無效電力潮流의 最適制御에 의한 電力損失 最小化 硏究

論 文
28—10—2

Minimizing Power Transmission Losses by Optimum Control of Reactive Power Flow

金 俊 鉉*·劉 錫 九**
(Joon-Hyun Kim. Suk-Koo You)

Abstract

The paper develops a method of minimizing power transmission losses by optimum control of reactive power flow.

In the past, because the optimizing method considers 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.

In this paper, a new computing method for real time control on a digital computer is described which aims at a coordinated use of reactive power sources and voltage regulating devices.

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.

1. 緖 論

電力系統에 있어서 無效電力潮流의 最適制御는 需用家에 대한 Service quality에 直結되는 重要한 問題이며 大規模化되고 있는 電力系統의 合理的인 運用面에서도 그 重要性이 크게 認識되고 있다.

電壓 및 無效電力潮流의 制御目的은 需用家에서 要求하는 電壓 Service quality를 適切히 維持시킴과 同時에 電力系統에서 發生하는 電力損失을 減小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시킴으로서 需用家에 대한 Service를 向上시키고 特히 모든 電氣機器가 正常的인 機能을 발휘하게끔 하고

(2) 系統內의 機器의 絕緣 Level을 초과하지 않게끔 過大한 電壓上昇을 防止하며

(3) 送電線에 흐르는 無效電力을 調整하여 送電損失을 減小하고 送變電設備의 利用率을 向上시킴과 아울러

(4) 無效電力源의 協助를 圖謀하여 各調整設備의 運用合理化를 이룩한다.

最近 發電機의 單位容量이 增大되어 감에 따라 電力系統의 規模가 擴大되고 長距離 送電이 不可避하게 되어 이에 따른 送電損失을 無視할 수 없게 되였으므로 無效電力潮流의 最適制御에 의한 電力損失 最小化方案이 硏究되어지고 있다.

從來에는 電壓 및 無效電力潮流의 瞬時制御에 있어서 먼저 電壓偏差의 最小化를 實行하여 電壓을 許容變動範圍內에 들도록 하고 그다음 電壓을 許容變動範圍內에 維持시키면서 送電損失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 협조시켜 計算하였으므로 所要計算時間이 길고 weight 계수의 選定法이 問題로 남았다.

허나 送電損失이 減小되게끔 送電線에 흐르는 無效電力을 制御하면 各 node間의 電壓偏差도 減小되어 大部分의 電壓이 規定値內로 들어가게 되므로 本論文에서는 電壓 및 無效電力에 관한 感度行列(系統特性定數)과 gradient法을 이용하여 送電損失을 最小化하는 調整設備(S.C, LRC, 發電機 AVR運轉)의 操作量을

* 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科敎授
** 正會員 : 蔚山工大副敎授
接受日字 : 1979年 7月 24日

反復計算으로 求하되 反復計算時마다 電壓變動을 電壓感度로 Check하고 만일 監視 node의 電壓中에서 規定値를 벗어난 것이 發生하면 벗어난 程度에 따라 操作量을 簡單히 再調整 토록 하므로서 結果的으로 送電損失 最小化만을 目的函數로 택할 수 있었고 따라서 無效電力潮流의 最適制御를 단순화시켜 大規模電力系統에서의 on-line 轉轉에 適用할 수 있도록 하였다.

2. 無效電力潮流의 最適制御

2.1 制御基礎 deta로서의 感度行列

電壓 및 無効電力制御에 있어서 基礎 deta인 系統特性定數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

$$P_k+jQ_k=C_k+jD_k+E_k\sum_{\alpha}^{n}(Y^*_{k\alpha}E_\alpha)^* \qquad k=1,2\cdots\cdots,\ N. \tag{1}$$

으로 表示된다.

지금 母線 k의 複素電壓을

$$E_k=E_k(\cos\theta_k+j\ \sin\theta_k) \tag{2}$$

複素 admittance를

$$Y_{k\alpha}=G_{k\alpha}+jB_{k\alpha} \tag{3}$$

라 하고

式 (2)(3)을 式 (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

$$g_{2k-1}=C_k-P_k+E_k\sum_{\alpha}E_\alpha\{G_{k\alpha}\cos(\theta_k-\theta_\alpha)+B_{k\alpha}\sin(\theta_k-\theta_d\}=0 \tag{4}$$

$$g_{2k}=D_k-Q_k+E_k\sum_{\alpha}E_\alpha\{G_{k\alpha}\sin(\theta_k-\theta_\alpha)+B_{k\alpha}\cos(\theta_k-\theta_\alpha)\}=0 \tag{5}$$

이 成立한다.

式 (4),(5)는 發電 및 消費有効, 無効 電力, 電壓, 位相角, conductance, susceptance를 變數로하는 $2N$元의 實數 連立方程式이다. 이 變數를 電壓 및 無効電力制御問題에서는 從屬變數 vector×($2N-1$ 次元 Vector), 操作變數 Vector$u$(M 次元 Vector) 및 parameter vector P로 나눌 수 있으므로

式 (4),(5)는

$$G(X,U,P)=0 \tag{6}$$

로 되는 $2N$ 次元의 vector 方程式으로 表示할 수 있다.

여기서

$$G\equiv\mathrm{Col}\,[g_1,g_2,\cdots,g_{2k-1},\ g_{2k}\cdots g_{2n-1},\ g_{2n}] \tag{7}$$

라 한다. 단 Col은 列 vector로 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

$$G(X_0,U_0,\ P)=0 \tag{8}$$

이 成立한다.

여기서 電壓 및 無効電力制御의 調整設備인 LRC의 tap 값, 發電機無効出力, 並列 Capacitor 等을 操作하여 操作變數 vector가 U_0에서 微小量 變化해서 $U_0+\triangle U$로 되고 從屬變數 Vector X도 X_0에서 $X_0+\triangle X$로 變化하였다고 하면

$$G(X_0+\triangle X,\ U_0+\triangle U,\ P)=0 \tag{9}$$

의 관계가 成立한다.

式 (9)를 初期狀態(X_0,U_0,P)를 中心으로 Taylor 展開하고 또 $\triangle X$ 및 $\triangle U$에 관한 2次 以上의 項을 無視하면

$$G(X_0,U_0P)+G_X(X_0,U_0,P)\triangle X+G_U(X_0,U_0,P)\triangle U=0 \tag{10}$$

가 얻어진다.

여기서 G_X, G_U는 vector 函數 G의 X 및 U에 관한 Jacobian 行列로서 各要素는

$$[G_X]_{ij}=\partial g_i/\partial X_j\ (i=1,2\cdots,\ 2N,\ j=1,2,\cdots,\ M) \tag{11}$$

$$[G_U]_{ij}=\partial g_i/\partial U_j\ (i=1,2\cdots,\ 2N,\ j=1,2,\cdots,\ M) \tag{12}$$

이다.

式 (10)의 第1項은 零이므로

$$\triangle X=-G_X^{-1}\cdot G_U\cdot\triangle U \tag{13}$$

이다.

$$S=-G_X^{-1}\cdot G_U \tag{14}$$

라하면

$$\triangle X=S\cdot\triangle U \tag{15}$$

의 形式으로 表示된다.[2]

式 (15)의 係數行列 S($2N\times M$ 次)는 電力潮流의 操作變數 Vector U에 관한 感度行列이라하며 電壓 및 無効電力制御에 있어서 制御量, 操作量이 式 (15)의 $\triangle X$와 $\triangle U$에 直接 대응할 경우에는 系統特性定數가 S에 의해서 直接 주어지게 된다.

그러나 LRC의 tap 값, 또 制御從屬變數로서의 線路無効電力潮流는 式 (4),(5)에 陽으로 포함되고 있지 않으므로 이들의 變數에 대한 系統特性定數는 感度行列 S의 要素 自體로서는 주워지지 않는다. LRC의 tap 값을 操作變數로 할 경우에는 等價回路를 使用하면 LRC의 變數比가 나타나는 母線의 Self admittance와 LRC를 가지는 線路와 連結되는 母線間의 mutual admittance는 각각 tap값의 函數로서 表示된다는 것을 이용해서 計算 할 수 있으며 또 線路의 無効電力潮

流를 從屬變數로 할 경우에는 그 線路 兩端의 母線電壓 및 位相角에 관한 感度가 S의 要素로서 구해 지므로 이를 利用하면 無効電力潮流의 感度도 쉽게 求할수 있다.

2·2 無効電力潮流의 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(sh. C, sh. R), 發電機의 無効電力發生 및 變壓器 tap 값을 許容範圍內에서 적절히 조절하여 系統內에서 指定된 地點의 電壓을 規定値內로 維持하는 同時에 送電損失의 最小化 또는 調整設備의 操作量 最小化 等의 効果를 期待한다.

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

$$E_i=E_{oi}+\sum_{j1=1}^{mi}a_{ij1}\cdot n_{j1}+\sum_{j2=1}^{m2}b_{ij2}\cdot y_{j2}+\sum_{j3=1}^{m3}C_{ij3}\ q_{gj3} \tag{16}$$

$$Q_k=Q_{0k}+\sum_{j1=1}^{m1}d_{kj1}\cdot n_{j1}+\sum_{j2=1}^{m2}e_{kj2}\cdot y_{j2}+\sum_{j3=1}^{m3}f_{kj3}\cdot q_{gj3} \tag{17}$$

여기서

E_i : 調整設備의 操作에 의한 i地點의 制御後 電壓

E_{oi} : 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

n_{j1} : j_1地點의 負荷時 電壓調整器의 tap 操作量

y_{j2} : j_2地點의 靜止形 調相設備의 操作量

q_{gj3} : j_3地點의 發電機 無効電力 操作量

$a_{ij1}\sim C_{ij3}$: 調整設備의 單位量 操作時 i地點의 電壓回復量을 나타내는 感度定數

$d_{kj1}\sim f_{kj3}$: 調整設備의 單位量 操作時의 K線路의 無効電力潮流 變化量을 나타내는 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의 最適制御에 의한 送電損失의 最小化를 目的函數로 채택한다.

$$\text{Min Loss}=\min\sum_{k=1}^{l}r_k\cdot I_k^2=\min\sum_{k=1}^{l}r_k\frac{P_k^2+Q_k^2}{E_k^2} \tag{18}$$

여기서 l는 無効電力潮의 監視線路數를 나타내며 r_k 및 P_k,Q_k는 各各 線路 k의 抵抗 및 有効, 無効電力潮流이고, 선로 k가 모선 i,j에 연결되고 P_k,Q_k가 $i\rightarrow j$일 때 $E_k=E_i$임.

電壓 및 無効電力潮流의 制御問題에서 有効電力潮流는 調整設備의 操作에 의한 영향을 거의 받지 않으며 各母線의 電壓을 $V_i\fallingdotseq 1.0P.U$로 간주하면 式 (18)은

$$\text{Min Loss}\fallingdotseq\min\sum_{k=1}^{l}r_k\cdot Q_k^2=\min\sum_{k=1}^{l}r_k\cdot\left(Q_{0k}+\sum_{j1=1}^{m1}d_{kj1}\cdot n_{j1}+\sum_{j2=1}^{m2}e_{kj2}\cdot y_{j2}+\sum_{j3=1}^{m3}f_{kj3}\cdot g_{gi3}\right)^2 \tag{19}$$

으로 나타낼 수 있다.[1]

한편 L.R.C의 tap, 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,

$$\underline{N}_{j1}\leq n_{oj1}+n_{j1}\leq\overline{N}_{j1}$$
$$\underline{Y}_{j2}\leq y_{oi2}+y_{j2}\leq\overline{Y}_{j2}$$
$$\underline{Q}_{gj3}\leq q_{ogj3}+q_{gj3}\leq\overline{Q}_{gj3} \tag{20}$$

단, 여기서 n_{oj1},y_{oj2},g_{ogj3}는 制御前의 값 곧 初期값이며 制御가 實施될적마다 再設定되는 것이다.

또한 系統內에서 指定된 地點의 電壓制限條件에서

$$\underline{E}_i\leq E_i\leq\overline{E}_i \tag{21}$$

따라서 調整設備의 操作에 따른 送電損失 最小化를 위한 無効電力潮流의 最適制御는 式 (20), (21)의 制限條件下에서 式 (19)의 目的函數를 最小로하는 調整設備의 操作量을 求하는 問題로 요약된다.

여기서 윗式들을 一般的으로 다루기 위하여 諸變數 및 諸定數를 다음과 같이 表示한다.

操作變數 : $n,y,q_g\longrightarrow x$

感度定數 : $a,b,c\longrightarrow a$

: $d,e,f\longrightarrow b$

이결과 無効電力潮流의 最適制御問題는 다음과 같이 一般形으로 表示된다.

$$\text{Min Loss}=\min P_L(x)=\min\sum_{k=1}^{l}r_k\cdot\left(Q_{ok}+\sum_{j=1}^{m}b_{kj}\cdot X_j\right)^2 \tag{22}$$

$$\underline{X}_j\leq X_{oj}+X_j\leq\overline{X}_j \tag{23}$$

$$\underline{E}_i\leq E_{oi}+\sum_{j=1}^{m}a_{ij}\cdot X_j\leq\overline{E}_i \tag{24}$$

윗式에서 알 수 있는 바와 같이 이 問題는 quadratic programming 범주에 속하는 問題이지만 實際는 式 (22)와 같이 目的函數가 2次式으로 되어 있으며 解로서는 各調整設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라고 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.

3. 無効電力 潮流의 最適解法

前節의 制御問題는 旣히 定式化된 問題로, 이를 풀 이함에 있어서 從來에는 式(24)의 制限條件을 滿足시키기 爲하여 電壓偏差에 관한 評價函數 E를 導入하여

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

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

E_{oi} : i地點의 制御前電壓偏差

를 實施하여 電壓을 許容範圍內에 끌어 넣고 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 圖謀하였으나 本論文에서는 序論에서 記述한바와 같이 目的函數로서 送電損失만을 擇하고 損失 最小化 過程에서 電壓을 check하여 式 (24)의 制限條件을 滿足시키는 調相設備의 操作量을 決定하므로서 計算過程을 單純化하였다.

한편 目的函數 $P_L(X)$는 항상 正의 값을 가지며 또한 凹函數이므로 $P_L(X)$의 極値는 最小값이 될 것이므로 收束이 가장 빠른 gradient法을 利用하였다.

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

$$\text{評價函數 } P_L(X)=\sum_{k=1}^{l}\cdot r_k\left(Q_{ok}+\sum_{j=1}^{m}b_{kj}X_j\right)^2 \qquad (25)$$

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

式 (25)에서 j node의 操作變數 X_j에 대한 偏微分값 $(\Delta P_L)_j$는

$$(\Delta P_L)_j=\frac{\partial P_L(X)}{\partial X_j}=2\sum_{k=1}^{l}r_k\left(Q_{ok}+\sum_{p=1}^{m}b_{kp}\cdot X_p\right)\cdot b_{kj} \qquad (26)$$

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

最適解를 反復計算에 의해서 얻게 되므로 萬一 $(i+1)$ 단계에서 j node의 X_j만이 ΔX_j 만큼 變化할때 最適解가 이루워졌다고 가정하면 (j以外의 node의 $\Delta X^{(i+1)}$은 일단 無視하는 것으로 함)

式 (26)에서

$$\begin{aligned}(\Delta P_L)_j^{(i+1)}&=0\\ &\fallingdotseq 2\sum_{k=1}^{l}r_k\left\{Q_{ok}+\sum_{\substack{p=1\\ p\neq j}}^{m}b_{kp}\cdot X_p^{(i)}+b_{kj}(X_j^{(i)}+\Delta X_j^{(i+1)}\right\}\cdot b_{kj}\\ &=2\sum_{k=1}^{l}r_k\left(Q_{ok}+\sum_{p=1}^{m}b_{kp}\cdot X_p^{(i)}+\Delta X_j^{(i+1)}\cdot b_{kj}\right\}b_{kj}\end{aligned} \qquad (27)$$

따라서

$$\Delta X_j^{(i+1)}=-\frac{\sum_{k=1}^{l}r_k\left(Q_{ok}+\sum_{p=1}^{m}b_{kp}\cdot X_p^{(i)}\right)b_{kj}}{\sum_{k=1}^{l}r_k(b_{kj})^2} \qquad (28)$$

여기서 $f_k^{(i)}=Q_{ok}+\sum_{p=1}^{m}b_{kp}X_p^{(i)}$ (29)

라하면

$$\Delta X_j^{(i+1)}=-\frac{\sum_{k=1}^{l}r_k f^{(i)}\cdot b_{kj}}{\sum_{k=1}^{l}r_k(b_{kj})^2} \qquad (30)$$

이다.

式 (30)에서 새로이 가해질 所要操作量 $\Delta X^{(i+1)}$ (m個)가 구해지지만 이것은 操作量을 連續量으로 取扱해서 얻은 것이므로 實系統에서는 系統의 各種 設備與件에 따라 이것을 Tap 값 또는 單位뱅크(bank) 용량의 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 (23)의 制限範圍를 넘는 것이 發生하였을 경우에는 각각 그 制限값에 固定시키도록 한다.

한편 操作設備를 投入한 結果 電壓監視點의 電壓絕對値가 式 (24)의 制限範圍를 넘는 것이 發生하게 되면 ΔX_j 값을 再調整하여 電壓制限條件을 滿足시키되 다음과 같이 施行한다.

만일 $(i+1)$ 단계에서 Node i의 電壓이 最大값을 넘고 그 超過값이 다른 어떤 node의것 보다 크다고 가정할 때 그 超過값은

$$\Delta E_i=E_i^{(i+1)}-E_i^{(i)} \qquad (31)$$

이 될것이며 電壓制限條件에서 要求되는 電壓變化分은

$$\Delta E_{ides}=E_{imax}-E_i^{(i)} \qquad (32)$$

그런데 node i의 電壓變化分은

$$|\Delta E_i|=\sum_{j=1}^{m}a_{ij}\Delta X_j \qquad (33)$$

이다. gradient法의 一般式은

$$\Delta X^{(i+1)}=X^{(i+1)}-X^{(i)}=-K^{(i)}\cdot\Delta P_L^{(i)} \qquad (34)$$

여기서 ΔX, ΔP_L은 列 vector이고

K는 하나의 正因數임

(34)式을 (33)式에 代入하면

$$|\Delta E_i|=K^{(i)}\sum_{j=1}^{m}a_{ij}\cdot(\Delta P_L^{(i)})_j \qquad (35)$$

한편 node i에서 要求되는 電壓變化分은

$$\Delta E_{ibes}=K_d^{(i)}\sum_{j=1}^{m}a_{ij}(\Delta P_L^{(i)})_j \qquad (36)$$

따라서 $\frac{\Delta X_{des}^{(i+1)}}{\Delta X^{(i+1)}}=\frac{K_d^{(i)}}{K^{(i)}}=\frac{\Delta E_{ides}}{\Delta E_i}$

即 $\Delta X_{des}^{(i+1)}=T\cdot\Delta X^{(i+1)}$ (37)

여기서 $T=\frac{\Delta E_{ides}}{\Delta E_i}=\frac{E_{imax}-E_i^{(i)}}{E_i^{(i+1)}-E_i^{(i)}}$ (38)

마찬가지로 萬一 node i의 電壓偏差가 가장 크고 電壓最小値보다 적을 경우에는

$$T=\frac{\Delta E_{ides}}{\Delta E_i}=\frac{E_i^{(i)}-E_{imin}}{E_i^{(i)}-E_i^{(i+1)}} \tag{39}$$

으로 된다.

이와 같이 하여 萬一 $(i+1)$ 단계에서 電壓監視點의 電壓絶對値가 制限範圍를 벗어나는 것이 發生하면 T값을 計算하여 ΔX값을 反復計算에 의해서 修正하며 電壓이 모두 制限範圍內로 들어간 다음에는 이를 固定시켜 놓고 最適化計算을 계속한다.

以上 本論文에서 感度行列과 gradient法을 利用한 無效電力潮流의 最適制御方法을 Flow Chart로 表示하면 그림 1과 같다.

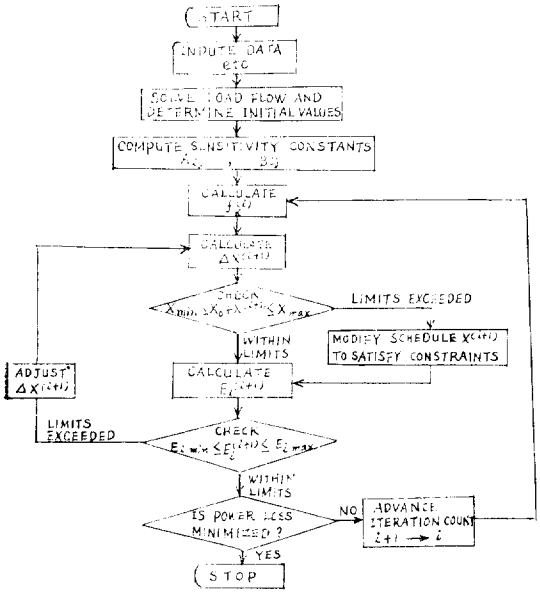

그림 1. 無效電力潮流의 最適制御의 흐름
Fig. 1. Flow chart for optimum control of reactive power flow.

4. Model系統에 대한 計算例

Model系統으로 그림 2의 ward-hale系統을 택하여 本論文에서 提示한 algorithm에 의해서 무효전력 최적제어에 의한 電力損失 最小化 過程을 說明한다.

系統의 初期狀態와 그때의 潮流計算 結果는 表 1과 같고 電壓 및 無效電力潮流의 感度定數는 表 2와 같다.

表 1. 系統의 初期狀態
Table 1. Existing Conditions on system.

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

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.

$1.05\leqq E_1\leqq 1.05,\ 0.95\leqq E_2\leqq 1.1$

$0.7\leqq N_4, N_7\leqq 1.3$

$0\leqq Q_{c4}, Q_{c6}\leqq 60(\mathrm{MVA})$

여기서 E_1은 slack node로 1.05에 固定시키는 것으로 하였다.

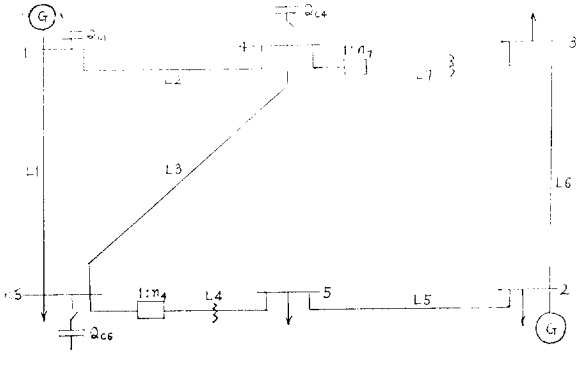

그림 2. ward-hale系統
Fig. 2. ward-hale system.

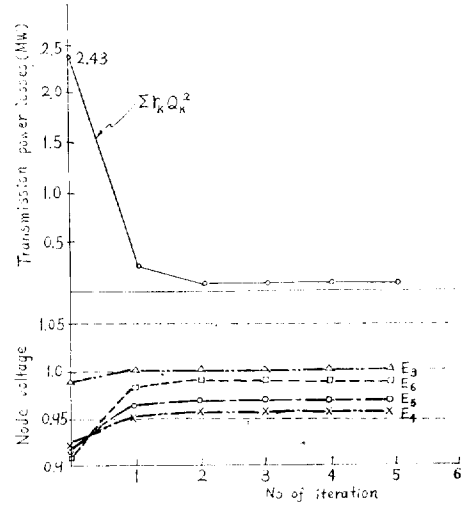

그림 3. 最適制御의 收束過程
Fig. 3. Convergent process of optimum control.

表 2. 感 度 定 數
Table 2. Sensitivity Constants.

Dependent variables	Operating variables					
	E_1	E_2	N_4	N_7	Q_{c4}	Q_{c6}
E_3	0.8371	0.482	−0.1086	0.6852	0.2375	0.1133
E_4	0.8327	0.3574	−0.1003	−0.1652	0.2354	0.1134
E_5	0.5810	0.6930	0.4974	−0.0836	0.08010	0.1960
E_6	0.8064	0.4219	−0.2231	−0.0843	0.1145	0.2682
L_1	0.5592	−0.8314	0.4403	0.1666	−0.2246	−0.5285
L_2	0.7278	−0.9892	0.2795	0.4569	−0.6536	−0.3217
L_3	0.0952	−0.1423	0.2647	−0.1643	0.2751	−0.3375
L_4	−0.7845	0.7467	−0.6000	0.0136	−0.1185	−0.2527
L_5	−0.9635	0.7502	−0.7840	0.0911	−0.1378	−0.3193
L_6	−0.7678	0.5464	0.0581	−0.5743	−0.2135	−0.1076
L_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_6로 하고 制限條件은 $0.95 \leqq E_i \leqq 1.05$로 定하였다.

表 3. 最適制御 結果
Table 3. Results for optimum control

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

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

最適制御計算結果는 表 3과 같고 制御過程을 나타내면 그림 3과 같다.

그림 3에서 알 수 있는바와 같이 단 2回反復計算으로 最終的인 解를 얻을 수 있었고 評價函數値도 2.43에서 0.05로(조류계산결과 0.4) 減小하였으며 所要計算時間은 加減算이 1.5μs정도의 計算機로 3秒程度(感度定數計算時間除外)이었다.

또한 實際의 總損失은 10.6Mω에서 8.63Mω로 18.5% 減小되었다.

參考로 母線數 16, 가지(branch)數 18, 操作設備 13個所의 韓電京仁系統에서의 計算結果는 評價函數値가 235에서 154로 減少하고 所要計算時間은 3.47秒이었으므로 實系統에서 本方式을 on-line制御에 適用可能할 것으로 思料된다.

5. 結　論

電壓 및 無效電力潮流의 瞬時制御를 on-line으로 處理함에 있어서 가장 要望되는 것은 計算 Algorithm의 單純化로 電子計算機의 記憶容量을 減小하고 所要計算時間을 最大로 短縮하는 것이며 Energy節減에 부응하여 電力損失 最小化方案이 더욱 바람직하다 하겠으므로

本論文에서는

(1) 感度行列을 基礎로 定式化된 電力損失最小化問題를 利用하여

(2) 系統電壓을 規定値內로 維持시키는 條件下에서 2次式으로 表示되는 電力損失方程式을 目的函數로 擇하여 gradient法에 의한 反復計算으로 그 解를 얻었으며.

(3) 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 check함에 있어서 潮流計算에 의하지 않고 電壓感度定數를 이용한 L·P計算으로 쉽게 check하고

(4) 만일 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토록 하므로서 最適制御方式을 單純化하는 한편 制御에 所要되는 時間을 大幅短縮시켜 on-line制御에 適用할 수 있도록 하였다.

參 考 文 獻

1. 宋吉永, "電力系統의 電壓無効電力制御에 關한 研究", 漢陽大學校產業科學研究所, 1976. pp.39~77.
2. A. Kishore, E.F. Hill, "Static optimization of reactive power sources by use of sensitivity parameters," AIEEE, Trans. Vol.PAS-90, pp. 1166~1173, 1971.
3. J.F. Dopazo, O.A. Klitin, G.W. Stagg, "An optimization technique for real and reactive power allocation", of thc IEEE, Vol. 55, pp. 1877~1885, 1967.
4. H.W. Smith "Minimizing powcr transmission losses by reative-volt-ampere control", AIEE, Trans, Vol.82, pp.542~544, 1963.
5. John Peschon, et al, "optimum control of reactive power flow, IEEE Trans, Vol. PAS-87, pp.40~48, 1968.
6. Ichiro Hano, Yasuo Tamura "Real time control of system voltage and reactive power", Waseda University, Tokyo, Japan, 1968, pp.1~25.