

การออกแบบวงจรกรองแบบแอคทีฟอย่างเหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธี ICuS

Optimal Active Filter Design by ICuS Algorithm

ชาติชาย มาจวง^{1,*} ชันญ์ชัย วุฒิชัยวัฒน์^{1,*} และ วัฒนวงศ์ ร่มไทร²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถนนพระราม 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

²บริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน) สายงานดาวเทียมและโครงข่าย

ฝ่ายปฏิบัติการโครงข่าย ส่วนปฏิบัติการโครงข่ายธนบุรี 2/12 ถนนพุทธมณฑลสาย 2

แขวงบางแคเหนือ เขตบางแค กรุงเทพมหานคร 10160

E-mail: chananchai.wut@gmail.com

Chartchai Majuang^{1,*}, Chananchai Wutthithanyawat^{1,*} and Wattanawong Romsail²

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology,

833 Rama 1 Road, Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand.

²National Telecom Public Company Limited, Satellite and Network, Network Operations Department,

Thonburi Network Operations Sector 2/12, Phuttha Monthon Sai 2 Road, Bang Khae Nuea,

Bang Khae, Bangkok 10160, Thailand.

E-mail: chananchai.wut@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอการออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอคทีฟอันดับ-4 ที่มีโครงสร้างแบบ Sallen-Key อย่างเหมาะสม โดยใช้การค้นหาแบบกระแสวิ่งเข้มข้น (intensified current search: ICuS) ผลรวมของความคลาดเคลื่อนกำลังสองระหว่างกราฟของวงจรกรองในอุดมคติและกราฟของวงจรกรองที่ได้จากการออกแบบจะถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการทำให้มีค่าน้อยที่สุด ผลการออกแบบจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบอภิศึกษาสำนึกที่ปรากฏในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากผลการออกแบบ พบว่า วงจรกรองผ่านต่ำแบบแอคทีฟอันดับ-4 ที่ออกแบบโดยขั้นตอนวิธี ICuS ให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกราฟอุดมคติมากกว่าขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบอภิศึกษาสำนึกที่ปรากฏในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คำสำคัญ: วงจรกรองแบบแอคทีฟ; โครงสร้างแบบ Sallen-Key; ขั้นตอนวิธี ICuS

Abstract

This paper presents the optimal fourth-order active low-pass filter design based on the Sallen-Key topology by using the intensified current search (ICuS) algorithm. The sum of squared error between the ideal characteristic curve and the actual characteristic curve of the considered active low-pass filter is set as the objective function to be minimized. Results obtained by the ICuS will be compared with those obtained by other algorithms appeared in the literatures. As design results, the fourth-order active low-pass filter designed by the ICuS provides the satisfactory characteristic closer to the ideal curve than other existing algorithms.

Keywords: Active filter; Sallen-Key topology; ICuS algorithm

1. บทนำ

ในงานวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ระบบควบคุม และโทรคมนาคม วงจรกรองผ่านต่ำแบบแอคทีฟ (active low-pass filter) ถูกประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง เพื่อทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงที่ไม่ต้องการออกไปจากระบบ [1, 2] โดยทั่วไปวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอคทีฟจะอาศัยโครงสร้างแบบ Sallen-Key [3] ซึ่งมีจำนวนองค์ประกอบ (ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ) ที่น้อยกว่าโครงสร้างอื่น [4, 5] และอาศัยการออกแบบโดยใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองมาตรฐาน เช่น วงจรกรองแบบ Butterworth, Chebyshev, Bessel หรือ Elliptic เป็นต้น [4-8]

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ในปัจจุบันการออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอคทีฟได้เปลี่ยนจากแนวทางดั้งเดิม มาอาศัยหลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ด้วยเทคนิคการค้นหาลักษณะอภิสัทศาสตร์ ได้แก่ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm: GA) [9, 10], อาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (artificial bee colony: ABC) [10], การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) [10, 11], ขั้นตอนวิธีการคัดเลือกสำเนาพันธุ์ (clonal selection algorithms: CSA) [12], ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวาฬ (whale optimization algorithm: WOA) [12] และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมมด (ant colony optimization: ACO) [13] เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 2014 การค้นหาแบบกระแสเชิงเข้มข้น (intensified current search: ICuS) [14] ได้รับการนำเสนอเป็นครั้งแรก ในฐานะเทคนิคการค้นหาลักษณะอภิสัทศาสตร์ โดยอาศัยพฤติกรรมการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรขั้ว ร่วมกับกลไกการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive radius: AR) และกลไกการปรับค่าข้างเคียง (adaptive neighborhood: AN) เพื่อช่วยเร่งให้กระบวนการค้นพบผลเฉลยวงกว้างได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น ขั้นตอนวิธี ICuS ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความสามารถในการค้นหาผลเฉลยวงกว้างที่รวดเร็วกว่าการค้นหาแบบกระแส (current search: CuS), PSO และ GA [14] และได้ถูกประยุกต์ใช้เพื่อการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในงานวิศวกรรมระบบควบคุม [15-17]

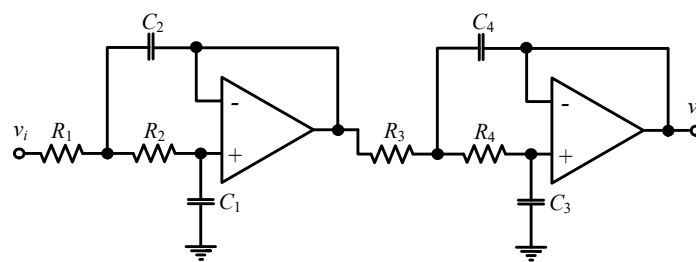
บทความนี้ นำเสนอการออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับ-4 ที่มีโครงสร้างแบบ Sallen-Key อย่างเหมาะสม โดยใช้ขั้นตอนวิธี ICuS ผลการออกแบบจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบ อภิศักขานที่ปรากฏในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ GA, ABC, PSO และ ACO ในหัวข้อต่อไปจะนำเสนอ กรอบงานการออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับ-4 ที่มีโครงสร้างแบบ Sallen-Key, ขั้นตอนวิธี ICuS, ผลการออกแบบและการอภิปรายผล และสรุป ในหัวข้อที่ 2, 3, 4, และ 5 ตามลำดับ

2. วงจรกรองผ่านต่ำอันดับ-4

วงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับ-4 เป็นการนำวงจรกรองผ่านต่ำอันดับ-2 จำนวน 2 วงจรมาต่อкас เกิดกัน ซึ่งมีฟังก์ชันการถ่ายโอนแสดงดังสมการที่ (1) [9], โดยที่ ω_{c1} และ ω_{c2} เป็นความถี่คัตออฟ (cutoff frequency) และ Q_1 และ Q_2 เป็นตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) ของวงจรกรองผ่านต่ำอันดับ-2 ที่ต่อкас เกิดกันจำนวน 2 วงจร

$$H(s) = \frac{\omega_{c1}^2}{s^2 + \frac{\omega_{c1}}{Q_1}s + \omega_{c1}^2} \times \frac{\omega_{c2}^2}{s^2 + \frac{\omega_{c2}}{Q_2}s + \omega_{c2}^2} \quad (1)$$

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับ-4 ที่มีโครงสร้างแบบ Sallen-Key แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยออปแอมป์ จำนวนสองตัว ตัวต้านทานจำนวนสี่ตัว และตัวเก็บประจุจำนวนสี่ตัว [9] โดยฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรกรองผ่านต่ำอันดับ-4 แสดงดังสมการที่ (2)



รูปที่ 1 วงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับ-4 ที่มีโครงสร้างแบบ Sallen-Key

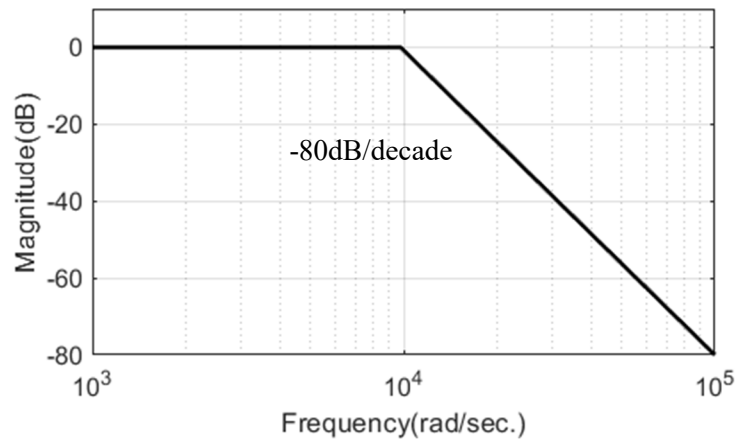
$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \left(\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_1)s + 1} \right) \times \left(\frac{1}{R_3 R_4 C_3 C_4 s^2 + (R_3 C_3 + R_4 C_3)s + 1} \right) \quad (2)$$

จากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ความถี่คัตออฟและตัวประกอบคุณภาพที่เกี่ยวกับส่วนประกอบของวงจรจะแสดงดังสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ตามลำดับ

$$\left. \begin{aligned} \omega_{c1} &= \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \\ \omega_{c2} &= \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4 C_3 C_4}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{R_1 C_1 + R_2 C_1} \\ Q_2 &= \frac{\sqrt{R_3 R_4 C_3 C_4}}{R_3 C_3 + R_4 C_3} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

กราฟลักษณะเฉพาะในอุดมคติของวงจรกรองผ่านต่ำอันดับ-4 แสดงดังรูปที่ 2 เมื่อกำหนดให้ความถี่คัตออฟที่ 10krad/sec (หรือ 1,591.55 Hz)



รูปที่ 2 กราฟในอุดมคติวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทิฟอันดับ-4

3. การค้นหาแบบกระแสน้ำแข็งเข้มข้น (ICuS)

การค้นหาแบบกระแสน้ำแข็งเข้มข้น (ICuS) เป็นหนึ่งในเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงอนุกรมวิธานที่สำคัญอยู่บนพื้นฐานของการสุ่มและการค้นหาผลเฉลยวงแคบ ซึ่งเป็นการปรับปรุงจากการค้นหาแบบกระแสน้ำ (CuS) วิธีของ ICuS มีการใช้หน่วยความจำ (Memory List: ML) เพื่อเป็นประโยชน์ในการค้นหาผลเฉลยสามารถหลุดจากการติดกับดักเฉพาะที่ (local entrapment) โดยใช้กลไกการปรับรัศมีการค้นหา (Adaptive Radius: AR) และกลไกการปรับค่าข้างเคียงการค้นหา (Adaptive Neighborhood: AN) เพื่อเพิ่มความเร็วในการค้นหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธี ICuS สามารถแสดงได้ด้วย รหัสเทียมแสดงดังรูปที่ 3

Initialized:

- Objective function $f(x)$, $x=(x_1, \dots, x_d)^T$,
 - Initialize the search space Ω ,
 - maximum allowance of solution cycling $j_{\max}$,
 - number of initial solutions N ,
 - number of neighborhood members n ,
 - search radius R , $k=j=1$.
 - Random initial solution X_i within Ω .
 - Evaluate $f(X_i)$ then rank and X_i into Ψ .
 - Let $x_0=X_k$ as selected initial solution.
 - $X_{\text{global}}=X_{\text{local}}=x_0$.
while ($k \leq N$ or termination criteria: TC);
 while ($j \leq j_{\max}$);
 Random neighborhood x_i around x_0 within R .
 Evaluate $f(x_i)$ and set the best one as x^* .
 if $f(x^*) < f(x_0)$; Update $x_0=x^*$ and set $j=1$.
 else Update $j=j+1$. **end**
 Activate AR by $R=\rho R$, $0 < \rho < 1$.
 Invoke AN by $n=\alpha n$, $\alpha > 1$.
 end
 Update $X_{\text{local}}=x_0$.
 if $f(X_{\text{local}}) < f(X_{\text{global}})$; Update $X_{\text{global}}=X_{\text{local}}$. **end**
 Update $k=k+1$ and set $j=1$.
 Let $x_0=X_k$ as selected initial solution.
end

รูปที่ 3 รหัสเทียมของการค้นหาแบบ ICuS

กลไก AR จะถูกเรียกใช้เมื่อกระบวนการค้นหาผลเฉลยดำเนินการไปได้ระยะหนึ่ง ภายในปริภูมิการค้นหาย่อยปัจจุบัน เมื่อพบว่าการค้นหาเข้าใกล้ผลเฉลยเฉพาะที่ในระดับที่กำหนดไว้ กลไก AR จะทำการปรับลดปริภูมิการค้นหาลงตามสมการที่ (5) เมื่อ ε_i คือผลเฉลยที่ยอมรับได้ในการปรับกลไก AR ครั้งที่ i และ ρ_i คือตัวประกอบการปรับลดครั้งที่ i ในการปรับกลไก AR ครั้งที่ i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$

$$\left. \begin{array}{l} \text{If } f(\cdot) \leq \varepsilon_1, \text{ then } R = \rho_1 R, \\ \text{If } f(\cdot) \leq \varepsilon_2, \text{ then } R = \rho_2 R, \\ \vdots \\ \text{If } f(\cdot) \leq \varepsilon_n, \text{ then } R = \rho_n R, \end{array} \right\} \quad (5)$$

ในทำนองเดียวกัน กลไก AN จะถูกเรียกใช้เมื่อกระบวนการค้นหาผลเฉลยดำเนินการไปได้ระยะหนึ่ง ภายในปริภูมิการค้นหาย่อย เมื่อพบว่าการค้นหาเข้าใกล้ผลเฉลยเฉพาะที่ในระดับที่กำหนดไว้ กลไก AN จะทำการปรับลดจำนวนค่าข้างเคียงลงตามสมการที่ (6) เมื่อ ε_i คือผลเฉลยที่ยอมรับได้ในการปรับกลไก AN ครั้งที่ i และ α_i คือตัวประกอบการปรับลดค่าข้างเคียงในการปรับกลไก AN ครั้งที่ i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$

$$\left. \begin{array}{l} \text{If } f(\cdot) \leq \varepsilon_1, \text{ then } n = \alpha_1 R, \\ \text{If } f(\cdot) \leq \varepsilon_2, \text{ then } n = \alpha_2 R, \\ \vdots \\ \text{If } f(\cdot) \leq \varepsilon_n, \text{ then } n = \alpha_n R, \end{array} \right\} \quad (6)$$

4. ผลการออกแบบและการอภิปรายผล

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับ-4 จะถูกดำเนินการบนโปรแกรม MATLAB version 2021b (License No.#40598465) ดำเนินการบน PC AMD Ryzen 7 4800U CPU@1.80 GHz. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ ซึ่งอยู่ในรูปผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (sum-squared error: SSE) ระหว่างผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองที่ผ่านการอิมัลไลซ์ M และผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองที่ได้จากออกแบบ M^* แสดงดังสมการที่ (7) การดำเนินการค้นหาผลเฉลยจะถูกแยกดำเนินการเป็น 2 กรณี ดังนี้

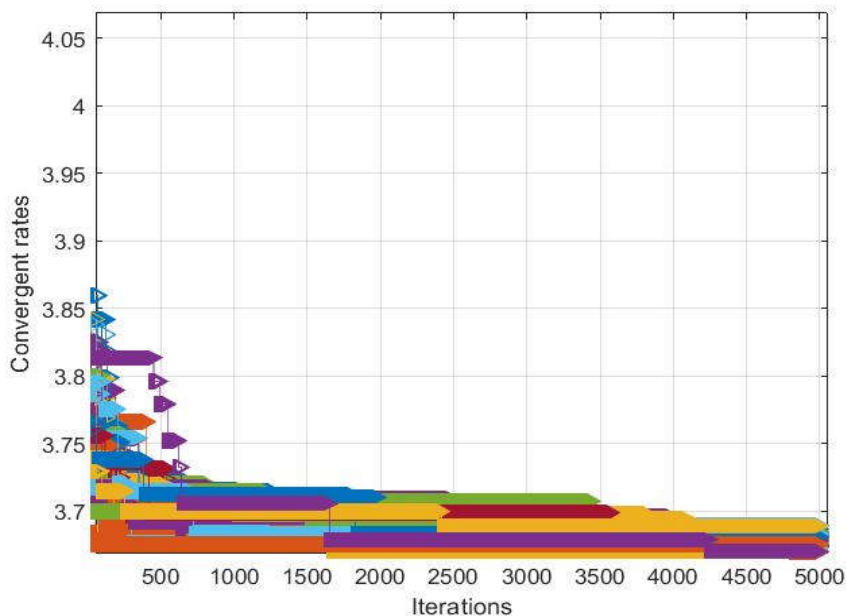
กรณีที่-1 ทำการค้นหาค่า $R_1, R_2, R_3, R_4, C_1, C_2, C_3$ และ C_4 ทั้ง 8 ตัว โดยจะมีขอบเขตการค้นหาแสดงดังสมการที่ (8) ที่กำหนดจากการทดสอบในเบื้องต้น ซึ่งหากพบว่าผลเฉลยที่พบมีค่าตรงกับขอบเขตด้านใดด้านหนึ่ง จะทำการปรับขยายขอบเขตการค้นหาด้านดังกล่าว เพื่อให้การค้นหาสามารถพบผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด

กรณีที่-2 กำหนดให้ C_1, C_2, C_3 และ C_4 เป็นค่าคงที่ และทำการค้นหาเฉพาะ R_1, R_2, R_3 และ R_4 จำนวน 4 ตัว การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ ICuS ที่เหมาะสมกระทำการทดสอบปรับเปลี่ยนค่าข้างเคียง $n = 10, 20, 30, 40, 50$ และ 60 จำนวนเส้นทางการค้นหา $N = 25, 50, 75, 100, 125$ และ 150 และรัศมีการค้นหาเริ่มต้น $R = 5\%, 10\%, 20\%, 30\%, 40\%$ และ 50% จากผลการทดสอบพบว่าค่าพารามิเตอร์ของ ICuS ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบวงจรกรองในงานวิจัยนี้คือ $n = 50, N = 100$ และ $R = 10\%$ แต่ละเส้นทางการค้นหาจะสิ้นสุดโดย $Imax = 5000$ โดยมีความถี่คutoff ที่ 10 krad/sec (หรือ $1,591.55 \text{ Hz}$)

$$\text{Min } f(x) = \sum_{i=1}^{ND} [M_i - M_i^*]^2 \quad (7)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{subject to } 6 \text{ k}\Omega \leq R_1 \leq 7 \text{ k}\Omega, \\ 5 \text{ k}\Omega \leq R_2 \leq 6 \text{ k}\Omega, \\ 1 \text{ k}\Omega \leq R_3 \leq 2 \text{ k}\Omega, \\ 1 \text{ k}\Omega \leq R_4 \leq 2 \text{ k}\Omega, \\ 5 \text{ nF} \leq C_1 \leq 6 \text{ nF}, \\ 50 \text{ nF} \leq C_2 \leq 60 \text{ nF}, \\ 50 \text{ nF} \leq C_3 \leq 60 \text{ nF}, \\ 50 \text{ nF} \leq C_4 \leq 60 \text{ nF} \end{array} \right\} \quad (8)$$

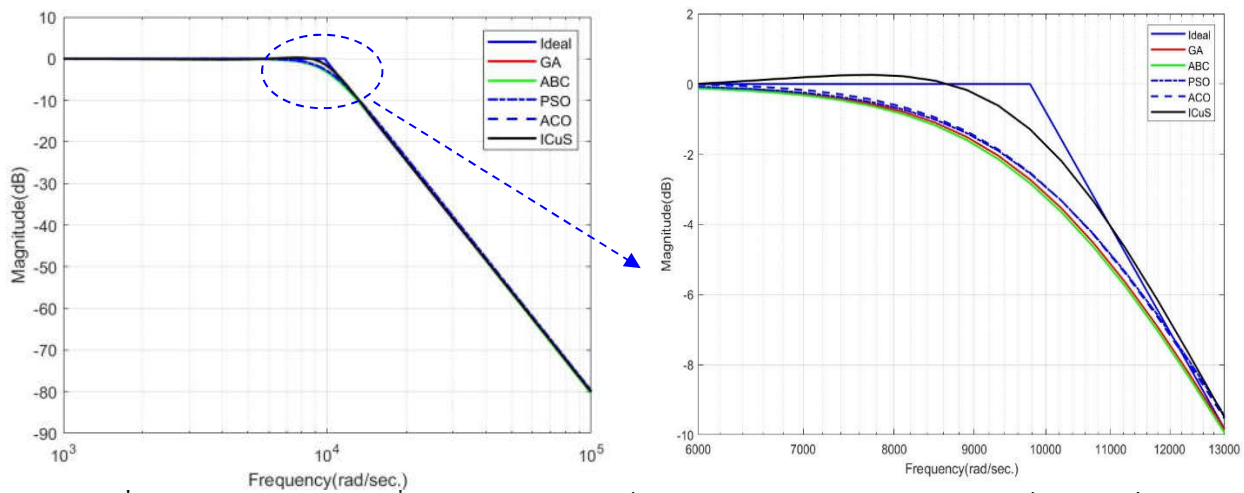
เมื่อดำเนินการค้นหาทั้งหมด 50 ครั้ง (trial) อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธี ICuS แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่า ขั้นตอนวิธี ICuS มีประสิทธิภาพในการค้นหาผลเฉลย เมื่อพิจารณาจากการค้นหาทั้งหมดจำนวน 50 ครั้ง ที่ซึ่งผลเฉลยเริ่มต้นมีค่าต่างกันเนื่องจากกระบวนการสุ่ม แต่การค้นหาของขั้นตอนวิธี ICuS สามารถลู่เข้าหาผลเฉลยได้เมื่อจำนวนรอบการทำซ้ำ (iterations) มีจำนวนมากขึ้น ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทิฟอันดับ-4 ทั้ง 2 กรณี แสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 4 อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของการค้นหาแบบ ICuS

ตารางที่ 1 สรุปค่าพารามิเตอร์และสมรรถนะการค้นหาผลเฉลยในกรณีที่-1 (ค้นหาจำนวน 8 ตัว)

ค่าพารามิเตอร์	GA [9]	ABC [9]	PSO [9]	ACO [12]	ICuS
$R_1(k\Omega)$	6.80	4.70	4.58	4.70	6.13
$R_2(k\Omega)$	6.80	4.70	4.70	4.99	5.70
$R_3(k\Omega)$	39.0	1.00	1.10	1.00	1.84
$R_4(k\Omega)$	1.00	39.0	1.00	2.34	1.81
$C_1(nF)$	5.60	8.20	8.20	7.87	5.00
$C_2(nF)$	39.0	56.0	56.0	54.2	59.90
$C_3(nF)$	4.70	4.70	87.6	54.9	56.10
$C_4(nF)$	56.0	56.0	102.2	77.7	51.20
SSE	24.5565	27.2181	32.8751	25.1316	3.8349

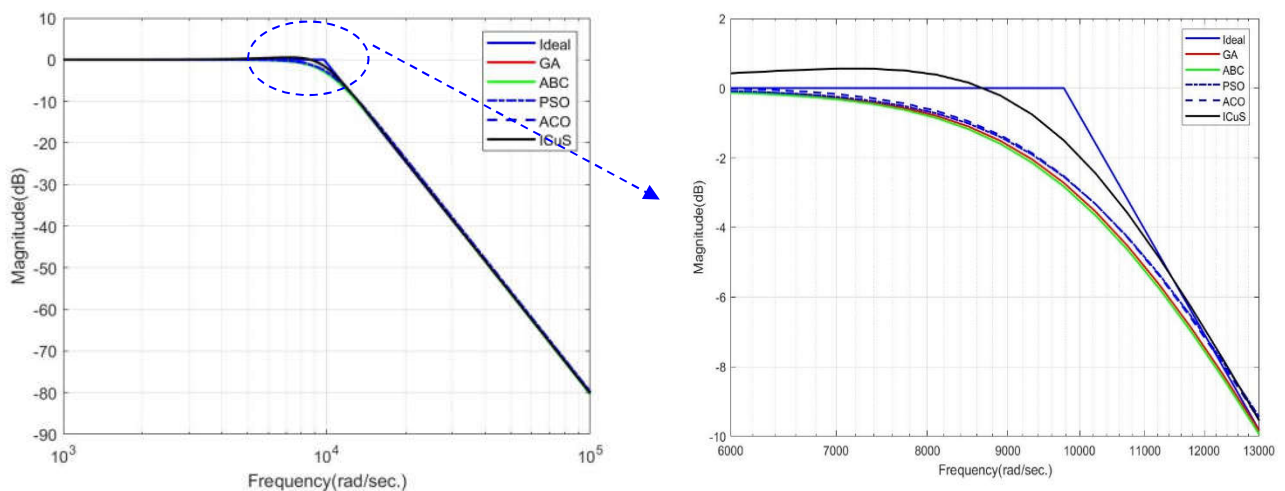


รูปที่ 5 การตอบสนองความถี่ของวงจรกรองผ่านต่ำอันดับ-4 ในกรณีไม่กำหนดค่าคงที่ของตัวเก็บประจุ

ตารางที่ 1 สรุปค่าพารามิเตอร์และสมรรถนะการค้นหาค่าผลเฉลยโดยดำเนินการค้นหา $R_1, R_2, R_3, R_4, C_1, C_2, C_3$ และ C_4 ที่เหมาะสม และรูปที่ 5 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ที่ออกแบบโดย GA, ABC, PSO, ACO และ ICuS ในกรณีไม่ได้กำหนดค่าคงที่ของตัวเก็บประจุ ซึ่งพบว่าขั้นตอนวิธี ICuS มีประสิทธิภาพในการออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับ-4 เหนือกว่า GA, ABC, PSO และ ACO อย่างชัดเจน

ตารางที่ 2 สรุปค่าพารามิเตอร์และสมรรถนะการค้นหาค่าผลเฉลยในกรณี-2 (ค้นหาจำนวน 4 ตัว)

ค่าพารามิเตอร์	GA [9]	ABC [9]	PSO [9]	ACO [12]	ICuS
$R_1(k\Omega)$: ค้นหา	6.80	4.70	4.58	4.70	9.88
$R_2(k\Omega)$: ค้นหา	6.80	4.70	4.70	4.99	4.16
$R_3(k\Omega)$: ค้นหา	39.0	1.00	1.10	1.00	36.00
$R_4(k\Omega)$: ค้นหา	1.00	39.0	1.00	2.34	0.91
$C_1(nF)$: คงค่า	5.60	8.20	8.20	7.87	4.70
$C_2(nF)$: คงค่า	39.0	56.0	56.0	54.2	56.00
$C_3(nF)$: คงค่า	4.70	4.70	87.6	54.9	5.10
$C_4(nF)$: คงค่า	56.0	56.0	102.2	77.7	56.00
SSE	24.5565	27.2181	32.8751	25.1316	7.2599



รูปที่ 6 การตอบสนองความถี่ของวงจรกรองผ่านต่ำอันดับ-4 ในกรณีกำหนดค่าคงที่ของตัวเก็บประจุ

ตารางที่ 2 สรุปค่าพารามิเตอร์และสมรรถนะการค้นหาค่าเหมาะที่สุดโดยดำเนินการค้นหา R_1, R_2, R_3 และ R_4 ในขณะที่ C_1, C_2, C_3 และ C_4 จะถูกกำหนดค่าคงที่ตามมาตรฐาน E24 (E24 standard series) [18] เป็น $C_1 = 4.70$ nF, $C_2 = 56.00$ nF, $C_3 = 5.10$ nF และ $C_4 = 56.00$ nF พารามิเตอร์การค้นหาค่าของ ICuS เป็นค่าเดียวกันกับกรณีแรก รูปที่ 6 แสดงผลการตอบสนองความถี่ที่ออกแบบโดย GA, ABC, PSO, ACO และ ICuS ในกรณีกำหนดค่าคงที่ของตัวเก็บประจุ ซึ่งพบว่าขั้นตอนวิธี ICuS มีประสิทธิภาพในการออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับ-4 เหนือกว่า GA, ABC, PSO และ ACO อย่างชัดเจน

5. สรุป

วงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับ-4 ที่มีโครงสร้างแบบ Sallen-Key ซึ่งออกแบบได้อย่างเหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธี ICuS ที่ได้นำเสนอในบทความนี้ ผลรวมของความคลาดเคลื่อนกำลังสองระหว่างกราฟของวงจรกรองในอุดมคติและกราฟของวงจรกรองที่ได้จากการออกแบบจะถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อทำให้มีค่าน้อยที่สุด การดำเนินการค้นหาค่าเหมาะที่สุดจะถูกแยกดำเนินการเป็น 2 กรณี คือการค้นหาในกรณีไม่กำหนดค่าคงตัวของพารามิเตอร์ใดๆ ในวงจร และกรณีกำหนดค่า C_1, C_2, C_3 และ C_4 ค้นหาเฉพาะพารามิเตอร์ R_1, R_2, R_3 และ R_4 ผลการออกแบบจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบอภิศักยภาพที่ปรากฏในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ GA, ABC, PSO และ ACO จากผลลัพธ์ทั้ง 2 กรณี พบว่า ICuS ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธี ICuS มีประสิทธิภาพในการออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับ-4 ที่เหนือกว่า GA, ABC, PSO และ ACO อย่างชัดเจน สำหรับงานวิจัยในอนาคต จะได้นำค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนวิธี ICuS ไปทำการสร้างวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับ-4 ที่มีโครงสร้างแบบ Sallen-Key เพื่อใช้งานจริงต่อไป อีกทั้งจะได้ดำเนินการประยุกต์ขั้นตอนวิธี ICuS เพื่อออกแบบวงจรกรองแบบดิจิทัล และวงจรกรองที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. I. Zverev, Handbook of Filter Synthesis, John Wiley, 1967.
- [2] L. P. Huelsman and P. E. Allen, Introduction to the Theory and Design of Active Filters, McGraw Hill, 1980.
- [3] A. B. Williams and F. J. Taylor, Electronic Filter Design Handbook, McGraw-Hill, 2006.
- [4] M. E. Van Valkenburg, Analog Filter Design, Holt, Rinehart & Winston, 1982.
- [5] A. Budak, Passive and Active Network Analysis and Synthesis, Houghton Mifflin Company, Boston, 1974.
- [6] W-K. Chen, Passive and Active Filters: Theory and Implementations, Wiley, 1991.
- [7] S. Winder, Analog and Digital Filter Design, Elsevier Science, 2002.
- [8] S. A. Pactitis, Active Filters Theory and Design, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
- [9] T. Kaya and M. C. Ince, "The design of analog active filter with different component value using genetic algorithm," International Journal of Computer Applications, Vol. 45, No. 8, 2012, pp.43-47.
- [10] R. A. Vural, T. Yildirim, T. Kadioglu and A. Basargan, "Performance evaluation of evolutionary algorithms for optimal filter design," IEEE Transactions on Evaluationary Computation, Vol. 16, No. 1, 2012, pp. 135-147.
- [11] R. A. Vural and T. Yildirim, "Component value selection for analog active filter using particle swarm optimization," Proceeding of the 2nd ICCAE, Vol. 1, 2010, pp. 25-28.
- [12] M. Jiang, Z. Yang and Z. Gan, "Optimal components selection for analog active filters using clonal selection algorithm," Proceeding of the ICICI, LNCS 4681, 2007, pp. 950-959.
- [13] B. Benhala, "Ant colony optimization for optimal low-pass Butterworth filter design," WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Vol. 13, 2014, pp. 313-318.
- [14] A. Nawikavatan, S. Tunyasirirut and D. Puangdownreong, "Application of intensified current search to optimum PID controller design in AVR system," Lecture Notes in Computer Science, 2014, pp. 255-266.
- [15] A. Nawikavatan, S. Tunyasirirut and D. Puangdownreong, "Optimal PID controller design for three-phase induction motor speed control by intensified current search," Proceeding of the 19th International Annual Symposium on Computational Science and Engineering, 2015, pp. 104-109.
- [16] A. Nawikavatan, S. Tunyasirirut and D. Puangdownreong, "Application of intensified current search to multiobjective PID controller optimization," International Journal of Intelligent Systems and Applications, Vol. 8, No. 11, 2016, pp. 51-60.
- [17] W. Romsai and A. Nawikavatan, "Optimal PID controller design for quarter car suspension system by intensified current search," Proceeding of the IEEE the 17th International Conference on ICT and Knowledge Engineering, 2019.
- [18] J. F. Blackburn, Components Handbook, MIT Radiation Laboratory Series, Vol. 17, McGraw-Hill, 1949.