

# QP技法에 의한 過負荷解消를 위한 最適負荷遮斷 및 發電再配分

PART (2)

## — 最適化 節次 및 그 適用 —

### Load Shedding and Generator Rescheduling By Quadratic Programming — Part II :

### — Optimization Procedure and Its Application —

文 永 鉉

延世大 助教授

要約— 過負荷解消를 위한 負荷遮斷 및 發電再配分の 最適解를 구하는 方法으로 QP (Quadratic Programming) 技法을 適用하는 Approach를 提案하였으며, 이 Approach는 Part I에서 開發된 線形모델을 使用하였다.

LSGR問題에 대한 Algorithm으로 證년에는 LP (Linear Programming) Approach가 가장 效果的인 것으로 생각되어 왔으나 이 方法의 短點은 發電費用函數의 部分的 線形化(Piecewise Linearization)에 따라 선택된 Line Segment 數 만큼의 새로운 不等式條件이 追加로 考慮되어야 한다. 또한 LP技法의 適用을 위하여는 各 不等式마다 Slack Variable을 導入해야 하기 때문에, LSGR問題에 대한 LP技法適用은 比較的 적은 規模의 系統에 대해서도 Dimensionality問題에 當면하게 된다.

LSGR問題에 대한 Solution Algorithm을 開發함에 있어서 實際의 Operation方針에 따라 階層方式의 Approach를 採擇하였으며 그 最適化 Level을 (i) 最適負荷遮斷(Optimal Load Shedding), (ii) 最適無效電力補償 및 (iii) 最適發電再配分(Optimal Generation Rescheduling)으로 나누어 取扱 하였다.

이 階層方式의 Approach는 最適化過程을 간소화시킬 뿐 아니라 計算時間도 현저히 줄일 수 있다.

上記 3개의 Optimization Level에 대한 最適化Algorithm이 記述되어 있으며 17-bus 및 50-bus System에 대한 數值計算結果가 提案된 Algorithm의 實用性을 立證한다.

#### NOTATIONS

$a_i, b_i$	:	generation cost coefficients for incremental power generation of generator $i$
$D_a$	:	diagonal matrix with elements $a_i$
$\alpha_i$	:	proportional ratio between active and reactive loads
$P, Q$	:	real and reactive bus injection powers
$F, G$	:	real and reactive line flow
$S$	:	line flow
$V_{sp}$	:	specified bus voltage
$\epsilon$	:	bus voltage tolerance limit
$\theta_i$	:	phase angle of bus voltage $V_i$
$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$	:	phase difference between bus voltages $V_i$ and $V_j$
$H, N, J, L$	:	Jacobian matrix
$B$	:	loss coefficient matrix
$N$	:	number of system buses
$n = N - 1$	:	dimensionality of bus admittance matrix
$\Delta$	:	incremental value
$Y, G, B$	:	bus admittance, conductance and susceptance
$y, g, b$	:	line admittance, conductance and susceptance

$K_{Pk,i}, K_{Qk,i}$  : sensitivities of power flow of line  $k$  to real and reactive injection powers at bus  $i$   
 $\underline{1}$  : a vector with all elements equal to unity  
 subscript G, L, C: control units of generator, load and condenser  
 subscript sp : specified  
 subscript u, l : upper and lower limits  
 subscript ovz : overload  
 superscript o : evaluation at the ambient operating point  
 superscript M : modified  
 underlined letter : a vector  
 upperdotted letter: a complex number

## I. 緒論

從來에는 LSQR問題解析을 위한 手段으로 系統의 制約條件을 線形化한 線形모델을 사용하고 最適化技法으로 LP技法을 適用하는 것이 가장 效果的인 方法으로 생각되어 왔다[6-9] 그러나 이 方法의 가장 큰 短點은 發電費用函數의 部分的線形化(Piecewise Linearization)이 필수적으로 要求되며 이에 새로운 不等式이 追加로 考慮되어야 한다. 더우기 LP Algorithm의 適用을 위하여는 各 不等式에 대하여 Slack Variable을 導入하여야 하기 때문에 Matrix의 Dimension이 커지며 이에 따라 所要記憶容量 및 計算 時間이 급속히 增加한다.

Chan과 Yip[8]은 이러한 Dimensionality 問題를 解決하기 위하여 Bartels-Golub Decomposition [10-12]에 기초를 둔 Sparse Linear Programming技法의 適用을 試圖하고 있으나, 이 方法 역시 Matrix의 Dimension에 비례하여 計算負擔을 增加시키므로 大電力系統에의 適用은 많은 問題點을 안고 있다.

Subramanian[3]은 Lagrangian Multiplier法에 의한 Algorithm을 提案하였으나 이 方法은 Part I에서 指摘한 바와 같이, 복잡한 모델을 採用하였기 때문에 計算時間이 많이 걸린다.

本 論文은 Wolfe's Method와 Kuhn-Tucker Theory에 基礎를 2가지의 QP Algorithm을 提示하고 있다. 이 QP技法의 適用은 實際의인 Cost Function과 가까운 2次 Cost Function을 쓸 수 있고 또 QP技法에서의 最適解는 一次聯立方程式의 解를 구함으로써 얻어지므로, 提案된 QP Algorithm 들은 LP方法에서 보다 計算時間 및 所要記憶容量을 줄

일 수 있다. 더군다나 Piecewise Linearize된 Cost Function대신에 Quadratic Cost Function을 使用하므로 QP Algorithm에서의 最適解는 LP Algorithm에 의한 解보다 더 낮은 發電費用을 주는 利點도 있다.

## II. 階層式 最適化(Hierarchical Optimization)

LSQR問題에 대한 Solution Algorithm을 開發하는데 있어서, 주어진 制約條件下에서 하나의 Cost Function을 最小化하는 解를 求하는 것보다 有效電力과 母線電壓 및 無效電力과 發電費用사이의 Decoupling을 이용하여 階層體系(Hierarby System)는 各種 制御裝置投入決定이 于先順位에 따라야 하므로 本 研究에서는 다음과 같은 最適化 過程의 Level이 採擇되었다.

Level(1): 負荷遮斷量의 總合을 最小로 하는 最適負荷遮斷Algorithm의 實現

Level(2): 負荷遮斷에 起因한 母線電壓의 變化를 補償할 수 있는 最適無效電力制御對策Algorithm의 實現

Level(3): 發電費用을 最小로 하는 最適發電再配分Algorithm의 實現

LSQR問題에 대한 最適解를 구하는 Program은 通常 Contingency Analysis Program과 協調를 통하여 遂行되며 上記 Algorithm들과 Contingency Program사이의 Interaction이 Fig 1의 Flow Chart에 주어져 있다. Flow Chart上段에는 從來의 Load Flow Program을 使用하여 非正常電壓을 抑制하며 下段에는 解의 有效性이 各 不等式 條件에 대하여 再檢討되도록 하였다. 解가 有效하지 않은 경우는 Algorithm에 의하여 구해진 解가 線形化된 Model에 의하여 計算되었기 때문이며 이때에는 새로운 Operating Point를 찾아 Loop②를 따라 線形모델을 修正할 필요가 있다. 하나 이러한 경우는 System의 Disturbance가 심한 경우에 該當한다.

## II. 最適負荷遮斷 알고리즘 (Optimal Load Shedding Algorithm)

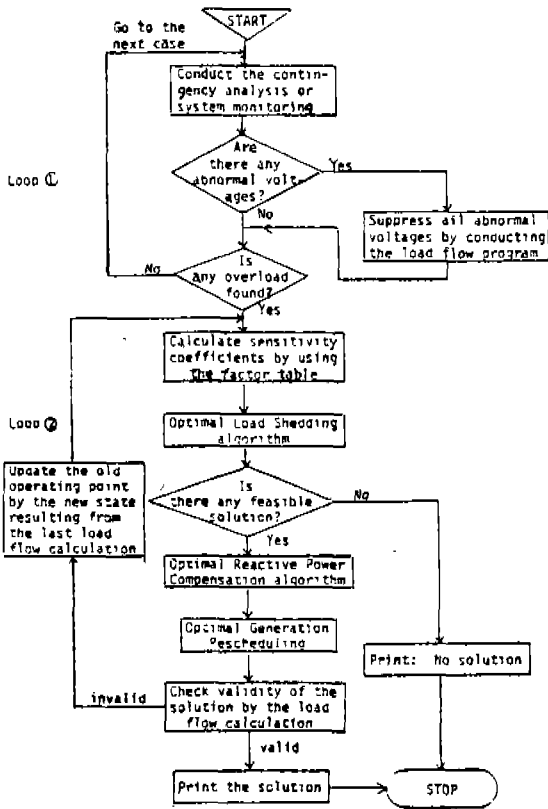


Fig.1 LSQR Program Flow Chart.

本節은 주어진 System制約條件下에서 負荷遮斷量을 最小로 하는 Algorithm을 取扱하고 있으며 Optimization問題는 Part I에서 提示된 線形모델을 使用함으로써, 다음과 같이 公式化될 수 있다.

Minimize

$$J_L = \sum_i \Delta P_{Li} \quad \dots \dots \dots (1)$$

Subject to

(i) 電力需給條件 (Power Balance Condition)

$$\underline{1}^T \Delta P_G - \underline{1}^T \Delta P_L - 2[P_G^0 - P_L^0]^T B[\Delta P_G - \Delta P_L] = 0 \quad (2)$$

(ii) 線路潮流制約條件 (Line Flow Constraints)

$$\sum_i [K_{PK,i}(\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Li}) + K_{Qk,i}(\Delta Q_{Gi}^* + \Delta Q_{Ci}^* - \Delta Q_{Li})] < - S_{k,ovl} \quad (3)$$

for all overloaded or vulnerable lines k.

(iii) 發電上, 下限條件 (Power Generation Limits)

$$P_{Gi}^0 - P_{Gi}^0 < \Delta P_{Gi} < P_{Gui} - P_{Gi}^0 \quad (4)$$

(iv) 負荷條件 (Load Constraints)

$$P_{Lli} - P_{Li}^0 < \Delta P_{Li} < P_{Lui} - P_{Li}^0 \quad (5)$$

$$\Delta Q_{Li} = \alpha_i \Delta P_{Li} \quad \text{where } \alpha_i = \frac{Q_{Li}^0}{P_{Li}^0} \quad (6)$$

上記 Formulation에서는 母線電壓制約條件의 考慮는 保留되었으며 負荷遮斷時의 母線電壓調整은 最適無效電力補償 (Optimal Reactive Bus Power Compensation) Algorithm에서 취급될 것이다. 하지만 Constraint(3)은 最適值  $\Delta Q_{Gi}$  및  $\Delta Q_{Ci}$ 를 包含하고 있으며, 이것은 最適解를 求하기 위해서는 負荷遮斷 Algorithm과 無效電力補償 Algorithm 사이의 反復計算過程이 必要함을 의미한다. 이러한 反復計算은 計算時間을 상당히 增加시키므로, 負荷遮斷에 따른 無效電力變化는 該當母線의 調容量 또는 發電設備에 의하여 完全히 補償될 수 있다는 假定下에서  $\Delta Q_{Gi}$  및  $\Delta Q_{Ci}$ 를 決定하며, 本 假定은 實際 大部分의 境遇에 있어서 適用된다는 점에서 그 妥當性이 認定된다. 또한 調容量이 ない나 發電設備가 없는 母線에서는  $\Delta Q_{Gi}$  및  $\Delta Q_{Ci}$ 가 Zero임으로 式(3)의 制約條件은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sum_i [K_{PK,i}(\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Li}) - K_{Qk,i} \{1 - I_{GC}(i)\} \Delta Q_{Li}] < S_{k,ovl} \quad (7)$$

where

$$I_{GC}(i) = \begin{cases} 1 & \text{if bus } i \text{ has any reactive power-generating facility (since } \Delta Q_{Gi} + \Delta Q_{Ci} - \Delta Q_{Li} = 0). \\ 0 & \text{otherwise (since } \Delta Q_{Gi} = 0, \Delta Q_{Ci} = 0) \end{cases}$$

損失係數 (Loss Coefficient) Vector  $\beta$ 를 導入함으로써, 電力需給條件(2)는 다음과 같이 적 수 있다. 쓸

$$[\underline{1} - \underline{\beta}]^T \Delta P_G - [\underline{1} - \underline{\beta}]^T \Delta P_L = 0 \quad (8)$$

$$\text{where } \underline{\beta} = 2B^T [P_G^0 - P_L^0].$$

그리고 式(6)을 式(7)에 代入하면 다음과 같이 된다.

$$\sum_i [K_{PK,i} \Delta P_{Gi} - \{K_{PK,i} + \alpha_i (1 - I_{GC}(i)) K_{Qk,i}\} \Delta P_{Li}] < - S_{k,ovl} \quad (9)$$

結果的으로, Optimization (1)~(6)은 制約條件 (8),

(4) (9)하에서 (1)을 最小化하는 問題로 간략화된다.

#### IV. 最適無効電力補償 (Optimal Reactive Power Compensation) Algorithm

負荷遮斷이 되었을 경우, 各 母線電壓偏差를 특정한 허용범위내에 유지하기 위하여 母線無効電力을 再調整하는 것이 必要하다.

母線無効電力變化가 過負荷線路上에 미치는 影響의 解析은, 從來에는 潮流計算 (Load Flow Calculation) Program에 의해서 行해졌으나 計算時間이 많이 걸리는 短點이 있었다. [4-8]

여기에서는 系統의 母線電壓偏差를 最小로 하기 위하여 最小自乘偏差法 (Least Square Error Method)를 適用하는 Algorithm을 提示한다.

前節에서의 最適負荷遮斷Algorithm을 遂行함으로써 各 母線에서의 最適負遮量이 決定되며 주어진 負荷遮斷條件下에서의 最適無効電力補償은 다음과 같이 公式化할 수 있다.

$$\text{Minimize } J_V = \sum_i \Delta V_i^2 \quad (10)$$

subject to

$$\hat{L} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\Delta Q_{GC1} - \Delta Q_{L1}^*)/V_1 \\ \vdots \\ (\Delta Q_{GCn} - \Delta Q_{Ln}^*)/V_n \end{bmatrix}$$

$$\Delta Q_{GCi} < \Delta Q_{GCi} < \Delta Q_{GCui} ; i=1,2,\dots,n \quad (11)$$

where

$$\Delta Q_{GCi} = \Delta Q_{Gi} - \Delta Q_{Ci}$$

$$\Delta Q_{Gxi} = Q_{Gxi} - Q_{Gi}^0, \Delta Q_{Gui} = Q_{Gui} - Q_{Gi}^0$$

$$\Delta Q_{Cxi} = Q_{Cxi} - Q_{Ci}^0, \Delta Q_{Cui} = Q_{Cui} - Q_{Ci}^0 \quad (12)$$

上記 最適化問題에 最小自乘法 (Least Square Deviation method)를 適用시킴에 있어서 다음의 Approach를 따른다.

(a) 各 母線에서 無効電力變化분의 完全補償을 試圖한다.

(i) 各 母線에서 無効電力이 成就되면 즉

$$\Delta Q_{GCi}^* = \Delta Q_{Li} \quad \text{for all buses } i \quad (13)$$

이면, 이 結果가 最適無効電力補償이며 計算은 終了된다.

(ii) (i)의 條件을 滿足시키지 않으면 Step(b)를 遂行하라.

(b) 無効電力이 完全補償된 母線에 대한 電壓·無効電力關係式을 式(11)에서 除去하고 最小自乘法에 의하여  $\Delta Q^*$ 를 計算하라.

上記 Approach에 있어서 Step(b)를 보다 구체적으로 記述할 필요가 있다. 無効電力의 完全補償이된 母線에 대한 方程式을 除去한 나머지 式들로 이루어진 Matrix를 A라 하고, 式(11)에서의 無効電力上·下限條件을 追後 解의 有效性 判別에서 考慮하기로 하면, 式(10)-(11)의 最適化 問題는 다음과 같이 된다.

$$\text{Minimize } J = \sum_i \Delta V_i^2 \quad (14)$$

Subject to

$$\hat{A} \Delta \underline{V} = \Delta \underline{Q}^f \quad (15)$$

式(14), (15)의 最適解는

$$\Delta \underline{V}^* = \hat{A}^T [\hat{A} \hat{A}^T]^{-1} \Delta \underline{Q}^f \quad (16)$$

으로 주어지며, 이에 따른 母線無効變化値는 다음과 같다.

$$\Delta \underline{Q}^* = \hat{L} \Delta \underline{V}^* \quad (17)$$

where

$$\Delta \underline{Q}^* = [\Delta \hat{Q}_1^*, \Delta \hat{Q}_2^*, \dots, \Delta \hat{Q}_n^*]^T$$

$$\Delta \hat{Q}_i^* = \Delta Q_i^* / V_i^0$$

따라서  $\Delta Q_i^*$ 는

$$\Delta Q_i^* = V_i^0 \Delta \hat{Q}_i^* \quad \text{for all } i \quad (18)$$

로써 주어지며, 式(9)로부터 最適無効電力補償은 다음에 의하여 計算된다.

$$\Delta Q_{GCi}^* = \Delta Q_i^* + \Delta Q_{Li} \quad \text{for all } i \quad (19)$$

여기에서  $\Delta Q_{GCi}$ 는 上記 過程에서 留保된 式 (11)의 無効電力上·下限條件 滿足與否가 檢討되어야 하며, 이것은 다음의 過程에 따라 遂行된다.

(i) 式(16)-(19)에 의거 모든  $\Delta Q_{GCi}$ 를 計算하라.모

든  $\Delta Q_{Gci}$ 가 上·下限條件을 滿足시키면 計算을 終了하고, 그렇지 않으면 Step (ii)를 遂行하다.

(ii) 上·下限條件을 만족시키지 않는  $\Delta Q_{Gci}$ 에 대한 母線을 모두 擇하여 그 母線에 대한 電壓·無效電力關係를 式(15)에 追加하고 Step(i)을 反復한다. 단 式(15)의 右邊의  $\Delta Q_i^f$ 는 다음과 같이 定한다.

$$\Delta Q_i^f = \begin{cases} (\Delta Q_{Gcui} - \Delta Q_{Li}) / V_i^0, & \text{if } \Delta Q_{Gci} > \Delta Q_{Gcui} \\ (\Delta Q_{Gcli} - \Delta Q_{Li}) / V_i^0, & \text{if } \Delta Q_{Gci} < \Delta Q_{Gcli} \end{cases} \quad (20)$$

上記의 最適化過程에 대한 Flow Chart는 Fig. 2와 같다.

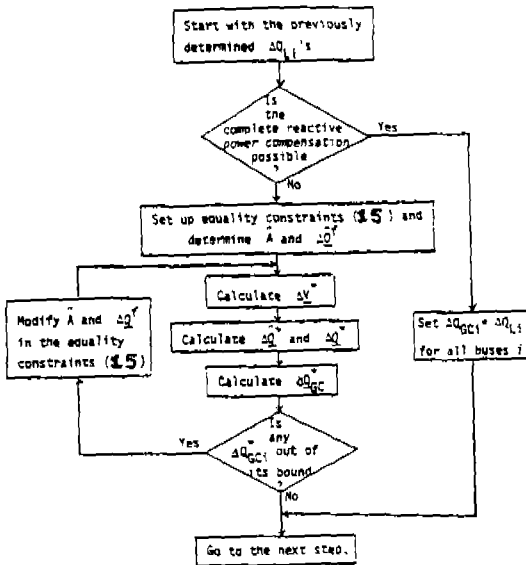


Fig. 2 Optimal reactive power compensation algorithm.

## V. 最適發電再配分 (Optimal Generation Rescheduling) Algorithm

本節에서는, 前述한 알고리즘들에 의하여 決定된 最適負荷遮斷 및 無效電力補償下에서, 發電費用을 最小로 하는 알고리즘의 開發을 取扱한다.

Part I에 提示된 線形모델을 사용함으로써, 最適發電再配分問題는 다음과 같이 公式化 된다.

$$\text{Minimize } J_G = \frac{1}{2} \Delta P_G^T D_a \Delta P_G + b^T \Delta P_G \quad (21)$$

subject to

制約條件:

(i) 電力需給條件 (Power Balance Condition)

$$[\mathbf{1} - \underline{\beta}^0]^T \Delta P_G = [\mathbf{1} - \underline{\beta}^0]^T \Delta P_L^* \quad (22)$$

(ii) 線路潮流條件 (Line Flow Constraints)

$$\sum_i (K_{Pk,i} \Delta P_{Gi}) < -(S_{k,ovl} - \Delta S_{LQ,k}) \quad (23)$$

for all overloaded and vulnerable lines.

where

$$\Delta S_{LQ,k} = (K_{Pk,i} + \alpha_i K_{Qk,i}) \Delta P_{Li}^* - \Delta S_{Q,k}$$

(iii) 發電上·下限條件 (Power Generation Limit)

$$P_{Gci} - P_{Gi}^0 < \Delta P_{Gi} < P_{Gui} - P_{Gi}^0$$

for all buses i (24)

上記 最適化問題의 解는 Kuhn-Tucker理論을 使用함으로써 求할 수 있으며, 이에 대한 Lagrangean Function)은 다음과 같이 주어 진다.

$$L(\Delta P_G, \lambda_0, \lambda) = \frac{1}{2} \Delta P_G^T D_a \Delta P_G + b^T \Delta P_G - \lambda_0 ([\mathbf{1} - \underline{\beta}^0]^T \Delta P_G - \Delta P_D) - \lambda^T (K \Delta P_G + \Delta S_{k,ovl}^M) \quad (25)$$

where

K = coefficient matrix for all inequalities in (29)

$$\Delta P_D = [\mathbf{1} - \underline{\beta}^0]^T \Delta P_L^* \quad (26)$$

$$\Delta S_{k,ovl}^M = S_{k,ovl} - \Delta S_{LQ,k}$$

制約條件(27)을 Lagrangean Function에 包含시키면 2개의 Multiplier를 도입해야 하므로 計算能率이 低下된다. 따라서 本 研究에서는 式(27)을 Lagrangean Function에서는 考慮를 保留하고, 最終結果에 대하여 解의 有效性을 判斷하는 데에 反影시킬 것이다.

式(25)로부터 Kuhn-Tucker의 필요조건을 구하면

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta P_G} = 0$$

or

$$D_a \Delta P_G + b - \lambda_0 [\mathbf{1} - \underline{\beta}^0] - K^T \lambda = 0 \quad (27)$$

로 되며, 式(31)로부터  $\Delta P_G$ 가 計算된다.

즉

$$\Delta P_G^* = D_a^{-1} \{ \lambda_0 [\mathbf{1} - \underline{\beta}^0] + K^T \lambda - b \} \quad (28)$$

式(25), (26) 및 (30)으로부터  $\lambda_0$ ,  $\lambda$ 를 求하기 위해 새로운 Matrix  $U_\lambda$ 를 다음과 같이 定義한다.

$$U_\lambda: \text{diagonal matrix with elements given by}$$

$$u_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } \Delta P_{Gi}^* \text{ satisfies the strict inequality of } i\text{-th constraint in (26)} \\ .1 & \text{if } \Delta P_{Gi}^* \text{ satisfies the equality of } i\text{-th constraint in (26)} \end{cases}$$

그러면, 制約條件(26)은 다음의 2개의 條件式으로 나누어 쓸 수 있다.

$$U_\lambda \{K \Delta P_G^* + \sum_{Ovz}^M\} = 0 \quad (29)$$

$$[U - U_\lambda] \{K \Delta P_G^* + \sum_{Ovz}^M\} < 0 \quad (30)$$

(단 式(30)에서의 等號는  $[U - U_\lambda]$ 의 Zero-row에 대해서만 성립함)

뿐만 아니라, 式(26) 및 (28)을 式(22)에 代入하면

$$[1 - \beta^0]^T D_a^{-1} \{ \lambda_0 [1 - \beta^0] + K^T \lambda - b \} = \Delta P_D$$

가 되며,  $\lambda$ 를  $U_\lambda \lambda$ 로 代置하면 다음 式을 얻는다.

$$\lambda_0 \{ [1 - \beta^0]^T D_a^{-1} [1 - \beta^0] \} + [1 - \beta^0]^T D_a^{-1} [K^T U_\lambda \lambda - b] = \Delta P_D$$

여기서  $\sigma_1$ 을

$$\sigma_1 = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \beta_i^0)^2}{a_i} \quad (31)$$

라 두면,  $\lambda_0$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\lambda_0 = \sigma_1 \{ -[1 - \beta^0]^T D_a^{-1} [K^T U_\lambda \lambda - b] + \Delta P_D \} \quad (32)$$

여기서  $\lambda_0$ 는 Incremental Unit Generation Cost을 意味할만 하다.

式(28) 및 (32)를 式(29)에 代入하고, Zero-Multiplier와 Dependent Equation들을 除去함으로써 다음 結果를 얻는다.

$$\hat{M}^{-1} \hat{U}_\lambda (K D_a^{-1} \{ b - (1 - \beta^0) \sigma_1 [ (1 - \beta^0)^T D_a^{-1} b + \Delta P_D ] \} - \sum_{Ovz}^M) \quad (33)$$

여기서  $M$ 은 다음과 같이 定義되며 Nonsingular N Matrix이다.

$$M = \hat{U}_\lambda K [D_a^{-1} - D_a^{-1} (1 - \beta^0) \sigma_1 (1 - \beta^0)^T D_a^{-1}] K^T \hat{U}_\lambda^T \quad (34)$$

式(33)은 式(32)에 代入하면  $\lambda_0$ 가 決定되며,  $\Delta P_G$

가 式(28)로 부터 計算된다. 그러나, 여기서 計算된  $\Delta P_G$ 는 條件式(24) 및 (30)을 滿足하는지 如何가 檢討되어야 한다. Kuhn-Tucker Condition으로 부터 式(3)을 滿足하는  $\Delta P_G$ 와 關聯된  $U_\lambda$ 가 분명히 存在하며 이러한  $U_\lambda$ 는 Trial and Error Method에 의하여 찾을 수 있다. 또한 系統의 過負荷는 몇개의 단순한 原因에 의하여 發生되므로 적당한  $U_\lambda$ 의 豫測도 可能하다.

式(24)의 制約條件은,  $\Delta P_{Gi}$ 가 許容範圍를 벗어날 경우 다음과 같이 取扱한다.

$$\Delta P_{Gi}^* = \begin{cases} \Delta P_{Gui} & \text{if } \Delta P_{Gi}^* > \Delta P_{Gui} \\ \Delta P_{Gzi} & \text{if } \Delta P_{Gi}^* < \Delta P_{Gzi} \end{cases} \quad (35)$$

만약  $\Delta P_{Gi}$ 중 어느 하나라도 上·下限値로 定해 야 한다면, 極限値로 定해지지 않은 나머지  $\Delta P_{Gi}$ 들은 다시 計算되어야 한다. 그리고 새로운  $\Delta P_{Gi}$ 에 대하여 같은 過程을 反復함으로써 最終結果의 모든  $\Delta P_{Gi}$ 가 Feasible Region내에 들어 가도록 해야 한다. 따라서 本 研究에서는 다음 過程을 열 고리즘에 포함시켰다.

(i) 式(28)에 의하여 모든  $\Delta P_{Gi}$ 를 計算하라.

만약 모든  $\Delta P_{Gi}$ 가 條件(24)를 滿足시키면 計算을 終了하고 그렇지 않으면 Step(ii)로 가라

(ii) 上·下限値를 벗어나는 모든  $\Delta P_{Gi}$ 를 적당한 境界値의 값으로 定하고, 그 때마다 나머지 變數에 對하여 Feasible Solution 存在與否를 Check하라, 여기서 Feasible Solution이 存在하지 않을 경우 고려되고 있는  $\Delta P_{Gi}$ 는 境界値로 定해 질 수 없다. 上·下限値를 벗어난  $\Delta P_{Gi}$ 들 중 가능한 것은 모두 境界値로 固定시키고 Step(iii)으로 가라.

(iii) 系統의 Parameter와 制約條件을 修正하고 Step(i)으로 가라

그림 3의 Flow Chart는 最適發電再配分 열 고리즘을 要約하여 圖示한 것이다.

## VI. 數值結果

LSGR 問題의 最適解를 구하는데 있어서 LP (Linear Programming) 및 QP (Quadratic Programming) 適用의 差異點이 Fig. 4에 比較되어 있으며, QP에 對한 計算時間 및 所要記憶容量을 Reference로 취

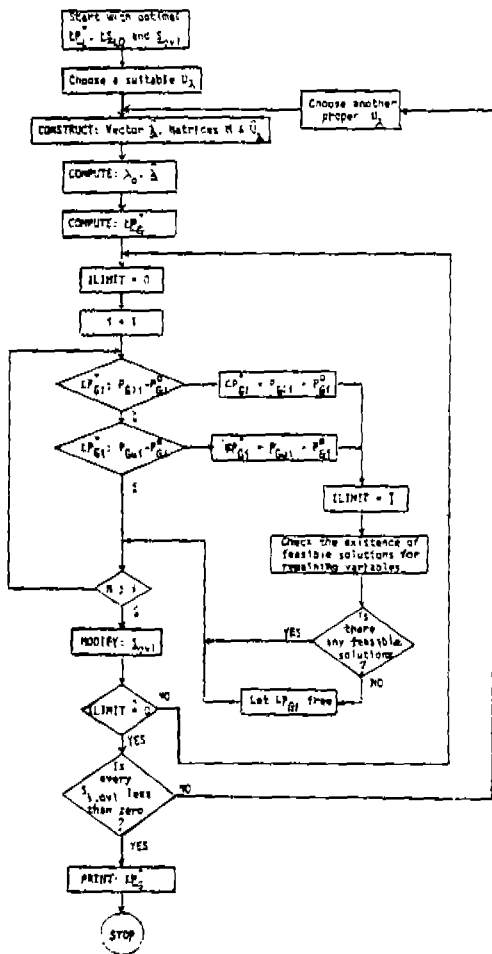
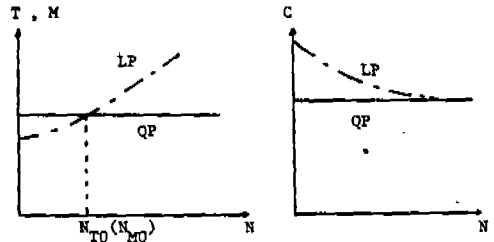


Fig. 3 Optimal Generation Rescheduling Algorithm.

하고 Unity로 正規化되었다. 發電費用도 같은 方法으로 比較되었다.  $N_{T0}$ ,  $M_{T0}$ 는 LP엘고리즘과 計算時間 및 所要記憶容量이 일치하는 Line Segment의 數를 나타내며, 50-Bus以上の 母線을 가진 系統에서는  $N_{T0}$ 는 4보다  $M_{T0}$ 는 3보다 적은 것으로 나타났다. LP方法에서 만족할만한 結果를 얻기 위해서는, 各 發電所燃料費函數에 대하여 最少한 4개의 Line Segment가 必要한 點을 考慮하면 QP의 適用이 LP보다 有利함을 알 수 있다. 더군다나 Fig 4 (b)에서 보여 주듯이 QP適用은 LP適用時 보다 더 낮은 發電費用을 얻을 수 있게 해 준다.

QP엘고리즘으로 Wolfe's Method가 있으나 LP와 비슷한 計算Structure를 갖고 있으므로 큰 記憶容量을 필요로 하므로, 본 研究에서는 Kuhn-Tucker 理論에 의한 엘고리즘을 Test하였으며, Table I에

는 이 두 方法의 所要記憶容量이 比較되어 있다.



(a) Computation time and memory (b) Generation cost  
Hor : Nr of line segments Hor : Nr of line segments  
Vert: Comp time and memory Vert: Generation cost

Fig. 4 Comparison of QP and LP.

Table I Essential Memory Requirements

Unit : byte words

System size	Adopted algorithm	No. of line segments for each generator cost function	Memory Requirements
10-bus system with 20 lines 5 generators 8 loads 3 capacitors	LP	2	2392
		3	2456
		4	3068
		6	3974
	QP(I)		2364
		QP(II)	
50-bus system with 100 lines 20 generators 35 loads 15 capacitors	LP	2	16,696
		3	20,936
		4	25,016
		6	37,496
	QP(I)		21,760
		QP(II)	

LP : linear programming  
QP(I) : quadratic programming based on Wolfe's method.  
QP(II) : quadratic programming based on Kuhn-Tucker's theory.

開發된 QP엘고리즘은 Fig. 5의 17-Bus系統 및 Fig. 6의 50-Bus系統에 대하여 Test되었으며 그 結果가 Table II에 収録되어 있다. 平均計算時間은 17-Bus System에 대하여 1.6초 그리고 50-Bus System에 대하여는 6.5초가 所要되었다. 이것은 종래의 LP엘고리즘에 의한 計算時間에 비하여 상당히 改善된 結果를 보여 주고 있다.

모든 Computer Program은 오레곤州立大學의 Cyber System(CDC CYBER 170-230) 및 BPA의 CDC System에 의하여 遂行되었다.

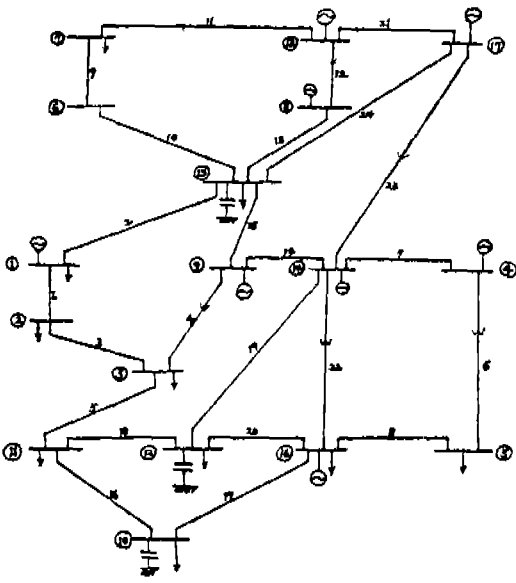


Fig. 5 17-Bus System Configuration.

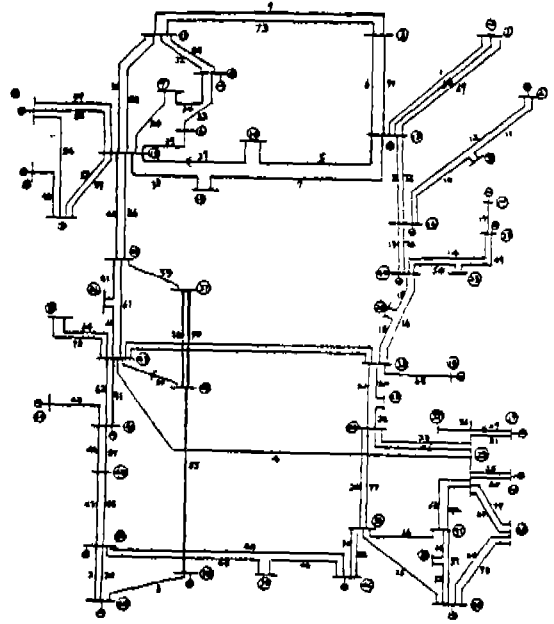


Fig. 6 50-Bus System Configuration.

Table II Summary of Numerical Results

SYSTEMS	FAULT CASES	OVERLOAD SITUATION	OVERLOAD SUPPRESSION MEASURES	COMPUTATION TIME (Seconds)			
				LOAD FLOW	CORRECTIVE ANALYSIS	LSGR	TOTAL TIME
17-BUS SYSTEM	Line outage on Line 22	Line 6: 30.0% Line 19: 0.9%	Generator Rescheduling	0.5	0.4	0.7	1.6
	Line outage on Line 11	Line 9: 6.1%	Generator Rescheduling, Load Shedding at Bus 11	0.5	0.8	0.8	2.1
	Line outage on Line 6	Line 7: 18.0%	Generator Rescheduling	0.5	0.3	0.4	1.3
	Generator outage at Bus 15	No overload	—————	0.5	—	—	0.5
	Line outage on Line 23	Line 24: 0.15%	Generator Rescheduling	0.5	0.3	0.4	1.2
50-BUS SYSTEM	Generator outage at Bus 10	Line 36: 2.8%	Generator Rescheduling, Load Shedding at Bus 7 and Bus 10	3.4	0.9	2.7	6.0
	Load outage at Bus 13	Line 36: 20.0%	Generator Rescheduling, Load Shedding at Bus 7	1.4	1.3	2.4	7.1
	Line outage on Line 37	Line 5: 15.7%	Generator Rescheduling, Load Shedding at Bus 14	3.4	1.1	2.3	6.7
	Line outage on Line 29	Line 81: 31.3%	Generator Rescheduling	3.4	1.4	1.6	6.4

## VII. 結 論

本 研究의 結果는 다음과 같이 要約될 수 있다.

- (i) LSGR問題에 대한 QP 알고리즘의 適用可能性 및 그 長點이 考察되었으며, Program Test 를 통하여 從來의 LP 알고리즘 보다 우수함이 立證되었다.
- (ii) QP 技法의 適用은 LP 方法에 비하여 計算時

間 및 所要記憶容량의 節減을 可能하게 해 주며, 또한 發電費用의 節減도 期할 수 있다.

- (iii) 無效電力補償 알고리즘이 LSGR 알고리즘에 附加되었으며, 負荷遮斷에 따른 母線電壓變動을 效果的으로 補償할 수 있다.
- (iv) 電力損失이 근소한 計算負擔의 增加로도 效果的으로 考慮될 수 있었다. \*

(參考文獻省略)