

線形計画法을 利用한 無効電力設備 計劃

Reactive Power Planning Using Linear Programming

金正夫* · 朴永文**
(Jeong-Boo Kim · Young-Moon Park)

요 약

本 論文은 電力系統 定常狀態 運轉에서 母線電壓을 許容範圍內에서 維持하기 爲한 無効電力 設備 計劃 方法을 提示하는 데 있다. 本 論文의 演算에서는 問題를 母線電壓 補償을 爲한 無効電力設備計劃 모듈과 線形近似에서 생긴 誤差를 調整하기 爲한 潮流計算 모듈로 分割하였다. 各 경우 追加 실시한 無効電力 設備量을 최소로 하기 爲하여 變壓器 Tap, 發電機 電壓을 調整, 設備의 物理的 制限條件과 電力需給 條件을 고려하면서 線形計画法이 利用되었다. 提案된 알고리즘의 實用性을 確認하기 爲하여 模擬系統에 適用 그 結果를 提示하였다.

Abstract- This paper presents a method for planning reactive power compensation such as shunt capacitors and reactors so as to maintain bus voltage in acceptable range during steady state operation in power system. The algorithm in this paper decomposes the problem into reactive power planning module for the compensation of bus voltage and load flow module for adjusting the error resulted from the linear approximation. A planning technique is based on linear programming to minimize the amount of added reactive power compensation in each case. Transformer tap settings and generator voltages are adjusted to minimize the compensation. The constraints are the operation limits of the control variables and bus voltages. The result of one sample system is presented to confirm the practical use of the proposed algorithm.

1. 서 론

電力의 需要는 時間 및 季節에 따라 變하며 每年 높은 比率로 增加하는 추세에 있다. 이 需要에

*正 會 員 : 韓電技術研究院 責任研究員

**正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字: 1989年 3月 31日

1次修正: 1989年 6月 1日

2次修正: 1989年 8月 18日

3次修正: 1989年 9月 7日

따라서 電力會社는 價格이 싼 良質의 電力을 需用家들에게 供給하여야 한다. 良質의 電氣는 停電없이 一定電壓 및 周波數를 維持하여 電力을 需用家들에게 供給하는 것을 말한다. 周波數는 有效電力運用, 電壓은 無効電力運用과 關聯이 있다.

一定한 電壓을 유지하기 爲하여 定常時는 勿論 異常時 運轉狀態에서 母線電壓을 許容範圍內로 維持하기 爲하여 固定 또는 開閉가 가능한 조상설비를 설치한다. 이때 그 設備를 언제 어느 母線에

얼마만큼 설치하여야 되는 문제가 생긴다.

한편, 最近 電力系統의 現況을 보면 大都市의 負荷密度의 增加와 電源地間 거리가 멀어짐에 따라 送電 電壓은 점점 높아지고 地中送配電 線路가 보급되고 있다. 이러한 現象들은 自然히 線路의 充電容量을 [1, 2] 增加시켜 輕負荷時 母線電壓 또는 수용가의 電壓上昇을 일으키 機器의 壽命을 단축시키게 된다. 또한 夏節期에는 冷房負荷가 일시에 많이 걸리므로 電壓이 떨어져 系統의 安定度가 問題되는 경우도 있다.

이와 같이 無効電力設備 設置 運用의 目的은 系統의 電壓을 適正한 水準으로 維持시키기 위한 것이지만, 부차적으로 系統의 電壓을 一定 범위내에 유지시킴으로써 系統全體의 安定度를 유지시킬 수 있고 또한 送電損失을 줄이는 데에도 기여한다.

現在까지 研究動向을 보면 1971年 A. Kiskore [10]에 의해 感度分析에 의한 最適無効電力 決定에 關한 論文이 發表되었다. 또한 같은 해 Takahashi [11]에 의해 SUMT法을 利用 送電損失, 無効電力設置費와 狀態變數가 制限值를 벗어난 것에 대하여 Penalty function形態로 變換하여 추가한 것을 最小로 하는 論文이 발표되었다.

1973년에는 Sachdeva, Billington [8, 12]에 의해 非線形 計劃法을 利用한 無効電力源의 設置에 대한 論文이 發表되었다.

1978년에는 Happ [13]에 의해 線形計劃法을 利用 無効電力設備 容量을 決定하였다.

1981년에는 Hughes [14]에 의해 목적함수에 Penalty項을 추가한 非線形計劃法에 의한 無効電力計劃의 論文이 발표되었다.

本 調相設備量의 計劃은 地域別 長短期 需要豫測과 送電計劃이 確定된 경우 그러한 需給條件에 따라 母線電壓을 許容範圍內에 維持시키기 위한 最適調相設備量을 定하도록 하는 것이다.

無効電力設備計劃 以前에 최적계통 운영 [15, 16]이 先行되어야 한다.

그러나 여기에서는 有効電力은 初期潮流計算에서 最適運用이 된 것으로 보고 電壓 補償을 위한 無効電力設備의 運用 및 計劃을 考慮하였다. 母線電壓의 偏差를 發電機電壓, 無効電力設備量 및 變압기 탭 調整量의 線形組合으로 補償하는 것으로 近似하였다. 線形計劃法 [4, 7]으로 最適 調整量을 決定하여도 潮流計算을 하여보면 適 또는 不足보상되는 경우가 있어 이를 補償하기 爲하여 경험적으로 補償量에 加速係數를 곱하도록 한 것이 從末의 方法과 다른點이라 할 수 있다. 이때 目的函數는 線形으로 表示하기 爲하여 新·增設無効電力設

備量의 sum으로 나타내었다.

2. 調相設備 計劃

2.1 電力偏差方程式

定常狀態에서 一般의 N-Bus 電力系統의 電力偏差方程式을 $2(N-1)$ 元의 실수 聯立方程式으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_k = C_k - P_k + V_k \sum_a V_a [G_{ka} \cos(\theta_k - \theta_a) + B_{ka} \sin(\theta_k - \theta_a)] \quad (1)$$

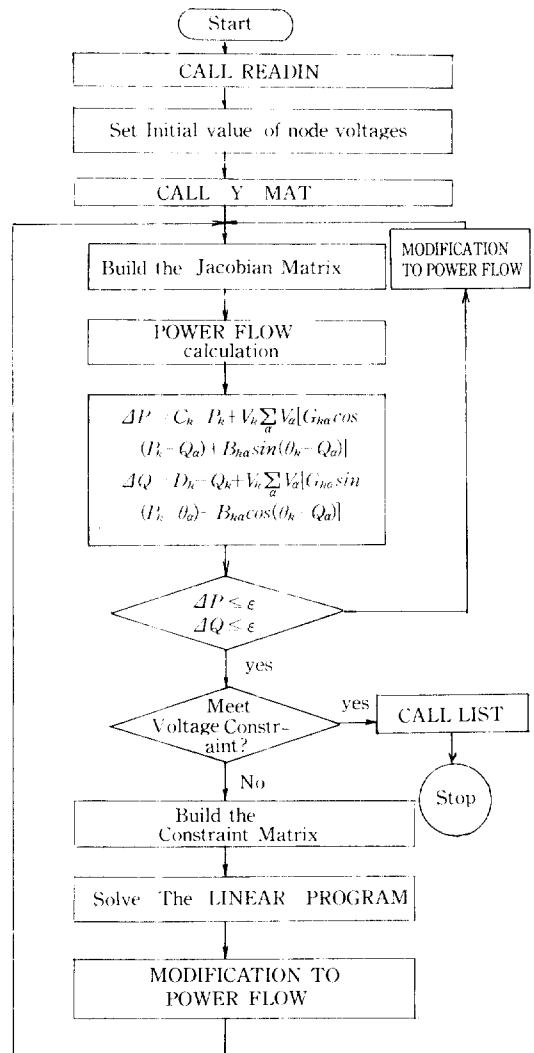


그림 1 最適 調相設備計劃의 順序
Fig. 1 Optimal Reactive Power planning Procedure

$$\Delta Q_k = D_k - Q_k + V_k \sum_{\alpha} V_{\alpha} [G_{k\alpha} \sin(\theta_k - \theta_{\alpha}) - B_{k\alpha} \cos(\theta_k - \theta_{\alpha})] \quad (2)$$

For $k=2 \cdots N$

여기서

P_k, Q_k : 각각 모선 k 에서의發電有效電力, 發電無効電力

C_k, D_k : 각각 모선 k 에서의消費有效電力, 消費無効電力

α : 母線 k 에 인접하는 母線(母線 k 자신도 包含)

V_k : 母線 k 에서 電壓의 크기

θ_k : 母線 k 에서 電壓의 位相角

$G_{k\alpha}, B_{k\alpha}$: 각각 母線 k 와 母線 α 사이의線路 콘덕턴스, 서셉턴스

電力潮流方程式은 非線形이기 때문에 이를 簡略計算으로 無効電力設備를 추가 電壓을 補償한다. 하더라도 조류계산을 하여 이를 確認補正하여야 한다.

電力潮流計算은 行列의 Sparsity技法을 導入, 三角分割法을 使用하여 電力變化에 따른 電壓크기와 位相角을 修正하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\Delta P, \Delta Q$: 각각 有效電力, 無効電力의 計劃値와 計算値의 偏差

H, L : Jacobian 行列

(3)으로부터 $\Delta \theta, \frac{\Delta V}{V}$ 를 구할 수 있으며 추정된 解는 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \bar{\theta} \\ \bar{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{V} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \bar{V} \end{bmatrix} \quad (4)$$

New old

2.2 調相設備 計劃 正式化

潮流計算을 하여 母線電壓이 上下限 範圍를 벗어나게 되면 既設 調相設備를 投入하거나 變壓器의 탭 또는 發電機의 電壓을 調整하여 母線電壓을 調整하고 그렇게 하여도 範圍를 벗어나게 되면 새로운 調相設備를 新·增設하여야 한다.

이 경우 최적선증설 조상설비의 용량 ΔQ^{ad} 는 모든 母線電壓이 그 許容 範圍내로 들어올 수 있는 最少容量으로 하된다.

따라서 制御變數로서 조상설비 모선의 無効電力, 非公稱 탭 및 發電機 모선전압 各各의 變數量: $\Delta Q, \Delta n, \frac{\Delta v'}{v'}$ 를 取하면 目的函數는 식(5)와 같이 表示할 수 있다.

$$F(\Delta Q, \Delta n, \frac{\Delta v'}{v'}) = \sum_{k=1}^n \Delta Q_k^{ad} + 0 \cdot \sum_{i=1}^t \Delta n_i + 0 \cdot \sum_{j=1}^G \frac{\Delta v_j'}{v_j'} \quad (5)$$

이 경우 制御條件은

$$\Delta Q_i \geq 0 \quad (6)$$

$$n_{\min} - n \leq \Delta n \leq n_{\max} - n \quad (7)$$

$$\frac{v'_{\min}}{v'} - 1 \leq \frac{\Delta v'}{v'} \leq \frac{v'_{\max}}{v'} - 1 \quad (8)$$

또 負荷母線의 電壓은 그 上下限 범위내에 들어와야 하므로 이를 制御變數의 函數로 表示하면 식(9)와 같이 表示할 수 있다.

$$\left[\frac{\Delta V}{V} \right] = [L]^{-1} \left\{ [\Delta Q] - [Tg][\Delta n] - [L'] \left[\frac{\Delta v'}{v'} \right] \right\} \quad (9)$$

여기서 n, t, G 는 各各 負荷母線數, 非公種 型 變壓器 數, 發電機 母線數를 表示한다.

또, $[L] = \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right]$: $[M \times M]$ 行列

$[L'] = \left[\frac{\partial Q}{\partial v'} \right]$: $[M \times G]$ 行列

$\left[\frac{v'}{\Delta v'} \right]$: 發電機 母線의 電壓變化量: $[G \times 1]$ 行列

$[Tg]$: 비공칭 탭 變化에 對하여 對應하는 母線의 感度行列로서 k, n 母線簡線路 i 의 k 측 母線側에 1:n의 비공칭 탭을 갖는 변압기가 設置되었을 경우 식(10)과 같이 表示된다.

$$\frac{\partial Q_k}{\partial n_i} = \frac{V_k V_m}{n_i} (G_{km} \sin \delta_{km} - B_{km} \cos \delta_{km}) + 2 V_k^2 B_{km} \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial n_i} = - \frac{V_k V_m}{n_i} (G_{km} \sin \delta_{km} + \cos \delta_{km})$$

따라서 식(9)의 $\left[\frac{\Delta V}{V} \right]$ 의 制御條件은 식(11)과 같이 表示된다.

$$\frac{V_{\min}}{V} - 1 \leq \frac{\Delta V}{V} \leq \frac{V_{\max}}{V} - 1 \quad (11)$$

또 발전기 모선의 無効電力變化量은 制御變數로 表示하면 식(12)와 같이 表示할 수 있고 그 制御

條件은 식(14)와 같이 表示된다.

$$\Delta Q' = \sum_{k=1}^M S_{ik} \Delta Q_k + \sum_{l=1}^L S_{il} \Delta n_l + \sum_{j=1}^6 S_{ij} \Delta v'_j / v_j \quad (12)$$

여기서

$$S_{ik} = \frac{\partial Q'_i}{\partial Q_k}, S_{il} = \frac{\partial Q'_i}{\partial n_l}, S_{ij} = \frac{\partial Q'_i}{\partial v_j / v_j} \quad (13)$$

- 단 i : 全發電機母線數
- k : 全負荷母線數
- l : 비공칭 탭 변압기수
- j : 全發電機母線數

$$Q'_{\min} - Q' \leq \Delta Q' \leq Q'_{\max} - Q' \quad (14)$$

따라서 本 問題는 식(6)~(8) 및 식(11), (14) 制約條件下에서 식(5)의 目的函數를 最小로 하는 問題로 歸着된다. 식(5)의 목적함수 및(6)~(14)의 제약조건은 모두 제어변수의 1次式이므로 線形 計劃法에 의하여 그 解를 求할 수 있다.

이때 實際 新增設容量 ΔQ^{ad} 는 식(15)에 의하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q + \Delta Q \leq Q_{\max}^{ex} \text{ 이면 } \Delta Q^{ad} &= 0 \\ Q + \Delta Q > Q_{\max}^{ex} \text{ 이면 } \Delta Q^{ad} &= Q + \Delta Q - Q_{\max}^{ex} \end{aligned} \quad (15)$$

각 母線의 k 年度 無効電力設備는 다음 式에 의해서 修正된다.

$$Q_i^k = Q_i^{k-1} + \alpha \Delta Q_i^{ad} \quad (16)$$

여기서 Q_{\max}^{ex} 는 既存設備의 最大值이다. α 는 $0 \leq \alpha \leq 1$ 의 범위 內에 있는 加速係數이다. 線形化했기 때문에 潮流計算의 結果와 一致시키기 위하여 必要하다. 위에서 선형계획의 Simplex Method 標準型[4, 18]은 식(17)과 같이 表示한다.

$$\begin{aligned} \text{목적함수 } Z &= [c][x] \\ \text{제약조건 } [A][X] &= [b] \\ [X] &\geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

식(17)의 制約條件式 右邊값이 陰인 경우 스택 베리어블의 초기값이 (-)로 되므로 인공변수를 도입해서 M 法(Big M method)을 適用한다.

식(9)의 싸코비안 행렬 $[L]$ 의 逆行列 計算은 三角因數法을 適用하면 쉽게 구할 수 있다. 이러한 行列은 스파스타 기법을 適用하기에 매우 便利하다. 其他의 싸코비안 行列은 쉽게 구할 수 있다.

3. 事例研究

模型計劃을 利用한 調相設備計劃 알고리즘

(Reactive Power planning algorithm)의 効用性을 考察하기 爲하여 다음과 같이 事例研究을 行하였다.

3.1 6—Bus系統

事例研究對象系統으로는 6—Bus系統을 擇하였으며 그 系統에 대한 資料는 表1과 같으며 그 研究 結果는 表2와 같다.

6母線 系統에 對한 負荷 및 線路의 資料는 表1과 같고 그 系統圖는 그림 2와 같으며 研究結果는 表2와 같다.

初期潮流計算에서 母線3, 5, 6의 電壓은 下限值에 未達되므로 이를 許容範圍內에 들게 하면서 그 量을 最小로 하는 電力用 Condenser量은 각각 母線 5, 6에 5.78MVar, 1.490MVar이다. 變壓器의 Tapchanger Setting과 發電機의 電壓은 表2와 같이 調整하면 된다.

표 1 6-Bus系統에 對한 資料(100MVA 基準)
Table 1 Data for the 6-Bus system(100MVA Base)

(a) 負荷資料(Load data)

母線番號	負 荷	
	P(p·u)	Q(p·u)
1	0.000	0.000
2	0.000	0.000
3	0.550	0.130
4	0.000	0.000
5	0.300	0.180
6	0.500	0.050

(b) 線路資料(Line data)

線路番號	母線番號		線路 Impedance		Tap setting
	始	終	R(p·u)	X(p·u)	
1	1	6	0.123	0.512	—
2	1	4	0.080	0.370	—
3	4	6	0.097	0.407	—
4	6	5	0.000	0.300	1.027
5	5	2	0.282	0.640	—
6	2	3	0.723	0.050	—
7	4	3	0.000	0.133	1.088

Ⅱ 2 6母線 系統에 對한 研究결과 要約(Ⅰ)

Table 2 Summary of results for the 6-bus system(Ⅰ)

變數	制限值		初期狀態時	補償狀態時	必要調相設備量 Static Con(MVAr)
	下限	上限			
P_1 (MW)	10	100	95.648	94.369	
P_2 (MW)	10	100	50.000	50.000	
Q_1 (MVAR)	-20	100	35.636	34.829	
Q_2 (n)	-20	100	33.832	24.912	
n_3	0.9	1.1	1.088	0.991	
n_5	0.9	1.1	1.027	1.000	
V_1 (P.u)	1.00	1.10	1.080	1.080	
V_2 (n)	1.00	1.15	1.130	1.150	
V_3 (n)	0.98	1.05	0.901	0.980	
V_4 (n)	0.98	1.05	0.989	0.986	
V_5 (n)	0.98	1.05	0.937	0.980	5.784
V_6 (n)	0.98	1.05	0.971	0.980	1.490
System losses (MW)			10.648	9.369	

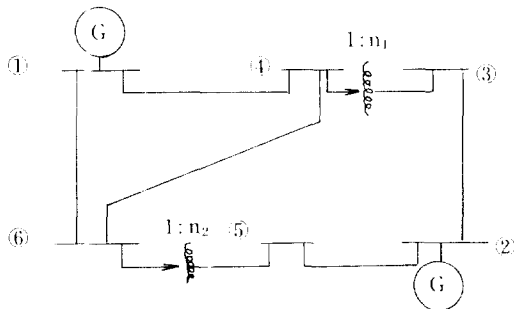


그림 2 6母線 系統
Fig. 2 The 6-bus network

非線形問題[11]로取扱하여 計算時間이 많이 所要 되었다. 한편 感度係數를 線形으로 풀 論文[10]도 있으나 1回, 計算으로 解를 求하였으므로 不足 또는 過補償되는 경우가 있으므로 이를 補完하기 爲하여 선형계획법에서 無効電力의 補償量에 經驗의 으로 加速係數를 곱하여 最適解를 求하도록 한 것이 이 論文의 特征이다.

(2) 在來式 調相設備는 連續의 으로 그 量을 調整할 수 없으므로 整數프로그램[9]을 利用 Unit數로 그 設備容量을 決定하고 異常時에도 系統電壓을 維持할 수 있게끔 그 設備量을 計劃하는 것이 앞으로 研究할 課題이다.

4. 結 論

(1) 電力系統의 年度別 最大負荷 또는 輕負荷時 定常運轉에서 許容範圍를 벗어난 母線의 電壓을 補償하기 爲한 無効電力設備를 決定하기 爲하여 線形關係式을 導出하고 線形計劃法과 電力潮流를 反復計算하여 그 設備容量을 最適으로 定하였다. IEEE 6 Bus, 30 Bus 系統에 適用, IBM, PC/AT를 利用하여 實用性을 立證하였다.

從前의 方法은 系統損失을 目的函數로 한

참 고 문 헌

[1] E.R. Taylor Jr. "Method Determining Shunt Reactor," Westinghouse Corporation, pp. 2.
 [2] R.P. Schulte, "Problem Associated with the Operation of EHV Transmission," IEEE Trans. Power App. Syst. vol. Pas-100, pp. 1378-1397, March 1981.
 [3] W.F. Tinney, "Notes on Newton-Raphson Method for Solution of AC Power Flow Problem," BPA April 1971, pp. 5-32.

- [4] F.S. Hiller Operational Research, "Linear Programming," Holden-Day Inc. pp. 17-72.
- [5] Scott, B., Alsac, O., "Fast Decoupled Load Flow," IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-93, pp. 859-869, May/June 1974.
- [6] H.H. Happ, "Large Scale Reactive Power Planning," IEEE 82 SM 376-2, pp. 141-145.
- [7] 宋吉永 "電力系統工學" 東明社 pp. 182-238.
- [8] Y.M. Park, K.Y. Lee, "Optimal Real and Reactive Power Dispatch," Electric Power System Research, 201-212, 7.(1984).
- [9] James L. Kuester & Jne H. Mize, "Integer Programming," Optimization Techniques with Fortran, McGraw-Hill, (1973).
- [10] A. Kishore, E.F. Hill, "Static optimization of Reactive power Sources by use of Sensitivity Parameters," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90, pp. 1166-1173, 1971.
- [11] K. Takahashi, "Optimal Allocation of Reactive Power in Electric Power Systems," CRIEPI Report no. 70115, 1971.
- [12] S.S. Sachdeva, R. Billinton, "Optimal Network Var Planning By Nonlinear Programming," IEEE PAS-92, pp. 1217-1225, 1973.
- [13] H.H. Happ, K.A. Wirgau, "Static and Dynamic Var Compensation in System Planning," IEEE Transactions on Power apparatus and Systems, vol PAS-97, no. 5, pp. 1564-1578, 1978.
- [14] A. Hughls, R.F. Shoults, "Optimal Reactive Power planning," IEEE Transactions on PAS vol PAS-100, no. 5, pp. 2189-2196, 1981.
- [15] H.W. Dommel, W.F. Tinney, "Optimal power Flow Solutions," IEEE Transactions on PAS vol PAS-89, no. 10, pp. 1866-1876, 1968.
- [16] Y.M. Park, K.Y. Lee, "An Optimization Technique for Reactive Power Planning of Sub-transmission Network under Normal Operation," IEEE Transactions on PAS vol. PWRS-1, no. 2, pp. 153-159, 1986.
- [17] M. Bazaraa, J.J. Jarvis, "Linear Programming and Network Flows," John Wiley & Sone, 1977, pp. 188-234.