

## A Study on the Optimal Power Flow with Suppressing the Short Circuit Capacity in Power Systems

李 光 浩  
(Kwang-Ho Lee)

**Abstract** - Switching of the transmission lines(T/L) is one of the ways for suppressing the short circuit capacity. This paper presents the extended optimal power flow(OPF) to the problem of selecting the T/Ls to be open. The constraints of the short circuit currents within limits are added to the inequalities of OPF. Also, the overload on the other lines due to switching of T/Ls is avoided by the linearized inequalities. The number of the open lines can be minimized by incorporating into the objective function of OPF in order to maintain reliability. The method of an effective calculation of the extended OPF is also proposed in this paper, which makes the two parts decoupled. The one concerning the generation dispatch is solved in the first place by the conventional method. Secondly, the other concerning the line-switching is optimized by the proposed formulation.

**Key Words** : Optimal Power Flow, Short Circuit Capacity, Line Power Sensitivity, Impedance Matrix

### 1. 서 론

국내 전력계통의 지속적인 확장으로 인해 고장용량이 증가되어 사고 파급에 따른 위험성이 날로 높아지고 있다. 이에 대한 대책으로 계통 보호설비의 투자비용을 피하면서 고장용량을 감소시키는 방법에 많은 관심이 모아지고 있다.[1] 본 연구에서는 계통 운용상의 현실성을 감안하여 운용 상태를 크게 변경시키지 않는 선로개방에 의한 계통의 구조 전환 기법을 제안한다.

선로의 개방 운용은 주로 계통 운용자의 직관에 의존하고 있는데 이는 계통구조와 고장용량과의 상관관계가 매우 복잡하여 해석적인 표현을 구하기 어렵기 때문이다. 또한 선로의 개방에 따라 선로조류가 일부 선로에 집중되어 송전선이나 변압기에 과부하가 발생할 수 있기 때문에 선로개방시에는 계통의 안전성 해석이 반드시 수반되어야 한다. 안전성이 검토된 개방선로의 후보를 제시하고 계통 운용자가 이 중에서 적절한 조합을 선택하는 연구가 수행된 바 있다.[2,3] 하지만 이는 순차적 기법으로서 운용자의 선택 과정에서 불확실성과 신뢰도 감소의 문제가 발생할 수 있기 때문에 본 연구에서는 최적화 개념을 도입하여 이를 해결하고자 한다.

최적조류계산(Optimal Power Flow: OPF)이란 기술적, 물리적, 환경적 제약조건 하에서, 최소 비용으로 전력계통을 운용하기 위한 해를 찾는 것으로서 경제급전과 조류계산을 총괄하는 기법이다.[4] 이는 일반적인 최적화 기법을 사용하

기 때문에 발전력 배분 뿐만 아니라 모선전압, ULTC 변압기의 탭, 전력용 콘덴서, 상정사고 고려 등 전력계통의 적정 운용과 관련된 다양한 제어변수가 광범위하게 적용될 수 있다.[5] 이러한 특성에 착안하여 고장용량 감소를 위한 송전선로의 개방을 제어변수로 추가하여 기존 OPF의 정식화를 확장하는 연구를 수행하였다.

송전선로의 개방이 늘어날수록 계통 신뢰성은 감소하기 때문에 가급적 적은 수로서 고장용량을 확보해야 한다. 이러한 목적이 최적화 함수에 추가되고 고장용량 한계가 제약조건에 포함됨으로서 기존의 OPF와 결합된다. OPF의 해를 구하는 자체도 상당히 어려운 문제인데 고장용량과 관련된 제어변수, 목적함수, 제약조건이 포함되면 더욱 복잡하고 난해한 계산이 될 것이다. 본 논문에서는 기존 OPF 부분과 선로개방 부분을 이원화하여 계산의 부담을 완화하는 해법을 소개하고 사례연구를 통해 타당성을 검증한다.

### 2. 고장용량 제약조건

#### 2.1 선로개방에 따른 영향

전력계통의 고장용량은 3상 단락 사고시의 계통 임피던스에 의해 결정된다. 즉, 각 모선에서의 고장전류는 구동점 임피던스의 역수로 계산되므로 임피던스 행렬의 대각원소만이 관계된다. 모선 p, q 사이의 선로가 개방되는 경우 행렬의 i 번째 대각원소는 다음 식(1)과 같다.[6]

$$Z_{ii}' = Z_{ii} - (Z_{ip} - Z_{iq})^2 / (Z_{pp} + Z_{qq} - 2 \cdot Z_{pq} - z_{aa}) \quad (1)$$

正 會 員 : 檀國大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博  
 接受日字 : 2000年 1月 25日  
 最終完了 : 2000年 11月 9日

여기서  $Z_{ii}$ ,  $Z'_{ii}$  는 각각 선로개방 이전과 이후의 구동 임피던스이고,  $z_{aa}$ 는 개방선로의 선로정수 임피던스이다. 선로 스위칭에 대한 제어변수를  $s$ 로 나타내면 선로개방시의 구동 임피던스 변화식은 다음 식(2)와 같은 선형형태로 표현된다.

$$Z'_{ii} \approx Z_{ii} + \sum_j d_{ij} \cdot s_j = Z_{ii}^0 + \Delta Z_{ii} \quad (2)$$

변수  $s_j$ 는 선로  $j$ 가 개방상태일 때 1, 투입 상태일 때 0이고,  $d_{ij}$ 는 선로  $j$ 의 개방에 따른 모선  $i$ 의 임피던스 증가량으로 양의 값을 갖는다. 모선에서의 고장전류가 한계값 이하가 되기 위해서는 구동 임피던스가 기준치 이상이 되어야 한다. 이러한 조건이 다음의 부등식(3) 형태로 OPF 제약조건에 포함된다.

$$Z'_{ii} > Z_i^{\min} \Rightarrow \sum_j d_{ij} \cdot s_j > (Z_i^{\min} - Z_{ii}) \quad (3)$$

선로개방에 따라 다른 선로에서의 조류와 모선전압 또한 변화하게 되므로 각각 허용범위 이내에서 유지되도록 해야 한다. 따라서 다음 식(4)와 같이 계통 안전성(Security)에 대한 항을 선형화하여 부등식 제약조건에 포함시킨다.

$$P_k' < P_k^{\max} \Rightarrow \sum_j e_{kj} \cdot s_j < (P_k^{\max} - P_k) \quad (4)$$

여기서  $P_k^{\max}$ ,  $P_k$ ,  $P_k'$ 는 각각  $k$  선로에서의 허용최대 조류와 선로개방 이전, 이후의 선로조류이고,  $e_{kj}$ 는 선로  $j$ 의 개방에 따른  $k$  선로에서의 유효전력 변화량으로서 전력방정식의 감도해석으로 유도된다.[7]

### 2.2 계통 분리의 판정

선로를 개방하면 구동점 임피던스가 증가하여 고장용량은 감소하지만 개방 이전에 중요하게 고려되어야 하는 점이 있다. 선로의 개방은 경우에 따라서 연결된 계통을 두 개의 회로로 분리시킬 수가 있으며 계통의 분리는 정전구역의 발생이나 계통운용을 복잡하게 만드는 원인이 될 수 있기 때문에 사전에 판단하여 이러한 현상을 피해야 한다. 이를 위해서 모선 임피던스 행렬의 변화식을 이용한 계통 분리의 판정식을 사용하였다.

모선  $p$ 와  $q$  사이의 선로를 개방하여 계통이 두 부분으로 분리되는 경우 각각을 그룹  $P$ 와 그룹  $Q$ 라고 하자. 이때의 그룹  $P$ 와 그룹  $Q$ 는 전기적으로 분리되어 있으므로  $p$ ,  $q$  모선 사이의 전달 임피던스는 영이 된다. 따라서 변화된 모선 임피던스 행렬식에서  $Z'_{pq}$ 의 값이 영이면 선로개방으로 계통분리가 되는 것이다. 전달 임피던스(비대각 원소) 식은 다음과 같다.[6]

$$Z'_{pq} = Z_{pq} - (Z_{pp} - Z_{pq}) \cdot (Z_{pq} - Z_{qq}) / (Z_{pp} + Z_{qq} - 2 \cdot Z_{pq} - z_{aa}) \quad (5)$$

여기에 전달 임피던스가 영이 되는 계통분리의 조건을 대입하고 정리하면 다음과 같은 계통분리의 판정식이 유

도 된다.

$$Z_{aa} = \frac{Z_{pp} \cdot Z_{qq}}{Z_{pq}} - Z_{pq} \quad (6)$$

따라서 식(6)을 만족하는  $p$ ,  $q$  모선 사이의 선로는 개방할 수 없으며 선로개방에 대한 제어변수에서 제외된다.

## 3. 최적조류계산 적용

### 3.1 문제의 정식화

최적조류계산은 전력계통에서 조류계산식이나 전압, 전류 등 여러 가지 상태변수의 허용범위가 제약조건으로 반영되어 최적화 문제와 결합된 기법이다. 따라서 문제의 정식화는 크게 세 부분으로 구분될 수 있다. 첫째, 목적함수는 일반적으로 발전비용이나 송전손실로 정의되지만 때로는 전압 조정 설비의 용량, 부하차단 용량 등이 될 수도 있고 그것들의 결합으로 나타날 수도 있다. 둘째, 제약조건은 모선전압, 무효전력, 선로조류 등 계통의 안정운용을 위한 상태변수의 허용범위로 정의된다. 셋째, 제어변수에 관한 항으로서 적용분야의 특성이 가장 많이 반영되는 부분이다. 주로 유효 발전력과 발전기 모선의 전압이 사용되지만 전압제어 설비의 제어량이나 차단 부하량 등이 될 수도 있다.

고장용량 최적화 문제와 발전력 배분 문제가 결합된 형태로 정식화하면 다음 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && F_x(x, s) + F_z(x, s) \\ & && h_x(x, s) = 0 \\ &\text{subject to} && g_x(x, s) \leq g_x^{\lim} \\ & && g_z(s) \leq g_z^{\lim} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 제어변수  $x$ 는 각 발전기의 발전력,  $s$ 는 선로 스위칭을 의미하며, 목적함수  $F_x$ 는 전체 연료비용이고  $F_z$ 는 고장용량 최적화에 대한 항이다. 등식 제약조건  $h_x$ 는 조류계산식이고 부등식 조건  $g_x$ 는 발전력의 상한한 범위와 선로조류, 모선전압의 허용범위이다. 변수  $s$ 만의 부등식인  $g_z$ 는 고장용량, 즉 임피던스 값에 대한 제약조건이다.

개방 선로가 증가하면 전력조류 경로에서의 병렬 특성이 감소하므로 송전손실이 증가하게 된다. 따라서 손실의 증가를 최소화할 필요가 생기며 송전손실 최소화를 통해 개방선로의 수를 줄일 수가 있다. 위의  $F_z$  항에는 이러한 송전손실식이 포함된다.

선로 스위칭에 대한 제어변수  $s$ 는 1과 0의 이진(binary) 값을 갖기 때문에 연속 변수에 대해 적용되는 최적화 해법을 직접 적용할 수가 없다. 즉 1과 0 사이의 값이 최적해로 계산되더라도 이는 불가능 해가 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 스위칭 변수가 이진값을 갖도록 다음 그림1과 같은 항을 목적함수에 추가하였다. 변수  $s$ 에 대한 'W' 형태의 4차 함수 ( $f_j(s_j) = \frac{1}{2} \cdot s_j^4 - s_j^3 + \frac{1}{2} \cdot s_j^2$ )와  $0 \leq s \leq 1$ 의 부등식 조건으로 구현된다. 따라서 최소값으로 수렴할 때  $s$ 는 0 혹은 1에 가까운 값을 갖게 된다. 위의  $F_z$  항은 이러한 함수와 송전손실식의 합으로 이루어진다.

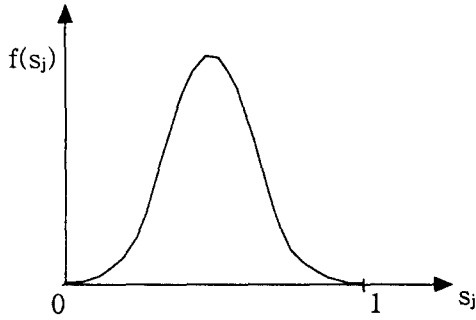


그림 1. 이진값 처리를 위해 추가된 함수  
Fig. 1. Function for handling binary value

3.2 부문제(subproblem) 분리

고장용량 최적화 문제와 발전력 배분 문제가 결합된 식(7)은 제어변수 증가에 따른 계산의 어려움뿐만 아니라 스위칭 변수가 포함됨으로서 계통의 구조가 고정되지 않아 조류계산을 수행할 수 없는 어려운 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 전체를 2개의 작은 부문제(subproblem)로 분리하였다. 고장용량 제약조건은 전압, 전류 등의 계통상태에는 관계없이 계통의 구조에만 관련되고, 발전력 배분은 주로 연료비 함수 특성에 의해 결정되는 성질을 활용한 것이다. 원래 문제인 식(7)을 분리된 형태로 나타내면 다음 식(8),(9)와 같다.

(단계 1) minimize  $F_x(x)$   
 subject to  $h_x(x) = 0$   
 $g_x(x) \leq g_x^{lim}$  (8)

(단계 2) minimize  $F_z(s)$   
 subject to  $g_x(s) \leq g_x^{lim}$   
 $g_z(s) \leq g_z^{lim}$  (9)

단계 1에서 우선 고정된 계통 구조에 대해 최적발전력 배분을 수행하면 전압, 전류 등의 계통상태가 계산된다. 발전력이 결정된 계통 상태에 대해 단계 2에서는 선로 스위칭 최적화를 계산한다. 선로 스위칭에 따라 송전손실이 달라지고 이에 따라 최적발전력 배분이 영향을 받을 수 있지만 그 정도는 상당히 작다. 또한 송전손실에 대해서는 단계 2에서 최소화하기 때문에 단계 1에서 계통구조를 고정시키고 발전력 배분을 하더라도 해의 최적성에는 크게 문제가 되지 않는다. 따라서 본 연구에서 제시한 부문제 분할 해법은 상호간의 연관성과 계산의 용이성 면에서 볼 때 의미가 있다고 할 수 있다.

단계 2에서의 송전손실의 변화는 선로 스위칭에 따른 선로조류 변화식(식4의 계수 e)을 이용한다. 송전손실의 변화는 결과적으로 슬랙모선과 연결된 선로에서의 선로조류 변화량으로 나타나므로 손실 변화식은 다음 식(10)과 같이 표현된다.

$$\Delta f_{loss} = \sum_j (\sum_k e_{kj}) s_j = \sum_j D_j s_j \quad (10)$$

여기서 k는 슬랙 모선과 연결된 선로들을 의미하며, 계수  $D_j$ 는  $\sum_k e_{kj}$ 로서 선로 스위칭  $s_j$ 에 따른 송전손실 변화 계수가 된다. 따라서 단계 2에서의 목적함수는 다음 식(11)과 같이 비선형과 선형식이 결합된 형태로 표현된다.

$$F_z(s) = \alpha \sum_j f_j(s_j) + \sum_j D_j s_j \quad (11)$$

여기서  $f_j$ 는 그림1에서와 같은 이진값 조건을 나타내는 함수이다. 또한  $\alpha$ 는 이진값 조건과 송전손실 최소화에 대한 상대적 가중치로 작용하며 최적화 과정에서는 초기에 작은 값에서 출발하여 값을 증가시키면 이진값에 가까운 해로 수렴하게 된다.

위의 식(11)은 1차의 송전손실식과 4차의 이진화 함수가 결합된 것이므로 일반적으로 convex 성질을 갖지 않는다. 하지만 계산된 결과에 대해서 스위칭 변수를 조사하여 이진값을 갖지 않는 경우 초기값을 조정하여 재계산하는 방법으로 최적성 문제를 극복할 수 있다.

부문제로 분리하여 계산하는 과정은 다음 그림2와 같다.

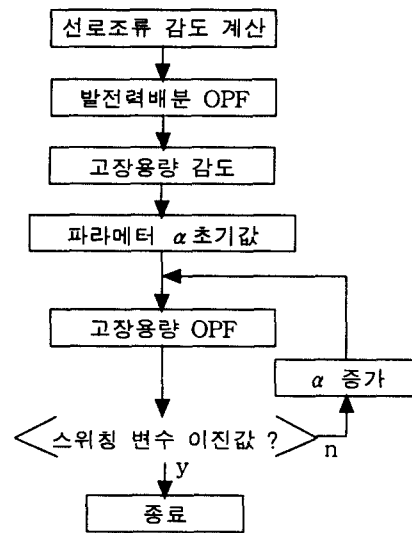


그림 2 계산과정 흐름도  
Fig. 2 Flow Chart of the Algorithm

4. 사례연구

사례연구는 그림3과 같은 IEEE 30모선 계통[8]을 대상으로 하였다. 6개의 발전기 모선과 37개의 선로, 4개의 변압기가 포함된 계통이다. 변압기를 기준으로 두 부분으로 구분되며 상위와 하위 지역의 고장전류의 한계값을 각각 7.5pu, 15.0pu로 가정한다. 따라서 계통 임피던스 행렬의 대각 원소는 각각 0.13333, 0.06667 이상이어야 한다. 선로데이터는 부록의 표 A1과 같고 발전기의 연료비 함수는 다음 표1과 같다.

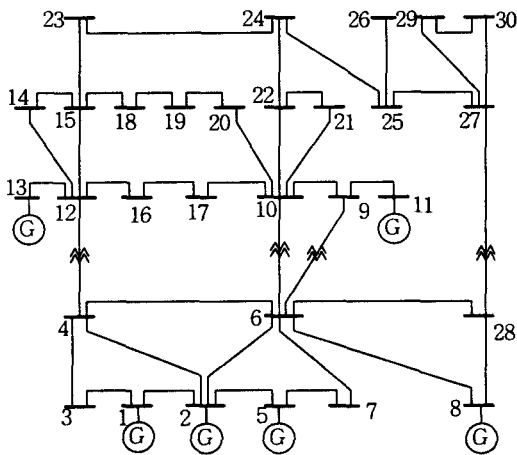


그림 2 대상 계통도(IEEE 30모선)  
Fig. 2 Diagram of Sample Power System

표 1 발전기 연료비 함수  
Table 1 Cost Functions of Generators

| 모선번호 | b    | c      |
|------|------|--------|
| 1    | 5.30 | 0.0050 |
| 2    | 5.80 | 0.0095 |
| 5    | 6.75 | 0.0115 |
| 8    | 6.30 | 0.0121 |
| 11   | 6.85 | 0.0085 |
| 13   | 6.60 | 0.0140 |

단계 1에서의 OPF를 수행하면 총부하 283.4MW에 대해 총발전력 290.656MW, 송전손실 7.256MW와 각 발전력의 최적값은 다음 표2와 같이 계산된다. 또한 송전손실을 고려할 때 나타나는 페널티 계수도 발전기 1을 기준으로 계산하여 함께 나타내었다.

표 2 단계1의 OPF 계산 결과  
Table 2 Results of OPF in step1

| 모선번호 | 최적발전력  | 페널티 팩터  | $\partial F / \partial P$ |
|------|--------|---------|---------------------------|
| 1    | 138.70 | 1.00000 | 6.6870                    |
| 2    | 57.56  | 0.97029 | 6.8918                    |
| 5    | 24.56  | 0.91422 | 7.3144                    |
| 8    | 35.00  | 0.93559 | 7.1474                    |
| 11   | 17.93  | 0.93448 | 7.1559                    |
| 13   | 16.91  | 0.94528 | 7.0741                    |

초기 계통에서의 고장용량을 초과하는 모선은 3개가 존재한다. 이들의 임피던스 원소를 기준치 이상으로 증가시키기 위해 선로 스위칭이 사용되며 가능한 모든 조합 중에서 개방 선로의 수와 송전손실을 최소로 하는 스위칭 조합을 구하기 위해 단계 2의 최적화가 수행된다.

일반적으로 임피던스 행렬은 리액턴스 성분만으로 계산된다.[6] 다음 표3은 초과 모선에 대해 초기 상태에서의 고장 용량과 고장전류를 나타낸 것이다.

표 3 임피던스 행렬 원소와 고장전류  
Table 3 Impedance elements and Fault Currents

| 모선번호 | $X_{pp}$ | $X_{min}$ | $I_p$  | $I_{max}$ | $X_{min}-X_{pp}$ |
|------|----------|-----------|--------|-----------|------------------|
| 6    | 0.06120  | 0.06667   | 16.340 | 15.0      | 0.0055           |
| 9    | 0.12491  | 0.13333   | 8.006  | 7.5       | 0.0084           |
| 12   | 0.12846  | 0.13333   | 7.785  | 7.5       | 0.0049           |

표3에서의 모선에 대해 임피던스 값을 증가시키는데 효과적인 개방 후보 선로는 식(6)과 식(3)에서의 감도계수( $d_{ij}$ )를 계산함으로써 선택된다. 계산결과 후보 선로는 7개(선로 4, 7, 9, 14, 19, 21, 26)가 존재하며 감도계수는 다음 표4와 같다.

표 4 임피던스 원소 감도계수  
Table 4 Sensitivity Coefficients for Impedance Elements

| 선로<br>모선 | 4       | 7       | 9       | 14      | 19      | 21      | 26      |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 6        | 0.00427 | 0.01411 | 0.00821 | 0.00011 | 0.00025 | 0.00025 | 0.00025 |
| 9        | 0.00246 | 0.00292 | 0.00378 | 0.03893 | 0.00584 | 0.00584 | 0.00584 |
| 12       | 0.00336 | 0.00314 | 0.00226 | 0.01578 | 0.01050 | 0.01050 | 0.01050 |

한편 후보선로 개방에 따라 다른 선로에서의 조류변화가 발생하는데, 전체 선로 중에서 선로용량이 초과될 가능성이 있는 선로는 3개(선로 7, 12, 18)가 존재하며 이에 대한 선로 조류 감도계수( $e_{kj}$ )는 다음 표5와 같다. 또한 단계1의 최적발전력 배분에 따른 과부하 조사 대상 선로의 선로조류( $P_k$ )와 한계용량( $P_{max}$ )과 한계용량에 대한 여유( $P_{max}-P_k$ )는 다음 표6과 같다.

표 5 선로조류 감도계수  
Table 5 Sensitivity Coefficients for Line Flows

| 개방선로<br>대상선로 | 4       | 7       | 9       | 14      | 19    | 21    | 26     |
|--------------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|--------|
| 7            | -21.910 | -38.644 | -18.694 | -12.237 | 2.848 | 1.448 | -2.022 |
| 12           | 0.427   | -3.277  | 0.403   | 13.657  | 1.163 | 0.593 | -0.771 |
| 18           | -0.598  | 4.672   | -0.58   | 5.424   | 2.882 | 1.353 | -2.690 |

표 6 선로조류와 한계용량  
Table 6 Line Flows and Capacities

| 대상선로 | 조류<br>$P_k$ [MW] | $P_{max}$ | $P_{max}-P_k$ |
|------|------------------|-----------|---------------|
| 7    | 38.644           | 40.0      | 1.356         |
| 12   | 12.720           | 20.0      | 7.280         |
| 18   | 17.972           | 20.0      | 2.028         |

송전손실에 대한 감도계수( $D_i$ )는 슬랙 모선과 연결된 선로(1, 2)에서의 선로조류 감도계수( $e_{kj}$ )로부터 계산되며 이를 나타내면 다음 표7과 같다.

표 7 송전손실 감도계수

Table 7 Sensitivity Coefficients for Transmission Loss

| 개방선로<br>감도계수   | 4       | 7       | 9      | 14     | 19     | 21     | 26     |
|----------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D              | 2.670   | 1.021   | 1.460  | 0.440  | 0.115  | 0.020  | 0.206  |
| e <sub>1</sub> | 48.632  | 12.274  | 9.056  | -0.451 | 0.258  | 0.122  | -0.017 |
| e <sub>2</sub> | -45.962 | -11.253 | -7.596 | 0.891  | -0.143 | -0.102 | 0.223  |

이상과 같이 제약조건 부등식과 송전손실 목적함수는 선형식으로 구성되지만 식(11)에서와 같이 스위칭 변수의 이진값 조건에 해당되는 목적함수가 비선형이므로 해는 스위칭 변수의 초기값에 따라 달라진다. 이진 변수의 초기값은 0.5로 정하는 것이 일반적이지만 이럴 경우에 표5와 표6으로부터 선로12에서 과부하가 발생하게 됨을 알 수 있다. 따라서 이는 가능해(feasible solution)가 아니므로 초기값이 가능해가 되도록 하기 위해 후보선로 7과 14에 해당되는 변수 s<sub>2</sub>와 s<sub>4</sub>의 초기값을 각각 0.1로 정하였다.

최적해를 구한 결과, 목적함수의 상대적 가중치 α의 증가에 따른 스위칭 변수의 값을 나타내면 다음 표 8과 같다.

표 8 가중치 증가에 따른 최적해

Table 8 Optimal Solutions with Increasing Weight

| α  | s <sub>1</sub> | s <sub>2</sub> | s <sub>3</sub> | s <sub>4</sub> | s <sub>5</sub> | s <sub>6</sub> | s <sub>7</sub> |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1  | 0.0            | 0.3676         | 0.0            | 0.0            | 0.0            | 0.8063         | 0.4483         |
| 5  | 0.0            | 0.3550         | 0.0            | 0.0            | 0.0            | 0.9961         | 0.9656         |
| 7  | 0.0            | 0.3548         | 0.0            | 0.0            | 0.0            | 0.9975         | 0.9766         |
| 10 | 0.0            | 0.3716         | 0.0            | 0.0360         | 0.0013         | 0.0127         | 0.9987         |
| 11 | 0.0            | 0.0            | 0.6394         | 0.0037         | 0.0            | 1.0000         | 0.0            |
| 13 | 0.0            | 0.0            | 0.6394         | 0.0037         | 0.0            | 1.0000         | 0.0            |
| 20 | 0.0            | 0.0            | 0.9130         | 0.0            | 0.0            | 0.9976         | 0.0            |
| 30 | 0.0            | 0.0            | 0.9486         | 0.0            | 0.0            | 0.9984         | 0.0            |
| 50 | 0.0            | 0.0            | 0.9713         | 0.0            | 0.0            | 0.9991         | 0.0            |

표8에서와 같이 가중치를 증가함에 따라 스위칭 변수는 이진값으로 수렴함을 알 수 있으며 s<sub>3</sub>=s<sub>6</sub>=1이라 볼 수 있으므로 선로 9와 21을 개방하는 것이 최적해가 된다. 선로9와 21을 개방했을 때의 조류계산을 수행하면 송전손실이 8.726MW로서 선로개방 이전(7.256MW)보다 다소 증가했음을 알 수 있고, 다음 표9에서의 선로조류와 임피던스 원소가 각각 허용범위를 만족하여 계통 안전성과 고장용량의 개선을 확인할 수가 있다.

표 9 최적해에서의 선로조류와 임피던스

Table 9 Line Flows and Impedances at Optimal Solution

| 선로번호 | 선로조류   | 한계값  | 모선번호 | 임피던스    | 한계값     |
|------|--------|------|------|---------|---------|
| 7    | 21.166 | 40.0 | 6    | 0.06974 | 0.06667 |
| 12   | 13.610 | 20.0 | 9    | 0.13479 | 0.13333 |
| 18   | 18.499 | 20.0 | 12   | 0.14096 | 0.13333 |

다음은 발전력 최적화와 고장용량 최적화를 분리시킨 알고리즘의 타당성 확인을 위해 단계 2의 결과(선로9, 21 개방)에 대해 발전력 최적화를 재차 수행하였다. 단계 1의 결과를 OPF1, 단계 2의 결과를 OPF2, 발전력 최적화를 재차 수행한 결과를 OPF\* 로 표시하여 다음 표10에 비교하여 나타내었다.

표 10 계산결과의 최적성 비교

Table 10 Comparisons of Optimal Solutions

| 최적화  | P <sub>g1</sub><br>[MW] | P <sub>g2</sub><br>[MW] | P <sub>g5</sub><br>[MW] | P <sub>g8</sub><br>[MW] | P <sub>g11</sub><br>[MW] | P <sub>g13</sub><br>[MW] | 송전<br>손실 | 연료비      |
|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|----------|
| OPF1 | 138.697                 | 57.56                   | 24.56                   | 35.00                   | 17.93                    | 16.91                    | 7.256    | 1845.823 |
| OPF2 | 140.167                 | 57.56                   | 24.56                   | 35.00                   | 17.93                    | 16.91                    | 8.726    | 1855.643 |
| OPF* | 138.786                 | 58.36                   | 32.33                   | 32.37                   | 14.64                    | 15.06                    | 8.152    | 1854.278 |

OPF\*의 결과는 표9에서 나타내었듯이 선로조류가 허용범위 이내로 유지되었고 송전손실 증가량이 OPF2의 결과보다 작으므로 사례계통에 대해 모든 제약조건을 만족하는 전체적인 최적해라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 알고리즘의 결과(OPF2)와 실제의 최적해(OPF\*)가 비교된 것이다.

발전력의 배분은 다소 차이를 보이며 송전손실도 최적해의 경우가 0.574MW 작게 나타났으나 연료비용을 살펴보면 OPF2와 OPF\*는 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 고장용량을 허용범위 이내로 감소시키면서 계통 안전성을 유지하고 최적 발전력 배분을 근사적으로 수행하는 데에 본 연구에서 제안한 알고리즘이 효과적이라고 할 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문은 최근 송전계통의 고밀도화로 인한 고장용량의 증가를 송전선로개방으로 해결하는 방법에 관한 것이다. 선로의 개방은 계통의 구조를 변경하는 것이므로 최적 발전력 배분에도 영향을 주며 계통 신뢰성 때문에 개방선로를 최소화해야 하므로 OPF로 이를 동시에 해결하고자 하였다. 고장용량의 감소는 모선 임피던스의 변화식으로, 계통의 안전성은 선로개방에 따른 선로조류의 감도식으로 정식화하였다. 계통분리를 발생시키는 선로를 제외하고 임피던스 변화량이 효과적인 선로를 선택함으로써 선로 스위칭 변수를 줄일 수 있지만, 최적발전력배분 문제와 고장용량 감소 문제가 결합된 상태로 계산하는 것은 상당히 어려운 문제가 된다. 따라서 두 문제를 분리하여 기존의 OPF 최적화 형태로 정식화하고 계산하는 알고리즘을 제안하였다. IEEE 30모선 샘플 계통에 적용한 결과, 고장용량을 허용범위 이내로 감소시키면서 최적발전력배분이 유지됨을 확인하였다.

### 감사의 글

이 논문은 1999년도 학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음. (KRF-99-003-E00145)

참 고 문 헌

[1] 계통특성 개선설비 설치 타당성 검토 보고서, 한국전력, 1995.  
 [2] 154kv 전력계통 방사상 운용방안 수립에 관한 연구, 한국전력, 1997.  
 [3] 이광호, "송전손실과 고장용량 억제를 위한 개방선로 선택 알고리즘 개발," 한국에너지 공학회, 제8권, 제3호, pp.401-406, 1999. 8.  
 [4] 김호웅, 박만근, 김발호, "Alternating Direction Method를 이용한 최적조류계산의 분산처리," 전기학회논문지, Vol.48A, No.11, pp.1424-1428, 1999. 11.  
 [5] A.J.Wood, B.F.Wollenberg, *Power Generation, Operation, And Control*, John Wiley & Sons, 1996.  
 [6] J.J.Grainger, W.D.Stevenson, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1994.  
 [7] K.H. Lee and Y.M. Park, "Application of Expert System to Power System Restoration in Sub-control Center," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.12, No.2, pp.629-635, May, 1997.  
 [8] Pai M.A., *Computer Techniques in Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1979  
 [9] K.C.Almeida, F.D.Galiana, "A General Parametric Optimal Power Flow," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.12, No.1, February 1999.

표 A1 대상계통 선로 데이터

Table A1 Line Data of Sample Power System

| 번호 | 위치<br>(양단모선) |    | R      | X      | B      | Tap    |
|----|--------------|----|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 1            | 2  | 0.0192 | 0.0575 | 0.0264 |        |
| 2  | 1            | 3  | 0.0452 | 0.1852 | 0.0204 |        |
| 3  | 2            | 4  | 0.0570 | 0.1737 | 0.0184 |        |
| 4  | 3            | 4  | 0.0132 | 0.0379 | 0.0042 |        |
| 5  | 2            | 5  | 0.0472 | 0.1983 | 0.0209 |        |
| 6  | 2            | 6  | 0.0581 | 0.1763 | 0.0187 |        |
| 7  | 4            | 6  | 0.0119 | 0.0414 | 0.0045 |        |
| 8  | 5            | 7  | 0.0460 | 0.1160 | 0.0102 |        |
| 9  | 6            | 7  | 0.0267 | 0.0820 | 0.0085 |        |
| 10 | 6            | 8  | 0.0120 | 0.0420 | 0.0045 |        |
| 11 | 6            | 9  | 0.0000 | 0.2080 | 0.0000 | 1.0155 |
| 12 | 6            | 10 | 0.0000 | 0.5560 | 0.0000 | 0.9629 |
| 13 | 9            | 11 | 0.0000 | 0.2080 | 0.0000 |        |
| 14 | 9            | 10 | 0.0000 | 0.1100 | 0.0000 |        |
| 15 | 4            | 12 | 0.0000 | 0.2560 | 0.0000 | 1.0129 |
| 16 | 12           | 13 | 0.0000 | 0.1400 | 0.0000 |        |
| 17 | 12           | 14 | 0.1231 | 0.2559 | 0.0000 |        |
| 18 | 12           | 15 | 0.0662 | 0.1304 | 0.0000 |        |
| 19 | 12           | 16 | 0.0945 | 0.1987 | 0.0000 |        |
| 20 | 14           | 15 | 0.2210 | 0.1997 | 0.0000 |        |
| 21 | 16           | 17 | 0.0824 | 0.1932 | 0.0000 |        |
| 22 | 15           | 18 | 0.1070 | 0.2185 | 0.0000 |        |
| 23 | 18           | 19 | 0.0639 | 0.1292 | 0.0000 |        |
| 24 | 19           | 20 | 0.0340 | 0.0680 | 0.0000 |        |
| 25 | 10           | 20 | 0.0936 | 0.2090 | 0.0000 |        |
| 26 | 10           | 17 | 0.0324 | 0.0845 | 0.0000 |        |
| 27 | 10           | 21 | 0.0348 | 0.0749 | 0.0000 |        |
| 28 | 10           | 22 | 0.0727 | 0.1499 | 0.0000 |        |
| 29 | 21           | 22 | 0.0116 | 0.0236 | 0.0000 |        |
| 30 | 15           | 23 | 0.1000 | 0.2020 | 0.0000 |        |
| 31 | 22           | 24 | 0.1150 | 0.1790 | 0.0000 |        |
| 32 | 23           | 24 | 0.1320 | 0.2700 | 0.0000 |        |
| 33 | 24           | 25 | 0.1885 | 0.3292 | 0.0000 |        |
| 34 | 25           | 26 | 0.2544 | 0.3800 | 0.0000 |        |
| 35 | 25           | 27 | 0.1093 | 0.2087 | 0.0000 |        |
| 36 | 27           | 28 | 0.0000 | 0.3960 | 0.0000 | 0.9851 |
| 37 | 27           | 29 | 0.2198 | 0.4153 | 0.0000 |        |
| 38 | 27           | 30 | 0.3202 | 0.6027 | 0.0000 |        |
| 39 | 29           | 30 | 0.2399 | 0.4533 | 0.0000 |        |
| 40 | 8            | 28 | 0.0636 | 0.2000 | 0.0214 |        |
| 41 | 6            | 28 | 0.0169 | 0.0599 | 0.0065 |        |

저 자 소 개



이 광 호(李 光 浩)

1965년 12월 22일 생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 단국대 공대 전기공학과 조교수

Tel : 02-709-2868, Fax : 02-795-8771

E-Mail : mania49d@ns.dankook.ac.kr