

การออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยการประยุกต์ใช้การค้นหาค้นหาแบบตาบู่

๒๕๕๓

ชวาทิ วุฒินทรเนตริกร¹ และ อนันท์ อุ่นศิริวิไล^{2*}

Wuttinatenatrak, C.¹ and Oonsivilai, A.^{2*} (2003). Harmonic Filter Design via Tabu Search Application. Suranaree J. Sci. Technol. 10:286-299.

Abstract

This article presents mathematical modelling and distortion analysis of harmonic current measurement based on exponential complex Fourier series. The corresponding Fourier coefficients obtained in this research were characterised by applying an intelligent optimisation method. A switched capacitor type online harmonic-filter, was designed by selecting appropriate switching pattern of the filter bank that well eliminated harmonic components of the current in a certain period of time. In this paper, Tabu Search (TS) method was used as a main optimisation sub-routine in both harmonic signal modelling and switching pattern design. The proposed method was tested with practical harmonic signals measured from an academic building category. From the satisfactory results, it revealed that the harmonic current was remarkably eliminated.

Keywords: A.I., Tabu Search, switched capacitor filter, harmonic

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของการวัดกระแสฮาร์มอนิกที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series) ซึ่งซ่อนแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดอย่างชาญฉลาดในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ พร้อมทั้งเสนอวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ (Switched Capacitor Filter: SCF) ซึ่งออกแบบได้จากการเลือกแบบรูปการสวิตซ์ชุดวงจรกรองให้เหมาะสมเพื่อกำจัดองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกในช่วงเวลาหนึ่ง บทความนี้ใช้วิธีการค้นหาค้นหาแบบตาบู่ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแบบจำลองสัญญาณกระแสฮาร์มอนิก และการออกแบบแบบรูปการสวิตซ์ บทความนี้ได้้นำวิธีการที่เสนอไปทดสอบกับสัญญาณฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้จริง จากผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ โดยสามารถตรวจวัดและกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจพบได้อย่างชัดเจน

¹ นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

² Ph.D., อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง, จ. นครราชสีมา 30000

* ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ

บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาใช้งานมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า ตัวเรียงกระแส และชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการผลิต ให้มีคุณภาพและได้ปริมาณตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ การใช้อุปกรณ์ดังกล่าวนี้เป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมให้เจริญก้าวหน้าขึ้นมากในระดับหนึ่ง แต่เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้มีคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากปกติ กล่าวคือ มีความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่มูลฐานรวมอยู่ในรูปคลื่นปกตินี้ด้วย เรียกคุณลักษณะนี้ว่าเกิดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก (Harmonic distortion) ดังนั้นหากมีอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังมาก จะทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power quality) ลดต่ำลง หรือการจ่ายไฟฟ้ามีมลภาวะมากขึ้นนั่นเอง อุปกรณ์ที่มีความไวต่อสิ่งรบกวนนี้อาจทำงานผิดพลาดได้ นอกจากนี้ กระแสฮาร์มอนิก

บางส่วนจะไหลกลับเข้าไปในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมอื่นที่อยู่ข้างเคียง [1]

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งมีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยทฤษฎีฟูรีเยร์วิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาแบบตาบ และวิธีการออกแบบแบบรูปการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ พร้อมทั้งเฝ้าตรวจสอบสถานะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณฮาร์มอนิกเพื่อปรับแบบรูปการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุให้เหมาะสม ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพการทำงานชุดวงจรกรองฮาร์มอนิกได้ดังรูปที่ 1 ผลการทดสอบในการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกที่ทำการตรวจวัดได้มีความถูกต้องสูง การปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกทำให้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณไฟฟ้าลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ยังสามารถลดเซชกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในวงจรเดียวกันและทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณภาพสูงขึ้นอีกด้วย

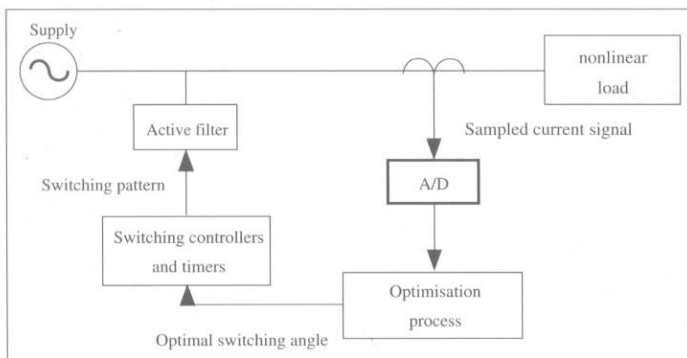


Figure 1. Block diagram of experimental setup.

อุปกรณ์และวิธีการ

การหาสัมประสิทธิ์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธีการแปลงฟูรีเยร์

การแปลงฟูรีเยร์และอนุกรมฟูรีเยร์เป็นคณิตศาสตร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ เนื่องจากการแปลงฟูรีเยร์และอนุกรมฟูรีเยร์จะมีสัญญาณไซน์และโคไซน์เป็นองค์ประกอบซึ่งสัญญาณทั้งสองนี้เป็นสัญญาณพื้นฐานสำหรับใช้วิเคราะห์สัญญาณใด ๆ ดังนั้นจึงนิยมนำการแปลงฟูรีเยร์มาใช้ในการประมวลผลสัญญาณ

การแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วยหรือการแปลงฟูรีเยร์ดิสครีต (Discrete Fourier Transform: DFT) สามารถแปลงสัญญาณซึ่งอยู่ในโดเมนเวลาไปเป็นสัญญาณที่อยู่ในโดเมนความถี่ การแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วยนี้มีวิธีการในการคำนวณที่ซับซ้อนมีจำนวนครั้งในการคำนวณมากและใช้เวลานานในการคำนวณมาก เพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาวิธีการแปลงให้เร็วขึ้น ซึ่งเรียกว่า การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ซึ่งทำให้การคำนวณ DFT ใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียง $N \log_2 N$ ครั้งเท่านั้น ($N =$ จำนวนข้อมูล) หรือทำให้จำนวนครั้งในการคูณตัวเลขลดลงไปถึง $N/(\log_2 N)$ เท่า [2] การแปลงฟูรีเยร์อย่างเร็วนี้มีการคำนวณคล้ายกับการแปลงฟูรีเยร์แบบเต็มหน่วยแต่การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วจะมีวิธีการจัดแบ่งข้อมูลแล้วทำการคำนวณซึ่งจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจะต้องเป็นค่า 2^n โดยที่ n เป็นจำนวนเต็มบวก ซึ่งทำให้การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วลดเวลาในการคำนวณลงซึ่งมีกระบวนการในการคำนวณเป็นดังนี้

$$f(m) \xrightarrow{\text{transform}} F(k)$$

$$F(k) = \sum_{m=0}^{N-1} f(m)e^{-\frac{j2\pi mk}{N}} \quad (1)$$

โดยที่ $k = 0, 1, \dots, N-1$

$f(m)$ คือ ฟังก์ชันของเวลา

$F(k)$ คือ ฟังก์ชันของความถี่

m, k คือ เลขจำนวนเต็มบวก

N คือ จำนวนข้อมูล

เมื่อทำการแปลงกลับ

$$f(m) \xleftarrow{\text{transform}} F(k)$$

$$f(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k)e^{\frac{j2\pi mk}{N}} \quad (2)$$

โดยที่ $m = 0, 1, \dots, N-1$

จากอนุกรมฟูรีเยร์แบบตรีโกณมิติ

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\Omega t) + B_n \sin(n\Omega t)] \quad (3)$$

โดยที่

A_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของฟังก์ชันคาบ $f(t)$ ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 0

A_n, B_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของฟังก์ชันคาบ $f(t)$ ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ n

n คือ ค่าลำดับของฮาร์มอนิก โดยลำดับของฮาร์มอนิกมีค่าตั้งแต่ $n = 0$ ถึง $n =$

Ω คือ ความถี่เชิงมุม

t คือ เวลา

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ของอนุกรมฟูรีเยร์แล้วสามารถหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน (complex fourier series) ได้ดังสมการที่ (4)

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\Omega t} \quad (4)$$

โดยที่

$$F_0 = \frac{A_0}{2}$$

$$F_n = F_{-n} = \frac{1}{2} (A_n - jB_n)$$

$$A_n = 2\text{Re}\{F_n\}$$

$$B_n = -2\text{Im}\{F_n\}$$

F_0	คือ สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนของไฟฟ้ากระแสตรง (ฮาร์โมนิกอันดับ 0)	S_0	คือ ค่าเริ่มต้นในการค้นหาแต่ละครั้ง
F_n	คือ สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนของฮาร์โมนิกอันดับที่ n	$S_{neighborhood}$	คือ ค่าใกล้เคียง S_0 ที่ได้จากการเคลื่อนย้ายไปเท่ากับ $step_size$ (search space)
$Re\{F_n\}$	คือ ส่วนจริงของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน	S_{best}	คือ ค่าใกล้เคียงที่เป็นค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น
$Im\{F_n\}$	คือ ส่วนจินตภาพของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน	S_{ans}	คือ ค่าใกล้เคียงที่เป็นค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดในวงกว้าง (global optimal)

หลักการการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบ

การค้นหาแบบตาบ (TS) เป็นวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยสามารถแก้ปัญหาการถูกบล็อกด้วยคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น (local optimum) ได้ ทำให้มั่นใจได้ว่าคำตอบที่ได้ใกล้เคียงคำตอบที่เหมาะสมที่สุด [3] องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตาบที่แตกต่างจากวิธีการค้นหาแบบอื่น ๆ คือ มีเกณฑ์ความเป็นตาบ (tabu list criteria) และมีเกณฑ์ความปรารถนา (aspiration criteria) ซึ่ง

- เกณฑ์ความเป็นตาบ เป็นส่วนที่เก็บข้อมูลของคำตอบในอดีตกระบวนการค้นหานั้น ๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดการค้นหาค่าตอบว่าจะมีทิศทางไปทางใด หลักการออกแบบเกณฑ์ความเป็นตาบจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัญหาแต่ละชนิด
- เกณฑ์ความปรารถนา เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในบางครั้งที่จำเป็นต้องเลือกคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ความเป็นตาบงานบางชนิดที่ปัญหาไม่ซับซ้อนไม่จำเป็นต้องมีส่วนนี้ก็ได้ เกณฑ์ความเป็นตาบอย่างเดียวกันก็เพียงพอที่จะค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดได้

n	คือ จำนวนรอบในการค้นหาค่าตอบ
cost	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริงกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งได้มาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)
step_size	คือ ขอบเขตของการทำงานแต่ละรอบ
value_move	คือ ขอบเขตการสุ่มของ $step_size$ ในการทำงานแต่ละรอบ

ขั้นตอนการค้นหาด้วยวิธี TS

ขั้นตอนที่ 1: รับข้อมูลกระแสไฟฟ้าจากชุดตรวจวัดกระแส

ขั้นตอนที่ 2: กำหนดค่า S_0 ซึ่งเป็นค่าตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ดังรูปที่ 2 และ 3 โดยหาค่าเริ่มต้น S_0 จากการสุ่มค่าตอบ จากนั้นเริ่มต้นจากค่าตอบที่มีอยู่โดยกำหนดให้ค่าตอบที่มีอยู่เป็นค่าตอบที่เหมาะสมที่สุด $S_{ans} = S_{best} = S_0$ และค่า cost ของ S_{best} ให้เป็น $best_error$ ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากฟังก์ชันตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การค้นหาค่าตอบจะทำได้เรื่อย ๆ จนได้ค่า cost น้อยที่สุดตามที่ได้กำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า

ขั้นตอนที่ 3: จาก S_0 ดำเนินการเคลื่อนย้ายโดยมีขอบเขตของ search space ขึ้นอยู่กับ $step_size$ โดยค่าของ $step_size$ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า cost

ที่ได้ โดยค่าใกล้เคียงค่าของ S_0 นั่นคือ $S_{neighborhood}$ จากนั้นทำการคำนวณหาค่า cost ของสมาชิกแต่ละตัวของ $S_{neighborhood}$ เลือกสมาชิกที่ให้ค่า cost ที่ดีที่สุด เรียกว่า S_{best}

ขั้นตอนที่ 4: ถ้าค่า cost ของ S_{best} มีค่าน้อยกว่าค่า cost ของ S_{ans} กำหนดให้ $S_{ans} = S_{best}$ ถ้าไม่สามารถหาสมาชิกตัวใดของ $S_{neighborhood}$ ที่ให้ค่า cost ดีกว่าค่า cost ของ S_0 ให้ไปทำขั้นตอนที่ 6 เพื่อหลีกเลี่ยงการลี้ภัยของค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น

ขั้นตอนที่ 5: กำหนดให้ $S_0 = S_{best}$

ขั้นตอนที่ 6: ถ้า S_{best} ไม่อยู่ใน tabu list ให้เก็บค่า S_{best} ไว้ใน tabu list

ขั้นตอนที่ 7: ตรวจสอบเงื่อนไขการยุติการค้นหาลงไปตามเงื่อนไขให้หยุดการค้นหาและคำตอบของการค้นหาค่าเหมาะที่สุดถือว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในวงกว้าง แต่เมื่อตรวจสอบแล้วไม่ปฏิบัติตามเงื่อนไข ให้ไปเริ่มทำในขั้นตอนที่ 2 ใหม่ การหาสัมประสิทธิ์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธีตาม

จากรูปที่ 1 รับข้อมูลกระแสไฟฟ้าของระบบจากตัวแปลงกระแสผ่านตัวแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อนำไปประมวลผลข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์จากคอมพิวเตอร์ ในการ

พิจารณาเวลาในการแปลงสัญญาณนั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถของไอซี (IC: Integrated Circuit) ในงานวิจัยนี้พิจารณาเวลาในการเก็บข้อมูล 128 จุดต่อ 20 ms (1 cycle ของ 50 Hz) โดยผลของฮาร์มอนิกทำให้รูปคลื่นสัญญาณภายในระบบไม่เป็นไซน์ซอซด์อย่างแท้จริงดังรูปที่ 4 สามารถวิเคราะห์ทางอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series) ได้ว่าสัญญาณรูปร่างในระบบที่เปลี่ยนไปสามารถแทนได้ด้วยผลรวมของสัญญาณไซน์ซอซด์ที่มีความถี่ต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน [4,5] ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$i(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)] \quad (5)$$

โดยที่

$i(t)$ คือ ค่าของฟังก์ชันของกระแสที่แปรตามเวลา

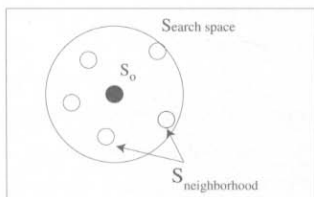


Figure 3. Search space.

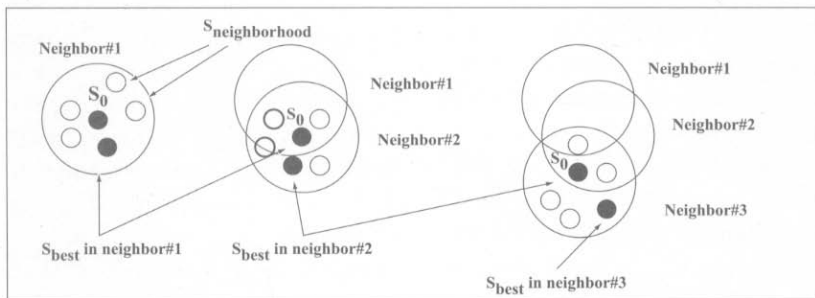


Figure 2. Searching procedures of the conventional TS method.

$\frac{A_n}{2}$ คือ ค่าของฟังก์ชันของไฟฟ้ากระแสตรง

A_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์หน้า $\cos(n\omega t)$ ของอนุกรมฟังก์ชัน $i(t)$ ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ n

B_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์หน้า $\sin(n\omega t)$ ของอนุกรมฟังก์ชัน $i(t)$ ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ n

n คือ ลำดับของฮาร์มอนิก โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ∞ ในงานวิจัยนี้พิจารณาค่า n ถึงลำดับที่ 19[6] โดย $n = 0$ แสดงถึงไฟฟ้ากระแสตรง

ในการนำอนุกรมฟูรีเยร์ไปใช้งานนั้นเพื่อความง่าย และสะดวกในการใช้งานและทำความเข้าใจ สามารถแทนสมการที่ (5) อยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$i(t) = c_n + \sum_{n=1} c_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (6)$$

โดยที่

$$c_0 = \frac{A_n}{2}$$

$$c_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left(\frac{A_n}{B_n} \right)$$

c_n คือ ค่าขนาดของ $i(t)$ ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ n (ขนาดของฮาร์มอนิกลำดับที่ n)

φ_n คือ เฟสของ $i(t)$ ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ n

สมการที่ (6) สามารถแสดงในรูปของเชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (7)

$$i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega t} \quad (7)$$

โดยที่

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \alpha$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i(t) e^{-jn\omega t} dt$$

T คือ คาบของฟังก์ชัน $i(t)$

ขั้นตอนการค้นหาพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธีตามนั้นเริ่มจากการสุ่มค่า $S_n = \{A_n, B_n, C_n\}$ ($n = 1, \dots, 19$) (ขอบเขตการสุ่ม A_n, B_n, C_n อยู่ในช่วง $[0, 300]$) โดย 300 คือขนาดของกระแสอาร์เอ็มเอสเฉลี่ยของระบบที่วัดได้ ส่วนค่าอื่น ๆ ได้จาก $A_n = \frac{A_1}{n}$, $B_n = \frac{B_1}{n}$) จากนั้นนำค่าที่ได้จากการสุ่มแทนลงในสมการที่ (5) เพื่อหากระแสที่ได้จากการจำลองแบบนำค่ากระแสที่ได้จากการจำลองแบบคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยเปรียบเทียบกระแสที่ตรวจวัดได้จริง (หาค่า cost: objective function) ดังสมการที่ (8)

$$\begin{aligned} \text{Cost} &= \text{error} \\ &= \sum_{m=1}^{128} [i_L \text{real}(m) - i_L \text{sim}(m)]^2 \quad (8) \end{aligned}$$

โดยที่

m คือ ค่าลำดับของจุดข้อมูลได้จาก A/D มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 128 โดย $m = 1$ คือ เวลา = 0.000156 วินาที, $m = 128$ คือ เวลา = 0.02 วินาที พิจารณาเพียง 1 ลูกคลื่นสัญญาณ

$i_L \text{real}(m)$ คือ ค่ากระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริงในข้อมูลลำดับที่ m

$i_L \text{sim}(m)$ คือ ค่ากระแสที่ได้จากการจำลองแบบในข้อมูลลำดับที่ m

ดำเนินการตามหลักการทำงานของการค้นหาแบบตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นโดยมีรูปแบบการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของ step_size โดย step_size จะเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับค่า cost ที่เกิดขึ้น เพื่อให้การเคลื่อนที่ของการค้นหาแบบตามมีความเร็วขึ้นและได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยในกรณีที่ cost มีค่ามาก การเคลื่อนที่จะกว้าง (step_size จะมีค่ามาก) เมื่อ cost น้อยลงการเคลื่อนที่ก็จะแคบลงดังรูปที่ 5 จากการค้นหาแบบตามจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ (A_n, B_n, C_n เมื่อ $n = 1, 2, \dots, 19$) เพื่อนำไปเป็นค่าอ้างอิงในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุต่อไป

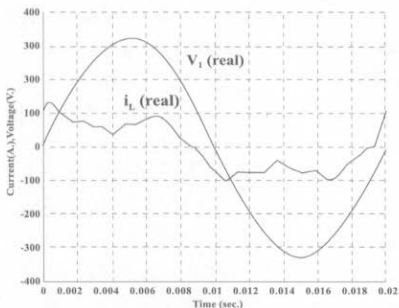


Figure 4. Current and Voltage waveform of system from an academic building category.

การออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยการหาแบบรูปการสวิตช์ตัวเก็บประจุด้วยการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตามู

ในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบคือ ขนาดของตัวเก็บประจุ, ขนาดของแรงดันที่จ่ายให้วงจรกรองฮาร์มอนิก, และรูปแบบการเปิดปิดสวิตช์ โดยตัวเก็บประจุ [7,8] ขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันนั้นจะบ่งบอกถึงขนาดของกระแสที่สามารถสร้างขึ้นมาจากฮาร์มอนิกคำสั่งสมการที่ (9) และ (10) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 3,000 ไมโครฟารัด (160 kVAR) ขนาดของแรงดันแหล่งจ่าย 230 V_{rms} ในส่วนของการเปิดปิดสวิตช์นั้นกำหนดให้มีการเปิดปิดสวิตช์ทั้งหมด 51 ครั้ง เนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้จากการทดสอบดังตารางที่ 2 โดยในการเปิดปิดแต่ละครั้งจะทำการเปิดปิดสวิตช์ Sw₁ และ Sw₂ สลับกันไปโดยทำมุม x₀, x₁, ..., x_{m+1} (m = 50, x₀ = 0, x_{m+1} = 2π) ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7

โดยที่

- i_s คือ กระแสจากระบบส่งจ่าย
- i_h คือ กระแสฮาร์มอนิก
- i_f คือ กระแสชดเชย
- Sw₁, Sw₂ คือ สวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการสร้างกระแสชดเชย
- V_i คือ แรงดันไฟฟ้าของระบบส่งจ่าย
- C คือ ตัวเก็บประจุในวงจรกรองฮาร์มอนิก
- L คือ ตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองฮาร์มอนิก

ในการหาค่าของ x₁, ..., x_m (m = 50) สามารถหาได้จากกรวิเคราะห์สมการอนุกรมฟูริเยร์ดังนี้

$$V(t) = V_{max} \sin(\omega t) \tag{9}$$

โดยที่

V_{max} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของรูปคลื่น (peak)

$$i_f(t) = C \frac{dv}{dt} \tag{10}$$

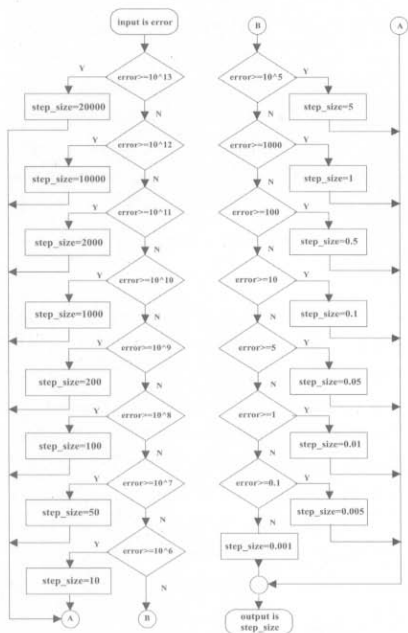


Figure 5. Subalgorithm for step size.

จากสมการที่ (9) และ (10) ได้คั้งสมการที่ (11)

$$i_f(t) = CV_{\max} \omega \cos(\omega t) \quad (11)$$

จากสมการที่ (5) นำมาเขียนใหม่โดยกำหนดค่าให้ $x = \omega t$ ได้คั้งสมการที่ (12)

$$i_f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1} [A_n \cos(nx) + B_n \sin(nx)] \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ได้คั้งสมการที่ (13)

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_f(x) dx \\ A_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_f(x) \cos(nx) dx \\ B_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_f(x) \sin(nx) dx \\ n &= 1, 2, \dots, 19 \end{aligned} \right\} (13)$$

แทนค่าสมการที่ (11) ลงในสมการที่ (13) โดยพิจารณาเฉพาะ $n \geq 2$ จะได้

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} CV_{\max} \omega \cos(x) \cos(nx) dx \\ A_0 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} CV_{\max} \omega \cos(x) \sin(nx) dx \end{aligned} \right\} (14)$$

เมื่อพิจารณาถึงแบบรูปการสวิตช์ สามารถเขียนสมการใหม่ได้คั้งสมการที่ (15) และ (16)

$$A_n = \frac{CV_{\max} \omega}{\pi} \left[\begin{aligned} &\int_0^{x_1} \cos(x) \cos(nx) dx \\ &+ \int_{x_2}^{x_3} \cos(x) \cos(nx) dx \\ &+ \dots \\ &+ \int_{x_m}^{x_{m+1}} \cos(x) \cos(nx) dx \end{aligned} \right] \quad (15)$$

$$B_n = \frac{CV_{\max} \omega}{\pi} \left[\begin{aligned} &\int_0^{x_1} \cos(x) \sin(nx) dx \\ &+ \int_{x_2}^{x_3} \cos(x) \sin(nx) dx \\ &+ \dots \\ &+ \int_{x_m}^{x_{m+1}} \cos(x) \sin(nx) dx \end{aligned} \right] \quad (16)$$

โดยที่ m เป็นเลขคู่, จากทฤษฎีตรีโกณมิติ

$$\left. \begin{aligned} \cos(x) \cos(nx) &= \frac{1}{2} [\cos(x+nx) + \cos(x-nx)] \\ \cos(x) \sin(nx) &= \frac{1}{2} [\sin(x+nx) - \sin(x-nx)] \end{aligned} \right\} (17)$$

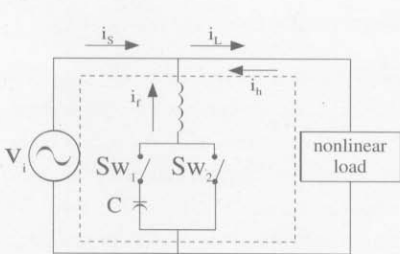


Figure 6. Switched-Capacitor Filter.

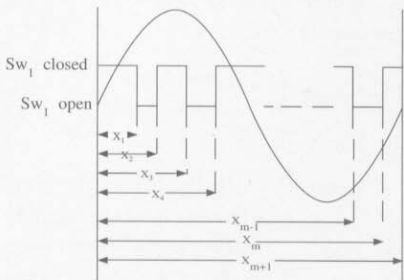


Figure 7. Switching pattern for S_{w1} .

แทนสมการที่ (17) ลงในสมการที่ (15) และ (16) ได้ดังสมการที่ (18)

$$A_n = \frac{CV_{max}\omega}{2\pi} \left[\begin{array}{l} \int_0^{x_1} (\cos(x+nx)+\cos(x-nx))dx \\ + \int_{x_2}^{x_3} (\cos(x+nx)+\cos(x-nx))dx \\ + \dots \\ + \int_{x_m}^{x_{m+1}} (\cos(x+nx)+\cos(x-nx))dx \end{array} \right] \quad (18)$$

$$B_n = \frac{CV_{max}\omega}{2\pi} \left[\begin{array}{l} \int_0^{x_1} (\sin(x+nx)-\sin(x-nx))dx \\ + \int_{x_2}^{x_3} (\sin(x+nx)-\sin(x-nx))dx \\ + \dots \\ + \int_{x_m}^{x_{m+1}} (\sin(x+nx)-\sin(x-nx))dx \end{array} \right]$$

จากการวิเคราะห์หาค่าของอนุกรมฟูรีเยร์ของแบบรูปการสับสวิตช์ x_1, \dots, x_m จะได้ค่า A_n, B_n ($n = 2, \dots, 19$) ดังนั้นในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุนั้นจะต้องหาค่า x_1, \dots, x_m ที่ให้ได้ค่า A_n, B_n ($n = 2, \dots, 19$) หักล้างกับ A_n, B_n ($n = 2, \dots, 19$) ของระบบดังสมการที่ (19) ในการหาค่า x_1, \dots, x_m นั้นหาได้จากการค้นหาแบบดาวยุ โดยการกำหนดค่าให้สุ่มค่าเริ่มต้น $S_0 = x_1, \dots, x_m$ จากนั้นนำค่าที่ได้จากการสุ่มแทนลงในสมการที่ (18) เพื่อหา A_n, B_n ของวงจรกรองฮาร์มอนิก นำค่า A_n, B_n ที่ได้จากการจำลองผลคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยเปรียบเทียบกับ A_n, B_n ที่ตรวจวัดได้จริง (หาค่า cost: objective function) ดังสมการที่ (19)

$$\text{Cost} = \text{Error} = \sum_{n=2}^{19} \left(\frac{(A_{n,real} - A_{n,sim})^2}{+ (B_{n,real} - B_{n,sim})^2} \right) \quad (19)$$

โดยที่

$A_{n,real}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์หน้า $\cos(n\omega t)$ ของอนุกรมฟังก์ชันกระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริง ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ n ฮาร์มอนิกอันดับ n

$B_{n,real}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์หน้า $\sin(n\omega t)$ ของอนุกรมฟังก์ชันกระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริง ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ n ฮาร์มอนิกอันดับ n

$A_{n,sim}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์หน้า $\cos(n\omega t)$ ของอนุกรมฟังก์ชันกระแสที่ได้จากการจำลองแบบ ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ n ฮาร์มอนิกอันดับ n

$B_{n,sim}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์หน้า $\sin(n\omega t)$ ของอนุกรมฟังก์ชันกระแสที่ได้จากการจำลองแบบ ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ n ฮาร์มอนิกอันดับ n

โดยมีรูปแบบการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของ step_size ซึ่งค่าของ step_size หาได้จากการสุ่มช่วง value_move ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากค่า error เพื่อให้การเคลื่อนที่ของการค้นหาแบบดาวยุมีความเร็วขึ้นและได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยในกรณีที่มี cost มีค่ามากการเคลื่อนที่ที่จะกว้าง (step_size มีค่ามาก) เมื่อ cost น้อยลงการเคลื่อนที่ก็จะแคบลงดังรูปที่ 8 ดำเนินการตามหลักการทำงานของการค้นหาแบบดาวยุที่ได้อกล่าวไว้ข้างต้นจะได้รูปแบบการสับสวิตช์ x_1, \dots, x_m ของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ

ผลการทดสอบและวิจารณ์

เมื่อทำการทดสอบตรวจวัดระบบที่มีฮาร์มอนิกในลำดับที่ 1 ถึง 19 โดยปราศจากสัญญาณรบกวน (white noise: Uniformly distributed random number [9,10]) และกรณีสัญญาณรบกวน (โดยมี SNR: signal-to-noise ratio = 12 db, 25 dB, 50 dB) โดยทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธี FFT และวิธีการค้นหาแบบดาวยุดังตารางที่ 1 ในกรณีที่ไม่มี

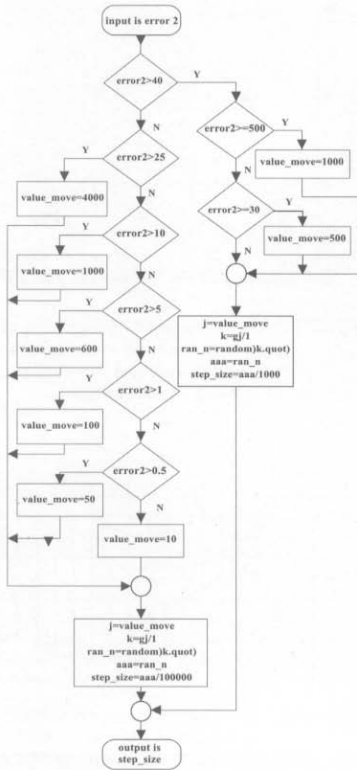


Figure 8. Sub algorithm for step size.

สัญญาณรบกวนจะเห็นได้ว่าวิธีการค้นหาแบบตาม มีประสิทธิภาพเท่าเทียมกับวิธี FFT โดยสามารถหาค่าได้ใกล้เคียงค่าจริงจากระบบคั้งรูปที่ 9 เมื่อนำสัญญาณกระแสที่ได้จาก FFT และการค้นหาแบบตามเปรียบเทียบกับรูปสัญญาณกระแสจริงของระบบจะเห็นว่ารูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของระบบจริงกับรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จาก FFT และการค้นหาแบบตามซ้อนทับกันสนิทคั้งรูปที่ 10 ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนคั้งตารางที่ 1 และรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 19 จะเห็นว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนจะทำให้การตรวจวัดด้วยวิธี FFT มีความคลาดเคลื่อน

Table 1. Performance comparison of various search methods.

Case	Method	*Error
No white noise	FFT	4.210E-27
	Tabu	0.000152***
Add white noise1: **SNR = 12 dB	FFT	769.709
	Tabu	473.538
Add white noise2: SNR = 25 dB	FFT	217.323
	Tabu	133.966
Add white noise 3: SNR = 50 dB	FFT	17.869
	Tabu	13.6634

$$* \text{ Error} = \sum_{m=0}^{19} \left((A_n^{\text{real}} - A_n^{\text{method}})^2 + (B_n^{\text{real}} - B_n^{\text{method}})^2 \right)$$

A_n^{method} , B_n^{method} คือ ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของอนุกรมฟังก์ชันกระแสที่ได้จากการจำลองแบบด้วยกระบวนการ FFT และ Tabu ณ สาร์ม่อนิก ลำดับที่ n

** SNR (signal-to-noise ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างสัญญาณจริงกับสัญญาณรบกวน มีหน่วยเป็น dB (เดซิเบล) โดยที่

$$\text{SNR} = 10 \log \left(\frac{\sum_{m=1}^{128} (i_{i,\text{real}}(m))^2}{\sum_{m=1}^{128} (i_{i,\text{noise}}(m) - i_{i,\text{real}}(m))^2} \right)$$

$i_{i,\text{noise}}(m)$ คือ ค่ากระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริงในข้อมูลลำดับที่ m รวมกับสัญญาณกระแสรบกวน

*** ค่าคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากเงื่อนไขยุติการค้นหาคือวิธีการค้นหาแบบตาม โดยค่าเงื่อนไขยุติการค้นหาคือ $\text{cost} < 0.01$

เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการทำงานของ FFT จะพยายามจำลองแบบของสัญญาณรบกวนทำให้ค่าสาร์ม่อนิกที่วิเคราะห์ทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนขึ้น แต่ในส่วนของการค้นหาแบบ Tabu จะถูกจำกัดการวิเคราะห์ไว้ด้วยรูปสัญญาณไซน์, โคไซน์ และ ความถี่ที่ใช้พิจารณา (950 Hz = สาร์ม่อนิกอันดับที่ 19) ทำให้ไม่สามารถจำลองสัญญาณรบกวนที่เป็นลักษณะของ Uniformly distributed random number ได้ทั้งหมด หรือกล่าวได้ว่าสัญญาณรบกวนมีผลต่อ

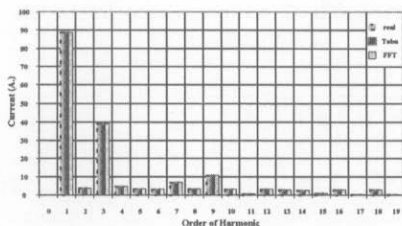


Figure 9. Harmonic current spectrum of the system between real current and simulation current from Tabu search and FFT (No White Noise).

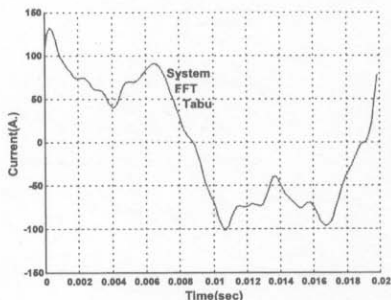


Figure 10. Harmonic current waveform of the system between real current and simulation current from Tabu search and FFT (No White Noise).

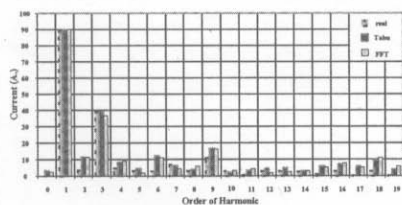


Figure 11. Harmonic current spectrum of the system between real current and simulation current from Tabu search and FFT (White Noise 1: SNR = 12 dB).

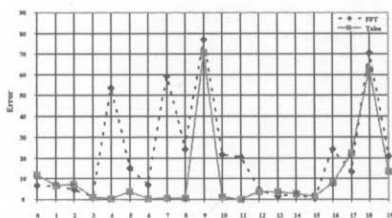


Figure 12. Error harmonic current of Parameter A ($\text{Error} = (A_n \text{real} - A_n \text{method})^2$) between Tabu search and FFT (Add White Noise 1: SNR = 12 dB).

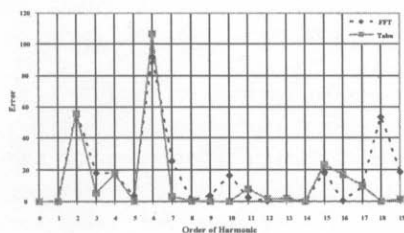


Figure 13. Error harmonic current of Parameter B ($\text{Error} = (B_n \text{real} - B_n \text{method})^2$) between Tabu search and FFT (Add White Noise 1: SNR = 12 dB).

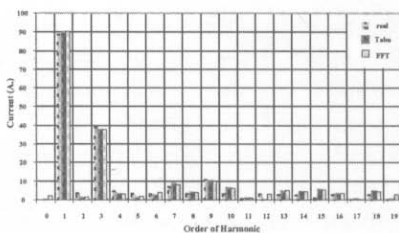


Figure 14. Harmonic current spectrum of the system between real current and simulation current from Tabu search and FFT (White Noise 2: SNR = 25 dB).

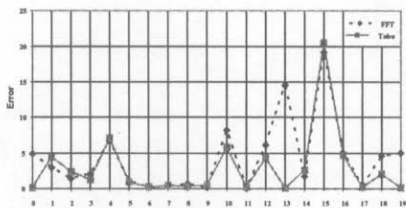


Figure 15. Error harmonic current of Parameter A ($\text{Error} = (A_n\text{real} - A_n\text{method})^2$) between Tabu search and FFT (Add White Noise2: SNR = 25 dB).

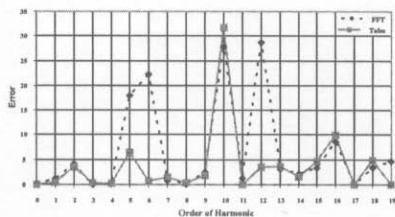


Figure 16. Error harmonic current of Parameter B ($\text{Error} = (B_n\text{real} - B_n\text{method})^2$) between Tabu search and FFT (Add White Noise2: SNR = 25 dB).

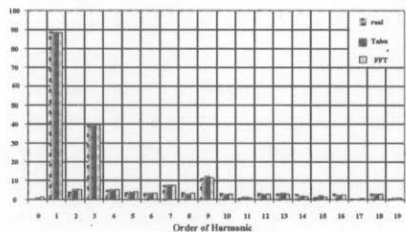


Figure 17. Harmonic current spectrum of the system between real current and simulation current from Tabu search and FFT (White Noise3:SNR = 50 dB).

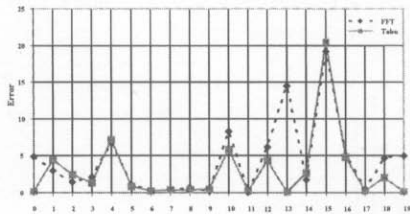


Figure 18. Error harmonic current of Parameter A ($\text{Error} = (A_n\text{real} - A_n\text{method})^2$) between Tabu search and FFT (Add White Noise3:SNR = 50 dB).

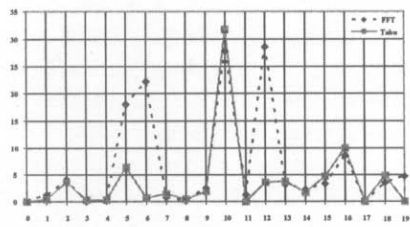


Figure 19. Error harmonic current of Parameter B ($\text{Error} = (B_n\text{real} - B_n\text{method})^2$) between Tabu search and FFT (Add White Noise3:SNR = 50 dB).

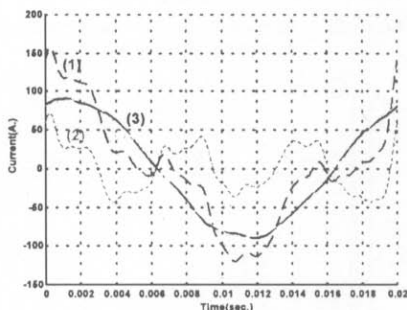
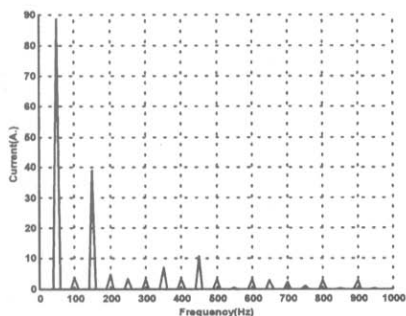
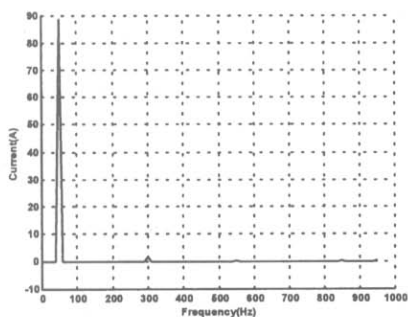


Figure 20. Current waveforms of system from an academic building category.
 (1) Current before compensation
 (2) Compensated current
 (3) Current after compensation
 (4) Ideal current

Table 2. Performance comparison number of switching of 1 period .

No. of Switching	error	time(sec)
11	621.57	9.67
31	283.57	116.33
51	73.85	256.33
71	76.39	329.33
91*	67.50	862

* ในการสวิตช์จำนวน 91 ครั้งใช้เวลาทั้งสิ้น 862 วินาทีซึ่งเกินมาตรฐานของ [6] โดยกำหนดไว้ที่ 15 นาที ในการทำการวัดซ้ำอีกครั้ง (เวลาการตรวจวัด + เวลาการออกแบบสร้างกระแสชดเชย < 15 นาที)

**Figure 21. Harmonic current spectrum of the system before compensation.****Figure 22. Harmonic current spectrum of the system after compensation.**

การตรวจวัดด้วยวิธี FFT มากกว่าวิธีการตรวจวัดด้วยการค้นหาแบบดา (สัญญาณรบกวนมาก ค่าของ SNR จะน้อย)

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ที่ได้จากการค้นหาแบบดามาทำการออกแบบหาแบบรูปการสวิตช์ตัวเก็บประจุโดยใช้วิธีการค้นหาแบบดา โดยทำการทดสอบหาจำนวนครั้งในการสวิตช์เปิดปิดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมซึ่งผลที่ได้ดังตารางที่ 2 ซึ่งค่าเหมาะสมที่สุดคือ 51 ครั้งโดยให้ค่าผิดพลาดน้อยสุดและเวลาที่ใช้ไม่เกินช่วงเวลากการตรวจวัดซ้ำ (เวลาการตรวจวัด + เวลาการออกแบบสร้างกระแสชดเชยน้อยกว่า 15 นาที) ตามมาตรฐานของ [6] จากรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสหลังจากผ่านวงจรกรองมีค่าใกล้เคียง (เกือบทับสนิท) กับรูปคลื่นของกระแสที่ปราศจากฮาร์มอนิกเมื่อพิจารณาในรูปของสเปกตรัมความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกจากรูปที่ 21 และ 22 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสหลังจากผ่านวงจรกรองฮาร์มอนิกนั้นฮาร์มอนิกในลำดับที่ 2 ถึง 19 จะหายไปเนื่องมาจากการหักล้างกันของกระแสฮาร์มอนิกกับกระแสของวงจรกรองซึ่งผลที่ได้จะเหลือเพียงฮาร์มอนิกในลำดับที่ 6 เล็กน้อยเท่านั้น

สรุป

จากผลการทดสอบการตรวจวัดฮาร์มอนิกโดยทำการเปรียบเทียบวิธี FFT กับวิธีการค้นหาแบบดาสรุปได้ว่าในการตรวจวัดสัญญาณที่ไม่มี white noise นั้น วิธีการตรวจวัดแบบ FFT และวิธีการค้นหาแบบดานั้นเหมาะสำหรับการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งจะได้ค่าที่ถูกต้องสูงดังตารางที่ 1 รูปที่ 9 และรูปที่ 10 ในส่วนของการตรวจวัดสัญญาณที่มี white noise ปะปนอยู่นั้นการตรวจวัดโดยวิธีการค้นหาแบบดาสามารถให้ค่าการตรวจวัดที่ถูกต้องมากกว่าวิธีการตรวจวัดแบบ FFT ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 19 และจากผลการทดสอบการหารูปแบบการทำงานของสวิตช์ด้วยการค้นหาแบบดา พบว่าสามารถลดความผิดเพี้ยนเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิก (THD; Total

Harmonic Distortion) จากเดิม 48.03 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 0.45 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่ากระแสของระบบลดลง 9.9570 เปอร์เซ็นต์ (6.9429 A_{rms}) จาก 69.7285 A_{rms} เหลือเพียง 62.7856 A_{rms} ซึ่งจะเห็นว่าวิธีการค้นหาแบบตามาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกได้จริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Arsoy, A., Halpin, S.M., Liu, Y. and Paulo, F.R. (1999). Modeling and simulation of power system harmonics [CD-ROM]. Task Force on Harmonics Modeling and Simulation Harmonic Working Group Transmission & Distribution Committee IEEE Power Engineering Society.
- [2] Timothy, A.G. (1991). Harmonic power flow determination using the fast fourier transform. IEEE Transaction on Power Delivery. 6(2):530-535.
- [3] Glover, F. (1993). Tabu Search, in Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. C.R. Reeves ed., John Willey & Sons, Inc.
- [4] Arrillaga, J., Bradley, D.A. and Bodger, P.S. (1985). Power System Harmonics. New York: John Willey & Sons, Inc.
- [5] Qi-Wen, Y., Feng, L., Guo-Hong, Z. and Jing-Ping, J. (2000). The application of computational intelligence to fourier transformation. IEEE Conf. Electronics, Circuits and Systems 2000. pp.178-181
- [6] คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า. (2541). ข้อกำหนดคกฏเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม. กฟผ. กฟภ. กฟน.
- [7] Mehta, P., Darwish, M. and Thomson, T. (1990). Switched-Capacitor Filters. IEEE Transaction on power electronics. 5(3):331-336.
- [8] Welsh, M., Mehta, P. and Darwish, M.K. (2000). Genetic algorithm and extended analysis optimization techniques for switched capacitor active filter-Comparative study. IEE Proceedings-Electric Power Applications. 147(1): 21-26.
- [9] Seed, V.V. (2000). Advanced digital signal processing and noise reduction. New York: John Willey & Sons, Inc.
- [10] Sidney, C.B., James, H.M., Alan, V.O., Thomas, W.S. and Hans, W.S. (1994). Computer-Based Exercises for Signal Processing Using MATLAB. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.