

전력설비의 신속한 상정사고 선택 알고리즘

(Fast Contingency Ranking Algorithm of Power Equipment)

박규홍* · 정재길**

(Kyu-Hong Park · Jai-Kil Chung)

요 약

본 논문은 전력설비의 신속한 상정사고 선택을 위한 알고리즘을 제시한다. 이 방법은 DC법에 의한 선로와 모선사이의 감도계수인 GSDF(Generation Shift Distribution Factor)를 이용하여 계산되는 선로개방분배계수(LODF : Line Outage Distribution Factor)를 사용하여 정상상태에서의 선로조류로부터 상정사고시의 선로조류를 계산하였다.

상정사고 선택을 신속히 하기 위하여 정상상태에서 용량대비 선로조류가 35[%](154[kV]에서는 60[%]) 이상의 선로만을 대상으로 하였다.

본 논문에서 제시한 알고리즘 및 프로그램의 효용성을 입증하기 위하여 6모선 11선로 모델계통을 선정하여 적용하였다.

Abstract

This paper presents an algorithm for contingency ranking using line outage distribution factors(LODF) which are established by generation shift distribution factors(GSDF) from DC load flow solutions.

By using the LODF, the line flow can be calculated according to the modification of base load flow if the contingency occur.

To obtain faster contingency ranking, only the loading line more than 35[%](60[%] at 154[kV]) is included in the computation of Performance Index(PI).

The proposed algorithm has been validated in tests on a 6-bus test system.

1. 서 론

전력계통에서 상정사고를 해석하는 목적은 발생 가능한 각종사고를 상정하여 이들 사고가 계통에 발생하였을 경우 계통의 운전 상태를 예측하여 계통 각 부분의 과부하 상태나 취약부분을 미리 검출하여 사고가 확대되지 않도록 사전에 대책을 수립하는데

*정회원 : 대림전문대학 전기과 교수

**정회원 : 중앙대학교 전기공학과 교수

접수일자 : 1997. 8. 14

있다.

상정사고 해석을 효과적으로 행하기 위해서는 가능한 한 해의 정도를 높이면서 계산시간을 단축시킬 수 있는 방법이 필요하며 이를 위해서는 우선 계통에 큰 영향을 미칠 수 있는 가혹한 상정사고만을 선택하여 전체의 해석에 요하는 시간을 단축시킬 필요가 있다.

신속한 상정사고 선택을 위하여 일반적으로 고속 분할법, 직류조류법 또는 1회 수정만으로 조류계산을 하는 1P-1Q법 등이 있으나 본 논문에서는 상정사고 대책의 일환으로 개발된 선로개방분배계수(LODF : Line Outage Distribution Factor)를 이용하여 정상상태의 조류를 수정함으로써 상정사고시의 조류를 간단히 계산할 수 있었다. 일반적으로 개방선로의 양단모선 구동점 리액턴스와 전달리액턴스 및 조류계산 대상선로의 양단모선과 개방선로의 양단모선간의 전달리액턴스의 함수로 표시되는 선로개방분배계수를 사용하여 선로 개방에 따른 분배계수를 적용함으로써 가능하였다[1~3].

또한 신속한 상정사고 선택을 위하여 정상상태에서 용량대비 선로조류가 35%(154kV에서는 60(%))를 넘는 선로만을 대상으로 하였다. 이는 일반적으로 선로용량이 비하여 35(% 미만)의 선로조류가 흐르는 경우하 선로에서는 상정사고시 별다른 영향을 미치지 않기 때문이다[5].

상정사고의 선택 및 그 우선 순위의 부여방법으로는 상정사고에 대한 평가지수를 계산하고 이 값이 큰 순서에 따라 순위를 부여하는 방법이 사용되고 있으며, 상정사고에 대한 평가지수를 설정하는 방법으로는 상정사고 근사 해석결과로부터 모든 과부하선로의 유효전력과 그 선로의 용량과의 비율로 계산하는 방법과 모든 과부하선로의 유효전력이 선로용량을 초과하는 편차와 그 선로의 용량과의 비율로 정하는 방법 및 계통운영자의 경험에 기인한 피지법을 이용하는 방법 등이 있다[1, 5].

따라서 본 논문에서는 LODF를 이용함으로써 상정사고시 별도의 조류 계산을 하지 아니하였으며, 상정사고시의 조류증가로 인하여 일부 선로에 심한 과부하가 야기되는 사고보다는 많은 선로에 약한 과

부하가 발생하는 상정사고시의 평가지수가 오히려 크게 나타나는 소위 마스킹 문제(masking problem)가 일어나지 않도록 평가지수 계산방법을 이용하였으며, 상정사고시의 선로조류를 신속히 계산하기 위하여 선로개방분배계수를 이용함으로써 효율적인 상정사고 선택이 되도록 하였다.

2. 상정사고 선택

2.1 상정사고 선택의 개요

상정사고를 선택하기 위한 평가지수 PI(performance index)는 상정사고가 발생하였을 경우 계통운영의 안전성 및 경제성의 관점에서 계통에 얼마만큼 영향을 끼치는가를 평가하기 위한 것이다.

따라서 평가지수는 사고발생에 따른 특정설비의 과부하로 인한 위험부담 및 전력설비의 부하부담 증가 등 계통의 안전도 및 재해에 대한 경제적 평가가 복합적으로 고려 되어야 한다.

이 평가지수를 정하는 방법은 여러 가지가 있으나 식 (1)과 같이 사고발생으로 인한 과부하 선로 조류의 크기와 그 선로의 정격치와의 비율에 의하여 정하는 방법과 식 (2)와 같이 사고발생으로 인한 과부하 선로의 조류와 정격치와의 편차의 절대치와 그 선로의 정격치와의 비율로 정하는 방법이 있다[1].

마스킹문제, 즉 상정사고시 여러 선로에 가벼운 과부하가 나타나는 경우와 일부선로에 심한 과부하가 나타나는 경우에 후자가 우선적으로 선택되기 위해서는 식 (2)를 이용하였으며 신속한 상정사고 선택을 위하여 정상상태에서 용량대비 선로조류 35%(154kV에서는 60(%))가 넘는 선로만을 대상으로 하였다. 이는 참고문헌 (5)에서와 같이 선로용량 대비 35(% 미만)의 선로는 개방사고시 별다른 문제를 야기하지 않기 때문이다.

또한 상정사고시에 우선 순위 부여는 상정사고를 어느 것부터 해석할 것인가를 정하는 것이다. 이는 사고발생시 계통에 영향을 많이 미치는 것부터 정하면 될 것이므로 평가지수가 큰 순서로부터 해석하였다.

$$PI = \sum_{NOL} W_m \left(\frac{P_m}{P_{m, \max}} \right) \quad (1)$$

$$PI = \sum_{NOL} W_m \left(\frac{|P_m - P_{m, \max}|}{P_{m, \max}} \right) \quad (2)$$

단,

P_m : 선로 m의 조류

$P_{m, \max}$: 선로 m의 용량

W_m : 선로 m의 중요도를 나타내는 가중치
(weighting factor)

NOL : 과부하선로 개수

이 방법에서는 상정사고시 선로의 전력조류 변화를 나타내는 선로개방분배계수를 사용함이 편리하다. 선로개방분배계수를 사용할 경우 상정사고시 선로의 전력조류식은 식 (3)과 같이 표시할 수 있다.

$$P'_m = P_m + d_{m, l} \cdot P_l \quad (3)$$

여기서,

P_m : 모선 l에서 모선 k로 흐르는 선로 m의 유효전력

P_l : 모선 s에서 모선 e로 흐르는 개방선로 f의 유효전력

P'_m : 선로 f의 개방후 선로 m의 유효전력

$d_{m, l}$: 선로개방분배계수(선로 f의 개방시 선로 m의 전력변화에 대한 감도계수)

2.2 선로개방분배계수 계산

개방선로의 양단 모선번호에 해당하는 2열의 리액턴스에서 조류계산을 하고자 하는 선로의 양단 모선번호에 해당하는 리액턴스 요소를 이용하여 발전력 변화시의 선로조류를 계산하는데 필요한 발전력변화분배계수(GSDF: Generation Shift Distribution Factor)를 구한 후 조류계산을 하고자하는 선로와 개방선로의 양단 모선 사이의 GSDF의 차를 구함으로써 선로개방분배계수 LODF를 계산할 수 있다.

2.2.1 GSDF 계산

모선 i의 발전력변화에 대한 선로 m의 조류의 변

화를 나타내는 발전력변화분배계수 GSDF의 계산은 직류조류법을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} A_{mi} &= \frac{\partial P_m}{\partial PG_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial PG_i} \left(\frac{\theta_i - \theta_k}{X_m} \right) \\ &= \frac{X_{li} - X_{ki}}{X_m} \end{aligned} \quad (4)$$

단, l, k는 선로 m의 양단 모선번호이다.

2.2.2 LODF 계산

선로사고시 LODF는 조류계산을 하고자 하는 선로와 사고선로 양단 모선 사이의 감도 계수인 GSDF를 상정사고 상태의 값으로 수정함으로써 계산할 수 있다.

선로 f의 탈락사고시 선로 m의 조류 P'_m 는 사고 전 조류를 P_m 이라 하고 선로 m과 사고선로 f사이의 선로개방분배계수를 $d_{m, l}$ 라 하면 계통의 발전기출력은 변하지 않는 것으로 하고 선로 f의 탈락사고를 시뮬레이션 할 수 있다.

즉, 조류가 모선 s에서 모선 e 방향으로 흐를 때 모선 s의 발전기 출력 변화분은 P_l , 모선 e의 발전기 출력 변화분은 $-P_l$ 로 됨으로 GSDF를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[2, 3].

$$\begin{aligned} P'_m &= P_m + d_{m, l} \cdot P_l \\ &= P_m + A_{ms} \cdot (P_l) + A'_{me} \cdot (-P_l) \\ &= P_m + (A_{ms} - A_{me})P_l \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 선로개방분배계수 $d_{m, l}$ 는 조류 계산을 하고자 하는 선로 m과 사고선로 f의 양단 모선사이의 발전력변화분배계수 A'_{ms} , A'_{me} 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$d_{m, l} = A'_{ms} - A'_{me} \quad (6)$$

그러나 본 논문에서는 상정사고시의 조류계산을 신속히 하기 위하여 GSDF를 상정사고 상태의 값으로 수정하는 대신에 사고 전 상태의 GSDF를 이용함으로써 리액턴스 행렬에서 8개의 요소를 이용하는 대신 4개의 요소만으로 계산토록 하였다. 즉, 개방선로 양단모선 번호에 해당하는 2열의 리액턴스 요

소 중에서 조류계산을 하고자 하는 선로의 양단모선 번호에 해당하는 요소만을 이용하였다.

2.2.3 선택기본원칙

평가지수 PI를 계산함에 있어서 참고문헌(5)에서 제안한 상정사고선택 기본 원칙을 나열하면 다음과 같다.

(1) 단독선로에 의하여 연계된 모선인 경우 선로 개방 사고가 일어나면 그 모선은 계통과 유리됨으로 상정사고 선택시 최우선 순위에 놓는다.

(2) 계통에 따라서 선로용량의 35~90(%)의 조류가 흐르는 선로도 순위 결정시 고려되어야 한다. 이는 초고압계통 간선인 경우 개방사고시 다른 선로에 과부하 또는 트립을 야기시키기 때문이다.

(3) 154(kV)계통보다는 345(kV)계통에 우선 순위를 부여한다.

(4) 110(%)이상의 과부하는 계통 안정상의 문제를 야기할 것이나, 35(%)이하 (단, 154(kV)에서는 60(%)이하)의 경우하서는 안정상의 문제를 야기하지 아니할 것이기 때문에 상정사고 선택에서 제외한다.

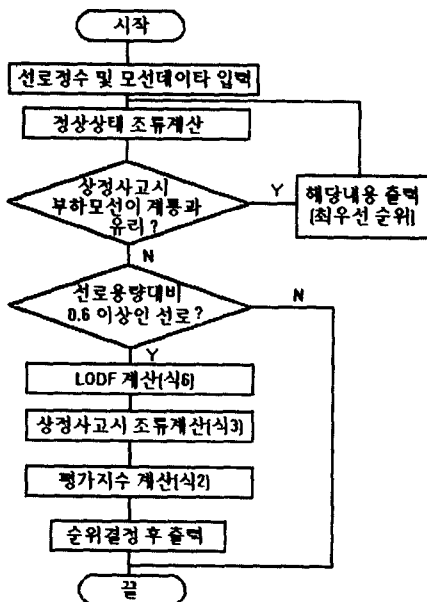


그림 1. 주프로그램 흐름도
Fig. 1. Flowchart of Main Program

(5) 상정사고시 선로용량의 임계치 가까이서 운전되는 선로가 많은 경우는 높은 순위를 주어야 한다.

이와 같이 계통운용 전문가의 경험에 기인한 선택 기본 원칙에 의하여 단독선로는 최우선 순위에 두며, 선로용량 대비 조류가 0.35이상의 선로(154 [kV]선로에서는 0.6 이상)만을 대상으로 함으로써 보다 더 효율적인 상정사고 선택이 가능할 것이다.

지금까지 제안한 상정사고 선택 알고리즘에 관한 흐름도는 그림 1과 같다.

3. 모델 계통에의 적용례

본 논문에서 제시한 알고리즘 및 프로그램에 대한 모델계통으로 그림 2와 같은 6 모선 11 선로계통을 선정하여 적용하였다. 신속한 상정사고 선택을 위하여 GSDF로부터 간단히 계산된 LODF를 이용하는 알고리즘에 대한 효율성을 입증하기 위하여 1회만 수정하는 1P-1Q법과 일반적인 P-Q분할법으로 계산한 결과를 비교 분석하였다.

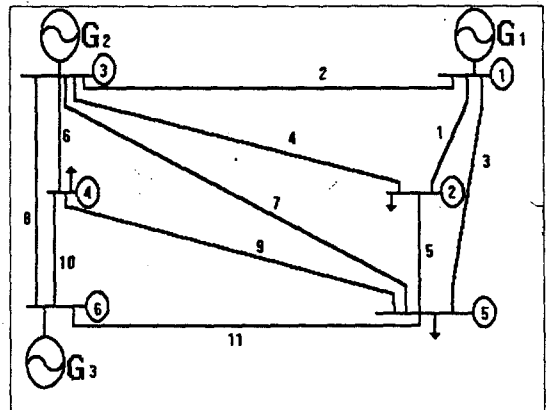


그림 2. 6 모선 모델 계통도
Fig. 2. Model Diagram of 6-Bus System

선로의 중요도를 나타내는 가중치 (weighting factor) W_m 는 본 프로그램에서는 모두 1로 두었으며, 신속한 상정사고 선택을 위하여 정상상태에서 경부하 선로는 상정사고시에 별다른 영향을 미치지 않는다는 연구결과에 의하여 선로용량대비 35(%)이상의 선로에 대해서만 상정사고를 선택한바 표 1과 같이 선로번호 10번, 1번, 6번의 순서로 나타났다.

즉, 식 (2)의 평가지수를 계산하여 상정사고를 선택하기 위하여 LODF를 이용하는 방법과 1회만 수정하는 1P-1Q법 및 P-Q분할법을 비교한 바 모두 같은 결과가 나왔다.

표 1. 상정사고 선택 결과

Table 1. Contingency Ranking Results

| 순위 | LODF 이용 | | LODF 이용 | | 1P-1Q법 | | 반복계산 회수 |
|----|---------|------|---------|------|--------|------|---------|
| | 선로 번호 | PI | 선로 번호 | PI | 선로 번호 | PI | |
| 1 | 10 | .611 | 10 | .847 | 10 | .764 | 7 |
| 2 | 1 | .090 | 1 | .127 | 1 | .082 | 16 |
| 3 | 6 | .061 | 6 | .057 | 6 | .044 | 13 |
| 4 | 7 | .022 | 7 | .024 | 7 | .020 | 6 |
| 5 | 4 | .017 | 4 | .015 | 4 | .013 | 4 |
| 6 | 3 | .009 | 3 | .014 | 3 | .011 | 6 |
| 7 | 11 | .004 | 11 | .007 | 11 | .010 | 6 |

그러나 P-Q분할법에서는 일반적인 조류계산의 경우와 같이 허용편차를 10^{-3} 으로 할 경우 선로에 따라서 4~16회 반복 후 수렴하였으며, 1P-1Q법을 이용하는 경우의 선로순위와도 일치하였으나, 1P-1Q법은 유효 및 무효전력을 1회 수정하는 조류계산법인 반면, LODF를 이용하는 상정사고 선택법은 4개의 리액턴스 요소만으로 개방선로와의 감도계수를 이용하여 정상상태의 조류를 수정하기 때문에 엘

표 2. 10번 선로 개방시 조류계산 결과 비교

Table 2. Comparison of two Load Flow Calculation Method for the Outage on Line 10

| 선로 번호 | 모선번호 | | 정상조류 | LODF 이용 | | P-Q 분할법 이용선로조류 |
|-------|------|----|--------|---------|------------|----------------|
| | 부터 | 까지 | | 선로조류 | $D_{m, j}$ | |
| 1 | 1 | 2 | 0.738 | 0.741 | -0.0046 | 0.739 |
| 2 | 1 | 3 | -0.108 | -0.087 | -0.0323 | -0.080 |
| 3 | 1 | 5 | 0.308 | 0.284 | 0.0369 | 0.280 |
| 4 | 2 | 3 | -0.475 | -0.450 | -0.0381 | -0.447 |
| 5 | 2 | 5 | -0.003 | -0.025 | 0.0335 | -0.030 |
| 6 | 3 | 4 | 0.649 | 1.144 | -0.7647 | 1.199 |
| 7 | 3 | 5 | 0.318 | 0.279 | 0.0589 | 0.266 |
| 8 | 3 | 6 | -0.328 | -0.739 | 0.6353 | -0.770 |
| 9 | 4 | 5 | 0.070 | -0.082 | 0.2353 | -0.086 |
| 10 | 4 | 6 | -0.648 | 0.000 | 0.0000 | 0.000 |
| 11 | 5 | 6 | -0.536 | -0.773 | 0.3647 | -0.801 |

고리즘이 간단함으로, 제안된 엘고리즘의 효율성을 입증할 수 있었다.

또한 표 2~표 4와 같이 상정사고 선택 1, 2, 3 순위인 10번, 1번 및 6번 선로의 개방사고인 경우 LODF를 이용한 선로조류값과 각 선로에 대한 LODF의 값($D_{m, j}$) 및 P-Q분할법에 의한 조류계산 결과치와 비교하였으며, LODF를 이용하는 경우에도 P-Q분할법에 의한 경우와 별 차이가 없음을 알 수 있었다.

표 3. 1번 선로 개방시 조류계산 결과 비교

Table 3. Comparison of two Load Flow Calculation Method for the Outage on Line 1

| 선로 번호 | 모선번호 | | 정상조류 | LODF 이용 | | P-Q 분할법 이용선로조류 |
|-------|------|----|--------|---------|------------|----------------|
| | 부터 | 까지 | | 선로조류 | $D_{m, j}$ | |
| 1 | 1 | 2 | 0.738 | 0.000 | 0.0000 | 0.000 |
| 2 | 1 | 3 | -0.108 | 0.280 | 0.5253 | 0.304 |
| 3 | 1 | 5 | 0.308 | 0.659 | 0.4747 | 0.635 |
| 4 | 2 | 3 | -0.475 | -0.906 | -0.5842 | -0.896 |
| 5 | 2 | 5 | -0.003 | -0.310 | -0.4158 | -0.304 |
| 6 | 3 | 4 | 0.649 | 0.635 | -0.0190 | 0.624 |
| 7 | 3 | 5 | 0.318 | 0.298 | -0.0264 | 0.312 |
| 8 | 3 | 6 | -0.328 | -0.338 | -0.0135 | -0.388 |
| 9 | 4 | 5 | 0.070 | 0.059 | -0.0150 | 0.087 |
| 10 | 4 | 6 | -0.648 | -0.651 | -0.0040 | -0.691 |
| 11 | 5 | 6 | -0.536 | -0.524 | 0.0174 | -0.553 |

표 4. 6번 선로 개방시 조류계산 결과 비교

Table 4. Comparison of two Load Flow Calculation Method for the Outage on Line 6

| 선로 번호 | 모선번호 | | 정상조류 | LODF 이용 | | P-Q 분할법 이용선로조류 |
|-------|------|----|--------|---------|------------|----------------|
| | 부터 | 까지 | | 선로조류 | $D_{m, j}$ | |
| 1 | 1 | 2 | 0.738 | 0.727 | -0.0176 | 0.729 |
| 2 | 1 | 3 | -0.108 | -0.188 | -0.1242 | -0.203 |
| 3 | 1 | 5 | 0.308 | 0.400 | 0.1418 | 0.413 |
| 4 | 2 | 3 | -0.475 | -0.570 | -0.1464 | -0.572 |
| 5 | 2 | 5 | -0.003 | 0.081 | 0.1288 | 0.084 |
| 6 | 3 | 4 | 0.649 | 0.000 | 0.0000 | 0.000 |
| 7 | 3 | 5 | 0.318 | 0.464 | 0.2264 | 0.475 |
| 8 | 3 | 6 | -0.328 | -0.001 | 0.5031 | -0.038 |
| 9 | 4 | 5 | 0.070 | -0.182 | -0.3879 | -0.187 |
| 10 | 4 | 6 | -0.648 | -1.045 | -0.6121 | -1.013 |
| 11 | 5 | 6 | -0.536 | -0.466 | 0.1090 | -0.478 |

4. 결론

본 논문은 신속한 상정사고선택을 위하여 선로와 모선사이의 감도계수인 발전력변화 분배계수 GSDF로 부터 선로개방 분배계수 LODF를 간단히 구하였으며, 이를 이용하여 상정사고시의 조류를 계산하였다. 이에 대한 평가지수를 계산함에 있어서 정상상태에서 선로용량 대비 일정비율 이상의 조류가 흐르는 선로만을 대상으로 하였으며, 1회만 반복 수정하는 $1P-1Q$ 법과 허용편차를 10^{-3} 을 부여한 $P-Q$ 분할법과 같은 정도를 나타내는 간단한 상정사고 선택 알고리즘을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] 朴圭弘, "電力系統의 想定事故 解析 및 對策에 관한 연구", 학위논문, 중앙대, 1986.
- [2] 朴圭弘, 鄭在吉, "線路切換에 의한 過負荷 解消 알고리즘", 대한전기학회지, Vol. 41, No. 5, pp. 459~467, 1992.
- [3] 朴圭弘외, "새로운 선로사고 분배계수를 이용한 과부하 해소대책 알고리즘" 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 588~590, 1995.
- [4] Chang, Y. C., "A new method for calculating loss coefficients", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, No. 3, pp. 1665~1671, 1994.
- [5] Yuan-Yih Hsu, "Fuzzy-Set based contingency ranking", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 1189~1196, 1992.
- [6] A. J. Wood, "Power Generation, Operation and Control", John Wiley, pp. 368~373, 1984.

본 논문은 1996학년도 학교법인 대림학원 학술 연구조성비에 의하여 연구되었음

◇ 著 者 紹 介 ◇



박 규 홍(朴圭弘)

1952년 2월 2일생. 1974년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 졸업(석사). 1987년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 대림전문대학 전기과 교수 발송배전기술사.



정 재 길(鄭在吉)

1936년 9월 24일생. 1961년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 졸업(석사). 1984년 숭실대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 현재 중앙대학교 전기공학과 교수 발송배전기술사.