

A COMPARATIVE STUDY OF STATIC VOLTAGE STABILITY INDICES FOR IEEE 30-BUS POWER SYSTEM

Pham Nang Van^{1*}, Nguyen Tien Thanh²

¹School of Electrical and Electronic Engineering - Hanoi University of Science and Technology

²National Power System and Market Operator Company (NSMO)

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 22/10/2024</p> <p>Revised: 27/02/2025</p> <p>Published: 27/02/2025</p>	<p>Static voltage stability is an important issue in monitoring the stability of the power system. Many static voltage stability indices have been proposed in the research to assess static voltage stability. These static voltage stability indices are often applied in problems such as optimizing the location and capacity of reactive power compensation devices and distributed generation sources based on the identification of weak nodes and weak lines in the power system. This article presents in detail the concepts and mathematical formulas of three static voltage stability indices, including the MVSI index, the AVSI index, and the C-index. Additionally, the IEEE 30-bus test system is used to calculate these three voltage stability indices. The calculation results are used to compare and evaluate three voltage stability indices. The comparative study shows that the C-index is the most effective indicator for monitoring voltage stability in the power system.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>Voltage stability</p> <p>Voltage stability index</p> <p>Modified voltage stability index</p> <p>Advanced voltage stability index</p> <p>C-index</p>	

SO SÁNH CÁC CHỈ SỐ ỔN ĐỊNH ĐIỆN ÁP TÍNH CHO LƯỚI ĐIỆN 30 NÚT IEEE

Phạm Năng Văn^{1*}, Nguyễn Tiến Thành²

¹Trường Điện – Điện tử - Đại học Bách khoa Hà Nội

²Công ty TNHH MTV Vận hành hệ thống điện và thị trường điện Quốc gia (NSMO)

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 22/10/2024</p> <p>Ngày hoàn thiện: 27/02/2025</p> <p>Ngày đăng: 27/02/2025</p>	<p>Ổn định điện áp tĩnh là một vấn đề quan trọng trong giám sát ổn định hệ thống điện. Nhiều chỉ số ổn định điện áp tĩnh đã được đề xuất trong nghiên cứu để đánh giá ổn định điện áp tĩnh. Các chỉ số ổn định điện áp tĩnh này thường được áp dụng trong các bài toán như tối ưu hóa vị trí và công suất của thiết bị bù công suất phản kháng và nguồn điện phân tán dựa trên sự nhận dạng các nút yếu và đường dây yếu của hệ thống điện. Bài báo này trình bày chi tiết khái niệm và các công thức toán học của ba chỉ số ổn định điện áp tĩnh, bao gồm chỉ số MVSI, chỉ số AVSI và chỉ số C-index. Ngoài ra, lưới điện 30 nút IEEE được sử dụng để tính toán ba chỉ số ổn định điện áp này. Các kết quả tính toán này được sử dụng để so sánh và đánh giá ba chỉ số ổn định điện áp. Nghiên cứu so sánh cho thấy C-index là chỉ số hiệu quả nhất để giám sát ổn định điện áp của hệ thống điện.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>Ổn định điện áp</p> <p>Chỉ số ổn định điện áp</p> <p>Chỉ số MVSI</p> <p>Chỉ số AVSI</p> <p>Chỉ số C-index</p>	

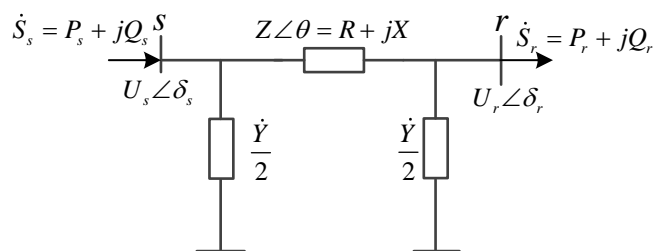
DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11374>

* Corresponding author. Email: van.phammang@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Ổn định điện áp là khả năng duy trì giá trị điện áp trong giới hạn cho phép ở tất cả các nút của hệ thống điện sau khi trải qua các kích động. Khả năng này đóng một vai trò quan trọng trong ổn định của hệ thống điện. Mất ổn định điện áp sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến các phụ tải, sự phát triển của nền kinh tế cũng như an ninh của hệ thống điện [1]. Việc tính toán biên giới ổn định điện áp tĩnh có thể trở thành cơ sở để đánh giá độ ổn định điện áp của hệ thống điện. Sự mất ổn định điện áp tĩnh có thể xảy ra khi điện áp giảm dần hoặc tăng dần của một vài hoặc tất cả các nút trong hệ thống. Phân tích tĩnh thường được xem là một trong những phương pháp hiệu quả để đánh giá biên giới ổn định, xác định các nút “yếu” trong hệ thống và có xem xét nhiều điều kiện của hệ thống. Các phương pháp, kỹ thuật đánh giá ổn định điện áp trong hệ thống điện đã được nghiên cứu trong một số bài báo.

Bài báo [2] sử dụng phương pháp GVSM (Global Voltage Stability Margin) để đánh giá toàn bộ các trạng thái ổn định điện áp, dựa vào mô hình π tương đương của đường dây tải điện. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp trên là đòi hỏi nhiều thời gian để tính toán, đặc biệt là khi lưới điện có nhiều nút. Trong nghiên cứu [3], các chỉ số ổn định điện áp dựa trên tỷ số giữa điện trở và điện kháng theo định lý Thevenin được đề xuất. Tuy nhiên, phương pháp này gặp khó khăn khi phải tìm vị trí điểm phân công suất trong trường hợp có xét tới cả hai điểm phân chia công suất tác dụng và công suất phản kháng. Gần đây, với sự phát triển mạnh mẽ của khoa học máy tính, một số phương pháp sử dụng trí tuệ nhân tạo cũng được đề xuất như dự báo sụp đổ điện áp trong kịch bản sự cố N-1 được nghiên cứu trong [4] bằng một mạng nơ-ron hồi quy, hoặc một mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) để đánh giá chất lượng điện áp trong thời gian thực [5]. Tuy nhiên, các phương pháp sử dụng học máy trên cần huấn luyện nhiều lần với mạng nơ-ron rất lớn để có được một giải pháp tối ưu áp dụng cho các điều kiện vận hành thực tế khác nhau và việc này không khả thi với hệ thống điện lớn. Hơn nữa, phương pháp này dễ bị ảnh hưởng bởi các thay đổi cấu trúc liên kết lưới điện. Ngược lại, phương pháp sử dụng các chỉ số ổn định điện áp được xem là một trong những phương pháp hiệu quả để giám sát hệ thống điện [6] với thời gian tính toán nhanh, được các nhà nghiên cứu và vận hành hệ thống điện đặc biệt quan tâm. Ngoài ra, phương pháp này còn có khả năng áp dụng trong việc lập kế hoạch để cải thiện ổn định điện áp cho lưới điện có tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo [7]. Nghiên cứu [8] đã đề xuất sự phân loại các chỉ số ổn định điện áp thành ba nhóm chính, bao gồm chỉ số ổn định áp dụng cho đường dây, chỉ số ổn định áp dụng cho nút và chỉ số ổn định cho toàn hệ thống.



Hình 1. Sơ đồ thay thế hình π của hệ thống điện hai nút

Chỉ số ổn định điện áp cho đường dây thường được xây dựng sử dụng hệ thống điện gồm có hai nút (xem Hình 1), trong đó thành phần tổng dẫn ngang được bỏ qua. Chỉ số FVSI (Fast voltage stability index) đã được đề xuất để phân tích ổn định điện áp của đường dây truyền tải [9]. Nếu chỉ số FVSI lớn hơn 1 thì điện áp của một trong hai nút kết nối với đường dây truyền tải giảm mạnh và dẫn đến mất ổn định toàn hệ thống. Bài báo [10] đề xuất chỉ số L_p (Line stability index) để đánh giá ổn định điện áp của đường dây truyền tải. Tuy nhiên, chỉ số L_p bỏ qua ảnh hưởng của dòng công suất phản kháng và tổng dẫn ngang của đường dây, chỉ xét ảnh hưởng của dòng công suất tác dụng đến ổn định điện áp. Nghiên cứu [11] xây dựng chỉ số PTSI (Power transfer stability index) dựa trên khái niệm về công suất truyền tải giới hạn của các đường dây.

Khi hệ thống vận hành ổn định thì chỉ số PTSI phải nhỏ hơn 1. Khi PTSI bằng 1 thì hệ thống có sụp đổ điện áp. Nghiên cứu [12] giới thiệu chỉ số LCPI (Line Collapse Proximity Index), trong đó đường dây truyền tải được mô hình hóa sử dụng sơ đồ thay thế hình PI và tổng dẫn ngang được xét. Để duy trì ổn định điện áp của hệ thống thì LCPI phải nhỏ hơn 1.

Chỉ số ổn định điện áp cho nút được sử dụng để xác định các nút “yếu” của hệ thống điện. Bài báo [13] giới thiệu chỉ số VCPI (Voltage collapse prediction index). Chỉ số VCPI này được dẫn ra từ hệ phương trình trào lưu công suất và có trị số từ 0 đến 1. Nếu VCPI đạt tới 1 thì điện áp tại nút bị sụp đổ. Bài báo [14] đề xuất chỉ số ISI (Impedance matching Stability Index) dựa trên lý thuyết mạch điện rằng khi độ lớn của tổng trở tải bằng độ lớn của tổng trở Thevenin thì hệ thống đạt tới giới hạn truyền tải công suất. Chỉ số ISI có giá trị xấp xỉ 1 khi hệ thống làm việc bình thường và giảm tới 0 tại điểm mất ổn định điện áp. Nghiên cứu [15] đề xuất chỉ số SVSI (Simplified Voltage Stability Index), trong đó điện áp của nút máy phát gần nhất với nút tải được xem như bằng điện áp Thevenin của mạng tại nút tải đó. Khi giá trị của SVSI đạt tới 1 thì sụp đổ điện áp xảy ra tại nút tải đó. Bài báo [16] đề xuất chỉ số MVSI (Modern Voltage Stability Index) để nhận dạng các nút “yếu”. Chỉ số MVSI này có xét cả dòng công suất tác dụng, dòng công suất phản kháng và tổng trở của đường dây. Giá trị của MVSI nhỏ hơn 1 thì hệ thống có ổn định điện áp; ngược lại, sự sụp đổ điện áp sắp xảy ra.

Chỉ số ổn định điện áp cho toàn hệ thống không thể xác định được nút hoặc đường dây “yếu nhất” của hệ thống điện mà chỉ có thể dự báo được điểm sụp đổ điện áp của toàn hệ thống điện. Bài báo [17] đề xuất chỉ số SG (Sensitivity of generation power) để tính khoảng cách từ điểm làm việc hiện tại đến điểm sụp đổ điện áp. Hệ số SG dựa trên đường cong P-V. Bài báo [18] giới thiệu chỉ số SOI (second order index) để đánh giá khả năng tải lớn nhất của hệ thống điện và xác định các tác động điều khiển để tránh hiện tượng sụp đổ điện áp. Chỉ số SOI được xác định dựa trên cực đại các trị riêng của ma trận nghịch đảo của ma trận Jacobi.

Tóm lại, các chỉ số ổn định điện áp đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì và đánh giá ổn định điện áp của hệ thống điện [19], [20], bao gồm:

– Chỉ số ổn định điện áp giúp xác định khoảng cách giữa điểm làm việc hiện tại và điểm sụp đổ điện áp của hệ thống điện. Điều này giúp ngăn ngừa mất ổn định và đảm bảo cung cấp điện tin cậy.

– Chỉ số ổn định điện áp giúp nhận dạng các khu vực “yếu” của hệ thống điện về phương diện ổn định điện áp. Điều này cho phép đầu tư và cải tạo lưới điện có trọng điểm và hiệu quả.

– Chỉ số ổn định điện áp hỗ trợ việc xác định vị trí đặt và công suất đặt tối ưu của các nguồn điện phân tán, tụ bù ngang và các thiết bị FACTS (Flexible AC Transmission Systems) để nâng cao ổn định điện áp của hệ thống.

– Chỉ số ổn định điện áp có thể được sử dụng để xếp hạng các sự cố khác nhau dựa trên sự tác động của sự cố này đến ổn định điện áp. Điều này giúp quy hoạch và vận hành hệ thống điện khi có xét sự cố một cách hiệu quả.

– Chỉ số ổn định điện áp cho phép giám sát và điều khiển ổn định điện áp thời gian thực. Điều này giúp nhân viên vận hành hệ thống có thể thực hiện các tác động hiệu chỉnh nhanh chóng và kịp thời để duy trì ổn định điện áp của hệ thống.

Xuất phát từ các nghiên cứu trên và vai trò quan trọng của chỉ số ổn định điện áp, bài báo này so sánh và phân tích tác động của ba chỉ số ổn định điện áp đối với việc dự đoán sự mất ổn định điện áp của hệ thống điện, bao gồm chỉ số MVSI [21], chỉ số AVSI [22] và chỉ số C-index [23]. Các đóng góp của bài báo bao gồm:

- Trình bày chi tiết công thức toán học để xác định ba chỉ số ổn định điện áp trên;
- Đánh giá và so sánh kết quả tính toán của ba chỉ số ổn định điện áp trên lưới điện 30 nút IEEE với các mức độ tăng tải khác nhau.

Nhấn mạnh rằng, bài báo [21] đã so sánh hai chỉ số MVSI và AVSI sử dụng hệ thống điện Etiopia. Tuy nhiên, theo hiểu biết của tác giả thì hiện nay, không có nghiên cứu về so sánh ba chỉ số ổn định điện áp MVSI, AVSI và C-index cũng như áp dụng ba chỉ số này cho lưới điện 30 nút IEEE.

Cấu trúc của bài báo gồm bốn phần. Giới thiệu tổng quan về nội dung nghiên cứu được trình bày ở phần đầu tiên. Phần 2 trình bày cơ sở lý thuyết của các chỉ số ổn định điện áp. Từ cơ sở lý thuyết, kết quả tính toán trên lưới điện 30 nút IEEE với các mức độ tăng tải khác nhau được trình bày ở phần 3. Cuối cùng, các kết luận và đánh giá được trình bày ở phần 4.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Chỉ số MVSI (Modified Voltage Stability Indices)

Chỉ số ổn định điện áp MVSI được đề xuất trong nghiên cứu [21]. Theo nghiên cứu này, dòng điện phức tại nút k được biểu diễn như sau:

$$\dot{I}_k = \dot{Y}_{kk} \dot{U}_k + \sum_{i=1, i \neq k}^N \dot{Y}_{ki} \dot{U}_i \quad (1)$$

Trong đó, \dot{Y}_{kk} là tổng dẫn riêng của nút k ; \dot{Y}_{ki} là tổng dẫn tương hỗ giữa nút k và nút i ; N là tổng số nút của lưới điện; \dot{U}_k và \dot{U}_i lần lượt là điện áp phức tại nút k và i .

Công suất phức tại nút k được biểu diễn như sau:

$$P_k - jQ_k = U_k^* \dot{I}_k \quad (2)$$

Trong đó, U_k^* là điện áp phức liên hợp tại nút k .

Kết hợp biểu thức (1) và (2), ta có:

$$P_k - jQ_k = U_k^2 \dot{Y}_{kk} + U_k^* \sum_{i=1, i \neq k}^N \dot{Y}_{ki} \dot{U}_i \quad (3)$$

Trong đó, U_k là mô-đun điện áp nút k .

Phân tách phần thực và phần ảo của biểu thức (3), ta được:

$$\begin{cases} P_k = U_k^2 Y_{kk} \cos \theta_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^N U_k U_i Y_{ki} \cos(\delta_i - \delta_k + \theta_{ki}) \\ -Q_k = U_k^2 Y_{kk} \sin \theta_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^N U_k U_i Y_{ki} \sin(\delta_i - \delta_k + \theta_{ki}) \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó, Y_{kk} và θ_{kk} lần lượt là mô-đun và góc pha của tổng dẫn riêng nút k ; Y_{ki} và θ_{ki} lần lượt là mô-đun và góc pha của tổng dẫn tương hỗ giữa nút k và i ; δ_i và δ_k lần lượt là góc pha điện áp tại các nút i và k .

Với $\delta_i - \delta_k = \delta$ và giả sử δ rất nhỏ nên ta có thể coi: $\sin \delta \approx 0$, $\cos \delta \approx 1$. Khi đó, biểu thức (4) được viết gọn như sau:

$$\begin{cases} P_k = U_k^2 Y_{kk} \cos \theta_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^N U_k U_i Y_{ki} \cos \theta_{ki} \\ -Q_k = U_k^2 Y_{kk} \sin \theta_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^N U_k U_i Y_{ki} \sin \theta_{ki} \end{cases} \quad (5)$$

Từ biểu thức công suất phản kháng, phương trình bậc hai của điện áp nút k :

$$\begin{aligned} U_k^2 + \frac{U_k}{Y_{kk} \sin \theta_{kk}} \sum_{i=1, i \neq k}^N U_i Y_{ki} \sin \theta_{ki} + \frac{Q_k}{Y_{kk} \sin \theta_{kk}} &= 0 \\ \Leftrightarrow U_k^2 - \frac{U_k}{Y_{kk}} \sum_{i=1, i \neq k}^N U_i Y_{ki} + \frac{Q_k}{Y_{kk} \sin \theta_{kk}} &= 0 \quad (\theta_{kk} \approx -\theta_{ki}) \end{aligned} \quad (6)$$

Khi đó, điện áp tại nút k được xác định:

$$U_k = \frac{\frac{1}{Y_{kk}} \sum_{i=1, i \neq k}^N U_i Y_{ki} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{1}{Y_{kk}} \sum_{i=1, i \neq k}^N U_i Y_{ki} \right)^2 - 4 \left(\frac{Q_k}{Y_{kk} \sin \theta_{kk}} \right) \right)}{2} \quad (7)$$

Với điều kiện:

$$\left(\frac{1}{Y_{kk}} \sum_{i=1, i \neq k}^N U_i Y_{ki} \right)^2 - 4 \left(\frac{Q_k}{Y_{kk} \sin \theta_{kk}} \right) \geq 0 \quad (8)$$

Chỉ số $MVSI_k$ tại nút phụ tải k được định nghĩa như sau:

$$MVSI_k = 4(Q_k Y_{kk} \sin \theta_{kk}) / \left(\sum_{i=1, i \neq k}^N U_i Y_{ki} \right)^2 \quad (9)$$

Từ biểu thức (8), để hệ thống có ổn định điện áp tĩnh, công suất phản kháng của phụ tải tại nút k phải thỏa mãn điều kiện sau:

$$Q_k \leq \left(\sum_{i=1, i \neq k}^N U_i Y_{ki} \right)^2 / (4Y_{kk} \sin \theta_{kk}) \quad (10)$$

Khi đó, nếu giá trị của chỉ số $MVSI_k$ lớn hơn 1 thì hệ thống sẽ mất ổn định điện áp.

2.2. Chỉ số AVSI (Advanced Voltage Stability Indices)

Chỉ số ổn định điện áp AVSI được đề xuất trong nghiên cứu [22]. Theo nghiên cứu này, dòng điện phức liên hợp tại nút thứ k được biểu diễn như sau: $I_k^* = (P_k + jQ_k) / \dot{U}_k$ (11)

Mặt khác, từ hệ phương trình dòng điện nút, ta có: $I_k^* = \left(\dot{U}_k \dot{Y}_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^N \dot{U}_i \dot{Y}_{ki} \right)^*$ (12)

Từ biểu thức (11) và (12), ta có: $\frac{P_k + jQ_k}{\dot{U}_k} = \left(\dot{U}_k \dot{Y}_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^N \dot{U}_i \dot{Y}_{ki} \right)^*$ (13)

Phân tách phần thực và phần ảo (13), ta được:

$$\begin{cases} P_k = U_k^2 G_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^N U_k U_i [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] \\ Q_k = -U_k^2 B_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^N U_k U_i [G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k)] \end{cases} \quad (14)$$

Trong đó, G_{kk} và B_{kk} lần lượt là phần thực và phần ảo của tổng dẫn riêng nút k ; G_{ik} và B_{ik} lần lượt là phần thực và phần ảo của tổng dẫn tương hỗ giữa nút i và k .

Vì chênh lệch góc pha điện áp giữa hai nút liền kề nhau nhỏ nên (14) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} P_k = U_k^2 G_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^N U_k U_i G_{ik} \\ Q_k = -U_k^2 B_{kk} - \sum_{i=1, i \neq k}^N U_k U_i B_{ik} \end{cases} \quad (15)$$

Cộng tổng hai phương trình trên và biến đổi, ta có:

$$U_k^2 (G_{kk} - B_{kk}) + U_k \left(\sum_{i=1, i \neq k}^N U_i (G_{ik} - B_{ik}) \right) - (P_k + Q_k) = 0 \quad (16)$$

Khi đó, điều kiện để điện áp tại nút k tồn tại là:

$$\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N U_i (G_{ik} - B_{ik}) \right]^2 + 4(G_{kk} - B_{kk})(P_k + Q_k) \geq 0 \quad (17)$$

Từ biểu thức (17), chỉ số AVSI_k tại nút phụ tải k được định nghĩa như sau:

$$AVSI_k = \frac{-4(G_{kk} - B_{kk})(P_k + Q_k)}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N U_i (G_{ik} - B_{ik}) \right]^2} \quad (18)$$

Hệ thống sẽ mất ổn định điện áp khi chỉ số AVSI của bất kỳ nút nào trong hệ thống lớn hơn 1.

2.3. Chỉ số C-index

Chỉ số ổn định điện áp C-index được đề xuất trong bài báo [23]. Xét hệ thống điện có 1 nút cân bằng và được mô tả bởi hệ phương trình:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_S \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{SS} & \mathbf{Y}_{SL} \\ \mathbf{Y}_{LS} & \mathbf{Y}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_S \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Trong đó, \mathbf{I}_S và \mathbf{U}_S lần lượt là véc-tơ dòng điện nút và điện áp tại các nút có điều chỉnh điện áp (bao gồm nút cân bằng và các nguồn có điều chỉnh điện áp); $\mathbf{I} = \mathbf{I}_D + j\mathbf{I}_Q$ và \mathbf{U} lần lượt là véc-tơ của dòng điện nút và điện áp tại các nút không có điều chỉnh điện áp (bao gồm tải và các nguồn không có điều chỉnh điện áp); \mathbf{Y}_{SS} , \mathbf{Y}_{SL} , \mathbf{Y}_{LS} và \mathbf{Y}_{LL} lần lượt là các ma trận con của ma trận tổng dẫn nút.

$$\text{Từ (19), ta có: } \mathbf{U} = -\mathbf{Y}_{LL}^{-1}\mathbf{Y}_{LS}\mathbf{U}_S + \mathbf{Y}_{LL}^{-1}\mathbf{I} \quad (20)$$

$$\text{Đặt: } \mathbf{E} = -\mathbf{Y}_{LL}^{-1}\mathbf{Y}_{LS}\mathbf{U}_S; \mathbf{Z} = -\mathbf{Y}_{LL}^{-1} \text{ và (20) được viết lại như sau: } \mathbf{U} = \mathbf{E} - \mathbf{Z}\mathbf{I} \quad (21)$$

Mối quan hệ giữa véc-tơ công suất nút, véc-tơ điện áp nút và véc-tơ dòng điện nút:

$$\mathbf{S} = \text{diag}(\mathbf{I}^*)\mathbf{U} = \text{diag}(\mathbf{I}^*)\mathbf{E} - \text{diag}(\mathbf{I}^*)\mathbf{Z}\mathbf{I} \quad (22)$$

Trong đó, \mathbf{I}^* là ma trận chứa các phần tử là liên hợp phức với các phần tử của \mathbf{I} ; diag biểu thị ma trận đường chéo.

Từ (22), công suất tác dụng và công suất phản kháng bơm vào nút k :

$$P_k = \text{Re} \left(I_k^* \dot{E}_k - I_k^* \sum_{i=1}^{N_{PQ}} Z_{ki} \dot{I}_i \right); \quad \forall k \in \Omega_{PQ} \quad (23)$$

$$Q_k = \text{Im} \left(I_k^* \dot{E}_k - I_k^* \sum_{i=1}^{N_{PQ}} Z_{ki} \dot{I}_i \right); \quad \forall k \in \Omega_{PQ} \quad (24)$$

Trong đó, N_{PQ} là tổng số nút không có điều chỉnh điện áp; Ω_{PQ} là tập các nút không có điều chỉnh điện áp của lưới điện.

Khi đó, ma trận Jacobian của mô hình (23)-(24) được xác định như sau:

$$\mathbf{J}^R = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{I}_D} & \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{I}_Q} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{I}_D} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{I}_Q} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Điểm suy biến của ma trận Jacobian truyền thống \mathbf{J}_{conv} (Ma trận Jacobian có hệ phương trình dòng công suất được viết dưới dạng mô-đun và góc pha điện áp của các nút trong tọa độ cực) được sử dụng như một điều kiện cần thiết để biểu thị giới hạn khả năng tải của hệ thống, từ đó xác định được vị trí bắt đầu xảy ra sự mất ổn định điện áp. Điểm suy biến của (25) trùng với điểm suy biến của ma trận \mathbf{J}_{conv} thông qua mối quan hệ sau:

$$\mathbf{J}_{conv} = \mathbf{J}^R \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{I}_D}{\partial \mathbf{U}} & \frac{\partial \mathbf{I}_D}{\partial \boldsymbol{\delta}} \\ \frac{\partial \mathbf{I}_Q}{\partial \mathbf{U}} & \frac{\partial \mathbf{I}_Q}{\partial \boldsymbol{\delta}} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\text{Điều kiện để ma trận Jacobian (25) suy biến là: } U_k \leq \sum_{i=1}^{N_{PQ}} Z_{ki} I_i; \quad \forall k \in \Omega_{PQ} \quad (27)$$

Dựa vào điều kiện (27), chỉ số đánh giá mức tải tới hạn C-index cho nút k được viết:

$$C_k = U_k / \sum_{i=1}^{N_{PQ}} Z_{ki} I_i; \quad \forall k \in \Omega_{PQ} \quad (28)$$

Hệ thống sẽ đạt tới giới hạn khả năng tải, bắt đầu xảy ra sự không ổn định tại C -index bằng 1. Khi chỉ số C -index của một nút có giá trị nhỏ hơn 1, hệ thống sẽ mất ổn định điện áp.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

Lưới điện 30 nút IEEE [24] được sử dụng để so sánh các chỉ số ổn định điện áp. Lưới điện này bao gồm 6 nút máy phát, 20 nút phụ tải và 41 nhánh đường dây. Để kiểm tra tính hiệu quả cũng như độ nhạy phát hiện sụp đổ điện áp trong hệ thống của các chỉ số ổn định điện áp, quá trình xác định các chỉ số trên được thực hiện trong các kịch bản tăng tải khác nhau cho tới khi hệ thống mất ổn định điện áp. Nhấn mạnh rằng, tại mức tăng tải 35%, hệ thống điện đã mất ổn định. Mức tăng tải này được xác định sử dụng phương pháp trào lưu công suất liên tục (CPF – Continuation Power Flow) trên phần mềm PSAT [25].

3.1. Chỉ số MVSI

Bảng 1. Chỉ số MVSI của các nút tương ứng với các kịch bản tăng tải

Nút	Các kịch bản tăng tải							
	Cơ sở	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
1								
2					0,0850	0,0844	0,0858	0,0910
3	0,0043	0,0046	0,0049	0,0052	0,0055	0,0059	0,0065	0,0078
4	0,0071	0,0076	0,0080	0,0085	0,0091	0,0097	0,0109	0,0135
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	0,0632	0,0672	0,0714	0,0760	0,0814	0,0874	0,0989	0,1240
8	0,0592	0,0630	0,0671	0,0716	0,0769	0,0826	0,0944	0,1215
9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0065	0,0070	0,0075	0,0080	0,0087	0,0094	0,0110	0,0154
11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12	0,0220	0,0233	0,0247	0,0263	0,0280	0,0297	0,0346	0,0468
13							0,3577	0,4667
14	0,0385	0,0409	0,0436	0,0464	0,0496	0,0530	0,0622	0,0860
15	0,0201	0,0213	0,0228	0,0243	0,0260	0,0279	0,0329	0,0458
16	0,0186	0,0198	0,0211	0,0226	0,0242	0,0259	0,0305	0,0423
17	0,0279	0,0298	0,0319	0,0342	0,0369	0,0398	0,0469	0,0655
18	0,0153	0,0165	0,0177	0,0191	0,0206	0,0224	0,0270	0,0402
19	0,0258	0,0277	0,0298	0,0323	0,0350	0,0381	0,0462	0,0697
20	0,0069	0,0074	0,0079	0,0086	0,0093	0,0101	0,0123	0,0184
21	0,0143	0,0153	0,0164	0,0176	0,0189	0,0204	0,0240	0,0330
22					0,0475	0,0492	0,0557	0,0746
23					0,1770	0,1812	0,2048	0,2755
24	0,0363	0,0386	0,0411	0,0438	0,0469	0,0501	0,0585	0,0798
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
26	0,0693	0,0733	0,0773	0,0817	0,0863	0,0909	0,1057	0,1442
27							0,3281	0,4402
28	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
29	0,0288	0,0304	0,0321	0,0338	0,0354	0,0372	0,0437	0,0622
30	0,1459	0,1539	0,1619	0,1701	0,1784	0,1867	0,2175	0,3022
Hệ thống	0,1459	0,1539	0,1619	0,1701	0,1784	0,1867	0,3577	0,4667

Chỉ số MVSI được sử dụng để đánh giá mức độ ổn định điện áp cho các nút phụ tải trong hệ thống điện. Chỉ số này được chứng minh là luôn nằm trong khoảng $[0, 1]$ nếu hệ thống đang làm việc ổn định. Với các mức tăng lên của phụ tải, chỉ số MVSI của các nút sẽ tăng lên, hệ thống sẽ mất ổn định nếu có ít nhất chỉ số của một nút trong hệ thống lớn hơn 1. Kết quả tính toán chỉ số MVSI tương ứng với các kịch bản tăng tải là 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% so với phụ tải ban đầu được trình bày ở Bảng 1.

3.2. Chỉ số AVSI

Kết quả tính toán chỉ số AVSI tương ứng với các kịch bản tăng tải là 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% so với phụ tải ban đầu được trình bày ở Bảng 2. Việc nhận biết sự mất ổn định trong hệ thống điện có thể thông qua chỉ số AVSI. Hệ thống được duy trì ổn định điện áp khi chỉ số AVSI của tất cả các nút trong hệ thống điện được giữ nhỏ hơn 1. Khi phụ tải tăng, chỉ số ổn định điện áp này tăng và hệ thống sẽ mất ổn định khi chỉ số tăng vượt quá 1.

Bảng 2. Chỉ số AVSI của các nút tương ứng với các kịch bản tăng tải

Nút	Các kịch bản tăng tải							
	Cơ sở	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
1								
2				0,0943	0,0950	0,0958	0,0990	0,1067
3	0,0096	0,0102	0,0108	0,0115	0,0122	0,0130	0,0144	0,0173
4	0,0160	0,0170	0,0180	0,0191	0,0204	0,0218	0,0245	0,0302
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	0,1370	0,1456	0,1546	0,1646	0,1764	0,1893	0,2142	0,2686
8	0,1312	0,1398	0,1487	0,1587	0,1704	0,1830	0,2093	0,2694
9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0146	0,0157	0,0168	0,0180	0,0195	0,0210	0,0248	0,0347
11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12	0,0514	0,0545	0,0579	0,0616	0,0656	0,0698	0,0816	0,1110
13							0,6210	0,8932
14	0,0928	0,0986	0,1050	0,1120	0,1196	0,1278	0,1502	0,2077
15	0,0454	0,0483	0,0515	0,0551	0,0590	0,0632	0,0745	0,1038
16	0,0402	0,0429	0,0457	0,0489	0,0524	0,0562	0,0661	0,0915
17	0,0604	0,0645	0,0691	0,0741	0,0799	0,0861	0,1016	0,1418
18	0,0333	0,0357	0,0384	0,0414	0,0448	0,0485	0,0586	0,0873
19	0,0558	0,0600	0,0646	0,0699	0,0759	0,0825	0,1001	0,1510
20	0,0148	0,0160	0,0172	0,0186	0,0202	0,0219	0,0266	0,0398
21	0,0311	0,0333	0,0356	0,0382	0,0412	0,0444	0,0522	0,0718
22				0,0629	0,0661	0,0697	0,0802	0,1090
23				0,2216	0,2304	0,2399	0,2758	0,3773
24	0,0806	0,0856	0,0912	0,0974	0,1041	0,1113	0,1300	0,1774
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
26	0,1564	0,1654	0,1746	0,1845	0,1948	0,2054	0,2387	0,3254
27							0,4135	0,5639
28	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
29	0,0630	0,0666	0,0702	0,0739	0,0776	0,0814	0,0956	0,1363
30	0,3194	0,3370	0,3544	0,3725	0,3906	0,4088	0,4762	0,6614
Hệ thống	0,3194	0,3370	0,3544	0,3725	0,3906	0,4088	0,6210	0,8932

3.3. Chỉ số C-index

Kết quả tính toán chỉ số C-index tương ứng với các kịch bản tăng tải là 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% so với phụ tải ban đầu được trình bày ở Bảng 3. Hệ thống sẽ đạt tới giới hạn khả năng tải, bắt đầu xảy ra sự mất ổn định khi giá trị C-index bằng 1. Bất kỳ nút nào trong hệ thống có giá trị C-index nhỏ hơn 1 chứng tỏ hệ thống đã mất ổn định điện áp. Qua Bảng 3, ta thấy với mức tăng tải 30% chỉ số C-index ở một số nút trong hệ thống có giá trị nhỏ hơn 1, chứng tỏ ở mức tăng tải này hệ thống đã mất ổn định điện áp.

3.4. So sánh các chỉ số ổn định điện áp

Sau khi tính toán các chỉ số ổn định điện áp cho tất cả các nút, chỉ số ổn định điện áp cho toàn hệ thống được tổng hợp ở Bảng 4. Trong đó, các chỉ số MVSI và AVSI được lấy giá trị lớn nhất trong các chỉ số của các nút, và chỉ số C-index được lấy giá trị nhỏ nhất. Đồng thời, từ các Bảng 1, 2 và 3, ta cũng nhận dạng được các nút “yếu nhất” của hệ thống điện (xem Bảng 5). Các nút này có thể được lựa chọn để đặt các thiết bị bù công suất phản kháng như tụ bù ngang, thiết bị bù

có điều khiển SVC (Static Var Compensator) để nâng cao ổn định điện áp của hệ thống điện. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong thực tiễn. Bảng 5 cho thấy rằng, nhận dạng nút “yếu nhất” của hai chỉ số MVSI và AVSI là giống nhau ứng với tất cả các kịch bản tăng tải. Với mức tải cơ sở và mức tăng tải 5%, chỉ số C-index cũng nhận dạng nút “yếu nhất” giống với hai chỉ số MVSI và AVSI. Tuy nhiên, với các mức tăng tải còn lại, nút “yếu nhất” được xác định bởi chỉ số C-index không giống khi so sánh với các chỉ số MVSI và AVSI.

Bảng 3. Chỉ số C-index của các nút tương ứng với các kịch bản tăng tải

Nút	Các kịch bản tăng tải							
	Cơ sở	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
1								
2				6,9220	6,6107	6,3049	2,3358	1,9645
3	17,2757	16,2357	5,6141	5,2972	4,9733	4,6650	1,4100	1,1341
4	14,5626	13,6742	4,6122	4,3467	4,0733	3,8130	1,1338	0,8962
5	14,8445	13,9550	4,7217	4,4520	4,1682	3,8984	1,3465	1,0792
6	11,6431	10,9161	3,8111	3,5853	3,3521	3,1300	0,9665	0,7531
7	8,7361	8,1846	4,0591	3,7931	3,5206	3,2642	1,4128	1,0634
8	8,5042	7,9607	3,3339	3,1289	2,9176	2,7166	0,8769	0,6753
9	15,3007	14,3155	2,4905	2,3428	2,1920	2,0476	0,6907	0,5193
10	17,7950	16,6335	2,0996	1,9744	1,8477	1,7262	0,5970	0,4430
11	15,3007	14,3155	2,4905	2,3428	2,1920	2,0476	0,6907	0,5193
12	14,1768	13,3304	3,9962	3,7762	3,5566	3,3469	0,6502	0,4896
13							0,6463	0,4981
14	9,8438	9,2351	2,8827	2,7148	2,5477	2,3882	0,5767	0,4235
15	12,3211	11,5571	2,6721	2,5185	2,3648	2,2176	0,5728	0,4217
16	11,7000	10,9608	2,6770	2,5200	2,3625	2,2120	0,5979	0,4422
17	12,5104	11,6909	2,1345	2,0052	1,8748	1,7498	0,5774	0,4244
18	8,0739	7,5324	2,0611	1,9304	1,7999	1,6750	0,5169	0,3671
19	7,3739	6,8658	1,8766	1,7538	1,6311	1,5136	0,5018	0,3523
20	8,4141	7,8386	1,9089	1,7861	1,6630	1,5451	0,5196	0,3690
21	49,4264	46,2021	1,9358	1,8224	1,7076	1,5973	0,5693	0,4236
22			1,9527	1,7971	1,6884	1,5834	0,5638	0,4231
23			2,3320	2,1661	2,0473	1,9323	0,5656	0,4279
24	37,6128	35,3308	2,3051	2,1763	2,0470	1,9227	0,5478	0,4090
25	43,0557	40,6163	5,6177	5,3354	5,0565	4,7896	0,5716	0,4391
26	15,0335	14,1531	4,2826	4,0515	3,8265	3,6131	0,5197	0,3887
27							0,6024	0,4774
28	12,0288	11,2802	4,1395	3,8953	3,6444	3,4053	0,8753	0,6807
29	12,5006	11,7812	11,1352	10,5270	9,9773	9,4694	0,5169	0,3860
30	7,1664	6,7295	6,3379	5,9679	5,6331	5,3245	0,4585	0,3262
Hệ thống	7,1664	6,7295	1,8766	1,7538	1,6311	1,5136	0,4585	0,3262

Bảng 4. So sánh các chỉ số ổn định điện áp tương ứng với các kịch bản tăng tải

Chỉ số	Cơ sở	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
MVSI	0,1459	0,1539	0,1619	0,1701	0,1784	0,1867	0,3577	0,4667
AVSI	0,3194	0,3370	0,3544	0,3725	0,3906	0,4088	0,6210	0,8932
C-index	7,1664	6,7295	1,8766	1,7538	1,6311	1,5136	0,4585	0,3262

Bảng 5. Nhận dạng nút “yếu nhất” của hệ thống điện tương ứng với các kịch bản tăng tải

Chỉ số	Cơ sở	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
MVSI	Nút 30	Nút 30	Nút 30	Nút 30	Nút 30	Nút 30	Nút 13	Nút 13
AVSI	Nút 30	Nút 30	Nút 30	Nút 30	Nút 30	Nút 30	Nút 13	Nút 13
C-index	Nút 30	Nút 30	Nút 19	Nút 19	Nút 19	Nút 19	Nút 30	Nút 30

Bảng 6 so sánh các chỉ số ổn định điện áp dựa trên các tiêu chí như hiệu quả giám sát ổn định, độ phức tạp tính toán và khả năng áp dụng trong thời gian thực. Hiệu quả nhận dạng sự mất ổn định của hệ thống của hai chỉ số MVSI và AVSI là rất kém vì khi hệ thống đã mất ổn định điện áp, nhưng hai chỉ số vẫn chưa đạt tới giá trị giới hạn. Chỉ số C-index dự đoán sự gần gũi điểm làm việc hiện tại với ranh giới mất ổn định điện áp của hệ thống khá tốt. Chỉ số đã phát hiện sự mất ổn định

của hệ thống trước điểm mất ổn định thực tế của hệ thống. Việc dự đoán trước thông qua giá trị của chỉ số C-index như vậy thuận lợi cho công tác vận hành và có các biện pháp dự phòng kịp thời trước khi hệ thống mất ổn định điện áp, tránh gây ảnh hưởng lớn tới hệ thống và thiết bị. Ngoài ra, thực hiện tính toán của chỉ số C-index đơn giản hơn so với hai chỉ số MVSI và AVSI.

Bảng 6. So sánh các chỉ số ổn định điện áp dựa trên các tiêu chí

Đặc tính	Chỉ số MVSI	Chỉ số AVSI	Chỉ số C-index
Hiệu quả giám sát ổn định	Không	Không	Có
Mức độ phức tạp về tính toán	Có	Có	Không
Khả năng áp dụng trong thời gian thực	Có	Có	Có

4. Kết luận

Bài báo này trình bày sự so sánh các chỉ số ổn định điện áp, bao gồm chỉ số MVSI, chỉ số AVSI và chỉ số C-index. Sự so sánh các chỉ số ổn định điện áp này được thực hiện trên lưới điện 30 nút IEEE. Các kết quả tính toán cho thấy, chỉ số C-index không chỉ đơn giản về mặt tính toán mà còn là chỉ số hiệu quả nhất để giám sát ổn định điện áp của hệ thống điện. Ngoài ra, căn cứ vào các chỉ số ổn định điện áp, các nút “yếu” trong hệ thống điện có thể được xác định và đơn vị vận hành hệ thống điện có thể lựa chọn được các vị trí lắp đặt thiết bị bù để cải thiện ổn định điện áp. Trong tương lai, hướng phát triển của nghiên cứu là xác định vị trí và công suất tối ưu của thiết bị bù tĩnh có điều khiển (SVC) trong lưới điện truyền tải có xét ràng buộc ổn định điện áp tĩnh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] T. T. Nguyen, N. V. Pham, Q. M. Nguyen, and T. H. T. Nguyen, “Optimal Size And Location of SVC Devices Considering Voltage Stability Constraints: A Mixed-Integer Nonlinear Programming Approach,” *TNU J. Sci. Technol.*, vol. 228, no. 14, pp. 3-16, Sep. 2023, doi: 10.34238/tnu-jst.8264.
- [2] P. Nagendra, S. H. Dey, and S. Paul, “An innovative technique to evaluate network equivalent for voltage stability assessment in a widespread sub-grid system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 737-744, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.ijepes.2010.11.024.
- [3] A. Augugliaro, L. Dusonchet, and S. Mangione, “Voltage collapse proximity indicators for radial distribution networks,” in *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Barcelona, Spain: IEEE, Oct. 2007, pp. 1-6.
- [4] H. Hagmar, L. Tong, R. Eriksson, and L. A. Tuan, “Voltage Instability Prediction Using a Deep Recurrent Neural Network,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 1, pp. 17-27, Jan. 2021.
- [5] D. Devaraj and J. P. Roselyn, “On-line voltage stability assessment using radial basis function network model with reduced input features,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 9, pp. 1550-1555, Nov. 2011.
- [6] I. Alhamrouni, M. Alif, B. Ismail, M. Salem, A. Jusoh, and T. Sutikno, “Load flow based voltage stability indices for voltage stability and contingency analysis for optimal location of STATCOM in distribution network with integrated distributed generation unit,” *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 16, no. 5, pp. 2302-2315, 2018.
- [7] R. Kyomugisha, C. M. Muriithi, and G. N. Nyakoe, “Performance of Various Voltage Stability Indices in a Stochastic Multiobjective Optimal Power Flow Using Mayfly Algorithm,” *J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2022, pp. 1-22, Apr. 2022, doi: 10.1155/2022/7456333.
- [8] J. Modarresi, E. Gholipour, and A. Khodabakhshian, “A comprehensive review of the voltage stability indices,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 63, pp. 1-12, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.010.
- [9] I. Musirin and T. K. A. Rahman, “Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system,” in *Student Conference on Research and Development*, Shah Alam, Malaysia: IEEE, 2002, pp. 265-268, doi: 10.1109/SCORED.2002.1033108.
- [10] M. Moghavvemi and M. O. Faruque, “Technique for assessment of voltage stability in ill-conditioned radial distribution network,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 21, no. 1, pp. 58-60, Jan. 2001, doi: 10.1109/39.893345.
- [11] M. Nizam, A. Mohamed, and A. Hussain, “Dynamic Voltage Collapse Prediction in Power Systems Using Power Transfer Stability Index,” in *2006 IEEE International Power and Energy Conference*, Putra Jaya, Malaysia: IEEE, Nov. 2006, pp. 246-250, doi: 10.1109/PECON.2006.346655.

- [12] R. Tiwari, K. R. Niazi, and V. Gupta, "Line collapse proximity index for prediction of voltage collapse in power systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 41, no. 1, pp. 105-111, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.03.022.
- [13] V. Balamourougan, T. S. Sidhu, and M. S. Sachdev, "Technique for online prediction of voltage collapse," *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 151, no. 4, pp. 453-460, 2004, doi: 10.1049/ip-gtd:20040612.
- [14] I. Smon, G. Verbic, and F. Gubina, "Local Voltage-Stability Index Using Tellegen's Theorem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1267-1275, Aug. 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.876702.
- [15] S. Pérez-Londoño, L. F. Rodríguez, and G. Olivar, "A Simplified Voltage Stability Index (SVSI)," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 806-813, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.044.
- [16] S. Mokred, Y. Wang, and T. Chen, "Modern voltage stability index for prediction of voltage collapse and estimation of maximum load-ability for weak buses and critical lines identification," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 145, Feb. 2023, Art. no. 108596, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108596.
- [17] F. A. Althowibi and M. W. Mustafa, "Power system network sensitivity to Voltage collapse," in *2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference*, Melaka, Malaysia: IEEE, Jun. 2012, pp. 379-383, doi: 10.1109/PEOCO.2012.6230893.
- [18] A. Berizzi, P. Finazzi, D. Dosi, P. Marannino, and S. Corsi, "First and second order methods for voltage collapse assessment and security enhancement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 543-551, May 1998, doi: 10.1109/59.667380.
- [19] C. Valuva, S. Chinnamuthu, T. Khurshaid, and K.-C. Kim, "A Comprehensive Review on the Modelling and Significance of Stability Indices in Power System Instability Problems," *Energies*, vol. 16, no. 18, Sep. 2023, Art. no. 6718, doi: 10.3390/en16186718.
- [20] M. S. S. Danish, T. Senjyu, S. M. S. Danish, N. R. Sabory, N. K., and P. Mandal, "A Recap of Voltage Stability Indices in the Past Three Decades," *Energies*, vol. 12, no. 8, Apr. 2019, Art. no. 1544, doi: 10.3390/en12081544.
- [21] T. G. Tella, S. S. Sitati, and G. N. Nvakoe, "Voltage Stability Assessment on Ethiopian 230 KV Transmission Network Using Modified Voltage Stability Indices," in *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Cape Town: IEEE, Jun. 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PowerAfrica.2018.8521144.
- [22] T. T. Wondie and T. G. Tella, "Voltage Stability Assessments and Their Improvement Using Optimal Placed Static Synchronous Compensator (STATCOM)," *J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2022, pp. 1-12, Aug. 2022, doi: 10.1155/2022/2071454.
- [23] Z. Wang, B. Cui, and J. Wang, "A Necessary Condition for Power Flow Insolvability in Power Distribution Systems with Distributed Generators," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 2, pp. 1440-1450, Mar. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2588341.
- [24] R. W. Ferrero, S. M. Shahidehpour, and V. C. Ramesh, "Transaction analysis in deregulated power systems using game theory," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 1340-1347, Aug. 1997, doi: 10.1109/59.630479.
- [25] F. Milano, L. Vanfretti, and J. C. Morataya, "An Open Source Power System Virtual Laboratory: The PSAT Case and Experience," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 51, no. 1, pp. 17-23, 2008, doi: 10.1109/TE.2007.893354.