

# 電力系統의 想定事故에 따른 線路의 過負荷 解消 對策

정재길\* 노신홍\* 박규홍\*\*

\* 중앙대학교 전기공학과 \*\* 대림전문대학 전기과

## The Alleviation Countermeasures of Line Overloads Due To a Contingency Occurred in Power System

Jai-Kil Chung, Sin-Hong Noh, Kyu-Hong Park

\* Dept. of Electrical Eng. Chung-Ang Univ. \*\* Dept of Electrical Eng. Daelin college

This paper presents a new algorithm for the countermeasure to alleviate without shedding system loads the line overloads due to contingency in power system. This method for relieving by line switching is based on obtaining the line outage distribution factors - the linear sensitivity factors, which give the amount of change in the power flow of each line due to the removal of same other line in the power system.

These factors are made up of the elements of Bus Reactance Matrix and branch reactances.

In this paper a fast algorithm and program is presented for obtaining only the required Bus Reactance elements which corresponds to a non-zero elements of Bus Admittance Matrix, and elements of columns which correspond to two terminal Buses of the overloaded(monitored) line.

The proposed algorithm has been validated in tests on the 6 busbar test system

### 1. 서 론

최근 전력계통은 전력수요의 급격한 증가와 더불어 사고를 일으킬 수 있는 부분은 각 모선, 선로등 대단히 많으며 계통의 어느 부분에서 돌발적인 사고가 발생하더라도 이들 사고가 다른 건전한 부분에 파급되지 않도록 빠른 시간내에 적절한 사고대책이 필요하다.

선로탈락 상정사고시 계통의 다른 선로에 과부하를 야기할수도 있으므로 이에대한 과부하해소 대책수립이 요구된다.

선로탈락 상정 사고시 과부하 선로의 과부하 해소대책으로는 우선 가능한한 부하를 차단하지 않고 해소할수있는 대책이 요구되며 그 대책으로는 다음과같은 방법이 있다.

- (1)발전력 조정에 의한 선로조류 재배분 방법
- (2)이상기(phase shifter)의 모선전압 위상각 제어에 의한 전력조류 재배분 방법

(3)선로결환(line switching)에 의한 전력조류 재배분 방법

(4) 부하차단으로 인한 전력조류 재배분 방법등이 있다.

이중 (1),(2)에 의한 방법이 이상적이나 (1)에 의한 방법은 계산시간이 문제가 되며 (2)의방법은 별도의 이상기를 설치하여야 하는 문제점이 있다.

(3)의 방법은 과부하선로 이외의 선로결환에 의하여 과부하선로의 조류를 감소시켜 과부하를 해소하는 하는 방법이 다.

(4)의 방법은 (1) - (3)의 방법에 의하여 과부하해소가 불가능할 경우에만 합리적인 부하차단에 의하여 과부하를 해소하는 방법이다.

따라서 본 논문에서는 (3)의 방법에서의 과부하해소 대책에 관하여 중점을 두고 계산속도의 향상 및 계산기의 기억용량 절감 방법을 제시 하고자 한다

(3)에 의한방법은 일반적으로 120% 이상의 과부하일 경우에는 과부하해소가 불가능하므로 이경우에는 과부하 선로의 양단 모선전력을 과부하량 만큼 조정함으로써 선로 과부하를 해소하는 방법을 사용하고자한다.

(3)의 방법은 선로 개방시 전력조류변화에 대한 과부하선로의 전력조류변화를 나타내는 감도계수인 선로개방분배계수(line outage distribution factors)를 사용하는 방법으로 이 분배계수가 작은 것만을 택하여 과부하선로의 과부하를 해소하는 방법이다.

이 선로개방분배계수는 일반적으로 개방선로의 양단모선 구동점 임피던스와 양단모선간의 전달임피던스 및 과부하선로의 양단모선과 개방선로의 양단모선간의 전달임피던스의 함수로 표시된다. 따라서 선로개방분배계수의 계산에 필요한 모선임피던스 요소는 다음과 같이 구한다.

우선 직류조류 계산법 예시와같이 선로의 저항분은 작으므로 무시하고 선로의 리액턴스 성분만에 의한 모선어드미턴스 행렬을 구성하고 이행렬이 매우 희박(sparse)한 성질을 이용하여 非常要素만을 1차원으로 기억시키고 이의 역행렬인 모선어드미턴스 행렬의 요소는 양삼각화 분해법을 이용하여

여 전부 구하지 않고 모션어드미턴스 행렬의 비영요소에 대응되는 위치의 요소 및 개방하고자하는 선로의 양단모선과 과부하선로 양단모선간의 전달임피던스만을 구하면 된다.

따라서, 본 논문은 과부하선로의 과부하해소 대책시 계산 시간및 기억용량을 대폭 경감시킬수 있다.

$$d_{l,k} = \frac{\Delta f_l}{f_k^0} = \frac{\frac{1}{X_l} (\Delta \theta_l - \Delta \theta_j)}{\left[ \frac{X_{1n}-X_{jn}-X_{im}+X_{jm}}{X_k-(X_{nn}+X_{mm}-2X_{nm})} \right] \left[ \frac{X_k}{X_l} \right]} \quad (2)$$

여기서,

- $f_k^0$  : 개방 대상 선로 k의개방전 전력조류
  - $\Delta f_l$  : 선로 k의 개방시 과부하 선로 l의 전력 조류의 변화량
  - $\Delta \theta_l, \Delta \theta_j$  : 각각 과부하선로 l의 양단모선 l 및 j의 전압 위상각
  - $X_l, X_k$  : 각각 선로 l 및 k의 리액턴스
  - $X_{nn}, X_{mm}$  : 각각 개방선로 k의 양단모선 n 및 m의 구동점 리액턴스
  - $X_{nm}$  : 개방선로 k의 양단모선 n과 m간의 전달리액턴스
  - $X_{1n}, X_{jn}, X_{im}, X_{jm}$  : 각각 과부하 선로 l의 양단모선 l 및 j와 개방선로 k의 양단모선 n과 m간의 전달 리액턴스
- 또한 선로개방분배계수  $d_{l,k}$ 의 부호는 개방선로의 개방전 전력조류가 모선 n에서 모선 m방향(+방향)이며 과부하선로 l의 전력조류는 모선 l에서 모선 j방향(+방향)일경우이므로 상정사고시 전력조류의 방향이 변하면 선로개방분배계수  $d_{l,k}$ 의 부호도 바꾸어야한다.

### 2.3 소모 모션 리액턴스 계산 알고리즘

선로개방분배계수는 식(2)와 같이 모션리액턴스 행렬 요소의 함수로 표현된다.

모션리액턴스 행렬은 선로의 저항분을 무시한 모션임피던스 행렬로서 모션임피던스 행렬을 구하는 방법은 1)모션어드미턴스 행렬을 형성한후 이의 역행렬을 구하는 방법과 2) 특수한 알고리즘을 사용하여 점차적으로 모션임피던스 행렬을 구하는 방법으로 대별할수 있으나 대전력계통의 경우, 계산기의 기억용량, 계산시간, 라운드 오프 에러(round off error)등의 문제점이있다. 그러나 선로개방분배계수 계산에는 그림 1에서 표시된바와 같이 개방 하고자 하는 선로 k의 양단모선의 구동점 리액턴스  $X_{nn}, X_{mm}$ 과 양단모선간의 전달 리액턴스  $X_{nm}$  및 과부하선로 l의 양단모선 l, j와 개방선로 k의 양단모선 n, m간의 전달리액턴스  $X_{1n}, X_{im}, X_{jn}, X_{jm}$ 만이 필요하고 또 과부하선로는 감시선로로 지정되어 l, j 는 고정되므로 이들 요소는 다음과 같은 방법의에 간단히 구할수 있으며, 따라서 계산기의 기억 용량및 계산시간을 대폭적으로 경감시킬수 있다.

## 2. 선로의 과부하 해소 대책

### 2.1 과부하 해소 대책의 개요

상정사고시 발생하는 선로의 과부하 해소대책으로는 가능한 한 부하를 차단하지 않고 해결할수있는 대책이 요구된다. 따라서 본 논문에서도 과부하 선로 이외의 임의의 선로를 개방(line switching)할때 선로개방분배계수(line outage distribution factors)를 사용하여 과부하선로의 전력을 가 장크게 감소 시킬수있는 선로를 찾아서 이 선로를 개방함으로써 과부하선로의 과부하를 효과적으로 해소시킬수있는 방법을 제시한다.

선로개방분배계수를 사용할경우 과부하선로의 전력조류식은 식(1)과 같이 표시할수있다.

$$P_l^* = P_l + D(l, k) P_k \quad (1)$$

여기서,

$P_l$  : 모선 l에서 j로 흐르는 과부하선로 l의 유효전력

$P_k$  : 모선 n에서 m으로 흐르는 개방선로 k의 유효전력

$P_l^*$  : 선로 k의 개방후 과부하선로 l의 유효전력

$D(l, k)$  : 선로개방분배계수(선로 k의 개방시 선로 l의 전력 변화에 대한 감도계수)

식(1)의 정의에 따라  $P_l$ 과  $P_k$ 의 값은 항상  $\geq 0$ 이므로 선로 개방분배계수의 값이  $\infty$ 일 경우에는 선로 k의 개방후 과부하선로 l의 전력은 감소하므로 과부하를 감소 또는 해소시킬수 있다.

따라서 주어진 과부하선로 l에 대한 다른 각선로의 선로 개방분배계수를 구하여 그 값이  $\infty$ 인 선로만을 택하여 절대 값이 큰순서에 따라 식(1)에 의하여 그선로의 개방후에 과부하선로의 과부하해소 여부를 판정하여 해소 시킬수 있다. 이때 선로의 과부하해소를 위한 소모계산시간은 선로개방분배계수를 구하는데 대부분이 소요되며 또 이선로개방 분배계수는 식(2)과같이 모션리액턴스(모션 임피던스)행렬 요소의 함수로 표시되므로 결국 모션리액턴스 행렬의 요소들 구하는데 대부분이 소요된다. 따라서 본논문에서는 이 모션 리액턴스 행렬의 요소들 효율적으로 파본 시간내에 구하는데 중점을 두고 그 기법을 제시 한다.

### 2.2 선로개방분배계수(1), (7)

선로개방분배계수( $d_{l,k}$ )는 전술한바와같이 개방선로 k를 개방한후 과부하선로 l의전력조류 변화를 나타내는 감도계수라고 할수있다. 이를 수식적으로 표현하면 다음식과 같다.

	과부하선로		개방선로	
	i	j	n	m
i				
j				
n	*	*	*	*
m	*	*	*	*

그림 1. 선로개방 분배계수계산에 필요한 모션리액턴스 요소  
Fig. 1. X matrix terms required for D factors

1) 모션어드미턴스의 구성

모션리액턴스 행렬의 요소를 효율적으로 구하기 위해서는 먼저 모션어드미턴스 행렬을 구성한후 이를 상삼각화 분해법을 사용하여 구한다.

모션어드미턴스 행렬은 대칭행렬이고 매우 낮은 성질을 갖고 있으므로 우선 선로의 원시임피던스 입력시 선로량단 모션번호와 모션임피던스 값을 함께 기억시키고 모션어드미턴스의 대각요소는 모션번호에 따라 1차원으로 기억 시키고 비대각요소는 비영요소를 선로번호에 따라 1차원으로 기억 시킨다. 이때 이 모션어드미턴스행렬의 상삼각화 분해시 새로운 비영요소의 출현을 최소로 억제 하기위하여 먼저 최적모션번호부여법을 적용한다.

2) 모션어드미턴스의 상삼각화분해

모션어드미턴스 행렬을 상삼각화분해(L·D·L<sup>T</sup>분해)하는 알고리즘은 식(3) 및 식(4)과 같다.

$$d_{ii} = Y_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} \cdot d_{kk} \quad (3)$$

$$l_{ij} = (Y_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik} l_{jk} d_{kk}) / d_{jj} \quad (4)$$

이때 대각요소 d<sub>ii</sub>는 모션순번대로, 비대각요소 l<sub>ik</sub>는 비영요소(상삼각화 분해시 새로 출현하는 비영요소 포함)만을 선로 순서대로 1차원으로 기억 시킨다.

3) 모션어드미턴스의 비영요소에 대응되는 위치의 모션리액턴스 계산(9)

모션임피던스 행렬은 정의에 따라 Z=Y<sup>-1</sup> 로 표시되므로 식(5)와 같이 표시할수 있다.

$$Y \cdot Z = Z \cdot Y = I \quad (5)$$

여기서 모션리액턴스 행렬의 요소를 구하기 위하여 행렬 Y를 상삼각화 분해하면 식(5)는 식(6)과 같이된다.

$$L \cdot D \cdot L^T \cdot Z = I \quad (6)$$

여기서 새로운 변수인 T와 W를 도입하면 다음과 같이 된다.

$$T = I - L^T \quad (7)$$

$$W = (L \cdot D)^{-1} = D^{-1} \cdot L^{-1} \quad (8)$$

식(7),(8)을 식(6)에 대입하여 정리하면 식 (9)와 같이 된다.

$$(I-T) \cdot Z = (L \cdot D)^{-1} = W$$

$$Z = W + T Z \quad (9)$$

식(9)의 변수 T는 단위행렬에서 L의 전치행렬을 뺀것이므로 대각선 요소가 0인 상삼각 행렬이 되며 W는 D가 대각행렬이므로 D<sup>-1</sup> 도 1/d<sub>ii</sub> 을 대각요소로 하는 대각행렬이되고, 따라서 W는 1/d<sub>ii</sub> 을 대각 요소로 하는 하삼각 행렬이 된다.

모션리액턴스 행렬은 대칭행렬이므로 모션리액턴스 행렬의 上三角 要素만 구하면 되므로 식(9)에서 W 요소는 대각요소인 1/d<sub>ii</sub>만 이용하고 T 요소는 대각 요소가 0인 -L<sup>T</sup> 행렬이므로 L 요소의 비영요소만을 이용하여 모션리액턴스 행렬을 구한다.

모션 리액턴스 행렬을 구하는 일반식은 식(10)및 식(11)과 같다.

$$Z_{ij} = \sum_{k=i+1}^N t_{ik} \cdot Z_{kj} = - \sum_{k=i+1}^N l_{ki} \cdot Z_{kj} \quad (i < j, i < k) \quad (10)$$

$$Z_{ii} = W_{ii} + \sum_{k=i+1}^N t_{ik} \cdot Z_{ki} = \frac{1}{d_{ii}} - \sum_{k=i+1}^N l_{ki} \cdot Z_{ki} \quad (11)$$

전력계통에 있어서 모션어드미턴스행렬은 대칭행렬이고 매우 낮으며 최적모션번호부여법에 의해 상삼각화분해 할경우 새로운 비영요소의 출현을 대폭으로 감소 시킬수 있으므로 상삼각화 분해행렬도 매우 낮다

식(7)의 T행렬 요소 t<sub>ik</sub>(k > i)는 상삼각화분해시 L<sup>T</sup>의 요소가 0요소인 경우에는 모두 영이되며 모션리액턴스 요소인 Z<sub>ii</sub>, Z<sub>ij</sub>계산시 식(10),(11)의 t<sub>ik</sub>·Z<sub>kj</sub> 및 t<sub>ik</sub>·Z<sub>ki</sub>의 계산에 이용되지않는다. 여기서 t<sub>ik</sub> = 0 라는것은 모션 i와 k간에 선로가 접속되어있지않음을 뜻하므로 L(또는L<sup>T</sup>)가 0요소인 위치에 대응되는 위치에 있는 모션리액턴스 요소의 값을 구할 필요가 없어진다. 따라서 모션어드미턴스 행렬의 비영요소(상삼각화 분해시 새로 출현하는 비영요소포함)에 대응되는 위치의 모션리액턴스 요소만 구한다.

이 모션리액턴스 행렬요소들이 구하여져 기억되는 프로그램과정은 다음과 같다.

- (1) W행렬의 요소 즉, 대각요소값인 1/d<sub>ii</sub>을 모든 모션에 대해서 구한다.
- (2) 계산할 Z<sub>ij</sub>를 구하기에 앞서 KI(I)는 i행의 첫번째 비영요소번호를 의미하는 인덱스(Index)를 이용하여 (KI(I+1)-1)-KI(I)를 실시하면, Z<sub>ik</sub> 요소와 대응된 행의 T행렬의 t<sub>ik</sub>요소들의 비영요소번호를 구하게 된다.
- (3) 다음에는 t<sub>ik</sub>요소들과 곱을 이룸 모션리액턴스 요소들을 찾는데 과정 2)에서 찾은 t<sub>ik</sub>들의 비영요소 번호들에 의해 NT(Jj)로서 t<sub>ik</sub>요소의 열번호와 같은 모션리액

텐스 행렬의 행번호(NK)를 찾는다.

(4) 과정 3)의 행번호 (NK)와 계산할 모션리액턴스 요소의 열번호(JQ)를 갖는 모션리액턴스 요소(IK)를 찾은다음 NK와 JQ를 비교해서 같으면  $Z(I)=Z(I)-Y(JJ)*ZD(JK)$ 를 계산하고, 다르면  $NF(IK)$ 와  $NT(IK)$ 를 비교해서  $Z(I)=Z(I)-Y(JJ)*Z(IK)$ 를 계산한다.

이러한 과정을 거쳐 모션리액턴스행렬의 비대각 요소들을 구할수 있다. 한편 모션리액턴스 행렬의 대각요소는 그행에 해당된 비대각요소를 하나 구할때마다 기억시켜 그행의 전 비대각 요소들을 합하여 과정 1)에서 구한  $1/d_{ii}$ 과 합하여 기억시킨다.

이렇게 할때 모션리액턴스 행렬의 대각요소에 해당하는것은 모선의 구동점임피던스로서  $ZD(1), ZD(2), \dots ZD(JD)$  (단, JD는 전모선수)로 기억 시키고, 비대각 요소인 모선의 전달 임피던스는  $Z(1), Z(2), \dots ZD(JSN)$  (단, JSN은 삼삼각화분해시 새로이 출현한것까지 합한 비영요소수)로 기억 시킨다.

4) 과부하선로의 양당모선과 개방선로 양당모선간의 전달 리액턴스 계산

모션어드미턴스의 삼삼각화 분해후 모션리액턴스 행렬중  $X_{in}, X_{im}, X_{jn}, X_{jm}$  요소는 식(12)에서 구할수있다.

$$[L][D][L^T][X]=[b] \quad (12)$$

먼저 열벡터[b]의 1번째 요소만 1이고 나머지 요소는 모두 0으로 하여 구한 [X]값중 n번째요소와 m번째 요소를 구하고 다시 열벡터 [b]의 j번째 요소만 1이고 나머지 요소는 모두 0으로 하여 구한[X]값중에서 n번째 요소및 m번째 요소를 구하면 상기 4요소를 모두 구할수 있다.

그해법은  $[D][L]^T[X] = [V]$ 라 놓고  $[L][V]=[b]$ 에서 새로이 도입한 열벡터 [V]를 구하고 다시  $[D][L]^T[X]=[V]$ 에서 [X]를 구한다.

이때 [V]및[X]를 구하는 일반식은 다음과 같다.

$$V_i = b_i - \sum_{j=1}^{i-1} l_{ij} \cdot V_j \quad (13)$$

$$X_i = V_i/D_{ii} - \sum_{j=i+1}^N l_{ji}X_j \quad (14)$$

모션리액턴스 행렬중  $X_{nn}, X_{mm}, X_{nm}$  요소는 개방대상 선로가 변경됨에 따라 모선 n과 m의 값은 계속 변하므로 전모선의 구동점리액턴스와 선로양당모선간의 전달리액턴스는 구할 필요가 있으나 모션리액턴스의 모든 요소를 구할 필요는 없다. 따라서 모션어드미턴스 행렬의 대칭성및 疎(sparse)한 성질을 이용하여 모션리액턴스 행렬의 모든 요소를 구하지 아니하고 모션어드미턴스 행렬의 비영요소에 대응되는 위치의 요소(삼삼각화 분해시 출현하는 비영요소포함)만 구함으로써 모든선로의 개방시 상기 4요소를 구할수 있다.

선로절환 및 모션주입전력조정에 의한 과부하 해소대책에 관한 프로그램의 흐름도는 그림 2와 같다.

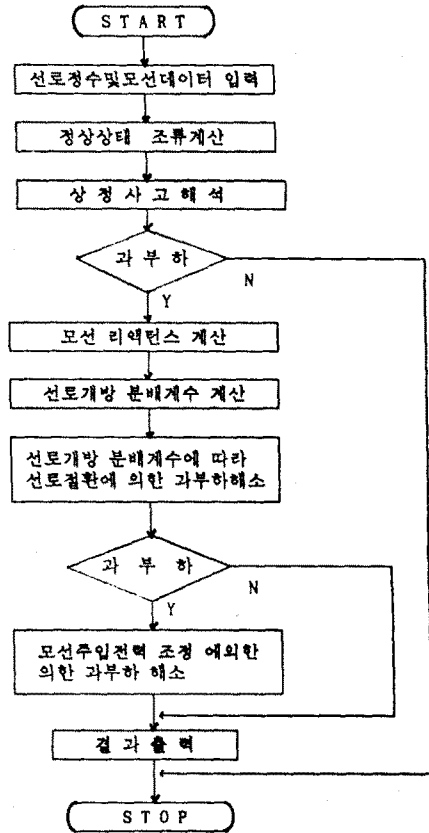


그림 2. 과부하 해소대책에 관한 흐름도

Fig. 2. Flowchart of contingency countermeasures.

### 6. 결 론

상정사고에 기인한 선로의 과부하해소대책을 수립함에 있어서 수용가에 대한 경건 없는 전력공급이 우선하여야 하므로 가능한 부하차단 없이 빠른시간내에 선로개방분배계수를 이용한 선로절환 방법만여의하여 선로의 전력조류를 제분함으로써 과부하를 해소하는 방법을 제시하고자 하였다.

선로개방분배계수 계산에는 모션임피던스 행렬의 요소가 필요하나 이 행렬의 모든 요소를 구하지 않고 실제 선로개방분배계수 계산에 필요한 최소한의 요소만을 구하도록 함으로써 계산시간을 대폭 감소 시켰다.

참 고 문 헌

1. A.J.Wood, "Power Generation, Operation and Control", John Willey, pp.368 - 373, 1984.
2. B.Stott, O.Alsac, "Fast Decoupled Load Flow", IEEE, Pas-93 No.3, pp.859 - 867, May/June, 1974.
3. 정재길, 홍기찬, "대전력계통의 전력조류해석에 관한 연구", 중앙대학교 과학 기술 연구소 제 6 집, pp.51 - 67, 1979.
4. 박규홍, "전력계통의 상정사고해석 및 대책에 관한 연구", 중앙대학교 학위논문, 1986
5. 정재길, 박규홍, "모선주입전력 조정에 의한 과부하 해소 알고리즘", 대한 전기 학회지, Vol.39, No.2, pp.111 - 118, 1990.
6. N.Srinivasan, C.S.Indulkar, S.SVenkata, "On-Line Computation of Phase Shifter Distribution Factors And Lineload Alleviation." IEEE Pas-104, pp.1656 - 1662, July 1985.
7. A.A.Mazzi, "Corrective Control of Power System flows by Line and BUS - BAR Switching", IEEE, Vol.Pwrs - 1, No.3, pp.258 - 264, Aug 1986.
8. Elham B.Makram, "Selection of Lines To Be Switched To Eliminate Overload Lines Using a Z Matrix Method", IEEE, Vol.4, No.2, pp.653 - 661, May, 1989.
9. 번기식, "대전력 계통의 고장해석에 대한 효율적인 계산방법에 관한 연구", 중앙대학교 학위논문, 1982.