

날씨효과를 고려한 전력계통의 상정사고 순위 결정

김경영* · 박종진* · 김진오* · 김태균** · 추진부**
 *한양대학교 전기공학과 **한국전력공사 전력연구원

A Determining Contingency Ranking Using the Weather Effects of the Power System

Kyoung-Young Kim* · Jong-Jin Park* · Jin-O Kim* · Jin-Bu Choo**
 *Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University **KEPRI KEPCO

Abstract - The deregulated electricity market is operated with respect to theory of economical efficiency, and therefore, the system operator requires data with fast contingency ranking for security of the bulk power system. This paper compares the weather dependant probabilistic risk index(PRI) with the system performance index for power flow in the IEEE-RBTS. also, the system performance index for power flow presents the power system stability. The probabilistic risk index can be classified into normal weather and adverse weather. This paper proposes calculation method using the probabilistic risk index in determining contingency ranking requiring for security under the deregulated electricity market.

날씨 상태로 구분하였고, 각 날씨에서의 파라미터 평균 값은 상수로 가정하였다. 고장율은 날씨상태에서의 평균 고장율의 날씨에 의한 가중치를 부여하였다.

평상날씨는 가혹날씨와 자연재해를 제외한 모든 날씨 상태를 나타내고, 가혹날씨는 뇌우, 강풍, 태풍과 같은 날씨상태를 고려하였다. 날씨가중치는 그림 1과 같은 각각의 날씨조건에 따라 가중치를 부여하였다.

1. 서 론

전력산업의 규제가 완화됨에 따라, 계통의 운영방식이 크게 바뀌고 있다. 기존의 수직통합체에서 하나의 주체에 의해 계통의 발전과 급전이 이루어지던 구조에서 시장에 참여하여 서로 경쟁하게 되는 다수의 의사결정 주체들에 의해 운영되는 구조로 변모하고 있는 것이다.

우리나라는 한국전력공사에 의해 송전, 배전, 발전이 수직통합된 전력시장의 구조였으나, 최근에 송전, 배전, 발전이 경쟁적인 전력시장 구조로 변화하는 추세이다. 이러한 전력시장구조는 경제성의 원리로 운영되므로, 계통의 안전성(Security) 확보를 위해 계통 운영자는 빠른 상정사고 순위에 대한 데이터를 요구하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 전력계통 상정사고 순위결정(Ranking)에 대한 빠른 계산과 잠재적 사고 확률을 고려한 지수(PRI : Probabilistic Risk Index)를 이용한 방법을 제안하고 있다.

확률적 위험 지수(PRI) 사용에 있어 날씨영향에 대한 고장을 고려하기 위해 평상날씨(Normal Weather), 가혹날씨(Adverse Weather) 2가지로 구분하였다.

평상날씨와 가혹날씨로 확률적 위험 지수(PRI)에 의해 상정사고 순위 산정된 결과와 계통에 흐르는 조류량을 이용한 상정사고 알고리즘을 이용하여 계통의 상정사고 순위를 결정하였다.

확률적 위험 지수(PRI)를 이용한 상정사고 순위 결정은 결정론적 지수 방법 보다 빠른 계산속도와 송전선로 고장율을 고려하기 때문에 보다 정확함을 사례연구를 통해 확인하였다.

본 논문에서는 경쟁적 전력시장구조 하에서 전력계통 안전성 확보를 위해 계통운영자가 필요로 하는 상정사고 순위결정에 있어 확률적 위험 지수(PRI)를 이용한 시간대별 계산방법을 채택하였다.

2. 본 론

2.1 확률적 모델링

본 논문에서는 날씨에 영향을 고려하기 위해 두 가지

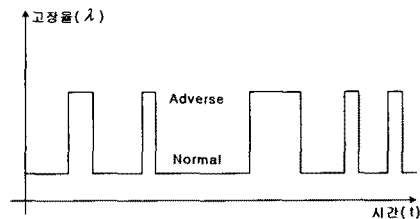


그림 1. 연간 날씨 변화

수리시간(Repair time)은 날씨뿐만 아니라 고장이 발생한 시간대에 따라 다른 값을 가진다. 즉, 어느 시간에 고장이 발생하는지에 따라 수리에 이용할 수 있는 인적, 물적자원이 달라지고 수리과정 절차에도 영향을 미치게 된다. 이런 가중치는 모두 과거의 고장수리 경험을 통해 구한다.

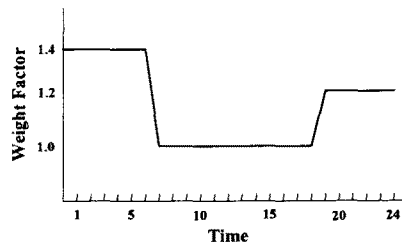


그림 2. 수리시간에 대한 가중치

따라서, 시간 t에서 송전선로마다 날씨를 고려한 가중치는 식 (1)처럼 표현된다.

$$U_{ij}(wt) = \lambda(t) \times r_{ij}(t) \times l_{ij} \quad (1)$$

$U_{ij}(w, t)$: 날씨의 영향과 시간에 대한 상정사고가 발생한 i-j 선로에서의 가중치

λ_n : 고장율

$r_{ij}(t)$: 매 시간대에 대한 i-j 선로에서 수리시간

l_{ij} : 송전선로길이에 대한 가중치

여기서, 송전선로길이 가중치(l_{ij})는 일차함수로 고려하였다.

2.1.1 날씨조건을 고려한 확률적 위험 지수(PRI)

계통사고 해석에 있어 빠르고 정확한 계산을 위한 방법으로 본 논문에서 전압과 유효전력에 대한 제한위반을 부여하여 확률적 위험 지수(PRI)를 개발하였다.

계통 운영상태에 대한 지수를 계산하기 위해서, 확률적 위험 지수(PRI)를 식 (2)처럼 정의하였다.

가중치는 유효전력과 전압의 운영제한 위반을 이용하여 결정하였다 [1].

시간대 별 송전선로의 확률적 위험 지수(PRI)를 식 (2)처럼 표현하고 있다.

$$I_{risk}(t) = U_{ij}(w, t) \cdot \left[\sum_k K_{Pk}^{ij} \left(\frac{\Delta P_k^{ij}}{P_N} \right)^2 + \sum_k K_{Vk}^{ij} \left(\frac{\Delta V_k^{ij}}{V_N} \right)^2 \right] \quad (2)$$

i, j : i-j 선로

$U_{ij}(w, t)$: 날씨의 영향과 시간에 대한 상정사고가 i-j 선로에서 발생할 때 가중치

k : 제한위반 범위

K_{Pk}^{ij} : 유효전력 위반에 대한 가중치

K_{Vk}^{ij} : 전압위반에 대한 가중치

ΔP_k^{ij} : 각 선로에 선로용량 위반량

ΔV_k^{ij} : 정격전압 위반량

P_N : 각 선로에 선로용량

V_N : 정격전압

확률적 위험 지수(PRI)는 전압과 유효전력 위반에 대한 가중치를 부여한 이차함수형태로 표현된다.

전압 위반 가중치는 저전압과 과전압을 고려하였고, 유효전력 위반 가중치는 상정사고로 인한 각 선로의 유효전력 위반에 대해 가중치를 고려하였다. 유효전력 위반 가중치에서 하한구간이 없는 이유는 송전선로의 정격 유효전력 보다 낮은 유효전력은 문제가 되지 않기 때문이다.

2.2 계통 안전 지수

상정사고에 대한 기준은 사고 후 과도정상상태에 대해서 전력조류를 운영 하는 것이다. 사고 중에서 몇몇 사고는 송전선로의 과부하와 일반적인 제한범위 밖의 부하 모선 전압과 같은 계통제한위반에 의해 야기 된다.

송전선로에서 전력조류는 일반적으로 유효전력제한에 의한 제한이 이루어지며, 때때로 장거리 송전선로에서는 안전도를 고려하여 제한한다[3].

2.2.1 전력조류에 대한 계통 안전 지수

$$PI_{MW} = \sum_{l=1}^{NL} \frac{W_l}{2n} \left(\frac{P_l}{P_l^{lim}} \right)^{2n} \quad (3)$$

P_l : 송전선로 l 의 조류량

P_l^{lim} : 송전선로 l 의 정격용량

NL : 송전선로 수

n : 가중치 함수의 멱차수($n=1$)

W_l : 송전선로 가중치 함수

식 (3)는 송전선로의 과부하로 인한 상정사고시 계통의 안전에 영향을 미치는 경우를 나타낸 안전 지수이다. 일반화된 전력조류는 지수가 짝수로 증가하기 때문에 전력조류의 절대값의 사용을 피할 수 있었다. 안전 지수

(PI_{MW})가 전력조류의 제한범위 내에 있다면 매우 작은 값을 가지며, 만약에 송전선로에 과부하가 발생하면 안전지수(PI_{MW})는 매우 높은 값을 가진다. 안전지수(PI_{MW})는 계통상태에 대한 송전선로 과부하의 심각성을 나타내는 좋은 지수이다.

송전선로 가중치 함수(W_l)는 상정사고시 송전선로용량까지는 가중치를 부여하지 않았으며, 상정사고시 송전선로용량이 초과하였을 경우 유효전력에 대하여 가중치를 부여하였다. 상정사고시 각 선로의 과부하를 고려하였기 때문에 계통 안전 지수(PI_{MW})는 사고시 모든선로를 합한 결과로 표현된다.

상정사고시 계통의 안전을 나타내는 지수로 전압에 대한 계통 안전 지수(PI_V)와 전력조류에 대한 계통 안전 지수(PI_{MW})로 표현하였다.

전압에 대한 계통 안전 지수(PI_V)는 발전기 사고에 대해 고려하는 경우 좋은 지수이며, 전력조류에 대한 계통 안전 지수(PI_{MW})는 선로 사고에 대해 고려할 때 좋은 지수이다.

3. 사례연구

본 논문에서 IEEE-RBTS 24 모선을 이용하여 계통의 상정사고 순위를 결정하였다.

전력조류에 대한 계통 안전 지수를 IEEE-RBTS 계통에 대하여 시뮬레이션한 결과를 표 1에서 보여주고 있다. 표 1은 전력조류에 대한 계통 안전지수와 확률적 위험 지수(PRI)에 대하여 계통의 상정사고 순위를 비교한 결과이다. 전력조류에 대한 계통 안전 지수에서 가중치 함수(W_l)는 상정사고 시 유효전력 위반 선로에 대하여 이차 함수적으로 가중치를 부여하였다. 확률적 위험 지수(PRI)와 전력조류에 대한 계통 안전 지수(PI_{MW})에 대한 시뮬레이션 결과가 표 1과 같이 같은 순위를 나타내고 있다. 표 1에서 확률적 위험 지수와 전력조류에 대한 계통 안전지수에 대한 순위가 5순위까지 변화가 없었다. 전력조류에 대한 계통 안전지수는 상정사고시 선로용량에 대하여 가중치로 함수를 고려하여 상정사고 순위를 결정하였다. 반면에 확률적 위험 지수는 전력조류에 대한 계통 안전지수에서 고려한 송전선로의 가중치 뿐만 아니라 전압에 대한 가중치와 상정사고에 대한 사고율, 고장율과 수리시간등 확률적인 요소를 고려하여 계통에 대한 상정사고 순위를 결정하였다.

표 1. 확률적 위험 지수(PRI)와 계통 안전 지수 비교

Rank	Branch	Normal Weather	Branch	PI_MW
1	6-10	0.0001162	6-10	0.959
2	15-21	0.0000685	15-21	0.85715
3	2-6	0.0000572	2-6	0.480615
4	13-23	0.0000558	13-23	0.47802
5	12-23	0.0000499	12-23	0.477335
6	8-10	0.0000477	7-8	0.369455
7	16-17	0.0000472	16-17	0.36652
8	1-3	0.0000464	16-19	0.35641
9	17-22	0.0000457	15-16	0.331945
10	19-20	0.0000454	19-20	0.307075
11	21-22	0.0000447	11-14	0.306125
12	12-13	0.0000443	15-24	0.266725
13	8-9	0.0000443	21-22	0.253655
14	11-13	0.0000419	3-9	0.24048
15	15-16	0.0000410	20-23	0.239465

전력조류에 대한 계통 안전 지수에서 높은 순위를 나타낸 7-8, 16-19, 15-16, 11-14, 15-24선로가 확률적 위험 지수에서는 낮은 순위로 변동 하는 것을 표 1에서 나타내고 있다.

평상날씨의 경우는 유효전력 제한위반과 전압 제한위

반 및 고장율, 수리시간에 대해 고려하였고, 가혹날씨의 경우는 평상날씨의 계산방법에 상정사고가 발생했을 경우 송전선로길이에 따른 수리시간 가중치를 더 부가하여 IEEE-RBTS 계통을 사례연구하였다.

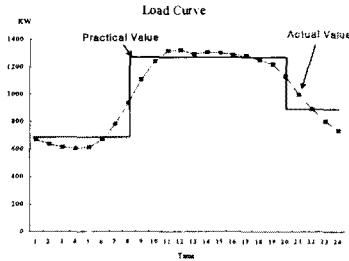


그림 3. 일일 부하 곡선

시간대별 부하형태를 이용하여 매 시간별 상정사고 순위를 평상날씨와 가혹날씨에 대해서 시뮬레이션을 하였다. 시간대별 부하형태는 그림 3의 일일부하곡선을 이용하여 부하의 변동을 고려하였다.

평상날씨와 가혹날씨에서 변압기에서는 평상날씨나 가혹날씨와 관계없이 일정한 상정사고 순위를 나타낸다. 그 이유는 고장율은 낮지만 매우 큰 수리시간 때문이다.

IEEE-RBTS 계통에서 지중케이블은 1-2와 6-10 선로이다. 지중케이블은 날씨에 영향을 받지 않으나, 사고가 발생했을 경우 지중에 매설되어 있기 때문에 사고를 복구하는데 가공송전선로보다 복구시간이 길다. 그 결과 6-10 선로는 길이가 동일한 가공송전선로보다 수리시간이 오래 소요됨을 알 수 있다. 1-2 선로의 경우는 6-10 선로와 동일한 지중케이블이나 케이블의 길이가 상당히 작기 때문에 날씨에 영향이 있는 경우라도 수리하는 시간이 적게 소요되기 때문에 상정사고순위가 낮게 나타남을 알 수 있었다.

표 2과 표 3에서 부하분포가 가장 적은 새벽시간대인 5시와 피크부하시간대인 14시에 대한 평상날씨와 가혹날씨에 대한 상정사고 순위 결과를 보여주고 있다.

표 2. IEEE-RBTS 24 모선에 대한 5시 상정사고 순위

Rank	Branch	Normal	Branch	Adverse Weather
1	6-10	0.0001711	6-10	0.074037
2	15-21	0.0001425	15-21	0.04316
3	13-23	0.0001227	13-23	0.042489
4	12-23	0.0001216	12-23	0.04209
5	16-19	0.0001087	17-22	0.041566
6	2-6	0.0001075	2-6	0.037207
7	17-22	0.0001067	1-3	0.031637
8	8-10	0.0000994	8-10	0.030129
9	21-22	0.0000955	21-22	0.028924
10	19-20	0.0000954	16-19	0.028221
11	16-17	0.0000952	11-13	0.025027
12	14-16	0.0000916	19-20	0.024778
13	1-3	0.0000914	12-13	0.024749
14	15-16	0.0000907	16-17	0.024729
15	20-23	0.0000841	8-9	0.24455

표 2는 부하분포가 가장 적은 5시에 대한 상정사고 순위이다. 표 2의 경우에 10위 이내 중요한 순위 중 16-19, 17-22 선로(진한 부분)가 평상날씨에 5순위와 7순위였으나 가혹날씨의 경우 10순위, 5순위로 변화하였다. 표 3은 피크부하 시간대인 14시에 대한 상정사고 순위이다. 21-22, 8-10 선로(진한 부분)가 평상날씨에 7순위와 8순위였으나 가혹날씨의 경우 9순위, 10순위로 변화하였다. 평상날씨에서 전압 제한위반, 유효전력 제한위반, 고장율에 따라 높은 순위를 나타내지만, 가혹날씨 상태에서

는 평상날씨에서 일정하게 고려하였던 송전선로길이에 대한 수리시간에 가중치를 부가했을 경우, 평상날씨에서 높은 순위였던 송전선로가 가혹날씨에서는 낮은 순위로 변동하였고, 또한 평상날씨에서 낮은 순위였던 송전선로가 가혹날씨에서 높은 순위로 변동되었음을 알 수 있다.

표 3. IEEE-RBTS 24 모선에 대한 14시 상정사고 순위

Rank	Branch	Normal	Branch	Adverse Weather
1	6-10	0.00007715	6-10	0.083475
2	15-21	0.00004859	15-21	0.036802
3	17-22	0.00003703	17-22	0.03606
4	12-23	0.00003566	12-23	0.030867
5	13-23	0.00003361	13-23	0.029091
6	2-6	0.00003132	2-6	0.027115
7	21-22	0.00003086	19-20	0.026063
8	8-10	0.00002966	1-3	0.025449
9	1-3	0.00002940	21-22	0.023372
10	7-8	0.00002844	8-10	0.022466
11	8-9	0.00002742	8-9	0.020767
12	12-13	0.00002741	12-13	0.020763
13	11-13	0.00002740	11-13	0.020752
14	16-17	0.00002551	15-24	0.019069
15	11-14	0.00002529	7-8	0.018461

평상날씨에서 상정사고 발생시 부하변동, 고장율과 수리시간에 의해서 상정사고 순위가 변동한 것을 알 수 있으나, 가혹날씨의 경우에는 평상날씨의 2가지 순위결정 변동요인과 더불어 송전선로길이에 따라 상정사고 순위가 변동함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서 제안된 확률적 위험 지수(PRI)를 이용하여 개방된 전력시장 내에서 계통운영자에게 시간대별, 날씨상태별로 상정사고의 순위에 대한 데이터를 빠르고 정확하게 제공하게 된다. 상정사고시 결정론적인 방법인 전력조류에 대한 계통 안전지수를 이용한 계통의 상정사고 순위와 날씨 상태를 고려한 확률적 위험 지수(PRI)에서 상위 순위가 동일함을 알 수 있었다. 즉, 상정사고해석에서 날씨의 영향을 고려한 확률적 위험 지수가 실제 계통에 가까운 상정사고 순위를 보였다. 따라서, 계통운영자는 계통에 대한 시간대별, 선로상태, 선로길이 및 기상조건 등 수집된 데이터를 이용하여 계통을 운영에 있어 안전성과 신뢰성을 가지고 계통을 운영할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 전력연구원의 지원에 의해 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] K. Uhlen and B. H. Bakkn, "Implementation of a probabilistic security assessment tool for determination of power transfer limits", *cigre*, 2002
- [2] T. A. M. Sharaf and G. J. Berg, "Loadability in composite generation/transmission power-system reliability evaluation", *IEEE Trans. Power system*, vol. 42, pp. 393-400, 1993
- [3] G. C. Ejebe and B. F. Wollenberg, "Automatic Contingency Selection", *IEEE Trans. Power Apparatus*, vol. PAS-98, No. 1. pp. 97-103, 1979
- [4] Peng Wang and R. Billinton, "Reliability cost/worth assessment of distribution systems incorporating time-varying weather conditions and restoration resources", *IEEE Trans. Power System*, vol. 17, pp. 260-256, 2002