

Vulnerability Evaluation for Monitoring Wide Area Outage in Transmission Systems

김진환* · 임일형** · 이승재*** · 최면송† · 임성일§ · 김상태§§ · 진보건§§§
 (Jin Hwan Kim · Il Hyung Lim · Seung Jae Lee · Myeon Song Choi · Seong Il Lim · Sang Tae Kim · Bo Gun Jin)

Abstract - Defense systems are needed to prevent catastrophic failures of a power grid due to cascaded events. Cascaded events can be occurred by power flow overload. Especially, it is the most dangerous problem that overload line is outage, because it can make the power system face danger of cascaded. In this paper, vulnerability evaluation for monitoring wide are outage is proposed using by configuration information of transmission systems. This method of vulnerability evaluation is considered direct effect and indirect effect of power flow, especially overload. What is more, it can be used when the configuration of power system changes, as simple fault occurs or maintenance of facility. In the case studies, the estimation and simulation network have been testified and analysed in PSSE and C programming.

Key Words : Black-Out, Cascading, Vulnerability, LODEF

1. 서 론

최근 들어 북미 유럽 등에서 발생한 대규모 정전사태는 무엇보다도 전기가 인류에 미치는 영향에 대한 중요성을 실감하게 해 주었다. 아마도 전기공학 분야의 관점에서는 역사상 가장 충격적인 사건으로 기억될 것이다. 이는 예측할 수 없는 우연한 동시 다발적 작은 사고에 의해 어마어마한 대규모 정전사태가 벌어졌다는데 실로 놀라움을 금할 수 없다. 이는 지금도 어디선가 광역정전의 위험성이 존재할 수 있다고 말할 수 있을 것이다[1].

광역정전에 대한 위험성과 분석 및 방지대책에 대한 연구는 세계적으로 많은 관심을 불러일으키며 활발한 연구가 진행되고 있다. NERC(North America Reliability Council)의 정전 기록 분석에 따르면 최근 대용량 정전사고도 높은 빈도로 발생되고 있다. 이에 대한 해결방안으로 충분한 여유용량 확보를 통해 전력계통을 운영하는 방법이 있다. 하지만 이는 막대한 시설비의 요구로 볼 때 현실적 대안이 되지 못한다[2].

또한 전력계통은 발전기, 부하 및 송전선로 등 구성요소

일부의 탈락이 전체 시스템 붕괴로 이어지는 것을 막기 위하여 안전도(Security)를 유지하여 운전하고 있다. 하지만 후비보호 계전기의 오정정[3], 운영자의 실수[4], 제어시스템 통신실패, 보호계전기의 고장[5]등의 원인으로 인하여 광역정전이 발생할 수도 있다.

현재까지 발생한 광역정전은 전력계통의 고장 혹은 외란에 의해 선로가 탈락되고, 이로 인하여 과부하가 발생하여 보호계전기가 동작함으로써 인해 광역정전으로 발전한 경우가 대부분이었다. 사례분석 결과 보호계전기에 의한 영향이 전체 광역정전 사례 중 75%에 달한다고 한다[6, 7].

광역정전을 막기 위하여 적응형 거리계전기[8], 계전기 잠재고장에 대한 연구[9, 10], 또한 멀티에이전트 시스템을 기반으로 취약성 산정 기법을 이용하여 전력계통에 자기복구 및 재구성 기능을 부여함으로써 광역정전을 막고자하는 SPID(Strategic Power Infrastructure Defense)[11]이라는 시스템도 개발되어 있다. 이러한 연구들은 공통적으로 계전기 자체에서 문제를 찾고 해결하는 방법을 제시하고 있지만, 상황에 따른 예측 방법으로 모든 상황에 대한 검증이 어렵다.

따라서 본 논문에서는 계통의 위험을 직접적인 위험과 간접적 위험을 동시에 고려한 선로의 취약도 평가 방법을 제안하였다. 이는 광역정전에 대한 위험을 현 상황에 대한 위험 뿐 만이 아니라 예측 불가능한 계통의 일부분에 사고에 대한 위험 요소를 고려하여 위험을 알려 주게 된다. 제안된 알고리즘은 수도권 중심의 모의 계통을 PSSE를 통해 구현하고 모의 계통의 데이터를 이용하여 취약도 산출을 C프로그래밍으로 구현하여 정상상태와 선로 탈락의 경우 취약도를 구하였다.

또한 본 연구는 현재 개발중인 광역감시 시스템에 적용을

* 준 회원 : 명지대 공대 전기공학과 석사과정
 ** 정 회원 : 명지대 공대 전기공학과 박사과정
 *** 펠로우회원 : 명지대 공대 전기공학과 교수
 § 정 회원 : 경남대 공대 전기공학과 조교수
 §§ 정 회원 : 한전 KDN 선임연구원
 §§§ 정 회원 : 한전 KDN 연구원
 † 교신저자, 정회원 : 명지대 공대 전기공학과 교수
 E-mail : mschoi@mju.ac.kr
 접수일자 : 2009년 11월 17일
 최종완료 : 2010년 2월 12일

위해 진행하였다. 이는 실시간 데이터를 통해 선로의 위험을 운영자에게 전달하여 광역정전 방지 대책 수립에 기여할 것이다.

2. 광역정전과 과조류 선로의 관계

2.1 광역정전 피해 사례

1977년 7월 13일 Buchanan South와 Millwood West 사이의 2개의 345[kV] 선로가 낙뢰로 인해 탈락 하고 약 18분 뒤 또 다른 낙뢰에 의해 Sprain Brook와 Buchanan 사이의 한 개의 345[kV] 선로와 Sprain Brook와 Millwood West 사이의 한 개의 345[kV] 선로가 탈락 하였다. 그 후 23분이 지나 345[kV] 선로가 나무에 접촉하며 계전기가 동작하여 탈락 하며 광역정전으로 진행을 하였다. 이로 인해 6,000[MW]의 부하가 탈락하며 900만 명이 피해를 입었다.

1996년 8월 10일 West Coast에서는 나무에 의한 사고로 3개의 500[kV] 선로가 탈락을 하고 Keeler-Allston 500[kV] 선로가 과조류에 의해 나무에 접촉하며 탈락해 1,300[MW]의 정전을 일으켰고 이들 송전 선로의 탈락으로 Portland 지역의 병렬로 연결된 선로의 과조류가 발생하였다. 그 후 약 5분이 지나 115[kV] 선로가 계전기에 의해 탈락이 되고 230[kV] 선로의 과조류가 발생하여 나무에 접촉하며 탈락하였다. 같은 시간 McNary 수력 발전기들이 탈락을 시작하면서 계통이 불안정하게 되어 Cascading 현상에 의해 광역정전으로 발전하였다. 이로 인해 28,000[MW]의 피해를 가져왔다.

또한 2003년 8월 14일 Eastlake의 5개의 발전기가 탈락을 하며 시작하여 29분후 Stuart-Atlanta 345[kV] 선로가 나무에 접촉하여 탈락하였다. 그 후 57분이 지나 52분 동안 3개의 345[kV] 선로가 나무에 접촉하여 탈락 하였고 24분후 29분 동안 16개의 138[kV] 선로가 과부하로 탈락 26분 후 5분 동안 대다수의 중요 선로가 거리계전기 동작에 의해 탈락하며 광역정전이 일어나 총 70,000[MW]의 피해를 가져왔다[12].

광역정전 사례를 보면 초기 계통의 일부분에서 불특정 사고에 의해 시작을 한다. 이러한 초기 사고는 예측하기 어렵거나 자연 재해와 같은 막을 수 없는 사고에 의해 이루어진다. 하지만 광역정전으로 진행되는 과정 중 공통점을 찾을 수가 있다. 이는 초기의 사고에 의해 계통이 불안정해지고 이로 인해 선로에 실질적 사고가 발생하지 않았음에도 불구하고 과조류에 의해 선로의 늘어짐 현상이나 후비 보호용 계전기의 동작으로 선로가 탈락을 하면서 정전 구간이 확산이 된다. 이는 계통의 일부분의 탈락에 의한 계통의 조류가 재분배 되어 타 선로의 과부를 일으켜 선로 탈락을 유발하여 광역정전으로 발전함을 알 수 있다.

2.2 광역정전에 대한 과조류 선로의 영향 및 취약도 평가

2.2.1 광역정전에 대한 과조류 선로의 영향

본 연구의 제안한 알고리즘 설명에 앞서 그림 1의 IEEE 39 모선 계통을 이용하여 단순한 한 개의 선로 탈락과 두

개의 선로 탈락에 대한 과조류 현상을 확인하였다. 이는 선로 탈락과 같은 단순 사고가 조류 재분배를 통해 계통의 과조류를 일으키는 현상과 과조류가 전체 계통에 미치는 악영향을 확인하였다.

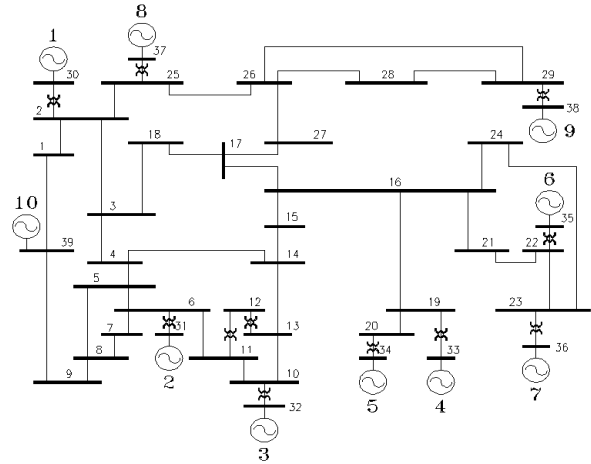


그림 1 IEEE 39 모선 시스템

Fig. 1 Power Flow of IEEE 39 Bus System

표 1 정상상태, 13-14선로 탈락 후와 5-6선로 및 13-14선로 탈락 후의 조류 흐름

Table 1 Power Flow normal states, 13-14 line outage and 13-14 line and 5-6 line outage

		Normal states	after 13-14 line outage	after 13-14, 5-6 line outage
From	To	P[MW]	P[MW]	P[MW]
13	14	334	0	0
5	6	532.4	822.1	0
6	7	436.1	481.6	1319.1
7	8	201.2	246.4	1074.2
6	11	306.6	639.8	639.8
10	11	312.6	617.4	617.5

그림 1은 IEEE 39 모선 시스템이다. 위 계통에서 13-14 선로의 탈락과 13-14 선로와 5-6 선로의 탈락을 가정하여 모의했고 표 1에 조류 변화가 많은 6개의 선로의 조류 흐름을 볼 수 있다. 이는 선로 13-14 선로의 정상상태 일 때 334[MW]의 조류가 선로 탈락 후 각 선로에 재분배되어 표 1에서 보여주는 3개의 선로(5-6, 6-11, 10-11)에 과조류 된 것을 볼 수 있다.

이는 크지 않은 조류가 흐르던 선로의 탈락이 계통의 일부분에 과부하를 일으킬 수 있는 요소가 된다. 또한 과조류를 일으킨 선로의 계전기 동작으로 5-6 선로의 2차 탈락을 하게 되면 또 다른 선로의 심각한 과조류가 발생함을 표 1에서 알 수 있다. 이러한 과조류는 또 다른 설비의 탈락을 유발하며 Cascading 현상을 일으킬 수 있다. 앞에서 언급했

던 실제 사례에서도 이러한 현상이 진행하였음을 알 수 있으며, 이를 시점으로 정전구간의 확산이 가중 되어 치명적 광역정전이 일어나게 되었다.

이처럼 계통의 일부분의 사고에 대한 설비의 탈락은 선로의 과조류를 일으키고 이에 대한 2차 탈락을 유발하여 Cascading 현상으로 발전하여 계통의 붕괴를 가져온다. 이러한 설비 탈락에 대한 과조류의 영향은 계통의 광역정전을 일으키는 요소임을 알 수 있다.

2.2.2 과조류와 취약도

본 연구에서는 계통의 위험을 조류의 영향에 맞춰 진행을 하였다. 이는 전력계통의 안정도 판단기준으로는 선로의 과부하정도, 전압의 크기 및 위상차, 전류의 크기, 주파수 등을 이용하여 그 영향정도를 산출할 수 있다. 하지만 과조류에 의한 후비 보호용 계전기의 오동작 확률이 증가하게 되며 과조류 선로의 탈락 시 큰 유효전력이 타 선로로 유입되므로 타 선로의 과조류 발생확률이 커지게 된다. 선로의 중요도를 대표한다고 할 수 있으며 과조류시 선로의 열화로 인한 고장발생확률이 커지고, 이는 다시 선로의 탈락으로 이어짐으로 유효전력의 중요성이 기타 수치에 비하여 그 중요도가 매우 높다 하겠다. 광역정전 실제 사례에서도 과조류 영향으로 선로의 늘어짐 현상이나 후비 보호계전기의 동작을 유발 시켜 광역정전으로 진행함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 유효전력에 대한 취약도 평가 방법을 제안하였다.

취약도를 자세히 설명하면 계통의 사고 시 설비의 일부분이 탈락을 하고 이후 탈락된 설비에 흐르던 조류가 재분배되어 계통의 과부하를 일으키게 되는 정도와 과부하로 인한 2차 탈락에 대한 영향까지 고려하여 산출이 된다. 따라서 취약도는 직접적인 영향인 과조류와 간접적인 영향인 2차 탈락에 대한 영향까지 고려하여 실제 광역정전의 진행에서 치명적 영향을 끼치는 Cascading 현상에 대한 취약도 평가 알고리즘을 제안한다. 이렇게 구해진 각 선로에 대한 취약도는 해당 선로가 탈락 하게 되면 탈락된 선로에 대한 계통의 취약정도를 나타내고 이는 취약도가 높을 수록 해당 선로의 탈락이 전체 계통에 미치는 영향이 크다 할 수 있다.

본 연구에서 제안된 취약도 평가 방법은 계통의 구성에 대한 정보와 감시시스템에서 실시간 계측된 조류량에 대한 취약도 뿐만 아니라 실제 사고 후 탈락 설비에 대한 계통 변경 후의 조류량을 이용하여 취약도를 구하게 되어 계통의 위험 상황을 운영자에게 빠르게 전달하여 계통 운영을 위해 이용될 것이다.

3. 광역정전에 대한 설비 취약도 평가 방법

본 논문에서는 유효전력의 중요도를 고려하여 LODF (Line Outage Distribution Factor)를 유효전력 예측 지수로 이용 하고 실시간 데이터로 실시간 유효전력을 고려한 설비 취약도 산출을 하였다.

3.1. LODF(Line Outage Distribution Factor)

LODF(Line Outage Distribution Factor)는 민감도 지수 (Sensitivity Factor)의 일부로 계통의 구성에 따라 정해지며

이를 이용하여 선로의 유효전력을 데이터를 기반으로 하여 선로 탈락에 대한 조류예측이 가능하다[13]. 다시 말해 LODF(Line Outage Distribution Factor)는 선로탈락에 대한 조류 재분배 후의 다른 선로의 조류 변화 정도를 나타내는 지수이다.

3.1.1. 정상상태 계통의 LODF

정상상태 계통의 LODF(Line Outage Distribution Factor)는 계통의 구성 정보와 임피던스 정보에 의해 X행렬이 정해지면 LODF는 구할 수 있다.

$$d_{l,k} = \frac{x_k (X_{in} - X_{jm} - X_{im} + X_{jm})}{x_k - (X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm})} \tag{1}$$

- x_k : 선로 k의 리액턴스
- X_{ab} : a,b번 X matrix 요소
- i, j : 선로 l에 연결된 버스 number
- m, n : 선로 k에 연결된 버스 number

식(1)은 l선로에 대한 k선로의 LODF를 나타내는 식으로 계통의 구성 정보와 임피던스 정보에 의해 식(1)과 같이 구한다.

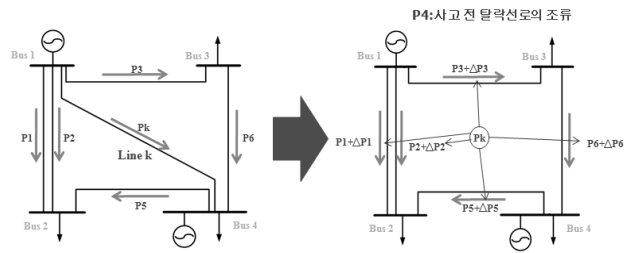


그림 2 선로 탈락에 의한 조류 재분배
Fig. 2 Power Flow Transfers after line outage

그림 2는 시스템에서 한 개의 선로가 탈락 했을 때 탈락된 선로의 조류가 각 선로에 재분배되어 흐른다는 것을 보인다. LODF는 탈락된 선로의 현재 조류량을 이용하여 탈락 후 각 선로의 조류량을 예측 할 수 있다.

$$\Delta P_l = d_{l,k} P_k \tag{2}$$

$$\hat{P}_l = P_l + \Delta P_l = P_l + d_{l,k} P_k \tag{3}$$

- \hat{P}_l : 선로 탈락 후 l선로의 조류량
- P_l : 선로 탈락 전 l선로의 조류량
- ΔP_l : 선로 탈락 전과 후의 l선로의 조류량 차이
- $d_{l,k}$: k선로에 대한 l선로의 LODF

식(2)은 k선로의 탈락에 대한 l선로의 조류량 변화를 LODF를 이용하여 구하는 식이다. 이를 이용하면 식(3)과 같이 l선로의 현재 조류량을 이용하여 k선로의 탈락 후 l선로의 조류량을 구할 수 있다.

LODF(Line Outage Distribution Factor)와 실시간 조류량을 알고 있으면 선로 탈락에 대한 계통의 조류량을 예측 할 수 있다.

3.1.2. 선로 탈락 후 계통의 LODF

계통의 구성이 변화하게 되면 LODF(Line Outage Distribution Factor)는 계통 구성에 따라 X행렬이 변하게 된다. 이는 X행렬을 다시 구해야 하는 번거로움이 발생한다. 하지만 계통 일부분이 탈락할 때 X행렬을 간편하게 구할 수 있다.

$$X_{kl}^{new} = X_{kl} - \frac{(X_{ik} - X_{jk})(X_{il} - X_{jl})}{(x_{ij} + X_{ii} + X_{jj} + 2X_{ij})} \quad (4)$$

- x_{ij} : 모선 i와 모선 j 사이의 선로 리액턴스
- X_{ab} : a,b번 X matrix 요소
- X_{kl}^{new} : 모선 i와 모선 j 사이의 선로 탈락 후 k,l번 X matrix 요소

식(4)는 계통의 선로가 탈락한 후 새로운 X행렬 요소를 구하는 식으로 이를 통해 각 새로운 X행렬을 구하여 식(1)을 이용하여 선로 탈락 후의 LODF를 구하게 된다. 이는 새로운 X행렬을 구하는데 계산 소요 시간을 줄여 실시간 취약도 산출을 위해 꼭 필요한 과정이다.

이를 이용하면 1차 선로 탈락 뿐 아니라 1차 선로 탈락 후 다시 2차 선로 탈락에 대한 조류 예측을 가능하게 한다.

3.2. 설비 취약도 지수

계통의 위험도를 산출하기 위해서는 전압, 전류, 주파수 등의 여러 가지 요소를 고려해야 한다. 하지만 본 논문에서는 앞에서 설명했던 것과 같이 유효전력의 영향이 크므로 유효전력만을 고려하여 설비 취약도를 산출 하였다. 이는 선로의 과조류가 계전기 동작에 영향을 줄 뿐 아니라 과조류 선로의 탈락 시 큰 유효전력이 타 선로에 유입되므로 타 선로의 과조류 발생확률이 커지게 됨으로 유효전력이 선로의 중요도를 대표한다고 할 수 있다.

- w_1 : 선로의 탈락률
- w_2 : 선로의 과부하률
- w_3 : 선로의 2차영향지수
- P_{max} : 선로 조류 한계량
- P_{nm} : n모선과 m모선 사이 선로의 조류량

$$w_1 = \begin{cases} 0 & : 0.8 \cdot P_{max} < P_{nm} \\ \frac{5 \cdot P_{nm}}{P_{max}} - 4 & : 0.8 \cdot P_{max} < P_{nm} < P_{max} \\ 1 & : P_{nm} < P_{max} \end{cases} \quad (5)$$

본 연구에서의 설비 취약도는 선로의 탈락 가능성을 전제 하에 유효전력의 변화에 대한 계통의 영향 정도를 나타낸다. 이는 각 선로의 과부하 정도에 따라 선로의 탈락확률과 영향이 다르다. 이에 본 논문에서는 식(5)와 같이 선로에 흐르는 조류가 선로의 한계량(P_{max})보다 크면 탈락확률을 1로 정하였고, 80%이상 선로의 한계량(P_{max})이하에서는 1~0사이 값을 갖게 되고, 80%이하에서는 탈락확률이 0으로 정하여 계산하였다. 이는 조류량에 의해 탈락확률을 1~0 사이 값을 갖게 하여 적용하였다.

$$w_2 = \frac{P_{nm}}{P_{max}} \quad (6)$$

선로의 과조류 정도는 현재 조류량의 위험정도를 나타내는 지수로 조류가 많이 흐르면 그에 비례하여 선로 탈락시의 영향 정도도 증가한다. 식(6)과 같이 계산하여 과조류 정도를 고려하였다.

$$w_3 = \sum_{p=1}^k \frac{P_{pq}}{P_{max}} \quad (7)$$

선로 탈락에 따른 영향 정도는 선로의 탈락에 대한 타 선로의 2차 영향 정도를 나타내는 지수로 선로가 탈락 할 경우 타 선로들의 과조류 정도로 나타내고 식(7)와 같이 계산하였다.

$$EF_{nm} = w_1 \cdot w_2 \cdot w_3 \quad (8)$$

- i, j, n, m : Bus Number
- EF_{nm} : nm선로의 영향도

위에서 설명한 3가지의 요소를 이용하여 n모선과 m모선 사이의 선로 영향도(EF_{nm})를 식(8)을 이용하여 구할 수 있다. 이 영향도 탈락률(w_1), 과부하률(w_2), 2차 영향지수(w_3)의 곱으로 구할 수 있어 2차 영향지수까지 고려하였다.

$$VI_{ij} = \sum_{n=1}^k \sum_{m=1}^k E_{nm} \quad (9)$$

- i, j, n, m : Bus Number
- k : Total Bus Number
- EF_{nm} : nm선로의 영향도
- VI_{ij} : ij선로의 취약도

모선 i와 모선 j사이의 선로의 취약도 지수는 해당 선로의 영향도(EF_{nm})의 모든 합으로 구한다. 식(9)는 영향도로부터 취약도를 구하는 식을 표현한 것이다. 이를 이용해 각 선로의 취약도를 구할 수 있다.

3.3. 실시간 데이터를 이용한 설비 취약도 산출 방법

본 논문은 계통의 구성 정보와 전력IT 기술을 이용한 시간 동기화된 실시간 광역감시에 적용을 위해 설비 취약도 평가를 연구했다. 그림 3은 실시간 데이터를 이용한 취약도 알고리즘의 총 구성도를 나타낸다. LODF를 이용하여 실시간 조류 데이터에 따른 위험도를 산출하여 계산하였다.

또한 이렇게 구한 취약도는 표준화를 위해서 모든 취약도의 평균을 구하고 이를 이용하여 규격화 하였다. 식(13)은 규격화한 취약도를 나타낸다. 본 논문에서는 이렇게 구해진 취약도의 위험기준을 5이하에서는 안정, 5~10은 경고, 10이상에서는 위험으로 정하였다. 이는 5이상일 때 대상선로의 탈락 이후 대개 2개 정도의 설비에 과부하가 생기고 10이상일 때 4개 설비에 과부하가 생기게 된다. 하지만 취약도는 그 자체에 수치로 위험정도를 나타내므로 전력계통의 운영자에 의해 위험정도를 정하여 운영을 하여야 한다.

이와 같이 제안된 알고리즘을 이용하여 취약도를 구하고 다시 표준화된 취약도를 구하였다. 이러한 표준화된 취약도는 계통의 2차적 영향을 고려하여 계통 운영에 맞는 위험을 운영자에게 인지 시켜주는 역할을 하고 이에 대해 계통의 운영적 측면 뿐 아니라 계통의 사고 시 제어 조치에 대한 방향을 제시 할 수 있을 것이다.

4. 사례 연구

본 연구에서는 사례연구를 그림 4와 같이 계통 모의로 PSSE 시뮬레이션으로 진행하였다.

그림 5의 계통은 한국의 PSSE 모의 데이터를 이용하여 취약도 지수 연구를 위해 345kV 전압레벨 이상의 설비에 대해 수도권 지역을 중심으로 재구성한 모의 계통이다. 각 데이터와 구성은 2008년 전국 PSSE 데이터를 이용하였고 조류의 흐름을 비슷하게 만들기 위해 발전기 데이터와 부하 데이터를 수정하여 2008년 조류 데이터와 비슷하게 만들었다.

4.1 사례 연구 시나리오

시뮬레이션은 두 가지로 진행을 하였다. 첫 번째는 LODF의 신뢰성을 검증하기 위해 PSSE의 모의 시스템의 선로를 탈락 했을 때의 조류 데이터와 LODF를 이용한 조류 예측 데이터를 비교하여 오차를 계산하였다. 이는 취약도를 구하기 위하여 LODF의 신뢰성이 보장되어야 하기 때문이다. 그리하여 LODF를 이용한 예측 데이터를 시뮬레이션 데이터와 비교 분석하였다.

두 번째는 설비 취약도를 정상상태일 때와 주요선로인 아산3-화성3 선로 탈락했을 때 취약도를 비교 하였다. 이는 정상상태의 취약도와 큰 조류가 흐르는 선로의 탈락의 경우 취약도를 비교 분석하여 계통의 상태에 따라 취약도의 의미를 확인할 수 있다.

4.2 LODF를 이용한 조류예측 결과

본 논문은 설비 취약도를 구하기 위해 LODF를 이용하였다. 본 사례연구는 LODF에 대한 검증을 위해 주요 선로 중 한 개 선로 탈락일 때 LODF 지수를 이용한 조류 예측 결과와 PSSE를 이용한 조류 결과의 오차를 분석하고 또한 취약도를 구하는 알고리즘에서 2차 영향지수를 구하기 위해서는 두 개의 선로 탈락에 대한 조류량도 예측 가능해야하기 때문에 두 개 선로의 탈락 일 때의 LODF를 이용한 조류 예측 결과와 PSSE 조류 결과도 분석을 하였다.

표 2 한 개 선로 탈락 시 LODF를 이용한 조류 예측 결과와 PSSE 시뮬레이션 결과 비교

Table 2 Predicting Active Power by LODF and PSSE simulation result after one line outage

Outage Line							최대 오차(%)
아산3-화성3	대상선로	신가평7-신태백7	미금3-동서울3	신안성7-신안성3	신은양3-청양3	보령-아산3	
	Power by LODF[MW]	1485.4	29.3	1373.2	867.7	143.0	
	Power by PSSE[MW]	1493.7	37.6	1364.0	876.6	127.1	
	오차(%)	0.40	0.40	0.44	0.43	0.77	0.77
신은양3-서서울3	대상선로	신태백7-신태백3					
	Power by SF[MW]	991.2					
	Power by PSSE[MW]	996.1					
	오차(%)	0.24					0.25
문지암3-신계천3	대상선로	신가평7-신가평3	신가평7-신태백7	신가평3-미금3	신태백7-신태백3	신태백3-울진	
	Power by SF[MW]	1120.2	1674.6	1073.9	1129.6	1121.4	
	Power by PSSE[MW]	1122.6	1678.1	1076.6	1133.3	1125.2	
	오차(%)	0.12	0.17	0.13	0.18	0.18	0.18

표 2은 한 개 선로 탈락에 대한 LODF를 이용한 유효전력 예측 결과와 PSSE 시뮬레이션을 이용한 유효전력과 오차를 비교 분석한 결과이다. 위 결과를 보면 모든 오차 계산의 기준을 최대 조류가 흐르는 신안성7-신서산7의 유효전력 2072[MW]을 기준으로 계산하였다.

표 3 두 개 선로 탈락 시 LODF를 이용한 조류 예측 결과와 PSSE 시뮬레이션 결과 비교

Table 3 Predicting Active Power by Sensitivity Factor and PSSE simulation result after one line outage

Outage Line							최대 오차(%)
아산3-화성3	대상선로	신가평7-신태백7	미금3-동서울3	신안성7-신안성3	신은양3-청양3	보령-아산3	
	Power by SF[MW]	1430.5	25.57	1373.2	867.7	143.0	
	Power by PSSE[MW]	1441.5	14.2	1363.9	876.9	126.7	
	오차(%)	0.53	0.55	0.45	0.45	0.79	0.79
신은양3-서서울3	대상선로	신안성7-신안성3	신안성7-신서산7	화성3-서서울3	아산3-화성3	아산3-신서산3	
	Power by SF[MW]	1373.2	2059.8	1285.7	1920.1	2498.6	
	Power by PSSE[MW]	1355.7	2033.5	1259.5	1891.5	2551.2	
	오차(%)	0.84	1.27	1.27	1.38	2.53	2.53

표 2의 분석 결과를 보면 PSSE 시뮬레이션 결과와 LODF를 이용한 예측된 유효전력의 결과 값의 오차는 1% 미만으로 한 개 선로의 탈락일 경우 LODF의 신뢰도는 검증이 되었다고 하겠다. 하지만 LODF는 선로의 2차 탈락도

고려해야 하므로 본 연구에서는 두 개의 선로 탈락일 때의 결과도 검증을 하였다.

표 3은 두 개 선로 탈락에 대한 LODF를 이용한 유효전력 예측 결과와 PSSE 시뮬레이션을 이용한 유효전력과 오차를 비교 분석한 결과이다. 대부분 1% 미만의 오차를 보인다. 하지만 신온양3-서서울3, 아산3-신서산3의 두 개 선로 탈락일 경우 1%이상의 오차를 보인다. 하지만 아산3-신서산3 선로의 경우 유효전력량을 보면 2500[MW]로 정상상태의 신안성7-신서산7 선로의 기준값 보다 높은 유효전력량을 보이고 있어 2.53%의 오차는 선로의 조류량에 비해 작다고 할 수 있다. 이에 취약도 지수 산출 과정의 LODF 이용이 가능하다고 하겠다.

4.3 취약도 산출 결과

본 논문의 취약도 사례연구는 정상상태일 때와 큰 조류가 흐르는 선로가 탈락 했을 때의 취약도를 구하여 비교 분석하였다.

표 4 정상상태와 아산3-화성3 선로 탈락 후 취약도 비교
Table 4 Vulnerability Index in normal states and one line outage

선로 및 설비	Active Power (normal state)	VI (normal state)	VI (아산3-화성3 outage)
아산3-화성3	1195.4 MW	0.97	5.20
청양3-신온양3	632.3 MW	0.92	2.13
아산3-신서산3	1249.3 MW	1.09	2.06
신안성7-신안성3	1373.2 MW	1.06	2.03
신가평7-신태백7	1485.4 MW	1.64	2.69
신서산7-신안성7	2059.8 MW	0.97	1.15
신태백7-신태백3	991.2 MW	1.10	2.13
신가평3-신가평7	982.5 MW	1.11	2.02

표 4은 정상상태와 아산3-화성3 선로 탈락 후의 9개의 선로의 취약도를 결과를 나타낸 표이다. 표를 보면 취약도는 정상상태일 때 거의 1에 가까운 값을 나타낸다. 하지만 아산3-화성3 선로 탈락 후의 취약도에서 2회선의 선로 중 나머지 아산3-화성3 선로의 취약도가 5.20가 되었다. 이는 2회선이던 선로 중 한 개 선로가 탈락 후 나머지 한 개 선로의 취약 정도가 높아졌음을 나타낸 것이다.

또한 정상상태일 때 취약도는 대부분 약 1정도의 취약도를 나타낸다. 하지만 아산3-화성3 선로의 탈락 후 청양3-신온양3, 아산3-신서산3 선로와 신가평7-신태백7 선로의 취약도가 2 이상의 값으로 나타났다. 이는 선로 탈락에 의해 각 선로의 취약 정도가 증가했다는 것을 알 수 있다. 하지만 본 논문에서 취약도가 5 이상일 때 경고를 나타내므로 아산3-화성3 선로를 제외하면 나머지 선로는 안정하다고 할 수

있다. 마지막으로 모의 계통을 보면 아산3-신서산3의 이중 선로에 의해 계통이 연결되어 있다. 이중 한 개의 선로가 탈락을 하게 되면 계통이 분리가 되면서 Islanding이 된다. 이는 계통을 불안정하게 하는 요소로 아산3-신서산3의 선로가 탈락 했을 때 나머지 선로의 취약도는 20이 되어 그 취약 정도를 위험수준으로 정했다.

4. 결 론

본 논문에서는 최근 15년간 빈번하게 발생하는 치명적 피해를 가져오는 광역정전 방지를 위하여 예측 불가능한 사고에 대한 설비 취약도 산출 알고리즘을 개발 하였다.

광역정전 사고는 초기 예기치 않은 사고에 의한 설비의 탈락 이후 조류 재분배 현상이 생기고 이에 대한 선로의 과조류가 발생하게 된다. 그 후 과조류 선로의 늘어짐 현상이나 과조류에 의한 계전기 동작과 같은 2차 사고가 발생하여 설비 탈락이 이루어지고 이후 계통의 붕괴하여 광역정전을 일으키게 된다. 이제 대해 전 세계적으로 광역정전에 대한 많은 연구가 진행 되어 지고 있다.

현재 국내에서 전력 IT분야의 발전으로 PMU를 개발 하여 실시간 시간 동기화된 데이터 취득이 가능해지고 계통 실시간 감시에 대한 연구가 진행이 되고 있다. 취약도 산출 알고리즘은 이러한 실시간 시간 동기화된 데이터를 이용한 알고리즘으로 계통의 불의 사고에 대한 직접적 영향뿐만 아니라 2차 영향까지 고려하여 취약도를 산출하여 계통의 위험정도를 알려 준다. 이는 광역정전의 큰 부분을 차지하는 과조류에 대한 설비 탈락을 감시하여 치명적 광역정전의 발생을 막을 수 있을 것이다.

본 연구에서 제시한 알고리즘을 검증하기 위하여 PSSE 시뮬링크를 이용하여 LODF에 대한 타당성과 취약도 결과를 비교하였으며, 결과대상은 계통의 사고가 없을 시 각각의 설비의 취약도와 큰 조류가 흐르는 선로 탈락 후 설비 취약도를 비교 분석 하였다. 이는 광역정전에 대한 계통 설비를 취약도를 이용하여 위험이 잠재되어 있는 설비의 점검이나 사고 발생시 운영자의 조치를 통한 대정전 방지를 가능하게 할 수 있음을 입증 하였다.

점차 전력계통은 산업의 발전함에 있어 복잡해지고 효율적 운영을 하기 위한 방향으로 변하고 있다. 이렇게 변하고 있는 전력계통은 적은 마진으로 운영이 되면서 광역정전에 대한 위험에 노출 되어 있다. 현재 전 세계적으로 광역정전 방지를 위한 노력들이 많아지고 있다. 국내에서도 실시간 계통 감시를 위한 WAMS라는 전력계통 감시 시스템 개발을 진행 하고 있다. 본 논문에서 제시한 알고리즘은 WAMS의 모니터링 시스템에 적용 되어 계통의 위험을 실시간으로 광역정전에 대한 위험을 진단하고 알려 줄 수 있는 역할을 해줄 것으로 기대하고 있다.

감사의 글

본 연구는 2단계 BK21 사업의 지원을 통해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] B.A. Carreras, V.E. Lynch, I. Dobson, D.E. Newman, "Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackout", Chaos, vol. 12, no. 4, December 2002, pp. 985-994.
- [2] P. Fairley. "The Inruly Power Grid", IEEE Spectrum. pp. 22-27, August 2004.
- [3] Gregory S. Vassell, Fellow, IEEE, "Northeast Blackout of 1965", IEEE Power Engineering Review, pp. 4-8, January 1991.
- [4] "NIGHT OF TERROR", TIME, pp. 24-26, July 25, 1977.
- [5] C. W. Taylor, "Improving Grid Behavior. IEEE Spectrum. June 1999. pp. 40-45.
- [6] J. Chen, J. S. Thorp and M. Parashar. "Analysis of Electric Power System Disturbance Data", Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Science, 2001.
- [7] A.G. Phadke and J.S. Thorp, "Expose Hidden Failure to Prevent Cascading Outages", IEEE Computer Application in Power, pp. 20-23, July 1996.
- [8] Seong-II Lim, Chen-Ching Liu, Seung-Jae Lee, Myeon-Song Choi and Seong-Jeong Rim. "Blocking of Zone 3 Relays to Prevent Cascaded Events", Power Systes. IEEE Transactions on Volume 23, pp. 747-754, May 2008.
- [9] Phadke, A.G and Thorp, J.S. "Expose hidden failures to prevent cascading outages in power systems", Computer Applications in Power. IEEE, pp 20-23, July 1996
- [10] David C. Elizondo, J. de la Ree, Arun G. Phadke and Stan Horowitz, "Hidden Failures in Protection System and their Impact on Wide-area Disturbances", IEEE, 2001. pp 710-714.
- [11] April 2000.U.S.-Canada Power System Outage Task Force, ""Final Report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada". <http://www.ferc.gov/>, April, 2004.
- [12] Carson W. Taylor, Bonneville Administration, "Improving Grid Behavior-The inglorious summer-of-1996 blackouts taught the west to improve emergency control and protection and to sharpen simulation techniques", IEEE SPECTRUM JUNE 1999, pp. 42-45.
- [13] Seong-II Lim, Han-Chuan Yuan, Seong-Jeong Rim, Seung-Jae Lee and Myeon-Song Choi "Adaptive Blinder for Distance Relay Based on Sensitivity Factors", IEEE 2006, pp. 22-26.

저 자 소 개



김진환 (金眞煥)

1980년 6월 30일생. 2008년 명지대학교 전기공학과 졸업(학사). 2010년 동 대학 전기공학과 졸업(석사)
 Tel : 031-335-2068
 Fax : 031-330-6816
 E-mail : jin60001374@mju.ac.kr



임일형 (林一亨)

1979년 4월 13일생. 2005년 명지대학교 전기공학과 졸업(학사). 2007년 동대학 전기공학과 졸업(석사). 2010년 동대학 전기공학과 졸업(공박)
 Tel : 031-336-3290
 E-mail : sojoo2jan@mju.ac.kr



이승재 (李承宰)

1955년 11월 30일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공박). 1994년 Univ. of Washington 교환 교수. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.
 Tel : 031-336-6362
 E-mail : sjlee@mju.ac.kr



최면송 (崔勉松)

1967년 4월생. 1989년 서울대 공대 전기 공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공박). 1995년 Pennsylvania State Univ. 방문 연구원. 1992년 기초전력공학 공동연구소 전임연구원. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.
 Tel : 031-336-3290
 E-mail : mschoi@mju.ac.kr



임 성 일 (林 星 日)

1967년 7월 10일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996-2001년 한국 전력공사 전력연구원. 2004년-2005년 명지대학교 차세대 전력기술 연구센터 연구교수 2006년 Iowa State University 방문 연구원. 현재 경남대학교 전기공학과 교수.

Tel : 055-249-2630

E-mail : slim@kyungnam.ac.kr



김 상 태 (金 尙 泰)

1971년 2월 15일생. 1996년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한전KDN(주) 전력IT연구원 송변전IT연구그룹 선임연구원. 대한전기학회 국제위원. 관심분야는 Synchro-Phasor기반 전력계통 감시 보호제어 기술, 디지털 보호계 전기 및 정정협조기술, 디지털 신호처리기술.

Tel : 031-420-0751

E-mail : jesteka@kdn.com



진 보 건 (陳 保 建)

1976년 9월 28일생. 2000년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한전KDN(주) 전력IT연구원 배전IT연구그룹 연구원. 관심분야는 배전 자동화, 디지털 보호계전기 및 정정협조기술, 분산전원 계통연계.

Tel : 031-420-0774

E-mail : sinato@kdn.com