

가중치를 고려한 전력시스템의 안전도 지수에 관한 연구

송성환, 정승완, 문승일, 윤용태  
서울대학교

The Advanced Power System Security Index Considering weighting factors

Sung-Hwan Song, Seung-Wan Jung, Seung-Il Moon, YongTae Yoon  
School of Electrical Engineering Seoul National University

**Abstract** - 본 논문에서는 전력시스템의 정적 안전도 수준(Steady-state Security Level)을 평가할 수 있는 안전도 지수를 전력시스템의 영향을 반영하는 가중치를 고려하여 보다 개선된 안전도 지수를 제안한다. 먼저, N-1 선로사고를 가정하여 각 선로가 계통에 미치는 영향과 각 선로의 사고로 인해 모선 전압의 변동량을 분석하여 각각 안전도 지수들의 가중치를 산정한다. 이때, 가중치의 표준화를 위해 분포도(Distribution Chart)를 활용한다. 가중치가 적용된 안전도 지수는 이를 고려하지 않은 안전도 지수보다 더욱 계통상황을 잘 반영할 것이며, 전력계통 운영 상태를 나타내는 중요한 지표로서 활용될 수 있을 것이다.

주제어 : 전력시스템 안전도, 안전도 지수 (security index), 상정고장 분석, 가중치

1. 서 론

안정적인 계통운영을 위해 적정 수준의 전압유지와 신뢰성 있는 전력공급은 매우 중요한 요소이다. 그리고 이와 같은 문제들을 다루는 전력시스템 안전도(Power System Security)는 전력산업 구조개편의 환경변화 속에서도 간과해서는 안 될 중요한 요소이다. 즉, 구조개편이라는 패러다임의 큰 변화를 겪고 있는 전력시스템은 계통의 불확실성(Uncertainty)이 점차 증가하고 있고, 전력시장참여자들의 이해관계가 상충할 가능성이 높아지고 있기 때문에 안전도에 더욱 위협을 받고 있는 실정이다. 그 결과로 계통은 낮은 안전도 수준에서 운영되고 결국 정전의 사고 확률이 높아지게 된다. 따라서 안전도(Security)문제는 전력시스템의 신뢰도(Reliability)와 밀접한 연관관계를 가지는 매우 중요한 문제이다.

본 논문에서는 전력시스템의 안전도 수준을 평가해 줄 수 있는 기존의 안전도 지수에 대해 고찰하고 이를 통해 계통의 영향을 판별하여 이에 대한 가중치를 고려하여 보다 유용한 안전도 지수를 제안하고자 한다.

기존의 안전도 지수에 가중치를 고려하여 개선된 안전도 지수 개발 절차는 IEEE 9모선에 적용되어 그 유용성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 안전도 지수 고찰

전력시스템의 안전도 지수는 다음과 같이 선로의 조류와 관계되는  $J_p$ 와 모선의 전압과 관계되는  $J_v$ 로 나눌 수 있다. [1, 2]

$$J_p = \sum_i \alpha_i \left( \frac{P_i}{P_i^{\max}} \right)^2 \quad (1)$$

$$J_v = \sum_j \beta_{j\#} (V_j - V_j^{\text{ref}})^2 \quad (2)$$

$i$  : 송전선로 수,  $j$  : PQ모선의 수

$\alpha_i, \beta_{j\#}$  :  $J_p$ 와  $J_v$ 의 가중치

$P_i$  :  $i$  선로의 유효전력

$P_i^{\max}$  :  $i$  선로의 최대 유효전력

$V_j$  :  $j$  모선의 전압 크기

$V_j^{\text{ref}}$  :  $j$  모선의 기준 전압 크기

$J_p$ 는 선로의 총 유효전력 흐름의 균등한 정도를 나타내는 지수이며,  $J_v$ 는 모선의 전압이 기준 전압에 얼마나 가까운가를 나타내는 지수이다.  $J_p$ 의 경우 선로에 흐르는 조류가  $P_i^{\max}$ 의 값을 넘어서면 조류의 비율이 1 이상의 값을 가지므로, 과부하에 걸리는 선로의 수가 많을수록 그 값은 증가한다. 그리고  $J_v$ 의 경우도 기준 전압 크기에서 벗어나는 경우, 특히 저전압 모선의 수가 증가할수록 그 값은 증가한다. 즉, 지수가 감소한다는 것은 전력 시스템의 안전도가 향상된다는 것을 의미한다. 따라서 안전도 지수  $J_p$ 와  $J_v$ 는 전력시스템의 정적 안전도를 평가하는데 유용한 지표들이다.

2.2 개선된 안전도 지수의 제안

기존의 연구[2, 3]에서는 안전도 지수  $J_p$ 와  $J_v$ 의 가중치  $\alpha_i$ 와  $\beta_{j\#}$ 를 각각 일정한 값(대부분 1로 가정)으로 가정하여 시스템을 평가하였다. 이는 시스템의 영향을 충분히 반영하지 못한 평가방법이라 할 수 있다.

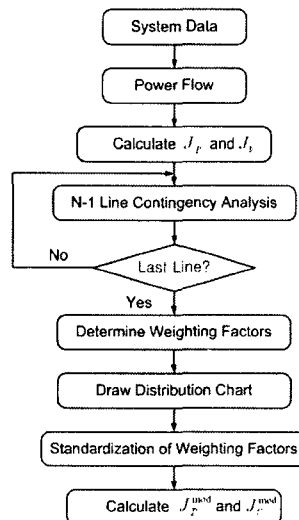


그림 1. 가중치를 고려한 안전도 지수 계산 절차

그림 1은 가중치를 고려한 안전도 지수의 계산 절차를 나타낸 것이다. 먼저 주어진 시스템 데이터를 통해 가중치가 일정한  $J_p$ 와  $J_v$ 의 값을 구한다. 그리고 모든 선로에 대한 N-1 Line Contingency Analysis를 수행하여, 각 선로사고가 계통에 미치는 영향을 가지고 가중치를 다음과 같이 구하게 된다.

먼저,  $J_p$ 의 가중치의 경우는 N-1 선로 상정사고 해석을 통해 해당 선로에 나타나는 과부하 선로 수준을  $a_i$ 로 판별하여 이를 다시  $a_i$ 의 값으로 식 (3)과 같이 표준화(Standardization)를 시킨다.  $a_i$ 의 범위는 0에서 1까지 하고 단계는 0.01로 한다.

$$a_i = \frac{(a_i - a_i^{\min})}{(a_i^{\max} - a_i^{\min})} \quad (3)$$

$J_v$ 의 가중치의 경우, 선로 상정사고를 통하여 각 선로가 모선의 전압크기에 영향을 미치는 성분인  $b_{ij}$ 를 식 (4)와 같이 구한다. 이는 선로 i 사고 시 모선 j로 영향을 주는 계수(coefficient)이다. 즉, 이는 N-1 선로 상정사고가 각 모선의 전압 값에 영향을 주는 수치적 함으로 산정되며, 선로사고 전후의 전압 값의 변동을 선로사고 전의 전압 값으로 나누어 선로사고로 인한 모선의 전압 변동 값을 반영한 것이다.

$$b_{ij} = \sum_i \frac{|V_j^{\text{post}} - V_j^{\text{pre}}|}{V_j^{\text{pre}}} \times 100 \quad (4)$$

$$\beta_{ij} = \frac{(b_{ij} - b_{ij}^{\min})}{(b_{ij}^{\max} - b_{ij}^{\min})} \quad (5)$$

그리고 계산된 가중치를 바탕으로 분포도(distribution chart)를 얻게 되며, 여기서 식 (5)와 같이 가중치를 0과 1사이의 값으로 단계별로 설정하는 표준화(Standardization) 작업을 통하여 계통의 상황(조류 및 전압)을 포함하는 개선된 안전도 지수  $J_p^{\text{mod}}$ 와  $J_v^{\text{mod}}$ 를 결정한다.

이러한 절차를 통하여 계통 상황을 반영할 수 있는 가중치  $a_i$ 와  $\beta_{ij}$ 를 고려함으로써 계통의 안전도를 보다 정확하게 평가할 수 있을 것이다.

### 2.3 제안한 안전도 지수의 특징 및 유용성

제안한 안전도 지수  $J_p^{\text{mod}}$ 와  $J_v^{\text{mod}}$ 의 특징 및 유용성을 살펴보면 다음과 같다.

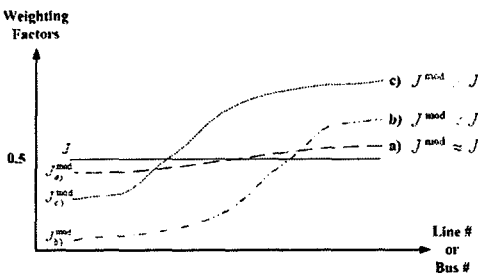


그림 2.  $J$ 의 분포와  $J^{\text{mod}}$ 의 분포 비교

그림 2는 각 선로와 모선에서 구해질 수 있는 가중치의 분포를 오름차순으로 나타낸 개념도이다. a)와 같이 선로 및 모선의 가중치 분포가 0.5 근처에 집중되어 있다

면  $J^{\text{mod}}$ 는  $J$ 와 비슷한 값을 가질 테지만, b)와 같이 낮은 가중치에 선로와 모선들이 상대적으로 많이 분포되어 있는 것이라면  $J^{\text{mod}}$ 값이  $J$ 의 값보다 작게 표현될 것이다. 그리고 반대의 경우(그림 c)라면  $J^{\text{mod}}$ 값이  $J$ 값보다 더 크게 평가되므로 계통의 보다 심각한 운영 상황을 잘 반영한 것이라 할 수 있다.

특히, 계통의 입장에서는 계통에 사고의 영향을 크게 미치지 않는 여러 사고를 보다는 오히려 큰 사고 1개의 영향이 더 심각하게 영향을 미친다.[2] 이를 Masking effect라고 하는데, 이런 관점에서 가중치를 고려한 안전도 지수는 일정한 가중치가 적용되는 안전도 지수 보다 더 높은 값을 나타내므로 계통 운영자에게 emergency 상황에 대한 판단의 근거를 빠르고 정확하게 제시해 줄 것이다.

그리고 안전도 지수의 가중치는 시스템으로부터 제안된 절차에 따라 산출되므로 이에 대한 계통 운영자의 주관적 판단이 배제되므로 객관적인 지수를 얻게 된다.

### 3. 사례연구

본 논문에서는 그림 3과 같이 IEEE 9 모선 시스템을 대상으로, N-1 선로사고를 가정했을 때 각 선로와 모선의 안전도 지수를 계산하고, 이를 바탕으로 계통상황을 더욱 자세하게 반영할 수 있도록 가중치를 산정하였다.

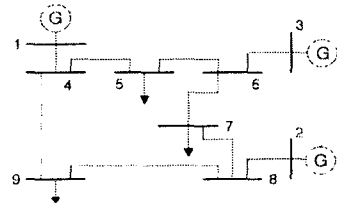


그림 3 IEEE 9 모선 시스템

위 IEEE 9 모선 시스템의 각각의 선로에 대해서 N-1 선로 상정사고 해석을 수행한다. 이를 통해서 각 선로에 사고가 발생하여 계통의 상태가 변화했을 때 이를 반영해주는 새로운 안전도 지수  $J_p$ 를 얻을 수가 있다. 이 때 얻은  $J_p$ (여기서는  $a_i$ 로 정의)값은 base상태에서 얻은  $J_p$ 값보다 조금 그 값이 커졌으리라는 것을 그림 4의 ( $a_i$ )값과 표 1의  $J_p$ 의 값을 비교하면 쉽게 알 수 있다. 그 이유는 계통의 선로에 사고가 나게 되면 조류의 분배가 달라지고 특정 선로의 조류에 과부하가 나타날 확률이 중전 상황에 비해서 커지기 때문이다. 따라서 이는 계통의 상황을 사고 전보다 악화시킬 수가 있다.

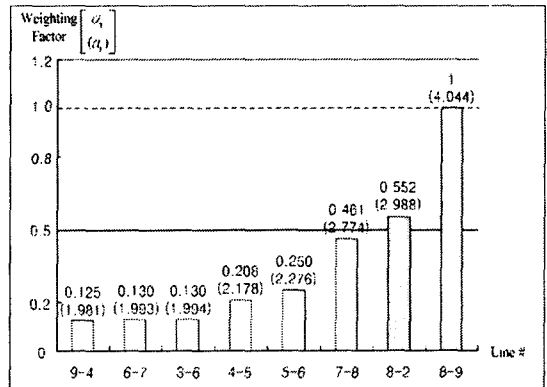


그림 4. 선로 상정사고에 따른 각 선로의 가중치

위의 계통에서 각 선로에 의한 사고는 계통에 미치는 영향이 서로 다를 것이다. 따라서 어떤 선로의 사고에 의해 계통의 안전도가 더 크게 영향을 받는지에 대해 그 우선순위를 알아야 한다. 이를 위해서 각 선로사고에 의한 변화된  $\alpha$ 값을 그림 4와 같이 오름차순으로 정리한다. 이 그래프에서 볼 수 있듯이 선로 8-9의 사고 발생 시에 안전도지수가 가장 높아진다는 것을 알 수가 있고, 이에 반해 선로 9-4의 사고는 계통의 안전도에 가장 적은 영향을 미치는 것을 알 수가 있다. 따라서 이처럼 계통에 서로 다른 영향을 주는 선로사고에 대해서 계통의 안전도에 보다 더 큰 영향을 주는 선로사고에 대해서는 더 큰 가중치를 주고, 보다 작은 영향을 주는 선로사고에 대해서는 작은 가중치를 줘야한다.

이러한 방식으로 구해진  $\alpha$ 값은 0과 1 사이의 값으로 표현되는  $\alpha_i$ 로 표준화되고 이를 적용한  $J_p^{mod}$ 값은 표 1과 같이 가중치를 모두 0.5로 동일하게 줘서 구한  $J_p$ 값보다 조금 작아진 1.34로 계산된다.

이 결과는 안전도 지수의 값이 작아졌다고 해서 계통의 안전도가 향상되었다는 것을 의미하지는 않는다. 계통의 데이터가 바뀌지 않았고, FACTS 기기 같은 보상 장치가 추가로 설치된 것이 아니므로 계통이 느끼는 안전도 자체는 변함이 없다. 하지만 이는 계통의 안전도 지수에 영향을 주는 선로 사고에 각기 다른 가중치를 주어서 계산된 결과 값이므로 종전의  $J_p$ 값보다 실 계통의 안전도를 더욱 잘 반영할 수 있는 지수라고 할 수 있다. 특히 각 선로의 가중치는 이들이 계통에 영향을 주는 정도를 주어진 계통으로부터 구해진 객관적인 수치이므로, 계통운영자들이 계통을 운영하는데 있어서 더욱 객관적이고 효율적으로 운영할 수 있는 기준이 될 것이다.

표 1.  $J_p$ 와  $J_p^{mod}$ 의 비교

$J_p$	$J_p^{mod}$
1.68	1.34

$J_p^{mod}$ 의 값을 계산할 경우에도 마찬가지로, 먼저 N-1 선로 상정사고 해석을 수행하여 각각의 선로에 사고가 발생했을 때 각 모선에 미치는 전압의 변화를 살펴야 한다. 각각의 선로에 사고가 발생하였을 때, 이는 모든 모선 전압에 영향을 끼칠 것이다. 즉, 각각의 선로의 사고는 각 모선의 전압 값의 저하를 야기한다. 각 선로사고를 상정하여 이러한 모선의 전압 값의 변동을 모두 더하여 그림 5에서와 같이  $\beta_i$ 로 나타나며, 그리고 이는 다시  $\beta_i$ 로 표준화 되었다. 이렇게 각 모선마다 다르게 가중치를 두어서 새로운 안전도 지수를 구할 수 있다.

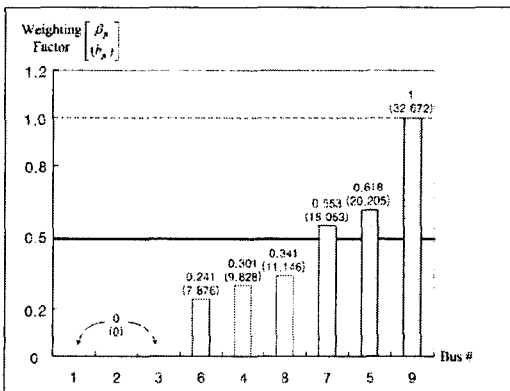


그림 5. 선로 상정사고에 따른 각 모선의 가중치

위 그림에서 모선 1,2,3에서는 전압의 변화를 보이지 않

았고 이는 발전기 모선이므로 발전기의 전압제어를 통해 일정한 전압이 유지된 것으로 해석할 수 있다. 그리고 모선 9에서 선로의 사고에 의해 전압 값이 가장 크게 영향을 받음을 알 수 있으며, 계통의 전압 안전도를 위해서는 모선 9에 전압보상을 위한 보조제어수단이 필요할 것이다.

표 2에서 볼 수 있듯이 새롭게 구해진  $J_v^{mod}$ 값은 가중치를 0.5로 동일하게 주었을 때의  $J_v$ 값보다 커졌음을 알 수 있다. 이는 실제로 전압과 관련된 계통안전도가 악화되었다는 것을 의미하는 것이 아니라 계통운영자가 이 계통을 해석할 때 기존의 안전도에 의한 계통의 정보보다는 조금 더 계통이 약할 수 있다는 가능성을 제시해 주는 것이다.

표 2.  $J_v$ 와  $J_v^{mod}$ 의 비교

$J_v$	$J_v^{mod}$
0.0013895	0.0023172

#### 4. 결 론

본 논문에서는 가중치를 고려한 전력시스템의 안전도 지수를 제안하였다.

기존의 안전도 지수는 선로의 과부하 상태나 모선의 저전압 수준에 따라 계통의 정적안전도를 평가할 수 있지만, 이는 모든 선로나 모선의 중요성을 일정하게 취급하여 지수를 평가한 것이다. 보다 정확한 계통의 상태 (state of power system)를 반영하기 위해서는 각 지수에 가중치의 필요성이 제기되었으며, 이에 대한 산정절차를 제시하였다.

본 논문에서는 선로사고를 가정하였으므로, 선로조류와 관련된 안전도 지수의 가중치는 계통에 영향을 주는 입장에서 이를 고려하였으며, 모선전압과 관련된 안전도 지수의 가중치는 선로사고로 인해 해당 모선에 나타난 전압감소의 영향을 반영하여 가중치가 계산되었다. 그리고 이들 가중치 값들은 제안된 안전도 지수에 적용하기 위해 표준화 되었다.

마지막으로 표준화 된  $\alpha_i$ 와  $\beta_i$ 의 가중치를 통하여 개선된 안전도 지수의 값을 계산하였고, 이를 기존의 안전도 지수와 비교하여 계통 안전도 입장에서 분석하였다. 개선된 안전도 지수는 계통의 운영 상태를 보다 정확하게 반영할 수 있으며, 특히 계통운영자들에게 계통운동을 하는데 있어서 운영 판단의 근거를 제시해줄 수 있다. 마지막으로, 가중치에 대한 객관성이 보장되므로 전력계통의 운영 상태를 나타내는 중요한 지표로서 활용 가능할 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", 2nd Edition, John Wiley & Sons, INC, 1996, pp. 410-452
- [2] S. N. Singh, A. K. David, "Congestion Management by Optimising FACTS Device Location", Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2000. Proceedings. DRPT 2000. International Conference, 2000, pp. 47 - 52
- [3] Sung-Hwan Song, Jung-Uk Lim, and Seung-II Moon, "FACTS Operation Scheme for Enhancement of Power System Security", IEEE Bologna Power Tech, 23 -26 June 2003, Bologna, Italy