

TỐI ƯU VỊ TRÍ TUA-BIN TRONG NHÀ MÁY ĐIỆN GIÓ SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP TÌM KIẾM TIA SÉT OPTIMIZING LAYOUT OF WIND TURBINES IN WIND FARMS USING LIGHTNING SEARCH ALGORITHM

Nguyễn Đăng Khoa¹, Võ Ngọc Điều², Lê Đình Văn²

¹Trường Đại học Cần Thơ; dangkhoa@ctu.edu.vn

²Trường Đại học Bách khoa – Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh; vndieu@hcmut.edu.vn

Tóm tắt - Ngày nay, với sự trợ giúp từ máy tính, việc tính toán tối ưu đang ngày một trở thành công cụ vô cùng mạnh mẽ và các thuật toán tính toán tối ưu cũng phát triển theo. Các thuật toán này thường được dựa trên mô phỏng hoạt động của tự nhiên hoặc cách giải quyết vấn đề theo tự nhiên. Chẳng hạn như thuật toán tối ưu đàn kiến (ACO), thuật toán di truyền (GA), ... Tối ưu vị trí đặt tua-bin điện gió bằng phương pháp tìm kiếm tia sét (Lightning Search Algorithm - LSA) là một cách tiếp cận mới về việc tìm vị trí tối ưu để đặt tua-bin gió nhằm thu được năng lượng lớn nhất. Bài báo này sẽ khảo sát một trang trại truyền phát điện gió đặt ở biển dựa trên các điều kiện như hướng gió, tốc độ gió, sự ảnh hưởng của lưu khối không khí phía sau máy phát điện gió (hiệu ứng Wake), độ nhám bề mặt, ... từ đó sẽ xác định vị trí tối ưu lắp đặt tua-bin gió để đạt được công suất cao nhất.

Từ khóa - thuật toán tìm kiếm tia sét; vị trí tối ưu; tua-bin gió; nhà máy điện gió; hiệu ứng Wake

1. Giới thiệu

Trong cuộc sống hiện đại ngày nay, năng lượng ngày càng đóng vai trò thiết yếu cho sự tồn tại và phát triển của một quốc gia, đặc biệt là sự đóng góp của các dạng năng lượng hóa thạch như dầu mỏ, than đá, khí tự nhiên, ... [1]. Tuy nhiên, nguồn nhiên liệu hóa thạch trong lớp vỏ Trái đất cũng đang ngày càng cạn kiệt do khai thác quá mức, đồng thời lượng khí thải từ nhiên liệu hóa thạch đi vào môi sinh cũng tác động không nhỏ đến hệ sinh thái và môi trường, gây ra nhiều chiều hướng tiêu cực như biến đổi khí hậu, hiệu ứng nhà kính, Trái đất nóng dần lên...

Năng lượng tái tạo là nguồn năng lượng “xanh”, “sạch” không gây tác hại đến môi trường. Tuy nhiên, năng lượng tái tạo vẫn chưa tạo ra cho mình bước đột phá do nguồn năng lượng thu lại thường nhỏ, chi phí công nghệ cao. Từ đó, việc nghiên cứu làm sao để tăng năng suất đồng thời với việc giảm chi phí lắp đặt và chi phí công nghệ đến mức thấp nhất đang là một bài toán lớn mà các nhà khoa học từ các nước trên thế giới đang cùng nhau nghiên cứu và xây dựng. Cụ thể như dò tìm điểm công suất cực đại trong lắp đặt hệ thống pin mặt trời, vị trí đặt tua-bin gió, ...

Vì thế, bài báo này sẽ đi sâu vào nghiên cứu tối ưu vị trí đặt tua-bin gió trong một trang trại máy phát gió đặt trên biển (offshore) dựa trên thuật toán Lightning Search Algorithm (LSA) [2], [3].

2. Mô hình hiệu ứng Wake và Thuật toán tìm kiếm tia sét

2.1. Mô hình hiệu ứng Wake của Jensen

Theo mô hình của Jensen [4] như trong Hình 1, gió thổi từ trái sang phải với tốc độ v_0 và đập vào tua-bin, bán kính quét của cánh quạt là r_0 . Tại một khoảng cách x nằm phía

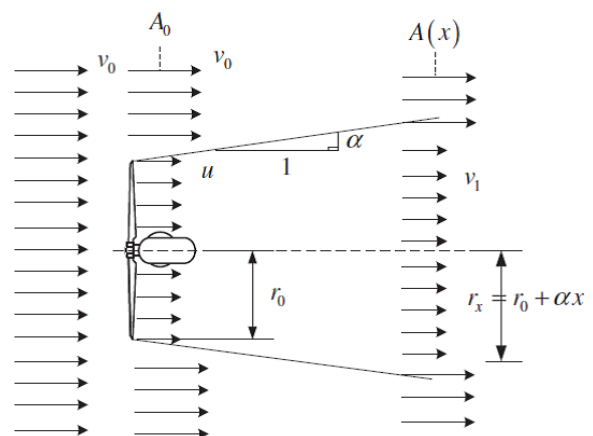
Abstract - Nowadays, with the support from computers, the optimal computation is becoming a powerful tool, and optimization algorithms have been also developed accordingly. These algorithms such as the ant colony optimization (ACO), genetic algorithm (GA), etc. are usually based on simulations of the natural behavior or problems in the nature. Optimizing layout of wind turbines in wind farms using the lightning search algorithm (LSA) is a new approach to obtain the highest amount of energy. This paper has investigated an offshore wind farm based on the conditions such as wind direction, wind velocity, the effect of wind turbine generators on wind velocity (wake effect) and rough surface to determine the optimal location for the installation of the wind turbines to capture the highest wind capacity.

Key words - lightning search algorithm; optimal layout; wind turbine; wind farm; Wake effect

sau tua-bin, tốc độ sẽ là v_1 và bán kính bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng Wake là $r_x = \alpha x + r_0$. Đại lượng α thể hiện mức độ mở rộng hiệu ứng Wake và được xác định theo công thức:

$$\alpha = \frac{0,5}{\ln \frac{z}{z_0}} \quad (1)$$

trong đó, z là chiều cao tua-bin gió và z_0 là độ nhám bề mặt.



Hình 1. Mô hình hiệu ứng Wake của Jensen

Gọi i là vị trí tua-bin phía trước tạo ra hiệu ứng Wake, j là vị trí tua-bin phía sau bị ảnh hưởng, v_0 là biên độ tốc độ gió, v_j là tốc độ gió tại vị trí j . Ta có:

$$v_j = v_0(1 - vd_{ij}) \quad (2)$$

trong đó, vd_{ij} là vận tốc hao hụt tại vị trí j khi bị ảnh hưởng hiệu ứng Wake của tua-bin ở vị trí i , vd_{ij} được xác định như sau:

$$vd_{ij} = \frac{2\alpha}{1 + \alpha \left(\frac{x_{ij}}{r_d} \right)^2} \quad (3)$$

Hệ số α được gọi là hệ số điện kháng dọc trục và được xác định như sau:

$$\alpha = 0,5 \left(1 - \sqrt{1 - C_T} \right) \quad (4)$$

Trong đó, C_T là hệ số đẩy của tua-bin, có mối quan hệ với điện kháng dọc trục như sau:

$$C_T = 4\alpha(1 - \alpha) \quad (5)$$

trong đó, r_d là bán kính quét của rotor phía sau:

$$r_d = r_r \sqrt{\frac{1 - \alpha}{1 - 2\alpha}} \quad (6)$$

trong đó, x_{ij} là khoảng cách giữa vị trí i và j .

Trong một trang trại máy phát gió, hiệu ứng Wake bị giao nhau và các tua-bin phía sau đều bị ảnh hưởng cùng một lúc [7]. Theo mô hình của Jensen, vận tốc bị hao hụt $v_{def}(j)$ tại vị trí thứ j sẽ bị ảnh hưởng theo công thức sau:

$$v_{def}(j) = \sqrt{\sum_{i \in W(j)} vd_{ij}^2} \quad (7)$$

Trong đó, $W(j)$ là tập hợp các tua-bin bị ảnh hưởng hiệu ứng Wake bởi tua-bin vị trí i .

Theo giả thuyết của Mosetti [5], tổng chi phí đầu tư cho một tua-bin là 1, thì đầu tư cho mỗi tua-bin tiếp theo chỉ còn 1/3. Như vậy, tổng chi phí trên một năm của một trang trại gió được tính như sau:

$$\text{cost} = N \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \exp^{-0,00174N^2} \right) \quad (8)$$

Hiệu suất của trang trại máy phát điện gió được tính như sau:

$$\text{Efficiency} = \frac{P_{\text{total}}}{0,3Nv_0^3} \quad (9)$$

Để tính toán công suất trong một trang trại máy phát điện gió, các công thức được đề xuất từ Mosetti [3] như sau:

Đối với 01 tua-bin gió có xét đến hiệu suất:

$$\text{Power produced} = \eta \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (10)$$

Trong đó, η là hiệu suất tổng thể của tua-bin gió; ρ là mật độ không khí (kg/m^3); và A là diện tích quét của tua-bin gió (m^2);

Công suất của tua-bin được đề xuất theo [3] là:

$$\text{Power produced} = 40\% \frac{1}{2} 2\pi (20)^2 u^3 \quad (11)$$

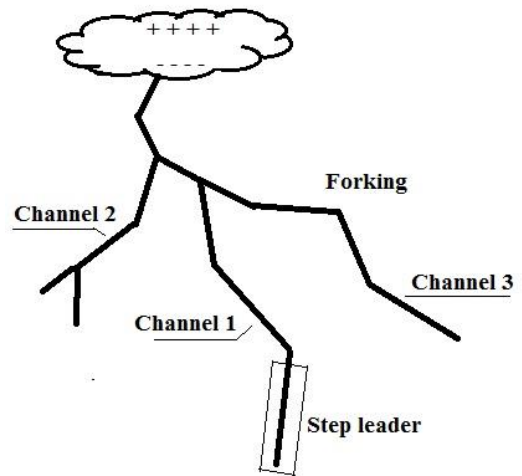
$$\text{Power produced} = 301 u^3 \text{ (Watt)} \quad (12)$$

2.2. Thuật toán Tìm kiếm tia sét và áp dụng

Phương pháp LSA là thuật toán tối ưu mới phát triển do Hussain Shareef cùng các đồng nghiệp đề xuất [2]. Thuật toán LSA là một thuật toán tối ưu được lấy cảm hứng từ hiện tượng tự nhiên, đó là sự hình thành sét trong cơn bão. Thuật toán này là một trong những thuật toán tối ưu sử dụng công cụ tính toán bằng máy vi tính đã được đề xuất

trong thời gian gần đây. Có thể kể đến như thuật toán di truyền (GA), thuật toán đàn kiến (ACO), thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO), thuật toán đàn ong (ABC) [10-12]. Tất cả các thuật toán kể trên đều mô phỏng theo cách giải quyết vấn đề của tự nhiên.

Một tính chất rất quan trọng của tiên đạo bước là có thể rẽ nhánh, trong đó các nhánh xuất hiện cân xứng và cùng một lúc. Hiện tượng này hiếm khi xảy ra bởi vì có sự va chạm hạt nhân. Nhiều kênh mới được tạo trong suốt thời gian các điểm nhánh tăng số lượng hướng phóng. Trong thuật toán này, giả định rằng điểm nhánh luôn rẽ thành 2 hướng và được thể hiện như Hình 2 [8].



Hình 2. Sự hình thành của tiên đạo sét

Trước tiên, các kênh được hình thành cùng một lúc do sự va chạm hạt nhân của các hướng phóng điện theo công thức:

$$\bar{P}_i = a + b - P_i \quad (13)$$

Trong đó, $\bar{P}_i$ là hướng phóng điện nghịch; P_i là hướng phóng điện thuận; và a, b là giới hạn biên.

Đáp ứng này sẽ làm tăng một số giải pháp “xấu”. Nếu điểm nhánh không làm tăng số kênh trong thuật toán LSA, thì một trong số các kênh tại điểm rẽ nhánh sẽ phát sáng để duy trì quy mô.

Điểm rẽ thứ hai, một kênh được giả định hình thành tại đỉnh tiên đạo do có sự phân bố lại năng lượng của tất cả các tiên đạo không có khả năng hình thành sau một vài lần thử lan truyền. Những tiên đạo không có khả năng hình thành đó có thể được phân bố lại bằng cách xác định số lượng tối đa có thể cho phép của những lần thử như là thời gian kênh [8]. Trong trường hợp này, số tiên đạo sẽ không tăng.

Hàm mật độ xác suất:

$$f(x^T) = \begin{cases} \frac{1}{b} - a & \text{khi } a \leq x^T \leq b \\ 0 & \text{khi } (x < a) \text{ or } (x^T > b) \end{cases} \quad (14)$$

Trong đó, x^T là số ngẫu nhiên đại diện cho một giải pháp hoặc năng lượng ban đầu E_{sl_i} của tiên đạo sl_i và a, b là hai bờ biên.

Véc-tơ tiên đạo: $SL = [sl_1, sl_2, sl_3, \dots, sl_N]$

Véc-tơ hướng phóng ngẫu nhiên (random projectile):

$$P^T = [p_1^T, p_2^T, p_3^T, \dots, p_N^T]$$

Véc-tơ hướng phóng không gian (space projectile):

$$P^S = [p_1^S, p_2^S, p_3^S, \dots, p_N^S]$$

Hàm mật độ xác suất với hệ số dạng μ viết dưới dạng hàm mũ:

$$f(x^S) = \begin{cases} \frac{1}{\mu} e^{-\frac{x^S}{\mu}} & \text{khí } x^S \geq 0 \\ 0 & \text{khí } x^S \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Hàm (15) biểu diễn vị trí của hướng phóng không gian hay là véc-tơ hướng cho bước phóng điện tiếp theo và nó được hiệu chỉnh bằng hệ số dạng μ .

Vị trí của hướng phóng không gian p_i^S tại bước thứ bước +1 có thể viết thành:

$$p_{i-new}^S = p_i^S \pm \exp rand(\mu_i) \quad (16)$$

Trong đó, $\exp rand$ là số mũ ngẫu nhiên. Nếu p_i^S là số âm, thì thành phần số ngẫu nhiên ($\exp rand$) phải mang dấu âm do (15) luôn dương. Tuy nhiên, vị trí mới p_{i-new}^S không đảm bảo hướng phóng điện của tiên đạo, trừ trường hợp năng lượng hướng phóng điện E_{p-i}^S lớn hơn tiên đạo bước E_{i-new}^S để mở rộng kênh truyền dẫn hay có giải pháp tốt được tìm thấy. Nếu p_{i-new}^S cung cấp một giải pháp tốt ở bước (bước +1), thì các tiên đạo sl_i được mở rộng đến một vị trí mới sl_{i-new} , và p_i^S được cập nhật đến p_{i-new}^S . Ngược lại, chúng sẽ duy trì không đổi ở bước tiếp theo. Nếu p_{i-new}^S mở rộng sl_{i-new} vượt ra ngoài khoảng, hầu hết các tia tiên đạo mở rộng trong suốt quá trình này sẽ trở thành hướng phóng tiên đạo chính.

Có thể dự đoán, tiên đạo bước sẽ di chuyển gần với mặt đất và hướng phóng đi cùng với nó sẽ không đủ năng lượng để ion hóa không khí trước đỉnh tiên đạo. Vì thế tiên đạo phóng chính có thể mô hình hóa như là một số ngẫu nhiên rút ra từ phân bố chuẩn với hệ số dạng μ và hệ số tỉ lệ σ . Hàm mật độ được biểu diễn:

$$f(x^L) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x^L - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (17)$$

Công thức (17) cho thấy tiên đạo chính hình thành ngẫu nhiên này có thể tìm kiếm tất cả các hướng từ vị trí hiện tại bằng hệ số dạng. Hướng tuyến còn có thể sử dụng hệ số tỉ lệ. Trong thuật toán LSA, μ_L dùng cho hướng tiên đạo chính p^L , và hệ số tỉ lệ σ_L sẽ giảm theo hàm mũ khi nó hướng về phía mặt đất hoặc tìm ra một giải pháp tốt nhất. Như vậy, vị trí p^L tại bước bước +1 có thể được viết:

$$p_{new}^L = p^L + normrand(\mu_L, \sigma_L) \quad (18)$$

Trong đó, $normrand$ là số ngẫu nhiên trong hàm phân bố. Tương tự, hướng tiên đạo chính mới có vị trí p_{new}^S sẽ không đảm bảo hướng phóng của tiên đạo trừ khi tiên đạo chính có năng lượng E_{p-i}^S lớn hơn tia tiên đạo bước E_{sl-i} để mở rộng giải pháp. Nếu p_{new}^L cung cấp một giải pháp tốt tại bước (bước +1), thì tia tiên đạo sl_i sẽ được mở rộng đến vị trí mới sl_{L-new} , và p^L được cập nhật đến p_{new}^L . Trái lại, chúng sẽ duy trì không thay đổi cho đến bước tiếp theo, như

trường hợp của hướng phóng không gian.

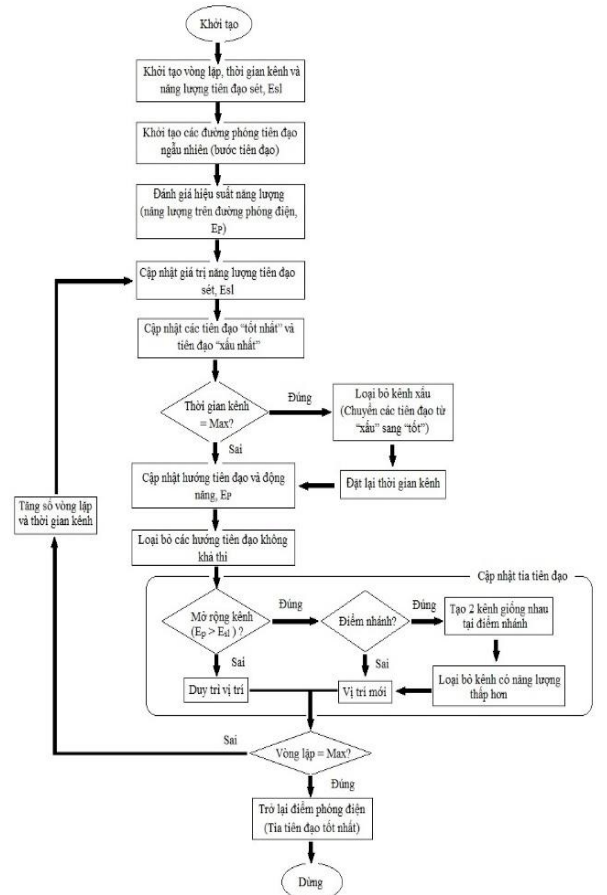
Hiệu ứng Wake được lồng ghép vào chương trình tính toán công suất để tìm ra công suất lớn nhất. Cụ thể như sau:

Bước 1: Sau khi có vị trí phân bố tua-bin ban đầu, chương trình sẽ thực hiện kiểm tra từng tua-bin trong trang trại gió có kích thước $L \times L$ theo các điều kiện thỏa để xảy ra hiệu ứng Wake (kiểm tra bằng điều kiện giới hạn nhỏ nhất xảy ra hiệu ứng Wake). Nếu xảy ra hiệu ứng Wake, sẽ thực hiện tính toán công suất tại các tua-bin đó. Quá trình sẽ thực hiện kiểm tra từ tua-bin thứ 2 đến tua-bin thứ N . Các tua-bin không bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng Wake coi như nhận được công suất gió là tối đa.

Công suất tổng sẽ bằng tổng công suất của N tua-bin.

Bước 2: Vị trí tua-bin tiếp theo của tua-bin sẽ được chương trình chính của thuật toán LSA cập nhật từ giá trị tua-bin ở vòng lặp thứ nhất. Quá trình được tính toán tương tự vòng lặp 1, kiểm tra ảnh hưởng của hiệu ứng Wake cho từng tua-bin, sau đó tính ra công suất tổng cho vòng lặp thứ 2. Quá trình được tiếp diễn cho tới vòng lặp thứ k của chương trình chính (k cho trước).

Hình 3 trình bày sơ đồ thuật toán LSA cho việc tìm kiếm vị trí tối ưu lắp đặt tua-bin gió để có được công suất lớn nhất.



Hình 3. Sơ đồ thuật toán LSA

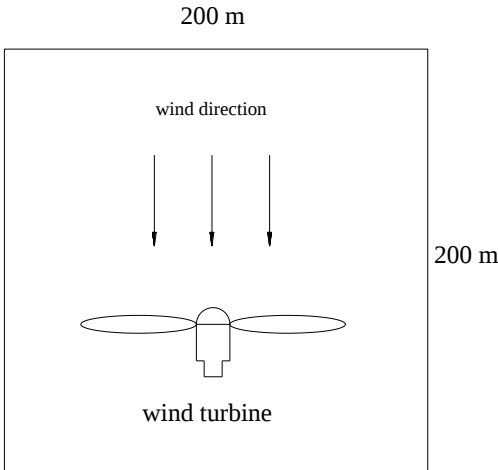
3. Kết quả tính toán và thảo luận

Dựa theo mô hình bài toán do Mosetti và Grady [3], [6] và đề xuất như Bảng 1:

Bảng 1. Thông số bài toán

STT	Thông số	Giá trị
1	Độ nhám (z_0)	0,3
2	Vận tốc gió ban đầu (v_0)	12 m/s
3	Chiều cao cột tháp tua-bin (h)	60 m
4	Đường kính rotor tua-bin (D)	40 m
5	Chiều dài khoảng đất	2.000 m
6	Chiều rộng khoảng đất	2.000 m
7	Hệ số C_T	0,88
8	Mật độ không khí	1,2253(kg/m ³)
9	Diện tích quét của tua-bin gió	5.080 (m ²)

Bài toán bố trí cho 26 và 30 tua-bin gió trên mặt biển hoặc khu đất lý tưởng có địa hình bằng phẳng, cây cỏ thấp có diện tích $2.000m \times 2.000m$. Khu đất được chia thành 10 ô (ngang x dọc), mỗi ô có kích thước $200m \times 200m$. Xem như các tua-bin gió là giống nhau về mặt kỹ thuật và công suất, hướng gió được lấy trong điều kiện lý tưởng là gió thổi theo một hướng và vuông góc với mặt trước cánh quạt tua-bin gió, được thể hiện như Hình 4.



Hình 4. Mô hình tua-bin gió

Các bước áp dụng thuật toán LSA cho bài toán đặt tối ưu vị trí tua-bin gió trong nhà máy điện gió như sau:

Bước 1: Khởi tạo các giá trị ban đầu bao gồm:

- Khởi tạo số vòng lặp T.
- Số lượng tua-bin N.
- Tốc độ gió ban đầu v_0 (m/s).
- Kích thước ranh đất L (m).
- Độ nhám của môi trường xung quanh z_0 .
- Chiều cao của tua-bin h (m).
- Bán kính mặt phẳng quét của cánh quạt tua-bin r_0 (m).
- Hệ số C_T .
- Góc α (thể hiện bán kính ảnh hưởng của hiệu ứng Wake của tua-bin phía trước đối với tua-bin sau).
- Số kênh (channel).
- Số kênh lớn nhất (max channel).
- Kích thước dân số (population size).
- Dim (Dimension).
- Khởi tạo ngẫu nhiên vị trí của các tua-bin theo điều kiện ràng buộc (wind farm).
- Khởi tạo hướng phóng tiên đạo direct.

Bước 2: Tính toán giá trị năng lượng gió ban đầu với vị

trí tua-bin ngẫu nhiên.

Bước 3: Đánh giá năng lượng qua vị trí đầu tiên. Gán hàm năng lượng ban đầu E bằng giá trị năng lượng ngẫu nhiên.

Bước 4: Cập nhật hướng phóng, loại bỏ các tiên đạo bước “xấu”.

Bước 5: Cập nhật tiên đạo bước, trong bước này sẽ kiểm tra có hiện tượng rẽ nhánh không, nếu có sẽ loại bỏ kênh có năng lượng thấp, giữ lại các kênh có năng lượng cao hơn.

Bước 6: Kiểm tra số vòng lặp. Nếu chưa thỏa mãn, sẽ cập nhật lại số kênh và tính toán như ban đầu. Kết quả thu được là vị trí các tua-bin có năng lượng thu về là lớn nhất.

Bước 7: Kết thúc.

Kết quả tính toán tối ưu bằng thuật toán LSA với số lượng tua-bin là 26 và 30 được thể hiện ở Hình 6 và Hình 8. Có thể thấy rằng sự phân bố tua-bin bằng LSA khác hoàn toàn so với thuật toán GA, được thể hiện ở Hình 5 và Hình 7.

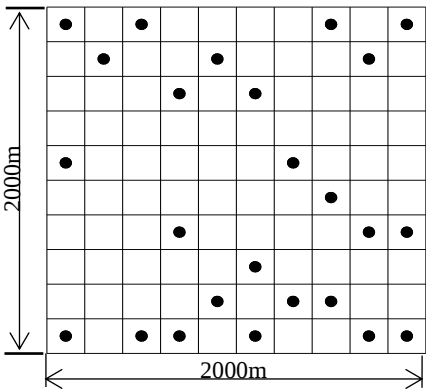
Bảng 2 và Bảng 3 là sự so sánh về tổng công suất nhận được và hiệu suất của toàn trang trại điện gió giữa hai giải thuật LSA và GA với cùng số lượng tua-bin là 26 và 30. Bảng 2 với số lượng tua-bin là 26 như nhau, nhưng kết quả tính toán bằng LSA sẽ cho công suất là 13.461kW và hiệu suất là 99,871%, lớn hơn so với kết quả tính toán bằng GA có công suất là 12.352kW và hiệu suất 91,645%. Tương tự cho trường hợp số lượng tua-bin là 30 thì việc sử dụng LSA cũng cho kết quả tốt hơn so với GA và được thể hiện cụ thể ở Bảng 3. Công suất thu được và hiệu suất của thuật toán LSA là 15.548 kW và 99,974%, so với 14.310 kW và 92,015% của thuật toán GA [9].

Bảng 2. Công suất nhận được và so sánh với thuật toán di truyền với số tua-bin là 26 [9]

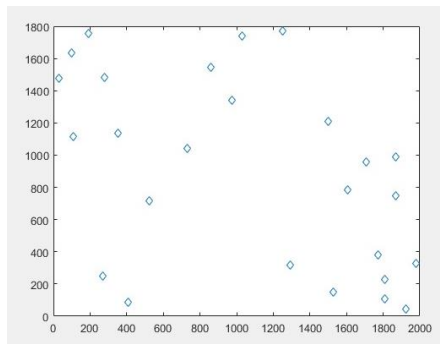
Thuật toán	GA	LSA
Số lượng tua-bin N	26	26
Tổng công suất (kW)	12.352	13.461
Hiệu suất	91,645%	99,871%

Bảng 3. Công suất nhận được và so sánh với thuật toán di truyền với số tua-bin là 30 [9]

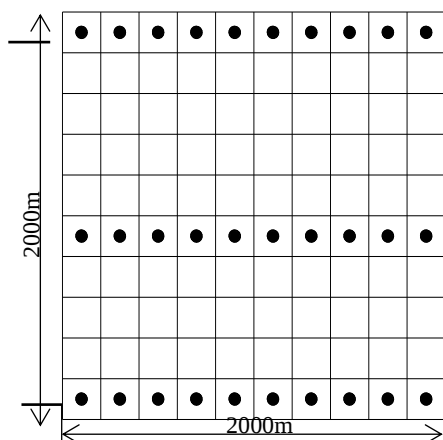
Thuật toán	GA	LSA
Số lượng tua-bin N	30	30
Tổng công suất (kW)	14.310	15.548
Hiệu suất	92,015%	99,974%



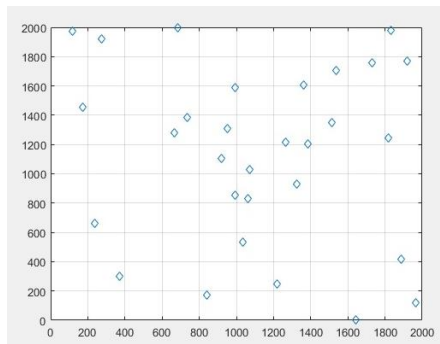
Hình 5. Kết quả phân bố 26 tua-bin sử dụng GA [9]



Hình 6. Kết quả phân bố 26 tua-bin sử dụng LSA



Hình 7. Kết quả phân bố 30 tua-bin sử dụng GA [9]



Hình 8. Kết quả phân bố 30 tua-bin sử dụng LSA

4. Kết luận

Trong bài báo này, thuật toán LSA đã được áp dụng thành công đối với bài toán xác định vị trí tối ưu cho các tua-bin gió trong nhà máy điện gió. Việc áp dụng thuật toán LSA vào bài toán tìm vị trí tối ưu của tua-bin gió có thể giúp nhanh chóng tìm ra vị trí thích hợp của các tua-bin gió sao cho năng lượng gió được khai thác trong một khu vực

là lớn nhất. Kết quả tính toán thuật toán LSA đạt hiệu quả cao hơn phương pháp GA cho cùng một bài toán. Do đó, thuật toán LSA có thể được tin cậy sử dụng để tính toán tìm vị trí tối ưu tua-bin gió trong nhà máy điện gió. Tuy nhiên, thuật toán chỉ mới xét trên phương diện lý tưởng về mặt địa hình và hướng gió trực tiếp. Đối với đất liền, địa hình sẽ không được lý tưởng, do đó các tua-bin có độ cao khác nhau nên khả năng đón gió khác nhau và bị ảnh hưởng hiệu ứng Wake cũng khác nhau. Bên cạnh đó, hướng gió không chỉ thổi trực tiếp mà sẽ thổi theo các góc nghiêng khác nhau, tốc độ gió cũng không được ổn định trong suốt thời gian tua-bin gió vận hành. Do đó, những nghiên cứu tiếp theo sẽ xem xét các khía cạnh này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hồ Phạm Huy Ánh, Nguyễn Hữu Phúc, Phạm Đình Trục, Nguyễn Quang Nam, Trần Công Bình, Phạm Quang Ân, *Kỹ thuật hệ thống năng lượng tái tạo*, NXB Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, 2013.
- [2] Hussain Shareef, Ahmad Asrul Ibrahim, Ammar Hussein Mutlag, "Lightning Search Algorithm", *Applied Soft Computing*, Vol. 36, Nov 2015, pp. 315-333.
- [3] Hussain Shareef, Ammar Hussein Mutlag, Azah Mohamed, "A Novel Approach for Fuzzy Logic PV Inverter Controller Optimization Using Lightning Search Algorithm", *Neurocomputing*, Vol. 168, 2015, pp. 435-453.
- [4] Jensen, N., *A Note on Wind Turbine Interaction*, Technical Report No. M-2411, Risoe National Laboratory: Roskilde, Denmark, 1983.
- [5] G. Mosetti, C. Poloni, B. Diviacco. "Optimization of Turbine Positioning in Large Wind Farms by Means of A Genetic Algorithm", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 51, 1994, pp. 105-116.
- [6] S. A. Grady, M. Y. Hussaini, M. M. Abdullah, "Placement of Wind Turbines Using Genetic Algorithms", *Renewable Energy*, Vol. 30, 2005, pp. 259-270.
- [7] Michele Samorani, *The Wind Farm Layout Optimization Problem*, in Handbook of Wind power systems, Panos M. Pardalos, Steffen Rebennack, Mario V.F. Pereira, Niko A. Iliadis, Vijay Pappu, Ed. Berlin: Springer, 2013, pp 21-38.
- [8] M. D. N. Perera and D. U. J. Sonnadara, "Fractal Nature of Simulated Lightning Channels", *Sri Lankan Journal of Physics*, Vol. 13(2), 2012, pp. 9-25.
- [9] C. BalaKrishna, M. K. Deshmukh, Darshana Mukherejee, "Optimal Location of Wind Turbines in A Wind Farm Using Genetic Algorithm", *Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 12, No. 8, 2014, pp. 5869-5876.
- [10] A. M. Adrian, A. Utamima và K. J. Wang, "A Comparative Study of GA, PSO and ACO for Solving Construction Site Layout Optimization", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1, 2014, pp. 520-527.
- [11] Alireza Emami, Pirooz Noghreh, "New Approach on Optimization in Placement of Wind Turbines within Wind Farm by Genetic Algorithms", *Renewable Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 1559-1564.
- [12] Tales G. Couto, Bruno Farias, Alberto Carlos G. C. Diniz, Marcus Vinicius G. de Moraes, *Optimization of Wind Farm Layout Using Genetic Algorithm*, in 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Florida, May 2013.

(BBT nhận bài: 06/3/2018, hoàn tất thủ tục phản biện: 20/4/2018)