

## XÁC ĐỊNH DUNG LƯỢNG VÀ VỊ TRÍ CỦA MÁY PHÁT PHÂN BỐ (DG) TỐI ƯU TỔN THẤT LƯỚI PHÂN PHỐI

Trương Quang Đăng Khoa, Phan Thị Thanh Bình, Hồng Bảo Trân  
Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM

**TÓM TẮT:** Những thay đổi gần đây trong cơ cấu chính của các công ty điện lực đã tạo cơ hội cho nhiều sự đổi mới khoa học kỹ thuật, bao gồm sự tham gia của các máy phát phân bố – DG (Distributed Generation) vào hệ thống đã đạt được những lợi ích khác nhau. Cả điện lực và khách hàng đều có lợi từ DG. Trong số những lợi ích của DG, có rất nhiều hướng để giải quyết bài toán về DG nhưng tất cả đều nhằm mục đích hướng đến việc tối ưu sự phát triển và vận hành của hệ thống điện. Trong bài báo này, một thuật toán sử dụng phương pháp điểm trong – PDIP (Primal Dual Interior Point) sẽ được trình bày để giải quyết bài toán xác định dung lượng và vị trí của DG nhằm tối ưu tổn thất lưới phân phối. Các điều kiện ràng buộc cân bằng và không cân bằng được giải quyết dựa trên các điều kiện Karush Kuhn Tucker (KKT). Chương trình tính toán tối ưu lưới phân phối 10 nút và 42 nút sẽ được thực hiện trong MATLAB.

### I. GIỚI THIỆU

Nhiều công nghệ tạo năng lượng mới khác nhau đang được phát triển rộng khắp thế giới. Tiêu biểu cho những công nghệ này là nhiều nguồn phát nhỏ có công suất từ 10 KW đến khoảng 10 – 20 MW và được đặt gần nơi tiêu thụ điện năng. Những máy phát này được gọi là máy phát phân bố – DG (Distributed Generation). Những lợi ích mà DG mang lại khi tham gia vào lưới phân phối bao gồm lợi ích kỹ thuật và lợi ích kinh tế.

Các lợi ích kỹ thuật:

- Giảm tổn hao đường dây
- Cải thiện điện áp
- Giảm sự ô nhiễm môi trường
- Tăng hiệu suất điện năng
- Tăng cường độ tin cậy và sự an toàn
- Cải thiện chất lượng điện năng
- Đảm bảo tính cung cấp điện liên tục

Các lợi ích kinh tế:

- Trì hoãn sự đầu tư trong việc nâng cấp các thiết bị
- Giảm chi phí vận hành
- Tăng cường hoạt động sản xuất
- Giảm chi phí nhiên liệu
- Tăng độ an toàn cho những tải quan trọng trong lưới phân phối

Dựa trên những lợi ích đó, người ta đã đặt ra rất nhiều bài toán vận hành DG. Các bài toán xoay quanh việc chứng minh sự có mặt của DG trong hệ thống là có lợi dựa trên các chỉ số mà họ đặt ra. Tuy mỗi bài toán sử dụng các thuật toán khác nhau, đặt ra các hàm mục tiêu khác nhau, nhưng đều có chung một mục đích là xác định vị trí đặt thích hợp và lượng công suất phát cần thiết của DG sao cho sự vận hành trong hệ thống là tối ưu.

Trong [4], R.Ramakumar và cộng sự đã khảo sát lợi ích giảm tổn hao trên đường dây của DG trong trường hợp đơn giản gồm có một phát tuyến phân bố với tải tập trung và DG. Kế thừa việc phân tích đó, chỉ số *LR – Line Loss Reduction* sẽ được phát triển lên trong trường hợp tổng quát hơn. Bài toán được đặt ra là đi tìm vị trí tối ưu và công suất phát của DG trong lưới phân phối sao cho độ giảm tổn hao trên đường dây đạt giá trị lớn nhất có thể. Khi giải các bài toán tối ưu phân

bổ công suất – OPF (Optimal Power Flow) dạng phi tuyến trong hệ thống lớn, phương pháp điểm trong được lựa chọn vì tính hiệu quả và tốc độ hội tụ của nó, như đã đề cập trong [7].

Bài báo này đề xuất giải bài toán tối ưu bằng giải thuật PDIPA (Pure Primal Dual Interior Point Algorithm). Chương 2 và 3 là mô hình toán học của bài toán tối ưu. Chương 4 là giải thuật điểm trong và các điều kiện ràng buộc của bài toán theo Karush-Kuhn-Tucker (KKT). Chương 5 là chương trình tính toán được thực hiện trên MATLAB, ứng dụng giải cho 2 lưới điện, 10 nút giả lập và Tuyến Rạch Chiết 42nút của Điện Lực TpHCM.

## 2. PHÂN TÍCH ĐỘ GIẢM TỔN HAO TRÊN ĐƯỜNG DÂY

Để đưa ra hàm mục tiêu của bài toán, đầu tiên ta cũng thực hiện tương tự như bài toán phân tích sự giảm tổn hao trên đường dây khi có DG trong [4]. Ta có công thức xác định độ giảm tổn hao trên đường dây trong trường hợp đơn giản:

$$LR = Loss_B - Loss_{AT} = \frac{RG}{3V_p^2 L} (2P_L P_G + 2Q_L Q_G - P_G^2 - Q_G^2)$$

Từ công thức trên, ta phát triển lên thành công thức tính toán độ giảm tổn hao trên đường dây trong trường hợp tổng quát của một hệ thống phân bố cấu trúc hình tia có nhiều phát tuyến. Giả thiết DG được đặt ngay tải.

Công thức tính độ giảm tổn hao trên đường dây được viết lại như sau:

$$LR = Loss_B - Loss_{AT} = \sum_{i=2}^N \frac{R}{3V_p^2} (2P_{Li} P_{Gi} + 2Q_{Li} Q_{Gi} - P_{Gi}^2 - Q_{Gi}^2)$$

Hàm mục tiêu của bài toán:

$$f(x) = -LR = -\sum_{i=2}^N \frac{R}{3V_p^2} (2P_{Li} P_{Gi} + 2Q_{Li} Q_{Gi} - P_{Gi}^2 - Q_{Gi}^2)$$

Trong đó, N: tổng số nút trong hệ thống, R: tổng điện trở của các nhánh tính từ nguồn đến vị trí đặt DG trên từng pha ( $\Omega/U$ ),  $V_p$ : điện áp pha tải trị hiệu dụng (V),  $P_{Li}$ : công suất tác dụng của tải tại nút thứ i (W),  $Q_{Li}$ : công suất phản kháng của tải tại nút thứ i (Var),  $P_{Gi}$ : công suất tác dụng của DG tại nút thứ i (W),  $Q_{Gi}$ : công suất phản kháng của DG tại nút thứ i (Var).

## 3. CÁC ĐIỀU KIỆN RÀNG BUỘC CÂN BẰNG VÀ KHÔNG CÂN BẰNG:

Các điều kiện ràng buộc cân bằng:

$$\begin{aligned} P_{Gi} - P_{Li} &= \text{Re} \left[ \bar{V}_i \cdot \sum_{k=1}^N Y_{busik}^* \cdot \mathbf{V}_k^* \right] \\ &= \sum_{n=1}^N |\dot{V}_i \dot{V}_n \bar{Y}_{in}| \cos(q_{in} + d_n - d_i) = |\dot{V}_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |\dot{V}_i \dot{V}_n \bar{Y}_{in}| \cos(q_{in} + d_n - d_i) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} &= \text{Im} \left[ \bar{V}_i \cdot \sum_{k=1}^N Y_{busik}^* \cdot \mathbf{V}_k^* \right] \\ &= -\sum_{n=1}^N |\dot{V}_i \dot{V}_n \bar{Y}_{in}| \sin(q_{in} + d_n - d_i) = -|\dot{V}_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |\dot{V}_i \dot{V}_n \bar{Y}_{in}| \sin(q_{in} + d_n - d_i) \end{aligned}$$

Các điều kiện ràng buộc không cân bằng:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}; \forall i = 1 \dots N$$

$$P_{G\min i} \leq P_{Gi} \leq P_{G\max i}; \forall i = 1 \dots N$$

$$Q_{G\min i} \leq Q_{Gi} \leq Q_{G\max i}; \forall i = 1 \dots N$$

#### 4. THUẬT TOÁN

Bài toán tối ưu được đặt ra với tất cả những điều kiện ràng buộc cân bằng và không cân bằng như sau:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & g(x) = 0 \quad (a) \\ & x_l \leq x \leq x_u \quad (b) \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó:

$$f(x) = -LR = -\sum_{i=2}^N \frac{R}{3V_P^2} (2P_{Li}P_{Gi} + 2Q_{Li}Q_{Gi} - P_{Gi}^2 - Q_{Gi}^2)$$

$$g_j(x) = \begin{cases} |\dot{V}_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |\dot{V}_i \dot{V}_n \bar{Y}_{in}| \cos(q_{in} + d_n - d_i) - P_{Gi} + P_{Li}, \forall j = 1 \dots N \\ -|\dot{V}_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |\dot{V}_i \dot{V}_n \bar{Y}_{in}| \sin(q_{in} + d_n - d_i) - Q_{Gi} + Q_{Li}, \forall j = (N+1) \dots (2.N) \end{cases}$$

x: tập hợp các biến trạng thái bao gồm công suất phát của các DG ( $P_G$  và  $Q_G$ ), điện áp các nút ( $V$  và  $\bar{V}$ );  $x_u, x_l$ : cận trên và cận dưới của các biến, x.

Từ bài toán tối ưu (1), ta biến đổi điều kiện ràng buộc không cân bằng (1.b) thành (2.b) & (2.c) bằng cách thêm vào các biến slack  $s_x$ . Ta sẽ được bài toán tối ưu (2) có dạng như sau:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & g(x) = 0 \quad (a) \\ & x + s_x = x_u \quad (b) \\ & x - x_l \geq 0, s_x \geq 0 \quad (c) \end{aligned} \quad (2)$$

Hàm chắn của bài toán (Barrier Function):

$$f_m = f(x) - m \sum_{j=1}^n \ln(x - x_l)_j - m \sum_{j=1}^n \ln(s_x)_j \quad (3)$$

Trong đó, n: số biến xác lập, m: thông số hàm chắn.

Hàm Lagrangian tương đương:

$$L_m = f(x) - y^T g(x) - y_x^T (x_u - x - s_x) - m \sum_{j=1}^n \ln(x - x_l)_j - m \sum_{j=1}^n \ln(s_x)_j \quad (4)$$

Điều kiện Karush-Kuhn-Tucker (KKT):

$$\begin{aligned} \nabla_x L_m &= \nabla f(x) - \nabla g(x)^T y + y_x - m(X - X_l)^{-1} e = 0 \quad (a) \\ \nabla_{s_x} L_m &= y_x - mS_x^{-1} e = 0 \quad (b) \\ \nabla_y L_m &= -g(x) = 0 \quad (c) \\ \nabla_{y_x} L_m &= x + s_x - x_u = 0 \quad (d) \end{aligned} \quad (5)$$

Trong đó,  $e = [1, \dots, 1]^T$ ,  $X = \text{diag}(x_1, \dots, x_n)$ ,  $S_x = \text{diag}(s_{x_1}, \dots, s_{x_n})$ .

Pure Primal – Dual Interior Point Algorithm (PDIPA):

Bằng phép biến đổi thích hợp và thêm vào một phương trình:

$$z = m(X - X_l)^{-1} e \quad (6)$$

các phương trình phi tuyến (5.a) – (5.b) và (6) được viết lại như sau:

$$(5.a) \Rightarrow \nabla_x L_m = \nabla f(x) - \nabla g(x)^T y + y_x - m(X - X_l)^{-1} e = 0 \quad (a)$$

$$(5.b) \Rightarrow \nabla_{s_x} L_m = y_x - mS_x^{-1} e = me \quad (b) \quad (7)$$

$$z = m(X - X_l)^{-1} e \Rightarrow (X - X_l)Z = me \quad (c)$$

Bằng cách lấy đạo hàm bậc nhất của (5.c) – (5.d) và (7), chúng ta sẽ thu được hệ phương trình đối xứng sau đây:

$$\begin{bmatrix} -Z^{-1}(X - X_l) & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & S_x^{-1}Y_x & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & H & -\nabla g^T \\ 0 & 0 & 0 & -\nabla g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta s_x \\ \Delta y_x \\ \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -mZ^{-1}e + (X - X_l)e \\ mS_x^{-1}e - Y_x e \\ -x - s_x + x_u \\ -\nabla_x L_m \\ g(x) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Trong đó, H là ma trận Hessian của hàm Lagrangian,

$$H = \nabla^2 f(x) - \sum_{j=1}^{2.N} y_j \nabla^2 g_j(x) \quad (9)$$

Các bước thực hiện của phương pháp PDIPA:

Bước 0: Khởi đầu  
 Chọn một điểm khởi động thích hợp sao cho những điều kiện không âm được thỏa mãn.

Bước 1: Tính toán thông số hàm chặn,  $\lambda$ .

Bước 2: Giải hệ phương trình (3.9).

Bước 3: Xác định bước lặp,  $\alpha$ , và cập nhật các giá trị.

Bước 4: Kiểm tra điều kiện hội tụ

Nếu thỏa điều kiện hội tụ, có nghĩa là nghiệm tối ưu của bài toán đã được tìm thấy, còn ngược lại quay trở về bước 1.

$$\text{Tính toán thông số hàm chặn: } gap^* = y_x^T s_x + z^T (x - x_l) \quad (10)$$

$$m = \frac{gap^*}{4n^2} \quad (11)$$

$$\text{Xác định bước lặp Newton: } a = \min\{0.9995a^*, 1.0\} \quad (12)$$

Trong đó:

$$a^* = \min \left\{ -\frac{(x - x_l)_j}{\Delta x_j}, -\frac{(s_x)_j}{(\Delta s_x)_j}, -\frac{(y_x)_j}{(\Delta y_x)_j}, -\frac{z_j}{\Delta z_j} \right\} \quad (13)$$

mà  $\Delta x_j < 0, (\Delta s_x)_j < 0, (\Delta y_x)_j < 0, \Delta z_j < 0$ . Hằng số, 0.9995, được sử dụng để ngăn chặn các biến không âm gần bằng 0.

Cập nhật các giá trị:

$$\begin{aligned}
 x^{k+1} &= x^k + a \Delta x \\
 s_x^{k+1} &= s_x^k + a \Delta s_x \\
 z^{k+1} &= z^k + a \Delta z \\
 y^{k+1} &= y^k + a \Delta y \\
 y_x^{k+1} &= y_x^k + a \Delta y_x
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Điều kiện dừng:

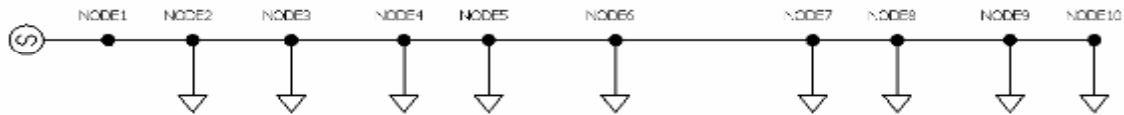
$$\begin{cases}
 dk 1 = \frac{gap^*}{1 + |do bj|} < e_1 \\
 dk 2 = |gap - gap^*| \leq e_2
 \end{cases}
 \tag{15}$$

## 5. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN TỐI ƯU LƯỚI PHÂN PHỐI 10 NÚT & 42 NÚT

### 5.1. 10-bus system:

$$S_{cb} = 63000 \text{ KVA}$$

$$V_{cbRMS} = 8.7 \text{ KV}, V_{min} = 0.95 \text{ p.u}, V_{max} = 1.05 \text{ p.u}$$



**Hình 1.** Lưới phân phối 10 nút

**Bảng 1.** Kết quả tính toán tối ưu lưới phân phối 10 nút

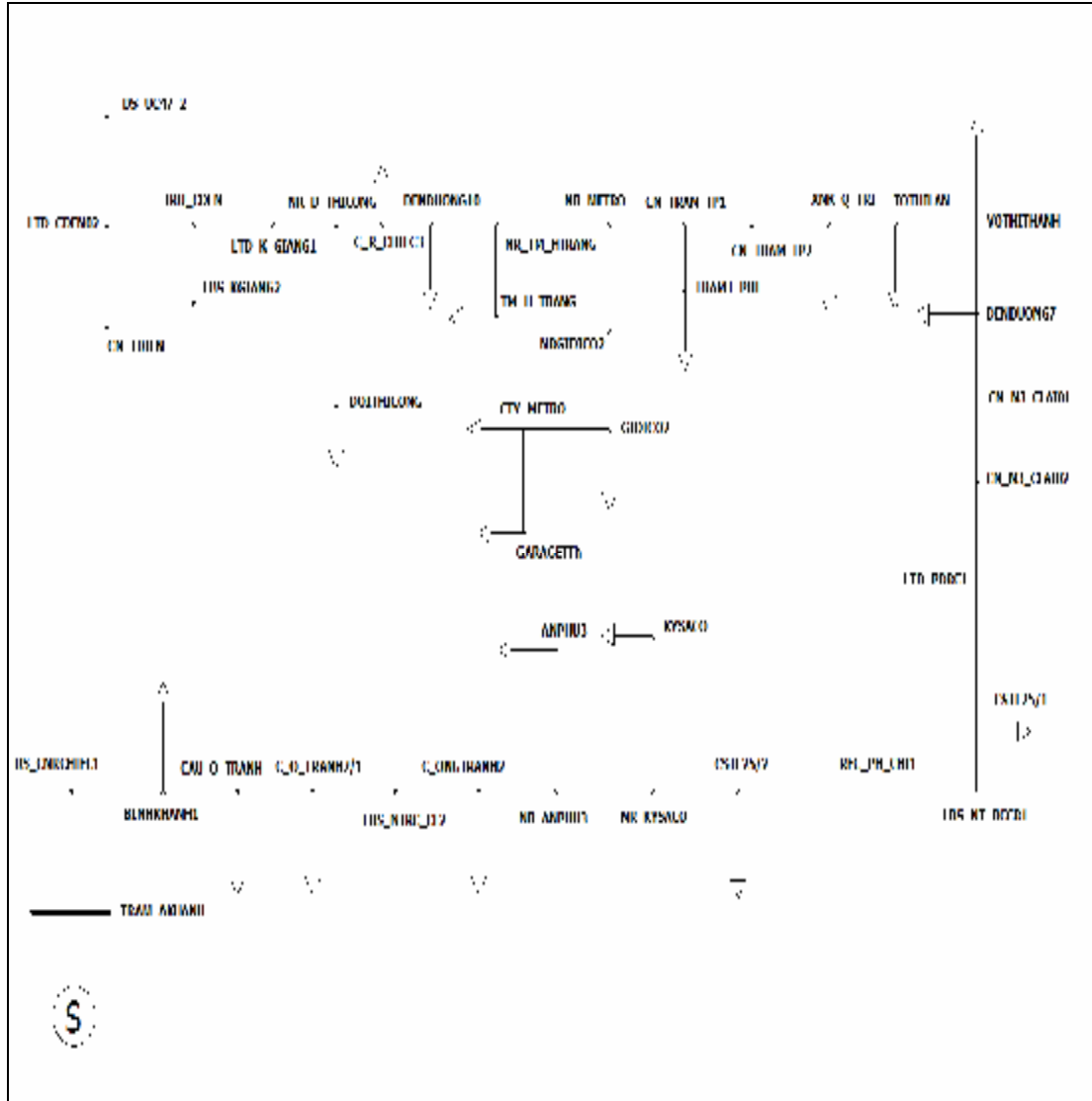
Tn nt	$V_{Pi}$ (V)	$\delta_i$ (rad)	$P_{Gi}$ (W)	$Q_{Gi}$ (W)
NODE1	8741.7600	0.06094900	1400553.0000	146909.700 0
<b>NODE7</b>	8683.5570	0.05079300	<b>349996.5000</b>	99741.6000
<b>NODE10</b>	8680.3380	0.05023700	<b>349971.3000</b>	99666.0000

**KẾT QUẢ:** Độ giảm tổn hao trên đường dây sau khi tính toán tối ưu lưới phân phối 10 nút là: 1379.7 W; Vị trí đặt DG tối ưu là tại NODE7 và NODE10 với công suất phát là 350 KW.

### 5.2. 42-bus system:

$$S_{cb} = 63000 \text{ KVA}$$

$$V_{cbRMS} = 8.7 \text{ KV}, V_{min} = 0.95 \text{ p.u}, V_{max} = 1.05 \text{ p.u}$$



**Hình 2.** Lưới phân phối 42 nút

**Bảng 2.** Kết quả tính toán tối ưu lưới phân phối 42 nút

Node Name	$V_{Pi}$ (V)	$\delta_i$ (rad)	$P_{Gi}$ (W)	$Q_{Gi}$ (W)
TRAM_AKHANH	8935.7700	0.05292600	1601082.0000	472185.0000
<b>CTY_METRO</b>	8697.2160	0.02558600	<b>799974.0000</b>	249996.6000

**KẾT QUẢ:**

- Độ giảm tổn hao trên đường dây sau khi tính toán tối ưu lưới phân phối 42 nút là: 14112 W.
- Vị trí đặt DG tối ưu là tại CTY\_METRO với công suất phát là 800 KW.

**6. KẾT LUẬN**

Sự tham gia của DG vào hệ thống phân bố sẽ đạt được một số lợi ích về mặt kỹ thuật như: giảm tổn hao đường dây, cải thiện chỉ số điện áp, nâng cao chất lượng điện năng, tăng độ tin cậy trong việc truyền tải và phân phối, v.v... .

Việc xác định dung lượng và vị trí của DG nhằm tối ưu tổn thất lưới phân phối là một bài toán tối ưu.

Chương trình tính toán bài toán tối ưu được thực hiện trong MATLAB và ứng dụng phần mềm PSS/ADEPT, khảo sát hai mô hình: lưới phân phối 10 nút và lưới phân phối 42 nút.

Kết quả tính toán cho thấy vị trí đặt DG tối ưu là tại nút có công suất tải tiêu thụ lớn nhất trong lưới phân phối. Độ giảm tổn hao trên lưới phân phối sau khi có DG so với trước khi có DG nhiều hay ít phụ thuộc vào lượng công suất phát ra của DG.

Các điều kiện ràng buộc của bài toán ngoài hàm phân bố công suất, giới hạn điện áp, giới hạn công suất phát của DG, ta có thể phát triển thêm tùy thuộc vào yêu cầu của bài toán đặt ra.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Roger C. Dugan & Thomas E. Mcdermott, *Distributed Generation*, IEEE Industry Applications Magazine, [www.iee.org/ias](http://www.iee.org/ias), Mar/Apr (2002).
- [2]. Per Lund, Olve Mogstad, Viktoria Neimane, Anngjerd Pleym and Olof Samuelsson, *Connection of distributed generation – effect on the power system (CODGUNet, WP 5)*, SINTEF Energy Research, Norway, Mars (2003).
- [3]. Pathomthat Chiradeja, Member, IEEE, and R. Ramakumar, Life Fellow, IEEE, *An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, December (2004).
- [4]. P. Chiradeja, Member, IEEE, *Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis*, IEEE, (2005).
- [5]. H. Iyer, Student Member, S. Ray, Student Member and R. Ramakumar, Life Fellow, IEEE, *Voltage Profile Improvement with Distributed Generation*, IEEE, (2005).
- [6]. Gianni Celli, Member, IEEE, Emilio Ghiani, Susanna Mocci, Member, IEEE, and Fabrizio Pilo, Member, IEEE, *A Multiobjective Evolutionary Algorithm for the Sizing and Siting of Distributed Generation*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 2, May (2005).
- [7]. Yu-Chi Wu, Student Member, Atif S. Debs, Senior Member (School of Electrical Engineering) and Roy E. Marsten (School of Industrial and Systems Engineering), *A Direct Nonlinear Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flows*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, May (1994).
- [8]. Qia Ding, Naihu Li and Xiaodong Wang, *Implementation of Interior Point Method Based Voltage/Reactive Power Optimization*, IEEE, (2000).
- [9]. Rabih A. Jabr, Alun H. Coonick, and Brian J. Cory, *A Primal-Dual Interior Point Method for Optimal Power Flow Dispatching*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, August (2002).
- [10]. Katia C. Almeida and Roberto Salgado, *Optimal Power Flow Solutions Under Variable Load Conditions*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 4, November (2000).
- [11]. Mokhtar S. Bazaraa, C. M. Shetty, *Nonlinear Programming Theory on Algorithms*, John Wiley & Sons, (1979).
- [12]. Hồ Văn Hiến, *Hệ thống điện – Truyền tải và Phân phối*, Nhà xuất bản đại học quốc gia, TP. HCM, (2003).

- [13]. John J. Grainger, *Power system analysis*, William D. Stevenson, McGaw-Hill, Inc. (1994).
- [14]. Caisheng Wang, Student Member, IEEE, and M. Hashem Nehrir, Senior Member, IEEE, *Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, November (2004).
- [15]. Yin Zhang, *User's Guide to Lpsol Linear-programming Interior Point Solvers v0.4 \**, Optimization Methods and Software, pp.385-396, Vol.11&12, (1999).
- [16]. S. Mehrotra, *On Finding a Vertex Solution Using Interior Point Methods*, Technical Report 89 – 22, Dept. of Industrial Engineering and Management Science, Northwest University, Evanston, IL (1990).
- [17]. Phan Quốc Khánh – Trần Huệ Nương, *Quy hoạch tuyến tính – GIÁO TRÌNH HOÀN CHỈNH: Lý thuyết cơ bản, Phương pháp đơn hình, Bài toán mạng, Thuật toán điểm trong*, Nhà xuất bản Giáo dục, 12/1999.
- [18]. Shaw® Shaw Power Technologies, Inc.™, *PSS/ADEPT 5.0 User's Guide*, 04/2004.
- [19]. Phan Văn Tùng, *Nghiên cứu phương pháp mô phỏng và giải tích mạch điện qua phần mềm PSS/ADEPT (Đề xuất mô hình áp dụng triển khai tại các công ty Điện lực)*, Luận văn Tốt Nghiệp Đại Học, Đại Học Bách Khoa TP. HCM, 01/2005.