

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนกระแสสลับด้วยวิธีไฮบริด

Harmonic Elimination for an AC Drive Via Hybrid Method

ศุภกร วิศวภัทรชนธร, สราวุฒิ สุจิตจร และ กองพล อารีรักษ์

Soupagorn Visawa phatra dhanadhorn, Sarawut Sujitjorn and Kongpol Areerak

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร. 044-224400 โทรสาร 044-224401

E-mail: soupagorn@gmail.com, sarawut@sut.ac.th, kongpol@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยวิธีไฮบริดที่ใช้การวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อนในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกให้กับวงจรกรองกำลังแยกที่แบบขนาน วงจรกรองกำลังพาสซีฟ LC ออกแบบด้วยวิธีแผนภาพคอนทัวร์ถูกนำมาใช้เพื่อลดทอนกระแสฮาร์มอนิกและลดพิคกิ้งกำลังของวงจรกรองกำลังแยกที่พาสซีฟจากผลการวิจัยพบว่าวงจรกรองกำลังไฮบริดสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกให้อยู่ในข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังต่ำ

ABSTRACT

This paper presents a hybrid method for current harmonic elimination for a single-phase induction motor drive. The approach employs the sliding window Fourier analysis method to identify harmonic contents for a parallel active power filter. An LC passive power filter designed by the contour map method is employed to compress some harmonics and decrease the power rating of the active power filter. It is found that the proposed hybrid power filter successfully eliminate the current harmonic to be complied with the IEEE Std 519-1992 for low rated power systems.

รายการสัญลักษณ์

$i_1(t)$	องค์ประกอบกระแสที่ความถี่มูลฐาน (A)
$i_1(k\tau)$	องค์ประกอบกระแสที่ความถี่มูลฐานในเวลา discrete (A)
$i_{C_1}(t)$	กระแสชดเชยฮาร์มอนิกจากวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (A)
$i_{C_2}(t)$	กระแสชดเชยฮาร์มอนิกจากวงจรกรองกำลังแยกที่พาสซีฟ (A)
$i_h(t)$	กระแสชดเชยฮาร์มอนิกอ้างอิง (A)
$i_h(k\tau)$	กระแสชดเชยฮาร์มอนิกอ้างอิงในเวลา discrete (A)
$i_l(t)$	กระแสโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (A)
$i_p(t)$	กระแสไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (A)
$i_p(k\tau)$	กระแสไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟในเวลา discrete (A)
$i_s(t)$	กระแสแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (A)
k, n	ดัชนีเวลา (time index)
A_1, B_1	สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ที่ความถี่มูลฐาน
A_1^{new}, B_1^{new}	สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ที่ความถี่มูลฐานค่าใหม่
A_1^{old}, B_1^{old}	สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ที่ความถี่มูลฐานค่าเก่า
N	จำนวนตัวอย่างข้อมูลกระแสไฟฟ้าต่อหนึ่งคาบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก
N_0	จุดเริ่มต้นซีกตัวอย่างข้อมูลกระแสไฟฟ้า

T	คาบเวลาของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (sec)
ω_1	ความถี่เชิงมุมมูลฐาน (rad/sec)
τ	คาบเวลาของการชักตัวอย่าง (sec)

1. บทนำ

ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่ใช้วงจรแปลงผันกำลัง(power converter) มักก่อให้เกิดฮาร์มอนิกในกระแสเป็นปริมาณมาก เมื่อใช้งานแบบปรับแปรความเร็วตลอดจนขับโหลดที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงไป จะประสบกับการมีค่าตัวประกอบกำลังที่อาจต่ำถึง 0.6 ในปัจจุบัน การคุมค่าฮาร์มอนิกมีความเข้มงวดมาก ผู้พัฒนาเทคโนโลยีระบบขับเคลื่อนอาจพิจารณาแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟ หรือ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ แต่เป็นที่ทราบกันอย่างกว้างขวางว่า วงจรกรองกำลังพาสซีฟไม่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างสมบูรณ์ และในการใช้งานต้องระมัดระวังสภาพเรโซแนนซ์ ตลอดจน แรงดันตกและกำลังสูญเสีย ในขณะที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีสมรรถนะสูง แต่ราคาแพงตามพิกัดกำลังที่ใช้ ทางเลือกหนึ่งเป็นการผสมผสานวงจรกรองทั้งสองชนิดให้ได้สมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีโดยไม่ต้องใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีพิกัดสูงมากนัก

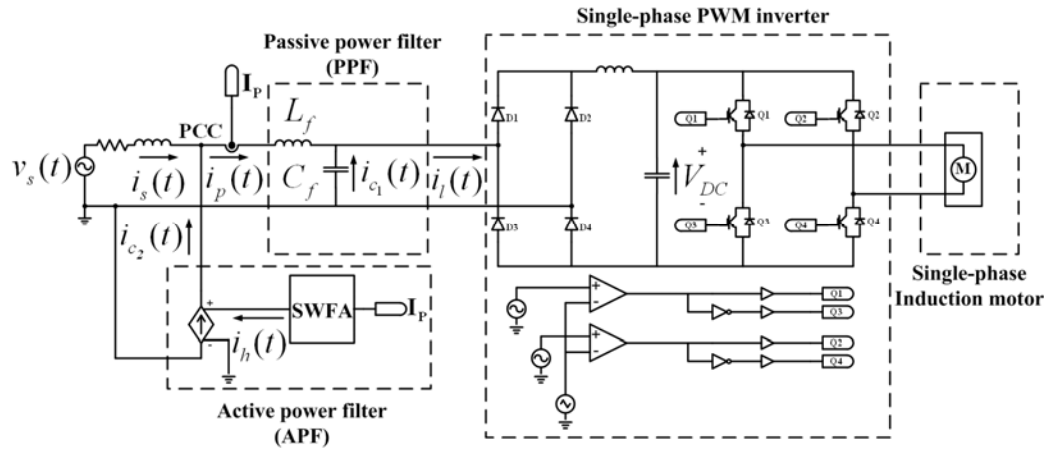
งานวิจัยนี้นำเสนอการลดทอนกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด (hybrid power filter, HPF) วงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นต้องมีกระบวนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก เพื่อทำการชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบได้อย่างถูกต้อง วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่นำมาใช้ในวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power method) [1] วิธีตรวจจับซิงโครนัส (synchronous detection method) [2] วิธีแปลงแกนดีคว (dq-frame method) [3] วิธีกรอบอ้างอิงเอบีซี (abc-reference-frame method) [4] และวิธีแปลงแกนดีควประกอบกับวิธีฟูรีเยร์ (dq-axis-with-Fourier

(DQF) method) [5] เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (sliding-window-Fourier-analysis (SWFA)) ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเพราะมีความรวดเร็วในการคำนวณในขณะที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำ [6] วงจรกรองกำลังพาสซีฟชนิด LC ถูกนำมาใช้เพื่อลดทอนกระแสฮาร์มอนิกและลดพิกัดกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การออกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟใช้วิธีสร้างแผนภาพคอนทัวร์ [7] โดยมีเป้าหมายในการลดทอนกระแสฮาร์มอนิก ณ พิกัดทำงานของระบบขับเคลื่อนดังกล่าวให้ เป็นไปตามข้อกำหนด IEEE Std 519-1992 [8]

บทความมีการแบ่งหัวข้อดังต่อไปนี้ หัวข้อที่ 2 กล่าวถึงหลักการและความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA หัวข้อที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาวงจรกรองกำลังไฮบริด หัวข้อที่ 4 กล่าวถึงวิธีการเลือกพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟจากแผนภาพคอนทัวร์ ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบการทำงานของวงจรกรองกำลัง และหัวข้อที่ 5 เป็นการสรุปผล

2. การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (SWFA)

เป็นที่ทราบกันอย่างดีแล้วว่าสัญญาณรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่เชิงมุมมูลฐานเท่ากับ ω_1 (เรเดียน/วินาที) และมีความคาบเท่ากับ T (วินาที) สามารถเขียนแทนด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ การคำนวณเชิงเลขอาจใช้อัลกอริทึม FFT แต่มีข้อเสียที่ใช้เวลาในการคำนวณนาน ปัจจุบันการคำนวณองค์ประกอบของอนุกรมฟูรีเยร์ สามารถทำได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำด้วยอัลกอริทึม SWFA เพื่อประยุกต์กับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก สามารถคำนวณเฉพาะองค์ประกอบกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่เชิงมุมมูลฐานและคำนวณกระแสฮาร์มอนิกรวมได้จากผลต่างระหว่างกระแสจริงที่ตรวจวัดได้กับกระแสมูลฐานนี้



รูปที่ 1 แผนภาพแทนระบบขับเคลื่อน

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_p(n\tau) \cos(n\omega_1\tau) \quad (1)$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_p(n\tau) \sin(n\omega_1\tau) \quad (2)$$

$$A_1^{(new)} = A_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{ i_p[(N_0+N)\tau] \cos[(N_0+N)\omega_1\tau] \dots - i_p[(N_0-1)\tau] \cos[(N_0-1)\omega_1\tau] \} \quad (3)$$

$$B_1^{(new)} = B_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{ i_p[(N_0+N)\tau] \sin[(N_0+N)\omega_1\tau] \dots - i_p[(N_0-1)\tau] \sin[(N_0-1)\omega_1\tau] \} \quad (4)$$

$$i_1(k\tau) = A_1 \cos(\omega_1 k\tau) + B_1 \sin(\omega_1 k\tau) \quad (5)$$

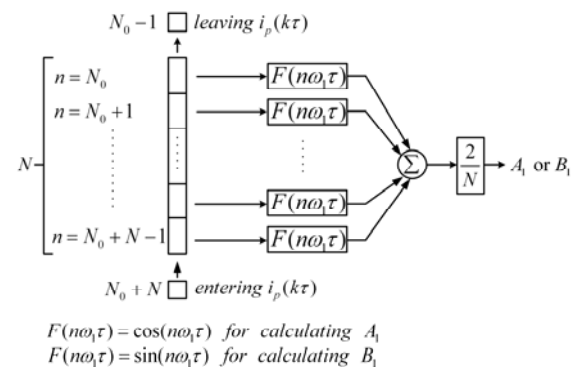
$$i_h(k\tau) = i_p(k\tau) - i_1(k\tau) \quad (6)$$

โดยที่ $k = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$ และ $\tau = \frac{T}{N}$

การดำเนินงานดังกล่าวในทางปฏิบัติอาศัย DSP และดำเนินการตามความสัมพันธ์ในเวลา discrete ดังที่แสดงด้วยสมการ (1)-(6)

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพแทนระบบขับเคลื่อนกระแสไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ ($i_p(t)$) ถูกนำมาคำนวณหาปริมาณฮาร์มอนิกที่เหลือจากการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟด้วยวิธี SWFA ในขั้นแรก DSP จะรับข้อมูลกระแส $i_p(t)$ จำนวนหนึ่งคาบเท่ากับ N ตัวอย่างข้อมูลเพื่อนำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 ตามความสัมพันธ์ที่

(1) และ (2) ตามลำดับ สัมประสิทธิ์ดังกล่าวถูกใช้เป็นตัวเริ่มต้น ($A_1^{(old)}, B_1^{(old)}$) ในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกหลังจากคาบแรกสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 ค่าใหม่ ($A_1^{(new)}, B_1^{(new)}$) ถูกคำนวณโดยรับตัวอย่างข้อมูล $i_p(t)$ ค่าใหม่มาหนึ่งตัวอย่างและลบข้อมูลตัวที่เก่าที่สุดออกไปหนึ่งตัวอย่างเพื่อทำการปรับปรุงข้อมูลตามความสัมพันธ์ (3) และ (4) ตามลำดับ แผนภาพอธิบายการคำนวณดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2 จากนั้นจึงคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ความถี่เชิงมุมมูลฐาน ณ เวลาปัจจุบัน ($i_1(k\tau)$) ดังสมการที่ (5) และกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ ณ เวลาปัจจุบัน ($i_h(k\tau)$) ดังสมการที่ (6) โดยช่วงเวลากลับรับข้อมูลในแต่ละรอบห่างกัน τ วินาที กระแสฮาร์มอนิก $i_h(k\tau)$ ที่คำนวณได้ถูกใช้เป็นตัวชดเชยเชิงอ้างอิงให้แก่วงจรกรองกำลังแอคทีฟ



รูปที่ 2 แผนภาพอธิบายการคำนวณสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูริเยร์ A_1 และ B_1

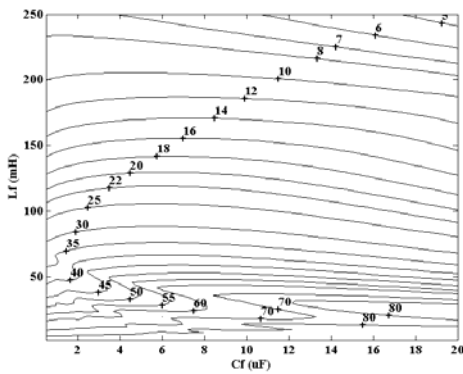
3. วงจรรอกกำลังไฮบริด

ในงานวิจัยนี้วงจรรอกกำลังพาสซีฟ ใช้เพื่อลดทอนกระแสฮาร์มอนิกและลดพิกัดกำลังของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ดังนั้นวงจรรอกกำลังพาสซีฟจึงถูกออกแบบก่อน ส่วนวงจรรอกกำลังแอกทีฟถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เหลือจากการชดเชยด้วยวงจรรอกกำลังพาสซีฟในภายหลัง แบบจำลองของระบบขับเคลื่อนสร้างเลียนแบบระบบจริงโดยโปรแกรม PSIM แสดงดังรูปที่ 1 แบบจำลองประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว วงจรรอกกำลังพาสซีฟและแอกทีฟ แบบจำลองและระบบจริงใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 4 โพล มีพิกัดทำงาน $220V_{rms}/5A_{rms}/1,425rpm$ ที่พิกัดโหลด 3 Nm อินเวอร์เตอร์ทำงานแบบพีดีบีบลิวเอ็ม และวงจรรอกกำลังแอกทีฟแทน

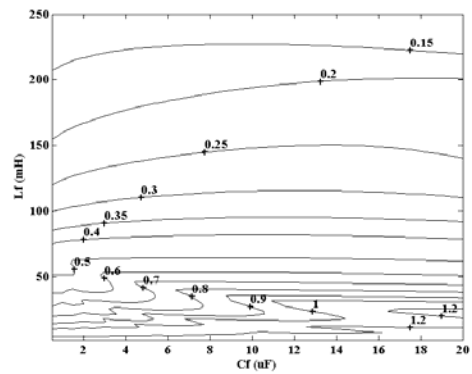
ด้วยแหล่งจ่ายกระแสสมบูรณ์ ซึ่งรายละเอียดของวงจรรอกกำลังทั้งสองมีดังต่อไปนี้

3.1 วงจรรอกกำลังพาสซีฟ

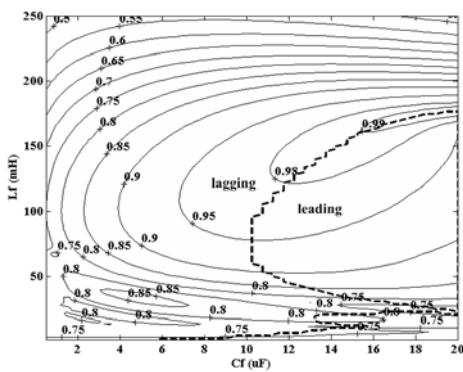
วงจรรอกกำลังพาสซีฟประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L_f และตัวเก็บประจุ C_f ดังรูปที่ 1 ขนาดของ L_f และ C_f ออกแบบโดยใช้โปรแกรม PSIM ร่วมกับ MATLAB จำลองสถานการณ์การทำงานของระบบขับเคลื่อนขณะติดตั้งวงจรรอกกำลังพาสซีฟเพียงอย่างเดียว เพื่อนำข้อมูลเชิงเลขที่ได้ไปสร้างแผนภาพคอนทัวร์ของค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกรวม ($\%THD_i$ และ $\%THD_v$) ตัวประกอบกำลัง (PF) และค่าแรงดันคิซีเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (V_{DC}) เมื่อมีการผันแปรค่าตัวเหนี่ยวนำ L_f และค่าตัวเก็บประจุ C_f



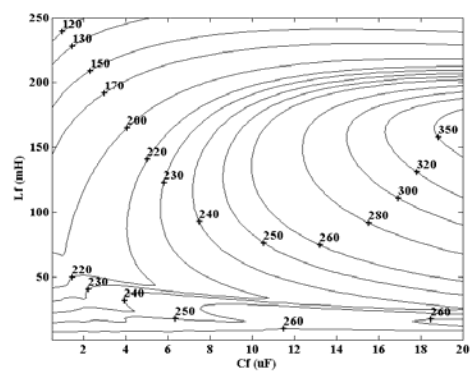
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

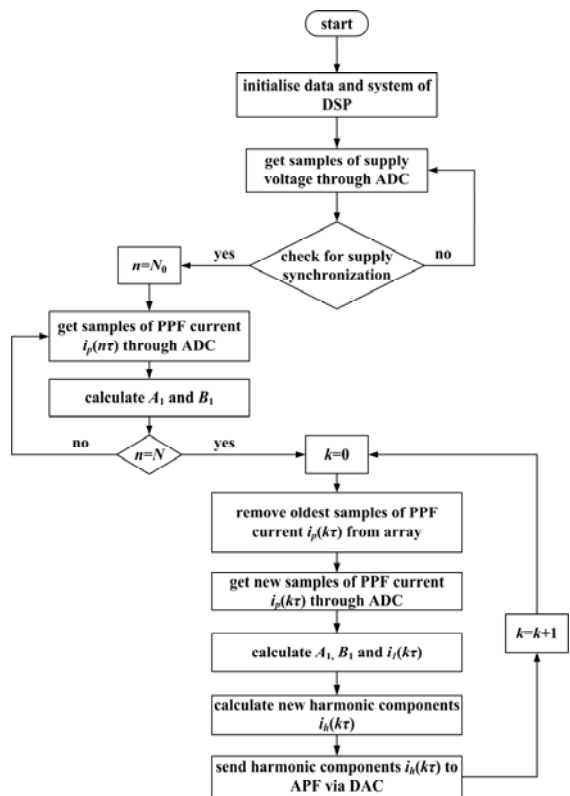
รูปที่ 3 แผนภาพคอนทัวร์สร้างจากข้อมูลเชิงเลขที่ได้จากการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบขับเคลื่อนที่จุดทำงาน (ก) ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม ($\%THD_i$) (ข) ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม ($\%THD_v$) (ค) ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) และ (ง) ค่าแรงดันคิซีเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (V_{DC})

โดยกำหนดจุดทำงานในการจำลองสถานการณ์ของมอเตอร์ไว้ที่ $(220V_{rms}/50Hz/5A_{rms})$ เนื่องจาก L_f ถูกต่ออนุกรมกับระบบจึงมีแรงดันจากแหล่งจ่ายส่วนหนึ่งตกคร่อม L_f ยิ่ง L_f มีขนาดใหญ่แรงดันที่ตกคร่อมก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันที่จ่ายให้แก่อินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงและอาจทำให้อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถจ่ายกระแสที่พิกัดทำงาน $5A_{rms}$ ให้แก่มอเตอร์ได้ ดังนั้นจึงต้องกำหนดขอบเขตของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ จากการจำลองสถานการณ์เบื้องต้นพบว่าค่าตัวเหนี่ยวนำ L_f สูงสุดที่ทำให้ระบบยังคงสามารถจำลองสถานการณ์ได้ที่พิกัดกระแสมอเตอร์ $5A_{rms}$ คือ $250mH$ ส่วนขอบเขตของตัวเก็บประจุ C_f สามารถกำหนดได้อย่างอิสระแต่ไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไป เนื่องจาก C_f ขนาดใหญ่อาจทำให้เกิดการคั้งกระแสจากแหล่งจ่ายมากขึ้นและทำให้ตัวประกอบกำลังเป็นแบบล้าหน้า ในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่ $20\mu F$ ในขอบเขตดังกล่าวไม่เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ของแหล่งจ่าย (50Hz) แผนภาพคอนทัวร์ของ $\%THD_I$, $\%THD_V$, PF และ V_{DC} ที่สร้างจากข้อมูลเชิงเลขแสดงดังรูปที่ 3(ก) ถึง 3(ง) ตามลำดับ

3.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ในงานวิจัยเป็นชนิดขนานมีโครงสร้างเป็นวงจรขยายกำลังมีพิกัด 750 วัตต์และมีอุปกรณ์ระบบเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกที่สร้างขึ้นโดยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) รุ่น eZdsp™ F2812 ความเร็วในการประมวลผล 150MHz อัลกอริทึมระบบเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วยวิธี SWFA ของ DSP เขียนด้วยภาษา C/C++ โดยการคำนวณได้ทำการซักรหัสตัวอย่างสัญญาณกระแส $i_p(t)$ ผ่านทางตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ขนาด 12 บิต กระแสฮาร์โมนิกที่คำนวณได้ถูกใช้เป็นกระแสชดเชยอ้างอิงให้แก่วงจรขยายกำลัง โดยถูกส่งผ่านทางตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกขนาด 16 บิต (DAC712) กระแสชดเชยดังกล่าวจะถูกขยายและฉีดเข้าสู่ระบบเพื่อชดเชยกระแสฮาร์โมนิกที่เหลือทั้งหมดของระบบ ณ จุดต่อร่วม โดยแผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมระบบเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วย

วิธี SWFA แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมระบบเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วยวิธีฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน

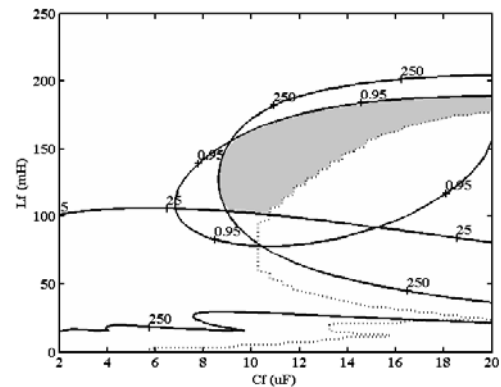
4. ผลการจำลองสถานการณ์และการทดสอบ

4.1 วงจรกรองกำลังพาสซีฟ

จากแผนภาพคอนทัวร์รูปที่ 3(ก) และ 3(ข) พบว่ายิ่ง L_f มีขนาดใหญ่ค่า $\%THD_I$ และ $\%THD_V$ จะมีค่าลดลง แต่ผลเสียประการหนึ่งของ L_f ขนาดใหญ่คือ ทำให้ V_{DC} มีค่าลดลงแสดงดังแผนภาพคอนทัวร์รูปที่ 3(ง) ส่วน C_f ที่ต่อขนานหน้าอินเวอร์เตอร์จะช่วยชดเชยกำลังรีแอกทีฟทำให้ตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าสูงขึ้น จากแผนภาพคอนทัวร์รูปที่ 3(ค) และ 3(ง) พบว่าแนวโน้มของค่า PF และ V_{DC} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ C_f มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่จะทำให้กระแสอาร์เอ็มเอสของระบบสูงขึ้นด้วยถือเป็นการสูญเสียในระบบและทำให้ตัวเหนี่ยวนำต้องรับภาระของกระแสอาร์เอ็มเอสที่สูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นควรเลือก L_f และ C_f ที่มีขนาดเหมาะสมกันและมีขนาดเล็ก ที่จะทำให้ได้คุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยรวมที่ดี

ไม่เกิดเรโซแนนซ์กับแหล่งจ่าย เกิดกำลังสูญเสียน้อยและราคาถูก การเลือกค่า L_f และ C_f อาจพิจารณาค่า V_{DC} และ PF เป็นหลักโดยพิจารณาค่า $\%THD_I$ และ $\%THD_V$ รองลงมา เนื่องจากค่า $\%THD_I$ และ $\%THD_V$ สามารถแก้ไขให้ดีขึ้นได้ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ แต่การทำงานของอินเวอร์เตอร์ต้องพึ่งพา V_{DC} ในระดับที่เหมาะสม จากผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์พบว่าค่า V_{DC} ณ จุดทำงานไม่ควรต่ำกว่า 250V ในขณะที่ค่าตัวประกอบกำลังไม่ควรเป็นแบบเฟสล้าหน้าเนื่องจากกำลังรีแอกทีฟส่วนเกินอาจไหลเข้าสู่ระบบข้างเคียงและก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าของระบบข้างเคียงได้

ข้อกำหนดสำหรับวงจรกรองกำลังพาสซีฟนั้นจะต้องสามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกให้เหลือ $\%THD_I$ ไม่มากกว่า 25% ค่า PF ต้องไม่ต่ำกว่า 0.95 (ล้าหลัง) ในขณะที่ค่า V_{DC} จะต้องไม่ต่ำกว่า 250V ณ จุดทำงาน เพื่อให้อินเวอร์เตอร์สามารถผลิตแรงดันเอาต์พุตได้ 220V_{rms} ตามเงื่อนไขดังกล่าวสามารถสร้างพื้นที่เพื่อเลือกพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟได้ดังส่วนที่แรงงาในภาพรูปที่ 5 ซึ่งได้เลือกพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการกรองทั้งหมด 13 กรณี แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีที่ 5, 6, 8, 9, 11 และ 12 ให้ประสิทธิภาพตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยกรณีที่ 12 ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีที่สุด ส่วนในกรณีที่ 5 พารามิเตอร์มีขนาดเล็กที่สุดพารามิเตอร์ทั้ง 6 กรณีสามารถเลือกใช้ได้ทุกกรณีแต่เมื่อพิจารณาทางด้านราคาที่สูงขึ้นของตัวเหนี่ยวนำที่ใหญ่ขึ้นในขณะที่ค่า $\%THD_I$ มีค่าลดลงเพียง 1 ถึง 3% เท่านั้นจึงควรเลือกใช้พารามิเตอร์ที่มีขนาดเล็กเพราะฮาร์มอนิกส่วนที่เหลือสามารถกำจัดให้อยู่ในข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 ได้ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ แม้ว่ากรณีที่ 5 ให้ประสิทธิภาพในการกรองตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดและมีขนาดเล็กที่สุด แต่ขนาดของ V_{DC}

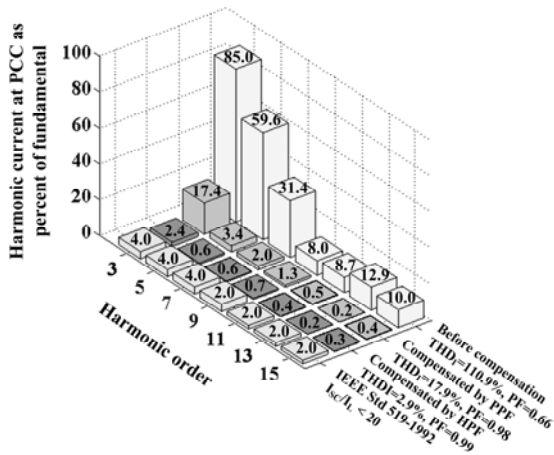


รูปที่ 5 แผนภาพคอนทัวร์แสดงพื้นที่ที่สามารถเลือกพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพผลของวงจรกรองกำลังพาสซีฟจากการจำลองสถานการณ์ในแต่ละกรณี

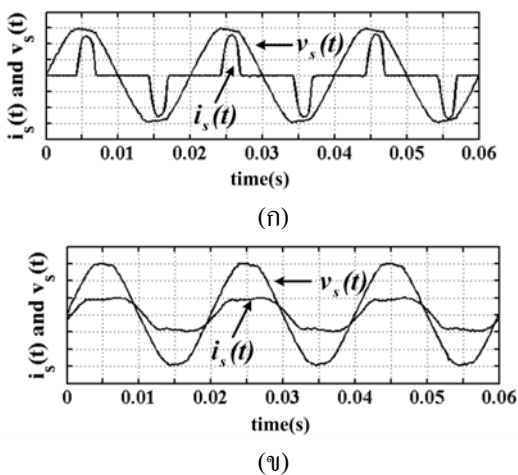
กรณีที่	L_f (mH)	C_f (μF)	THD_I (%)	PF	V_{DC} (V)
1	no PPF		122.3	0.610 (lag)	288.00
2	100	9	25.94	0.965 (lag)	249.38
3	100	10	25.62	0.968 (lag)	254.99
4	100	12	24.72	0.969 (lead)	265.89
5	105	9	24.66	0.966 (lag)	250.31
6	105	10	24.37	0.971 (lag)	256.22
7	105	12	24.72	0.969 (lead)	265.89
8	110	9	23.50	0.967 (lag)	251.12
9	110	10	23.23	0.965 (lag)	257.32
10	110	12	22.44	0.975 (lead)	269.39
11	120	9	21.46	0.968 (lag)	252.34
12	120	10	21.21	0.974 (lag)	259.04
13	120	12	21.54	0.979 (lead)	272.37

อยู่ชิดกับขอบเขตของเงื่อนไขคือ 250V มากเกินไป ผู้วิจัยจึงเลือกใช้พารามิเตอร์ในกรณีที่ 6 ($L_f = 105mH$ และ $C_f = 10\mu F$) ซึ่งให้ค่า PF และค่า V_{DC} ที่สูงกว่าและตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 6 กระแสฮาร์โมนิกก่อนและหลังใช้วงจรกรองกำลังแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับ IEEE Std 519-1992

ผลการทดสอบวงจรกรองกำลังพาสซีฟในรูปที่ 6 พบว่าหลังติดตั้งวงจรกำลังพาสซีฟ $%THD_I$ มีค่าลดลงเหลือ 17.9% จากเดิมอยู่ที่ 110.9% ค่า PF เพิ่มขึ้นเป็น 0.98 ล้าหลังจากเดิมอยู่ที่ 0.66 ล้าหลัง (วัดโดย FLUKE 434) ลักษณะสัญญาณกระแสแหล่งจ่าย $i_s(t)$ ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟแสดงดังรูปที่ 7 (ก) และ 7(ข) ตามลำดับ (วัดโดย Tektronix TDS420A)

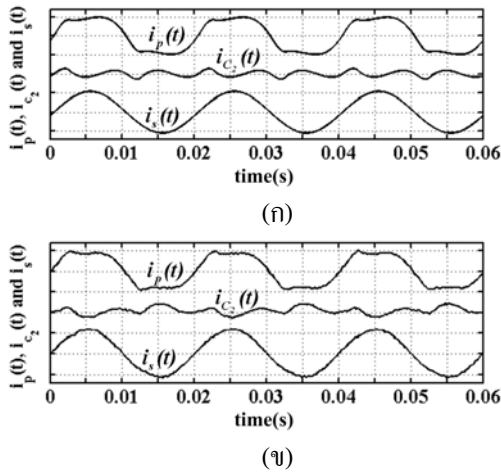


รูปที่ 7 สัญญาณกระแสและแรงดัน (ก) ก่อนการชดเชย (ข) หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (มาตราส่วน 5A/DIV และ 100V/DIV)

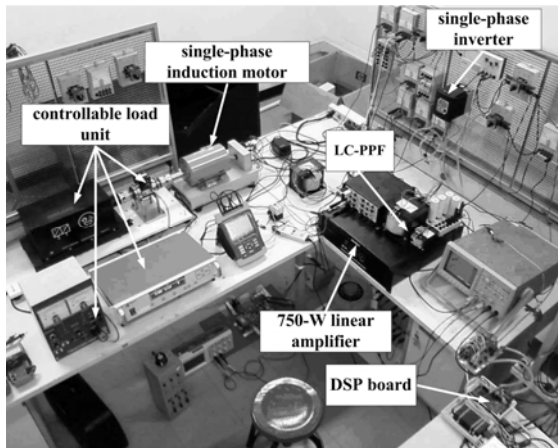
เมื่อพิจารณาค่า $%THD_I$ ก่อนและหลังติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟ จากการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับ การทดสอบจริงพบว่าให้ค่าที่แตกต่างกันทั้งนี้อาจเกิดจากแบบจำลองของระบบขับเคลื่อนไม่สามารถนำพารามิเตอร์ เช่น ค่าความต้านทานแฝงในแกนเหล็กและขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุ ตลอดจนค่าพารามิเตอร์แฝงที่อยู่ในสายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบจริง ซึ่งมีจำนวนมากมารวมในแบบจำลองได้ครบถ้วน แต่อย่างไรก็ตามการลดลงของ $%THD_I$ ก็มีค่าใกล้เคียงกัน ในการจำลองสถานการณ์ $%THD_I$ ลดลงเหลือ 24.37% และผลการทดสอบจริงลดลงเหลือ 17.9% เมื่อพิจารณากระแสฮาร์โมนิกแต่ละอันดับดังรูปที่ 6 พบว่ามีเพียงอันดับสามเท่านั้นที่ยังคงเกินข้อกำหนด IEE Std 519-1992 สำหรับระบบแรงดันต่ำ ซึ่งจะทำให้การชดเชยกระแสฮาร์โมนิก ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟต่อไป

4.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ก่อนการสร้างวงจรถองกำลังแอกทีฟได้จำลองการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธีคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกทั้งหมดที่เหลือจากการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟตามอัลกอริทึม SWFA ซึ่งเขียนขึ้นโดยภาษา C โดยสร้างเป็น .dll ไฟล์เพื่อใช้ร่วมกับฟังก์ชัน DLL block ของ PSIM จากแบบจำลองรูปที่ 1 กระแส $i_p(t)$ ถูกส่งผ่านไปยัง DLL block หนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตชื่อ SWFA ซึ่งภายในฟังก์ชันดังกล่าว $i_p(t)$ ถูกแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิกทั้งหมดออกมาเป็นกระแสอ้างอิง $i_h(t)$ และส่งต่อไปยังแหล่งจ่ายกระแสสมบูรณ์เพื่อสร้างกระแสชดเชยฮาร์โมนิก $i_{c_2}(t)$ และฉีดกระแสดังกล่าวเข้าสู่ระบบ ณ จุดต่อร่วม ผลของ PSIM แสดงดังรูปที่ 8(ก) และผลการทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 8(ข) (วัดโดย Tektronix TDS420A) ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 (ก) ผลจากการจำลองสถานการณ์ด้วย PSIM
(ข) ผลจากการทดสอบจริง (มาตราส่วน 5A/DIV)



รูปที่ 9 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบจริง

ผลการทดสอบวงจรรองกำลังไฮบริดในรูปที่ 6 พบว่าหลังการชดเชยด้วยวงจรรองกำลังไฮบริดค่า THD_i ลดลงเหลือเพียง 2.9% ในขณะที่ PF เพิ่มขึ้นเป็น 0.99 ล้าหลังเมื่อพิจารณากระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับพบว่ากระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับอยู่ภายในข้อกำหนด IEEE Std 519-1992 ทุกอันดับ เมื่อนำกระแสแหล่งจ่าย $i_s(t)$ ก่อนการชดเชยด้วยวงจรรองกำลังใด ๆ ในสภาวะอยู่ตัวดังรูปที่ 7(ก) จำนวนหนึ่งคาบไปคำนวณหาค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดด้วยวิธี SWFA พบว่าหากใช้วงจรรองกำลังแอกทีฟเพียงอย่างเดียววงจรรองกำลังแอกทีฟจะต้องฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิกเท่ากับ $3.49 A_{rms}$ เมื่อทำการติดตั้งวงจรรอง

กำลังพาสซีฟสามารถลดพิกัดกระแสของวงจรรองกำลังแอกทีฟได้ถึง 77% โดยหลังการติดตั้งวงจรรองกำลังพาสซีฟ วงจรรองกำลังแอกทีฟต้องฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิกเพียง $0.8 A_{rms}$ เท่านั้น ซึ่งคิดเป็น 22.92% ของ $3.49 A_{rms}$ ในขณะที่ค่าตัวประกอบกำลังของระบบก็มีค่าที่ดีขึ้นเช่นกัน โดยสามารถวัดได้เท่ากับ 0.99 ล้าหลัง ที่พิกัดการทำงานของมอเตอร์

นอกจากการทดสอบที่พิกัดทำงานของระบบขับเคลื่อน ผู้วิจัยยังทำการทดสอบวงจรรองกำลังไฮบริดที่ 110% 100% 80% และ 50% ของพิกัดโหลด 3Nm โดยปรับความเร็วมอเตอร์ไว้ที่ 100% 90% และ 80% ของความเร็วพิกัด 1,425 rpm จากการทดสอบพบว่าวงจรรองกำลังไฮบริดยังให้ประสิทธิภาพในการชดเชยที่ดีที่จุดทำงานต่ำกว่าพิกัดอีกด้วย โดยผลการทดสอบดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 2 (วัดโดย FLUKE 434)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบที่ค่าโหลดและความเร็วรอบต่าง ๆ

แรงบิดที่เพลา (Nm)	ความเร็วรอบ (rpm)	THD_i (%)	THD_v (%)	PF
3.3 (110%)	1,425	2.9	1.6	0.99
	1,282	2.9	1.9	0.99
	1,140	2.9	1.9	0.99
3.0 (100%)	1,425	2.9	2.0	0.99
	1,282	3.2	2.1	0.99
	1,140	3.3	2.1	0.99
2.4 (80%)	1,425	3.7	2.0	0.98
	1,282	3.8	2.1	0.97
	1,140	3.9	2.1	0.96
1.5 (50%)	1,425	4.5	2.0	0.91
	1,282	4.7	2.1	0.90
	1,140	4.8	2.1	0.88

5. สรุป

จากผลการวิจัยพบว่า การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนกระแสสลับเฟสเดียวด้วยวิธีไฮบริด ให้ผลเป็นอย่างดี โดยที่วงจรรองกำลังแอกทีฟมีพิกัดกำลังไม่สูง

ค่า% THD_r หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังโอบริดเหลือเพียง 2.9% ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายของงานวิจัย คือ อยู่ในข้อกำหนด IEEE Std 519-1992 นอกจากนี้วงจรกรองกำลังโอบริดยังให้ประสิทธิภาพที่ดีเมื่อนำไปใช้กับโหลดและความเร็วรอบมอเตอร์ในย่านต่ำกว่าพิกัด ในขณะที่วงจรกรองกำลังพาสซีฟก็สามารถลดพิกัดกระแสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้ดีเช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่เอื้อเฟื้อซอฟต์แวร์ PSIM ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและจำลองผลต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] 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. Proceedings of the 1992 International Conference on Power Electronics and Motion Control; Nov 9-13, 1992; San Diego, CA, USA, p. 374-380 (vol.1).
- [3] Takeda, M., Ikeda, K., Teramoto, A., and Aritsuka, T. (1988). Harmonic current and reactive power compensation with and active filter. IEEE 19th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC 1988); April 11-14, 1988; Kyoto, Japan, p. 1174-1179 (vol.2).
- [4] 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.
- [5] Sujitjorn, S., Areerak, K.-L., and Kulworawanichpong, T. (2007). The DQ axis with Fourier (DQF) method for

harmonic identification. IEEE Transactions on Power Delivery., 22(1):737-739.

- [6] 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.
- [7] Moo, C.S., Cheng, H.L., and Guo, S.J. (1997). Designing passive LC filters with contour maps [for diode bridge rectifiers]. Proceedings of the 1997 International Conference on Power Electronics and Drive System; May 26-29, 1997, p. 834-838 (vol.2).
- [8] IEEE Std. 519-1992. (1993). IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electrical power system.