

## 電力系統에 있어서 電壓・無効電力의 最適制御

劉 錫 九

電氣工學科

### 〈要 約〉

本 論文은 大規模電力系統에서 系統電壓을 規定値內로 維持시키는 同時에, 送電線路에서 發生하는 電力損失最小化를 目標로 하는 電壓 및 無効電力의 最適제에 관한 on-line 制御方式의 開發에 重點을 두었다.

從來에는 電壓 및 無効電力의 瞬時制御에 있어서 먼저 電壓偏差를 最小化하고, 그 다음 電壓을 許容變動範圍內로 維持시키면서 送電損失을 最小化하였으므로 計算過程이 複雜하고 所要計算時間이 길었으나, 送電損失減少는 電壓偏差(母線間) 減少를 隨伴함으로, 本 論文에서는 目的函數로 送電損失 最小化만을 擇하고 最小化 過程에서 系統電壓을 check 한 後, 萬一 系統電壓中에서 規定値를 벗어난 것이 發生하던 벗어난 程度에 따라 調整設備의 操作量을 간단히 再調整하여, 모든 電壓이 規定値內에 들도록 하였다.

한편 感度行列을 基礎로 定式화된 最適制御問題를 풀이함에 있어서 損失方程式이 恒常 正의 값을 가지며 또한 凹函數이므로, 그의 極値는 最小값이 되겠으나, 電壓 및 調整設備의 制限條件을 滿足시키는 것이어야 함으로, 本 論文에서는 가장 簡單하고 收束이 빠른 gradient法을 利用하여 反復計算으로 解를 얻었다.

本 論文에서 提示한 algorithm을 Model 系統과 韓電系統(京仁地區)에 適用해 본 結果, 大規模 電力系統에 本 方式을 使用함으로써, on-line 制御의 實現을 充分히 期待할 수 있다는 것을 確認하였다.

---

## Optimum Control of Voltage and Reactive Power in Power System

Seok Ku You

Dept. of Electrical Eng.

### 〈Abstract〉

As the development of large integrated power system led to the transmission of large blocks of power over longer distance, it has become necessary to pay attention not only to the voltage control problem but to a rational system operation scheme which also minimizes transmission losses.

In the past, because the optimizing method considered as the first step the minimization of node voltage deviations and as the second step the minimization of transmission losses within the system, the calculating procedure was more complex and difficult to handle.

This paper presents a new optimizing computational algorithm for the on-line control of system voltage and reactive power flow which aims at minimizing power transmission losses.

The power transmission losses are minimized by a gradient method while satisfying the constrained system voltage conditions, and sensitivity parameters are the basis of the method. The practicability of the present approach is proven by the numerical example for the Ward-Hale system and KEKO power system (Kyong In area).

## I. 序 論

最近 電力需要의 急增으로 電力系統이 날로 擴大되고 있으며, 더욱이 原子力發電機를 爲始해서 火力發電機가 大型化되고 또한 送電電壓이 超高壓으로 拔돋음함으로서, 長距離 大電力 傳送이 不可避한 實情이다.

이러한 與件下에서 需用家의 電壓을 規定值內로 維持하고, 送電線路에서 發生하는 電力損失減少는 必然的으로 擡頭되는 重要한 問題이며, 高度의 技術을 要求하고 있다.

電力系統에 있어서 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御目的은 需用家가 要求하는 電壓 service quality를 適切히 維持시키고 아울러 電力損失을 最小化하는 것으로 이를 具體的으로 列擧하면

(1) 系統電壓을 許容變動範圍內로 維持시키므로서 需用家에 對한 service를 向上시키고 特히 모든 電氣機器가 正常的인 機能을 發揮하게끔 하고

(2) 系統內의 機器의 絶緣 level을 超過하지 않게끔 過大한 電壓上昇을 防止하며

(3) 送電線에 흐르는 無効電力을 調整하여 送電損失을 減少하고, 送電設備의 利用率을 向上시키고 아울러

(4) 無効電力源의 協助를 圖謀하여 各 調整設備의 運用合理化를 이룩하는 것이라 하겠다.

1979年 7月 우리나라에서도 電力系統運用의 一環으로 自動給電시스템(LN5400AGC/SCADA SYSTEM)을 稼動함으로써 電力系統制御의 새로운 章을 열었으며 現在 自動給電시스템으로 實施하고 있는 것은 自動周波數制御(Automatic Frequency Control)와 經濟負荷配分(Economic Load Dispatching)으로 이에 對한 理論的 研究은 거의 完成되어 適用實施하고 있다고 하겠다.

自動給電 시스템에서 AFC, ELD의 問題가 解決된 다음에는 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御가 自動化되어야 하며 이에 對한 研究가 要望되고 있다.

AFC 및 ELD는 全系統內에서 有効電力의 需給 balance를 考慮한 것임에 反하여, 電壓 및 無効電力制御는 無効電力의 需給 balance를 考慮하는 것이고, 또한 電壓과 無効電力 사이에는 周波數와 有効電力 사이처럼 密接한 關係가 存在하지만, 周波數

變化는 全系統에 걸쳐 거의 一定한데 比하여 電壓 및 無効電力의 變化는 系統構成에 따라 많이 左右되며 局部的이라 하겠다.

뿐만 아니라 電壓 및 無効電力潮流의 調整設備는 並列컨덴서(Sh.C), 並列리액터(Sh.R), 負荷時電壓調整器(LRC), 同期調相機, 發電機 等 種類가 많고 各設備의 操作量에는 制限條件이 따르며, 全系統에 散在되어 있으면서, 設備操作에 따른 影響이 各 地點에 따라 다르므로, 電壓 및 無効電力制御는 自動化함에 있어 AFC나 ELD에 比하여 매우 어려운 問題이다.

電壓 및 無効電力潮流의 制御에 있어서 萬一 系統이 작고, 母線間의 임피던스가 클 경우에는 局部的인 制御가 可能하겠으나, 系統의 大規模化로 送電線의 回線이 增大하고 loop 系統이 增加되면 母線間의 임피던스가 작게 되므로, 自然히 制御範圍가 擴大되어, 局部的인 制御가 困難하게 되므로, 오늘날 電壓 및 無効電力潮流에 對한 制御는 全系統의 電壓 및 無効電力潮流狀況과 調整設備의 動作狀況 등을 考慮한 一貫性 있는 制御를 實施하지 않으면 所期의 目的을 達成할 수 없게 된다.

특히 大規模 電力系統에서는 電力設備의 投資費가 莫大함으로, 單純히 電壓調整에 對해서만 考慮할 수 없고, 系統內 無効電力源의 balance를 이룬 協助運轉에 의해서 系統運轉費의 最小化까지 包含시킨 所謂 合理的인 系統運用의 實現을 目標로 進行해 나가야 할 것이다.

위와 같은 與件을 斯案하여 本論文에서는 感度行列에 의한 系統特性定數의 計算方式에 對하여 상세히 記述하고, 感度行列을 基礎로한 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御 理論을 說明하였으며, 大規模 電力系統에서의 on-line 制御에 應用할 수 있는 algorithm 開發에 重點을 두고 論하였다.

끝으로 本方式의 試算例로서 Ward-Hale 系統과 KECO 系統(京仁地區)에 對하여 考察하였다.

## II. 電壓 및 無効潮流에 관한 系統性定數의 決定法

### 1. 系統特性定數의 定義

電壓 및 無効電力潮流의 制御에 있어서 系統特性定數라 함은 發電機無効電力, 調相設備(Sh.C, Sh.R, LRC)의 操作과 그것에 의한 系統內의 母線電壓 및

送電線에 흐르는 無効電壓潮流의 變化와의 關係를 定量的으로 把握 表示한 定數를 말한다. 이것은 電壓 및 無効電力潮流의 綜合自動制御에 必要할 뿐만 아니라 調整設備의 運用計劃과 設備計劃에 利用할 수 있다.

2. 系統特性定數의 算定方法

系統特性定數의 算定方法을 大別하면

- (1) 實系統에서 實測에 의한 方法
- (2) 交流計算盤에 의하여 計算하는 方法
- (3) 計數型 電子計算機에 의하여 計算하는 方法으로 나눌 수 있다.

上記 各 方法의 特徵을 比較하여 記述하면, 實測에 의한 方法은 實際의 系統에 대하여 測定하는 것이므로 가장 正確한 定數를 얻을 수 있는 可能性이 있으나, 營業運轉系統에서 試驗을 해야 함으로 試驗內容에 限界가 있고, 또 試驗用 通信回線의 設定, 測定人員의 動員 등 어려운 問題가 따르며, 測定結果는 平常時의 電壓變動, 無効電壓變動의 影響을 받아 一定值를 얻을 수 없다. 따라서 몇번씩 同一試驗을 반복하여 統計的인 定數를 求하지 않으면 안되는 難點이 있다.

交流計算盤에 의한 方法은 系統自體를 模擬한 것이므로, 實系統의 物理的 image를 確實이 把握할 수 있고, 系統操作의 實感을 느낄 수 있는 反面 系統의 設定, 潮流調整 및 測定 등에 상당한 人力과 時間을 要하며, 計算精度도 만드지 좋다고는 할 수 없으며, 系統의 規模가 클수록 難點은 더욱 增大된다.

計數型 電子計算機에 의한 方法은 計算 program이 完成되어 있으면, 약간의 入力 data 作成外에는 努力이 必要치 않으며, 더욱이 計算機制御實施에 있어서도 on-line에서의 計算이 可能하고, 系統模擬가 忠實하면 系統의 潮流狀態와 一致하는 定數를 求할 수 있다.

3. 電力潮流方程式에 관한 感度行列

電壓 및 無効電力潮流의 制御에 있어서 基礎 data인 系統特定定數를 電力方程式에 관한 感度行列에 의해서 求하는 方法과 計算式에 대하여 記述한다.

$N$ 母線 電力系統의 電力潮流는 一般的으로  $N$ 元의 複素連立方程式

$$P_k + jQ_k = C_k + jD_k + \dot{E}_k \sum_{\alpha}^N (\dot{Y}_{k\alpha})^* \quad (2.1)$$

$$k=1, 2, \dots, N$$

으로 表示된다. 여기서

- $P_k$ : 母線  $k$ 에서의 發電有効電力
- $Q_k$ : 母線  $k$ 에서의 發電無効電力
- $C_k, D_k$ : 母線  $k$ 에서의 消費有効電力 및 無効電力
- $\alpha$ : 母線  $k$ 에 인접하는 母線(母線  $k$  自體도 포함)

- $\dot{E}_k$ : 母線  $k$ 의 複素電壓
- $\dot{Y}_{k\alpha}$ : 母線  $k$ 와 母線  $\alpha$ 의 相互 admittance( $\alpha \neq k$ ).
- $\dot{Y}_{kk}$ : 母線  $k$ 의 自己 admittance

\* : 共軛量

지금 母線  $k$ 의 複素電壓을

$$\dot{E}_k = E_k (\cos \theta_k + j \sin \theta_k) \quad (2.2)$$

複素 admittance를

$$\dot{Y}_{k\alpha} = G_{k\alpha} + jB_{k\alpha} \quad (2.3)$$

라 하고 式 (2.2), (2.3)을 式 (2.1)에 代入하여 實數部와 虛數部(有効電力分과 無効電力分)로 나누면  $2N$ 個의 方程式

$$g_{2k-1} = C_k - P_k + E_k \sum_{\alpha} E_{\alpha} \{G_{k\alpha} \cos(\theta_k - \theta_{\alpha}) + B_{k\alpha} \sin(\theta_k - \theta_{\alpha})\} = 0 \quad (2.4)$$

$$g_{2k} = D_k - Q_k + E_k \sum_{\alpha} \{G_{k\alpha} \sin(\theta_k - \theta_{\alpha}) - B_{k\alpha} \cos(\theta_k - \theta_{\alpha})\} \quad (2.5)$$

이 成立한다.

式 (2.4)(2.5)는 發電 및 消費有効·無効電力, 電壓크기, 位相角, 콘덕턴스, 서셉턴스를 變數로 하는  $2N$ 元의 實數 連立方程式이다.

이 變數를 電壓 및 無効電力潮流의 制御問題에서 母線의 種類와 調整設備의 運轉條件에 따라 定해지는 3個의 vector로 分類된다.

- 即 (i) 從屬變數 vector  $X$  ( $2N-1$  次元 vector)
- (ii) 操作變數 vector  $U$  ( $M$  次元列 vector)
- (iii) parameter vector (列 vector)

式 (2.4), (2.5)를 3個의 vector로 表示하면

$$G(X, U, P) = 0 \quad (2.6)$$

로 되는 ( $2N-1$ ) 次元의 vector 方程式으로 表示할 수 있다.

여기서

$$G \equiv \text{Col}[g_1, g_2, \dots, g_{2k-1}, g_{2k}, \dots, g_{2n-1}] \quad (2.7)$$

라 한다. 단 Col은 列 vector를 意味한다.

지금  $N$ 母線의 電力系統이 基準狀態( $X_0, U_0, P$ )에서 運用되고 있다면

$$G(X_0, U_0, P) = 0 \quad (2.8)$$

이 成立한다.

여기서 調整設備를 操作하여 操作變數 vector가  $U_0$ 에서 微小量 變化해서  $U_0 + \Delta U$ 로 되고 從屬變數 vector  $X$ 도  $X_0$ 에서  $X_0 + \Delta X$ 로 變化하였다고 하면

$$G(X_0 + \Delta X, U_0 + \Delta U, P) = 0 \quad (2.9)$$

의 關係가 成立한다.

式 (2.9)를 初期狀態 ( $X_0, U_0, P$ )를 中心으로 Taylor 級數로 展開하고 또  $\Delta X$  및  $\Delta U$ 에 관한 2次 以上の 項을 無視하면

$$G(X_0, U_0, P) + G_X(X_0, U_0, P)\Delta X + G_U(X_0, U_0, P)\Delta U = 0 \quad (2.10)$$

가 얻어진다.

여기서  $G_X, G_U$ 는 Vector 函數  $G$ 의  $X$  및  $U$ 에 관한 Jacobian 行列로서 各 要素는

$$[G_X]_{ij} = \partial g_i / \partial x_j \quad (i=1, 2, \dots, 2N-1, j=1, 2, \dots, 2N-1) \quad (2.11)$$

$$[G_U]_{ij} = \partial g_i / \partial u_j \quad (i=1, 2, \dots, 2N-1, j=1, 2, \dots, M) \quad (2.12)$$

이다.

式 (2.10)의 第1項은 零이므로

$$\Delta X = -G_X^{-1} \cdot G_U \cdot \Delta U \quad (2.13)$$

$$\text{여기서 } S = -G_X^{-1} \cdot G_U \quad (2.14)$$

라 하면  $\Delta X = S \cdot \Delta U$  (2.15)의 形式으로 表示된다.

式 (2.15)의 係數行列  $S\{(2N-1) \times M\}$ 次를 電力潮流의 操作變數 vector  $U$ 에 관한 感度行列(sensitivity matrix)라 하며, 이들의 各 要素가 곧 電壓 및 無効電力制御에 있어서의 系統特性定數에 對應하는 것이다. 그러나 LRC의 電압, 또 制御從屬變數로서의 線路無効電力潮流는 式 (2.4), (2.5)에 陽으로 包含되고 있지 않으므로, 이들 變數에 대한 系統特性定數는 感度行列  $S$ 의 要素로서는 주어지지 않는다.

LRC의 電압을 操作變數로 할 경우에는 等價回路를 使用하면 LRC의 變壓比가 나타나는 母線의 自己 admittance와 LRC를 가지는 線路로 連結되는 母線間의 相互 admittance는 各各 電壓의 函數로 表示되는 것을 利用하여 計算할 수 있다.

#### 4. 無効電力潮流에 관한 感度定數의 計算法

앞에서 說明한 바와 같이 無効電力潮流制御에 있어서 無効電力潮流에 대한 感度는 式 (2.4), (2.5)에 陽으로 包含되어 있지 않으므로, 式 (2.14)의 感

度行列에서는 直接求할 수가 없으나, 母線電壓 및 位相角에 대한 感度定數를 利用함으로써 쉽게 求할 수 있다.

지금 母線  $k$ 로부터 母線  $m$ 에 흐르는 線路電力潮流를  $P_{km} + jQ_{km}$ 이라고 하면

$$P_{km} + jQ_{km} = \dot{E}_k(\dot{E}_k - \dot{E}_m)^* (-\dot{Y}_{km})^* \quad (2.16)$$

로 表示된다.

지금 無効電力潮流  $Q_{km}$ 에만 着眼한다면 式으로부터

$$Q_{km} = E_k \{ B_{km} [ E_k - E_m \cos(\theta_k - \theta_m) ] + G_{km} E_m \sin(\theta_k - \theta_m) \} \quad (2.17)$$

을 얻는다.

式 (2.17)의 右邊의  $E_k, E_m, \theta_k, \theta_m$ 가 各各  $\Delta$ 를 붙인만큼 變化했을 때 左邊의  $Q_{km}$ 의 變化分을  $\Delta Q_{km}$ 이라 하면

$$\begin{aligned} \Delta Q_{km} = & \Delta E_k \{ B_{km} [ E_k - E_m \cos(\theta_k - \theta_m) ] \\ & + G_{km} E_m \sin(\theta_k - \theta_m) \} \\ & + E_k \{ B_{km} [ \Delta E_k - \Delta E_m \cos(\theta_k - \theta_m) ] \\ & + G_{km} \Delta E_m \sin(\theta_k - \theta_m) \} \\ & + E_k \{ B_{km} E_m \sin(\theta_k - \theta_m) \times (\Delta \theta_k - \Delta \theta_m) \\ & + G_{km} E_m \cos(\theta_k - \theta_m) (\Delta \theta_k - \Delta \theta_m) \} \end{aligned} \quad (2.18)$$

여기서 系統內의 어떤 操作變數를 單位量 操作했을 때  $E_k, E_m, \theta_k, \theta_m$ 의 變化分은 感度行列  $S$ 의 要素로 求해져 있으므로 式 (2.18)의  $\Delta Q_{km}$ , 即 線路無効電力潮流에 관한 感度定數가 곧 計算된다.

만일 線路  $k-m$  사이에 LRC가 包含될 때에는 式 (2.16) 代身에

$$P_{km} + jQ_{km} = \dot{Y}_k (n\dot{E}_k - \dot{E}_m)^* (-\dot{E}_{km})^* \quad (\text{電壓 } n \text{이 母線 } k \text{에 나타날 때})$$

$$P_{km} + jQ_{km} = \dot{E}_k \left( \frac{1}{n} \dot{E}_k - \dot{E}_m \right)^* (-\dot{Y}_{km})^* \quad (\text{電壓 } n \text{이 母線 } m \text{에 나타날 때})$$

를 使用함으로써 式 (3.18)과 같은 關係式을 얻을 수 있다.

但, 위의  $\dot{Y}_{km}$ 은 電壓  $n$ 의 函數이다.

以上과 같이 感度行列에 의해서 系統特性定數를 求하는 計算法은 平常時의 電力潮流에 관한 母線方程式을 여러가지 運用狀態를 中心으로 攝動시켜서 求하고 있기 때문에 다음과 같은 見점을 가지고 있다.

- (i) 系統의 潮流狀態(例를 들면 輕負荷時, 重負荷時의 相異)에 一致한 系統特性定數를 얻을 수 있다
- (ii) 從來와 같이 系統에 대해서 特別한 假定을

들 必要가 없으며 또 數值計算上의 誤差 以外는 理論上의 誤差가 極히 적다.

(iii) 系統의 幾何學的 構成 뿐만 아니라 系統의 運轉條件(AVR, AQR 運轉 等)이라든가 運用狀態(發電電力 및 負荷分布의 相異)를 반영한 data가 計算된다.

### III. 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御

#### 1. 最適制御方程式

電力系統에 있어서 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御는 各 地點의 調相設備, 發電機의 無効電力發生 및 變壓器 電 壓을 許容範圍 內에서 適切히 調節하여, 系統內에서 指定된 母線의 電壓을 規定值 內로 維持하는 同時에 送電損失 最小化 또는 調整設備의 操作量 最小化 等の 效果를 期待한다.

지금 電壓 및 無効電力潮流와 調整設備의 操作量과의 關係가 線形性이라 假定하면

$$E_i = E_{0i} + \sum_{j1=1}^{m1} a_{ij1} \cdot x_{j1} + \sum_{j2=1}^{m2} b_{ij2} \cdot y_{j2} + \sum_{j3=1}^{m3} c_{ij3} \cdot z_{j3} \quad (3.1)$$

$$Q_k = Q_{0k} + \sum_{j1=1}^{m1} d_{kj1} \cdot x_{j1} + \sum_{j2=1}^{m2} e_{kj2} \cdot y_{j2} + \sum_{j3=1}^{m3} f_{kj3} \cdot z_{j3} \quad (3.2)$$

여기서

$E_i$ : 調整設備의 操作에 의한  $i$ 地點의 制御後 電壓

$E_{0i}$ :  $i$ 地點에 있어서의 制御前 電壓

$Q_k$ : 調整設備의 操作에 의한  $k$ 線路의 制御後 無効電力潮流

$Q_{0k}$ :  $k$ 線路에 있어서의 制御前 無効電力潮流

$x_{j1}$ :  $j1$ 地點의 負荷時 電壓調整器의 電 壓操作量

$y_{j2}$ :  $j2$ 地點의 靜止形 調相設備의 操作量

$z_{j3}$ :  $j3$ 地點의 發電機 無効電力 操作量

$a_{ij1} \sim c_{ij3}$ :  $i$ 地點에 대한 電壓感度定數

$d_{kj1} \sim f_{kj3}$ :  $k$ 線路에 대한 無効電力潮流感度定數

지금 合理的인 系統運用 立場에서 系統의 無効電力 潮流制御에 의한 送電損失 最小化를 目的函數로 採擇한다.

$$\begin{aligned} \text{Min Losses} &= \text{Min} \sum_{k=1}^l r_k \cdot I_k^2 \\ &= \text{Min} \sum_{k=1}^l r_k \cdot \frac{P_k^2 + Q_k^2}{E_k^2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

여기서

$l$ : 無効電力潮流의 監視線路數

$r_k, P_k$ :  $k$ 線路의 抵抗 및 有功電力潮流

電壓 및 無効電力潮流의 制御問題에서 有功電力潮流는 調整設備의 操作에 의한 影響이 적어 一定하다 하고, 各 母線電壓을  $E_i = 1.0 p.u$ 로 看做하면 式(3.3)은

$$\begin{aligned} \text{Min Loss} &= \text{Min} \sum_{k=1}^l r_k \cdot Q_k^2 \\ &= \text{Min} \sum_{k=1}^l r_k \cdot \left( Q_{0k} + \sum_{j1=1}^{m1} d_{kj1} \cdot x_{j1} + \sum_{j2=1}^{m2} e_{kj2} \cdot y_{j2} + \sum_{j3=1}^{m3} f_{kj3} \cdot z_{j3} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

으로 나타낼 수 있다.

한편 LRC의 電 壓, 調相設備 및 發電機에 의한 無効電力의 調整에는 設備上 各各 上下限의 制限條件이 있다. 即

$$\left. \begin{aligned} x_{j1} &\leq x_{0j1} + x_{j1} \leq \bar{x}_{j1} \\ y_{j2} &\leq y_{0j2} + y_{j2} \leq \bar{y}_{j2} \\ z_{j3} &\leq z_{0j3} + z_{j3} \leq \bar{z}_{j3} \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

단 여기서  $x_{0j1}, y_{0j2}, z_{0j3}$ 는 制御前의 값, 곧 初期 값이며 制御가 實施될 次마다 再設定되는 것이다.

또한 系統內에서 指定된 地點의 電壓制限條件에서

$$E_i \leq E_i \leq \bar{E}_i \quad (3.6)$$

따라서 調整設備의 操作에 따른 送電損失 最小化를 위한 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御는 式(3.5), (3.6)의 制限條件下에서 式(3.4)의 目的函數를 最小로 하는 調整設備의 操作量을 求하는 問題로 要約된다.

여기서 式(3.5)을 一般的으로 다루기 위하여 諸變數 및 諸定數를 다음과 같이 表示한다.

操作變數:  $x, y, z \rightarrow X$

感度定數:  $a, b, c \rightarrow a$

感度定數:  $d, e, f \rightarrow b$

이 結果 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御方程式은 다음과 같이 一般形으로 表示된다.

$$\begin{aligned} \text{Min Loss} &= \text{Min} P_L(X) \\ &= \text{Min} \sum_{k=1}^l r_k \left( Q_{0k} + \sum_{j=1}^m b_{kj} \cdot X_j \right)^2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$X_j \leq X_{0j} + X_j \leq \bar{X}_j \quad (3.8)$$

$$E_i \leq E_{0i} + \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot X_j \leq \bar{E}_i \quad (3.9)$$

式(3.7)에서 알 수 있는 바와 같이 이 問題는 目的函數가 2次式으로 quadratic programming 범주에 屬하는 것으로, 解로서는 各調整設備의 單位操作量

에 관한 整數解를 必要로 하고 있으므로 非線形 整數化計劃(non-linear integer programming) 問題라 볼 수 있으며, 더우기 瞬時制御에서는 on-line 處理가 要請되고 있어 신속한 解法이 무엇보다도 切實히 要求되고 있다.

## 2. 最適解法

前節에서 보인바와 같이 定式化된 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御 問題를 풀이함에 있어서 從來에는 式 (3.9)의 制限條件을 滿足시키기 爲하여 電壓偏差에 관한 評價函數  $E$ 를 導入하여

$$E = \sum_{i=1}^N (E_{di} + \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot X_j)^2 \longrightarrow \text{最小化}$$

但  $X_j \leq X_{j0} + X_j \leq \bar{X}_j$

$E_{di}$ :  $i$  地點의 制御前 電壓偏差

를 實施하여 電壓을 許容範圍內에 끌어넣고, 그 다음에 電壓을 許容變動範圍內에 維持시키면서, 送電損失에 관한 評價函數  $P_L(X)$ 의 最小化를 求하거나, 目的函數로 電壓制御 및 送電損失 最小化를 導入하여 兩者를 협조시키 計算하였으므로, 所要計算時間 길어지고 weight 係數의 選定法이 問題로 남았었다. 그러나 系統內에 散在되어 있는 發電機母線의 電壓은 AVR 運轉으로 恒常 規定值內로 維持시킬 수 있으며, 送電損失이 減少되게끔 送電線에 흐르는 無効電力을 制御하면, 各母線間의 電壓偏差가 減少되어 大部分의 電壓을 規定值內로 들어가게 할 수 있으므로, 本 論文에서는 目的函數로 送電損失만을 擇하고, 最小化過程에서 系統電壓을 check한 後 萬一 系統電壓中에서 規定值를 벗어난 것이 發生하면 벗어난 程度에 따라 調整設備의 操作量을 간단히 再調整하여 모든 電壓이 規定值內에 들도록 하였으며, 感度行列을 基礎로 定式化된 最適制御問題를 풀이함에 있어서, 目的函數  $P_L(X)$ 는 2次式으로 恒常正의 값을 가지며 그의 極值是 最小값이 되겠으나 電壓 및 調整設備의 制限條件을 만족시키는 것이어야 함으로, 本 論文에서는 가장 簡單하고 收束이 빠른 gradient 法을 利用하여 反復計算으로 解를 얻도록 하였다.

이와같이 하여 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御 方式을 單純化함으로서 計算機 記憶容量과 所要計算時間을 크게 줄일 수 있다.

即 無効電力潮流制御의 評價函數로  $P_L(X)$ 를 導入하여 이것을 各 制御變數  $X_j$ 로 偏微分해서 그 最小化를 圖謀한다.

評價函數

$$P_L(X) = \sum_{k=1}^l \gamma_k \cdot (Q_{0k} + \sum_{j=1}^m b_{kj} \cdot X_j)^2 \quad (3.10)$$

$j=1, 2, \dots, m$

式 (3.10)에서  $j$  母線의 操作變數  $X_j$ 에 대한 偏微分값  $(\nabla P_L)_j$ 는

$$(\nabla P_L)_j = \frac{\partial P_L(X)}{\partial X_j} = 2 \sum_{k=1}^l \gamma_k \cdot (Q_{0k} + \sum_{p=1}^m b_{kp} \cdot X_p) \cdot b_{kj} \quad (3.11)$$

$j=1, 2, \dots, m$

最適解를 反復計算에 의해서 얻게 되므로 萬一  $(i+1)$  段階에서  $i$  母線의  $X_j$ 만이  $\Delta X_j^{(i+1)}$ 만큼 變化할 때 最適解가 이루어졌다고 가정하면 ( $j$  以外の 母線의  $\Delta X^{(i+1)}$ 은 일단 無視하는 것으로 함)

式 (3.11)에서

$$\begin{aligned} (\nabla P_L)_j^{(i+1)} &= 0 \\ &= 2 \sum_{k=1}^l \gamma_k \{ Q_{0k} + \sum_{p=1}^m b_{kp} \cdot X_p^{(i)} \\ &\quad + b_{kj} (X_j^{(i)} + \Delta X_j^{(i+1)}) \} \cdot b_{kj} \\ &= 2 \sum_{k=1}^l \gamma_k \{ Q_{0k} + \sum_{p=1}^m b_{kp} \cdot X_p^{(i)} \\ &\quad + \Delta X_j^{(i+1)} \} \cdot b_{kj} \end{aligned} \quad (3.12)$$

따라서

$$\Delta X_j^{(i+1)} = - \frac{\sum_{k=1}^l \gamma_k (Q_{0k} + \sum_{p=1}^m b_{kp} \cdot X_p^{(i)}) b_{kj}}{\sum_{k=1}^l \gamma_k (b_{kj})^2} \quad (3.13)$$

여기서

$$f_k^{(i)} = Q_{0k} + \sum_{p=1}^m b_{kp} \cdot X_p^{(i)} \quad (3.14)$$

라 하면

$$\Delta X_j^{(i+1)} = - \frac{\sum_{k=1}^l \gamma_k f_k^{(i)} \cdot b_{kj}}{\sum_{k=1}^l \gamma_k (b_{kj})^2} \quad (3.15)$$

로 된다.

式 (3.15)에서 새로히 가해질 所要操作量  $\Delta X^{(i+1)}$  ( $m$ 個)가 求해지지만, 이것은 操作量을 連續量으로 取扱해서 얻은 것이므로, 實系統에서는 系統의 各種 與件에 따라 階값 또는 單位 bank 容量의 整數倍가 되도록 處理할 必要가 있다(例 반올림 處理).

또 調整設備의 操作量이 式 (3.8)의 制限範圍를 넘는 것이 發生하였을 경우에는 各各 그 制限값에 固定시키도록 한다.

한편 操作設備을 投入한 結果 電壓監視點의 電壓 絕對值가 式 (3.9)의 制限範圍를 넘는 것이 發生하게 되면  $\Delta X_j$  값을 再調整하여 電壓制限條件을 滿足시키되 다음과 같이 施行한다.

萬一  $(i+1)$  段階에서 母線  $i$ 의 電壓이 最大값을 넘고 그 超過값이 다른 어떤 母線의 것보다 크다고 가정할 때 그 電壓變化分은

$$\Delta E_i = E_i^{(i+1)} - E_i^{(i)} \quad (3.16)$$

이 될 것이며 電壓制限條件에서 要求되는 電壓變化分은

$$\Delta E_{idos} = \bar{E}_i - E_i^{(i)} \quad (3.17)$$

그런데 母線  $i$ 의 電壓變化分은

$$|\Delta E_i| = \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot \Delta X_j \quad (3.18)$$

이다. gradient法의 一般式은

$$\Delta X^{(i+1)} = X^{(i+1)} - X^{(i)} = -K^{(i)} \cdot \nabla P_L^{(i)} \quad (3.19)$$

여기서  $\Delta X$ ,  $\nabla P_L$ 은 列 Vector이고  $K$ 는 하나의 正因數임.

式 (3.19)를 式 (3.18)에 代入하면

$$|\Delta E_i| = k^{(i)} \sum_{j=1}^m a_{ij} (\nabla P_L^{(i)})_j \quad (3.20)$$

한편 母線  $i$ 에서 要求되는 電壓變化分은

$$\Delta E_{idos} = K_d^{(i)} \sum_{j=1}^m a_{ij} (\nabla P_L^{(i)})_j \quad (3.21)$$

따라서

$$\frac{\Delta X_{dos}^{(i+1)}}{\Delta X^{(i+1)}} = \frac{K_d^{(i)}}{K^{(i)}} = \frac{\Delta E_{idos}}{\Delta E_i}$$

$$\text{即 } \Delta X_{dos}^{(i+1)} = T \cdot \Delta X^{(i+1)} \quad (3.22)$$

여기서

$$T = \frac{\Delta E_{idos}}{\Delta E_i} = \frac{\bar{E}_i - E_i^{(i)}}{E_i^{(i+1)} - E_i^{(i)}} \quad (3.23)$$

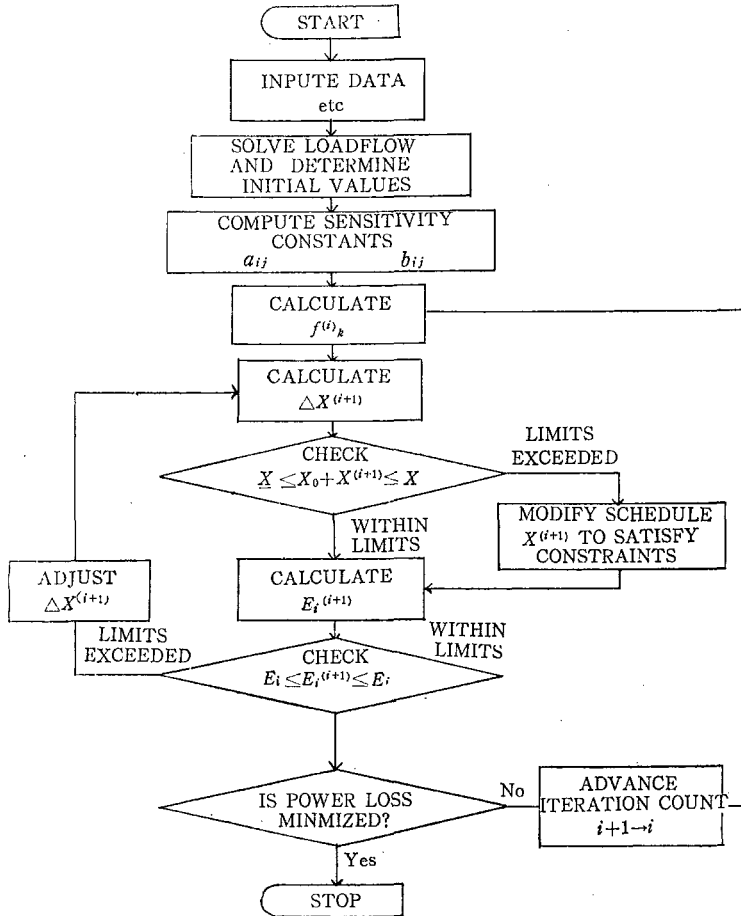


Fig. 3.1. Flow chart for optimum control of voltage and reactive power flow.

이다.

마찬가지로 萬一 母線  $i$ 의 電壓偏差가 가장 크고 電壓最小值(lower limit)보다 적을 경우에는

$$T = \frac{\Delta E_{ides}}{\Delta E_i} = \frac{E_i^{(i)} - E_i}{E_i^{(i)} - E_i^{(i+1)}} \quad (3.24)$$

으로 된다.

이와 같이 하여 萬一  $(i+1)$  段階에서 電壓監視點의 電壓絕對值가 制限範圍를 벗어나는 것이 發生하면  $T$  값을 計算하여  $\Delta X^{(i+1)}$  값을 修正함으로써 電壓이 모두 制限範圍內로 들어가게 되어 電壓制限條件이 滿足된다.

以上 本論文에서 提示한 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御에 관한 algorithm을 flow chart로 要約해서 整理하면 그림 3.1과 같다.

#### IV. Model 系統에 대한 計算例

Model 系統으로 그림 4.1의 Ward-Hale 系統을 擇하여 本論文에서 提示한 algorithm에 의해서 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御에 의한 電力損失 最小化 過程을 說明한다.

系統의 初期狀態와 그림의 潮流計算結果는 表 4.1과 같고 電壓 및 無効電力潮流의 感度定數는 表 4.2와 같다.

最適制御에서 操作變數를 發電機電壓 ( $E_1, E_2$ ), LRC( $n_4, n_7$ ), SC( $Q_{c4}, Q_{c6}$ )로 하고 아래와 같은 制限條件을 갖는 것으로 한다.

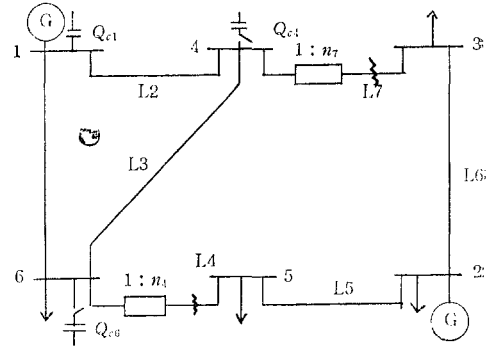


Fig. 4.1. Ward-Hale system.

Table 4.1. Existing Conditions on system

Voltage in perunit	LRC, S. C	Loss(MW)
$E_1=1.05$	$n_4=1.025$	$\sum \gamma_k Q_k^2 = 2.43$
$E_2=1.1$	$n_7=1.1$	
$E_3=0.9912$	$Q_{c1}=0$	$\sum \gamma_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{E_k^2} = 10.6$
$E_4=0.9204$	$Q_{c4}=0$	
$E_5=0.9115$	$Q_{c4}=0$	
$E_6=0.9084$	$Q_{c6}=0$	

$$E_i = 1.05$$

$$0.95 \leq E_2 \leq 1.1$$

$$0.7 \leq N_4, N_7 \leq 1.3$$

$$0 \leq Q_{c4}, Q_{c6} \leq 60(\text{MVA})$$

여기서  $E_1$ 은 shack 母線으로 1.05에 固定시키는 것으로 하였다.

Table 4.2. Sensitivity Constants.

Dependent Variables	Operating Variables					
	$E_1$	$E_2$	$N_4$	$N_7$	$Q_{c4}$	$Q_{c6}$
$\Delta E_3$	0.8371	0.482	-0.1086	0.6852	0.2375	0.1133
$\Delta E_4$	0.8327	0.3574	-0.1003	-0.1652	0.2354	0.1134
$\Delta E_5$	0.5810	0.6930	0.4974	-0.0836	0.08010	0.1960
$\Delta E_6$	0.8064	0.4219	-0.2231	-0.0843	0.1145	0.2682
$\Delta Q_1$	0.5592	-0.8314	0.4403	0.1666	-0.2246	-0.5285
$\Delta Q_2$	0.7278	-0.9892	0.2795	0.4569	-0.6536	-0.3127
$\Delta Q_3$	0.0952	-0.1423	0.2647	-0.1643	0.2751	-0.3375
$\Delta Q_4$	-0.7845	0.7467	-0.6000	0.0136	-0.1185	-0.2527
$\Delta Q_5$	-0.9635	0.7502	-0.7840	0.0911	-0.1378	-0.3193
$\Delta Q_6$	-0.7678	0.5464	0.0581	-0.5743	-0.2135	-0.1076
$\Delta Q_7$	-0.7365	0.5742	0.0283	-0.6200	-0.2020	-0.1057

Note: Constants for line reactive power flows are for those from node  $i$  to node  $j$  where  $i < j$ .



한편 電壓監視點은  $E_3, E_4, E_5, E_6$ 로 하고 制限條件은

$$0.95 \leq E_i \leq 1.05$$

로 定하였다.

最適制御結果는 表 4.3과 같고 制御過程을 圖示하면 그림 4.3과 같다.

Table 4.3. Results for optimum control

Voltage in perunit	LRC, SC (MVA)	Loss(MW)
$E_1=1.05$ (1.05)	$n_4=1.057$	$\sum \gamma_k Q_k^2 = 0.05(0.4)$
$E_2=1.1$ (1.1)		
$E_3=1.0253$ (1.0449)	$n_7=0.998$	$\sum \gamma_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{E_k^2} = 8.63$
$E_4=0.9645$ (1.0035)	$Q_{c4}=23.5$	
$E_5=0.9705$ (0.9718)	$Q_{c6}=30.1$	
$E_6=0.989$ (1.0176)		

Note: The values in parenthesis are those computed by load flow calculation

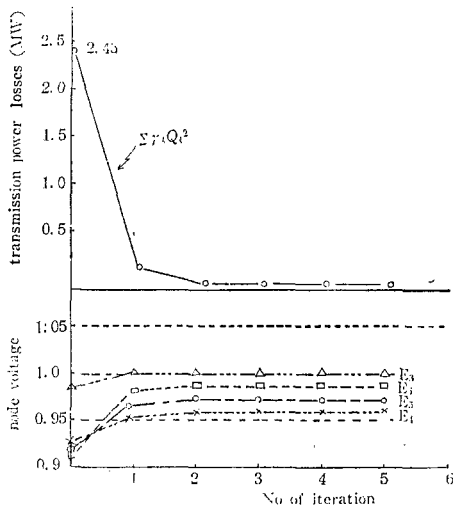


Fig. 4.2 Convergent process of optimum control.

그림 3에서 보인바와 같이 단 2회 反復計算으로 最終的인 解를 얻을 수 있었고 評價函數值도 2.43에서 0.05로(潮流計算結果 0.4) 減少하였으며 所要計算時間은 加減算이 大型 計算機로 3秒(感度定數計算時時除外)이었다. 또한 潮流計算結果 實際의 總

損失은 制御前 10.6MW에서 制御後 8.63MW로 18.5% 減少되었다.

## V. 韓電電力系統에 대한 適用計算

### 1. 系統制御에 관한 Data

電壓 및 無効電力潮流의 瞬時制御方式을 檢討함에 있어서 對象系統을 1979年末 現在の 京仁地區 電力系統을 擇하였으며, 將來 實系統에 대한 計算機制御의 適用可能性과 그 效果를 確認코져 하였다. 對象時點으로는 1979年末 Peak 負荷時를 生覺하였으며, 이때의 系統圖 및 各線路 임피던스는 그림 5.1 및 그림 5.2와 같고 需給條件은 表 5.1과 같다.

制御對象으로서는 그림 5.3에 보이는 바와 같이 系統內 負荷母線 10個所를 電壓監視點으로 擇하고 無効電力潮流監視線路로서는 全線路(18個線路)를 對象으로 하였다. 또한 電壓 및 無効電力 調整設備는 그림 5.3에 나타낸 바와 같이 發電機端子 電壓調整 6個所, 變電所의 並列콘덴서(S.C)bank 7個所를 擇하였다. 한편 調整設備의 制限條件으로서는

$$\text{發電機電壓調整: } 0.95 \leq E_g \leq 1.05$$

$$\text{S.C 容量調整: } 0 \leq Q_c \leq 60(\text{MVA})$$

로 定하였고 電壓監視線路의 電壓制限條件을

$$0.95 \leq E_i \leq 1.05$$

Table 5.1. Node Conditions of Kyong In System (per unit) 100MVA Base

Node No	Active power	Reactive power
1. (SUL)	3.0, -0.4	2.5
2. (ICN154)	4.8, -0.2	1.07, 0.12
3. (ICN345)	2.8, -0.3	1.69, -0.19
4. (GYN)	2.2, -0.1	1.45, -0.06
5. (HGG)	2.0, -0.5	0.97, -0.31
6. (PDG)	1.4, -0.1	0.65, -0.06
7. (YSO154)	-2.3	-1.43
8. (YSO345)	0.0	0.0
9. (SSU345)	0.0	0.0
10. (SSU154)	-2.3	-1.43
11. (BPG)	-1.3	-0.81
12. (SSG)	-1.5	-0.93
13. (DBG)	-1.5	-0.93
14. (DSO)	-1.0	-0.62
15. (YJI)	-1.4	-0.87
16. (JAN)	-2.4	-1.49

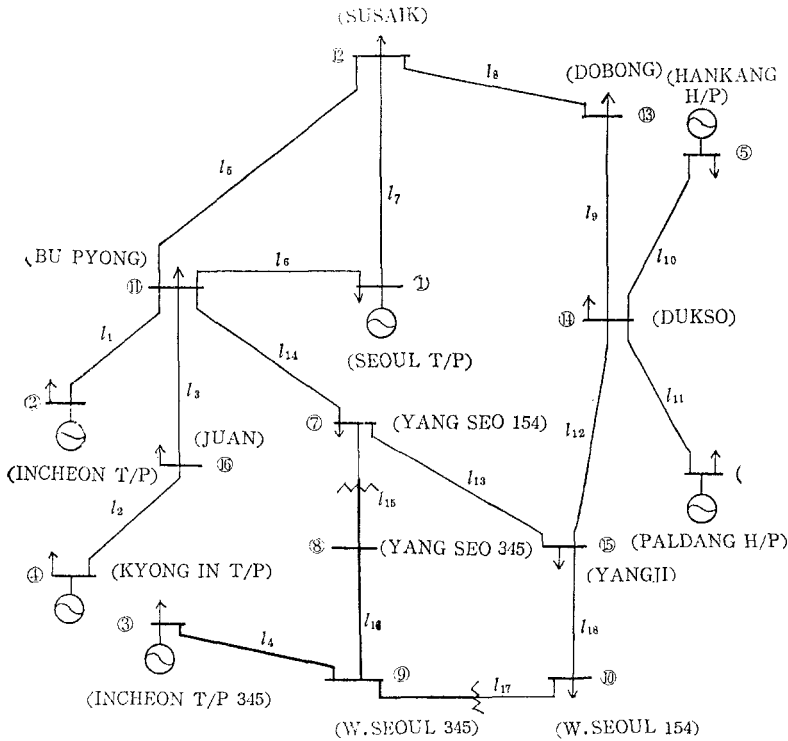


Fig. 5.1. Kyong In System (KECO) in 1979

로 잡았다.

2. 系統特性定數 算出

앞에 記述한 바와 같이

調整設備의 操作點 : 13個所

電壓監視 母線 : 10個所

無効電力潮流監視線路 : 18個所

일 때 1979年末 Peak 負荷時의 京仁地區電力系統의 電壓感度定數 및 無効電力潮流 感度定數는 計算 結果 各各 表 5.2 및 表 5.3과 같다.

表에 나타난 感度定數는 100MVA Base에서 per unit 값으로 나타낸 것임.

3. 最適制御 計算結果

表 5.1의 需給條件下에서

發電機의 端子電壓  $E_g=1.0$ (per unit : 6個所)

調相設備의 投入量  $Q_{cj}=0.0$ (MVA : 7個所)

으로 한 初期狀態에서 潮流計算結果, 電壓監視點의 電壓絕對值와 送電損失은 表 5.4와 같고 本 論文에서 提示한 algorithm에 의한 最適制御計算結果는 表 5.5와 같다.

表 5.4 및 表 5.5에서 보인바와 같이 評價函數值가 23.5에서 11.6으로 減少한 것은 無効電力潮流를 制御함으로써 無効電力潮流에 의한 電力損失을 50.7% 減少시켰음을 나타내는 것이다.

또한 反復計算은 1회로 最終解를 얻었으며 所要 計算時間 亦是 3.43秒(感度定數計算除外)이었으므로 大規模電力系統의 on-line 制御에 充分히 利用할 수 있을 것으로 期待되는 바이다.



Table 5.3. Sensitivity Constants for line reactive power flows ( $b_{rf}$ )

dependent variable	operating variable						
	SUL $E_1$	ICN 154 $E_2$	ICN 345 $E_3$	GYN $E_4$	HGG $E_5$	PDG $E_6$	YSO 154 $SC_7$
$\Delta Q_1$	-0.3351	0.6773	-0.0864	-0.2068	-0.0310	-0.0237	-0.2345
$\Delta Q_2$	-0.1612	-0.2083	-0.0416	0.4344	-0.0149	-0.0114	-0.1128
$\Delta Q_3$	0.1570	0.2029	0.0405	-0.4249	0.0145	0.0111	0.1099
$\Delta Q_4$	-0.0849	-0.0882	0.3223	-0.0421	-0.0667	-0.0510	-0.3395
$\Delta Q_5$	-0.2543	0.1618	0.0280	0.0773	-0.0070	-0.0054	0.0813
$\Delta Q_6$	0.3233	-0.1802	-0.0360	-0.0861	-0.0127	-0.0097	-0.0972
$\Delta Q_7$	0.4170	-0.1587	-0.0478	-0.0759	-0.0784	-0.0600	-0.1073
$\Delta Q_8$	0.1532	0.0081	-0.0184	0.0039	-0.0839	-0.0642	-0.0228
$\Delta Q_9$	0.1496	0.0080	-0.0176	0.0038	-0.0814	-0.0623	-0.0218
$\Delta Q_{10}$	-0.0906	-0.0311	-0.0656	-0.0149	0.3847	-0.1859	-0.0970
$\Delta Q_{11}$	-0.0690	-0.0237	-0.0499	-0.0113	-0.1851	0.3364	-0.0738
$\Delta Q_{12}$	-0.0031	-0.0450	-0.1298	-0.0215	0.1116	0.0854	-0.1875
$\Delta Q_{13}$	0.0268	0.0605	0.0033	0.0289	-0.0682	-0.0522	0.2440
$\Delta Q_{14}$	-0.0815	-0.1260	0.1831	-0.0602	0.0488	0.0373	0.5012
$\Delta Q_{15}$	0.0548	0.0655	-0.1862	0.0313	0.0194	0.0149	0.2552
$\Delta Q_{16}$	0.0565	0.0676	-0.1910	0.0323	0.0202	0.0154	0.2634
$\Delta Q_{17}$	-0.0256	-0.0176	0.1276	-0.0084	-0.0445	-0.0340	-0.0647
$\Delta Q_{18}$	-0.0238	-0.0162	0.1220	-0.0077	-0.0418	-0.0320	-0.0594

dependent variable	operating variable					
	BPG $SC_{11}$	SSG $SC_{12}$	DBG $SC_{13}$	DSO $SC_{14}$	YJI $SC_{15}$	JAN $SC_{16}$
$\Delta Q_1$	-0.3965	-0.0839	-0.0684	-0.0511	-0.1282	-0.1901
$\Delta Q_2$	-0.1907	-0.0404	-0.0329	-0.0246	-0.0617	-0.6275
$\Delta Q_3$	0.1858	0.0393	0.0320	0.0240	0.0601	-0.3899
$\Delta Q_4$	-0.0808	-0.0256	-0.0712	-0.1097	-0.3372	-0.0387
$\Delta Q_5$	0.1479	-0.1702	-0.0897	-0.0118	0.0322	0.0707
$\Delta Q_6$	-0.1648	-0.0334	-0.0270	-0.0205	-0.0532	-0.0769
$\Delta Q_7$	-0.1451	-0.7637	-0.4414	-0.1281	-0.1043	-0.0693
$\Delta Q_8$	0.0074	0.0795	-0.5232	-0.1375	-0.0694	0.0036
$\Delta Q_9$	0.0073	0.0777	0.4930	-0.1332	-0.0668	0.0035
$\Delta Q_{10}$	-0.0285	-0.0413	-0.2335	-0.4000	-0.2203	-0.0137
$\Delta Q_{11}$	-0.0217	-0.0315	-0.1778	-0.3046	-0.1677	-0.0104
$\Delta Q_{12}$	-0.0412	0.0082	0.1012	0.1830	-0.4434	-0.0197
$\Delta Q_{13}$	0.0554	0.0010	-0.0586	-0.1115	-0.3574	0.0265
$\Delta Q_{14}$	-0.1153	-0.0159	0.0342	0.0795	0.2623	-0.0552
$\Delta Q_{15}$	0.0600	0.0149	0.0244	0.0321	0.0953	0.0288
$\Delta Q_{16}$	0.0619	0.0153	0.0253	0.0332	0.0989	0.0297
$\Delta Q_{17}$	-0.0162	-0.0098	-0.0437	-0.0731	-0.2281	-0.0077
$\Delta Q_{18}$	-0.0148	-0.0091	-0.0410	-0.0687	-0.2146	-0.0071

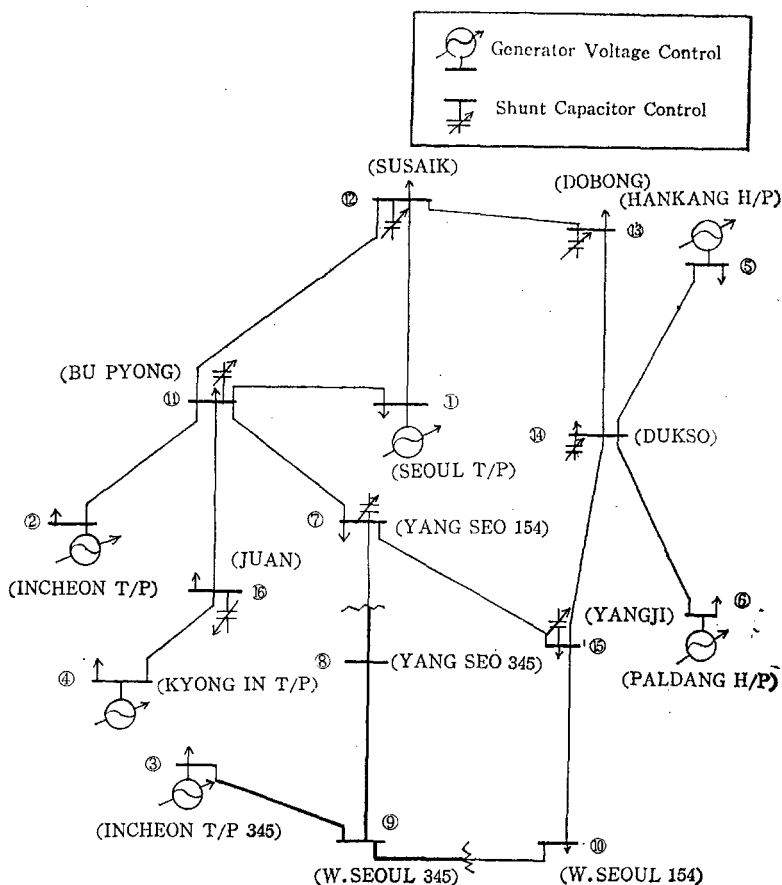


Fig.5.3. Control devices Map

Table 5.4. Existing Conditions on Kyong In System

Voltage of Load Node	Gen Vlg., S.C	Loss(MW)
$E_7$ (YSO154) =0.9674	$E_1$ (SUL)=1.00	$\Sigma 7.8 Q_k^2$ =23.5
$E_8$ (YSO345) =0.9823	$E_2$ (ICN154)=1.00	
$E_9$ (SSU345) =0.9863	$E_3$ (ICN345)=1.00	
$E_{10}$ (SSU154) =0.9584	$E_4$ (GYN)=1.00	
$E_{11}$ (CPG)=0.9860	$E_5$ (HGG)=1.00	
$E_{12}$ (SSG)=0.9884	$E_6$ (PDG)=1.00	
$E_{13}$ (DBG)=0.9703	$SC_7$ (YSO)=0.0	
$E_{14}$ (DSO)=0.9786	$SC_{11}$ (BPG)=0.0	
$E_{15}$ (YJI)=0.9613	$SC_{12}$ (SSG)=0.0	
$E_{16}$ (JAN)=0.9846	$SC_{13}$ (DBG)=0.0	
	$SC_{14}$ (DSO)=0.0	
	$SC_{15}$ (YJI)=0.0	
	$SC_{16}$ (JAN)=0.0	

Table 5.5. Results for optimum Control

Voltage of Load Node	Gen. Vlg. SC(MVA)	Loss(MW)
$E_7$ (YSO154) =1.0050	$E_1$ (SUL)=0.95	$\Sigma 7.8 Q_k^2$ =11.6
$E_8$ (YSO345) =0.9973	$E_2$ (ICN154)=1.05	
$E_9$ (SSU345) =0.9955	$E_3$ (ICN345)=1.05	
$E_{10}$ (SSU154) =0.9736	$E_4$ (GYN)=1.0165	
$E_{11}$ (BPG)=1.050	$E_5$ (HGG)=0.9595	
$E_{12}$ (SSG)=1.0020	$E_6$ (PDG)=0.9527	
$E_{13}$ (DBG)=0.9813	$SC_7$ (YSO)=36.566	
$E_{14}$ (DSO)=0.9868	$SC_{11}$ (BPG)=17.704	
$E_{15}$ (YJI)=0.9818	$SC_{13}$ (DBG)=41.973	
$E_{16}$ (JAN)=1.0153	$SC_{14}$ (DSO)=29.644	
	$SC_{15}$ (YJI)=46.553	
	$SC_{17}$ (JAN)=17.461	

## IV. 結 論

電子計算機를 中樞로 한 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御를 on-line realtime으로 施行함에 있어서 가장 要望되는 것은 計算機의 記憶容量을 減少하고 所要計算時間을 最大로 短縮할 수 있는 algorithm의 開發이라 하겠으며, 에너지 節減에 符應해서 電力損失 最小化 方案이 더욱 바람직하다고 하겠으므로 本 論文에서는

(1) 制御目標로서 系統電壓을 規定値內로 維持시키고 同時에 系統運用的 合理化를 考慮하여 送電損失 最小化를 擇하였고

(2) 感度行列을 基礎로 한 最適制御問題를 從來와는 달리 電力損失만을 目的函數로 擇하여 定式化 하였으며

(3) 定式화된 最適制御問題를 풀이함에 있어서 目的函數  $P_L(X)$ 이 2次式으로 恒常 正의 값을 가지며 또한 凹函數로 그의 極値는 最小값이 되겠으나, 電壓 및 調整設備의 制限條件이 隨伴되므로 本論文에서는 가장 簡單하고 收束이 빠른 gradient法을 利用하여 反復計算으로 解를 얻었으며

(4) 電力損失 最小化 過程에서 調整設備의 投入에 따른 系統電壓變動을 check하되, 潮流計算에 의하지 않고, 電壓感度定數를 利用한 L.P 計算으로 쉽게 check하고

(5) 萬一 系統電壓中에서 制約條件을 벗어난 것이 發生하면, 벗어난 程度에 따라 調整設備의 操作量을 再調整시켜 全系統電壓이 規定値內에 들어가도록 함으로써 電壓制御를 遂行하였다.

(6) 위와 같은 內容으로 電壓 및 無効電力潮流의 最適制御에 대한 algorithm을 開發하여, 計算機制御의 所要時間과 記憶容量을 크게 줄일 수 있었다.

(7) 本 論文에서 提示한 algorithm을 Model系統 (Ward-Hale 系統)과 韓電系統(京仁地區)에 適用해 봄으로써 本 方式의 優秀성과 大規模電力系統에서의 on-line 制御에 適用可能性을 立證하였다.

## 後 記

本 研究는 1979학년도 문교부 학술연구조성비의 지원으로 이루어졌음을 밝히고 감사드리는 바이다.

## 參 考 文 獻

1. 宋吉永：“電力系統에 있어서의 電壓·無効電力 制御에 관한 研究”，學位論文，1967.
2. A. Kishore, E. F. Hill, “Static optimization of reactive power sources by use of sensitivity parameters”, IEEE, Trans. Vol. PAS-90, pp.1163—1173, 1971.
3. J. F. Dopazo, O. A. Klitin, G. W. Stagg, “An optimization technique for real and reactive power allocation”, proc. of IEEE, Vol. 55, pp. 1877—1885, 1967.
4. Ichiro Hano, Yasuo Tamura “Real time control of system Voltage and reactive power,” Waseda university, Tokyo, Japan, pp1—25, 1968.
5. John Peschon, D. S. Piercy, “Optimum Control of Reactive power Flow,” IEEE. Trans, Vol. PAS-87, pp40—47, 1968,
6. A. M. Pretelt, “Automatic Allocation of Network Capacitors” IEEE Trans, Vol. PAS-90, pp. 54—61, 1971.
7. AKIO SAITOH, “Study on optimal allocation of Real and Reactive power in Power Systems, waseda university, pp. 1—39.
8. ALBERT M. SASSON, “Nonlinear Programming Solutions for Load-Flow, Minimum-Loss, and Economic Dispatching problems”, IEEE Trans, Vol. PAS—88, pp399—409, 1969.
9. 朴永文, 金建中, “非線形計劃法에 의한 自動經濟給電 알고리즘의 開發에 관한 研究”, 대한전기학회지, 第26卷, 第1號, pp. 77—81, 1977
10. H. W. Smith “Minintizing power transmission losses by reactive-ampere control), IEEE, Trans Vol. 82 pp. 542—544, 1963.
11. 成田, 多田, “感度行列에 기초를 둔 電壓無効電力에 관한 系統特性定數의 決定法”, 日本電氣學會誌, Vol. 88, No. 959 1968.
12. 小林侂史：“電壓無効電力의 Multi-Level 制御의 計算方式”, 日本電氣學會誌, Vol. 92, No11, pp. 9—16, 1972.