

การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของวงจรกรองความถี่สูงโดยประยุกต์ใช้ ระเบียบวิธี PBIL

ธีรยุทธ คุณะโคตร* อภินันท์ อรุโสมภณ และ สິงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต. ขามเรียง อ. กันทรวิชัย จ. มหาสารคาม 44150

*E-mail: Teerayuth_tk@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธี PBIL (Population-Based Incremental learning) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมแบบวิวัฒนาการ สำหรับออกแบบวงจรกรองความถี่สูงอันดับที่สองของ Sallen-key ร่วมกับการกำหนดฟังก์ชันที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยการออกแบบมีหลายเป้าหมายเพื่อเลือกอุปกรณ์ภายในวงจรเพื่อให้ได้ค่า ω_n และ Q ตามที่กำหนด พร้อมกันนั้นยังต้องลดความไวของพารามิเตอร์ Q (Low- Q sensitivities) ลงให้เหมาะสมที่สุดเมื่ออุปกรณ์ในวงจรมีการเปลี่ยนแปลง ผลลัพธ์จากการทดสอบ จะถูกนำมาเปรียบเทียบในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและความไว กับการคำนวณด้วยวิธีแบบเดิม (Conventional design) และวิธีที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ (new conventional design) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธี PBIL กับการออกแบบชนิดนี้ จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า วิธี PBIL มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ โดยเฉพาะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ต่ำกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบเดิมและวิธีที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ วิธี PBIL จึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงอันดับที่สองของ Sallen-key ได้ดี

คำสำคัญ: Population-Based Incremental learning (PBIL), อัลกอริทึมวิวัฒนาการ, การออกแบบหลายเป้าหมาย, ความไวตอบสนองของ Q

1. บทนำ

ในปัจจุบันการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนับว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญเพื่อช่วยลดความยุ่งยากของขั้นตอนการออกแบบตามกรอบแนวคิด (Conceptual Design) ที่ถือตามตำรา และสอดคล้องกับเป้าหมายที่ตั้งเอาไว้ได้เป็นอย่างดี จึงก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านวิศวกรรม เครื่องกลโยธา ไฟฟ้า หรืออิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น อาทิเช่นการประยุกต์ใช้งานสำหรับออกแบบการหาค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของวงจรกรองความถี่ชนิดต่างๆ การออกแบบที่เหมาะสมที่สุด (Component Optimization) โดยส่วนมากจะใช้ฟังก์ชันเป้าหมายเดียว นั่นคือการหาค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด (Minimize Error) ตามกรอบของเงื่อนไข (Constraints) ด้วยวิธีการหาผลรวมค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดของความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency : ω_n) และค่าประสิทธิภาพ (Quality Factor : Q) [1] เพื่อให้ได้ค่าของตัวแปรออกแบบ (ตัว

แปรรูปแบบคืออุปกรณ์ประเภท passive : ตัวต้านทาน R และตัวเก็บประจุ C) ที่ทำให้ ω_n และ Q มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าที่กำหนดไว้

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการออกแบบด้วยการหาค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด จะสามารถออกแบบวงจรได้ตามเป้าหมายจริง แต่ถ้าคำนึงถึงเป้าหมายอื่นๆ ได้แก่การพยายามที่จะลดค่าความไวของพารามิเตอร์ Q ให้ต่ำลงเมื่ออุปกรณ์แต่ละตัวภายในวงจรมีการเปลี่ยนแปลงค่าอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนของอุณหภูมิ หรือแม้กระทั่งผลกระทบจากสถานะแวดล้อมอื่นๆ มาประกอบ จึงทำให้มีหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi Objective Function) ที่ต้องให้ความสำคัญ เช่นการลดค่าความไวของพารามิเตอร์ Q ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวต้านทาน $R(S_R^Q)$ และ พยายามลดค่าความไวของพารามิเตอร์ Q ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวเก็บประจุ $C(S_C^Q)$ ลงให้เหมาะสม ที่สุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองทางด้านความถี่ (Frequency Response) ให้กับวงจรได้อีกทางหนึ่ง [2] จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นการยากที่ผู้ออกแบบจะออกแบบวงจรด้วยวิธีดั้งเดิม เพื่อให้ได้ค่าอุปกรณ์ที่ทำให้ค่า ω_n และ Q เป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด พร้อมกันนั้นยังต้องควบคุมค่าของฟังก์ชันเป้าหมายที่มากกว่าหนึ่งฟังก์ชันในคราวเดียวกันให้ เหมาะสมที่สุด ได้ด้วย จากปัญหานี้จึงทำให้ผู้ออกแบบเปลี่ยนมาหาค่าตอบด้วยวิธีการใช้อัลกอริทึมแบบวิวัฒนาการเพื่อหาผลเฉลยหรือการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ในทางคณิตศาสตร์ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดคือการหาค่าของตัวแปรออกแบบ (Design Variables) ซึ่งมีฟังก์ชันเป้าหมายที่เหมาะสมที่สุด และคำตอบนั้นต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ สิ่งที่น่าออกแบบจะต้องคำนึงถึงคือ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถแบ่งคร่าว ๆ ออกได้เป็นสองกลุ่ม [3] คือ วิธีการที่ใช้อนุพันธ์ และไม่ใช่อนุพันธ์ ในการหาค่าตอบวิธีการที่ไม่ใช่อนุพันธ์ซึ่งมีจุดเด่นเหนือกว่าวิธีที่ใช้อนุพันธ์คือจะให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดวงกว้างที่อยู่ในกลุ่มของระเบียบวิธีแบบวิวัฒนาการหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi Objective Evolutionary Algorithms, MOEAs) [4] เช่นวิธีที่มีการดัดแปลงจาก GA มาเป็นวิธี PBIL (Multi Objective Population-Based Incremental learning) [5,6,7] ซึ่งมีข้อได้เปรียบตรงที่ความง่ายในการประยุกต์ใช้งาน สามารถนำไปแก้ปัญหาได้หลากหลายรูปแบบฟังก์ชันเป้าหมายและตัวแปรออกแบบ อีกทั้งมีความสามารถในการเข้าสู่จุดเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Optimum) นอกจากนั้นก็ยังมีระเบียบวิธีที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้อีกหลายวิธีคือ VEGA (Vector Evolution Genetic Algorithm) [8], MOGA (Multi Objective Genetic Algorithm) [9], Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) [10], PAES (Pareto Achieved Evolution Strategy) [11], SPEA (Strength Pareto Evolution Algorithm) [12] และวิธี MPSO (Multi Objective Particle Swarm Algorithm) [13] เป็นต้น

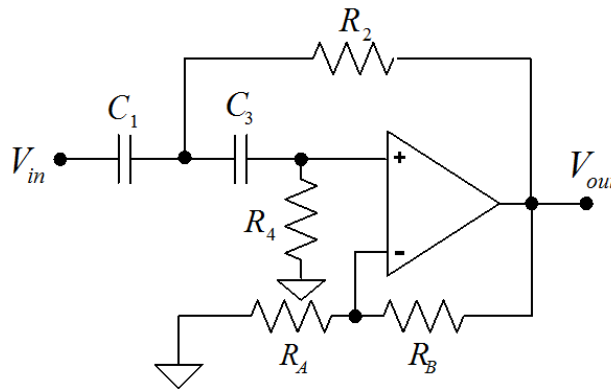
บทความนี้มีจุดมุ่งหมายนำเสนอเทคนิคการออกแบบปัญหาให้มีการหาค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดของ ω_n และ Q ไปพร้อมๆ กับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันความไวของพารามิเตอร์ Q อีกสองฟังก์ชัน โดยการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธี PBIL สำหรับออกแบบอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุดของวงจรความถี่สูง เนื่องจากมีความง่ายต่อการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาหลากหลายฟังก์ชันเป้าหมายและตัวแปรออกแบบที่มีจำนวนมาก โดยอาศัยความเป็นไปได้ในการกำเนิดชุดประชากรใหม่ ซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้วิธีนี้ในการ

ทดสอบกับหุ่นยนต์ และการคำนวณเชิงตัวเลข ค่าฟังก์ชันเป้าหมายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี GA แล้วใช้หน่วยความจำในการคำนวณน้อยกว่า และอัตราผู้เข้าของค่าฟังก์ชันเป้าหมายก็ยิ่งเร็วกว่า [14]

2. วงจรกรองความถี่สูงอันดับที่สอง

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น

วงจรกรองความถี่สูงอันดับที่สองแบบ Sallen และ key [15] ประกอบไปด้วย Op-Amp หนึ่งตัวและอุปกรณ์ประเภท Passive คือ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นวงจรที่นิยมนำมาใช้กัน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรกรองความถี่สูงอันดับที่สองของ Sallen-Key

จากวงจรกรองความถี่สูงดังรูปที่ 1 เมื่อนำมาวิเคราะห์และเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ได้ดังสมการที่ 1

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{S^2(R_2R_4C_1C_3)K}{S^2(R_2R_4C_1C_3) + S(R_4C_3 + R_2C_1 + R_2C_3 - KR_4C_3) + 1} \quad (1)$$

เมื่อแยกการหาพารามิเตอร์แต่ละตัวโดยสามารถหาความถี่ธรรมชาติดังสมการที่ 2 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาความถี่ตัด (f_c) จาก $\omega_n = 2\pi f_c$ ส่วนค่า Q และ K หาได้จากสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{R_2R_4C_1C_3}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{R_2C_1}{R_4C_3}} + \sqrt{\frac{R_2C_3}{R_4C_1}} + (1-K)\sqrt{\frac{R_4C_3}{R_2C_1}} \quad (3)$$

$$K = 1 + \frac{R_B}{R_A} \quad (4)$$

ความถี่ธรรมชาติและค่า Q แม้ว่าจะมีประโยชน์มากต่อเสถียรภาพของฟังก์ชันถ่ายโอนก็ตาม แต่สำหรับวงจรกรองความถี่แบบ Sallen-key ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรได้ด้วยการลดค่าความไวของพารามิเตอร์ Q ลงได้ [16, 17] ดังพื้นฐานจากสมการที่ 5

$$S_x^y = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y} \quad (5)$$

จากสมการที่ 5 x คืออุปกรณ์ภายในวงจร ในขณะที่ y คือพารามิเตอร์ที่ต้องการลดค่าความไว ดังนั้นจึงนำสมการที่ 5 มาวิเคราะห์ และได้สมการที่หาค่าความไวของ Q ในวงจรกรองความถี่สูงดังนี้

$$S_{C_3}^Q = -S_{C_1}^Q = -0.5 + Q \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_4 C_3}} \quad (6)$$

จากสมการที่ 6 เป็นสมการที่พิจารณาเฉพาะส่วนของตัวต้านทานและมีความหมายว่าความไวของพารามิเตอร์ Q ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของ C_3 และ C_1

$$S_{R_4}^Q = -S_{R_2}^Q = -0.5 + Q \left[\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_4 C_3}} + \sqrt{\frac{R_2 C_3}{R_4 C_1}} \right] \quad (7)$$

จากสมการที่ 7 เป็นสมการที่ใช้พิจารณาเฉพาะส่วนของตัวเก็บประจุและมีความหมายว่าความไวของพารามิเตอร์ Q ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของ R_2 และ R_4

2.2 การออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม (Conventional Design)

การออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผู้ออกแบบสามารถหาค่าส่วนประกอบประเภท Passive ภายในวงจรเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ Q และ f_c ตามที่ผู้ออกแบบกำหนดพร้อมกันนั้นยังให้ความสำคัญถึงการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ Q เมื่อส่วนประกอบทั้งหมดภายในวงจรมีการเปลี่ยนแปลงค่า การออกแบบวิธีดั้งเดิมในครั้งนี้ได้นำเสนอเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 R เท่า C เท่า: เมื่อต้องออกแบบให้ได้ค่าพารามิเตอร์ $Q=1$ จากสมการที่ 3 อัตราการขยายมีค่าเท่ากับ $K=3-1/Q$ ดังนั้นจะได้ $K=2.0$ และต้องการ $f_c=4.8 \text{ kHz}$ เมื่อเลือกค่าตัวเก็บประจุ $C_1=C_3=2000 \text{ pF}$ ดังนั้นจะได้ตัวต้านทาน $R_2=R_4=16.5 \text{ k}\Omega$ จากผลการออกแบบนำมาคำนวณหาค่าความไวของพารามิเตอร์ Q ในสมการ 6 และ 7 ซึ่งผลลัพธ์เป็นไปตามสมการที่ 8

$$S_{R_4}^Q = -S_{R_2}^Q = 1.5 \quad S_{C_3}^Q = -S_{C_1}^Q = 0.5 \quad (8)$$

ค่าความไวของพารามิเตอร์ Q จากสมการที่ 8 ก็ยังถือว่ายังมีค่ามาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการออกแบบใหม่เพื่อพยายามลดค่าความไวให้ต่ำลงและเข้าใกล้ศูนย์ให้ได้มากที่สุด

กรณีที่ 2 C เท่า R ไม่เท่า [2] : เมื่อต้องออกแบบให้ได้ค่าพารามิเตอร์ $Q=1$ จากสมการที่ 3 อัตราการขยายจึงสามารถกำหนดให้เป็น $K=1$ และความถี่ที่ต้องการเป็น $f_c = 4.8 \text{ kHz}$ เริ่มต้นเลือกตัวเก็บประจุ $C_1 = C_3 = 2000 \text{ pF}$ และทำการออกแบบใหม่เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกรณีที่ 1 ให้ดีขึ้นโดยอาศัยสมการที่ 9 และ 10 เพื่อหาค่าตัวต้านทานภายในวงจรดังนี้

$$R_2 = \frac{1}{2\omega_n C Q} = \frac{1}{4\pi F_n C Q} \quad (9)$$

สามารถแทนค่า ω_n จากสมการที่ 2 และหาค่า R_4 จะได้

$$R_4 = \frac{2Q}{\omega_n C} = \frac{Q}{\pi F_n C} \quad (10)$$

จากสมการทั้งสองจึงสามารถคำนวณหาค่า $R_2 = 8.25 \text{ k}\Omega$ และ $R_4 = 33.2 \text{ k}\Omega$ ดังนั้นจากสมการความไว 6 และ 7 สามารถคำนวณค่าความไวใหม่ได้ดังสมการที่ 11

$$S_{R_4}^Q = -S_{R_2}^Q \approx 0.5 \quad S_{C_3}^Q = -S_{C_1}^Q \approx 0 \quad (11)$$

ผลจากสมการที่ 11 ก็ยอมรับได้เพราะถือว่าน้อยกว่าการออกแบบในครั้งแรกและเป็นที่น่าพอใจแต่ถ้าไม่ตรงตามเป้าหมายการออกแบบ จะต้องทำการออกแบบลองผิดลองถูกโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานให้เหมาะสมต่อไปเรื่อยๆ ก็จะสามารถทำให้ค่าความไวลดลงได้ตามต้องการ ซึ่งนั่นก็เป็นการเพิ่มความยุ่งยากให้กับผู้ออกแบบได้มากเช่นกัน

3. ระเบียบวิธีวิวัฒนาการแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi-objective Evolutionary Algorithms (MOEAs))

จากการออกแบบที่ผ่านมาผู้ออกแบบมักจะพยายามกำหนดขอบเขตของปัญหาที่มีอยู่หลายฟังก์ชันเป้าหมายให้รวมเป็นเพียงฟังก์ชันเดียว (Single Objective Problem) เรียกวิธีนี้ว่า “From Multiple to Single Objective” [18] ซึ่งมีอยู่หลายวิธีเช่น Weighted-sum method, Global criteria method และ Game theory เป็นต้น แต่ในปัจจุบันปัญหาหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi-objective Problems: MOPs) ได้มีงานวิจัยในกลุ่มของ MOEAs สำหรับช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวและเป็นที่ยอมรับเนื่องจากการประยุกต์ใช้งานง่าย รูปแบบการออกแบบปัญหาของ MOPs สามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันได้ดังนี้

การหาค่าคำตอบหรือการหาค่าตัวแปรออกแบบ X ที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย f มีค่าน้อยที่สุด สามารถเขียนได้เป็น

$$\text{Min: } f = \{f_1(X), \dots, f_p(X)\}$$

Subject to

$$g_i(X) \leq 0$$

$$h_i(X) = 0$$

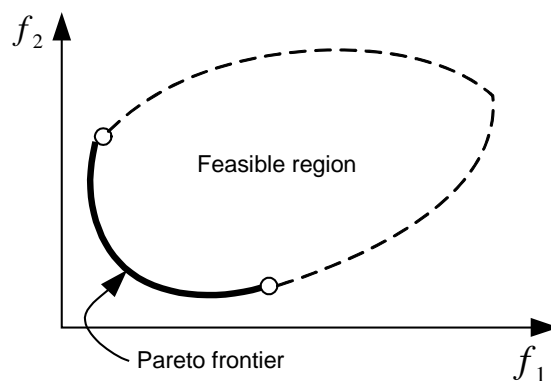
เมื่อ X คือเวกเตอร์ของตัวแปรออกแบบ

f_i คือฟังก์ชันเป้าหมาย p ฟังก์ชัน

g_i คือเงื่อนไขบังคับไม่เท่ากับ

h_i คือเงื่อนไขบังคับเท่ากับ

ตัวอย่างเช่นการหาค่าที่น้อยที่สุดเมื่อมีสองฟังก์ชันเป้าหมายคือ f_1 และ f_2 และนำค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองมาแสดงในรูปแบบของ *curve* ที่มี Pareto frontier ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 Pareto frontier ของสองฟังก์ชันเป้าหมาย

จากรูปที่ 2 ค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชัน f_1 คือจุด \circ ที่อยู่ห่างออกไปทางด้านซ้ายของขอบเขตหาคำตอบได้ (Feasible region) ส่วนค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชัน f_2 คือจุด \circ ที่อยู่ต่ำลงมาทางด้านขวาของ Feasible region และทั้งสองจุดนี้เรียกว่าจุดทอดสมอ (Anchor Point) ส่วนจุดที่อยู่บน *curve* ระหว่างสองจุด anchor เรียกว่า “trade-off ระหว่าง f_1 และ f_2 ” ดังนั้นจากภาพเป็นการแสดงขอบเขตที่หาคำตอบได้ของปัญหาการออกแบบสองเป้าหมายที่มีความขัดแย้งกันบนโดเมนของฟังก์ชันเป้าหมายจากรูปจะเห็นได้ว่า ผลเฉลยของปัญหามีมากกว่าหนึ่งและเมื่อรวมผลเฉลยทั้งหมดจะได้เส้นโค้งที่แรงงาที่บิซึ่งเรียกว่าแนวของพารेटอส่วนผลเฉลย (x) ที่อยู่บนพารेटอเรียกว่าเซตผลเฉลยเหมาะสมสุดของพารेटอ (Pareto optimal set)

3.1 PBIL แบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi-objective PBIL)

ขั้นตอนของวิธี PBIL มีหลักการในการกำเนิดประชากรโดยการพิจารณาความเป็นไปได้ของแต่ละบิต (bit) ของค่าไบนารีสตริง ‘0’ หรือ ‘1’ เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าความเป็นไปได้เท่ากันหมด ค่าความเป็นไปได้จะถูกเปลี่ยนแปลงในขบวนการค้นหาค่าความเหมาะสมที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าฟังก์ชันเป้าหมายหรือค่า fitness ของโครโมโซมที่ดีที่สุด

ตัวอย่างการใช้ค่าความเป็นไปได้ของบิต (Bit) พิจารณาประชากร 3 กลุ่ม ประกอบด้วยค่าความเป็นไปได้ของแต่ละโครโมโซม ถ้าความเป็นไปได้เท่ากับ 1 ทุกบิตในแต่ละหลักจะเท่ากับ 1 แต่ถ้าเท่ากับ 0 ทุกบิตในหลักนั้นก็เท่ากับ 0

Population 1	Population 2	Population 3
0 0 1 0,	0 1 0 1,	1 1 0 1
1 0 0 1,	1 1 1 0,	0 0 0 1
1 1 1 0,	0 0 0 1,	1 1 0 1
0 1 0 1,	0 0 0 0,	0 1 1 0
Probability vectors		
[0.5, 0.5, 0.5, 0.5]	[0.25, 0.5, 0.25, 0.5]	[0.5, 0.75, 0.25, 0.75]

รูปที่ 3 แสดงเลขไบนารีสตริง ‘0’ และ ‘1’ ของแต่ละหลักตามค่าเวกเตอร์ความเป็นไปได้

ค่าเวกเตอร์ความเป็นไปได้ที่เป็นผลเฉลย สำหรับการออกแบบที่มีหลายฟังก์ชันเป้าหมาย PBIL จะใช้จำนวนของเวกเตอร์ที่เป็นไปได้ซึ่งเรียกว่าเมตริกความเป็นไปได้ (Probability matrix) ค่าเวกเตอร์ความเป็นไปได้มีการพัฒนาดังสมการ 15

$$P_{i,j}^{new} = P_{i,j}^{old} (1 - LR) + \bar{b}_j LR \quad (15)$$

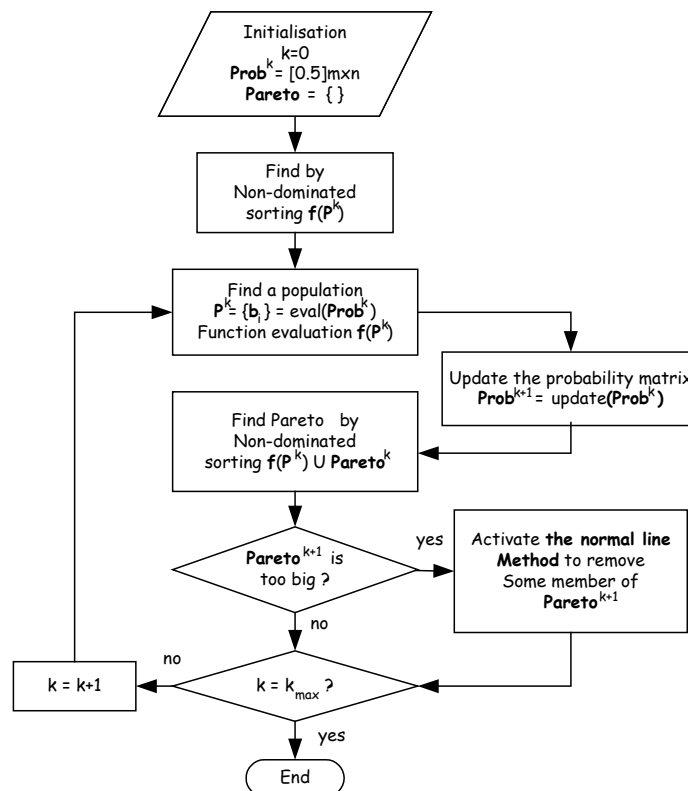
เมื่อ LR คืออัตราการเรียนรู้ \bar{b}_j คือค่าเฉลี่ยของโบนารีสตริงของโครโมโซมที่ดีที่สุดของตำแหน่งคอลัมน์ j^{th} ดังนั้นอัตราการเรียนรู้กำหนดได้เป็น

$$LR = 0.5 + rand \cdot (+0.1 \text{ or } -0.1) \quad (16)$$

เมื่อ $rand \in [0,1]$ คือค่าการสุ่มตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 สำหรับการผ่าเหล่าบนแถว i^{th} เมตริกความเป็นไปได้จะอาศัยค่าความเป็นไปได้ที่ได้จากการสุ่มดังสมการ 17

$$P_{i,j}^{new} = P_{i,j}^{old} (1 - ms) + rand(0 \text{ or } 1).ms \quad (17)$$

เมื่อ $P_{i,j}^{new}$ คือ การเปลี่ยนแปลงค่า $P_{i,j}^{old}$ ใหม่ และ ms คือ ค่าคงที่ของจำนวนช่วงการดำเนินการเปลี่ยนแปลง หลักการทำงานของแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมายของ PBIL อธิบายได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ฟังก์การทำงานของ PBIL [18]

3.2 การกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function setting)

การแก้ปัญหาเชิงของระบบที่ต้องการนำมาทดสอบนั้น การออกแบบปัญหา ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญ สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วย การกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย และกำหนดเงื่อนไข บังคับรวมถึงการกำหนดขอบเขตของตัวแปรให้อยู่ภายใต้สมมติฐานที่ตั้งไว้และมีรายละเอียดดังนี้

ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective functions)

$$f_1 = \frac{|\Delta\omega|}{\omega_n}, \quad f_2 = \frac{|\Delta Q|}{Q}$$

เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

$$S_1 = \left| -0.5 + Q \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_4 C_3}} \right|$$

$$S_2 = \left| -0.5 + Q \left[\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_4 C_3}} + \sqrt{\frac{R_2 C_3}{R_4 C_1}} \right] \right|$$

โดยที่

$$S_1 + S_2 < 0.5$$

เมื่อ S_1 คือความไวของ Q เมื่อเก็บประจุ C_1, C_3 มีการเปลี่ยนค่า และ S_2 คือความไวของ Q เมื่อตัวต้านทาน R_2, R_4 มีการเปลี่ยนค่า

ขอบเขตของตัวแปร (Boundary of variables) และค่าคงที่ (Constants)

$$10 \Omega \leq [R_2 \text{ and } R_4] \leq 820 \text{ M}\Omega$$

$$0.1 \text{ pF} \leq [C_1 \text{ and } C_3] \leq 8200 \text{ }\mu\text{F}$$

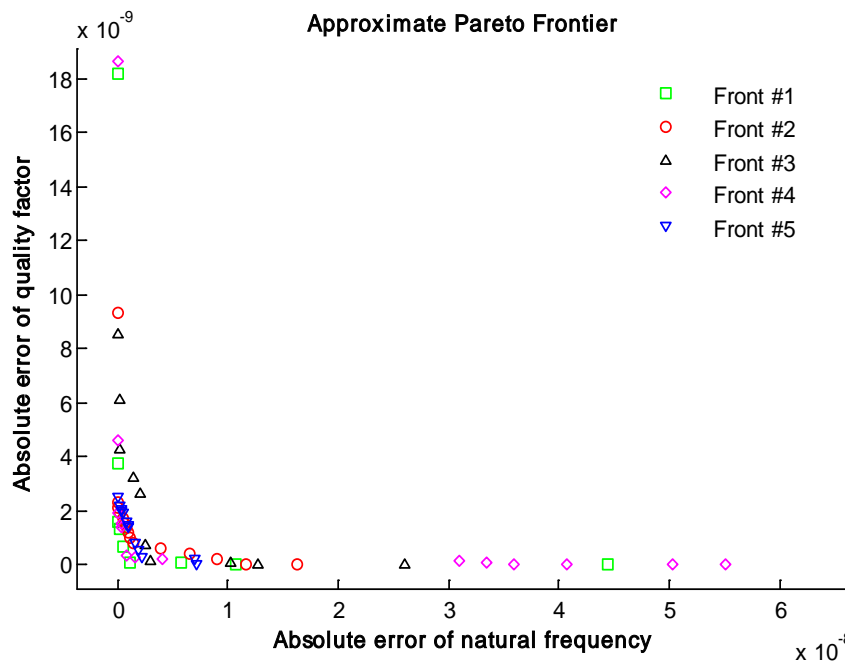
$$Q = 1.0, \quad f_c = 4.8 \text{ kHz}$$

4. ผลการทดสอบ

การออกแบบด้วย PBIL ในส่วนการกำหนดค่าเริ่มต้นของการออกแบบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ $Q = 1$ เพื่อให้สอดคล้องกับการออกแบบกับวิธีดั้งเดิมทั้งสองกรณีในข้างต้นเพื่อให้การเปรียบเทียบ คุณลักษณะทางด้านความไวของพารามิเตอร์ Q เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ส่วน อัตราการขยาย สามารถ

กำหนดให้เป็น $K = 1$ ได้ และความถี่ที่ต้องการเป็น $f_c = 4.8 \text{ kHz}$ การคำนวณหาค่าความไว ของพารามิเตอร์ Q ยังคงใช้สมการ 6 และ 7 เหมือนกับการออกแบบเช่นเดียวกับวิธีดั้งเดิม

ในส่วนของการออกแบบด้วยระเบียบวิธี PBIL ภายในบทความนี้ได้กำหนดขนาดของความยาวของบิตเท่ากับ 20 บิต ($n_b = 20$) ความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า 0.05 และการคลาดเคลื่อนของการผ่าเหล่าเท่ากับ 0.2 ($m_s = 0.2$) และผลลัพธ์จำนวน 5 ครั้งหรือ 5 พารेटอฟรอนที่สามารถนำมาเป็นคำตอบสำหรับออกแบบวงจรองความถี่สูงแสดงได้ดังรูปที่ 5



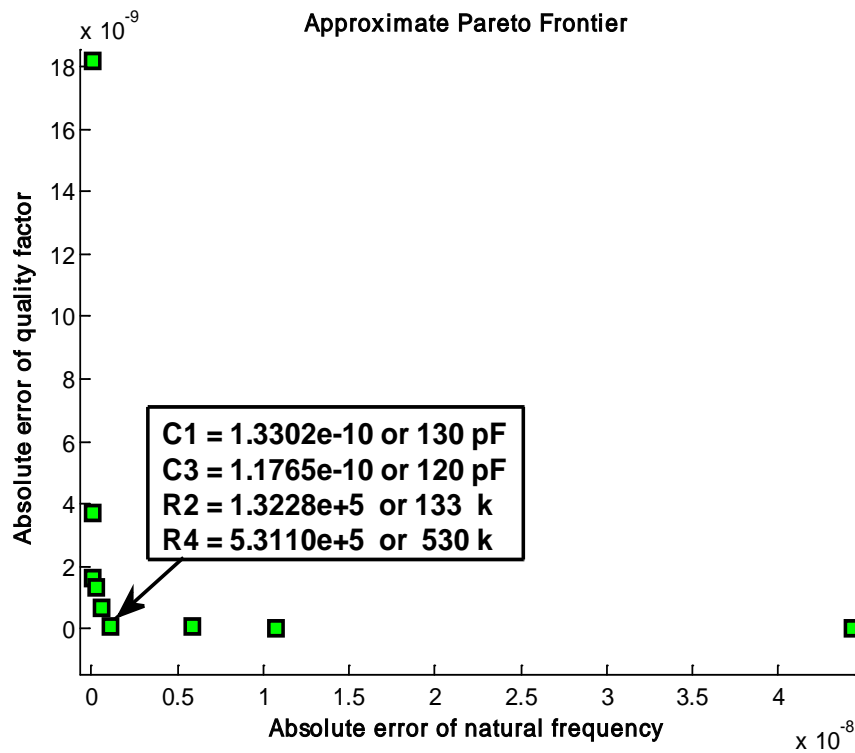
รูปที่ 5 พารेटอฟรอนจำนวน 5 ครั้ง ของฟังก์ชันเป้าหมาย

จากพารेटอฟรอนรูปที่ 5 พบว่าแนวโน้มของค่าผิดพลาดของความถี่ธรรมชาติในแกนนอนและค่าประสิทธิภาพในแกนตั้งมีค่าต่ำมากมากจึงทำให้แนวพารेटอใกล้เคียงกันมากจนทำให้บางพารेटอเกือบจะเป็นแนวเดียวกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้ออกแบบสามารถเลือกฟรอนตัวไหนมาเป็นคำตอบก็ได้ ดังนั้นจึงเลือกฟรอนที่มีค่าผิดพลาดต่ำสุดคือ Front #1 มาเป็นคำตอบ และแสดงได้ดังรูปที่ 6

จากพารेटอฟรอนที่ได้จากการออกแบบด้วย PBIL ในรูปที่ 6 ทุกๆ จุดสามารถนำมาเป็นคำตอบในการออกแบบได้ แต่ผู้ออกแบบสนใจเลือกจุดบนแนวพารेटอมาเป็นคำตอบเพียงหนึ่งจุดเท่านั้น ซึ่งจุดที่เลือกมาจะเป็นกลุ่มของคำตอบที่ประกอบไปด้วยค่าของอุปกรณ์หรือค่าตัวแปรออกแบบทั้งหมด แสดงได้ดังตารางที่ 1 และค่าของฟังก์ชันเป้าหมายแสดงได้ดังตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการเลือกอุปกรณ์ด้วยการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธี PBIL

Parameter	Conventional Design		Using PBIL Algorithm
	Case 1	Case 2	
Q	1.0	1.003	0.997
ω_n (rad / s)	30303.030	30211.618	30156.015
R_2 (k Ω)	16.5	8.25	133
R_4 (k Ω)	16.5	33.2	530
C_1 (pF)	2000	2000	130
C_3 (pF)	2000	2000	120
Error(%)	0.477	0.476	0.279



รูปที่ 6 พารेटอฟรอนต์ที่เลือกมาสำหรับออกแบบ

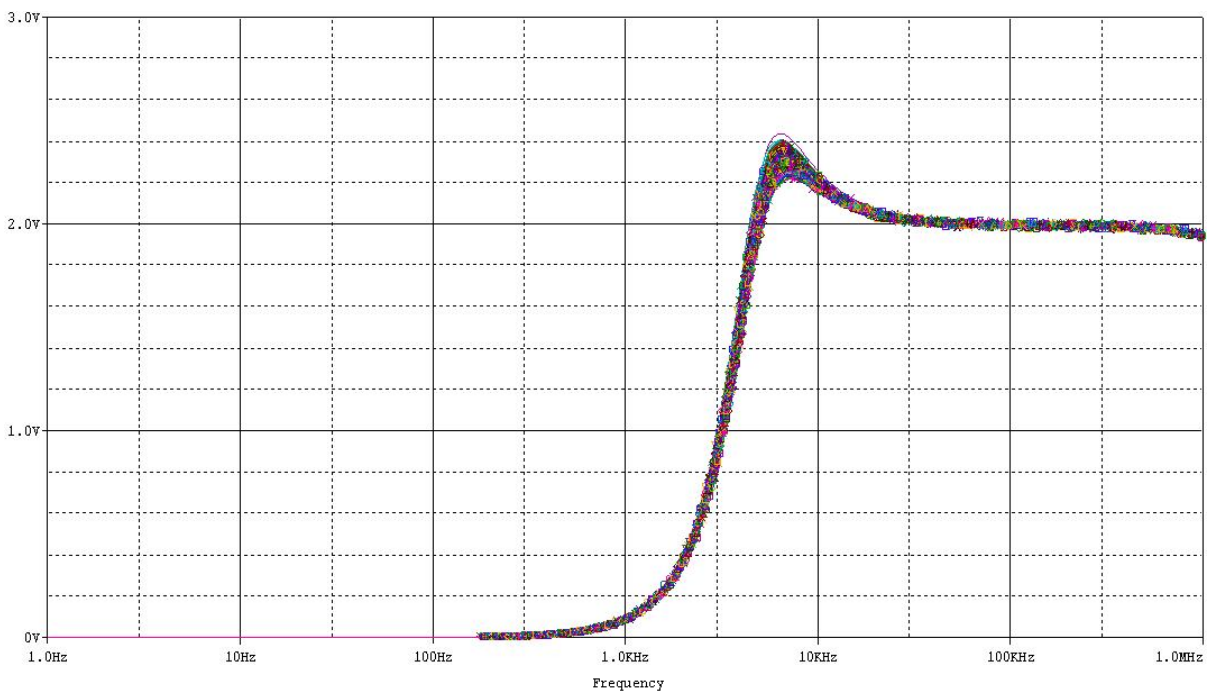
ตารางที่ 2 ค่าความไวของพารามิเตอร์ Q ของแต่ละวิธี

Sensitivity of Q	Conventional Design		Using PBIL Algorithm
	Case 1	Case 2	
$S_{R_4}^Q = -S_{R_2}^Q$	1.5	0.5	0.5
$S_{C_3}^Q = -S_{C_1}^Q$	0.5	0.0	0.02

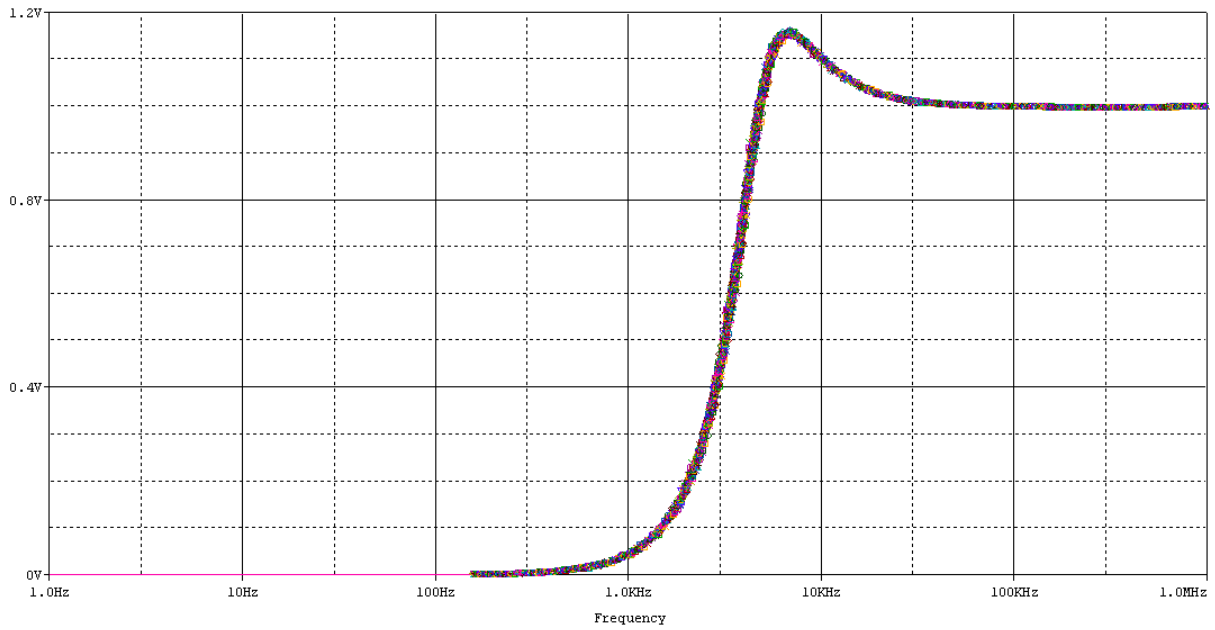
หมายเหตุ: 1) $Error(\%) = \left[\frac{|\Delta\omega|}{\omega_n} + \frac{|\Delta Q|}{Q} \right] \times 100$

2) ค่าอุปกรณ์ในตารางเทียบเคียงจากตารางมาตรฐานของตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานที่เรียกว่า "E192 series"

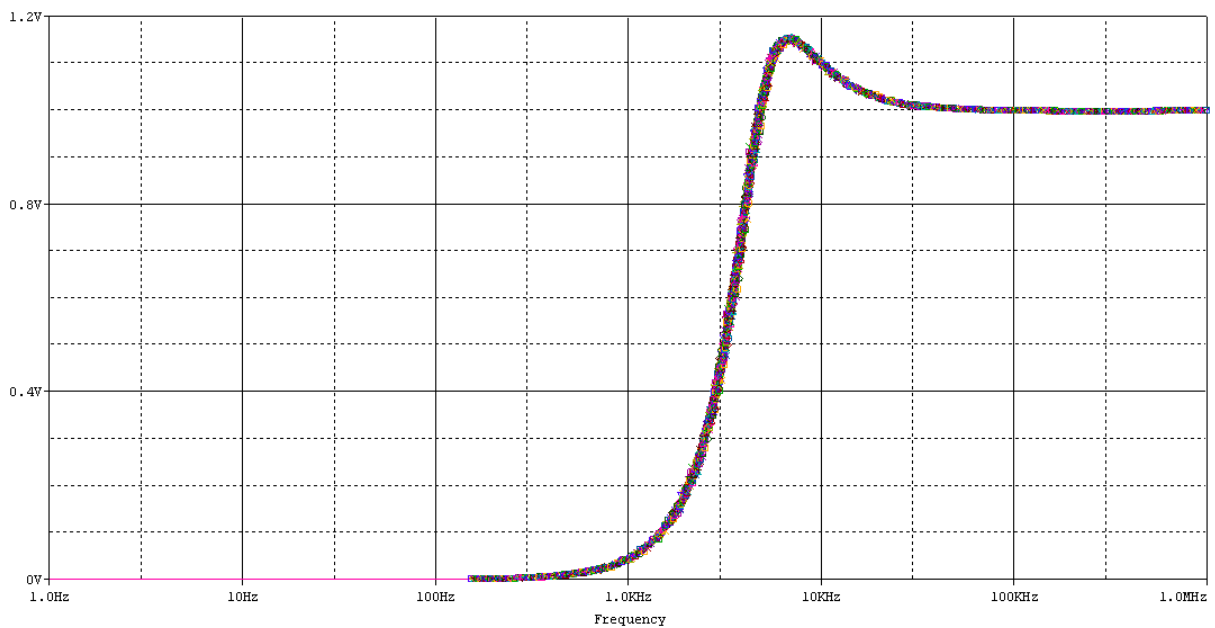
จากตารางที่ 1 พบว่าผลการออกแบบด้วยวิธี PBIL ให้ค่าผิดพลาดที่น้อยกว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมทั้งสองกรณีมาก และจากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า PBIL สามารถออกแบบให้ผลความไวของพารามิเตอร์ Q ใกล้เคียงกับวิธีดั้งเดิมกรณีที่ 2 และยังให้ผลของความไวต่ำกว่าวิธีดั้งเดิมกรณีที่ 1 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่า การจำลองในครั้งนี้เลือกใช้ Op-Amp เบอร์ TL082 การสร้างผลตอบสนองทางความถี่แต่ละครั้งจะใช้หลักการคำนวณที่เรียกว่า "Monte Carlo" ด้วยการคำนวณ 250 ครั้งที่แตกต่างกัน โดยสุ่มค่าของส่วนประกอบ Passive ให้อยู่ภายใต้ค่าผิดพลาดของตัวต้านทาน 1% และตัวเก็บประจุ 5% ผลทดสอบที่ได้ในแต่ละกรณีการออกแบบแสดงดังรูปที่ 7, 8 และ 9



รูปที่ 7 ผลตอบสนองทางความถี่ของการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม Case 1



รูปที่ 8 ผลตอบสนองทางความถี่ของการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม Case 2



รูปที่ 9 ผลตอบสนองทางความถี่ของการออกแบบด้วยวิธี PBIL

จากผลตอบสนองทางความถี่ทั้งหมดจะเห็นได้ว่าคุณลักษณะทางความไวของพารามิเตอร์ Q ของการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม Case 1 ในรูปที่ 7 มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าวิธีดั้งเดิม Case 2 ในรูปที่ 8 และ ความไวของพารามิเตอร์ Q ของการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม Case 1 ก็ยังมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าวิธี PBIL ในรูปที่ 8 อย่างเห็นได้ชัด ส่วนผลการทดสอบรูปที่ 8 และ 9 แสดงให้เห็นว่าความไวของ

พารามิเตอร์ Q ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม Case 2 กับ PBIL มีการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม Case 1 ไม่เหมาะสมที่จะนำมาสำหรับออกแบบถ้าผู้ออกแบบต้องการผลทางด้านความไวของพารามิเตอร์ Q ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยเป็นหลักสำคัญ แม้ว่า จะมีความง่ายในการออกแบบก็ตาม และผลตอบสนองทางความถี่ของทุกกรณีการออกแบบยังคงให้รูปการตอบสนองทางความถี่สูงได้ใกล้เคียงกับค่าความถี่ตัดที่กำหนด

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอ MOEAs ด้วยระเบียบวิธี PBIL ร่วมกับหลายฟังก์ชันเป้าหมายประยุกต์ สำหรับออกแบบวงจรกรองความถี่สูงอันดับที่สองของ Sallen-Key ภายได้เงื่อนไขค่าพารามิเตอร์ K , ω_n และ Q ที่กำหนด ไปพร้อมๆ กับการลดความไวของพารามิเตอร์ Q ให้เหมาะสมที่สุดเมื่อค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุภายในวงจรเกิดการเปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองตารางที่ 1 และ 2 พบว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมทั้งสองแบบให้เปอร์เซ็นต์ข้อผิดพลาดที่มากกว่าการออกแบบด้วยระเบียบวิธี PBIL ในด้านการลดความไวของพารามิเตอร์ Q แม้ว่าจะได้ค่าความไวที่ใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมแบบปรับปรุงใหม่ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม Case 1 ก็ยังให้ค่าความไวโดยรวมที่ต่ำกว่า นั่นก็แสดงให้เห็นว่าระเบียบวิธี PBIL สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งสะดวกในการออกแบบเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบดั้งเดิม ทั้งสองแบบ หรือวิธีการลองผิดลองถูก และยังเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบกับระบบที่มีหลายปัญหาแย้งได้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Coello CC, Romero CEM. Evolutionary Algorithms and Multiple Objective Optimization. Multicriteria Optimization. Ehrgott, Matthias; Gandibleux, Xavier (Eds). 2002: 277-331.
- [2] Huelsman, L.P. and Allen, P.E., Introduction to the Theory and Design of Active Filter, McGraw-Hill, New York, 1980.
- [3] C.P. Pantelides, S. –R Tzan. Modified iteration simulated annealing algorithm for structural synthesis Advances in engineering software 2001; 31 (2000): 391-400.
- [4] Coello CC. A short tutorial on evolutionary multiobjective optimization. Lecture Note in Computer Science, Springer 2001; 1993/2001: 21-40.
- [5] Sujin Bureerat and Sriworamas (2007), Population-Based Incremental Learning for Multiobjective Optimization, A Saad et al. (Eda.): Soft Computing in Industrial Application, ASC 39, 2007, pp. 223-232.
- [6] Tawatchai Kunakote and Sujin Bureerat (2011), Multi-objective Topology Optimization using Evolution Algorithms, Engineering Optimization, Vol. 43, No. 5, May 2011, p.541-557.

- [7] Baluja, S. (1994), Population-Based Incremental Learning: a Method for Integrating Genetic Search Base Function Optimization and Competitive Learning, Technical Report CMU_CS_95_163, Carnegie Mellon University 1994.
- [8] Schaffer, J.D. (1985), Multiobjective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms, In GAs and their Application: Proc. of 1st Inter Conf. On GAs 1985, pp.93-100.
- [9] Fonseca, C.M., and Fleming, P. j. (1993), Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization, In Proc. of 5th inter. Conf. on GAs 1993, pp.416-423.
- [10] Srinivas, N. and Deb, K (1994), Multiobjective Optimization Using Non-Dominated Genetic Algorithms, Evolutionary Computation, vol. 2(3), 1994, pp.221-248.
- [11] Knowles, J.D. and Corne, D.W. (2000), Approximating the Non-Dominated Front Using the Pareto Archive Evolution Strategy, Evolutionary Computation, Vol. 8(2), 2000, pp.149-172.
- [12] Zitzler, E. and Thiele, L. (1999), Multiobjective Evolution algorithm: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach, Transactions on Evolutionary Computation, vol.3(4), 1999, pp.257-271.
- [13] Reyes-Sierra, M. and Coello Coello, C.A.(2006), Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art, Int. J. of Computation Intelligence Research, vol.2(3), 2006, pp.287-308.
- [14] Joseba Urzelai, Dario Floreano. Incremental Evolution with Minimal Resources. Microprocessor and Interface Lab (LAMI) Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), CH-1015 lausanne.
- [15] Sallen, R.P. and Key, E.L., "A Practical Method of Designing Active Filter," IRE Transactions on Circuit Theory, vol. CT-2, pp.74 to 85, March 1995.
- [16] Budak, Aram, Passive and Active Network Analysis and Synthesis, Houghton Mifflin Company, Boston, 1974.
- [17] Ghausi, M.S. and Laker, K.R., Modern Filter Design: Active RC and Switched Capacitor, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1981
- [18] Bureerat S. Lecture Notes on Mechanical System Optimisation. Khon Kean University 2008, Thailand.

บทความนี้ส่งเข้ามาเมื่อ 22 สิงหาคม 2554 และได้รับพิจารณาให้ตีพิมพ์เมื่อ 9 กันยายน 2554