

PHÂN TÍCH BẤT ỔN ĐỊNH KẾT CẤU THÉP DẠNG THÁP

Structural Buckling Analysis of Tower-Type Steel Structures

Võ Hoàng Nhân¹ và Trương Tích Thiện²

¹Học viên cao học Trường Đại học Kinh tế Công nghiệp Long An, Tây Ninh, Việt Nam
hoangnhan5454@gmail.com

²Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG TP. HCM, Việt Nam
tttruong@hcmut.edu.vn

Tóm tắt — Tháp thép dạng giàn có vai trò quan trọng trong hệ thống truyền tải điện cao thế nhờ đặc tính nhẹ, hiệu quả và thi công nhanh. Tuy nhiên, với hình học thanh mảnh và chịu tác động của tải ngang – dọc, chúng dễ xảy ra hiện tượng mất ổn định, đặc biệt dưới điều kiện môi trường khắc nghiệt như gió mạnh, tải trọng dây dẫn mất cân bằng. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) bằng phần mềm ANSYS để phân tích bất ổn định tháp thép. Hai mô hình gồm một tháp thép quốc tế và một đoạn tháp cao 23 m theo thiết kế Việt Nam, được mô phỏng dưới tổ hợp tải trọng tĩnh gồm trọng lượng bản thân, tải gió và tải trọng mất cân bằng. Phân tích tuyến tính và phi tuyến đều được thực hiện nhằm xác định các khu vực dễ xảy ra mất ổn định cục bộ hoặc tổng thể. Kết quả cho thấy ứng suất và chuyển vị lớn tập trung tại các vị trí chịu tải không đối xứng, làm tăng rủi ro biến dạng dẻo và sụp đổ. Từ đó, đề xuất các giải pháp như gia cường thanh chịu lực chính, sử dụng thép cường độ cao và tối ưu hệ giằng, nhằm nâng cao độ ổn định của kết cấu, góp phần thiết lập cơ sở cho thiết kế tháp truyền tải bền vững.

Từ khóa — Bất ổn định kết cấu, kết cấu thép dạng tháp, tải trọng gió, phân tích phi tuyến.

Abstract — Truss steel towers play an important role in high-voltage power transmission systems due to their lightweight, efficiency, and rapid construction. However, with slender geometry and being subjected to both horizontal and vertical loads, these structures are prone to instability, especially under harsh environmental conditions such as strong winds and unbalanced conductor tensions. This study employs the Finite Element Method (FEM) using ANSYS software to analyze the instability of steel towers. Two models, including an international steel tower and a 23-meter-high tower segment designed according to Vietnamese standards, are simulated under a combination of static loads, including self-weight, wind load, and unbalanced loading. Both linear and nonlinear buckling analyses are conducted to identify areas susceptible to local or global instability. The results show that large stress and displacement are concentrated in regions subjected to asymmetric loading, increasing the risk of plastic deformation and collapse. Based on these findings, the study proposes solutions such as strengthening the main load-bearing members, using high-strength steel, and optimizing the bracing system to improve structural stability, thereby contributing to a foundation for sustainable transmission tower design.

Keywords — Structural instability, tower-type steel structures, wind loads, nonlinear analysis.

1. Giới thiệu

Tháp thép dạng giàn là một trong những dạng kết cấu được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực truyền tải điện, viễn thông và phát sóng truyền hình nhờ vào các ưu điểm vượt trội như trọng lượng nhẹ, khả năng thi công nhanh chóng và hiệu quả sử dụng vật liệu cao. Kết cấu dạng giàn với hệ thanh chịu lực giúp phân bổ nội lực hợp lý, đồng thời giảm thiểu khối lượng kết cấu và áp lực lên móng công trình. Tuy nhiên, đặc điểm hình học thanh mảnh khiến các tháp này dễ bị ảnh hưởng bởi hiện tượng mất ổn định tổng thể và cục bộ. An toàn của hệ thống điện ảnh hưởng trực tiếp đến hoạt động sản xuất, xây dựng của quốc gia cũng như trật tự sinh hoạt của người dân [1, 2].

Trong thực tế, tại Việt Nam cũng như nhiều quốc gia khác, đã ghi nhận không ít sự cố sập đổ hoặc hư hỏng nghiêm trọng liên quan đến kết cấu tháp thép cao, gây tổn thất lớn về kinh tế, gián đoạn hệ thống truyền tải và ảnh hưởng đến an toàn cộng đồng [3]. Nguyên nhân phổ biến là do thiết kế chưa tính đến đầy đủ các tổ hợp tải trọng bất lợi hoặc không đánh giá đúng mức độ nguy hiểm của hiện tượng bất ổn định kết cấu [4-6].

Trước thực trạng đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá ứng xử bất ổn định của kết cấu tháp truyền tải bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), thông qua mô phỏng số bằng phần mềm ANSYS. Hai mô hình tiêu biểu được lựa chọn: (1) mô hình tháp thép dạng giàn theo tiêu chuẩn quốc tế và (2) đoạn trụ tháp cao 23m theo thiết kế phổ biến tại Việt Nam. Các mô hình được

gia khác, đã ghi nhận không ít sự cố sập đổ hoặc hư hỏng nghiêm trọng liên quan đến kết cấu tháp thép cao, gây tổn thất lớn về kinh tế, gián đoạn hệ thống truyền tải và ảnh hưởng đến an toàn cộng đồng [3]. Nguyên nhân phổ biến là do thiết kế chưa tính đến đầy đủ các tổ hợp tải trọng bất lợi hoặc không đánh giá đúng mức độ nguy hiểm của hiện tượng bất ổn định kết cấu [4-6].

<https://doi.org/10.63783/dla.2026.014>

Ngày nộp bài: 15/07/2026; Ngày nhận bản chỉnh sửa: 15/02/2026; Ngày duyệt đăng: 25/03/2026

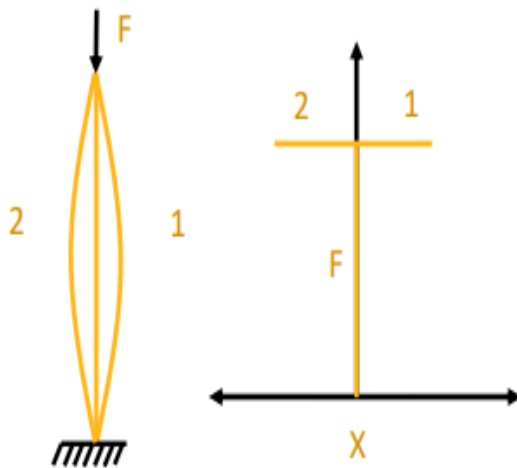
phân tích dưới tác dụng của tổ hợp tải trọng tĩnh, bao gồm: Trọng lượng bản thân, tải trọng gió và lực mất cân bằng trong quá trình vận hành. Nghiên cứu tiến hành cả phân tích mất ổn định tuyến tính (theo giá trị riêng) và phi tuyến (bao gồm biến dạng lớn và vật liệu dẻo), nhằm xác định chính xác các khu vực nguy hiểm, khả năng xảy ra ứng suất cục bộ và biến dạng quá mức. Trên cơ sở kết quả mô phỏng, các giải pháp thiết kế được đề xuất nhằm nâng cao khả năng chống chịu và ổn định tổng thể của kết cấu tháp, góp phần đảm bảo an toàn vận hành và kéo dài tuổi thọ công trình.

2. Cơ sở lý thuyết và mô hình tính toán

2.1. Hiện tượng mất ổn định và tải trọng

Buckling là hiện tượng mất ổn định của kết cấu, trong đó cấu trúc bị biến dạng ngang nhanh chóng. Nguyên nhân chính là mất độ cứng đột ngột. Thường xảy ra khi chịu tải nén (ví dụ: lon soda bị bóp méo), nhưng cũng có thể xảy ra khi chịu tải kéo (ví dụ: đường ray bị uốn cong do nhiệt). Buckling không bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng quán tính như trong phân tích động lực học. Quá trình này liên quan đến sự chuyển đổi nhanh chóng từ năng lượng bên trong của hệ thống sang động năng.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$



Hình 1. Mất ổn định tại một cột dưới tải tới hạn

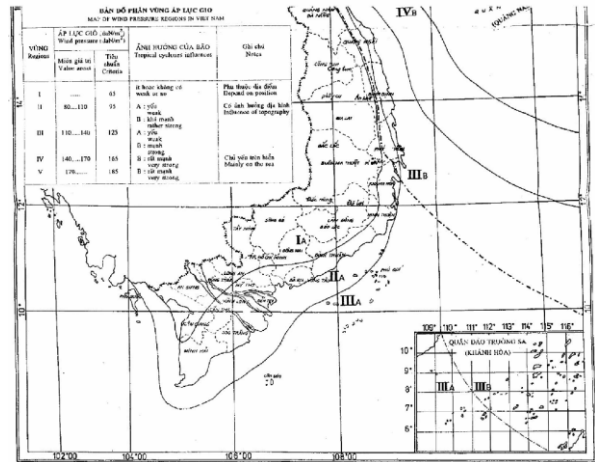
Đối với tải gió, giá trị tiêu chuẩn thành phần tĩnh của tải trọng gió ở độ cao Z chuẩn xác định theo công thức:

$$W = W_0 \times k \times c \quad (2)$$

Trong đó: W_0 là giá trị áp lực gió lấy theo bản đồ phân vùng (daN/m²); k là hệ số tính đến sự thay đổi của áp lực gió theo độ cao; c là hệ số khí động.

Từ phụ lục D và phụ lục E theo tiêu chuẩn thiết kế (TCVN 2737 – 1995) về tải trọng và tác động thì thành phố Bảo Lộc nằm ở vị trí vùng gió

số IA. Chi tiết được thể hiện ở Hình 2 bên dưới. Các hệ số k , c lần lượt được tra tại Bảng 5 và Bảng 6 theo tiêu chuẩn TCVN 2737-1995.

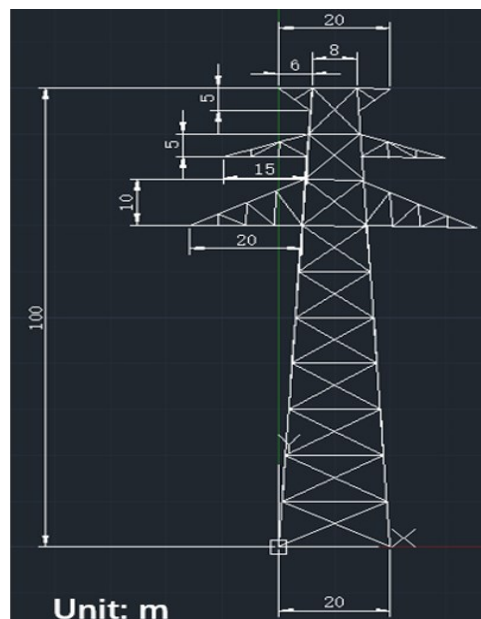


Hình 2. Bản đồ phân vùng áp lực gió [7]

2.2. Mô hình tính toán

2.2.1. Tháp truyền tải dạng giàn thép:

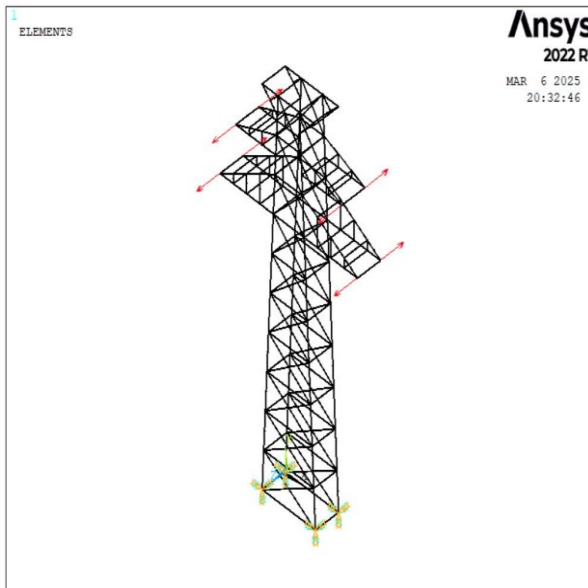
Một mô hình phần tử hữu hạn (FEM) của tháp truyền tải đã được xây dựng nhằm mô phỏng phân ứng cơ học của kết cấu giàn. Tháp truyền tải bao gồm các dầm thép có đường kính 200mm và độ dày 10mm, minh họa ở Hình 3. Quá trình thiết lập mô hình FEM tận dụng tính đối xứng của kết cấu và loại bỏ các chi tiết không ảnh hưởng đáng kể đến kết quả mô phỏng (ví dụ như các đặc điểm biên của vật liệu dầm thép). Sau đó, mô hình được sử dụng để tạo ra sơ đồ ba chiều của hệ giàn. Tổng chiều cao của tháp truyền tải 500kV là 100m. Các kích thước tham khảo từ nghiên cứu [8].



Hình 3. Kích thước tháp truyền tải dạng giàn thép [8]

Kích thước lưới toàn cục được thiết lập khoảng 2m, giúp cân bằng giữa độ chính xác và

thời gian tính toán. Trong phân tích phần tử hữu hạn, vật liệu thép được giả định có tính chất đàn hồi tuyến tính với tính chất cơ học được đưa ra gồm module đàn hồi 210GPa, hệ số Poisson 0.3, khối lượng riêng 7,800kg/m³, giới hạn chảy 345MPa. Nhằm đánh giá tác động của lực mất cân bằng đến độ ổn định của tháp, các điều kiện tải trọng trong Bảng 1 được đưa vào mô phỏng, với lực mất cân bằng thay đổi từ 0N đến 25,000N. Tại 4 chân trụ của tháp được đặt điều kiện biên cố định. Hình 4 thể hiện mô hình phần tử hữu hạn của tháp truyền tải dạng giàn thép sau khi được gán tải trọng mất cân bằng.

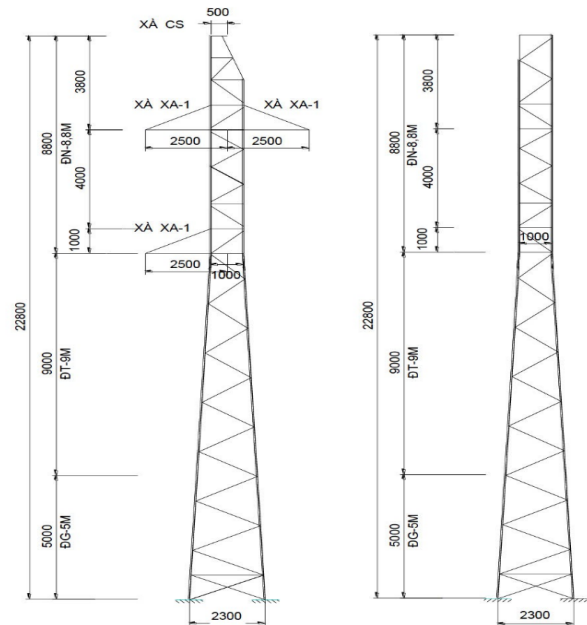


Hình 4. Điều kiện biên áp dụng cho tháp truyền tải dạng giàn thép

2.2.2. Tháp truyền tải ở Việt Nam:

Kết cấu trụ tháp thép đỡ thẳng ba tầng xà được trích từ mô hình trụ tháp thép đỡ thẳng ĐT-111-22 trong giai đoạn thiết kế bản vẽ thi công thuộc dự án đường dây 110kV một mạch Bảo Lộc – Bauxit – Lâm Đông. Trụ tháp thép đỡ thẳng ba tầng xà có chiều cao 22.8m, thể hiện ở Hình 5. Công trình trong mô phỏng được xem xét dưới hai trường hợp tải trọng. Thứ nhất, mô hình tháp chịu tải trọng lực mất cân bằng (do không phân bố đều tải trọng từ dây dẫn). Thứ hai, mô hình tháp chịu ảnh hưởng của tải trọng gió – một yếu tố thường xuyên và quan trọng trong thiết kế các kết cấu ngoài trời. Cả hai loại tải trọng này đều có khả năng gây ra biến dạng lớn hoặc mất ổn định cục bộ nếu không được xét đến đúng mức trong tính toán thiết kế.

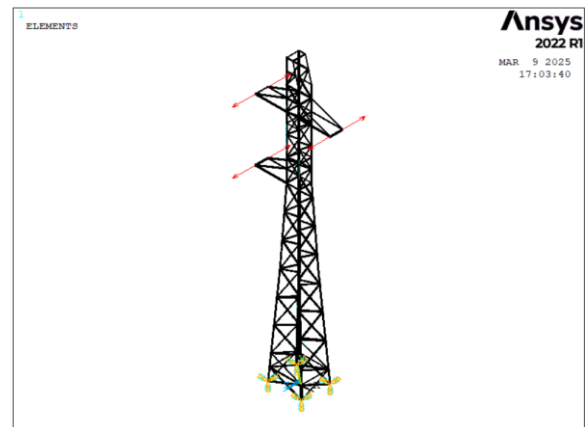
Thông số tiết diện của các thanh dầm cũng được thể hiện trong Bảng 2. Tháp được thiết kế với các thông số vật liệu thép như sau: Module đàn hồi 200GPa, hệ số Poisson 0.3, khối lượng riêng 7,800kg/m³, giới hạn chảy 248MPa.



Hình 5. Kích thước mô hình tháp truyền tải ở Việt Nam [9]

Tháp sẽ được chia lưới với kích thước lưới cục bộ là 2m. Điều kiện biên của mô phỏng là liên kết bản lề. Kích thước lưới toàn cục được thiết lập khoảng 2m. Tại vị trí các chân cột của tháp được giữ cố định. Đối với điều kiện tải trọng được chia ra làm hai phần phân tích: (1) tháp chịu trọng lực mất cân bằng, chưa kể đến tải trọng gió; (2) tháp chịu ảnh hưởng của tải trọng gió.

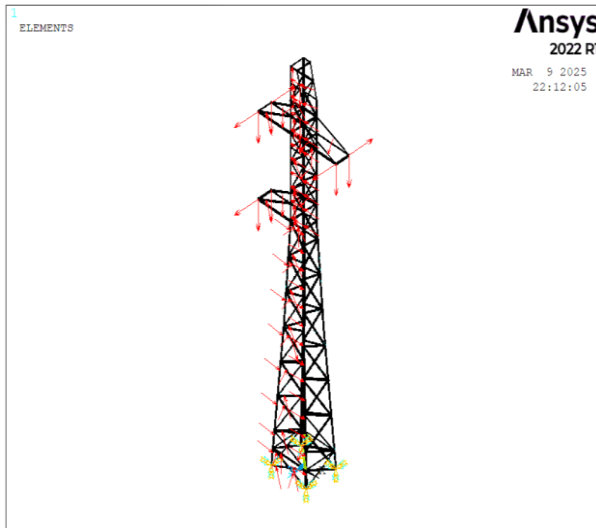
Ở trường hợp 1, tương tự như phân tích đối với tháp trong tài liệu tham khảo [8], mô hình tháp truyền tải điện ở Bảo Lộc sẽ chịu tải mất cân bằng để tìm được tải tới hạn mà tháp có thể chịu được. Các giá trị lực khảo sát được trình bày trong Bảng 3 và Hình 6.



Hình 6. Điều kiện biên chưa kể tải trọng gió của tháp truyền tải ở Việt Nam

Ở trường hợp 2, kết cấu chịu tải trọng do dây dẫn điện và tải trọng gió, được thể hiện ở Bảng 4 và Hình 7. Trọng lượng dây dẫn và sứ cách điện (P_1), tác động theo phương thẳng đứng xuống tại bên cánh của tháp, theo phương y. Lực gió tác động lên dây dẫn (P_2), tác động ngang lên tháp, theo phương z.

Lực căng dây dẫn (P_3), tác động ngang tại các bên cánh của tháp, tạo mô men xoắn (theo phương z).



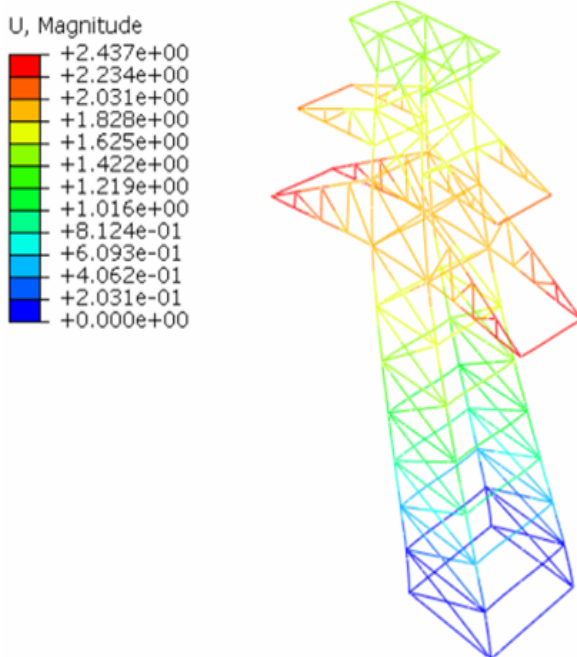
Hình 7. Điều kiện biên có chứa tải gió của tháp truyền tải ở Việt Nam

3. Kết quả số

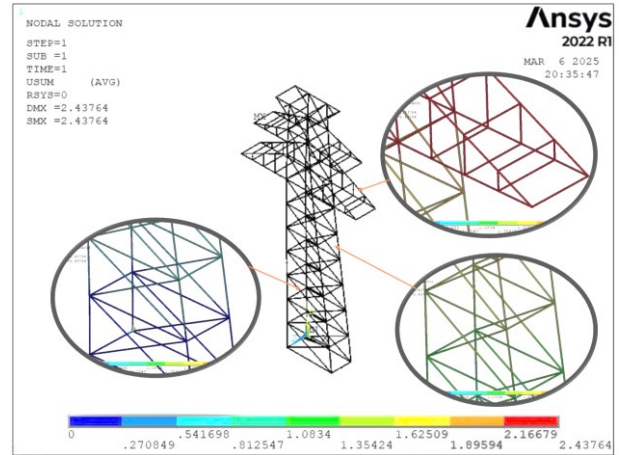
3.1. Tháp truyền tải dạng giàn thép

Hình 8 và Hình 9 lần lượt biểu diễn sự phân bố chuyển vị của tháp truyền tải khi chịu tác động của lực mất cân bằng 10,000 N theo tài liệu tham khảo [8] và theo phân tích bằng ANSYS APDL.

Kết quả cho thấy chuyển vị lớn nhất xuất hiện tại các nút chịu tải. Ngoài ra, phần phía dưới tải cho thấy chuyển vị có xung hướng tăng dần khi chiều cao tăng.

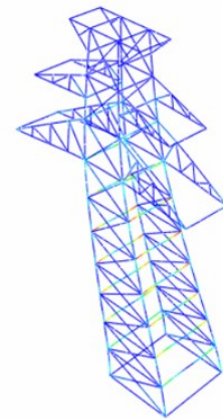
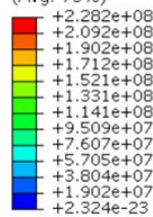


Hình 8. Kết quả chuyển vị tổng của tháp truyền tải dạng giàn thép [8]

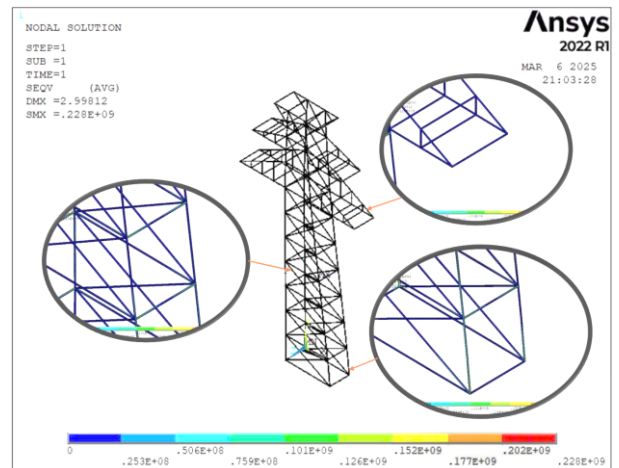


Hình 9. Phân bố chuyển vị tháp truyền tải dạng giàn thép

S, Mises
Angle = -90.0000, (1-fraction = 0.000000, 2-fraction = -1.000000)
(Avg: 75%)



Hình 10. Ứng suất của tháp truyền tải dạng giàn thép [8]



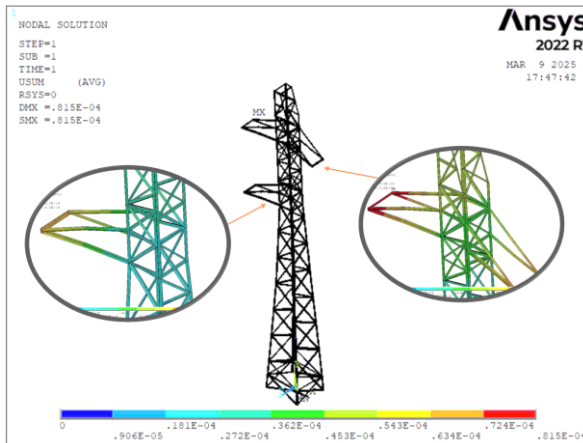
Hình 11. Phân bố ứng suất tháp truyền tải dạng giàn thép

Phân bố ứng suất của tháp truyền tải điện khi chịu tác động của lực mất cân bằng 10,000 N theo tài liệu tham khảo [8] và theo phân tích bằng ANSYS APDL được thể hiện lần lượt trong Hình 10 và Hình 11. Khác so với chuyển vị, ứng suất cao nhất trong ống thép tập trung gần phần chân tháp. Đồng thời, phân bố ứng suất giảm dần khi khoảng cách đến mặt đất tăng lên.

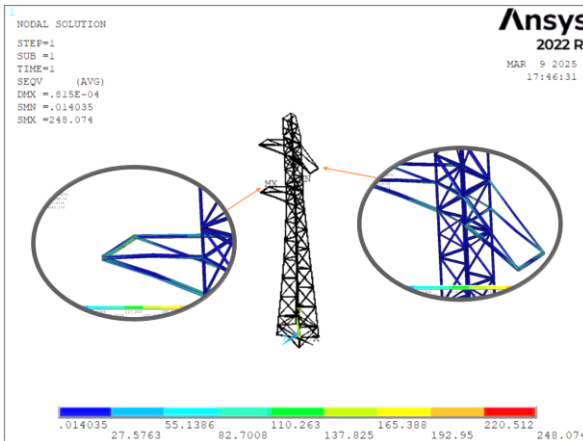
3.2. Tháp truyền tải ở Việt Nam

3.2.1. Trường hợp chịu tải trọng mất cân bằng, chưa kể đến tải trọng gió:

Hình 12 minh họa sự phân bố chuyển vị của tháp truyền tải dưới tác động của lực mất cân bằng 5,650N. Kết quả phân tích cho thấy chuyển vị lớn nhất xảy ra tại các nút chịu tải. Bên cạnh đó, có thể nhận thấy rằng chuyển vị có xu hướng tăng dần theo chiều cao của tháp.



Hình 12. Kết quả chuyển vị tổng của tháp truyền tải ở Việt Nam khi chịu tải mất cân bằng



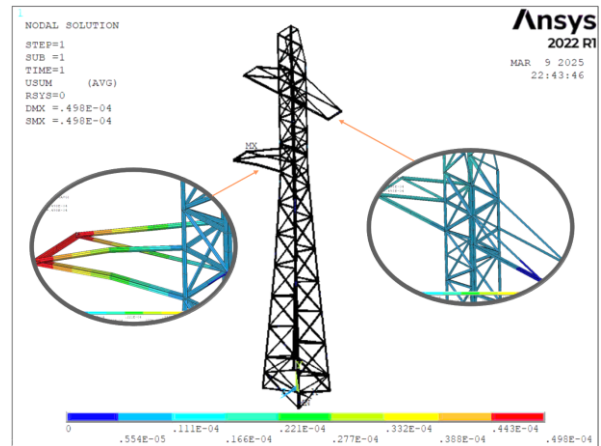
Hình 13. Kết quả ứng suất của tháp truyền tải ở Việt Nam khi chịu tải mất cân bằng

Phân bố ứng suất của tháp truyền tải điện khi chịu tác động của lực mất cân bằng 5,650N được thể hiện trong Hình 13 và cho thấy ứng suất cao nhất của tháp Việt Nam tập trung gần phần chịu tải.

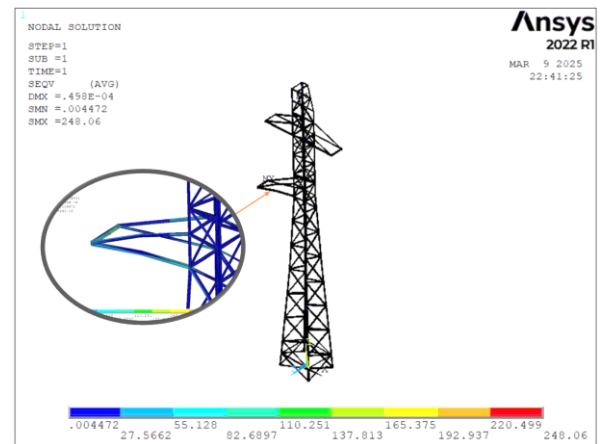
3.2.2. Tháp chịu tải trọng gió:

Sự phân bố chuyển vị và ứng suất của tháp truyền tải khi chịu ảnh hưởng của tải gió được thể hiện ở Hình 14 và Hình 15.

Kết quả phân tích cho thấy chuyển vị lớn nhất tập trung tại các nút chịu tải căng dây, cụ thể là ở vị trí cánh dưới của tháp. Ứng suất lớn nhất tập trung chủ yếu ở khu vực chịu tải căng dây dẫn (cánh phía dưới của tháp).



Hình 14. Kết quả chuyển vị tổng của tháp truyền tải ở Việt Nam khi có ảnh hưởng tải gió

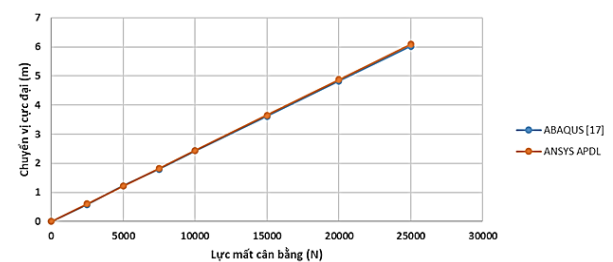


Hình 15. Kết quả ứng suất của tháp truyền tải ở Việt Nam khi có ảnh hưởng tải gió

3.3. Phân tích kết quả tính toán

3.3.1. Quan hệ biến dạng và ứng suất cực đại theo lực mất cân bằng của tháp truyền tải dạng giàn thép:

Để đánh giá ảnh hưởng của lực mất cân bằng đến độ ổn định của tháp truyền tải, mô hình FEM đã được sử dụng để tính toán chuyển vị lớn nhất dưới các mức tải trọng tập trung khác nhau (được trình bày trong Bảng 1). Sau đó kết quả được so sánh với tài liệu [8]. Sự biến đổi của chuyển vị lớn nhất được thể hiện trong Hình 16.

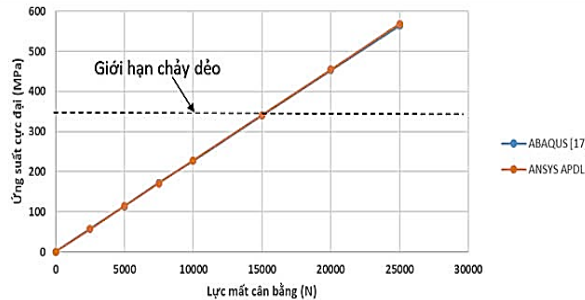


Hình 16. Sự thay đổi chuyển vị lớn nhất tại nhiều lực mất cân bằng khác nhau của tháp truyền tải dạng giàn thép

Kết quả mô phỏng cho thấy chuyển vị lớn nhất có mối quan hệ tuyến tính với lực mất cân

bằng, nghĩa là khi lực tăng lên, chuyển vị cũng tăng theo tỷ lệ tương ứng. Ngoài ra, kết quả sai số 4.6% so với tài liệu tham khảo [8]. Điều này cho thấy độ chính xác khi giải bằng ANSYS APDL tương đối cao.

Ngoài ra, quan hệ giữa ứng suất và lực mất cân bằng được thể hiện trong Hình 17. Tương tự với biến dạng, ứng suất cực đại cũng tăng theo quy luật tuyến tính khi lực mất cân bằng tăng. Kết quả cho sai số tương đối nhỏ 1.1% so với tài liệu [8]. Ngoài ra, khi lực mất cân bằng gần đạt 15,000N, ứng suất cực đại có thể chạm ngưỡng chảy của thép Q345 – loại vật liệu được sử dụng để chế tạo tháp truyền tải 500kV. Khi lực mất cân bằng nhỏ hơn giá trị này, ứng suất vẫn nằm trong giới hạn chảy, đảm bảo an toàn cho kết cấu. Tuy nhiên, nếu lực mất cân bằng vượt quá 15,000N, ứng suất cực đại có thể vượt qua giới hạn chảy của thép, dẫn đến biến dạng dẻo tại một số vị trí, đặc biệt là ở chân tháp.



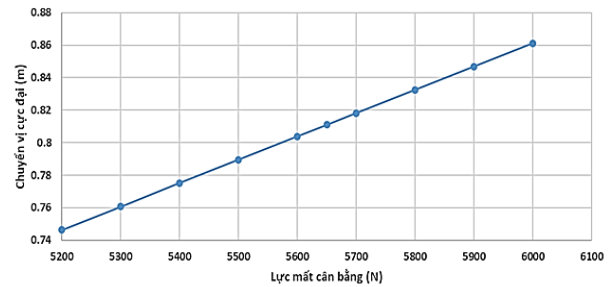
Hình 17. Sự thay đổi ứng suất cực đại tại nhiều lực mất cân bằng khác nhau của tháp truyền tải dạng giàn thép

Nếu hai lực tác dụng (F_1 và F_2) có độ lớn bằng nhau, lực mất cân bằng bằng 0, dẫn đến ứng suất và chuyển vị đều bằng 0. Khi đó, tháp truyền tải vẫn ở trạng thái ổn định và an toàn. Tuy nhiên, sự xuất hiện của biến dạng dẻo cục bộ có thể gây ra biến dạng không hồi phục, làm tăng nguy cơ mất ổn định và sập đổ tháp truyền tải.

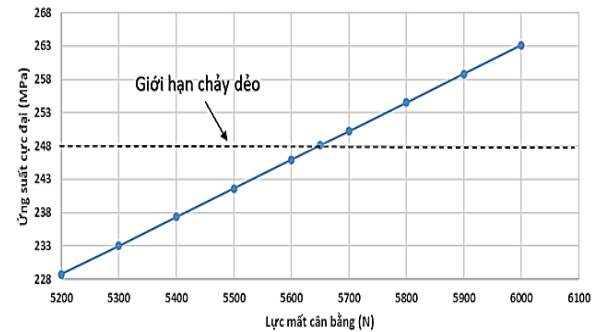
Do đó, trong quá trình thiết kế, cần đảm bảo tránh hiện tượng này. Dựa trên các phân tích trên, giới hạn lực mất cân bằng tối đa mà tháp truyền tải có thể chịu được là 15,000N.

3.3.2. Quan hệ biến dạng và ứng suất cực đại theo lực mất cân bằng của truyền tải ở Việt Nam:

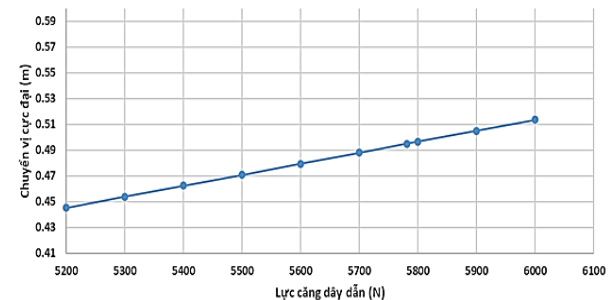
Trường hợp tháp chịu tải trọng mất cân bằng, chưa kể đến tải trọng gió. Tương tự, để đánh giá tác động của lực mất cân bằng đến độ ổn định của tháp truyền tải, mô hình FEM được áp dụng để xác định chuyển vị lớn nhất dưới các mức tải trọng tập trung khác nhau (được trình bày trong Bảng 3). Sự thay đổi của chuyển vị lớn nhất được minh họa trong Hình 18.



Hình 18. Sự thay đổi của chuyển vị cực đại tại nhiều lực mất cân bằng khác nhau của tháp truyền tải ở Việt Nam



Hình 19. Sự thay đổi của ứng suất cực đại tại nhiều lực mất cân bằng khác nhau của tháp truyền tải ở Việt Nam

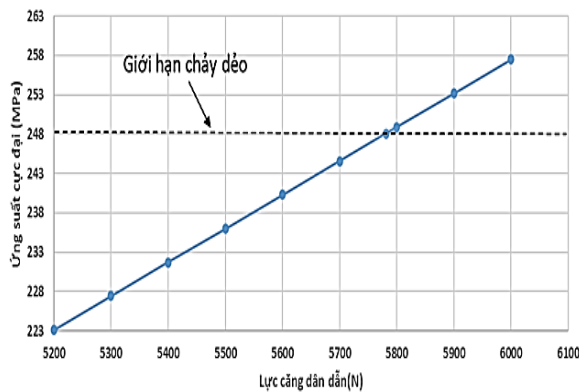


Hình 20. Sự thay đổi của chuyển vị cực đại của tháp truyền tải ở Việt Nam khi có ảnh hưởng của tải gió

Tương tự phân phân tích so với tài liệu tham khảo [8], kết quả mô phỏng cho thấy chuyển vị lớn nhất có mối quan hệ tuyến tính với lực mất cân bằng, nghĩa là khi lực tăng lên, chuyển vị cũng tăng theo tỷ lệ tương ứng. Điều này cho thấy phương pháp nghiên cứu đang đạt được sự hiệu quả. Ngoài ra, quan hệ giữa ứng suất và lực mất cân bằng được thể hiện trong Hình 19. Tương tự với biến dạng, ứng suất cực đại cũng tăng theo quy luật tuyến tính khi lực mất cân bằng tăng. Ngoài ra, khi lực mất cân gần đạt 5,650N, ứng suất cực đại có thể chạm ngưỡng chảy của vật liệu đã thiết lập trước đó. Khi lực mất cân bằng nhỏ hơn giá trị này, ứng suất vẫn nằm trong giới hạn chảy, đảm bảo an toàn cho kết cấu. Tuy nhiên, nếu lực mất cân bằng vượt quá 5,650N, ứng suất cực đại có thể vượt quá giới hạn chảy của vật liệu, gây ra biến dạng dẻo tại một số vị trí, đặc biệt là khu vực bên cánh của tháp.

Tương tự, với trường hợp chịu ảnh hưởng của tải trọng gió được trình bày trong Bảng 4. Sự biến thiên của chuyển vị cực đại được minh họa ở Hình

20 và mối quan hệ giữa ứng suất và lực được minh họa trong Hình 21.

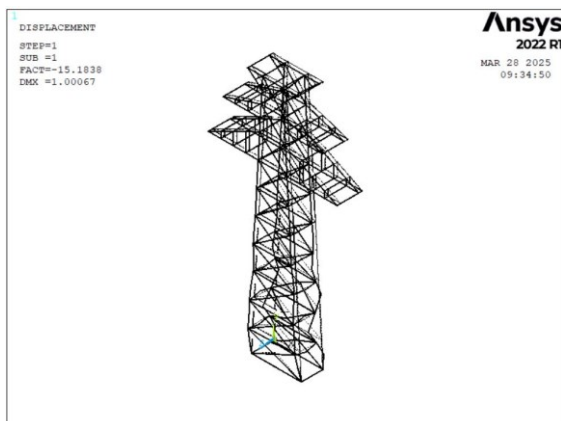


Hình 21. Sự thay đổi của ứng suất cực đại của tháp truyền tải ở Việt Nam khi có ảnh hưởng của tải gió

3.4. Giải pháp xử lý

3.4.1. Giải pháp cho tháp truyền tải dạng giàn thép:

Khi phân tích kết cấu tháp truyền tải điện cao thế, một trong những yếu tố quan trọng cần xem xét là ứng suất tập trung. Trong quá trình làm việc, nếu hệ số tải trọng tăng lên, ứng suất tại chân tháp sẽ gia tăng đáng kể. Khi lực mất cân bằng của dây điện đạt đến giá trị 15,000N thì ứng suất cực đại tại khu vực này có thể chạm ngưỡng giới hạn chảy dẻo của vật liệu ($\sigma_y = 345\text{MPa}$). Tại thời điểm này, vật liệu bắt đầu biến dạng dẻo, tức là mất khả năng đàn hồi và không thể quay về trạng thái ban đầu sau khi tải trọng được gỡ bỏ. Nếu sự biến dạng dẻo tiếp tục lan rộng, khu vực chịu ứng suất cao này sẽ bị suy yếu nghiêm trọng, làm giảm khả năng chịu tải của toàn bộ kết cấu. Khi đó, hiện tượng mất ổn định có thể xảy ra, gây ra sự biến dạng lớn và mất khả năng chịu lực của tháp truyền tải.



Hình 22. Sự mất ổn định tháp truyền tải dạng giàn thép

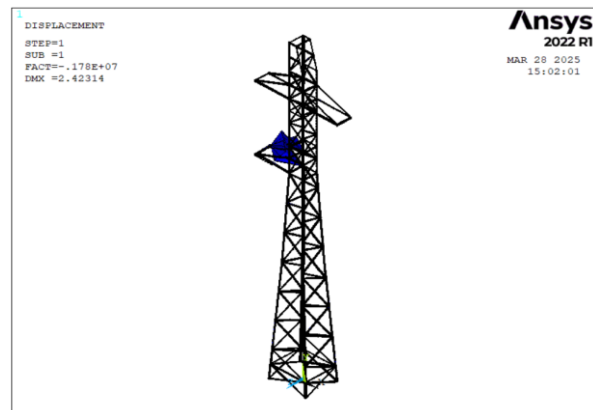
Hình 22 minh họa rõ nét quá trình này, trong đó có thể thấy rõ cách thức kết cấu phản ứng dưới tải trọng tăng dần, cũng như vùng bị biến dạng

nhất trong điều kiện tải trọng tới hạn. Hiện tượng mất ổn định này là một yếu tố quan trọng trong thiết kế kết cấu, đòi hỏi các kỹ sư phải có biện pháp gia cố phù hợp để đảm bảo độ an toàn và ổn định của tháp truyền tải.

Để hạn chế nguy cơ mất ổn định tại vị trí này, có thể áp dụng một số giải pháp như: tăng độ cứng kết cấu bằng cách sử dụng các thanh giằng bổ sung hoặc gia cường các mối liên kết; tối ưu hóa kích thước và tiết diện của các cấu kiện tại chân tháp để giảm ứng suất tập trung; kiểm tra kỹ thuật hàn và liên kết bu lông để đảm bảo các chi tiết không bị suy yếu do lỗi chế tạo.

3.4.2. Giải pháp cho tháp truyền tải ở Việt Nam:

Hình 23 thể hiện phân tích mất ổn định của tháp truyền tải ở Việt Nam. Biến dạng tổng thể cho thấy phân thân giữa có sự dịch chuyển đáng kể, đặc biệt là các cánh ngang bị xoắn và lệch khỏi vị trí ban đầu. Nguyên nhân chính có thể đến từ việc kết cấu thiếu độ cứng, đặc biệt ở phần thân giữa và hệ giằng ngang chưa đủ khả năng chống lại các tác động từ tải trọng ngoài như gió hoặc tải trọng không đối xứng. Ngoài ra, việc phân bố tải trọng không hợp lý hoặc quá lớn so với khả năng chịu tải của kết cấu cũng là yếu tố quan trọng làm giảm hệ số tải trọng tới hạn. Những dấu hiệu này cho thấy mô hình tháp đang trong trạng thái nguy hiểm và cần được tối ưu hóa thiết kế để đảm bảo an toàn khi làm việc thực tế.



Hình 23. Sự mất ổn định của tháp truyền tải ở Việt Nam

Để cải thiện độ ổn định của tháp truyền tải và giảm nguy cơ mất ổn định tại các vị trí bên cánh, có thể áp dụng các giải pháp tăng cường cánh đỡ như sau: Gia cố các nút liên kết giữa cánh đỡ và thân tháp để giảm nguy cơ mất ổn định do xoắn; sử dụng thêm giằng ngang giữa các cánh để tăng độ cứng và ổn định của hệ thống; xem xét việc tăng tiết diện các thanh chính của cánh đỡ để cải thiện khả năng chịu tải.

Bảng 1. Tải trọng tác dụng lên tháp, đơn vị: N [8]

STT	Lực 1 (F_1)	Lực 2 (F_2)	Lực mất cân bằng ($F_1 - F_2$)
1	10,000	10,000	0
2	12,500	10,000	2,500
3	15,000	10,000	5,000
4	17,500	10,000	7,500
5	20,000	10,000	10,000
6	25,000	10,000	15,000
7	30,000	10,000	20,000
8	35,000	10,000	25,000

Bảng 2. Thông số tiết diện bài toán trụ tháp ba tầng xà, cao 23m [9]

Tiết diện	Chiều cao cạnh A (mm)	Chiều rộng cạnh A (mm)	Chiều dày cạnh t (mm)
L100x100x7	100	100	7
L90x90x7	90	90	7
L80x80x6	80	80	6
L70x70x6	70	70	6
L65x65x5	65	65	5
L60x60x5	60	60	5
Lx50x50x5	50	50	5

Bảng 3. Tải trọng tác dụng lên tháp, đơn vị: N

STT	Lực 1 (F_1)	Lực 2 (F_2)	Lực mất cân bằng ($F_1 - F_2$)
1	10,200	5,000	5,200
2	10,300	5,000	5,300
3	10,400	5,000	5,400
4	10,500	5,000	5,500
5	10,600	5,000	5,600
6	10,650	5,000	5,650
7	10,700	5,000	5,700
8	10,800	5,000	5,800
9	10,900	5,000	5,900
10	11,000	5,000	6,000

Bảng 4. Thông tin tải trọng [9]

Trọng lượng dây + sứ cách điện $P_1(N)$	Áp lực gió lên tháp $P_2(N/m^2)$	Lực căng dây dẫn $P_3(N)$
2,400	Tính toán dựa trên công thức (2)	5,200
		5,300
		5,400
		5,500
		5,600
		5,700
		5,782
		5,800
		5,900
		6,000

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã phân tích toàn diện hiện tượng bất ổn định của kết cấu tháp thép dạng giàn, một thành phần thiết yếu trong hệ thống truyền tải điện cao thế, bằng phương pháp phân tử hữu hạn. Hai mô hình tháp đại diện – tháp thép quốc tế và

đoạn tháp cao 23m theo thiết kế Việt Nam – đã được mô phỏng dưới tác dụng của tải trọng tĩnh bao gồm trọng lượng bản thân, tải gió và tải trọng mất cân bằng. Kết quả phân tích cho thấy sự phụ thuộc tuyến tính của chuyển vị và ứng suất cực đại vào các lực tác dụng. Cụ thể, khi lực mất cân bằng đạt ngưỡng 15,000N đối với tháp quốc tế, ứng suất

tại chân tháp có thể vượt quá giới hạn chảy của vật liệu.

Tương tự, đối với tháp Việt Nam, giới hạn lực mất cân bằng tối đa được xác định là 5,650N, mà khi vượt qua có thể gây biến dạng dẻo cục bộ và tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định tổng thể. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng tác động của tải trọng gió có vai trò đáng kể trong việc thay đổi phân bố ứng suất và ảnh hưởng đến lực căng dây dẫn, với giới hạn an toàn là 5,782N. Sự mất cân bằng do các yếu tố ngoại cảnh như gió, hoặc thay đổi vận hành có thể làm tăng ứng suất và chuyển vị, từ đó ảnh hưởng nghiêm trọng đến độ bền và tuổi thọ của công trình.

Để nâng cao khả năng chịu tải và độ ổn định của tháp, nghiên cứu đã đề xuất các giải pháp thiết kế cải tiến. Đối với tháp truyền tải dạng giàn thép, cần tăng cường độ cứng kết cấu thông qua việc bổ sung thanh giằng, gia cường mối liên kết, tối ưu hóa kích thước và tiết diện của các cấu kiện tại chân tháp, đồng thời kiểm tra kỹ thuật hàn và liên kết bu lông. Tương tự, để cải thiện độ ổn định của tháp truyền tải ở Việt Nam tại các vị trí cánh, các biện pháp bao gồm gia cố các nút liên kết giữa cánh đỡ và thân tháp, sử dụng thêm giằng ngang giữa các cánh, và xem xét tăng tiết diện các thanh chính của cánh đỡ. Những giải pháp này đóng vai trò then chốt trong việc giảm thiểu ứng suất tập trung, ngăn chặn biến dạng dẻo cục bộ và duy trì trạng thái ổn định của tháp dưới các điều kiện tải trọng khắc nghiệt.

Những phát hiện trong nghiên cứu này không chỉ giúp nâng cao hiểu biết về hành vi cơ học của tháp thép dưới các tác động tải trọng khác nhau mà còn cung cấp cơ sở khoa học vững chắc để tối ưu hóa thiết kế, nâng cao độ bền và tính an toàn của công trình truyền tải điện. Trong tương lai, các nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào việc xem xét thêm các yếu tố động lực học phức tạp (chẳng hạn như ứng phó với động đất hoặc rung động do gió giật), hoặc đánh giá chi tiết hơn ảnh hưởng của các điều kiện môi trường khắc nghiệt như nhiệt độ, ăn mòn. Những hướng nghiên cứu này sẽ góp phần hoàn thiện hơn nữa tiêu chuẩn thiết kế và vận hành tháp truyền tải điện, đảm bảo an toàn và hiệu quả tối đa trong điều kiện thực tế.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả xin trân trọng cảm ơn Trường Đại học Kinh tế Công nghiệp Long An đã hỗ trợ, tạo điều kiện để tác giả hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hu, J. W., “Response of seismically isolated steel frame buildings with sustainable lead-rubber bearing (LRB) isolator devices subjected to near-fault (NF) ground motions,” *Sustain.*, vol. 7, pp. 111–137, 2015.
- [2] Seo, J. W., Kim, Y. C., & Hu, J. W., “Pilot study for investigating the cyclic behavior of slit damper systems with recentering shape memory alloy (SMA) bending bars used for seismic restrainers,” *Appl. Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 187–208, 2015.
- [3] Xie, Q., & Li, J., “Current situation of natural disaster in electric power system and countermeasures,” *J. Nat. Dis.*, vol. 15, no. 4, pp. 126–131, 2006.
- [4] Hamizah, N. H., Fathoni, U., & Omar, R. C. “Geospatial study for wind analysis and design codes for wind loading: A review,” *Int. J. Adv. Appl. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 94–100, 2018.
- [5] Veerendra, K. S., Munusamy, S., & Kalla, V. K. “Failure Analysis of a Cruciform-Leg Transmission Line Tower,” *Int. J. Steel Struct.*, vol. 21, pp. 539–548, 2021.
- [6] Liqiang, A., Jiong, W., Zhiqiang, Z., and Ronglun, Z., “Failure analysis of a lattice transmission tower collapse due to the super typhoon Rammasun in July 2014 in Hainan Province, China,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 182, pp. 295–307, 2018.
- [7] TCVN 2737:1995, *Tải trọng và tác động – Tiêu chuẩn thiết kế, Hà Nội*, Việt Nam: Nhà xuất bản Xây dựng, 1995.
- [8] Hongji, Z. “Effect of unbalanced force loading on the safety of transmission tower,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 898, no. 1, 012011, 2021.
- [9] Uyen, D. T. P., Cuong, L. T., và Cường, N. H. “Phân tích phi tuyến trụ thép truyền tải điện sử dụng phương pháp phân tích dầm-cột,” *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Mở TP.HCM*, vol. 11, no. 1, 2016.