

海外論文紹介

鄭 在 吉*

Newton 法에 依한 Penalty factor의 直接
算出法 F.L. Alvarado, "Penalty Factors
from Newton's Method" IEEE Trans., Vol.
PAS-97, No. 6, pp. 2031~2040, Nov/Dec,
1978.

On line에 依한 經濟給電은 發電機의 增分費用과 送電線의 損失을 고려한 Penalty factor의 概念에 基礎를 두고 있다. 從來의 經濟給電運用은 線路의 損失을 發電機 出力의 2次式으로 表示하는 損失方程式 即 B係數法이 널리 利用되어 왔다. 本論文은 損失方程式의 B係數 및 入의 計算을 必要로 하지 않고 Newton潮流計算方法의 轉置 Jacobian 行列(極座標法)을 利用하여 직접 Penalty factor를 正確하게 算出하는 方法 및 Algorithm을 開發하여 大規模 電力系統의 經濟給電運用에 利用할 수 있도록 하였다. 이 方法의 概念은 增分損失 $\frac{\partial P_L}{\partial P_{ti}}$ 는 P_{ti} 의 微少한 增分을 要하여 이 것은 損失과 負荷의 同一한 增分에 依하여 需給平衡되어야 하고 負荷增加에 따른 周波數의 微少한 增分에 依하여 適行되는데 근거를 두고 있다.

따라서 각母線의 負荷(P_{di})는 一定負荷(P^*_{di})와 周波數의 敏感한 負荷(frequency sensitive load)로 區分하여 다음 (1)식으로 表示하였으며(여기서 I_i^P 는 그 運轉狀態에서 求할 수 있음) Penalty factor를 求하기 위하여 (7)~(4)식의 等式拘束條件를 세우고 다시 이拘束條件下에서 獨立變數 P_i 에 關한 總損失의 導函數를 求하기 위하여 (5)식과 같은 Lagrange의 未定乘數를 導入하는 方式을 使用하였다. 이와같이 하여 (6)식을 誘導하고 (6)식으로 부터 β 를 求한 다음 (7)식에서 增分損失을 求하여 (8)식으로 부터 Penalty factor를 求한다. $P_{di} = P^*_{di} + I_i^P \cdot P_D \cdots (1)$ [단 P_D 는 系統의 總 Frequency sensitive 負荷, I_i^P 는 各母線 負荷의 周波數 敏感度係數(또는 負荷配分系數임)]

$$\triangle P_i = -\triangle P_{d,i} + P_{d,i}^0 + l_i^P \cdot P_D + P_i(\bar{V}) = 0$$

*正會員：中央大工大電氣工學科副教授(當學會編修委員)

(단 $i=1, 2, \dots, m$) (2)

$$\Delta P_i = P_{\text{d}}^0 + l_i^P \cdot P_D + P_i(\bar{V}) = 0 \quad (\text{단 } i=m+1, \dots, n)$$

.....(3)

$$\Delta Q_i = Q^0_{di} + l_i^0 \cdot P_d + Q_i(\bar{V}) = 0 \quad (\text{단 } i=m+1, \dots, n)$$

.....(4)

단 m : 발전기 모선수, n : 전모선수, \bar{V} : 전압의 열 벡터.

$$L := P_L + \sum_{i=1}^n \beta_i^P \cdot \Delta P_i := \sum_{i=1}^m P_{di} - \sum_{i=1}^n P_{di^0} - P_D + \sum_{i=1}^n \beta_i^P \cdot \Delta P_i \\ + \sum_{i=1}^n \beta_i^Q \Delta Q_i \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

단 β_i 는 Lagrange의 未定乘數

$$\left[J^t + \frac{\partial P_1}{\partial \bar{V}} \right]^t \left[-\frac{1}{l^P} \right] \bar{l}^t \cdot \bar{\beta} = -\frac{1}{l^P} \left[\frac{\partial P_1}{\partial \bar{V}} \right]^t \dots \dots \dots (6)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_{ki}} = 1 - \beta_i^p, \dots \dots (7), \quad L_i = \frac{1}{\beta_i^p} \dots \dots (8)$$

本方式에 依하여 求한 Penalty factor는 從來의 B係數法에 依하여 求한 값과 같지는 않으나 모두 比例하므로 經濟給電運用에 適用時에는 何等의 差異가 有する다. Penalty factor를 求하는 從來의 B係數法은 系統의 發電機數의 2乗에 比例하는 計算을 必要로 하는데 比例 轉置 Jacobian法을 使用하는 本方式은 總母線數의 2倍보다 적은 $[2n-m]$ 의 計算을 要하다.

따라서 本方式은 극히 적은 系統이나 發電機數가 極히 적은 系統을 除外하고는 모든 系統에 있어서 B係數法에 比해 計算時間이 매우 빠르다는 特徵을 갖고 있다.

非線形性を保有する高速電力潮流解析法

S. Iwamoto, Y Tamura. "A Fast Load Flow Method Retaining Nonlinearity"
IEEE Trans. Vol 97, No. 5 pp. 1586~1599
sep/Oct, 1978.

本論文은 2次式으로 表示되는 多變數 電力潮流 方程式을 近似式이 아닌 完全正確한 Tailor 級數의 展開式

으로 表示함으로서 電子計算機에 의한 潮流計算에 있어서 1回 反復計算時 計算所要時間은大幅의으로 減少 시켜 總計算時間은 상당히 短縮시킬 수 있는 새로운 電力潮流計算法을 提示하였다. 그概要是 電力潮流方程式은 直交座標 表示法에서 多變數의 2次式으로 表示될 수 있으므로 이 多變數函數를 Tailer 級數로 제3項 즉 2次項까지만 포함되고 2次項以上은 零이 된다는데 근거를 두고 있다. 즉 電壓의 有効 및 無効分에 對應되는 未知 變數(眞值)의 $n \times 1$ 列ベ터를 X , 電力의 有効分, 無効分 및 電壓의 絶對值에 對應되는 指定值의 $n \times 1$ 列ベ터를 Y , $n \times n^2$ 의 係數行列을 A , 變數의 推定值(近似解)의 $n \times 1$ 列ベタ를 x , X 의 誤差(修正量)의 $n \times 1$ 列ベ터를 dx 라고 하면 Y 는 다음 (1)식으로 表示할 수 있으며 (1)을 Tailer 級數로 展開하면 (2)식의 正確한 式으로 表示할 수 있다.

$$\left[Y_i \right] = \left[Y(X_i) \right] + \left[J \right] \left[\Delta X \right] + \frac{1}{2} \left[H \right] \begin{pmatrix} \Delta X_1 & \Delta X_1 \\ \Delta X_1 & \Delta X_2 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta X_i & \Delta X_i \\ \vdots & \vdots \\ \Delta X_n & \Delta X_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

단 $[J]$ 는 $N \times R$ 方法과 같은 Jacobian 行列, $[H]$ 는 Y_s 의 2次偏導函數의 $n \times n^2$ 行列임. 다시 (2)식의 右邊 3項은 $[Y(\Delta x)]$ 로 되어 Y_s 는 (3)식으로 簡單化 할 수 있다.

$$[Y] = [Y(X)] + [J][\Delta X] + [Y(\Delta X)] \quad \dots\dots(3)$$

따라서 $J \cdot \Delta X^{(r+1)} = Y_s - Y(X_s) - Y(\Delta X^{(r)})$ ……(4) 으로
표시된다.

(4) 식은 近似式이 아니고 正確한 展開式으로 부터
 誘導된 式이고 ΔX 및 $Y(\Delta X)$ 는 反復計算동안 그 값이
 變하므로 初期推定值 X_0 는 常數로 取級할 수 있으며
 또한 X_0 의 函數인 J 도 일단 한번 計算되면 反復計算
 동안 繼續 常數로 取級된다.

따라서 $\Delta x^{(r)}$ 를 求하는 데 1回反復에 要하는 計算時間은大幅減少시킬 수 있다.

計算反復回數는 X .의 初期值 選定에 큰 영향을 받으며 이를 적당히 選定하면(즉 $e+jf=0.866+j0.50$) Newton Raphson 方法(N-R 方法)과 큰 差異가 없다. 따라서 總計算時間은 N-R 方法에 比해 상당히 短縮시킬 수 있다. 또한 本論文에서는 (4)식에서 ΔX 를 求하는 데 J 의 三角因數化(Triangular FactorizationE) 方法을 適用하여 더욱 電子計算機의 記憶容量의 節減 및

計算時間의 短縮을 꾀하고 있다. 그러나 計算機의 記憶容量은多少 많이 所要된다.

本論文과類似한概念의論文으로는 IEEE Trans. PAS 96, No.1, pp.189~197 Jan/Feb 1977.에 이미發表된 "a second order Load Flow technique"가 있으며 本論文의評價에關하여는討論者에 따라意見을 달리하고 있으나 이를綜合하면計算時間은 상당히 短縮할 수 있을 것 같으나 아직問題點은 남아 있는 것 같으며 앞으로 더욱開發할價値가 있는 것으로生覺된다.

線路潮流 制約을 考慮한 經濟的 發電出力의 再分配

K.R.C. Mamandur, G.J. Berg, "Economic shift in Electric Power Generation with Line Flow Constraints" IEEE Trans. Vol PAS-97, No. 5 pp. 1618~1626 Sep/Oct, 1978.

電力系統에 있어서 連系線路나 脫落等에 依한 偶發事故가 發生하면 많은 線路 및 電壓器가 過負荷를 招來하게 되고 이 過負荷를 輕減하기 為하여 發電出力의 再配分이 要求되며 이때문에 脱落事故前에 最適經濟運轉하고 있는 系統(各 發電機에서 增分運轉費用이 같도록 運轉)에서 運轉費用을 增加시키게 된다. 따라서 本論文에서는 系統의 脱落事故等의 偶發事故狀態(contingency state)에서 各線路 및 變壓器의 過負荷를 解消하고 또는 連絡線의 潮流를 計劃대로 維持할 수 있도록 함과 同時に 發電機出力 再配分에 따른 運轉費用의 增加를 最少化 하기 위한 最適經濟給電方法을 提示하고 있다. 本方法의 解析節次는 ① 線路의 脱落狀態下에서(發電機出力은 事故前과 同一) 基本的인 最適經濟給電을 위한 潮流狀態의 解를 求한다. ② 線路의 潮流가 過負荷인가 또는 計劃에 벗어 있는가를 試驗한 후 만일 모든 線路가 制約値을 벗어나지 않는다면 通常의 最適化法에 따르며 그렇지 않다면 다음 段階로 넘어가서 ③ 線路의 過負荷의 解消 및 指定値로의 回復를 위해 다음에 記述하는 修正給電 algorithm을 使用 反復計算에서 解를 求한다.

$$\left[\begin{array}{c} \frac{\partial P_L}{\partial P} \\ \hline \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial P_L}{\partial Q} & \frac{\partial P_L}{\partial V} \\ \hline \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \frac{\partial Q}{\partial P} \\ \hline \frac{\partial V}{\partial P} \end{array} \right] \dots\dots\dots(1)$$

$$\left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial P_L}{\partial Q} & \frac{\partial P_L}{\partial V} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial P_1}{\partial Q} & \frac{\partial P_1}{\partial V} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial P_2}{\partial Q} & \frac{\partial P_2}{\partial V} \end{array} \right] +$$

$$\dots + \begin{vmatrix} \frac{\partial P_n}{\partial Q} & \frac{\partial P_n}{\partial V} \end{vmatrix} \dots \quad (2)$$

도선 ①을 swing Bus 라 하고 도선 i, J 에 連結된
線路가 過負荷되었다고 하면

$$[\Delta P_{ij}] = \left[\frac{\partial P_{ij}}{\partial P_2}, \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_3}, \dots, \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_m} \right] \begin{pmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_m \end{pmatrix} - (3),$$

$$[H] = \left[\frac{\partial P_{ij}}{\partial P} \right] = \left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \hline \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \frac{\partial Q}{\partial P} \\ \frac{\partial V}{\partial P} \end{array} \right] \dots\dots\dots(5),$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial P_t} = \sum_{l=2}^n \frac{\partial P_{lj}}{\partial Q_l} \cdot \frac{\partial Q_l}{\partial P_t} + \sum_{l=n+1}^m \frac{\partial P_{lj}}{\partial V_l} \cdot \frac{\partial V_l}{\partial P_t} \dots (6)$$

$[AP]_{\text{Gen}}$ 의 最適解를 求하기 위하여는 發電出의 變化(shift) 즉 發電出力의 再配分에 起因된 追加의 運轉費用을 最少로 하는 條件下에서 (4)式의 H 의 一般化逆行列을 求할 必要가 있으며 이 目的을 위하여 다음 (7)식과 같이 定義되는 minimum N norm condition을 使用하고 이解를 위한 一般化逆行列을 求하는 式은 (8) 및 (9)식과 같다.

$$|\Delta P_{\text{Gen}}| = (\Delta P^t_{\text{Gen}} \cdot [N] \cdot [\Delta P]_{\text{Gen}})^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (7)$$

단 $[N]$ 는 norm Matrix

$$H^{-1} = N^{-1} H^t H (H^t \cdot H N^{-1} H^t \cdot H)^{-1} \cdot H^t \text{ for } K \geq m -$$

1.....(9)

단 m 는 發電機母線數, K 는 過負荷線路數, 各發電機의 增分發電出力에 對應되는 增分費用은 (10)식으로 表示되어 發電出力의 再配分에 따른 追加運轉費用의 最少化는 minimum norm condition $\|AP_{gen}\|$ 과 系統의 增分費用을 같게 함으로서 達成될 수 있으므로 이를 利用 「 N 」 헤열을 求하면 (11)식과 같이 表示된다.

$$a_i = \frac{\partial F_j}{\partial P_i} - \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}\right) \frac{\partial F_{ref}}{\partial P_{ref}} \dots \dots \dots \quad (10)$$

(1)~(11)식을 利用 새로운 各發電機 出力의 再配分 을 決定할 수 있고 이 値의 指定值에 대한 誤差가 許用範圍内에 들어올 때까지 反復計算하면 發電出力 再配分의 最適解를 求할 수 있다. 本論文의 特徵은 ΔP_{Gen} 을 求하는데 一般化逆行列 計算法을 利用하고 (1), (4)

식의 $\frac{\partial Q}{\partial P}$, $\frac{\partial V}{\partial P}$ 의 感度行列의 要素(element)를 求하는 데에 J 행렬의 triangular factor를 利用한 점이

라 하겠다.

偶發事故의 自動選擇

G.E. Ejebu, B.F. Wollenberg, "Automatic Contingency Selection" IEEE Trans. Vol-98, No 1 pp. 97~109, Jan/Feb, 1979.

電力系統이 正常運轉狀態에서 모든 偶發事故에 對하여 如何히 잘 견딜 수 있는지를 決定하기 위하여 모든 想定事故에 對한 試驗(조류계 산기법을 응용)을 行한다 는 것은 時間의 낭비요 非經濟的일뿐 아니라 거의 實行不可能한 것이다. 따라서 本論文에서는 線路나 發電機脫落等의偶發事故의 優先順位決定 및 選擇을 簡單히 行하는 algorithm 및 高速技法을 開發하고 그 方法論을 提示하고 있다. 이 偶發事故 優先順位決定 方法의 概要是 線路 또는 發電機의 脫落이 母線電壓 및 線路에 미치는 영향의 가혹도(severity)에 따라 그 脫落의 優先順位를 決定하는 方法으로 이 苛酷度는 偶發事故의 結果로 因해 限界值를 袋어나는 모선전압 및 線路의 過負荷狀態의 程度로서 表示되며 이는 系統性能指標(system Performance Index)에 의하여 量的으로 表示된다. 電壓에 대한 脫落의 苛酷度를 表示하는 電壓性能指標는 (1)식으로 表示되며 이때 潮流計算은 非線形 A.C潮流方程式을 使用한다.

$$PI_{Vq} = \sum_{i=1}^{NB} \frac{W_{Vi}}{2n} \left(\frac{|V_i| - |V_i^{sp}|}{\Delta V_i^{1:m}} \right)^{2n} + \sum_{i=1}^{NG} \frac{W_{Qi}}{2n} \\ \left(\frac{Q_i}{Q_i^{\max}} \right)^{2n} \dots \dots \dots \quad (1)$$

(1) 식의 右邊 第 2 項은 發電機의 無効電力이 그 限
界值를 超어날 때를 考慮한 式이며 그 限界值를 超어나
지 않으면 W_{q1} 는 Zero가 되어 생략된다. 또 線路의
過負荷程度를 測定하기 위한 有効電力性能指標는 다음
(2) 식으로 表示되며 이때 潮流計算은 簡單한 直流模型
을 使用한다.

$$PI_{MW} = \sum_{t=1}^{NL} \frac{W_t}{2n} \left(\frac{P_t}{P_t^{\lim}} \right)^{2n} \dots \dots \dots \quad (2)$$

그러나 本論文에서 偶發事故 選擇節次의 開發目的은 各脫落에 關한 完全한 潮流解析의 遂行 또는 豫測의 分析을 行하지 않고 더 정밀하게 위급한 脱落을 빨리 同定(identify)하는데 있으므로 本論文에서는 各偶發事故에 관하여 위에서 定義된 性能指標 PI_{vo} , PI_{MW} 를 직접 計算하는데 關心을 두지 않고 脱落에 關한 性能指標의 感度를 計算하는데 重點을 두고 있다.

本論文에서는 脫落에 關한 全系統的 性能指標(Systemwide Performance Index)의 感度를 算出하기 為하여 Tellegen의 定理를 利用하고 있다. 系統性態指

$$\text{標의 標準화된 感度는 } S_i = \frac{\Delta PI}{\Delta Y_i}, S_c = \frac{\Delta PI}{\Delta G_c}.$$

$\Delta G_c, \Delta PI_{total} = \sum_i S_i + \sum_l S^l$ 로 表示되나 Tellegen의 定理를 利用하여 導誘한 性能指標의 感度는 電壓性能指標에 대하여는 (3)식, 有効電力性能指標에 關하여는 (4)식으로 表示된다.

$$\Delta PI = - \sum_i R_i (\hat{V}_i \cdot V_i \cdot \Delta Y_i) \dots \dots \dots (3),$$

$$\Delta PI = \sum_l \hat{Q}_l \cdot Q_l \cdot \Delta B_l \dots \dots \dots (4)$$

따라서 線路脫落에 關한 偶發事故 優先順位 決定은 各線路 脫落에 대 한 系統性能指標感度를 (3), (4)式을 計算하여 이 感度가 가장 大 것으로 부터 順次 適은 順으로 配列함에 依하여 定하여진다.

i) 偶發事故順位를 決定 이의 目錄을 作成함으로서

此後에 系統에 있어날 수 있는 모든 偶發事故를豫測하고 非正常狀態를 決定할 수 있으며 또한 系統運轉員으로 하여금 現在 運轉되고 있는 狀態의 脆弱領域을 말아낼 수 있게하여 1次 偶發事故에 對備할 수 있도록 할 수 있다.

記號 說明

NB: 全母線數, NG: 全發電機數, W: 力重值係數 (weighting factor) ΔV_i^{lim} : 電壓偏差限界 (V_t , deviation limit), P_l^{lim} : l 선로의 MW容量 n : Penalty函數의 指數(exponent)로 보통 $n=1$, $|V^*|$ 을 定格(또는 指定) 電壓, \hat{V}_i, \hat{Q} 의 \wedge 은 adjoint network의 値을 表示함.

<p.44의 계속>

7. Chung, W.L. IGCAD: Part I. Overview and hardware system. KIST Software Development Center Newsletter 10-1 (March 1979), 6-24.
8. English, C.H. Interactive computer-aided technology. CAD 9-4 (Oct. 1977), 243-254.
9. Fritz, W.B. and Lansberry, C.R. Ship modeling with interactive graphics. Datamation (Dec. 1975), 54-58.
10. Grover, D. Hardware for visual information. CAD 9-4 (Oct. 1977), 223-232.
11. Hatvany, J., Newman, W.M., and Sabin, M.A. World survey of computer-aided design. CAD 9-2 (Apr. 1977), 79-98.
12. Kaplan, G. Computer-aided design. IEEE Spectrum 12-10 (Oct. 1975), 40-47
13. Martin, J. Design of Man-Computer Dialogues. Prentice-Hall, N.J., 1973.
14. Merryweather, H. Two application programs which link design and manufacture. Proc. of NCC 1974, 805-811.
15. Nitzan, D. and Rosen C.A. Programmable industrial automation. IEEE TR on Computers C-25, No. 12 (Dec. 1976), 1259-1270.
16. Rocenbluth, W. Design automation: Architecture and applications. Computer 9-2 (Feb. 1976), 12-17
17. Ruehli, A.E. et al. Macromodelling-an approach for analyzing large-scale circuits. CAD 10-2 (March 1978), 121-129
18. Teicholz, E. Interactive graphics comes of age. Datamation (Dec. 1975), 50-53.
19. Warn, D.R. VDAM-a virtual data access manager for computer aided design. Proc. of the Workshop on Data Bases for Interactive Design edited by van Cleemput, Sept. 1975, Waterloo, Canada, 104-111.