

想定事故를 고려한 電力系統 最適運用に 관한 研究

論 文

33~6~5

Study on the Calculation of the Optimal Power Operation Considering Line Contingencies

朴 永 文* · 白 榮 植**

(Young-Moon Park · Young-Sik Paek)

Abstract

The power system scheduling process is formulated as an optimization problem with linear inequality constraints. AC Loadflow method is used for the problem solution and line losses are considered. The constraints under consideration are generator power limits, load shedding limits and line capacity limits.

In solving the objective function the Dual Relaxation method is adopted. Tests indicate that the method is practical for real time applications

1. 序 論

送電系統의 最適運用計算은 系統運用 및 計畵에 必要하며, 여기에 關하여 그간 많은 研究가 進行되어 왔다. 1974年度에 발표된 文獻¹⁾은 라그랑주法을 使用하여 最適問題를 풀었으며, PESHON等²⁾은 GRG (Generalized reduced gradient)法을 使用하여 問題를 解決하였다. GUNGOR³⁾는 燃料費를 目的函數로 두고 有効, 無効電力에 關한 最適配分을 구하였다.

그러나 이들 方法은 線路容量制約이 없다는 가정에서만 可能하므로, 線路事故時 線路潮流가 線路容量을 초과하는 경우 맞지가 않으며, 또 NLP (nonlinear programming) 方法으로 問題를 解決하였으므로, 計算時間 및 解의 不安定性때문에 큰 系統에서의 適用이 의문시된다

그후 線路容量制約을 考慮한 方法이^{4),5)} 研究되었 으며, 이들은 解가 보장되는 LP (Linear programming) 法을 사용하였다. Chan 과 Yip⁴⁾는 SLP (sparse linear programming) 技法을 사용하였고, Stott와 Marinho⁵⁾는 듀알릴렉세이션法(Du-

al-Relaxation method)을 사용하였다. 그러나 이들 方法은 直流潮流法(D.C Loadflow)을 사용하였으므로 實系統과는 약간의 거리가 있다.

本 論文은 이 點에 착안하여 交流潮流法(A.C Loadflow)^{6),7)}을 사용하였고 目的函數를 發電費用 및 供給支障費用과의⁸⁾ 합으로 놓아 實際系統運轉에 가깝도록 하였으며, 듀알릴렉세이션法⁹⁾을 사용하여 計算時間도 짧게 걸리도록 하였다.

2. 問題의 설정

系統狀態(線路狀態 및 發電可能出力의 上下限 및 負荷量)가 주어진 경우, 發電出力 및 供給負荷는 系統運轉費用을 最少化하도록 配分되어야 한다. 本 論文에서는 運轉費用을 發電費用 및 供給支障費用의 합으로 놓았다. 그리고 실제 系統運轉에 있어서, 線路潮流가 線路容量을 초과 할 때에는, 이 線路過負荷를 解消하도록 發電出力을 再分配하고, 만약 이것으로도 안 될 경우에는 負荷遮斷을 行하여 安定된 系統運轉을 하여야 한다. 이것에 對한 目的函數 및 制約條件이 式(1) 및 (2)~(6)에 주어져 있다.

$$\text{最少化: } \sum_{i=1}^{NB} C_i P_{gi} + \sum_{i=1}^{NB} \alpha_i (P_{Li} - P_{Li}) \quad (1)$$

$$\text{制約條件: } \underline{P}_g \leq P_g \leq \bar{P}_g \quad (2)$$

* 正會員: 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
** 正會員: 明知大 工大 電氣工學科 助教授
接受日字: 1984年 4月 30日

$$0 \leq P_L \leq P_L^a \quad (3)$$

$$-\bar{P}_i \leq P_L \leq \bar{P}_i \quad (4)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^{NB} |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_{ij} + \theta_i - \theta_j), \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, NB$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{NB} |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_{ij} + \theta_i - \theta_j), \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, NB$

단, P_g, P_g^o, P_g^a ; 母線 發電電力, 發電可能下限 및 上限의 벡터값.

P_l, \bar{P}_l^d ; l 線路의 潮流 및 線路容量의 벡터값.

P_{gi}, P_{Li}, P_{Li}^d ; i 母線의 發電出力, 供給電力 및 負荷需要.

C_i, α_i ; i 母線 發電所의 平均 燃料費係數 및 i 母線 負荷의 供給支障費用係數.

NB ; 母線의 갯수

P_i, Q_i ; i 母線의 有効 및 無効電力.

V_i, θ_i ; i 母線의 電圧 및 位相角

Y_{ij}, δ_{ij} ; 母線 i, j 間의 母線어드미턴스 및 그 位相角.

여기서 式(2)는 發電電力 上下限값의 制約, 式(3)은 供給負荷量의 制約, 式(4)는 線路潮流의 制約, 式(5) (6)은 有効, 無効母線電力에 관한 制約式이다.

3. 解法

式(2)~(6)의 制約條件下에서 式(1)의 最少값을 LP 技法을 사용하여 구하기 위해서는 우선 이 式을 線型化하기 위한 初期運轉點을 구해야 되고, 이 運轉點 근방에서 非線型式인 式(4) 및 (5), (6)을 線型化하여야 한다. 그後 이 LP 問題를 듀알릴렉세이션法을 適用하여 구하면 된다. 듀알릴렉세이션法은 3.3에서 다룬다.

3.1 線型化를 위한 運轉狀態의 初期推定

初期 發電出力 및 供給電力量을 計算하기 위해서, 直流潮流法을 사용하여 구하였다.

$$\text{最少化; } \sum_{i=1}^{NB} C_i P_{gi} + \sum_{i=1}^{NB} \alpha_i (P_{Li}^d - R_i) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{NB} (P_{gi} + R_i) = 0 \quad (8)$$

$$-\bar{P}_l \leq A(P_g - P_L) \leq \bar{P}_l \quad (9)$$

$$\underline{P}_g \leq P_g \leq \bar{P}_g \quad (10)$$

$$0 \leq P_L \leq P_L^d \quad (11)$$

단, A 는 SY^{-1} 이고, 여기서 S 는 母線接續行列이고 Y 는 母線어드미턴스行列이다.

式(9)는 變數 P_{gi}, P_{Li} 에 관해 線型이므로 式(7)~(11)을 듀알릴렉세이션法을 사용하여 풀 수있으며, 그 결과로 初期運轉點 P_g^o, P_L^o 를 얻을 수있다. 線路損失에 對한 고려로써, 각 母線에서의 負荷값을 1.5% 정도 증가시켜서 計算하였다.

3.2 線型化

式(1)~(6)의 解를 P_g, P_L 이라고 하면, 式(12)와 같이 놓을 수 있고

$$P_g = P_g^o + \Delta P_g, \quad P_L = P_L^o - \Delta P_L \quad (12)$$

이 式을 이용하여 式(1)~(5)를 變換하면

$$\text{最少化; } \sum_{i=1}^{NB} C_i \Delta P_{gi} + \sum_{i=1}^{NB} \alpha_i \Delta P_{Li} \quad (13)$$

$$\text{制約條件; } \underline{P}_g - P_g^o \leq \Delta P_g \leq \bar{P}_g - P_g^o \quad (14)$$

$$-(P_L^d - P_L^o) \leq \Delta P_L \leq P_L^o \quad (15)$$

$$-\bar{P}_l - P_L^o \leq \Delta P_L \leq \bar{P}_l - P_L^o \quad (16)$$

$$\Delta P_{gs} - \Delta P_{Ls} = T(\Delta P_{gs} - \Delta P_{Ls}^s) \quad (17)$$

단, $\Delta P_{gs}, \Delta P_{Ls}$; 슬랙 母線에서의 發電電力, 供給電力의 증감분.

T ; 차코비안行列에 관한 式으로 다음에 설명함.

各各式(13)~(17)로 變換되며, 여기서는 有効電力 配分만이 考慮의 대상이므로 式(6)에 관해서는, 일단 交流電力潮流計算 (P_g^o, P_L^o 에서)을 하여 式(6)을 만족시킨 後에는 고려할 필요가 없다.

式(16)은 變數를 ΔP_L 대신 $\Delta P_g, \Delta P_L$ 의 線型式으로 바꾸어야 되며 그 과정은 다음과 같다. 分割뉴턴랩슨法 (Decoupled Newton Raphson Load flow method)을 사용하였으므로, 計算과정에서 式(18)의 $[H]^{-1}$ 를 얻을 수 있으며

$$[V \Delta \theta] = [H]^{-1} [\Delta P/V] \quad (18)$$

$$[\Delta V] = [L]^{-1} [\Delta Q/V] \quad (19)$$

式(18)에서 $[H]^{-1}$ 의 ij 要素를 Z_{ij} 라 하면 $\Delta \theta_i$ 는 式(20)으로 주어지므로, 이것을 式(21)에 代入하면

$$\Delta \theta_i = \frac{1}{V_i} \sum_{k=1}^{NB} Z_{ik} \cdot \Delta P_k / V_k \quad (20)$$

$$\Delta P_{pq} = V_p V_q \{g_i \sin(\theta_p - \theta_q) - b_i \cos(\theta_p - \theta_q)\} (\Delta \theta_p - \Delta \theta_q) \quad (21)$$

단, g_i, b_i 은 l ($p \rightarrow q$) 線路의 어드미턴스의 실수부 및 허수부.

式(22)를 얻는다.

$$\Delta P_{pq} = V_p \cdot V_q \left\{ g_i \sin(\theta_p - \theta_q) - b_i \cos(\theta_p - \theta_q) \right\} \cdot \sum_{k=1}^{NB} \left(\frac{1}{V_p} Z_{pk} - \frac{1}{V_q} Z_{qk} \right) \frac{\Delta P_k}{V_k} \quad (22)$$

$$\Delta P_{pq}^i = \left\{ g_i \sin(\theta_p - \theta_q) - b_i \cos(\theta_p - \theta_q) \right\} \cdot \left(\frac{V_p}{V_i} Z_{pi} - \frac{V_q}{V_i} Z_{qi} \right) \quad (23)$$

여기서 ΔP_{pq}^i 를 식(23)과 같이 놓는다면, 이것은 i 母線의 電力이 ΔP 만큼 변화했을 때의 pq 線路에 흐르는 潮流變化, 즉 感度의 의미가 있다. 따라서 식(22)의 ΔP_{pq} 는 식(24)와 같이 $\Delta P_g, \Delta P_L$ 의 線型式이 된다.

$$\Delta P_{pq} = \sum_{k=1}^{NB} P_{pq}^k \Delta P_k = \sum_{k=1}^{NB} P_{pq}^k (\Delta P_g^k - \Delta P_L^k) \quad (24)$$

다음에 식(17)에 대해 설명하면 다음과 같다. 母線電力의 變化分에 대해서 고려할 경우 식(18)은 식(25)와 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} \Delta P^s \\ \Delta P^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J & J_1 \\ J_2 & J_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta^s \\ \Delta \theta^j \end{pmatrix} \quad (25)$$

단, $\Delta P^s, \Delta \theta^s$; 슬랙 母線을 제외한 母線電力, 位相角 變化分의 벡터값.

$\Delta P^j, \Delta \theta^j$; 슬랙 母線의 母線電力 및 位相角 (= 0) 變化分.

식(25)에서 식(26)과 같은 母線電力 변화분에 관한 等式 制約을 얻을 수 있고 이것은 식(17)과 같다.

$$\Delta P_g^s - \Delta P_L^s = J_s J_s^{-1} (\Delta P_g^s - \Delta P_L^s) \quad (26)$$

3.3 듀알릴렉세이션法

식(7), (13)을 LP技法中 듀알릴렉세이션法에 適用하여 풀었다. 듀알技法(Dual approach)을 사용한 것은, 프라이말技法(Primal approach)이 가능기 저해로 초기해를 들어오게 하는 段階 I (Phase I)이 필요하며 여기에 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 線路制約에 관한 不等式 條件이 많이 들어가는데 반해, 듀알技法를 사용할 경우에는 初期解를 구하기가 쉽고, 또 實系統에서 線路制約을 만족하지 않는 線路數가 적으므로 이것만을 不等式 條件으로 처리하면 유리하기 때문이다.

듀알릴렉세이션法을 適用하기 위한 식(7)의 初期解는 制約條件(9)를 제외한 식(7), (8), (10), (11)을 구하면 된다. 이것은 供給支障費係數 α_i 가 發電費用係數 C_i 보다 크므로 $P_{Li} = P_{Li}^0$ 로 결정되므로, 식(27)과 같이 되며

$$\text{最少化;} \sum_{i=1}^{NB} C_i P_{gi}$$

$$\begin{aligned} \text{制約條件;} \sum_{i=1}^{NB} P_{gi} &= \sum_{i=1}^{NB} P_{Li}^0 \\ P_{gi} &\leq P_{gi} \leq \bar{P}_{gi} \end{aligned} \quad (27)$$

이것은 費用 C_i 의 순서에 따라서 쉽게 구할 수 있다.

식(13)의 初期解는, 식(7)을 풀 결과 供給支障이 일어난다면 線路制約을 고려하지 않는다는 조건下에서 이것을 전부 해소시켰을 때가 最少가 되므로 $\Delta P_{Li} = -(P_{Li}^0 - P_{Li}^i)$ 되도록 ΔP_{Li} 를 결정하고 ΔP_{gi} 에 대해서는 식(28)을 풀면 된다.

$$\begin{aligned} \text{最少化;} \sum_{i=1}^{NB} C_i \Delta P_{gi} \\ \text{制約條件;} T_1 \Delta P_{g1} + T_2 \Delta P_{g2} + \dots \\ + T_s \Delta P_{gs} = \sum_{i=1}^{NB} T_i \Delta P_{Li} \end{aligned} \quad (28)$$

$$P_{gi} - P_{gi}^0 \leq \Delta P_{gi} \leq \bar{P}_{gi} - P_{gi}^0$$

단, T_i 는 식(17)에서 T 의 i 번째 要素. 식(28)은 變數 變환에 의해 ($y_i = h_i \Delta P_{gi}$),

$$\begin{aligned} \text{最少化;} \sum_{i=1}^{NB} \frac{C_i}{h_i} y_i \\ \text{制約條件;} y_1 + y_2 + \dots + y_s \\ = \sum_{i=1}^{NB} T_i \Delta P_{Li} \\ h_i (P_{gi} - P_{gi}^0) \leq y_i \leq h_i (\bar{P}_{gi} - P_{gi}^0) \end{aligned} \quad (29)$$

식(29)로 變환되며, 이것은 식(27)과 같은 方法으로 쉽게 구해진다. 이렇게 구해진 初期解로 듀알릴렉세이션法을 풀면 식(7), 식(13)의 解를 구할 수 있다.

4. 프로그램의 概要

전체적인 프로그램의 概要는 그림 1과 같다. 우선 直流潮流法을 사용한 經濟配分(식(7)~(11))에 의하여 初期 運轉點을 구하고, 이 값을 사용하여 分割뉴턴법에 의한 電力潮流解를 구한다. 이 過程에서 사용된 자코비안行列(Jacobian matrix)과 線路潮流값을 사용하여 식(24), (26)과 같이 線路化를 한다. 그리고 듀알심플렉스法을 適用하기 위하여 線路制約以外的 制約을 만족하고(식(14), (15), (17)) 目的函數식(13)을 最少化하는 初期解를 구한 후, 이 初期值에 의한 線路潮流를 구하고, 線路容量을 초과하는 線路만을 制約條件에 첨가하여(식(16)), 듀알심플렉스法에 의하여 새로운 最少值를 구한다. 이 결과를 사용한 線路潮流를 다시 구하고, 만약 線路制約이 만족하지 않는 것이 생겼다면 A로 되돌아가 線路制約을 만족할 때까지 계속한다. (릴렉세이션法^{8), 9)}

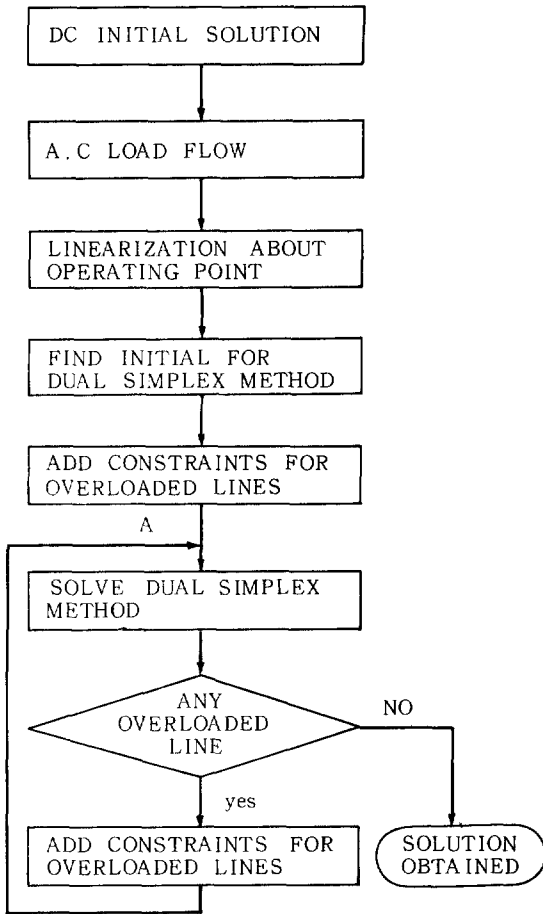


그림 1. 프로그램의 概要

Fig. 1. Flow chart of overall solution scheme

5. 모델系統에의 適用

앞에 提示된 方法을 그림 2의 모델系統¹⁰⁾(24 母線, 38 線路)에 適用해 본 結果를 要約하면 다음과 같다.

표 1에 母線의 最適配列에 의한 母線再配列後의 結果와 負荷需要量, 發電力의 上下限值 및 平均發電費用이 주어 있다.

표 1의 오른쪽에 直流潮流法에 의한 初期解가 나와 있다. 이것은 直流潮流法에 의한 것이므로 線路損失이 불포함 되었으며, 이것을 보완하기 위하여 원래 負荷需要值보다 1.5% 정도 증가된 負荷로 본 후 이 方法을 適用하면 1.5% 정도의 損失에 해당되는 電力이 各 發電機에 고루 配分될 것이다. 이것을 初期值로 하여 交流潮流問題를 풀면 슬랙電力만이 약간

표 1. 母線再配列結果, 負荷需要, 發電出力 上下限值 및 平均發電費用과 計算結果

Table 1. Result of bus reordering, load demands, generator capacities, mean generation cost and calculated results

| BUS ORDER | BUS NAME | LOAD DEMAND | \underline{P}_g | \overline{P}_g | Generation Cost | Initial Point | Final Point |
|-----------|----------|-------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------|-------------|
| 1 | BUS 07 | 1 | 3.0 | 0.5 | 23 | 0.5 | 1.853 |
| 2 | BUS 20 | 0.224 | | | | | |
| 3 | BUS 19 | 1.448 | | | | | |
| 4 | BUS 22 | | | | | | |
| 5 | BUS 17 | | | | | | |
| 6 | BUS 21 | | 4.0 | 0.5 | 6 | 4.0 | 2.431 |
| 7 | BUS 14 | 1.552 | | | | | |
| 8 | BUS 16 | 0.8 | 1.55 | 0.5 | 12 | 0.5 | 0.5 |
| 9 | BUS 15 | 1.736 | 2.15 | 0.5 | 16.35 | 0.5 | 0.5 |
| 10 | BUS 24 | | | | | | |
| 11 | BUS 23 | | 6.6 | 0.5 | 11.68 | 6.6 | 6.6 |
| 12 | BUS 08 | 1.368 | | | | | |
| 13 | BUS 06 | 1.088 | | | | | |
| 14 | BUS 04 | 0.592 | | | | | |
| 15 | BUS 02 | 0.776 | 1.92 | 0.5 | 20.78 | 1.92 | 1.92 |
| 16 | BUS 05 | 0.568 | | | | | |
| 17 | BUS 01 | 0.864 | 1.92 | 0.5 | 20.78 | 1.92 | 1.92 |
| 18 | BUS 03 | 1.44 | | | | | |
| 19 | BUS 13 | 2.12 | 5.91 | 0.5 | 22 | 2.833 | 2.833 |
| 20 | BUS 10 | 1.56 | | | | | |
| 21 | BUS 11 | | | | | | |
| 22 | BUS 09 | 1.4 | | | | | |
| 23 | BUS 12 | | | | | | |
| 24 | BUS 18 | 1.864 | 4.0 | 0.5 | 6 | 2.0 | 2.091 |
| Line loss | | | | | | 0.3764 | 0.2478 |

變하고 다른 값은 不變이다. 이것은 實際의 線路損失이 가정한 값과 다르므로 생긴 差異일 것이다. 표 2에 交流電力潮流計算에 의한 線路潮流값이 나와 있고 線路 21, 22, 23이 過負荷된 것을 볼 수 있다. 이것은 直流潮流法에서도 線路制約下에서 구하였으나, 그 結果가 精確한 값(交流計算)과 다르기 때문에 나타난 結果이다. 이 過負荷된 線路를 새로운 制約條件으로 하고, 初期解에서 線型化된 目的函數 및 制約條件을 사용하여 구한 최종結果가 표 1의 제일 오른쪽 편에 나와 있다. 그리고 이 結果를 사용해서 구한 線

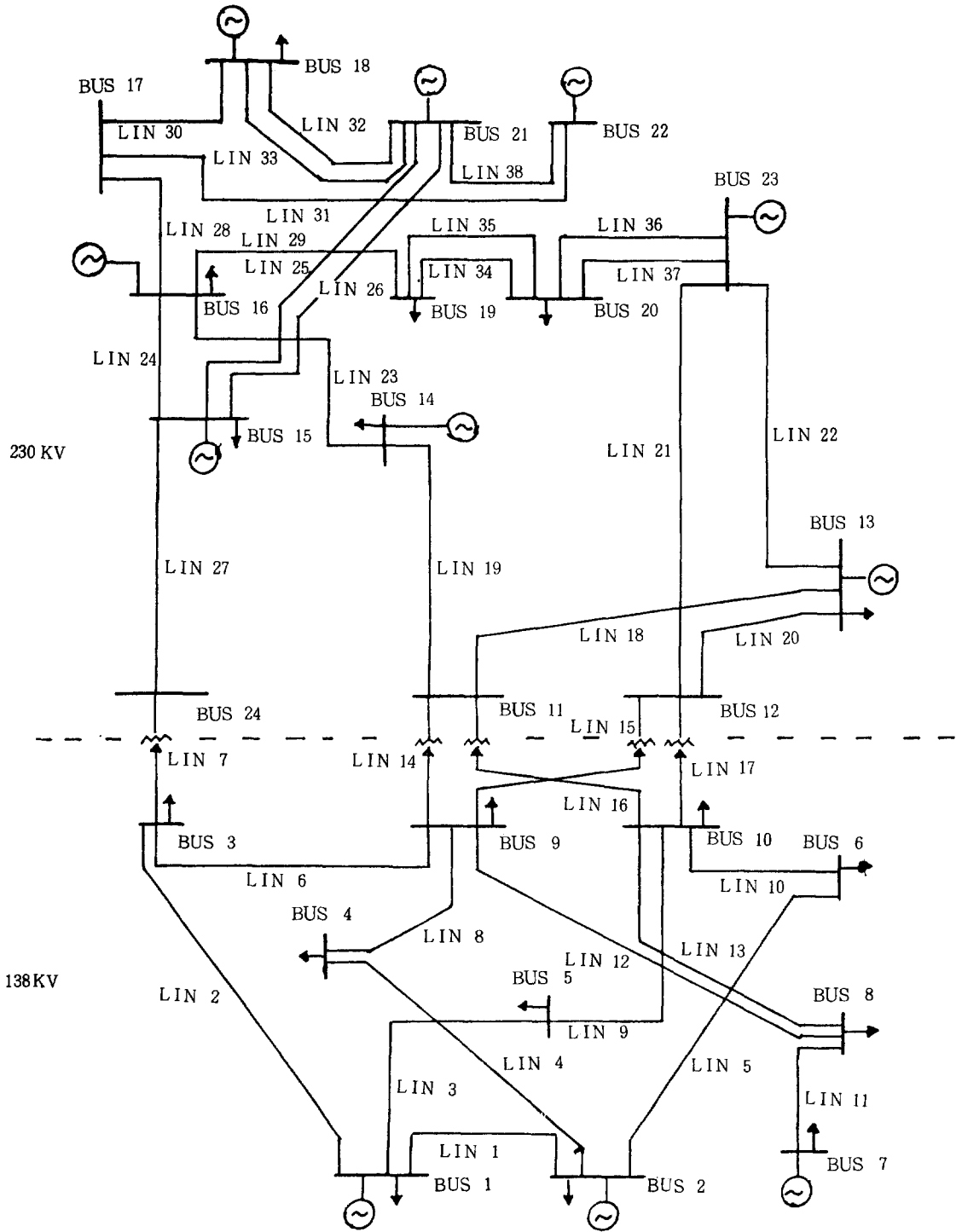


그림 2. IEEE 모델系統

Fig. 2. IEEE reliabilty test system

路潮流값이 표2에 나와있으며, 線路의 過負荷가 解決됨을 볼 수 있고, 이때 負荷遮斷은 없었다. 표1 하단에 보면 初期解에서의 線路損失과 최종결과에서의 線路損失을 비교해보면 약 35% 정도 損失이 감소했음을 알 수 있다.

표 2. 初期 및 最終 線路潮流結果

Table 2. Initial and final lineflows

| Line # | BUS from | BUS to | Line capacity | Initial Line Flow | Final Line Flow |
|--------|----------|--------|---------------|-------------------|-----------------|
| 1 | 15 | 17 | 2.2 | -0.026 | 0.031 |
| 2 | 18 | 17 | 2.1 | -0.233 | -0.346 |
| 3 | 16 | 17 | 2.0 | -0.779 | -0.721 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 17 | 23 | 20 | 2.5 | 1.565 | 1.305 |
| 18 | 19 | 21 | 2.45 | 1.523 | 1.488 |
| 19 | 7 | 21 | 2.5 | 0.709 | 0.121 |
| 20 | 19 | 23 | 2.5 | 0.921 | 0.742 |
| 21 | 11 | 23 | 2.0 | 2.038 | 1.75 |
| 22 | 11 | 19 | 1.65 | 1.766 | 1.544 |
| 23 | 8 | 7 | 1.68 | 2.287 | 1.687 |
| 24 | 8 | 9 | 2.0 | -0.093 | 0.413 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

6. 結 論

本論文은 종래의 直流潮流法을 사용한 線路容量 制約下的 發電力 再配分 方法을 實際系統에 가까운 交流潮流法을 사용하여 구하였다. 따라서 精確한 線路損失도 고려되었다. 또 目的函數를 發電費用과 負荷遮斷費用과의 合으로 놓았으므로, 發電力 再配分 만으로는 解決할 수 없는 問題를 負荷遮斷에 의해 구할 수 있도록 하여 實系統에서의 運轉方式과 유사하도록 하였다. 目的函數의 最適化에는 듀알릴렉 세이션 法을 사용하여 計算時間의 短縮을 꾀하였으며, 온라인用으로도 利用 가능케 하였다. (MV-8000 콤퓨터로 CPU 15 초) 그러나 本 方法은 有效電力 配分만을 고려의 對象으로 하였으며, 無効電力 配分에 관한 것은 앞으로의 研究과제이다.

參 考 文 獻

- 1) A. M. H. Rashed and D. H. Kelly, "Optimal Load Flow Solution using Lagrangian Multipliers and the Hessian Matrix.", Paper T74 160-8, presented at the IEEE PES Winter Meeting, New York, January, 1974.
- 2) J. Peschon, W. Bree and L. P. Hajdu, "Optimal Power-Flow Solutions for Power System Planning.", Proceedings of the IEEE, Vol. 60, No 1, 1972, pp. 64~70.
- 3) R. B. Gungor, N. F. Tsang and B. Webb, "A Technique for Optimizing Real and Reactive Power Scheduling.", Paper 71-TP 100-PWR, Presented at the IEEE Winter Power Meeting, New York, N. Y., January, 1971.
- 4) S. M. Chan and E. Yip, "A Solution of the Transmission Limited Dispatch Problem by Sparse Linear Programming." IEEE Trans. PAS-98, No. 3, pp. 1044~1053, 1979.
- 5) B. Stott and J. L. Marinho, "Linear Programming for Power System Network Security Applications." IEEE Trans. PAS-98, No. 3, pp. 837~848, 1979.
- 6) B. Stott and O. Alsag, "Fast Decoupled Load Flow.", IEEE Trans. PAS-93, pp. 859~867, 1974.
- 7) 朴永文, 白榮植, "電力潮流計算의 改善에 관한 研究." 대한전기학회지, 3월, 1977.
- 8) 朴永文, 白榮植, "線路事故를 고려한 簡略化 運轉費計算에 관한 研究." 대한전기학회지, 10월 1983.
- 9) B. Stott, J. L. Marinho and O. Alsac, "Review of Linear Programming Applied to Power System Rescheduling." 1979 Power Industry Computer Applications Conference, pp. 142~153.
- 10) "IEEE Reliability Test System." IEEE Trans. PAS-98, pp. 2047~2054, 1979.