

# 線路過負荷解消를 고려한 最適負荷遮斷에 관한 研究

## A Study on the Optimal Load Shedding Considering Alleviation of the Line Overload

宋吉永\* · 李喜永\*\*

(Kil - Yeong Song · Hee-Young Lee)

### Abstract

This paper presents a method for optimal load shedding in preserving a system security following abnormal condition as well as a sudden major supply outage.

The method takes account of static characteristic of generators control and voltage and system frequency characteristic of loads.

The optimization problem is solved by a gradient technique to get the maximal effect by the least quantity of load shedding considering line overloads as well as voltage disturbances and system frequency.

The method is illustrated on a 8-bus system.

It has been found that the use of the proposed algorithm for model systems alleviate the line overload more efficiently than the former method

It is believed that this method will be useful in security studies and operational planning.

### 1. 序 論

電力系統에서 大電源脫落事故나 送電線路斷線 등 系統의 需給均衡을 잃게하는 重大事故가 발생했을 경우 系統의 安定運用을 도모하기 위해서 負荷의 強制遮斷이나 系統分離등의 緊急制御(emergency control)를 실시하는 경우가 많다.

負荷의 強制遮斷問題는 系統運用과 設備의 여러 가지 制約條件이 수반되는 動的瞬時制御問題<sup>1)</sup>로 취급할수 있으나 이와는 별도로 Hajdu<sup>2)</sup>, Subramanian<sup>3)</sup> 등에 의해서 제안된 방법과 같이 系統의 需給調整을 통하여 系統의 安定平衡狀態(steady - state sta-

ble equilibrium)를 求하는 靜的最適化問題로 해석하므로서 非常時 系統安全狀態의 先行決定과 給電運用에 必要한 情報를 미리 把握해서 이러한 事態에 대처 하고저하는 研究도 계속되어 왔다.<sup>2) - 3)</sup>

현재까지 발표된 文獻들의 경향을 살펴보면 負荷遮斷에 의해 事故系統을 制御할 경우 무엇보다도 먼저 負荷遮斷이 需用家에게 미치는 영향을 重要視하여 系統의 運用條件을 만족시키면서 系統을 安定狀態로 回復시키는데 필요한 最小의 負荷遮斷量을 求하는것이 重要課題였다. 이를 實現하는 方法의 하나로 Okamura<sup>4)</sup>, Ueda<sup>5)</sup>는 postfault 系統의 特性을 解析하는데 系統周波數를 직접 變數로 도입하고 發電機의 調速機特性및 負荷의 電壓·周波數特性등의 系統特性을 고려한 보다 實際的인 負荷遮斷法을 提示하였다. 특히 Ueda<sup>6)</sup>는 系統特性을 감안한 動的 潮統計算法<sup>7)</sup>으로 負荷遮斷量에 對한 周波數 및 電壓感度係數를 求하고 이를 토대로 配分遮斷시키

\*正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工傳

\*\*正 會 員 : 高麗大 大學院 電氣工學科 博士過程

接受日字 : 1986年 12月 5日

1次修正 : 1987年 2月 3日

모로서 전체적인 負荷遮斷量을 效果的으로 減小시킬 수 있도록 하였다.

그러나 이 方法은 負荷遮斷이 실시되는 過程에서 發生할 수 있는 線路의 過負荷를 防止할 수 없다는 短點이 있다. 本 研究에서는 종래의 方法<sup>8)</sup>에 線路兩端母線의 相差角을 最大許容相差角 以內로 制限시키는 制約條件式을 penalty function 型態로 變換시켜 追加 도입하므로써 系統의 周波數와 電壓의 適正維持는 물론 線路의 過負荷解消까지 고려할 수 있는 새로운 負荷遮斷 알고리즘을 개발하고 몇가지 適用例를 通하여 그 有効性を 검증하였다.

## 2. 문제의 定式化

### 2.1 종래의 目的函數<sup>8)</sup>

大電源脫落事故時 負荷의 強制遮斷에 의해서 系統을 制御할 경우 系統의 發電機出力의 合計( $\sum P_G$ )와 系統負荷( $\sum P_L$ )의 需給不平衡分  $\Delta P' = \sum P_G - \sum P_L$ 에 기인하여 基準周波數  $f_s$ 로부터 벗어나게 될 周波數偏差  $\Delta f'$ 는

$$\Delta f'(\Delta p') = f_s - f' \text{ [Hz]} \tag{1}$$

$f'$ : postfault steady state<sup>5),8)</sup>의 系統周波數 [Hz]

로 된다. 負荷遮斷制御時 式(1)의  $f'$ 는 負荷遮斷量  $\Delta p$ 의 函수가 되며 式(1)을 單位法으로 나타내면

$$\begin{aligned} \Delta f &= 1 - \frac{f'(\Delta p)}{f_s} \\ &= 1 - f(\Delta p) \text{ [pu Hz]} \end{aligned} \tag{2}$$

와 같이된다.

한편 系統周波數  $f'(\Delta p)$ 는 負荷遮斷을 실시하므로써 다음의 制約式을 만족해야 한다.

$$f_{min} \leq f'(\Delta p) \leq f_{max} \tag{3}$$

여기서  $f_{min} : f_s - f_{BF}$  [Hz]  
 $f_{max} : f_s + f_{BF}$  [Hz]  
 $f_{BF}$ : 周波數偏差許容幅 [Hz]

式(3)의 制約式을 周波數偏差에 대해 나타내면

$$-f_{BF} \leq f_s - f(\Delta p) \leq f_{BF} \tag{4}$$

$$\text{즉 } |\Delta f'| \leq f_{BF} \tag{5}$$

로 된다. 系統의 安定運用을 도모하기 위해서는 式(5)와 같이 周波數偏差의 絶對值가 系統의 周波數許容幅  $f_{BF}$  以內로 유지되어야 한다.

따라서  $\Delta f'$ 를  $f_{BF}$ 로 다음式과 같이 正規化하고

$$\frac{f_s - f'(\Delta p)}{f_{BF}} \text{ [Hz]} = \frac{1 - f(\Delta p)}{B_F} \text{ [pu Hz]} \tag{6}$$

여기서  $B_F = f_{BF}/f_s$ ,  $f(\Delta p) = f'(\Delta p)/f_{BF}$

式(6)이 負가 될 경우에 대해서도 定量的으로 解析하기 편리하도록 2次化시켜 이를 負荷遮斷 制御時 最小化 하는 目的函數로 取할 수 있다.

$$F_0 = \left[ \frac{1 - f(\Delta p)}{B_F} \right]^2 \tag{7}$$

한편 負荷母線電壓  $V'$ 는 負荷遮斷量  $\Delta p$ 에 관한 函數이며 負荷遮斷時 야기되는 負荷母線 電壓變動은 수용가에 나쁜 영향을 미치므로  $j$  負荷母線電壓  $V'_j$ 는 基準電壓  $V_{sj}$ 에서 電壓偏差許容幅  $V_{BV}$  以內로 維持해야하며 따라서 다음 제약式을 만족해야 한다.

$$V_{j \min} \leq V'_j(\Delta p) \leq V_{j \max} \tag{8}$$

여기서  $V_{min} : V_{sj} - V_{BV}$   
 $V_{max} : V_{sj} + V_{BV}$

式(8)의 制約式을 電壓偏差에 대해 나타내면

$$-V_{BV} \leq V_{sj} - V'_j(\Delta p) \leq V_{BV} \tag{9}$$

로된다. 式(9)는  $V_{sj}$ 를 基準값으로 取하여 單位法으로 換算하면 式(10)과 같이된다.

$$-B_V \leq 1 - V_j(\Delta p) \leq B_V \tag{10}$$

여기서  $B_V = V_{BV}/V_{sj}$ ,  $V_j(\Delta p) = V'_j(\Delta p)/V_{sj}$

$j$  母線의 基準電壓으로부터의 電壓偏差  $\Delta V_j$ 는

$$\Delta V_j = 1 - V_j(\Delta p) \text{ [pu V]} \tag{11}$$

이된다.

한편 負荷遮斷時 電壓偏差  $\Delta V_j$ 를 電壓偏差許容幅  $\pm B_V$  以內로 유지시키도록 하기위해 penalty function method를 이용하여 式(10)의 制約式을 처리한다. 즉 式(10)을  $B_V$ 로 正規化하고 해당모선의 負荷  $P_{Lj}$ 의 크기에 따라 加重하여 모든 負荷母線에 대해 代數和를 취하면

$$\sum_i \frac{P_{Li}}{\sum_j P_{Lj}} \left[ \frac{1 - V_j(\Delta p)}{B_V} \right]^2 \tag{12}$$

으로되고 이를 式(7)에 線型給合하므로써 scalar penalty function 型態의 非制約目的函數 式(13)을 얻게 된다.

$$F_1 = K_1 \left[ \frac{1-f(\Delta p)}{B_F} \right]^2 + K_2 \sum_i^n \frac{P_{Li}}{\sum_j^n P_{Lj}} \left[ \frac{1-V_i(\Delta p)}{B_V} \right]^2$$

여기서  $K_1, K_2$  : weighting factor

일반적으로 大電源脫落事故 以後에 發電力의 再分配와 負荷遮斷에 따른 線路潮流變動으로 線路의 過負荷가 發生될 경우가 많은데 이것은 線路 자체뿐 아니라 系統의 安定度를 위해서도 이러한 過負荷解消는 系統의 周波數나 電壓의 安定維持와 함께 필수적인 조건이 되고 있다.

### 2.2 目的函數의 擴張

본 연구에서는 負荷遮斷時 線路가 過負荷로 되는 것을 防止하기 위하여 線路兩端 母線間의 電壓位相角差를 最大許容相角 以內로 制限 시키는 制約條件式을 다음과 같이 도입하였다.

$$-\phi_{km}^{max} \leq \phi_{km} \leq \phi_{km}^{max} \quad (14)$$

여기서  $\phi_{km}$  : k - m 母線間의 相角差 ( $\theta_k - \theta_m$ )  
 $\phi_{km}^{max}$  : k - m 母線間의 最大許容相角

式(14)에서  $\phi_{km}^{max}$ 는 線路의 最大許容電流를 사용해서 다음과 같이 求할수 있다.<sup>6)</sup>

그림 1과 같이 兩端이 母線 k와 m에 연결된 線路의 線路電流  $\hat{I}_{km}$ 은

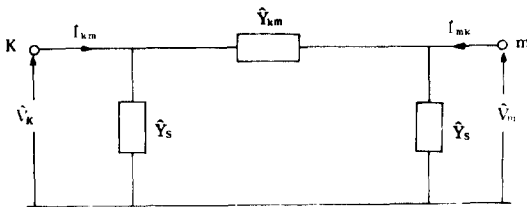


그림 1.  $\pi$  모델 송전선로

Fig. 1. Pi-model of Transmission Line

$$\hat{I}_{km} = \hat{Y}_{ks} V_k e^{j\theta_k} - \hat{Y}_{km} V_m e^{j\theta_m} \quad (15)$$

로 된다.

여기서  $\hat{Y}_{km} (G_{km} + jB_{km})$  : 線路의 Series admittance.

$\hat{Y}_{ks}$  :  $\hat{Y}_s + \hat{Y}_{km}$

$\hat{Y}_s$  : 線路의 兩分된 Shunt admittance

(15)式에서 線路電流  $\hat{I}_{km}$ 의 크기의 2승은

$$|\hat{I}_{km}|^2 = |Y_{ks}|^2 V_k^2 - 2 \text{Re} \{ \hat{Y}_{km}^* \hat{Y}_{ks} V_k V_m e^{j(\theta_k - \theta_m)} \} + |\hat{Y}_{km}|^2 V_m^2 \quad (16)$$

이 된다.

만일 매개변수 C와  $\epsilon$ 을 式(17)과 같이 정의하면 式(18)을 얻을수 있다.

$$C = |\hat{Y}_{km}| \cdot |\hat{Y}_{ks}| \cdot |V_k| \cdot |V_m|$$

$$\epsilon = t_{am}^{-1} \frac{B_{km}}{G_{km}} + t_{am}^{-1} \frac{B_{km}}{G_{km}} \quad (17)$$

$$\text{Re} \{ \hat{Y}_{km}^* \hat{Y}_{ks} V_k V_m e^{j(\theta_k - \theta_m)} \} \equiv C \cos(\epsilon + \theta_k - \theta_m) \quad (18)$$

式(18)에서부터 母線 k와 m사이의 相角差  $\theta_k - \theta_m$ 을 求하면 (19)式으로 된다.

$$\theta_k - \theta_m = \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2C} (|\hat{Y}_{ks}|^2 V_k^2 + |\hat{Y}_{km}|^2 V_m^2 - |\hat{I}_{km}|^2) \right\} - \epsilon \quad (19)$$

各母線의 電壓位相角  $\theta_i$ 는 負荷遮斷量  $\Delta P_i$ 의 函數이며 式(14)의 制約範圍를 벗어나는 값은 式(20)과 같은 scalar penalty function

$$F_{line} = \sum_i^{kl} x_i \cdot u(x_i) \quad (20)$$

여기서  $x_i$  :  $(\theta_k(\Delta p) - \theta_m(\Delta p))^2 - \theta_{km}^{max}$

$u(x_i)$  : unit step function

$kl \in \text{Tr, Cable}$  線路等 重要線路

으로 나타낼수 있기 때문에 이것을 종래의 目的函數에 結合시키므로써 式(21)과 같은 새로운 目的函數를 定義할수 있다.

$$F = K_1 \left( \frac{1-f(\Delta p)}{B_F} \right)^2 + K_2 \sum_i^n \frac{P_{Li}}{\sum_j^n P_{Lj}} \left( \frac{1-V_i(\Delta p)}{B_V} \right)^2 + K_3 \sum_i^{kl} X_i \cdot u(x_i) \quad (21)$$

여기서  $K_3$  : Weighting factor

式(21)을 目的函數로 채택하므로써 負荷遮斷時 系統周波數와 電壓의 適正維持는 물론 線路過負荷까지 解消시킬수 있도록 各母線의 負荷遮斷量  $\Delta P_i$ 를 決定할 수 있다. 여기서 Weighting factor  $K_1, K_2, K_3$ 의 결정은 몇몇 penalty term으로 구성된 목적함수를 最適化시키는 문제의 경우 일반적으로 이용하는 방식, 즉 강조되어지는 term을 다른 것에 비해 더욱 加重시키는 일반적 방법을 이용하되 계통의 상태에 따라 중속되는 각각의 penalty term 값을 상호 비교하여 制御되는 상태변수가 소폭적으로 制約을 벗어나는데 대해서 iteration이 너무많이 소모되지 않도록 trial and error method에 의해 적절히 scaling하여 결정한다.

2.3 感度行列에 의한 線型化

系統周波數  $f$ 와  $i$ 母線電壓  $V_i$  및 位相角  $\theta_i$ 는  $j$ 母線의 負荷遮斷量  $\Delta P_j$ 에 關한 非線型函數이고 (21)式으로 定義한 目的函數  $F$  역시 非線型이다.

여기서 目的函數  $F$ 를 効率的으로 最小化하기 위하여 系統事故後 미스의 負荷遮斷이 실시될 경우 이 負荷遮斷이 周波數, 電壓, 位相角에 미치는 影響을 나타내는 各各의 感度係數  $S_F, S_V, S_\theta$ 를 이용하여  $f, V_i, \theta_i$ 를 線型化 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{즉, } f &= f_0 + \sum_j S_{Fj} \Delta P_j \\ V_i &= V_{oi} + \sum_j S_{Vij} \Delta P_j \\ \theta_i &= \theta_{oi} + \sum_j S_{\theta ij} \Delta P_j \end{aligned} \quad (22)$$

여기서  $f_0, V_{oi}$ : 系統事故後 형성되는 새로운 系統狀態 (new steady state)<sup>5), 6)</sup>에서의 周波數, 電壓, 位相角.

$S_{Fj}$ :  $j$ 母線의 有效電力變化에 대한 周波數 感度係數.

$S_{Vij}$ :  $j$ 母線의 有效電力變化에 대한  $i$ 母線의 電壓 感度係數.

$S_{\theta ij}$ :  $j$ 母線의 有效電力變化에 대한  $i$ 母線의 位相角 感度係數.

한편 感度係數  $S$ 를 作成하기 위하여 系統動搖後의 系統狀態를 해석하는데 적합한 즉 發電機의 調速機 靜的應動特性和 負荷의 電壓·周波數特性을 고려하고 系統周波數를 電力方程式에 變數로 도입한 潮流計算法<sup>5)</sup>을 이용하였다(부록 참조). 式(22)를 式(21)의 目的函數에 代入하면

$$\begin{aligned} \text{Min} &= K_1 \left( \frac{1 - f_0 - \sum_j S_{Fj} \Delta P_j}{B_F} \right)^2 + K_2 \sum_j \frac{P_{Lj}}{\sum_j P_{Lj}} \\ &\left( \frac{1 - V_{oi} - \sum_j S_{Vij} \Delta P_j}{B_V} \right)^2 + K_3 \sum_i^{K_i} X_i u(x_i) \\ &= a (\Delta f - \sum_j S_{Fj} \Delta P_j)^2 + b \sum_i P_{Li} (\Delta V_i - \\ &\sum_j S_{Vij} \Delta P_j)^2 + K_3 \sum_i X_i u(x_i) \end{aligned} \quad (23)$$

여기서  $a = K_1 / B_F^2$

$$b = (K_2 / B_V^2) \sum_j P_{Lj}$$

$$x_i = (\theta_{\kappa o} - \theta_{m o} + \sum_j S_{\theta \kappa j} \Delta P_j - \sum_j S_{\theta m j} \Delta P_j)^2$$

과 같이  $\Delta P_j$ 에 關한 2次式으로 된다.

한편  $j$ 母線에서의 負荷遮斷量  $\Delta P_j$ 는  $j$ 母線에서의

負荷  $P_{Loj}$  以上으로 될수 없으므로

$$0 \leq \Delta P_j \leq P_{Loj} \quad (24)$$

를 만족해야 한다.

따라서 負荷遮斷量決定문제는 式(24)의 制約條件下에서 式(23)의 目的函數를 最小化시키는 最適化問題로 要約된다.

2.4 負荷遮斷量的 決定

前項에서 얻어진 目的函數를 最小化하기 위한 數值解法으로서는 gradient法과 遮斷效果크기에 比例하여 遮斷量을 各負荷母線에 配分하는 配分遮斷方式<sup>8)</sup>을 適用하였다.

먼저  $j$ 母線에서 目的函數  $F$ 를 最小化하는 gradient는 다음 式(25)와 같이 求해진다.

$$\begin{aligned} g_i &= \frac{\partial F}{\partial \Delta P_j} \\ &= -2a (\Delta f - \sum_j S_{Fj} \Delta P_j) S_{Fj} - 2b \sum_i P_{Li} (\Delta V_i - \\ &\sum_j S_{Vij} \Delta P_j) S_{Vij} \\ &+ K_3 \sum_i^{K_i} \left[ 2(S_{\theta \kappa j} - S_{\theta m j}) \left( \sum_j S_{\theta \kappa j} \Delta P_j + \theta_{\kappa o} \right) \right. \\ &\left. + 2(S_{\theta m j} - S_{\theta \kappa j}) \left( \sum_j S_{\theta m j} \Delta P_j + \theta_{m o} \right) \right] \cdot u(x_i) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{여기서 } x_i = \left( \theta_{\kappa o} - \theta_{m o} + \sum_j S_{\theta \kappa j} \Delta P_j - \sum_j S_{\theta m j} \Delta P_j \right)^2$$

式(25)의 gradient  $g_i$ 는 目的函數  $F$ 의 等高線에 直交하는 것으로 最大傾斜의 方向을 나타낸다. 따라서  $-g_i$ 의 方向으로  $\alpha$ 만큼 前進할때  $F$ 의 最小化가 이루어지므로 目的函數  $F$ 를  $\alpha$ 와  $g_i$ 의 函數로써 式(26)과 같이 나타내고  $F(-\alpha g)$ 를 最小로하는 step  $\alpha$ 를 求한후 遮斷量을 決定 한다.

$$\begin{aligned} \text{이 결과 } F(\Delta P) &= F(-\alpha g) \\ &= A\alpha^2 + B\alpha + C \end{aligned} \quad (26)$$

여기서

$$A = a \left( \sum_j S_{Fj} g_j \right)^2 + b \sum_i P_{Li} \left( \sum_j S_{Vij} g_j \right)^2 + K_3 \sum_i^{K_i}$$

$$\left( \sum_j S_{\theta \kappa j} g_j - \sum_{j=1}^n S_{\theta m j} g_j \right)^2 \cdot u(x_i)$$

$$B = a \cdot \Delta f \sum_j S_{Fj} g_j + b \sum_i P_{Li} \Delta V_i \left( \sum_j S_{Vij} g_j \right) +$$

$$K_3 \sum_i^{K_i} \left[ (\theta_{\kappa o} - \theta_{m o}) \left( \sum_j S_{\theta \kappa j} g_j \right) + (\theta_{m o} - \theta_{\kappa o}) \right.$$

$$\left. \left( \sum_j S_{\theta m j} g_j \right) \right] u(x_i)$$

$$C = a\Delta f^2 + b\sum_i P_{Li}\Delta V_i^2 + k_3\sum_i^{k_i} (\theta_{ko} - \theta_{mo})^2 - C_{km}^2 \cdot u(x_i)$$

로 된다. 式(26)에서 F를 最小化하는  $\alpha$ 값은  $-B/A$ 로 되기 때문에 j 母線에서의 最適遮斷量  $\Delta P_j$ 는 아래와 같이 결정된다.

$$\Delta P_j = (B/A) g_j \quad (27)$$

한편 j 모선에의 無効電力遮斷量  $\Delta Q_j$ 는 無効電力이 有効電力遮斷時 一定比率에 따라 同時에 遮斷 되기 때문에 해당 부하모선의 無効電力과 有効電力比率  $Q_o/P_o$ 를 사용해서 다음과 같이 결정하였다.

즉, j 母線의 遮斷後電力  $P'_{oj}$ ,  $Q'_{oj}$ 는 式(28)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} P'_{oj} &= P_{oj} - \Delta P_j \\ Q'_{oj} &= Q_{oj} - \Delta P_j (Q_{oj}/P_{oj}) \end{aligned} \quad (28)$$

여기서  $P_{oj}$ : 遮斷前 j 母線의 有効電力  
 $Q_{oj}$ : 遮斷前 j 母線의 無効電力

만일 決定된 j 母線의 負荷遮斷量이 遮斷前 電力보다 클 경우 負荷遮斷量  $\Delta P_j$ 는 두 값의 最小值를 택하여 式(29)와 같이 決定한다.

$$\Delta P_j^* = \min(P_{oj}, (B/A) g_j) \quad (29)$$

式(27)의 制約式을 벗어날 경우 그때의 gradient  $g_j$ 는 強制的으로 0으로 처리하며 이같이 制約條件을 벗어날때의 修正方法의 概念度를 그림 2에 나타낸다.

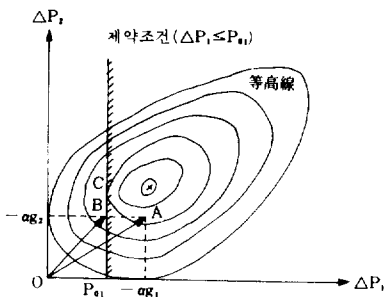


그림 2. 制約條件을 고려한 경우 修正方法  
 Fig. 2. Modified gradient method

즉,  $\Delta P_1$ 가 制約을 벗어날 경우  $\Delta P_1$ 方向의 成分을  $-\alpha g_1$ (A點)에서  $P_{01}$ (B點)로 修正하도록 한다. 以上の 式(25)에서 부터 式(29)까지 反復計算하므

로서 系統周波數 f 및 母線電壓  $V_i$ 와 線路電流를 規定值 以內로 維持 하는데 필요한 各 負荷母線에서의 負荷遮斷量을 求할 수 있다.

본 알고리즘의 概略的인 flow-chart를 그림 3에 보인다.

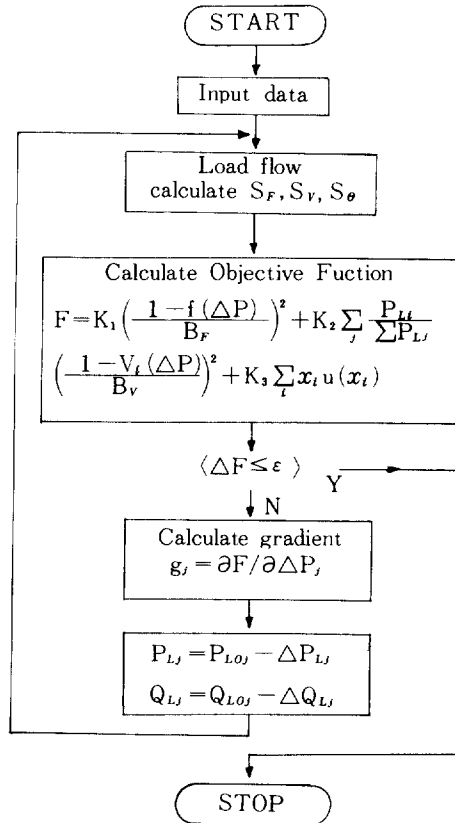


그림 3. 간략화한 알고리즘  
 Fig. 3. General Flow Chart of Logic

### 3. 適用事例

適用事例로서는 그동안 관련논문에서 여러 차례 인용되어 온 그림 4와 같은 8 母線 9 線路 모델系統<sup>5), 9)</sup>을 사용하였다.

系統條件은 表 1에 나타난 바와 같으며 各線路의 最大許容電流值는 適當히 假定해서 指定하기로 하고  $f_{HF}$ 와  $B_v$ 는 各各 0.05[Hz], 5[%V]로 設定하였다.

본 사례에서의 weighting factor의 값은  $K_1: 1$ ,  $K_2: 1$ ,  $K_3: 1$ 로 하였다.

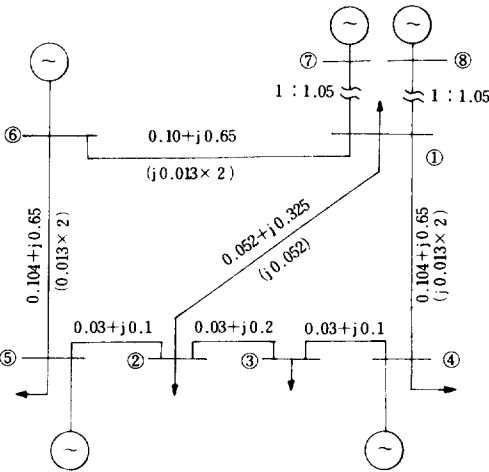


그림 4. 8-모선 모델계통  
Fig. 4. 8-Bus Model System

본 연구에서는 總系統電力의 10~25(%)에 해당하는 電源脫落事故를 想定하고 이 때 系統을 安定狀態로 회복시키는데 必要한 各負荷母線에서의 所要負荷遮斷量의 計算結果를 表 2에 나타내었다.

表 2에서 Case 2, Case 4와 같이 發電機母線 6과 7에서 各各 系統總發電力의 10(%)와 20(%)에 해당하는 電源脫落事故가 일어났을 경우 중래방법과 본 연구방법에 의한 計算結果는 同一하게 됨을 알 수 있다. 즉 이 경우에는 0.10993[pu], 0.71894[pu]의 負荷가 各母線에서 配分遮斷 되므로써 系統周波數는 49.99[Hz]로 회복되어 周波數許容運轉範圍인 50±0.05[Hz] 以內로 유지되었다. 끝 이와같이 兩 Case에 대해서는 負荷遮斷 過程에서 線路過負荷가 일어나지 않았기 때문에 兩方法에 計算結果가 同一함을 알 수 있다.

표 1 8-모선 모델계통의 계통 조건

Table1. The condition of 8-Bus Model System

Bus	V	Gen.	Load	$P_p$ $q_p$	$p_c$ $q_c$	$p_z$ $q_z$	$N_1$ $N_2$	$k_p$ $k_q$	Reg.	Line No	SB-EB (k) - (m)	$I_{km}^{max}$	$\phi_{km}^{max}$
1			0.0	1.0 1.0	0.0 0.0	0.0 0.0	1 2	0.0 0.0		1	6 - 1	0.15	5.259
2			1.3	0.2 0.0	0.3 0.0	0.5 0.0	1 2	0.04 0.0		2	6 - 5	0.65	23.256
3			1.5	0.2 0.0	0.3 0.0	0.5 0.0	1 2	0.03 0.0		3	5 - 2	1.50	6.773
4	1.0	1.625 0.	0.45 +j.15	0.2 0.2	0.3 0.3	0.5 0.5	1 2	0.0 0.0	0.05	4	1 - 2	1.25	23.393
5	1.0	0.2	0.5	0.2 0.0	0.3 0.0	0.5 0.0	1 2	0.0 0.0	0.05	5	2 - 3	0.25	2.923
6	1.0	0.5							0.05	6	4 - 3	2.45	13.042
7	1.0	0.8							0.05	7	1 - 4	0.35	12.461
8	1.0	0.82							0.05	8	7 - 1	1.0	10.968
										9	8 - 1	1.0	11.026

표 2. 8-모선 모델 계통의 적용례

Table2. Comparison Results of load shedding schemes for model system

case No	case 내용	총발전력 의 (%)	주파수 (Hz)		부하차단량		과부하 선로 및 과부하율	
			I	II	I	II	I	II
1	전원탈락 이전상태	0	50	50	0.0	0.0		
2	모선 6 전원탈락	10	49.996	49.996	0.10993	0.10993		
3	모선 4 전원탈락	15	49.984	50.003	0.31881	0.36032	(5) 0.8(%) (7) 7.5(%)	(5) 0(%) (7) 0(%)
4	모선 7 전원탈락	20	49.996	49.996	0.53069	0.53069		
5	모선 4 전원탈락	25	49.982	50.001	0.71894	0.94805	(5) 51.4(%) (7) 28.3(%)	(5) 0(%) (7) 0(%)

I : 중래방법 II : 본연구방법

한편 case 3 과 case 5 와 같은 경우, 즉 母線 4 에서 各各 總系統電力의 15(%)와 25(%)의 電源脫落事故時에는 종래방법으로는 電源脫落量의 53.1(%)와 71.9(%)에 해당하는 負荷가 遮斷되어 系統周波數를 各各 49.98[Hz], 49.98[Hz]로 회복시키고 있으나 線路 5 와 7 의 線路電流가 앞서 지정했던 最大線路電流許容值를 가령 case 3 의 경우는 各各의 線路에 대해 0.8(%)와 7.5(%)의 過負荷率을 case 5 의 경우는 各各 51.4(%)와 28.3(%)의 過負荷率을 나타내어 系統安定運轉에 문제를 남기고 있다.

한편 본연구방법의 計算結果를 살펴보면 各 case 에 대해서 各各 電源脫落量의 60(%) (=0.36032pu)와 94(%) (=0.94805pu)의 負荷遮斷으로 系統周波數 및 電壓을 許容範圍內로 회복시키고 동시에 앞서 일어났던 線路 5 와 7 의 過負荷도 解消시키고 있음을 알 수 있다(表 3 참조)

참고로 case 5 의 電源脫落事故時 兩方法에 의해

서 計算된 各負荷母線에서의 遮斷量과 各發電機母線에서의 發電機出力을 表 4 에 나타내었다.

여기서 各母線別 負荷遮斷量의 合計를 比較해 보면 본연구의 計算結果값이 종래방법의 計算값에 비해 약 31.8(%)의 遮斷量이 더 많은데 이것은 새로 追加된 線路過負荷 解消를 고려했기 때문이다.

本研究에서는 IEEE 14母線 20線路의 모델계통에 대해서도 여러가지 電源脫落事故를 想定해서 兩方法을 比較해본 結果 過負荷解消까지 고려한 새로운 알고리즘의 有效性을 확인 할 수 있었다.

#### 4. 結 論

本研究를 통하여 얻어진 結論을 要約하면 다음과 같다.

(1) 發電機脫落事故와 같은 苛酷한 系統事故가 發生하였을 경우 이에 대응해서 強制負荷遮斷으로 電力

표 3. 8-모선 모델 계통의 선로전류의 비교

Table3. Comparison of line current

선 번	로 시단-종단	전원탈락전 선로전류	case 3. 부하차단후 선로전류		case 5. 부하차단후 선로전류	
			I	II	I	II
1	6-1	0.07762	0.10252	0.10658	0.09504	0.09647
2	6-5	0.47228	0.48759	0.42738	0.49446	0.48070
3	5-2	0.98438	1.03452	1.02162	0.97972	0.95341
4	1-2	0.83840	0.86846	0.73814	0.87638	0.84053
5	2-3	0.17246	0.37849	0.22256	0.25206	0.18839
6	4-3	1.62285	1.29116	1.31427	1.35784	1.35871
7	1-4	0.24199	0.44919	0.31960	0.37649	0.33288
8	7-1	0.69782	0.75128	0.67311	0.75229	0.73545
9	8-1	0.74089	0.79394	0.71645	0.79494	0.77804

I : 종래방법 II : 본연구방법

표 4. case 5 의 모선별 부하 차단량 및 발전력

Table4. Load curtailed and generation of buses(case 5.)

모선 No.	사고이전의 발전력(P)	부 하 차 단 량		부하차단후 발전력(P)	
		I	II	I	II
1		0.11374	0.00716		
2		0.16501	0.19168		
3		0.18270	0.30860		
4	1.73816	0.14898	0.30199	0.8415	0.8415
5	0.18915	0.10851	0.13863	0.20576	0.1816
6	0.57286			0.61640	0.5560
7	0.76201			0.82216	0.7377
8	0.76201			0.82216	0.7377
計	4.02747	0.71894	0.94805	3.30761	3.05546

\* I : 종래방법 II : 본연구방법

系統을 制御할때에, 負荷母線의 電壓變動을 고려하면서 系統周波數를 안정범위로 회복시킬뿐만 아니라 동시에 負荷遮斷에 起因한 潮流의 變動으로 發生하는 送電線路의 過負荷解消까지 고려할 수 있는 새로운 負荷遮斷 알고리즘을 개발하였다.

(2) 본 알고리즘에서는 負荷遮斷量과 피제어 변수  $f, v, \theta$ 에 대한 非線型關係를 感度解析을 통하여 線型化하여 문제를 간소화 시킨과 동시에 母線別 負荷遮斷效果를 求할 수 있도록 하므로서 各負荷母線에서 그 크기에 比例하여 配分遮斷을 할 수 있게 하였다.

(3) 본 알고리즘을 모델계통에 適用하여 여러 case의 電源脫落事故에 대해서 검토해본 결과 그 有効性을 검증할 수 있었다.

(4) 본 연구는 瞬時制御범위를 벗어나 post-fault steady state에서 검토되었지만 여기에서 얻어진 결과는 電源脫落事故와 같은 重大事故가 發生한 系統의 安全狀態의 先行決定과 給電計劃 및 非常時의 安定度研究에도 有用할 것으로 기대되며 앞으로 연속량으로 求해진 負荷遮斷量을 現實에 맞게 불연속량으로 求하도록 하는 것과 瞬時制御로 發展시키는 것이 研究되어야 할 課題이다.

附 錄

感度係數  $S_f, S_v, S_\theta$  計算<sup>5)</sup>

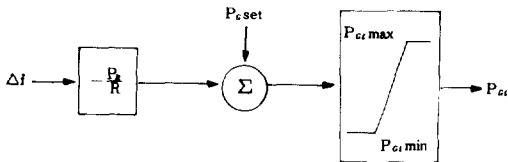
任意 i母線에서의 電力偏差方程式은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_{pi} &= P_i - P_{Gi} + P_{Li} = 0 \\ f_{qi} &= Q_i - Q_{Gi} + Q_{Li} = 0 \end{aligned} \quad (A-1)$$

여기서  $P_i, Q_i$  : i母線電力

$P_{Gi}, Q_{Gi}$  : i母線에서 發電機 調速機靜의 特性을 고려한 出力

$P_{Li}, Q_{Li}$  : i母線의 電壓과 周波數特性을 고려한 負荷電力



그림A-1. 發電機의 Governor Model  
Fig. A-1. Generator Governor Model

$$\begin{aligned} P_{Gi} &= P_{Gi} \text{ set} - \frac{P_i}{R} \Delta f \\ P_{Gi} \text{ min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi} \text{ max} \end{aligned} \quad (A-2)$$

여기서  $\Delta f$  : 系統周波數偏差

$R$  : 調整率

$P_R$  : 發電機 定格出力

$P_{Gset}$  : 發電機 Schedule 出力

(A-1)式에서 負荷電力  $P_{Li}$ 와  $Q_{Li}$ 는 다음式(A-3)와 같다.

$$\begin{aligned} P_{Li} &= P_{Li} \text{ set} (1 + k_p \Delta f) (p_p + p_c \left(\frac{V}{V_{LB}}\right)^{N_1} \\ &\quad + p_z \left(\frac{V}{V_{LB}}\right)^2) \\ Q_{Li} &= Q_{Li} \text{ set} (1 + k_q \Delta f) (q_p + q_c \left(\frac{V}{V_{LB}}\right)^{N_2} \\ &\quad + q_z \left(\frac{V}{V_{LB}}\right)^2) \end{aligned} \quad (A-3)$$

여기서  $P_{Li} \text{ set}, Q_{Li} \text{ set}$  : 負荷의 定格電力

$k_p, k_q$  : 負荷의 系統特性定數

$p_p, q_p$  : 一定電力負荷의 比率

$p_z, q_z$  : 一定임피던스 負荷比率

$p_c, q_c$  : 電壓의 N승에 比例하는 負荷의 比率

$N_1, N_2$  : 指數

$V_{LB}$  : 負荷母線의 定格電壓

式(A-1)에 式(A-2), (A-3)를 代入하면

$$\begin{aligned} f_{pp} &= P_i \text{ set}_p (1 + k_{pp} \Delta f) (P_{pp} + P_{cp} \left(\frac{V_p}{V_{LBp}}\right)^{N_1} \\ &\quad + P_{zp} \left(\frac{V_p}{V_{LBp}}\right)^2) - P_{Gset}_p + \frac{P_{Rp}}{R_p} \Delta f \\ &\quad + V_p \sum_{q=1}^n [(G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) V_q] = 0 \\ f_{qp} &= Q_i \text{ set}_p (1 + k_{qp} \Delta f) (q_{pp} + q_{cp} \left(\frac{V_p}{V_{LBp}}\right)^{N_2} \\ &\quad + q_{zp} \left(\frac{V_p}{V_{LBp}}\right)^2) - Q_{Gset}_p - a_{qp} \Delta P_c - b_{qp} \Delta P_G^2 \\ &\quad + V_p \sum_{q=1}^n [(G_{pq} \sin \theta_{pq} - B_{pq} \cos \theta_{pq}) V_q] = 0 \end{aligned} \quad (A-4)$$

로 된다.

여기서,

$$\Delta P_G = -P_R \frac{1}{R} \Delta f$$

$\Delta f$  :  $f_s$ 로 부터의 周波數偏差

$G_{pq}, B_{pq}$  : p-q母線間的 어드미턴스

한편 式(A-4)는 Newton-Raphson法을 利用하여 풀며 이때, 수정방정式(A-5)의 축차계산을 통하여 式(A-4)를 만족하는  $V, \theta, \Delta f$ 의 값이 求해지는 最終단계의 式(A-5)에 의하여 感度行列[S]가 求해진다.



$$\begin{bmatrix} f_{P1} \\ \vdots \\ f_{Pn-1} \\ f_{Pn} \\ f_{QU} \\ \vdots \\ f_{QU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{ij} & F_i & N_{ij} \\ (-\frac{\partial f_{Ql}}{\partial \theta_j}) & (-\frac{\partial f_{Ql}}{\partial \Delta f}) & (-\frac{\partial f_{Ql}}{\partial V_j}) \\ J_{ij} & G_i & L_{ij} \\ (-\frac{\partial f_{Ql}}{\partial \theta_j}) & (-\frac{\partial f_{Ql}}{\partial \Delta f}) & (-\frac{\partial f_{Ql}}{\partial V_j}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{n-1} \\ \Delta(\Delta f) \\ \Delta V_n \\ \vdots \\ \Delta V_u \end{bmatrix}$$

(A-5)

여기서, n : 總母線數  
l : 負荷母線數

式(A-5)에서 Jacobian行列의 逆行列을 求한 다음  
우변에 대해서 式을 세우면

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{n-1} \\ \Delta(\Delta f) \\ \Delta V_n \\ \vdots \\ \Delta V_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_n \\ \vdots \\ \Delta Q_u \end{bmatrix}$$

(A-6)

여기서  $\Delta P_l = f_{Pl}$   
 $\Delta Q_l = f_{Ql}$

式(A-6)으로 되며 이式을 다음과 같이 狀態變數

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \cdots \Delta \theta_{n-1} : \Delta(\Delta f) : \Delta V_n \cdots \Delta V_u \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} S_\theta \\ S_f \\ S_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} \quad (A-7)$$

와 從屬變數를 포함하는 行列形式으로 式(A-7)  
과 같이 縮約시켜 感度行列  $[S_\theta]$ ,  $[S_f]$ ,  $[S_v]$  를  
求한다.

## References

- 1) 宋吉永 “最適負荷制限方式의 適用에 관한 연구”  
大韓電氣學會誌 vol.24, No.2, 1975
- 2) L.P. Hajdu 外 “Optimum Load-Shedding Policy  
for Power Systems” IEEE Transaction on Power  
Apparatus and System, vol.PAS-87, NO.3, pp.784-  
795, March, 1968
- 3) M.H. Kent 外 “Dynamic Modeling of Load in st-  
ability Studies” IEEE Transaction on Power Ap-  
paratus and System, vol.PAS-88, pp.750-760, May,  
1969
- 4) D.K. Subramanian 外 “Optimum Load Shedding  
Through Programming Techniques”, IEEE Trans-  
action on Power Apparatus and System, vol.PAS-90,  
No.1, pp.89-95, January / February, 1971.
- 5) M. Okamura 外 “A New Power Flow Model and  
Solution Method” IEEE Transaction on Power Ap-  
paratus and System, vol.PAS-94, No.3, pp.1042-1050,  
May / June, 1975.
- 6) S.M. Chan 外 “A solution of the transmission limited  
dispath problem by sparse linear Programming”  
IEEE Transaction on Power Apparatus and System,  
vol.PAS-98, No.3, pp.1044-1053, 1979.
- 7) 長尾他外 “發電機特性と 負荷特性을 考慮した潮流  
計算法” 日本電力中央 研究所報告 No.180008, 1980
- 8) Ueda 外 “Optimal Load shedding as Emergency con-  
trol of Power Systems” 日本電力中央研究所報告,  
No.183009, 1983.
- 9) K.A. Palanisway 外 “Optimal Load Shedding Taking  
into account of Voltage and frequency characteristic  
of Loads”  
IEEE Transaction on Power Apparatus and System,  
vol.PAS-104, No.6, June, 1985.