การหาตำแหน่งเหมาะที่สุดสำหรับติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าส่งออกให้มากที่สุดโดยวิธีวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์

Finding the Wind Farm Layout Optimisation by Using Differential Evolution Algorithm for the Maximum Output of Electricity

ธวัฒน์ชัย คุณะโคตร[1*], ณัญธิวัฒน์ พลดี[1]และ สุจินต์ บุรีรัตน์[1]

[1*] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามจังหวัดมหาสารคาม 44150
[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นจังหวัดขอนแก่น 4002
Tel: 0-4375-4321 E-mail: tawatchai.k@msu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวิวัฒนาการเพื่อใช้ออกแบบหาตำแหน่งเหมาะที่สุดสำหรับติดตั้งกังหันลมที่สามารถให้ประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการผลิตไฟฟ้าพร้อมกันนั้นต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยต้องต่ำที่สุดด้วยและต้องอยู่ภายใต้ข้อกำหนดที่จำเป็นในการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วยการสูญเสียเนื่องจากอิทธิพลเวก (wake loss effect) ผลกระทบจากลักษณะพื้นที่ภูมิอากาศโดยรอบ (terrain effect) และการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์ (Differential Evolution, DE) จะถูกนำมาใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้นโดยใช้ค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Scaling Factor, F) และความน่าจะเป็นในการสลับสายพันธ์ (Crossover rate, C_r) หลายค่าเพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพในการหาคำตอบ ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะทำให้เราทราบถึงสมรรถนะของ วิธี DE กับการประยุกต์ใช้ออกแบบค้นหาจำนวนกังหันลมพร้อมตำแหน่งติดตั้งเหมาะที่สุดที่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยรวมสูงสุดของพื้นที่ในการออกแบบ

คำหลัก: กังหันลม; ทุ่งกังหันลม; วิธีวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์; อิทธิพลเวก; การหาค่าเหมาะที่สุด

Abstract

This paper presents wind turbine layout optimization evolutionary algorithms. The problem is posted to maximize total energy output and minimize cost of energy while the design variables are the number and locations of wind turbine. Weak and terrain effect and economic are included in the energy and cost analysis model. Differential Evolution algorithm (DE) is used to solve the problem using various sets of the scaling factor (F) and crossover rate (C_r). The effect of F and C_r value on the DE performance for solving such a design problem is investigated. Base on this study, the performance of DE wind farm layout optimization is demonstrated whereas optimum number of turbines and their locations for a defined space is obtained.

Keywords: wind turbines; wind farm; differential evolution; wake decay model; optimisation

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีปริมาณที่สูงขึ้น [1] เนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งพลังงานไฟฟ้ายังเป็นองค์ประกอบจำเป็นหลักในการดำเนินชีวิตประจำวันตลอด 24 ชั่วโมง ในการผลิตกำลังงานไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องแลกมากับการสูญเสียสภาพแวดล้อมบริเวณที่สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เช่น เขื่อนกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน และ/หรือ โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ โดยเฉพาะ 2 ประเภทหลังสุด ขบวนการจัดการควบคุมต้องไม่มีข้อผิดพลาด เพราะมลผิดที่เกิดขึ้นนั้นรุนแรงต่อสรรพชีวิตทุกชนิด ดังนั้นการหาพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีผลกระทบน้อยที่สุดหรือไม่กระทบต่อสิ่งแวดล้อมเลย จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญมากกับการดำรงชีวิตในอนาคต และที่เห็นได้ชัดเจนในปัจจุบันนั้น คือ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์ และ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากกระแสลมหรือความเร็วลม เป็นต้น ทั้ง 2 ต้นกำเนิดกระแสไฟฟ้าก็มีข้อดีและข้อจำกัดที่ต่างกันออกไป คือ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์ผลิตได้ในช่วงที่มีแสงเท่านั้น ส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากกระแสลมก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เฉพาะในช่วงที่มีลมผัดผ่าน แต่มีจุดเด่นคือสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตราบใดที่มีกระแสลมผัดผ่านเพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าที่มากพอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีบริเวณพื้นที่เหมาะสมหรือมีกระแสลมที่ให้พลังงานเพียงพอกับการหมุนใบพัดของกังหันลม (wind turbine) สำหรับใช้เป็นตำแหน่งจัดวางกลุ่มกังหันลมหรือที่เรียกว่า ทุ่งกังหันลม (wind farm) ซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ติดตั้งกลุ่มกังหันลมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า โดยกังหันลมนี้จะทำหน้าเปลี่ยนพลังงานจากกระแสลมตามธรรมชาติ [2] เป็นพลังงานกลเพื่อไปขับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า ทุ่งกังหันลมอาจจะติดตั้งได้ทั้งในพื้นที่บนบกหรือในทะเล โดยมากกังหันลมขนาดใหญ่จะใช้กังหันลมชนิดแกนแนวนอนที่มี 3 ใบพัดหันหน้าเข้าสู่กระแสลม [2] จากพลังงานจลน์ที่เกิดจากกระแสลมจะทำให้ใบพัดกังหันเกิดการหมุน และพลังงานกลที่ได้จากการหมุนของกังหันจะถูกเปลี่ยนรูปพลังงานไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่กับแกนหมุนของกังหัน หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านระบบควบคุมไฟฟ้าและจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าระบบสายส่งต่อไป [3]

ด้วยเงื่อนไขการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมตามธรรมชาตินั้น ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญยิ่งเพื่อรับพลังงานลจลน์ของกระแสลมให้ได้มากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นทิศทางตั้งรับตามธรรมชาติ ระยะห่างของแต่ละชุดกังหันลม เพื่อหลีกเลี่ยงความปั่นป่วนที่ทำให้พลังงานจากกระแสลมลดลงเนื่องจากอิทธิพลของเวก (wake) หรือลมเคลื่อนที่ผ่านกังหันจะมีอัตราเร็วลดลงและเกิดเป็นกลุ่มลมด้านหางที่มีความปั่นป่วนเมื่อเปรียบเทียบกับลมด้านหน้ากังหัน [3] ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความปั่นป่วนด้านหลังของกังหันลม จึงได้จัดวางกังหันลมในฟาร์มกังหันให้ห่างกันอย่างน้อยเป็นระยะ 7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดอย่างไรก็ตาม แม้ว่าการจัดวางกังหันลมในฟาร์มกังหันลมถูกกำหนดระยะมาตรฐานเอาไว้ แต่การวางกังหันลมทุกๆ ระยะห่างดังกล่าวในฟาร์มกังหันลมนั้น จะมีต้นทุนที่สูงและในขณะเดียวกันกังหันลมที่อยู่ในตำแหน่งใต้ลม ก็ไม่สามารถผลิตพลังงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากพลังงานลมถูกดูดซับไปแล้วจากกังหันลมตัวที่อยู่ด้านหน้าเหนือลม ดังนั้นการค้นหาตำแหน่งติดตั้งกังหันลมในทุ่งกังหันลมให้เหมาะที่สุดเพื่อที่จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยรวมได้สูงสุดจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง และปัจจุบันพบว่ามีหลายงานวิจัยได้นำเอาเทคนิคของการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวิธีวิวัฒนาการเข้ามาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งเหมาะที่สุดสำหรับติดตั้งกังหันลมในทุ่งกังหันลม [4] ซึ่งวิธีวิวัฒนาการที่นิยมใช้ เช่น genetic algorithm [5], Ant colony algorithm [6] ฯลฯ แม้ว่าจะมีงานวิจัยบางส่วนได้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีวัฒนาการในการหาตำแหน่งติดตั้งเหมาะที่สุดของกังหันลมในทุ่งกังหันลม แต่ในปัจจุบันพบว่าการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีวิวัฒนาการได้ถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างมากมายและหลายๆ วิธียังไม่ถูกนำมาศึกษาในปัญหาดังกล่าว

งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะนำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาที่มีชื่อว่า ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์ (Differential Evolution, DE) [7] มาเป็นเครื่องมือสำหรับค้นหาจำนวนกังหันลมพร้อมตำแหน่งติดตั้งในทุ่งกังหันลมที่สามารถผลิตไฟฟ้าทั้งระบบได้สูงสุด ภายใต้เงื่อนไขในการออกแบบ [8]

2. การหาตำแหน่งเหมาะที่สุดสำหรับติดตั้งกังหันลม

การหาตำแหน่งเหมาะที่สุดเพื่อติดตั้งกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยให้ได้มากที่สุดนั้นสิ่งที่จำเป็นต้องพิจารณาคือ

2.1 การวิเคราะห์ด้านพลังงานลมว่ามีปริมาณพลังงานที่สามารถผลิตไฟฟ้าจากตำแหน่งการติดตั้ง
2.2 การประเมินและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ด้านเศรษฐศาสตร์ของโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้า
2.3 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการติดตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศเสมือนจริง

กรณีศึกษานี้เป็นการสาธิตการหาตำแหน่งติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าโดยใช้วิธีวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์สำหรับหาตำแหน่งติดตั้งเหมาะที่สุดและมีวัตถุประสงค์ในการจัดตั้งทุ่งกังหันลมคือ การหาต้นทุนต่ำสุดหรือเหมาะที่สุดสำหรับติดตั้งกังหันลมดังสมการที่ 1 [8-9]

Minimise:

$$fitness = \frac{\left(c_t \cdot n + c_s \cdot floor\left(\frac{n}{m}\right)\right)\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot e^{-0.00174n^2}\right)}{(1-(1+r)^{-y})/r} + \frac{c_{OM} \cdot n}{(1-(1+r)^{-y})/r} \cdot \frac{1}{8760P} + \frac{0.1}{n} \qquad (1)$$

โดยค่าที่กำหนดและตัวแปรออกแบบในฟังก์ชันเป้าหมายอ้างอิงจาก [8] เพื่อทดสอบสมรรถนะของวิธี DE ซึ่งประกอบด้วย

n = จำนวนกังหันลม (ตัวแปรออกแบบ)
c_t = 750,000 usd คือ ต้นทุนกังหันลม
c_s = 8,000,000 usd คือ ต้นทุนสถานีติดตั้ง
m = 30 คือจำนวนกังหันลมต่อ 1 หน่วยสถานีติดตั้ง
r = 0.03 interest rate
y = 30ปี คือ ช่วงระยะเวลาการทำงานผลิตไฟฟ้าของทุ่งกังหันลม
c_{OM} = 20,000 usd คือต้นทุนการดำเนินการประจำปีของกังหันลมต่อเครื่องและ

P หรือ $P_{\text{wind farm}}$ คือ พลังงานทั้งหมดที่ได้จากทุ่งกังหันลม คำนวณได้จากสมการที่ 2

$$P_{\text{wind fram}} = \sum_{i=1}^{n} P_i \qquad (2)$$

โดยที่ P_i หรือ P_{WT} คือ พลังงานจากกังหันลมแต่ละตัวคำนวณได้ตามสมการที่ 3 [3, 10]

$$P_{WT} = \eta\left(\frac{1}{2}\rho A V^3\right) \qquad (3)$$

เมื่อ P_{WT} คือ พลังงานจากกังหันลม η คือ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของกังหันลม ρ คือ ความหนาแน่นของลม (kg/m^3) A คือ พื้นที่กวาดของใบกังหัน (m^2) และ V คือ ความเร็วลม (m/s)

3. วิธีวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์ [7]

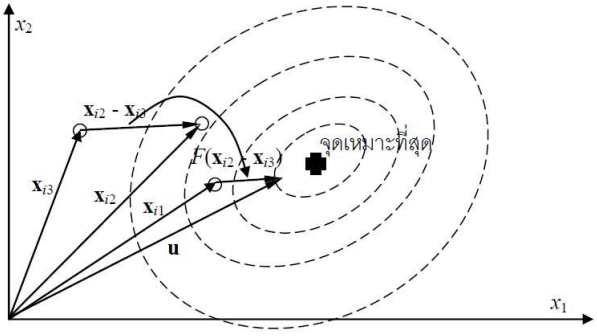
วิธีวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์ (DE) เป็นขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการเพื่อหาค่าเหมาะที่สุด โดยที่ขั้นตอนการคำนวณของ DE จะใช้กลุ่มประชากรในการหาคำตอบและแต่ละรอบการคำนวณกลุ่มประชากรจะวิวัฒนาการเข้าสู่ผลเฉลยเหมาะที่สุดโดยใช้ผลต่างของเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ ตัวดำเนินการของ DE ประกอบด้วย การมิวเทชัน คลอสโอเวอร์ และ การคัดเลือก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

มิวเทชัน

กำหนดให้ประชากรในรอบการคำนวณปัจจุบันคือ $\mathbf{P} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1, \ldots, \mathbf{x}_n\}$ และสามารถสร้างผลเฉลยลูก $\mathbf{u}_i$ ด้วยการมิวเทชันโดยใช้สมการ

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{x}_{i1} + F(\mathbf{x}_{i2} - \mathbf{x}_{i3}) \qquad (4)$$

เมื่อ $F \in [0, 1]$ คือตัวประกอบมาตราส่วน (scaling factor) $\mathbf{u}_i$ คือ ผลเฉลยจากการมิวเทชัน $\mathbf{x}_{i1}$ คือ เวกเตอร์ผลเฉลยดีที่สุดในสมาชิกของประชากรในรอบคำนวณปัจจุบัน $\mathbf{x}_{i2}$ และ $\mathbf{x}_{i3}$ คือ เวกเตอร์ผลเฉลยที่ได้มาจากการเลือกแบบสุ่มในกลุ่มสมาชิกของประชากร ทั้งนี้ $\mathbf{x}_{i2} \neq \mathbf{x}_{i3}$



รูปที่1 มิวเทชันของวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์

ครอสโอเวอร์

เมื่อได้ u_i จากการมิวเทชันแล้วผลเฉลยลูก u_i จะต้องนำมาทำการครอสโอเวอร์กับผลเฉลย พ่อ-แม่ x_i ซึ่งจะได้ผลเฉลยลูกสุดท้าย v_i ในที่นี้การครอสโอเวอร์จะใช้แบบทวิภาค (binary crossover) โดยเอลิเมนต์ที่ j-th ของ v_i เขียนแทนด้วย $v_{i,j}$ ซึ่งหาได้จาก

$$v_{i,j} = \begin{cases} u_{i,j}; rand \le c_R \\ x_{i,j}; rand > c_R \end{cases} \qquad (5)$$

เมื่อ $c_R \in [0, 1]$ คือ อัตราการครอสโอเวอร์ (crossover rate)

การคัดเลือก

เมื่อได้เวกเตอร์ผลเฉลยที่เป็นสมาชิกของประชากรลูก v_i ด้วยการมิวเทชันและครอสโอเวอร์แล้ว จากนั้นหาค่าฟังก์ชันเป้าหมายของผลเฉลยลูกและนำมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยพ่อ-แม่ ณ ตำแหน่งเดียวกัน x_i ผลเฉลยที่ดีกว่าจะถูกเลือกเป็นสมาชิกของประชากรในรอบการคำนวณถัดไป จากนั้นทำการสลับตำแหน่งของสมาชิกในประชากรรอบถัดไปแบบสุ่มดำเนินการซ้ำจนกระทั่งได้ค่าเหมาะที่สุด

กระบวนการค้นหาผลเฉลยเหมาะที่สุดด้วยวิธี DE มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนเริ่มต้น

กำหนดพารามิเตอร์ที่จำเป็นทั้งหมดและสร้างประชากรตั้งต้นพร้อมค่าฟังก์ชันเป้าหมายของสมาชิกในประชากร

ขั้นตอนคำนวณหลัก

1. ถ้าเงื่อนไขการหยุดคำนวณเป็นจริงหยุดการค้นหาผลเฉลยถ้าไม่เป็นจริงดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 2
2. หาประชากรลูกด้วยการมิวเทชันและครอสโอเวอร์
3. หาค่าฟังก์ชันเป้าหมายของประชากรลูก
4. ทำการคัดเลือกสมาชิกของประชากรในรอบถัดไประหว่างประชากร พ่อ-แม่ และประชากรลูก
5. สลับตำแหน่งของประชากรชุดใหม่แบบสุ่มและกลับไปขั้นตอนที่ 1

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> [7] จงหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน

$$f(x) = \frac{x_1^4 - 16x_1^2 + 5x_1}{2} + \frac{x_2^4 - 16x_2^2 + 5x_2}{2}$$

โดยที่ $-4 \le x_i \le 4$

กลุ่มของอนุภาคหรือตำแหน่งของผลเฉลยในรอบปัจจุบัน

ผลเฉลยที่	x_1	x_2	$f(x)$
1	0	2	-19.0000
2	-1	-3	-49.0000
3	-1.5	2.0	-38.2188
4	-3.0	-2.0	-68.0000
5	-2	2	-48.0000
6	-4	-1	0.0000

จงหาประชากรในรอบการคำนวณถัดไปด้วยวิธี DE

ขั้นตอนการคำนวณ

เริ่มต้น กำหนดให้ตัวประกอบมาตราส่วน F = 0.8 อัตราส่วนการครอสโอเวอร์ C_R = 0.7 โอกาศเกิดการมิวเทชัน 100% หรือ Pc = 1 ผลเฉลยดีที่สุดในประชากรชุดนี้ คือ$x_{i1} = \{-3.0, -2.0\}^T$ ส่วนดัชนี i_2 และ i_3 สำหรับผลเฉลยทั้ง 6 สามารถหาได้จากการสุ่มดังนี้

ผลเฉลยที่	1	2	3	4	5	6
i_1	3	3	4	4	1	4
i_2	2	4	5	2	2	2

การมิวเทชันสาหรับเวกเตอร์ลูกตัวที่ 1 หาได้จาก

$$\boldsymbol{u}_1 = \{-3.0, -2.0\}^T + 0.8[\{-1.5, 2.0\}^T - \{-3.0, -2.0\}^T]$$

เมื่อดำเนินการมิวเทชันกับสมาชิกทั้งหมดพร้อมทั้งจัดให้อยู่ในขอบเขตบนและล่างของตัวแปรออกแบบจะได้ประชากรลูกดังนั้น

ผลเฉลยที่	u_2	u_3
1	-3.5	3.0
2	-1.5	2.0
3	-4.0	4.0
4	-4.0	-1.0
5	-2.0	3.0
6	-4.0	-1.0

ผลเฉลยที่	$rand_1$	$rand_2$
1	0.3804	0.5678
2	0.0759	0.0540
3	0.5308	0.7792
4	0.9340	0.1299
5	0.5688	0.4694
6	0.0119	0.3371

จากการสุ่มตัวเลขจากตารางด้านบนพบว่าตัวเลขที่มีค่ามากกว่า C_R คือเอลิเมนต์ที่ 2 ของผลเฉลยที่ 3 และเอลิเมนต์ที่ 1 ของผลเฉลยที่ 4 นั่นหมายความว่าเอลิเมนต์ทั้ง

สองต้องใช้ค่าจากประชากร พ่อ-แม่ ส่วนเอลิเมนต์ที่เหลือใช้ค่าจากประชากรลูกซึ่งจะได้ประชากรลูกสุดท้ายดังนี้

ผลเฉลยที่	v_2	v_3	F
1	0	2	-19.0000
2	-1	-3	-49.0000
3	-1.5	2.0	-38.2188
4	-3.0	-2.0	-68.0000
5	-2	2	-48.0000
6	-4	-1	0.0000

จากนั้นทำการเปรียบเทียบประชากร พ่อ-แม่ กับประชากรลูกเพื่อคัดเลือกประชากรสำหรับรอบการคำนวณถัดไปดังนี้

ผลเฉลยที่	x_1	x_2	$f(x)$
1	-3.5	3.0	-55.7188
2	-1	-3	-49.0000
3	-1.5	2.0	-38.2188
4	-3.0	-2.0	-68.0000
5	-2.0	3.0	-53.0000
6	-4.0	-1.0	-20.0000

จากนั้นสลับตำแหน่งแบบสุ่มแล้วดำเนินการต่อในรอบการคำนวณถัดไป(ดูรายละเอียดพิมเต็มใน [7])

4. กรณีศึกษาออกแบบ

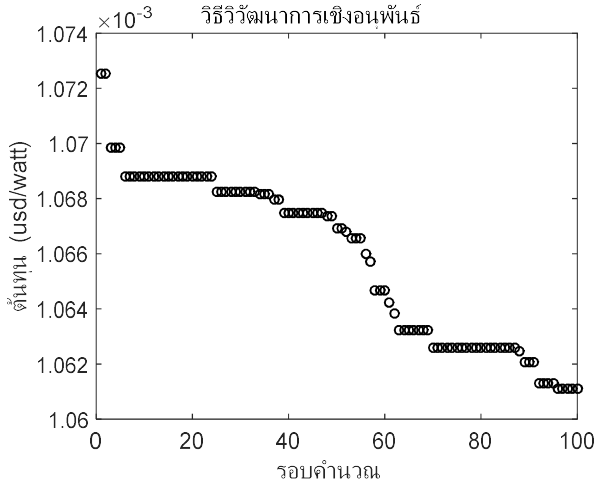
สำหรับกรณีศึกษาออกแบบนี้ได้กำหนดบริเวณพื้นที่ซึ่งมีขนาดความกว้าง 7000 เมตร สูง 14000 เมตร สำหรับใช้ทดสอบหาตำแหน่งติดตั้งกังหันลม โดยตำแหน่งติดตั้งแต่ละจุดห่างกัน 308 เมตร ทั้งในแนวกว้างและแนวสูงซึ่งมีตัวแปรออกแบบคือจำนวนกังหันลมและตำแหน่งติดตั้งกังหันลม พร้อมแบ่งแหน่งตลอดพื้นที่ทดสอบให้มีขนาดเท่ากับ 1058 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3 งานวิจัยนี้ได้กำหนดทิศทางของลมในทุกทิศทาง โดยใช้ข้อมูลจาก [8] ซึ่งกำหนดขนาดความเร็วและทิศทางของลม รวมถึงความน่าจะเป็นในการเกิดลมจากข้อมูลลมตลอดทั้งปี เพื่อนำมาคำนวณเป็นพลังงานที่จะผลิดได้ต่อปี ส่วนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบในวิธี DE คือ จำนวนประชากรเท่ากับ 50 และรอบในการคำนวนสำหรับหาคำตอบเท่ากับ 100 ส่วนค่าความน่าจะเป็นของการกำเนิดชุดประชากรใหม่แบ่งออกเป็น 5 ระดับดังตารางที่ 1 โดยจำนวนครั้งในการหาคำตอบเท่ากับ 5

ตารางที่ 2 ค่าความน่าจะเป็นที่ใช้ทดสอบ

No.	Pc	F	C_R
1	1	0.7	0.9
2	1	0.5	0.8
3	1	0.5	0.9
4	1	0.5	1
5	1	0.4	1

5. ผลการออกแบบ

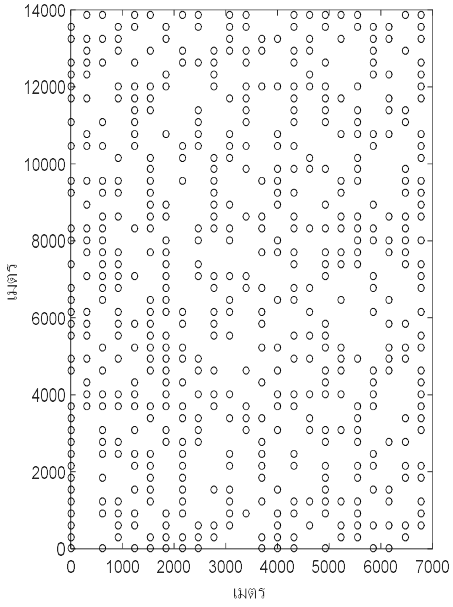
จากผลการทดสอบออกแบบทั้ง 5 กรณีทดสอบโดยพิจารณาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันเป้าหมายจากจำนวน 5 ครั้งในการหาคำตอบดังแสดงในตารางที่ 3 การกำหนดค่าความน่าจะเป็นสำหรับกรณีที่ 2 หรือ Pc = 1, F = 0.5 และ C_R= 0.8 ให้ค่าต้นทุนสำหรับติดตั้งกังหันลมต่ำสุด (usd/kw) โดยมีวิวัฒนาการสำหรับการปรับลดต้นทุนของแต่ละรอบดังรูปที่ 2 และได้จำนวนกังหันลมที่ 539 ตัว พร้อมตำแหน่งติดตั้งเหมาะที่สุดหรือตำแหน่งติดตั้งที่ให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยต่ำสุด ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4 พร้อมกันนั้นสามารถลดจำนวนกังหันลมหรือต้นทุนสำหรับติดตั้งลงได้ถึง 50.94% เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนเริ่มต้นออกแบบ



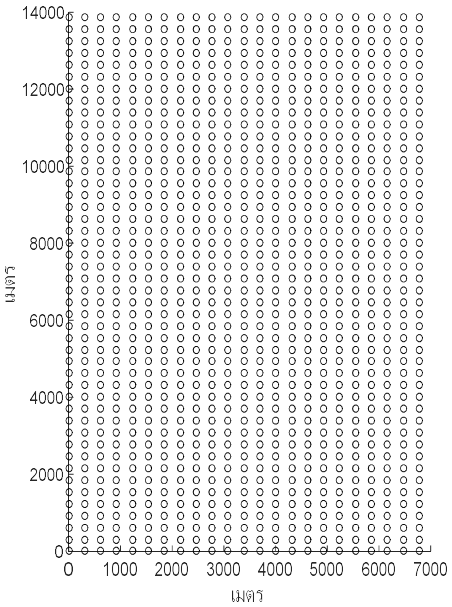
รูปที่ 2 วิวัฒนาการในการปรับลดต้นทุนของแต่ละรอบการคำนวณ

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณหาต้นทุนต่ำสุด (usd/kw) สำหรับติดตั้งกังหันลมจาก 5 กรณีทดสอบและ 5 ครั้งในการหาคำตอบ

run	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5
1	0.001065544	0.001061092	0.001063054	0.001063891	0.001069332
2	0.001066178	0.001063394	0.001061907	0.001063843	0.001068011
3	0.001065748	0.001062336	0.001063366	0.001065055	0.001066982
4	0.001063957	0.001063598	0.001061977	0.001068876	0.001064297
5	0.00106829	0.001062318	0.001064017	0.001065591	0.001067918
เฉลี่ย	0.001065944	0.001062548	0.001062864	0.001065451	0.001067308



รูปที่ 3 สัญลักษณ์ o คือตำแหน่งเริ่มต้นทั้งหมดที่จะติดตั้งกังหันลม



รูปที่ 4 จำนวนกังหันลมและตำแหน่งติดตั้งเหมาะที่สุด

6. สรุปและวิจารณ์

การนำขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์มาประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดสำหรับองค์กรหรือหน่วยงานมีความจำเป็นยิ่งเพื่อลดต้นทุนภายใต้เงื่อนไขต่างๆในสภาวะจริง จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวิธีวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์ (DE) อย่างไรก็ตามในการทดลองเชิงตัวเลขครั้งนี้ยังสรุปได้ไม่ชัดเจนว่าค่าต่างๆ ที่กำหนดขึ้นเหมาะที่สุดแล้ว เช่น ค่าความน่าจะเป็น จำนวนรุ่น (generation) และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้นที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ทดสอบออกแบบเท่านั้น ดังนั้นควรมีการทดสอบเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในช่วงต่างๆ ที่เหมาะสมต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ภายใต้โครงการการออกแบบหาค่าเหมาะที่สุดเชิงสหวิทยาการของชิ้นส่วนเครื่องบินและกังหันลมและศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

8. เอกสารอ้างอิง

[1] ธีรพงษ์ฉิมเพชร ชลัชสัตยารักษ์ (2560). การควบคุมกำลังไฟฟ้าของกังหันลมด้วยวิธีการควบคุมความยาวใบพัดกังหัน, *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์*

ม.อบ., 1, มกราคม2560, หน้า 28–36.

[2] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2554). *พลังงานทดแทน*,http://www4.egat.co.th/re/egat_wind /egat_wind.htm, เข้าดูเมื่อวันที่ 27/01/2561.

[3] จอมภพแววศักดิ์, ชูลีรัตน์คงเรือง, สุภวรรณฏิระวณิชย์กุล, ยุทธนาฏิระวณิชย์กุล, นิรันดรมาแทน, เชาวรัตน์พรหมแพทย์และ อภิชาตหนูทอง (2551). *รายงานการวิจัยเรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้ของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมตามแนวชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ของประเทศไทย*, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, หน้า 10-12, 17–21.

[4] Javier Serrano Gonzalez, Angel G. Gonzalez Rodriguez, Jose Castro Mora. Jesus Riquelme Santos, Manuel Burgos Payan (2010). Optimization of winfarm turbines laout using an evolutive algorithm. Renewable Energy, vol. 63(674-680).

[5] Ying Chen, Hua Li, Hai Jin, Qing Song (2013). Winfarm laout optimization using genetic algorithm with different hub height wind turbines. Energy conversion and Management, vol. 63(674-680).

[6] Yunus Eroglu, Serap Ulusam Seckiner (2012). Design of wind farm layout using ant colony algorithm. Renewable Energy, vol.44 (53-62)

[7] สุจินต์บุรีรัตน์. เอกสารประกอบการสอนวิชา *Mechanical Engineering System Design III (Truss Finite Element Analysis and Design)*, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล: มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[8] GECCO (2015), *Wind Farm Layout Optimization Competition*, httpwww.irit.fr/wind -competition/2015

[9] S.D.O. Turner, D.A. Romero, P.Y. Zhang, C.H. Amon, T.C.Y. Chan (2014). A new mathematical programming approach to optimize wind farm layouts, Renewable Energy, vol. 63(674-680).

[10] Jaydeep Patel, VimalSavsani, Vivek Patel, Rajesh Patel (2017). *Layout optimization of a wind farm to maximize the power output using enhanced teaching learning based optimization technique*, Journal of Cleaner Production, vol. 158(81-94)