

송길영 김영한 이기탁*
 고려대학교 안전발전처 고려대학교

On-Line Contingency Selection Method Considering Voltage Security

Kil-Yeong Song Yeong-Han Kim Gi-Tack Lee.
 Korea University Korea Electric Power Corp. Korea University

Abstract

This paper presents a new algorithm in formulating a performance index for contingency selection method considering voltage security. Security limits defined in terms of real power line flows and voltage magnitudes are considered in normalized subspaces where in critical contingencies are identified by a filtering algorithm using the infinite norm. Two types of limits, warning limit and emergency limit, are introduced for voltage and line flow. Usually performance indices have been constructed for real power line flows and voltages with each different criterion. This paper, however, presents a method that constructs them with the same criterion in use of the norm properties, so that we can assess security considering both of them. Rapid contingency simulation is performed using one iteration of fast decoupled load flows with IMML(Inverse Matrix Modification Lemma).

1. 머리말

전력 계통 운용에서 급전(Load Dispatching)의 형태를 크게 다음과 같이 3가지로 나눌 수 있다.

- (1) 경제급전 (Economic Dispatch)
- (2) 안전급전 (Security Dispatch)
- (3) 환경급전 (Environmental Dispatch)

이중에서 안전급전은 계통에 갑작스런 사고나 동요가 발생하여도 이것에 이기낼 수 있도록 계통을 운용하는 것을 말한다. 이러한 안전급전을 위하여 계통의 안전도 평가(Security Assessment)를 하게 되는데 일반적으로 상정사고 해석에 치중하고 있다.

상정사고 해석은 정상시에는 안전하지만 선로나 발전기의 사고 시에 다른 선로나 변압기에 과부하를 주는 지의 여부와 전압 불균형상을 일으킬 위험성이 있는지를 파악하기 위한 것이다. 그러나 대규모 전력계통에서 모든 상정사고 케이스를 온라인으로 해석한다는 것은 현재 불가능하다. 따라서 우선 간이해법으로 계통에 가혹한 영향을 주게 될 치명적인 상정사고(Critical Contingency)만을 선택한 후 이것들만을 상세해석하게 하는 상정사고 선택법(Contingency Selection Method)이 널리 적용되고 있다. 특히

최근에 발생한 동경전력의 대정전사고 등 세계적인 대정전사고가 전압붕괴로 비롯되는 경우가 많게 됨에 따라 상정사고 선택에 있어서도 전압안전도를 고려할 필요성이 더욱 높아지고 있으며 이 분야에 많은 연구가 계속되고 있다. 따라서 본 연구에서는 전압안전도를 고려한 상정사고 선택법에 대하여 연구하였으며 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) Norm의 성질을 이용하여 각부하에 대한 평가지수와 전압에 대한 평가지수를 같은 기준에서 평가하는 방안을 제시함으로써 전압과 각부하를 동시에 고려한 상정사고의 평가와 순위 결정이 가능하도록 하였다.
- (2) 유효전력의 평가지수(PI; Performance Index)와 전압 평가지수에서 무한대 norm을 사용하여 이과(Filtering)시킴으로써 Masking 문제를 개선하였다.
- (3) 유효전력 조류 한계치와 전압 한계치를 경계 한계치(Warning Limit)와 비상한계치(Emergency Limit)로 나누어 한계치 별로 평가지수를 계산하여 순위 결정(Ranking)을 함으로써 상정사고 선택의 신뢰성을 높일 수 있게 하였다.
- (4) 상정사고의 시뮬레이션 방법으로 고속 분할 조류 계산(Fast Decoupled Load Flow)의 1회 반복을 이용하였으며 특히 빠른 해석을 위해 상정사고마다 B'의 삼각화 인수를 새롭게 구성할 필요 없이 B행렬의 변화분 ΔB 를 IMML(The Inverse Matrix Modification Lemma)을 사용하여 처리했다.

2. 상정사고 시뮬레이션 방법

상정사고 선택을 위한 평가지수를 계산하기 위해서는 상정사고 후의 모션전압 및 선로 조류를 고속으로 구할 필요가 있다. 이 목적을 위해 본 연구에서는 고속 분할 조류 계산(Fast Decoupled Load Flow)의 1회 반복법을 이용하였다. 또한, 상정사고 시마다 B'의 삼각화 인수를 새롭게 구성하지 않도록 하기 위해, B행렬의 변화분 ΔB 를 이용하여 식(2-1)의 IMML(Inverse

Matrix Modification Lemma)을 사용했다.

$$(B')^{-1} = (B + \Delta B)^{-1} = B^{-1} - B^{-1}(I + \Delta B B^{-1})^{-1} \Delta B B^{-1} \quad (2-1)$$

여기서 B: 사고후의 행렬
 ΔB : 사고로 인해 나타나는 B 행렬의 변화분

3. 상정사고 평가치수

본 연구에서는 한계치별로 평가치수를 산정하여 순위를 결정할 수 있도록 경계 한계치와 비상 한계치의 두 종류 한계치를 정의하였다.

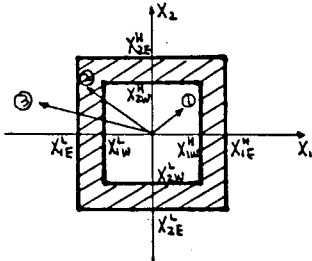


그림 1. 2차원공간에서의 경계한계치와 비상한계치

이 두 가지 한계치를 기초로 하여 그림1과 같은 2차원 공간에서 다음과 같은 세가지 상태를 정의할 수 있다.

- 1) 안전상태: ①번 벡터와 같이 모든 요소가 경계 한계치내에 있는 경우
- 2) 경계상태: ②번 벡터와 같이 경계한계치를 위반하나 비상한계치를 위반하지 않는 경우
- 3) 비상상태: ③번 벡터와 같이 하나의 요소라도 비상한계치를 위반하는 경우

한편, 한계치를 벗어난 상정사고를 걸러내기 위하여 다음 식 (3-1)의 무한대 norm(infinite norm)을 사용했다.

$$PI_f = \|X\|_\infty = \max |X_i| \quad (3-1)$$

여기서 $PI_f \geq 1$... 치명적인 상정사고 (critical)
 $PI_f \leq 1$... 치명적이지 않은 상정사고 (noncritical)

(3-1)을 상정사고의 여과(filtering)를 위해 사용한 것은 치명적인 상정사고로부터 치명적이지 않은 상정사고를 분리하는 기준을 명확히 하기 위함이다. 즉 masking 문제를 개선하기 위함이다.

그리고 경계상태와 비상상태를 구분하는 기준으로서 다음과 같은 PI_f 를 사용한다.

$$PI_f \leq k \quad \text{경계상태(3-2)}$$

$$PI_f \geq k \quad \text{비상상태(3-3)}$$

여기서, $k = \frac{\text{비상한계치}}{\text{경계한계치}}$

또한 본 연구에서 사용한 유효전력 조류에 대한 평가치수와 전압에 대한 평가치수는 다음과 같다.

$$PI_{MW} = \sum w_l \left(\frac{P_l - a P_l^{lim}}{a P_l^{lim}} \right)^{2n} \quad (3-4)$$

$$PI_V = \sum w_{iu} \left(\frac{V_i - a V_i^{lim}}{a V_i^{lim} - V_{id}} \right)^{2n} + \sum w_{il} \left(\frac{a V_{il}^{lim} - V_i}{V_{id} - a V_{il}^{lim}} \right)^{2n} \quad (3-5)$$

단 α : 각부 아 선로의 집합
 \mathcal{A} : 전압한계치를 벗어난 모선의 집합
 a : 한계치 변경 계수

w_l, w_{iu}, w_{il} : 유효 전력 조류, 전압상한, 전압하한에 대한 가중 계수.

V_i^{lim}, V_{il}^{lim} : 모선 i 에 해당하는 전압의 상한과 하한.

V_{id} : 모선 i 에서의 전압의 기준치

전압에 대한 평가치수 PI_V 와 선로 각부 아에 대한 평가치수 PI 를 이용하여 계통의 안전도를 종합적으로 평가하고자 할 때에는 이들 두 평가치수를 하나의 평가치수로 나타낼 필요가 있다.

PI 와 PI_V 를 하나의 평가치수로 나타내고자 할 때 다음과 같은 경우를 생각할 수 있다.

- 1) 1차 norm 을 사용하는 경우

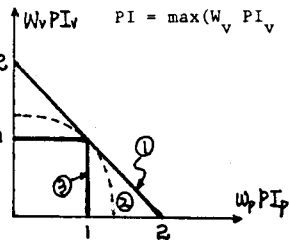
$$PI = W_v PI_V + W_p PI_p$$

- 2) 2차 norm 을 사용하는 경우

$$PI = \left\{ (W_v PI_V)^2 + (W_p PI_p)^2 \right\}^{1/2}$$

- 3) 무한대 norm 을 사용하는 경우

$$PI = \max(W_v PI_V, W_p PI_p)$$



- ①: 1차 norm 을 사용한 경우
- ②: 2차 norm 을
- ③: 무한대 norm 을 사용한 경우

W_v, W_p : 전압안전도와 선로 과부 아 안전도의 중요도에 따라 결정되는 가중 계수

그림 2. 1차norm 2차norm 무한대 norm 을 사용한 종합적인 평가치수의 비교

그림2에서 ①, ②, ③ 은 1차norm, 2차norm 무한대norm 을 사용했을 경우에 종합적인 평가치수 값이 같은 점들의 궤적을 각각 나타낸다.

그림2를 살펴보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- 1) 무한대norm 을 사용하는 경우.

선로 과부 아 안전도 평가치수와 전압 안전도 평가치수의 계산값이 모두 존재하게 되면 이때의 종합적인 평가치수는 계통 안전도를 과소평가하게

전압 안전도를 고려한 온라인 상정사고 선택법

된다.

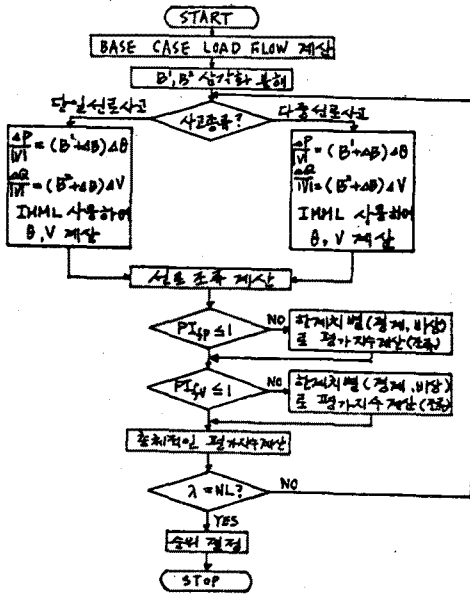
2) 1차 norm 을 사용 하는 경우 .

선로 과부하 안전도 평가지수와 전압안전도 평가 지수의 계산과정에서 어느 하나만 존재하게 되면 이때의 종합적인 평가지수는 계통 안전도를 과대 평가하게 된다.

따라서 종합적인 평가지수를 구하기 위해서는 이들 사이의 적절한 norm 을 선택해야 한다.

본 논문에서는 2차 norm 을 선택했다.

4. 상정사고 선택법의 흐름도



5. 적용 예

본 연구에서 제안한 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해 IEEE 14선로 모델 계통에 적용하였다. 적용 결과에 의하면 제안된 방법이 계산시간 및 상정사고 선택의 신뢰성면에서 종래의 방법보다 우수함을 확인할 수 있었다.

표 1. 평가지수 계산결과

순번	조류 평가지수	선로	전압 평가지수	선로	종합 평가지수	
위 번호	비상	경계	비상	경계	비상	
1	2	0.25085	2	0.45730	2	1.33500
2	1	0.21041	16	0.23435	1	1.05305
3	8	0.04154	12		8	0.30780
4	4	0.18767	17	0.91842	4	0.23435
5	12	0.17459	20	0.48372	12	1.24710
6	9	0.14787	15	0.43864	6	0.93548
7	11	0.12494	14	0.59242	7	0.08041
8	3	0.10731	4	0.43859	17	0.87575
9	17	0.10508	1	0.28585	15	0.74481
10	10	0.09148	9	0.27871	20	0.68834
11	6	0.09039	3	0.23483	11	0.63960
12	19	0.08892	11	0.21142	3	0.58449
13	15	0.08414	18	0.19031	14	0.50242
14	5	0.04925	6	0.04450	10	0.45743
15	13	0.05213	19	0.05034	4	0.45432
16	14	0.03153	4	0.01442	19	0.44743
17	20	0.01592	10	0.00520	5	0.34773
18			13	0.00255	13	0.24047
19					18	0.18631

종합평가지수에서 비상상태라는 것은 상정사고시에 선로 조류나 모선전압이 비상상태에 존재하고 있음을 나타내고 경계상태라는 것은 상정사고시에 선로조류나 모선전압이 경계상태에 존재하고 있음을 나타낸다.

6. 결론

- 1) 무한대 norm 을 사용 하여 여과 (filtering) 시킴으로써 치명적인 상정사고로부터 치명적이지 않은 상정사고를 정도 높게 걸러낼 수 있었다.
- 2) 한계치별로 평가지수를 도입함으로써 순위 결정에 신뢰성 높일 수 있었다.
- 3) 전압의 평가지수와 선로 과부하의 평가지수를 하나의 평가지수로 합치는 방안을 제시했다.
- 4) 가중 계수 (weighting factor) 를 적절하게 고려할 수 있는 방법 이하에 따라 상정사고 순위 선정의 정도가 높아지리라 생각되었으므로 가중 계수를 구하는 방법에 대해서 더 연구해 나갈 계획이다.

7. 참고 문헌

- 1) 송길영: "전력계통의 예석 및 운용", 동일출판사 1984
- 2) 송길영, 김영한, 노대석: "온라인 고속 상정사고 선택에 관한 연구" 대한전기학회 논문지 36-5-1, 1987, 5월
- 3) G.C.Ejebe, B.F.Wollenberg "Automatic Contingency Selection" IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-98 No. 1 Jan/Feb 1979. pp 97-109
- 4) F.Albuyeh, A.Bose and B.Heath "Reactive Power Considerations in Automatic Contingency Selection" IEEE Trans.PAS, Vol,PAS-101, January 1982 PP 107-112
- 5) R.G.Wasley and M.Daneshdoost, "Identification and Ranking of Critical Contingencies in Dependent Variable Space" IEEE Trans. PAS Vol-102 April 1983 PP 881-892
- 6) M.G Laudy, T.A. Mikolinnas, and N.D. Reppen "Contingency Selection of Branch Outages Causing Voltage Probelems" IEEE Trans. onPAS, Vol.PAS-102, PP 389-3094 Dec. 1983
- 7) T.F Halpin, R.Fischl, and R.Fink "Analysis of Automatic Contingency Selection Algorithms" IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-103, N.S, May 1984 PP938-945
- 8) O.Alsac, B.Stott, W.F.Tinney "Sparsity-Oriented Compensation Methods For Modified Network Solutions" IEEE Trans.PAS, Vol. PAS-102 No. 5, May 1983 PP 1050-1060
- 9) K.Nara, K.Tanaka, R.R Shoultz, M.S.Chen and Peter Van Olinda "On-Line Contingency Selection Algorithm for Voltage Security Analysis" IEEE Trans. PAS Vol PAS-104, No. 4 April 1985 PP 847-856