %THD ของการจำลองสถานการณ์กรณิ APF เป็นอินเวอร์เตอร์

%THD ของกระแสไฟฟ้า	เฟส			%THD _{av}
	a	b	c	
%THD ก่อนการชดเชย	25.5063	25.4145	25.5798	25.5003
%THD หลังการชดเชย	2.5577	2.5558	2.5752	2.5629

สรุป

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งเป็นวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังกรณิแบบจำลองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ พบว่าวงจรกรองผ่านสูงชนิด Butterworth อันดับวงจรกรองที่ 1 ที่ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 100 Hz ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการตรวจจับฮาร์มอนิก และสำหรับการจำลองสถานการณ์กรณิแบบจำลองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ พบว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก จึงส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักเป็นรูปไซน์มากขึ้น ซึ่งทำให้ปริมาณของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังลดลงได้ตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Std 519-1992, *IEEE Recommended practices and requirement for harmonic control in electrical power system.*
- [2] Yousif, S.N.A.L., Wanik, M.Z.C. and Mohamed, A., "Implementation of different passive filter designs for harmonic mitigation", *Power and Energy Conference*, 2004, pp. 229-234.
- [3] Jung, G. H. and Cho, G. H., "New Active Power Filter with Simple Low Cost Structure without Tuned Filters", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1998, pp. 217-222.
- [4] Singh, B. N. , Singh, B. , Chandra, A. and Al-Haddad, K., "Digital implementation of a new type of hybrid filter with simplified control strategy", *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC '99)*, 1999, pp. 642 – 648.
- [5] Peng, F. Z. and Lai, J. S., "Generalized instantaneous reactive power theory for three phase power system", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.45, no.1, February 1996, pp. 293-297.
- [6] Dixon, J. W.,Tepper, S. and Moran, L., "Analysis and evaluation of different modulation techniques for active power filter", *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1994,pp.894-900.