

## **XOÁ NÚT TRUNG GIAN ĐỂ GIẢM THỜI GIAN GIẢI TÍCH LƯỚI ĐIỆN**

### **ELIMINATION OF PASSIVE NODES TO IMPROVE LOAD FLOW ANALYSIS**

**Trần Thanh Sơn, Hoàng Thu Hà, Nguyễn Đức Thuận**

*Trường Đại học Điện lực*

**Tóm tắt:** Bài báo này giới thiệu thuật toán xoá nút trung gian để làm giảm thời gian tính toán và số bước lặp của bài toán giải tích chế độ xác lập lưới điện. Thuật toán được lập trình trong Matlab và kiểm chứng trên các lưới điện chuẩn IEEE 30 nút và 118 nút. Kết quả tính toán cho thấy thuật toán làm giảm đáng kể thời gian và tổng số bước lặp của bài toán giải tích lưới điện.

**Từ khóa:** Giải tích lưới điện, nút trung gian, thời gian tính toán.

**Abstract:** This paper introduces an algorithm, which is programmed in Matlab and is validated by IEEE 30 and 118 nodes, to eliminate passive nodes in order to improve load flow analysis. The computed results show that this method can considerably reduce both computation time and number of iterations.

**Keywords:** Load flow analysis, passive nodes, computation time.

### **I. GIỚI THIỆU CHUNG**

Giải tích lưới điện là một bài toán quan trọng trong nghiên cứu hệ thống điện. Để nghiên cứu các bài toán khác của hệ thống điện như tính toán ổn định, tính tối ưu hóa công suất thì bao giờ chúng ta cũng phải bắt đầu bằng việc giải bài toán giải tích lưới điện. Để giải bài toán giải tích lưới điện, có rất nhiều thuật toán đã được phát triển như phương pháp Gauss-Seidel, Newton-Raphson,... [1] [2]. Các thuật toán tuy rất mạnh nhưng đối với một lưới lớn thì

số bước lặp và thời gian lặp tăng lên rất nhanh khi số nút phụ tải trong lưới tăng. Do hệ thống điện ngày càng phát triển nên thời gian tính toán cho bài toán này là rất lớn. Tuy nhiên xuất phát từ nhu cầu thực tế của các bài toán về vận hành, điều khiển tức thời, chúng ta cần nghiên cứu phát triển các phương pháp để cải thiện tốc độ tính toán của bài toán này. Hiện nay đã có rất nhiều phương pháp, thuật toán được nghiên cứu, phát triển để làm tăng tốc độ tính toán và giảm yêu cầu về bộ nhớ cho bài toán này như: sử dụng kỹ thuật ma trận

thưa, sử dụng một số giả thiết để tách biến,... [2][3]. Bài báo này nghiên cứu ứng dụng xóa nút trung gian nhằm giảm thời gian tính toán và yêu cầu về bộ nhớ trong bài toán giải tích lưới điện.

Trong lưới điện, ngoài các nút đầu nối với các nguồn hoặc phụ tải thì còn các nút trung gian (nút mà chỉ có các đường dây nối vào). Tại các nút trung gian này không có nguồn dòng đi vào hay đi ra. Do đó ta tìm cách xóa bớt chúng trước khi dùng các thuật toán giải tích lưới điện. Việc xóa bớt chúng trong quá trình giải sẽ làm giảm số phương trình mô tả lưới điện và do đó sẽ giảm được bộ nhớ và thời gian tính toán khi sử dụng các phương pháp Gauss-Seidel, Newton-Raphson,...

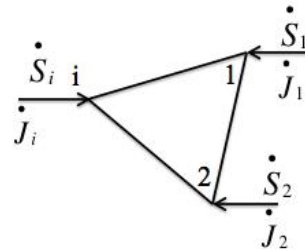
Bộ cục bài báo gồm 5 phần như sau:

- Phần I: giới thiệu chung;
- Phần II: giới thiệu về các mô hình toán học của bài toán giải tích chế độ xác lập lưới điện;
- Thuật toán xóa nút trung gian được xây dựng trong phần III. Các ưu điểm của thuật toán này sẽ được kiểm chứng thông qua tính toán cho lưới điện IEEE 30 nút và 118 nút;
- Phần IV đưa ra ứng dụng và kết quả;
- Phần V đưa ra một số kết luận.

## 2. Mô hình bài toán giải tích chế độ xác lập lưới điện

Xét một lưới điện gồm  $n$  nút. Gọi  $\dot{S}_i, \dot{J}_i$  lần lượt là dòng công suất, dòng điện đi vào nút như trên hình 1.

Gọi  $Y_{dik}, B_{cik}$  lần lượt là tổng dẫn, dung dẫn của đường dây nối giữa nút  $i$  và nút  $k$ .



Hình 1. Mô hình 1 lưới điện đơn giản

Chọn điện thế của đất bằng 0, gọi  $\dot{U}_i, \dot{U}_f$  là điện áp dây và điện áp pha của nút  $i$ . Áp dụng phương pháp điện thế đỉnh cho lưới, ta có:

$$\left[ \dot{Y} \right] \cdot \left\{ \dot{U}_f \right\} = \left\{ \dot{J} \right\} \quad (1)$$

Trong đó:

$$\left\{ \dot{U}_f \right\} = \left[ \begin{matrix} \dot{U}_{f1} & \dot{U}_{f2} & \dots & \dot{U}_{fn} \end{matrix} \right]^T$$

$$\left\{ \dot{J} \right\} = \left[ \begin{matrix} \dot{J}_1 & \dot{J}_2 & \dots & \dot{J}_n \end{matrix} \right]^T$$

$[Y]$  là ma trận tổng dẫn, được xác định như sau:

$$\dot{Y}_{ii} = \sum_{k=1, k \neq i}^n \left( \dot{Y}_{dik} + j \frac{B_{cik}}{2} \right) \quad (2)$$

$$\dot{Y}_{ik} = \dot{Y}_{ki} = -\dot{Y}_{dik} \quad (i \neq k)$$

Do:

$$\dot{S} = \sqrt{3} \dot{U} J^* \quad (3)$$

Thay (3) vào (1) ta được:

$$[\dot{Y}] \times (\dot{U}) = \left\{ \begin{matrix} \dot{S} \\ \dot{U} \end{matrix} \right\} \quad (4)$$

Hệ phương trình trên được gọi là hệ phương trình mô tả lưới điện theo cân bằng dòng nút. Thông thường ta có thể giải hệ phương trình trên bằng phương pháp lặp Gauss - Seidel, Newton - Raphson,... Trong trường hợp lưới điện xét có số lượng nút lớn thì yêu cầu về thời gian và bộ nhớ cho tính toán là rất lớn. Trong phần tiếp theo ta xét một thuật toán nhằm giảm số lượng phương trình của hệ phương trình (4), từ đó giảm được thời gian tính toán và yêu cầu về bộ nhớ đối với các phương pháp được sử dụng để giải (4).

Chương trình tính toán giải tích lưới điện thường gồm các mô đun có chức năng như trên hình 2.



Hình 2. Trình tự chung của bài toán giải tích lưới điện

### 3. Thuật toán xoá nút trung gian

Hệ phương trình mô tả lưới điện theo cân bằng dòng nút (4) viết dưới dạng khai triển:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{11} \cdot \dot{U}_1 + \dot{Y}_{12} \cdot \dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}_{1k} \cdot \dot{U}_k + \dots + \dot{Y}_{1n} \cdot \dot{U}_n &= \frac{\dot{S}_1}{U_1} \\ \dots & \\ \dot{Y}_{k1} \cdot \dot{U}_1 + \dot{Y}_{k2} \cdot \dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}_{kk} \cdot \dot{U}_k + \dots + \dot{Y}_{kn} \cdot \dot{U}_n &= \frac{\dot{S}_k}{U_k} \\ \dots & \\ \dot{Y}_{n1} \cdot \dot{U}_1 + \dot{Y}_{n2} \cdot \dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}_{nk} \cdot \dot{U}_k + \dots + \dot{Y}_{nn} \cdot \dot{U}_n &= \frac{\dot{S}_n}{U_n} \end{aligned} \quad (5)$$

Giả sử  $k$  là nút trung gian:  $\dot{S}_k = 0$ , khi đó phương trình thứ  $k$  có dạng như sau:

$$\dot{Y}_{k1} \cdot \dot{U}_1 + \dot{Y}_{k2} \cdot \dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}_{kk} \cdot \dot{U}_k + \dots + \dot{Y}_{kn} \cdot \dot{U}_n = 0 \quad (6)$$

Từ (6) ta suy ra:

$$\dot{U}_k = -\frac{1}{\dot{Y}_{kk}} \left[ \dot{Y}_{k1} \cdot \dot{U}_1 + \dot{Y}_{k2} \cdot \dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}_{kn} \cdot \dot{U}_n \right] \quad (7)$$

Thay (7) vào các phương trình còn lại của (5) ta nhận được:

$$\left[ \dot{Y}_{i1} - \frac{\dot{Y}_{ik} \cdot \dot{Y}_{k1}}{\dot{Y}_{kk}} \right] \cdot \dot{U}_1 + \left[ \dot{Y}_{i2} - \frac{\dot{Y}_{ik} \cdot \dot{Y}_{k2}}{\dot{Y}_{kk}} \right] \cdot \dot{U}_2 + \dots + \left[ \dot{Y}_{in} - \frac{\dot{Y}_{ik} \cdot \dot{Y}_{kn}}{\dot{Y}_{kk}} \right] \cdot \dot{U}_n = \frac{S_i}{U_i} \quad (8)$$

với  $i = 1 \dots n, i \neq k$

Đặt:

$$\dot{Y}'_{ij} = \left[ \dot{Y}_{ij} - \frac{\dot{Y}_{ik} \cdot \dot{Y}_{kj}}{\dot{Y}_{kk}} \right] \quad i \neq k, j \neq k,$$

Công thức (9) còn được gọi là công thức Kron [3].

Phương trình (8) trở thành:

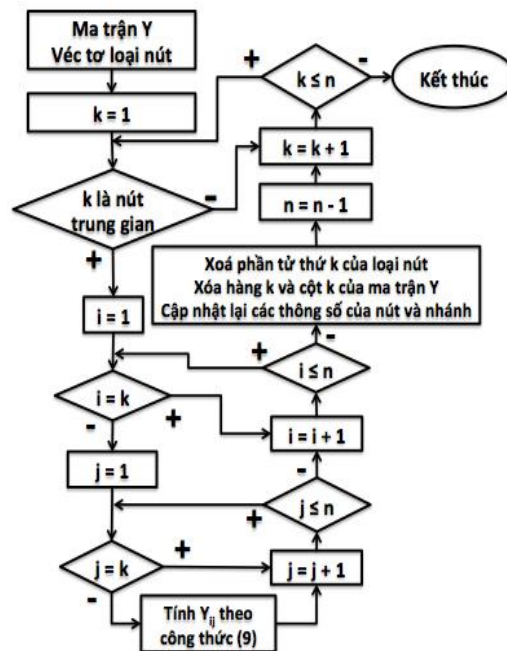
$$\dot{Y}'_{i1} \cdot \dot{U}_1 + \dot{Y}'_{i2} \cdot \dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}'_{in} \cdot \dot{U}_n = \frac{S_i}{U_i}$$

với  $i = 1 \dots n, i \neq k$ .

Như vậy khi nút  $k$  là nút trung gian ta có thể loại bỏ nó trong quá trình tính toán và các thành phần của ma trận tổng dẫn được tính lại bằng công thức (9). Áp dụng công thức (9) cho từng nút trung gian ta sẽ nhận được 1 hệ phương trình mô tả lưới điện chỉ còn

$(n - m)$  phương trình. Trong đó  $m$  là tổng số nút trung gian.

Sơ đồ chi tiết của khối xử lý nút trung gian được biểu diễn trên hình 3. Sơ đồ này đã được lập trình trong Matlab để kiểm nghiệm. Trong chương trình, sau khi mỗi nút trung gian được xóa thì các véc tơ điện áp, công suất, loại nút, ma trận tổng dẫn  $Y$  và tổng số nút được cập nhật lại. Để thuận tiện cho việc khai thác kết quả sau khi tính toán, chương trình sử dụng riêng một mô đun để sao lưu việc xóa. Mô đun này cho phép ta tìm lại đúng nút ban đầu khi chưa tiến hành xóa nút.



Hình 3. Sơ đồ chi tiết khối xử lý nút trung gian

Hình 4 là sơ đồ chương trình giải tích lưới điện có chức năng xóa nút trung gian. Ta thấy trong sơ đồ này có thêm ba khối là: Xóa nút trung gian và cập nhật lại giá trị điện áp theo đúng thứ tự

ban đầu và tính điện áp các nút trung gian. Sơ đồ thuật toán này đã được tác giả lập trình trong môi trường Matlab.



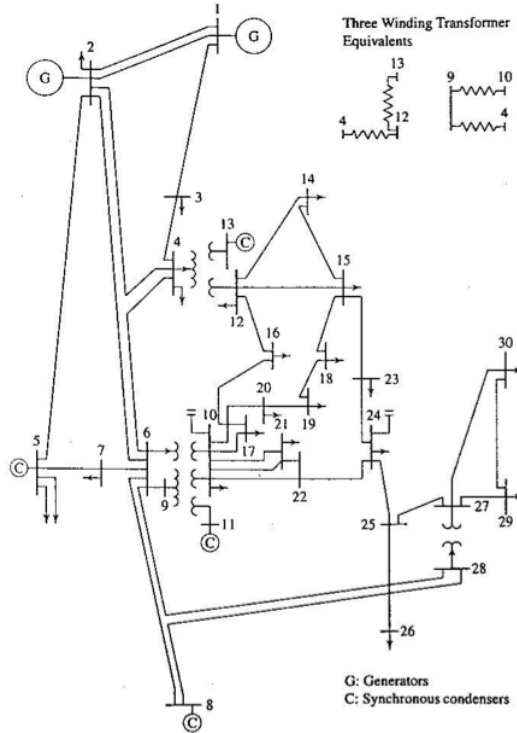
Hình 4. Sơ đồ chương trình giải tích lưới điện có chức năng xóa nút trung gian

#### 4. ỨNG DỤNG VÀ KẾT QUẢ

Để kiểm tra hiệu quả của thuật toán xóa nút. Thuật toán xóa nút trung gian đã được ứng dụng để mô phỏng tính toán cho các lưới điện chuẩn IEEE 30 nút và IEEE 118 nút. Các kết quả được thực hiện tính toán trên máy tính hệ điều

hành OS X, 2,26 Ghz Intel Core 2 Duo, 2 GB 1067 MHz DDR3.

Lưới điện chuẩn IEEE 30 nút, 41 nhánh, trong đó có 6 nút trung gian là: 6, 9, 22, 25, 27 và 28. Các thông số của lưới như trong phụ lục 1 và 2.



Hình 5. Sơ đồ lưới điện IEEE 30 nút

Bảng 1. Tổng số bước lặp và thời gian giải bài toán IEEE 30 nút bằng phương pháp Gauss-Seidel khi có và không có xử lý nút trung gian

	Không có xóa nút trung gian	Có xóa nút trung gian
Tổng số bước lặp	332	214
Thời gian giải bài toán (s)	0.18	0.12
Thời gian chạy thuật toán xóa nút trung gian (s)	0	0.01
Độ lệch điện áp lớn nhất ở bước lặp cuối	9.76E-07	9.61E-03

Khi sử dụng phương pháp Gauss-Seidel [2] để giải bài toán thấy kết quả về điện áp ở bước lặp thứ 332 đối với trong hợp không có xóa nút trung gian và ở bước lặp 214 khi có xóa nút trung gian là giống nhau (Phụ lục 3). Bảng 1 tổng kết tổng số bước lặp, thời gian giải và thời gian xóa nút trung gian cũng như độ lệch điện áp lớn nhất trong 2 trường hợp xét. Ta thấy thời gian để xóa nút trung gian chiếm rất ít (0.01s). Tuy nhiên hiệu quả của nó mang lại rất cao. Sau khi xóa các nút trung gian đi thì số bước lặp của thuật toán Gauss-Seidel chỉ còn 214 bước, giảm 118 bước. Thời gian giải bài toán giảm từ 0,18 giây xuống 0.12 giây (giảm được 33% thời gian giải bài toán).

Xét lưới điện chuẩn IEEE 118 nút, 186 nhánh, trong đó có 10 nút trung gian. Sử dụng cùng 1 điều kiện dừng lặp với độ điện áp yêu cầu  $\varepsilon = 10^{-6}$  ta có tổng số bước và thời gian chạy trong trường hợp có xử lý nút trung gian và không có xử lý nút trung gian như trong bảng 2.

Ta thấy thời gian để xóa nút trung gian chiếm rất ít. Tuy nhiên hiệu quả của nó mang lại rất cao. Sau khi xóa các nút trung gian đi thì số bước lặp của thuật toán Gauss-Seidel chỉ còn 889 bước, giảm 278 bước. Thời gian giải bài toán giảm đáng kể từ 6.17 giây xuống 3.83 giây (giảm được 38% thời gian giải bài toán).

**Bảng 2. Tổng số bước lặp và thời gian giải bài toán IEEE 118 nút bằng phương pháp Gauss-Seidel khi có và không có xử lý nút trung gian**

	Không có xóa nút trung gian	Có xóa nút trung gian
Tổng số bước lặp	1167	889
Thời gian giải bài toán (s)	6.17	3.83
Thời gian chạy thuật toán xóa nút trung gian	0	0.04
Độ lệch điện áp lớn nhất ở bước lặp cuối	9.9385e-07	9.9205e-07

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo đã giới thiệu chi tiết thuật toán để xóa nút trung gian trong tính toán giải tích lưới điện. Kết quả tính toán cho các lưới điện chuẩn IEEE 30 và

118 nút cho thấy thuật toán cho phép giảm đáng kể thời gian tính toán và số bước lặp.

**6. PHỤ LỤC****Phụ lục 1. Dữ liệu nút lưới điện IEEE 30 nút**

<i>Nút</i>	<i>Loại nút</i>	<i>Mo đun U (kV)</i>	<i>Góc pha U (degree)</i>	<i>Pnguồn (MW)</i>	<i>Qnguồn (MVAr)</i>	<i>Ptải (MW)</i>	<i>Qtải (MVAr)</i>	<i>Qmin (MVAr)</i>	<i>Qmax (MVAr)</i>
1	0	1.06	0	0	0	0	0	-1000	1000
2	1	1.043	0	40	0	21.7	12.7	-40	50
3	2	1	0	0	0	2.4	1.2	-1000	1000
4	2	1.06	0	0	0	7.6	1.6	-1000	1000
5	1	1.01	0	0	0	94.2	19	-40	40
6	2	1	0	0	0	0	0	-1000	1000
7	2	1	0	0	0	22.8	10.9	-1000	1000
8	1	1.01	0	0	0	30	30	-10	40
9	2	1	0	0	0	0	0	-1000	1000
10	2	1	0	0	19	5.8	2	-1000	1000
11	1	1.082	0	0	0	0	0	-6	24
12	2	1	0	0	0	11.2	7.5	-1000	1000
13	1	1.071	0	0	0	0	0	-6	-24
14	2	1	0	0	0	6.2	1.6	-1000	1000
15	2	1	0	0	0	8.2	2.5	-1000	1000
16	2	1	0	0	0	3.5	1.8	-1000	1000
17	2	1	0	0	0	9	5.8	-1000	1000
18	2	1	0	0	0	3.2	0.9	-1000	1000
19	2	1	0	0	0	9.5	3.4	-1000	1000
20	2	1	0	0	0	2.2	0.7	-1000	1000
21	2	1	0	0	0	17.5	11.2	-1000	1000
22	2	1	0	0	0	0	0	-1000	1000
23	2	1	0	0	0	3.2	1.6	-1000	1000
24	2	1	0	0	4.3	8.7	6.7	-1000	1000
25	2	1	0	0	0	0	0	-1000	1000
26	2	1	0	0	0	3.5	2.3	-1000	1000
27	2	1	0	0	0	0	0	-1000	1000
28	2	1	0	0	0	0	0	-1000	1000
29	2	1	0	0	0	2.4	0.9	-1000	1000
30	2	1	0	0	0	10.6	1.9	-1000	1000

Ghi chú: Loại nút có giá trị 0 là nút cân bằng công suất, 1 là nút PV, 2 là nút PQ.

**Phụ lục 2. Dữ liệu nhánh lưới điện IEEE 30 nút**

<i>Nhánh</i>	<i>Nút đầu</i>	<i>Nút cuối</i>	<i>R</i>	<i>X</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Hệ số phân áp</i>
1	1	2	0.0192	0.0575	0	0.0528	1
2	1	3	0.0452	0.1852	0	0.0408	1
3	2	4	0.057	0.1737	0	0.0368	1
4	3	4	0.0132	0.0379	0	0.0084	1
5	2	5	0.0472	0.1983	0	0.0418	1
6	2	6	0.0581	0.1763	0	0.0374	1
7	4	6	0.0119	0.0414	0	0.009	1
8	5	7	0.046	0.116	0	0.0204	1
9	6	7	0.0267	0.082	0	0.017	1
10	6	8	0.012	0.042	0	0.009	1
11	9	6	0	0.208	0	0	0.978
12	10	6	0	0.556	0	0	0.969
13	9	11	0	0.208	0	0	1
14	9	10	0	0.11	0	0	1
15	12	4	0	0.256	0	0	0.932
16	12	13	0	0.14	0	0	1
17	12	14	0.1231	0.2559	0	0	1
18	12	15	0.0662	0.1304	0	0	1
19	12	16	0.0945	0.1987	0	0	1
20	14	15	0.221	0.1997	0	0	1
21	16	17	0.0824	0.1923	0	0	1
22	15	18	0.1073	0.2185	0	0	1
23	18	19	0.0639	0.1292	0	0	1
24	19	20	0.034	0.068	0	0	1
25	10	20	0.0936	0.209	0	0	1
26	10	17	0.0324	0.0845	0	0	1
27	10	21	0.0348	0.0749	0	0	1
28	10	22	0.0727	0.1499	0	0	1
29	21	22	0.0116	0.0236	0	0	1
30	15	23	0.1	0.202	0	0	1
31	22	24	0.115	0.179	0	0	1
32	23	24	0.132	0.27	0	0	1



Nhánh	Nút đầu	Nút cuối	R	X	G	B	Hệ số phân áp
33	24	25	0.1885	0.3292	0	0	1
34	25	26	0.2544	0.38	0	0	1
35	25	27	0.1093	0.2087	0	0	1
36	27	28	0	0.396	0	0	0.968
37	27	29	0.2198	0.4153	0	0	1
38	27	30	0.3202	0.6027	0	0	1
39	29	30	0.2399	0.4533	0	0	1
40	8	28	0.0636	0.2	0	0.0428	1
41	6	28	0.0169	0.0599	0	0.13	1

Ghi chú: Các đại lượng cho trong hệ đơn vị tương đối với  $S_{cb} = 100$  MVA.

**Phụ lục 3. Kết quả điện áp khi sử dụng phương pháp lặp Gauss-Seidel**

Nút	Khi không xóa nút trung gian	Khi xóa nút trung gian
	Điện áp ở bước lặp thứ 332	Điện áp ở bước lặp thứ 214
1	1.06	1.06
2	$1.03905028761339 + 0.0906835145466580j$	$1.03903464602858 + 0.0908625574824956j$
3	$1.01354928623127 + 0.132103074407876j$	$1.01349686648506 + 0.132365882924455j$
4	$1.00109738909742 + 0.157768073693736j$	$1.00102901868089 + 0.158084832564183j$
5	$0.982927745601444 + 0.232277951874179j$	$0.982860743588965 + 0.232561300976209j$
6	$0.995368460836308 + 0.184862438790075j$	
7	$0.981015602486704 + 0.211877912986230j$	$0.980932506841698 + 0.212229210548184j$
8	$0.991305397200997 + 0.193425979331047j$	$0.991197004747754 + 0.193980663415407j$
9	$1.02186197086895 + 0.246841064498913j$	
10	$1.00822551100959 + 0.273602352228669j$	$1.00810843655132 + 0.274000355033744j$
11	$1.05174957370265 + 0.254060690025624j$	$1.05164734499887 + 0.254483519617324j$
12	$1.02372210561750 + 0.265249293402201j$	$1.02362275997588 + 0.265616546549442j$
13	$1.03676405935008 + 0.268628526482113j$	$1.03666735645510 + 0.269001472227203j$
14	$1.00513977429196 + 0.276970214882502j$	$1.00503477151969 + 0.277336089117839j$
15	$1.00032542021948 + 0.277112205623296j$	$1.00021696294454 + 0.277481004131120j$
16	$1.00894605135258 + 0.271796566702152j$	$1.00883752271466 + 0.272173587002838j$
17	$1.00232017092814 + 0.275298034983701j$	$1.00220457933684 + 0.275687265373410j$
18	$0.988021065598919 + 0.284658063204765j$	$0.987905956291684 + 0.285031419507915j$

Nút	<i>Khi không xóa nút trung gian</i>	<i>Khi xóa nút trung gian</i>
	Điện áp ở bước lặp thứ 332	Điện áp ở bước lặp thứ 214
19	$0.984678564562396 + 0.286643875420137j$	$0.984560487009326 + 0.287021394344200j$
20	$0.989544917180859 + 0.284229268109541j$	$0.989426666289880 + 0.284611474621208j$
21	$0.994257879075118 + 0.278105359072111j$	$0.994138608437912 + 0.278499877092445j$
22	$0.994877772179056 + 0.278021102381140j$	
23	$0.988436230957465 + 0.280599201857041j$	$0.988322002774770 + 0.280975135086054j$
24	$0.982340893123735 + 0.281487185696435j$	$0.982220580566872 + 0.281876250540894j$
25	$0.981942374808005 + 0.273279806693001j$	
26	$0.962960619563021 + 0.275582879360882j$	$0.962834650044340 + 0.275981414185688j$
27	$0.991098601291365 + 0.265967916892433j$	
28	$0.991929414230402 + 0.195316387508362j$	
29	$0.966210181114311 + 0.281525313246853j$	$0.966077181733512 + 0.281935252375233j$
30	$0.950853415213213 + 0.292922880031610j$	$0.950715334049130 + 0.293326384575595j$

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Arrillaga, C. P. Arnold, "Computer Analysis of Power System", John Wiley & Sons Ltd, 1990.
- [2] Hadi Saadat, "Power System Analysis", PSA Publishing, Third Edition, 2010.
- [3] Prabha Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Professional, 1994.

#### Giới thiệu tác giả:



**Tác giả Trần Thanh Sơn** tốt nghiệp đại học tại Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội chuyên ngành hệ thống điện năm 2003. Năm 2004 tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện tại trường Đại học Bách Khoa Grenoble, Cộng hoà Pháp. Năm 2008 nhận bằng tiến sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện của Trường Đại học Joseph Fourier - Cộng hoà Pháp. Hiện nay là Trưởng Bộ môn Mạng & Hệ thống điện, Trưởng Khoa Hệ thống điện - Trường Đại học Điện lực. Nghiên cứu tập trung vào các vấn đề: ứng dụng phương pháp số trong tính toán, mô phỏng trường điện từ; các bài toán tối ưu hoá trong hệ thống điện.



**Tác giả Hoàng Thu Hà** nhận bằng kỹ sư và thạc sĩ tại Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội chuyên ngành hệ thống điện năm 2000 và 2003. Từ năm 2000, là giảng viên chính Khoa Hệ thống điện - Trường Đại học Điện lực. Nghiên cứu tập trung vào tính toán chế độ xác lập, phân tích chất lượng điện năng lưới điện phân phối có nguồn phân tán, các phương pháp giải mạch điện.



**Tác giả Nguyễn Đức Thuận** nhận bằng kỹ sư và thạc sĩ tại Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội chuyên ngành hệ thống điện năm 2008 và 2010. Từ năm 2010, là giảng viên Khoa Hệ thống điện - Trường Đại học Điện lực. Nghiên cứu tập trung vào tính toán chế độ xác lập lưới điện, bù công suất phản kháng.