

電力系統의 信賴度制御

—想定事故解析을 中心으로—

論 文
26~3~6

Security Control of Power Systems

梁 興 錫* 朴 永 文**
(Heung Suk Yang, Young Moon Park)

Abstract

A modified version of algorithm and computer program is proposed to improve the currently available contingency analysis method for the security control of power system.

The underlying principle is based upon the reasonable modification of the current methods suggested by Stagg, Tinny, Alsac, and Stott in consideration of speed, accuracy, reliability and convergence characteristics.

The algorithm and program are designed especially for On-Line operation, although Off-Line applications are readily available.

Several case studies on the Korean Power Company's 48-bus, 91-line system have shown that the method proposed is efficiently powerful in a sense of practical applicability.

1. 序 言

電力系統 大規模化와 複雜化 추세에 따라, 電力供給의 經濟性, 良質性 및 信賴性을 圖謀하기 위하여는 從來와 같은 人力에만 依存하는 方式을 脫皮하여, 電子計算機를 主軸으로 하는 電力系統運用, 制御 및 計劃의 自動化 方式으로 轉換하지 않으면 안 될 時點에 到達하고 있다.

우리나라에서도 이 方面에 對한 關心이 漸高하고 있으며, 韓國電力株式會社에서는 自動給電시스템의 導入을 爲한 具體的 計劃이 推進되고 있는 것으로 알려져 고 있다.

電力系統의 安定性과 信賴性 向上을 目的으로 하는 電力系統信賴度制御(Power System Security Control)는 電子計算機의 온라인-리얼타임(On-Line Real Time) 기술의 發展에 힘입어 比較의 最近에 導入된 關係로, 아직까지 그 理論의 體系나 實際適用에 있어서 극히 初步的인 段階를 벗어나지 못하고 있으나, 이

를 適用함으로써 얻어지는 効果는 實로 莫大하다고 보겠다.

이를 機能面에서 分類한다면, 信賴度制御의 對象으로서 未來의 電力安全供給을 爲한 豫防制御(Preventive Control), 事故發生時 故障波及의 極小化를 위한 危急制御(Emergency Control)와 事故經過後 正常狀態에의 復舊를 위한 回復制御(Restorative Control)의 3機能으로 大別한다.

그러나 先進 各國의 現狀으로서는 危急制御와 復舊制御의 機能은 아직 研究中이며 經驗的인 試行過程을 벗어나지 못하고 있다.

또 豫防制御의 경우도 마찬가지로 內容과 水準의 差異가 많아 이를 모두 列擧하기는 어려우나, 그 中에서 가장 基本的이고 基礎的인 것은 想定事故에 對한 系統의 過負荷 地點의 有無를 判定하여 過負荷가 豫想되면 그 地點이나 線路를 系統運用 要員에게 온라인 리얼타임으로 通告함으로써 要員에게 適切한 對策을 事전에 講究케 하는 소위 想定事故解析(Contingency Analysis) 프로그램의 稼動이라 하겠다.

따라서 이 論文은 電力系統 自動運用制御室(System Operator's Office)에 設置되는 電力計算에 必要한 소프트웨어 즉 故障에 基因한 發電機 脫落(Generator

* 正 會 員 : 서울工大 教授 · 工博(當學會副會長)

** 正 會 員 : 서울工大 副教授 · 工博(當學會事業理事)

接受日字 : 1977年 4月 8日

Outage) 負荷遮斷(Load Shedding), 送電線路遮斷(Line Outage) 및 發電計劃의 變更에 의한 各 發電所出力의 再分配(Changing the Generator Schedule)의 結果로 招來되는 線路 또는 變壓器의 過荷負 地點을 未然에 判定하여, 過荷負가 豫想되는 地點이 發見되면, 그 地點과 過荷負率을 系統運用 要員에게 온라인方式으로 即時通告하는 알고리즘(Algorithm)과 電子計算프로그램을 開發하는데 있다.

一般的으로 想定事故解析프로그램은 現在事故解析프로그램과 未來事故解析프로그램의 兩種이 있다.

前者는 各 線路나 變壓器의 現在의 有効電力[MW]와 無効電力[MVAR]을 計測裝置(Telemetering Devices)와 電子計算機에 入力시키면, 電子計算기로

$$[MVA] = \sqrt{[MW]^2 + [MVAR]^2} \quad (1)$$

의 값을 計算한 후, 이 값이 許容上限值 K와 比較하여 K보다 크면 系統運用 要員에게 警告메시지를 發하게 하는 프로그램으로서, 프로그램 自體는 極히 簡單하고, 故障이 發生하는 경우에만 適用되므로, 事故의 未然防止機能은 없다.

그러나 後者는 可能한 事故를 미리 想定하여, 系統을 計算機內에서 시뮬레이션(Simulation)하여, 各 線路 또는 變壓器의 過荷負 여부를 式(1)에 依하여 같은 方法으로 判定通告하므로 알고리즘과 프로그램은 前者보다 複雜하고, 또 前者의 機能을 內包하고 있을 뿐만 아니라 事故의 未然防止 機能을 갖고 있다.

本 研究에서는 後者의 경우를 對象으로 한다. 그런데 이 경우에도 事故 直前의 狀態가 現在일 때 現在의 各 母線電壓의 絕對值 및 位相角은 傳送線路를 通하여 온-라인(On-Line) 入力시켜서 事故를 解析하는 경우와 未來의 事故에 對하여 事故 直前의 狀態를 電力潮流計算結果로 얻은 다음에 事故를 解析하는 경우의 두 경우를 생각할 수 있다.

이 方面의 論文을 살펴볼 때, 브라운(H.E. Brown)이 제시한 Z-行列法에 依한 想定事故評價法은 그 解析이 簡潔한 點이 있으나, 基本的으로 線形回路에 立脚하고 있으므로 그 解가 正確하지 못하다⁽³⁾. 또 보우만(M.L. Baughman) 등에 依하여 提示된 直流電力潮流法은 計算速度에 있어서 長點이 있으나 精度가 낮고, 無効電力의 흐름에 關한 情報를 提供하지 못하는 缺點이 있다⁽⁶⁾. 다니엘즈(Daniels) 등이 提示한 有効電力投入量變化法 亦是 無効電力의 흐름에 關한 情報를 알지 못하므로 역시 上述의 直流電力潮流法과 大同小異하다⁽⁴⁾. 스태크(Stagg) 등은 뉴우튼-라프슨法에 立脚하여 자코비안行列의 修正과 母線電力偏差를 利用

하여 線路事故를 시뮬레이션하는 比較의 最新의 方法을 提示하고 있으나, 計算速度面에서 多少 問題가 있다⁽³⁾. 티니(Tinney) 등은 三角因數化法과 線路의 線形近似化 電力潮流計算法을 導入하여 計算速度를 向上시켰으나, 電壓調整母線의 電壓絕對值의 正確한 計算이 正確하지 못하다⁽⁵⁾. 스토트(Stott) 및 엘제크(Alsac)는 자코비안行列의 構成에 있어서 電壓絕對值은 1로 線路兩端의 電壓位相角差는 0으로 近似化하는 假定한 假定을 하고 한번 構成한 後 다시 更新을 하지 아니하는 方法을 提示하고 있다⁽¹⁾.

本 研究結果에 依하면, 스토트 및 엘제크의 方法이 매우 매력적이기는 하나, 重負荷等의 惡條件의 경우에는 그 收束性을 믿기가 困難하고, 特히 不變자코비안行列을 使用하는 關係로 電壓絕對值의 收束에 있어서 問題가 있음이 實驗적으로 나타났다.

따라서 本 研究에서는 스택크, 티니, 스토트 및 엘제크의 方法을 綜合하여, 그 長點을 살리고, 缺點을 補充하는 方向으로 研究를 進行시켜, 計算速度面에서는 스토트의 方法보다 못하나, 比較的 收束性에 이어 信賴性이 向上된 結果를 얻었으므로, 그 概要를 아래에 記述코자 한다.

本 研究에서 誘導한 想定事故解析 알고리즘은 本質적으로 이미 報告한 바와 같은 電力潮流計算 알고리즘⁽⁶⁾과 大差가 없다. 그러나 初期條件의 決定過程과 P-자코비안 및 Q-자코비안, 그 因數表 形成 또는 處理過程이 다르고, 그 線路의 過荷負여부의 判定 및 通告알고리즘이 追加되고, 한 件의 想定事故處理 完了後 初期值의 回復機能이 갖추어져 있다.

2. 計算初期值의 設定알고리즘

電力潮流計算에서는 電壓의 絕對值은 1[P.U.]로, 또 位相角은 모두 0으로 놓고 計算을 開始하게 되나, 想定事故解析알고리즘에서는 上述한 바와같이 傳達回路를 通하여 入力되거나 또는 電力潮流計算結果로 얻어지는 電壓의 絕對值과 位相角을 그 初期值로 하여 計算이 開始된다.

그리고, 相定事故의 種類로서는 每線事故(Bus outage)와 線路事故(Line outage)의 2種으로 大別되며, 母線事故는 다시 電源脫落(generator outage)과 負荷遮斷(Load Shedding)의 두 경우로, 또 線路事故 亦是 純粹線路事故(Line outage only)와 線路 및 變壓器事故(Line and transformer outage)의 두 事故로 細分된다.

a) 母線事故의 경우

電源脫落의 경우에는 事故母線 f 의 母線 有効 및 無効電力의 편차 ΔP_f 및 ΔQ_f 가

$$\Delta P_f = (PG_f + \Delta PG_f) + PR_f - P_f = \Delta PG_f < 0 \quad (2)$$

$$\Delta Q_f = X_f + QR_f - Q_f \geq 0 \quad (3)$$

但, PG_f = 事故直前의 f 母線 發電機 有効出力

ΔPG_f = 發電機 有効出力 脫落量

PR_f, QR_f = 負荷의 有効 및 無効成分

P_f, Q_f = 事故直前의 母線 有効 및 無効電力 計算值

$X_f = (QGL_f + QCL_f) \sim (QGU_f + QCU_f)$ 區間에 屬하는 값中 ΔQ_f 의 絕對值를 最小로 하는 값

QGL_f, QGU_f = 事故直前 發電機無効力 下, 上限值

QGL_f', QGU_f' = 脫落發電機 無効出力의 下, 上限值

QCL_f, QCU_f = 調相機 容量의 下, 上限值

로서 주어지므로 事故後 事故母線의 有効電力 指定值 PS_f' 와 無効電力의 上, 下限值 QU_f' 및 QL_f' 는

$$PS_f' = PS_f + \Delta QG_f \quad (4)$$

$$QU_f' = QU_f + QU_f' \quad (5)$$

$$QL_f' = QL_f + QL_f' \quad (6)$$

와 같이 修正되고, 負荷遮斷의 경우에는

$$\Delta P_f = PG_f + (PR_f + \Delta PR_f) - P_f = \Delta PL_f > 0 \quad (7)$$

$$\Delta Q_f = X_f' + (QR_f + \Delta QR_f) - Q_f \geq 0 \quad (8)$$

但, 電壓調整 母線의 경우

$$\Delta Q_f = (QR_f + \Delta QR_f) - Q_f = \Delta QR_f > 0 \quad (9)$$

但, 電壓非調整 母線의 경우

$\Delta PR_f, \Delta QR_f$ = 遮斷負荷의 有効 및 無効成分 $X_f' = (QGL_f' + QCL_f') \sim (QGU_f' + QCU_f')$ 區間에 屬하는 값中 ΔQ_f 의 絕對值를 最小로 하는 값

PS_f, QU_f, QL_f = 事故直前의 事故母線의 有効 및 無効電力의 指定, 上, 下限值

로서 주어지므로, 事故後 事故母線의 有効電力 指定值 PS_f' , 無効電力 指定值 QS_f' 또는 無効電力 上, 下限值 QU_f' 및 QL_f' 는

$$PS_f' = PS_f + \Delta PR_f \quad (10)$$

$$QS_f' = QS_f + \Delta QR_f \quad (11)$$

$$QU_f' = QU_f + \Delta QU_f \quad (12)$$

$$QL_f' = QL_f + \Delta QR_f \quad (13)$$

로 修正된다.

그런데 母線의 事故로 電力需給에 不均衡이 생기는 것을 是正하기 위하여는 다른 母線에서의 發電計劃修正 또는 負荷遮斷이 不可避한 경우가 通常的이고, 이 경우에 對한 有効電力 및 無効電力의 再配分 및 負荷遮斷도 上述한 알고리즘으로 修正하여야 한다. 따라서 母線故障時의 入力情報로서는 故障母線番號 f 와 더불어 電源脫落의 경우에는 脫落有效成分 ΔPG_f 및 脫落發電機의 QU_f', QL_f' 및 出力 또는 負荷變動母線(番號 $j = j_1, j_2, \dots, j_m$)의 ΔPG_j (또는 ΔPR_j), ΔQR_j (또는 QU_j', QL_j')가 必要하고, 負荷遮斷의 경우에는 $\Delta PR_f, \Delta QR_f$ 및 出力 또는 負荷變動 母線의 ΔPG_j (또는 ΔPR_j), ΔQR_j (또는 QU_j', QL_j')가 必要하며, 元來의 各 母線의 PS, QS, QU, QL 값은 保存해 두어야 한다.

b) 線路事故의 경우

線路事故의 경우의 入力情報는 事故線路番號 f 만으로 充分하나, 初期值設定은 다음과 같은 알고리즘에 依據해야 한다.

即, 線路 f 가 遮斷되면 母線어드미턴스行列 $(G + jB)$ 의 非對稱 $jk(j \neq k)$ 및 主對稱 jj 要素는

$$\left. \begin{aligned} G_{jk} &= G_{kj} = -\sum_{i \in S} \{g_i / (t_{ij} \cdot t_{ik})\} \\ B_{jk} &= B_{kj} = -\sum_{i \in S} \{b_i / (t_{ij} \cdot t_{ik})\} \\ G_{jj} &= \sum_{i \in S} \{g_i / t_{ij}^2\} \\ B_{jj} &= \sum_{i \in S} \{(b_i + 0.5b_i') / t_{ij}^2\} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

但, $S = j, k$ 모선에 接續된 線路集合

$$g_i = R_i / (R_i^2 + X_i^2)$$

$$b_i = -X_i / (R_i^2 + X_i^2)$$

t_{ij} = i 母線에 接속된 j 母線에서의 i 母線에 인접한 變壓器 非公稱變比(Off-nominal tap ratio)

로 표시되며, 여기서 선로 f 가 遮斷되면, g_f 및 b_f 가 모두 0이 되므로 이 線路와 接續된 兩母線 j, k 의 母線 어드미턴스가 $G_{jk}', G_{kj}', B_{jk}', B_{kj}', G_{jj}', B_{jj}'$, G_{kk}', B_{kk}' 로 變한다.

$$G_{jk}' = G_{kj}' = G_{jk} - \Delta G_{kj} = G_{jk} + g_f / (t_{fj} \cdot t_{fk}) \quad (15)$$

$$B_{jk}' = B_{kj}' = B_{jk} + \Delta B_{kj} = B_{jk} + b_f / (t_{fj} \cdot t_{fk}) \quad (16)$$

$$G_{jj}' = G_{jj} + \Delta G_{jj} = G_{jj} - g_f / t_{fj}^2 \quad (17)$$

$$B_{jj}' = B_{jj} + \Delta B_{jj} = B_{jj} - (b_f + 0.5b_f') / t_{fj}^2 \quad (18)$$

$$G_{kk}' = G_{kk} + \Delta G_{kk} = G_{kk} - g_f / t_{fk}^2 \quad (19)$$

$$B_{kk}' = B_{kk} + \Delta B_{kk} = B_{kk} - (b_f + 0.5b_f') / t_{fk}^2$$

(20)

따라서 線路事故의 경우에는 이들 값을 初期値로 設定하되 元來의 값은 保存해 두어야 한다. 그리고 母線 어드미턴스 成分이 變하여 (8)

$$[V\Delta\theta]=[H]^{-1}[\Delta P/V] \quad (21)$$

但, $H_{jj} = -B_{jj} - Q_j/V_j^2$

$$H_{jk} = G_{jk} \sin\theta_{jk} - B_{jk} \cos\theta_{jk}$$

의 $[H]$ 行列의 H_{jj} , H_{jk} , H_{kk} 成分도 式(14)에 依하여

$$H_{jj}' = H_{jj} + \Delta H_{jj} \quad (22)$$

$$= H_{jj} - V_j \{g_f \cdot \sin\theta_{jk} - (b_f + 0.5b_f') \cos\theta_{jk}\} / (t_{fj} \cdot t_{fk} \cdot V_j)$$

$$H_{kk}' = H_{kk} + \Delta H_{kk} \quad (23)$$

$$= H_{kk} - V_k \{g_f \cdot \sin\theta_{kj} - (b_f + 0.5b_f') \cos\theta_{kj}\} / (t_{fk} \cdot t_{fj} \cdot V_k)$$

$$H_{jk}' = H_{jk} + \Delta H_{jk} \quad (24)$$

$$= H_{jk} + \{g_f \cdot \sin\theta_{jk} - (b_f + 0.5b_f') \cos\theta_{jk}\} / (t_{fj} \cdot t_{fk})$$

$$H_{kj}' = H_{kj} + \Delta H_{kj} \quad (25)$$

$$= H_{kj} + \{g_f \cdot \sin\theta_{kj} - (b_f + 0.5b_f') \cos\theta_{kj}\} / (t_{fk} \cdot t_{fj})$$

와 같이 變化하는데 이 變化分 ΔH 는 後述의 理由(3項 參照)로 미리 계산해 두어야 한다.

3. 電壓位相角의 修正 알고리즘

電壓位相角의 修正은 式(21)에 依據함이 電力潮流計算에서와 마찬가지로, 자코비안 $[H]$ 는 上述한 G_{jj} , G_{jk} , G_{kj} , G_{kk} 의 變化로 $[H]_{jk}$ 로 값이 달라져 그대로 使用할 수 없다.

샤흐데브(M.S. Sachdev)와 이브라힘(S.A. Ibrahim)은 그들의 논문⁽⁷⁾에서 感度 解析法(Sensitivity analysis method)에 依하여 이를 補償하고 있으나, 그 節次가 까다로운 面이 있어, 本 研究에서는 스토트(B. Stott) 및 엘제크(O. Alsac)가 採用한 方法에 따라 逆行列 修正技法(Inverse-matrix modification technique)을 使用하기로 하였다.

그러나 後者의 方法도 變壓器가 線路兩端에 있는, 보다 一般화된 경우에는 그대로 適用할 수 없기 때문에, 本 研究에서는 다음과 같이 이를 改善, 擴張하여 使用하였다.

即, 式 $[V\Delta\theta]=[H]^{-1}[\Delta P/V]$ 의 $[H]$ 는 j , k 母線에 接續된 f 線路가 遮斷될 경우에는

$$[H]_{jk} = [H] + \begin{matrix} & j & & k \\ \begin{matrix} \cdots \\ \vdots \\ \cdots \end{matrix} & \begin{matrix} \cdots \\ \vdots \\ \cdots \end{matrix} & \begin{matrix} \cdots \\ \vdots \\ \cdots \end{matrix} & \begin{matrix} \cdots \\ \vdots \\ \cdots \end{matrix} \\ \begin{matrix} \cdots \\ \vdots \\ \cdots \end{matrix} & \begin{matrix} \cdots \\ \vdots \\ \cdots \end{matrix} & \begin{matrix} \cdots \\ \vdots \\ \cdots \end{matrix} & \begin{matrix} \cdots \\ \vdots \\ \cdots \end{matrix} \end{matrix} \quad (26)$$

로 變化하고, 이를 變形하면

$$[H'] = [H] + [M^j][m^j]^T \quad (27)$$

但, $[M^j] = j$ 列 要素만 1이고, 나머지는 0인 列벡터

$[m^j] = j$ 列 要素는 ΔH_{jj} , k 列 要素는 ΔH_{jk} 이

고 나머지는 모두 0인 列벡터

$$[H'^k] = [H'] + [M^k] \cdot [m^k]^T \quad (28)$$

但, $[M^k] = k$ 列 要素만 1이고 나머지는 모두 0인 列벡터

$[m^k] = j$ 列 要素는 ΔH_{jk} , k 列 要素는 ΔH_{kk} 이

고 나머지는 모두 0인 列벡터

로 表示할 수 있다. 따라서 $[H]^{-1}[\Delta P/V]$ 의 解를

$[V\Delta\theta]$ 라 할 때 $[H']^{-1}[\Delta P/V]$ 의 解 $[V \cdot \Delta\theta']$ 는

$$[V \cdot \Delta\theta'] = [V \cdot \Delta\theta] - C^j [X^j] \cdot [m^j]^T \cdot [V \cdot \Delta\theta] \quad (29)$$

但, $[X^j] = [H]^{-1} \cdot [M^j]$

$$C^j = 1 / (1 + [m^j]^T \cdot [X^j]^T)$$

를 얻게 되고, 마찬가지로 $[H'^k]^{-1}[\Delta P/V]$ 의 解 $[V\theta'^k]$ 도

$$[V \cdot \Delta\theta'^k] = [V \cdot \Delta\theta'] - C^k [X^k] [m^k]^T [V \cdot \Delta\theta'^k] \quad (30)$$

但, $[X^k] = [H']^{-1} [M^k]$

$$= ([H]^{-1} - [C^j][X^j][m^j]^T [H]^{-1}) [M^k]$$

$$C^k = 1 / (1 + [m^k]^T [X^k])$$

로 얻을 수 있다. 따라서 $[H]$ 의 變化分 ΔH_{jj} , ΔH_{kj} , ΔH_{kk} 만 알면, $[H]$ 를 修正함이 없이 即 因數表(Factor Table)을 그대로 使用하여 電壓位相角을 修正할 수 있게 된다.

本 研究에서는 電力潮流計算結果로 얻어진 $P-\theta$ 因數表를 그대로 使用하였으며, 이로 因하여 位相角 修正의 高速化를 期하였다.

그리고 故障線路의 一端이 스텝크母線인 경우에는 j 또는 k 가 스텝크母線이 아닌 것, 即 $[V\Delta\theta']$ 나 $[V\Delta\theta^k]$ 중 하나만의 修正을 行한다.

本 研究에서 導出한 逆行列 修正 技法 알고리즘은 多重 線路 및 變壓器 事故의 경우에도 그대로 擴張 適用될 수 있음을 附言한다.

4. 電壓 絕對值 修正 알고리즘

電壓 絕對值 修正에는 式(21)에 따라 $[H]$ 行列의 因數表에 依한 直接法을 使用하는 點은 電力潮流 計算의

경우와 마찬가지로, 3項에서의 마찬가지로 이 因數表를 故障時의 計算에서 固定하면 $[L]$ 의 變化成分만 追加로 考慮하면 되므로 計算時間이 短縮된다. 따라서 最近의 海外文獻에서는 그렇게 하는 例가 많은 것으로 報告되고 있다^{(1),(2)}.

그러나 本 研究 結果에 依하면, 重負荷時等の 惡條件에서는 收束이 되지 아니하는 경우가 있고, 故障時에 있어서의 電壓變動을 正確하게 反映하지 못하는 短點이 發見되었다(電壓調整 母線의 調相容量이 充分하여, 故障前後에 있어서 母線 電壓의 變動이 없는 것으로 假定할 때는 이 短點이 除外되고, 海外文獻에서는 그렇게 假定하고 있음). 따라서 本 研究에서는 現 韓 電系統의 調相容量이 不足한 現況과 收束性의 向上을 위하여, 計算速度가 多少 低下함을 甘受하고, 電力潮流 計算時와 마찬가지로 $[L]$ 의 修正 行列 $[L^k]$ 의 因數表를 再構成하는 方法을 採擇하였다.

5. 過負荷 檢出 알고리즘

母線事故 또는 線路事故에 의한 過負荷 線路 또는 變壓器 個所의 檢出은 全 線路를 모두 檢出하는 것이 確實한 方法이나, 老練한 系統運用 要員은 過負荷가 짐작되는 候補個所를 選定하여 檢出하면 不必要한 計算을 省略할 수 있다. 本 研究에서는 이 두가지 경우를 모두 考慮하여 알고리즘 및 프로그램을 開發하였는데 그 개요를 記述하면 아래와 같다.

어느 任意 個所, 即 i 線路의 過負荷率은 i 線路를 흐르는 皮相 電力의 定格 皮相電力에 對한 比率을 뜻하는데 이 값이 100(%)를 超過하면 過負荷 警告를 發하게 된다. 그런데 엄격히 말하자면 i 線路의 接續兩端 母線 j, k 近處의 過負荷率은 理論적으로 同一하지 않다. 그러나 實用上으로는 別 大差가 없으므로 本 研究에서는 接續兩端 母線中 어느 한쪽 것만을 取하기로 하였다.

i 線路의 有効 및 無効出力 $PL_{i(j-k)}$ 및 $QL_{i(j-k)}$ 의 計算 알고리즘은, i 線路의 j 에서 k 로 흐르는 有効 및 無効電力을 $PL_{i(j-k)}$, $QL_{i(j-k)}$ 라 할 때

$$\left. \begin{aligned} PL_{i(j-k)} &= V_j V_k (g_i C_i + b_i S_i) / (t_{ij} \cdot t_{ik}) \\ &\quad + V_j^2 \cdot g_i / t_{ij}^2 \\ QL_{i(j-k)} &= V_j V_k (b_i C_i - g_i S_i) / (t_{ik} \cdot t_{ij}) \\ &\quad - V_j^2 (b_i + 0.5 b_i') / t_{ij}^2 \end{aligned} \right\} (31)$$

但, $l = NK_p$ ($P = NJ_1 \sim (NJ_{i+1} - 1)$) 中에서 $NK_p = k$ 와 一致하는 P 의 값

$C_i \cdot S_i = \cos \theta_{jk}$, $\sin \theta_{jk}$ 의 值

와 같고, 그 플로우차트는 그림 1과 같으므로, 그 皮

相電力 $SL_{i(j-k)}$ 는

$$SL_{i(j-k)} = PL_{i(j-k)} + QL_{i(j-k)} \quad (32)$$

로서 表示되고 定格 皮相電力(또는 最高許用 皮相電力)을 KL_i 라 할 때, 그 過負荷率 OL_i (%)와는

$$OL_i^2 = (SL_{i(j-k)} / KL_i^2) \times 100 \quad (33)$$

의 關係가 成立한다. 따라서 $OL_i \geq 100$ 이면 이의 平方根을 計算하여 얻은 값을 運用要員에게 母線番號 i 와 함께 通告하고, 다른 線路의 過負荷 檢出 順序로 넘어가면 된다.

全 線路를 檢出할 경우에는 i 를 1에서 i_i (i_i 는 線路數)까지 옮으면 되므로 特出한 情報가 不必要하나, 特定 線路만을 훑을 경우에는 該當 線路 番號群 情報를 入力시켜야 한다.

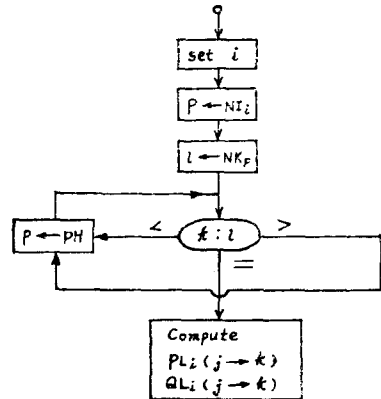


그림 1. 線路의 有効 및 無効電力計算 플로우차트
Fig. 1. Flowchart for computing line active and reactive power.

6. 開始處理 및 終了處理

想定事故解析 프로그램을 作動시킬 경우에는 電力潮流 計算 結果로 얻어진 母線電壓 位相角 情報 $C_i = \cos \theta_{jk}$, $S_i = \sin \theta_{jk}$, 絶對值 情報 V_j , 有効 및 無効電力 指定值 PS_j , QS_j , 無効電力의 上·下限值 QU_j , QL_j 및 $[H]$ 行列의 因數表 等を 引用하나, 이 初期值가 作動中에 消失되므로 다음 차례의 故障케이스에 利用할 수 있도록 保存 措置를 講究하였다.

7. 想定事故解析 루틴의 順序 및 收束特性

至今까지는 計算過程을 部分的으로 記述하였으나, 그 全體의인 順序를 플로우차트로 表示하면 그림 2와 같다.

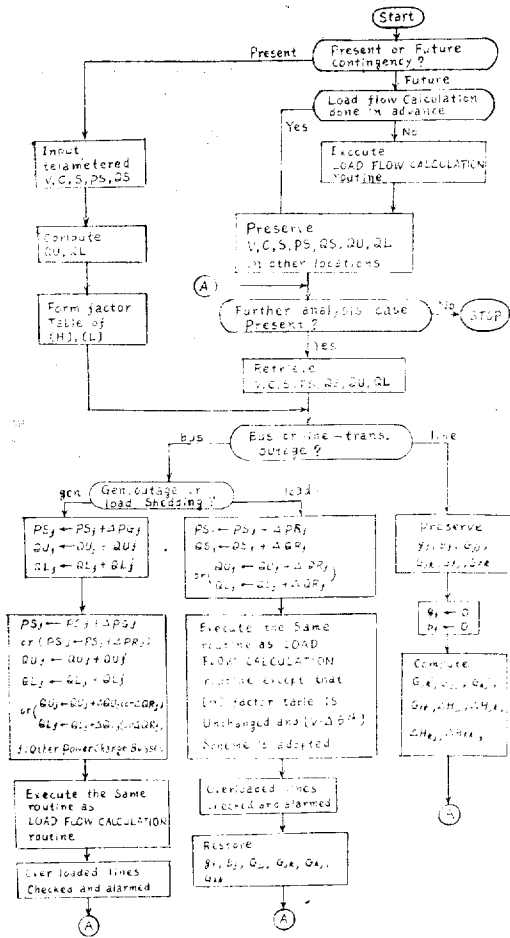


그림 2. 過負荷監視 플로우차트
Fig. 2. Flow chart for overload alarm.

8. 事例研究

以上에서 記述한 알고리즘에 따라 開發한 想定事故 解析프로그램은 5個 母線으로 構成된 위어드-헤일 模型系統, 호주의 22個 母線系統, 韓電系統에 對한 프로그램 테스트 및 事例研究를 通하여 實用性이 立證되어 있으며, 本格的인 事例研究를 行한 韓電의 實系統을 略述하면 다음과 같다.

表 1. 母線別 發電所 發電可能出力[MW] 및 調相設備 容量[MVAR]

母線	發電容量	調相設備
1 한강	371	
2 경인	325	

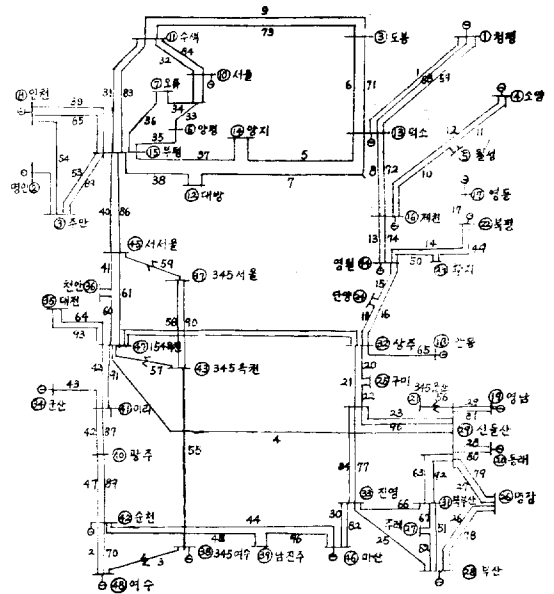


그림 3. 韓電系統構成圖
Fig. 3. KECO power system configuration

3	도봉		35
4	소양	100	
6	양평		6
7	오류동		30
8	인천	500	
9	주안		18
10	서울	412	
11	수색		58
13	덕소	25	
14	양지		18
15	부평		32
16	계천	2	
17	영동	125	
18	안동	45	
19	영남	400	
20	동해	660	
22	삼척	55	
23	황지		10
24	단양		10
25	구미		20
26	명장		35
28	부산	342	
30	대구		89
32	상주		10
34	군산	75	
35	대전		32

36	천안	300	30
38	345여수		
40	광주	30	20
41	이리		
42	순천	3	
44	영월	100	
46	마산	65	
48	여수	500	

各發電所 및 154kV級 以上の 送電線路 및 母線系統 構成圖는 그림 3과 같은데, 漢江系는 淸平 發電所를 基準으로 하여 한 發電所로 等價化시켰다. 따라서 韓電系統은 앞으로 追加될 서울-옥천間 超高壓 2回線을 包含하여 48個 母線(發電所 中規模 系統이라 할 수 있다.

그리고 各發電所의 發電 可能出力[kW] 및 各調相設備容量[KVAR]은 表 1과 같다.

表 2. BUS OUTAGE

CASE I			CASE II			CASE III			故障母線의 番號	다른 變化母線 番號
IP	IQ	소요시간	IP	IQ	소요시간	IP	IQ	소요시간		
3	5	2.2	3	6	2.5	2	4	1.7	8	44, 19, 20, 10
3	3	1.7	4	4	2.3	3	2	1.4	13	10
3	2	1.4	3	2	1.4	2	1	0.8	11	19

LINE OUTAGE

CASE I			CASE II			CASE III			故障線路의 番號
IF	IQ	소요시간	IP	IQ	소요시간	IP	IQ	소요시간	
3	4	2.0	3	4	2.0	3	2	1.4	2
6	11	4.9	6	12	5.2	4	7	3.2	55
3	2	1.4	3	1	1.4	3	2	1.4	29
2	2	1.2	2	1	1.2	3	2	1.4	92
2	2	1.2	2	3	1.5	2	2	1.2	44
2	1	0.9	2	2	1.2	2	1	0.9	19
2	3	1.5	1	2	0.9	1	1	0.6	8
2	1	0.9	2	1	0.9	2	3	1.5	40

但, IP; P-θ 反復回數, IQ; Q-V 反復回數
EP=0.01[1MW]; 最大有効 및 無効電力偏差

以上の 系統 構成으로 重負荷 2케이스, 輕負荷 1케이스의 各各에 對하여 母線事故(電源脫落 및 負荷遮斷) 3件, 線路事故 8件, 都合 33件의 想定 事故에 對한 想定事故解析의 事例 研究를 遂行하였다.

事例 研究의 結果를 要約하면 表 2와 같으며, 이 表에 依하면 P-Q反復 2.9回, Q-V反復 3.3회로 나타났으며, 所要되는 時間은 約 1.5秒의 結果를 얻었다.

9. 研究結果의 効用性 評價 및 檢討

本 研究의 効用性 評價 및 檢討 結果는 다음과 같다.

a) 從前의 가우스-사이델法 또는 워드-헤일法에 依한 想定事故 프로그램에 比하여 計算速度를 10배이

상 向上시킬 수 있고, 韓電規模의 電力系統에 對하여 現在의 韓電保有 計算機를 使用하여 計算하는데 所要되는 時間은 約 1.5秒이므로, 이 計算速度는 實用條件을 充足시킨다.

b) 分割法을 導入하지 아니하는 從來의 뉴우톤-라프슨法으로는 자코비안行列을 記憶하는데 所要되는 容量은 韓電規模의 電力系統에서는 40K바이트(20K語)가 所要되고, 從前의 分割法으로는 10K바이트(5K語)가 所要되어, 中形級 計算機로는 計算이 도저히 不可能하나, 本研究結果의 方法으로는 不過 3K바이트(1.5K語)만 所要되므로 本 研究에서 開發한 프로그램은 小, 中形級 計算機로서도 處理가 可能하게 되었다.

c) 本 研究에서 開發한 프로그램은 오프라인 方式으

로 現在에도 電力系統運用計劃 및 開發計劃에 活用될 수 있다.

10. 結 論

研究結果로 얻어진 想定事故解析計算알고리즘에 對하여 그 結論을 要約하면 다음과 같다.

a) 本 研究에서 導出한 想定事故解析計算알고리즘은 分割 潮流計算法과 母線番號 最適配定法과 最適配置 三角因數化法에 依한 直接法을 導入한, 이미 보고한 如 있는 電力潮流計算알고리즘과 基本原理가 같고 많은 部分이 共有되어 있으므로, 若干의 記憶容량의 增加로 그 프로그램을 共用 目的으로 作成 利用할 수 있다.

b) 이미 發表된 電力潮流計算알고리즘과 本 研究에서 導出한 想定事故解析알고리즘의 主要 差異點은, 前者의 경우에는 $P-Q$ 修正 因數表와 $Q-V$ 修正 因數表를 反復 計算時마다 更新하나, 後者의 경우에는 $Q-V$ 修正 因數만을 更新하고, $P-Q$ 修正 因數表는 初期의 것을 非更新하되 그 代身 逆行列修正技法을 導入한 點에 있다.

c) 逆行列修正技法은 從前의 方法을 더욱 擴張하여 線路 兩端에 變壓器가 接續된 경우와 多重 線路事故에도 通用될 수 있도록 하였다.

d) 本 研究에서 導出한 想定事故解析알고리즘은 感度解析法에 依한 알고리즘보다 計算速度가 向上된다.

e) 本 研究에서 導出한 想定事故解析알고리즘은 $Q-V$ 修正 因數表까지도 非更新하는 알고리즘보다는 計算速度面에서는 多少 不利하나, 收束性 및 信賴性面에서 월등히 有利하다.

f) 本 研究에서 導出한 想定事故解析알고리즘은 數分 또는 數時間後의 想定事故를 온라인으로 解析함과 同時에 在의 想定事故도 電力系統의 現狀態 情報를 入 力시킴으로써 解析이 可能하다.

g) 本 研究에서 開發한 프로그램은 장차 導入될 電

力系統 自動運用시스템의 소프트웨어의 一部로서 納入될 수 있으므로, 結果적으로 國內技術의 自立과 海外 技術導入에 따른 外貨節減效果가 期待된다.

本 研究은 1976年度 產學協同財團의 支援으로 遂行되었음을附言한다.

參 考 文 獻

1. O. Alsac and B. Stott, "Optimal Load Flow with Steady State Security." Paper T 73, 484-3, July 1973.
2. Homer E. Brown, "Contingencies Evaluated by a Z-Matrix Method." IEEE, PAS-88, No. 4 APR. 1969.
3. G.W. Stagg and A.G. Phadke, "Real Time Evaluation of Power System Contingencies Defection of Steady State Overloads." Paper No. 70 CP692-PWR, July 1970.
4. H. Daniels and Mo-Shing Chen, "An Optimization Technique and Security Calculations for Dispatching Computers." IEEE PAS-91, p.883 May/June 1972.
5. W.F. Tinney, "Compensation Methods for Network Solutions by Optimally Osdered Triangular Factorization." IEEE PAS-91 p. 123, Jan/Feb 1972.
6. M.L. Baughman and F.C. Schwapp, "Contingency Evaluation Real Power Flow from a linear Model," Paper No. 70 Cp. 69 2-PWR, July 1970.
7. M.S. Sachdev and S.A. Ibrahim, "A Fast Approximate Technique for Outage Studies in Power System Planning and Operation." IEEE PAS, May 1973.