

ƯỚC TÍNH ĐỘ BIẾN DẠNG CỦA THÁP TUỐC BIN GIÓ DỰA TRÊN MÁY QUÉT LASER TRÊN MẶT ĐẤT

ESTIMATION OF WIND TURBINE TOWER DEFORMATION BASED ON GROUND-BASED LASER SCANNING

Trần Trọng Tấn¹, Đỗ Văn Hiến²

¹Công ty TNHH Meso Group

²Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: tantran.meso@gmail.com;

hiendv@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh nhu cầu năng lượng tái tạo ngày càng gia tăng, các tuabin gió hiện đại có xu hướng phát triển với kích thước lớn hơn, dẫn đến sự gia tăng đáng kể về tải trọng động và độ phức tạp trong ứng xử kết cấu của tháp. Do đó, việc ước tính chính xác độ biến dạng của tháp tuabin gió đóng vai trò quan trọng trong hệ thống quan trắc kết cấu công trình, đánh giá hiệu năng vận hành và kiểm chứng các mô hình số. Bài báo này đề xuất một phương pháp đo không tiếp xúc nhằm xác định độ biến dạng của tháp tuabin gió dựa trên công nghệ quét laser mặt đất (Terrestrial Laser Scanning – TLS). Phương pháp cho phép đồng thời xác định chuyển vị theo phương trục và phương ngang chỉ từ một vài vị trí quan sát, không yêu cầu gắn thiết bị hoặc sửa đổi kết cấu. Chiến lược quét được xây dựng để thu nhận các mặt cắt ngang của tháp, từ đó độ biến dạng được xác định thông qua kỹ thuật xấp xỉ đường cong. Các thí nghiệm thực địa được thực hiện trên tuabin gió đang vận hành nhằm đánh giá tính khả thi và độ chính xác của phương pháp. Kết quả cho thấy phương pháp TLS có khả năng đo đạc đáng tin cậy ở khoảng cách lớn (trên 128 m) và phù hợp cho giám sát từ xa. Phương pháp đề xuất mở ra tiềm năng ứng dụng hiệu quả trong các hệ thống giám sát kết cấu và tích hợp với mô hình số hiện đại.

Từ khóa: Tháp tuabin gió; Hệ thống quan trắc kết cấu công trình; Quét laser mặt đất; Đo biến dạng không tiếp xúc.

ABSTRACT

With the increasing demand for renewable energy, modern wind turbines are being designed with larger dimensions, resulting in significantly higher dynamic loads and more complex structural responses of the tower. Accurate estimation of tower deformation is therefore essential for structural health monitoring, performance evaluation, and validation of numerical models. This study proposes a non-contact measurement method for wind turbine tower deformation based on terrestrial laser scanning (TLS). The proposed approach enables the simultaneous identification of both axial and lateral displacements from a single observation point, without requiring any physical modification or instrumentation of the structure. A dedicated scanning strategy is developed to

acquire cross-sectional profiles of the tower; and the deformation is subsequently determined through a curve-fitting procedure. Field experiments are conducted on an operating wind turbine to evaluate the feasibility and accuracy of the method. The results demonstrate that the TLS-based approach provides reliable deformation measurements at long distances exceeding 128 m, with good agreement compared to reference data. The proposed method offers a practical and efficient solution for remote structural monitoring of large-scale wind turbine towers. Its non-invasive nature and high measurement capability make it a promising tool for integration into advanced structural health monitoring systems and digital twin frameworks for wind energy applications.

Keywords: *Wind turbine tower; Structural health monitoring (SHM); Terrestrial laser scanning (TLS); Non-contact measurement.*

1. GIỚI THIỆU

Sự gia tăng nhu cầu năng lượng và các cam kết giảm phát thải khí nhà kính đã thúc đẩy quá trình chuyển dịch sang các nguồn năng lượng tái tạo trên toàn thế giới, trong đó năng lượng gió đóng vai trò đặc biệt quan trọng. Trong những năm gần đây, các tuabin gió hiện đại có xu hướng tăng đáng kể về kích thước nhằm nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng. Chiều cao tháp và đường kính rôto ngày càng lớn giúp tuabin tiếp cận các lớp gió ổn định hơn, từ đó cải thiện sản lượng điện năng. Tuy nhiên, sự gia tăng về quy mô này đồng thời làm gia tăng tải trọng khí động và tải trọng động tác động lên kết cấu tuabin, đặc biệt là tháp tuabin gió, vốn đóng vai trò là bộ phận chịu lực chính của hệ thống [1-3]. Do đó, việc theo dõi biến dạng và dao động của tháp tuabin trong quá trình vận hành là yếu tố quan trọng nhằm đảm bảo độ tin cậy, an toàn và tuổi thọ của các hệ thống điện gió hiện đại. Tại Việt Nam, năng lượng gió đang trở thành một trong những nguồn năng lượng tái tạo có tiềm năng phát triển lớn nhờ điều kiện gió thuận lợi và đường bờ biển dài hơn 3.000 km. Theo các nghiên cứu đánh giá tài nguyên gió, nhiều khu vực ven biển miền Trung và Nam Bộ có tốc độ gió trung bình phù hợp cho phát triển các trang trại điện gió quy mô lớn [4]. Trong những năm gần đây, công suất lắp đặt điện gió tại Việt Nam đã tăng

nhANH với nhiều dự án tuabin gió trên đất liền và ngoài khơi được đưa vào vận hành. Sự phát triển nhanh chóng này đặt ra yêu cầu cấp thiết đối với các phương pháp giám sát và đánh giá trạng thái kết cấu của các tuabin gió, đặc biệt là đối với các tháp tuabin có chiều cao lớn. Trong bối cảnh đó, việc phát triển các phương pháp đo không tiếp xúc dựa trên TLS nhằm xác định chính xác biến dạng của tháp tuabin gió theo nhiều phương khác nhau có ý nghĩa quan trọng, góp phần nâng cao hiệu quả vận hành, đảm bảo an toàn kết cấu và hỗ trợ kiểm chứng các mô hình mô phỏng của tuabin gió trong điều kiện vận hành thực tế. Trong bối cảnh đó, các hệ thống quan trắc kết cấu công trình (Structural Health Monitoring – SHM) đã được nghiên cứu và triển khai nhằm đánh giá trạng thái làm việc của tuabin gió thông qua việc đo các đại lượng như biến dạng, dao động và các đặc trưng động lực học của kết cấu [5, 6]. Các phương pháp SHM truyền thống thường sử dụng cảm biến như cảm biến biến dạng hoặc gia tốc kế được lắp đặt trực tiếp trên cấu trúc tháp. Mặc dù các phương pháp này có thể cung cấp dữ liệu chính xác tại các vị trí đo cụ thể, chúng lại bị hạn chế bởi phạm vi đo cục bộ, yêu cầu lắp đặt phức tạp và chi phí bảo trì cao, đặc biệt đối với các tuabin gió có chiều cao lớn. Do đó, các phương pháp đo không tiếp xúc dựa trên kỹ thuật quang học đã thu hút nhiều sự quan tâm trong những năm gần đây. Trong số đó, quét laser mặt đất

(Terrestrial Laser Scanning – TLS) được xem là một giải pháp đầy tiềm năng nhờ khả năng thu thập dữ liệu hình học có độ chính xác cao từ khoảng cách xa và không yêu cầu lắp đặt cảm biến trực tiếp trên kết cấu [7, 8, 9, 10]. TLS đã được ứng dụng thành công trong việc theo dõi biến dạng của nhiều công trình quy mô lớn như cầu, đập và tháp cao. Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào việc đo biến dạng theo phương trục của tháp, trong khi chuyển động thực tế của tháp tuabin gió thường xảy ra theo nhiều hướng khác nhau do sự biến thiên liên tục của tải trọng gió.

Để đánh giá khả năng ứng dụng của phương pháp đề xuất, một thí nghiệm thực địa đã được thực hiện trên một tuabin gió thực tế có chiều cao trục quay 128 m bằng cách tiến hành cả quét ngang và quét dọc nhằm phân tích hình dạng đường bao của tháp. Nguyên lý của phương pháp đo và thiết lập thí nghiệm lần lượt được trình bày trong Phần 2. Các phép đo TLS được thực hiện trên tuabin gió đang vận hành với chiều cao trục 128 m. Để làm dữ liệu tham chiếu, chuyển động hai chiều của vỏ tuabin được đo bằng cách quan sát video từ một camera đặt tại chân tháp hướng lên phía vỏ tuabin, kết hợp với phần mềm theo dõi điểm ảnh. Các kết quả đo từ TLS sau đó được so sánh với dữ liệu tham chiếu trong Phần 3. Ngoài ra, các đường đồng mức đo được của tháp tuabin gió cao cũng được trình bày và khả năng đo lường của phương pháp được thảo luận. Cuối cùng, các kết luận chính và hướng nghiên cứu trong tương lai được trình bày trong Phần 4.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vị trí thực hiện

Nghiên cứu được thực hiện tại Khu công nghiệp Deep C, tập trung vào tháp tuốc

bin. Bản đồ vị trí nghiên cứu được trình bày trên Hình 1.



(a) Vị trí nghiên cứu



(b) Hình ảnh tháp tuốc bin gió

Hình 1. Hình ảnh tháp tuốc bin gió và vị trí nghiên cứu

2.2. Thiết bị thực hiện

Thiết bị cần thiết cho việc thu thập và xử lý dữ liệu trong nghiên cứu này được liệt kê ở bảng Bảng 1 như sau:

Bảng 1. Thiết bị thực hiện

Phần cứng	Máy quét laser mặt đất Faro Focus 3D Premium
Phần mềm	a) Faro Stream dùng để xử lý đám mây điểm từ các phép đo bằng máy quét laser mặt đất. c) Faro Scene dùng để xử lý và ghép dữ liệu. d) Polyworks Inspection để phân tích đám mây điểm.



2.3. Quá trình thực hiện nghiên cứu

Dữ liệu TLS được xử lý bằng kỹ thuật đăng ký đám mây, giúp đồng bộ hóa nhiều thiết lập máy quét dựa trên các điểm chồng chéo. Để đảm bảo quy trình làm việc hiệu quả, một quy trình thu thập dữ liệu có cấu trúc đã được phát triển. Quy trình làm việc cho quá trình thu thập dữ liệu trong nghiên cứu này được minh họa trong sơ đồ khối ở Hình 2.

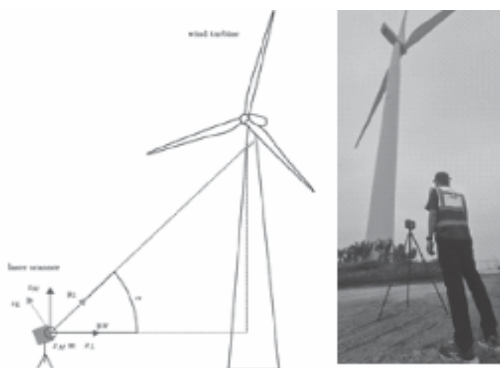


Hình 2. Sơ đồ quá trình thực hiện

2.4. Phương pháp nghiên cứu

2.4.1. Nguyên lý đo của máy quét laser

Kỹ thuật quét laser mặt đất (Terrestrial Laser Scanning – TLS) xác định khoảng cách s giữa máy quét và đối tượng dựa trên nguyên lý thời gian bay của tia laser (time-of-flight – ToF).



Hình 3. Hình chiếu cạnh căn chỉnh ngang của máy quét laser với một góc nghiêng α .

Trong phương pháp này, các xung laser được phát ra từ máy quét hướng tới bề mặt mục tiêu. Thời gian cần thiết để tín hiệu laser truyền từ máy quét đến mục tiêu và phản xạ trở lại được đo và ghi nhận. Khoảng cách s từ máy quét đến mục tiêu có thể được xác định theo biểu thức:

$$s = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1)$$

Trong đó: t là thời gian lan truyền khứ hồi của xung laser và c là vận tốc ánh sáng.

Trong chế độ quét theo đường thẳng (line-scanning mode), máy quét laser mặt đất sử dụng một gương quay để quét chùm tia laser phát ra trên một góc quét xác định θ với N bước gia tăng. Từ các khoảng cách đo được $s(n)$ với $n = 1, \dots, N$, và bước góc đã biết $\Delta\theta = \theta/N$, các điểm trên bề mặt tháp được xác định ban đầu trong hệ tọa độ cực. Sau đó, các tọa độ này được chuyển đổi sang hệ tọa độ Descartes hai chiều để phục vụ cho việc phân tích hình học và biến dạng của tháp.

2.4.2. Phương pháp đo

Như đã trình bày trong [6], phép đo biến dạng của tháp có thể được thực hiện bằng máy quét laser mặt đất hai chiều sử dụng nguyên lý thời gian bay. Trong quá trình đo, máy quét laser có thể được căn chỉnh theo hai cách khác nhau so với trục của tháp, bao gồm căn chỉnh theo phương thẳng đứng và căn chỉnh theo phương ngang. Sơ đồ bố trí thí nghiệm máy quét laser được minh họa trong Hình 3.

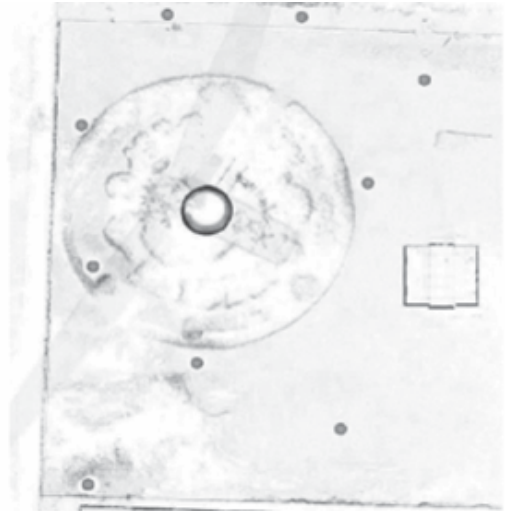


Hình 4. Thiết lập máy quét laser để đo biến dạng tháp tuabin gió tại hiện trường

Chuyển động của tháp tuabin gió được phân tích bằng cách sử dụng cả hai cấu hình căn chỉnh của máy quét laser. Máy quét sẽ được căn chỉnh theo phương thẳng đứng và phương ngang, máy quét được bố trí sao cho mặt phẳng quét song song với mực nước biển như Hình 4. Việc kết hợp hai cấu hình đo này cho phép phân tích chuyển động của tháp tuabin gió theo cả phương trục và phương ngang. Nhờ đó, phương pháp TLS có thể cung cấp thông tin hình học và động học chi tiết của tháp tuabin gió từ một vị trí quan sát đặt trên mặt đất, hỗ trợ hiệu quả cho các nghiên cứu hệ thống quan trắc kết cấu công trình của hệ thống tuabin gió.

2.5. Xử lý dữ liệu TLS và xác định biến dạng tháp

Dữ liệu thu được từ hệ thống quét laser mặt đất bao gồm tập hợp các điểm đo khoảng cách cùng với các góc quét tương ứng. Từ các thông tin này, tọa độ của các điểm trên bề mặt tháp được xác định trong hệ tọa độ Descartes hai chiều. Cụ thể, đối với mỗi điểm đo n , khoảng cách đo được $s(n)$ và góc quét $\theta(n)$ được sử dụng để chuyển đổi sang tọa độ Cartesian thông qua các quan hệ hình học thích hợp. Kết quả là thu được một tập hợp các điểm biểu diễn hình dạng mặt cắt của tháp tại vị trí quét.



Hình 5. Vị trí đặt máy scan để thu thập dữ liệu tại hiện trường

Để xác định vị trí hình học đặc trưng của mặt cắt tháp, các điểm đo được xử lý bằng phương pháp khớp đường cong theo nguyên lý bình phương tối thiểu (least-squares fitting). Do mặt cắt của tháp tuabin gió có dạng gần tròn, một đường cong thích hợp (ví dụ cung tròn hoặc đường cong bậc hai) được khớp với tập hợp các điểm đo trên bề mặt tháp. Từ đường cong khớp này, vị trí đặc trưng của mặt cắt tháp, chẳng hạn như tâm hoặc điểm cực tiểu của đường cong, được xác định và được sử dụng làm đại diện cho vị trí của tháp tại thời điểm quét tương ứng.



Hình 6. Hình ảnh ghép dữ liệu của các phép quét liên tiếp và sai số ghép dữ liệu

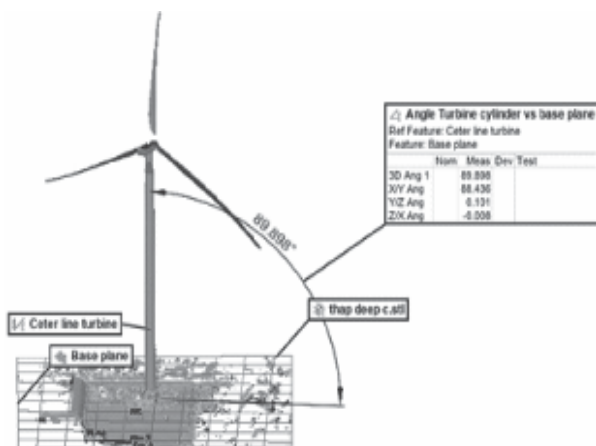
Bằng cách thực hiện phép quét liên tiếp theo thời gian, sự thay đổi vị trí của mặt cắt tháp có thể được xác định. Từ đó, chuyển động của tháp theo phương trục (dọc theo đường ngắm) và phương ngang (vuông góc với đường ngắm) ➡

được tính toán. Phương pháp này cho phép xác định biến dạng và dao động của tháp trong quá trình vận hành của tuabin gió mà không cần lắp đặt các cảm biến trực tiếp trên cấu trúc.



a) Hình chiếu đứng b) Hình chiếu bằng
Hình 7. Đám mây điểm thu được bằng TLS

Ngoài ra, để giảm nhiễu đo và cải thiện độ chính xác của kết quả, các bước xử lý dữ liệu bổ sung như lọc nhiễu, loại bỏ các điểm ngoại lai và làm mượt dữ liệu theo thời gian có thể được áp dụng. Thông qua quá trình xử lý này, các đặc trưng động lực học của tháp, bao gồm biên độ dao động và tần số rung, có thể được xác định từ dữ liệu TLS thu được. Phương pháp đề xuất do đó cung cấp một công cụ hiệu quả để theo dõi và đánh giá biến dạng của tháp tuabin gió trong điều kiện vận hành thực tế.



Hình 8. Hình ảnh đánh giá hình học của tháp Turbine

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả xử lý dữ liệu TLS

Dữ liệu đám mây điểm TLS thu được tại hiện trường đã được xử lý bằng phần mềm Faro Stream thông qua quy trình đăng ký đám mây điểm. Tổng cộng có 11 vị trí thiết lập máy quét được sử dụng, bao gồm 9 vị trí thiết lập cho Turbin gió. Sau khi đăng ký, tập dữ liệu được xử lý trong phần mềm Faro Scene để loại bỏ các đối tượng không cần thiết. Quy trình xử lý này đã tạo ra tập dữ liệu đám mây điểm cuối cùng cho Turbin gió như Hình 7.

Sau khi dữ liệu đã loại bỏ các đối tượng không cần thiết sẽ được đưa vào phần mềm chuyên dụng để phân tích và đánh giá các thông số hình học của tháp Turbine.

3.2. Đánh giá độ chính xác

Đánh giá độ chính xác hình học là điều cần thiết trong các hoạt động đo lường để đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu thu thập được. Một phương pháp thường được sử dụng là Sai số bình phương trung bình gốc (RMSE), tính toán sự khác biệt bình phương trung bình giữa các giá trị đo được và giá trị tham chiếu. RMSE càng nhỏ thì độ chính xác càng cao. Các công thức đánh giá độ chính xác được sử dụng trong nghiên cứu này được trình bày bên dưới.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

Kết quả đánh giá hình học của tháp sau khi hoàn thiện được trình bày ở hình 8.

4. KẾT LUẬN

Hệ thống đo lường dựa trên TLS được

đề xuất có khả năng mô tả chuyển động của các tháp tuabin gió cao theo hai hướng và tần số chủ đạo của chuyển động đó từ một điểm truy cập duy nhất. Điều này đạt được bằng cách đặt máy quét laser ở khoảng cách đo hơn 128 m so với tháp. Máy quét laser được nghiêng lên trên để đo biến dạng ở đầu trên cùng của tháp. Với sự trợ giúp của phương pháp khớp bình phương nhỏ nhất thông qua các điểm dữ liệu đo được và trích xuất các giá trị cực tiểu cho mỗi lần quét, có thể xác định chuyển động của tháp không chỉ theo hướng trục (đường ngắm) mà còn theo hướng ngang (vuông góc với đường ngắm).❖

Ngày nhận bài: 12/3/2026

Ngày phản biện: 27/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Paul Veers, Katherine Dykes, Eric Lantz, Stephan Barth, and Ryan Wiser, “Grand challenges in the science of wind energy”. Science, 366(6464), 2019.
- [2]. Pierre Tchakoua, Ren Wamkeue, Mohand Ouhrouche, Fouad Slaoui-Hasnaoui, Tommy Tameghe, and Gabriel Ekemb, “Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges”. Energies, 7(4):2595{2630, 2014.
- [3]. Đặng Thị Hải Linh, Hoàng Xuân Cơ, Tạ Văn Đa, Nguyễn Thu Hà, Đinh Mạnh Cường, Trịnh Thị Mai, Trần Thanh Phong, “Nghiên cứu một số điều kiện phát triển điện gió tại Việt Nam trên cơ sở dự án Nhà máy Phong Điện I - Bình Thuận”.
- [4]. Trần Thực, Tạ Văn Đa, Nguyễn Văn Thắng (2012), “*Năng lượng gió ở Việt Nam - Tiềm năng và khả năng khai thác*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [5]. Muammer Ozbek, Fanzhong Meng, and Daniel J. Rixen, “Challenges in testing and monitoring the in-operation vibration characteristics of wind turbines”. Mechanical Systems and Signal Processing, 41(1-2):649-666,2013.
- [6]. M E Tjahjadi, L A Parsamardhani and K T Suhari, “Bridge Structural Deformation Monitoring Using Digital Camera”. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1051-012009, 2022.
- [7]. Mukupa, W.; Roberts, G.W.; Hancock, C.M.; Al-Manasir, K., “A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures”. Survey Review. 2016, 1-18.
- [8]. Ozbek, M.; Meng, F.; Rixen, D.J., “Challenges in testing and monitoring the in-operation vibration characteristics of wind turbines”. Mechanical Systems and Signal Processing. 2013, 41, 649-666.
- [9]. Paula Helming, Axel von Freyberg, Michael Sorg, and Andreas Fischer, “Wind Turbine Tower Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanning on a 3.4 MW Wind Turbine”. Energies, 14(11):3255, 2021.
- [10]. Ahmet U. Dilek, Ali D. Oguz, Furkan Satis, Yigit D. Gokdel, and Muammer Ozbek, “Condition monitoring of wind turbine blades and tower via an automated laser scanning system”. Engineering Structures, 189:25-34,2019.