변전소의 다중상태를 고려한 송전시스템의 내진 신뢰성 평가

Seismic Reliability Evaluation of Electric Power Transmission Systems Considering the Multi-state of Substations

고현무* 박영준** 박원석*** 조호현****

Koh, Hyun-Moo Park, Young Jun Park, Wonsuk Cho, HoHyun

The technique for the seismic reliability evaluation of the electric power network is presented. In the previous study, the state of the substations was represented by the bi-state which is classified as failure or survival. However, the bi-state model can result in oversimplified analysis, because substations are worked by the parallel operating system. In this paper, Considering the characteristics of the parallel operating system, the damage of the substation is expressed by the multi-state for the more realistic seismic reliability evaluation. Using Monte-Carlo simulation method, the seismic reliability for Korean 345kV electric power network is evaluated. Analysis results show that reliability levels of the network by the multi-state analysis is higher than that by the bi-state analysis and the electric power network in southeastern area of the Korean Peninsular may be vulnerable to earthquakes.

1. 서 론

사회 기간망으로서의 전력망의 중요성에 따라, 지진과 같은 자연 재해에 대한 전력망의 신뢰성 평가 연구가 이루어졌다[1],[2],[3]. 미국, 일본 등 강진지역을 중심으로 수행된 이러한 연구 가운데, 특히 변전소의 중요 기기들이 비교적 약한 지진에 대해서도 매우 취약하다는 연구 결과[4]는 상대적으로 중·약진 지역으로 분류되는 국내에서도 변전소 기기의 내진 보강 및 전체 전력망의 지진 신뢰성 평가에 대한 필요성을 증대시켰으며, 최근 이에 대한 연구가 이루어지고 있다[3]. 이 논문은 고현무 등의 국내 송전 시스템의 지진 신뢰성 평가 연구[5]를 확장하여 국내 전력망의 내진 신뢰성 평가 방법을 제시한다. 기존의 연구에서는 지진 하중에 대한 변전소의 상태를 파괴와 생존의 이중 상태(Bi-state)로 표현하여 신뢰성 평가를 수행하였다. 그러나 일반적으로 변전소는 다수의 변압기에 의해 병렬로 운전[5]되는 특성을 고려할 때, 이중상태에 의한 표현법은 다소 단순화된 모형일 수 있다. 따라서 이 연구에서는 변전소의 병렬운전 특성을 고려하여, 지진하중에 대한 변전소의 피해를 다중상태(Multi-state)로 표현하여 보다 현실적인 신뢰성 해석 방법을 제시한다.

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원
** 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 석사과정
*** Post doc., Department of Civil & Environmental Engineering, UC Berkeley
*** 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 박사과정

2. 전력계통 시스템의 내진 신뢰성 평가 방법

이 연구에서는 그림 1 과 같은 Monte-Carlo Simulation Method를 사용하여 전력망의 내진 신뢰성을 평가한다. 전력계통 시스템은 망 모형으로 모델링 된다. 공급절점은 수요절점으로 전력을 공급하는 발전소나 변전소로 나타내며, 수요절점은 변전소를 나타낸다. 각 노드를 연결하는 송전선로는 링크로 표현된다. 이 연구에서는 송전탑과 송전선에 비해 상대적으로 지진에 취약한 특성을 가지고 있는 변전소의 특성을 고려하여, 수요절점에서만 파괴가 발생한다고[3] 가정하였다.

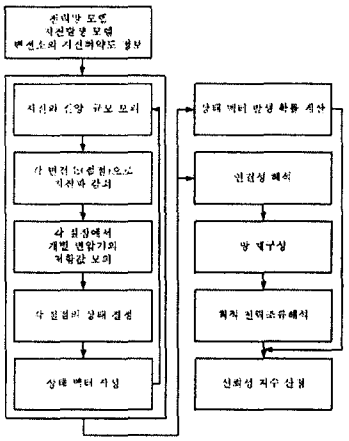


그림 1. 다중상태에 의한 신뢰성 평가 방법

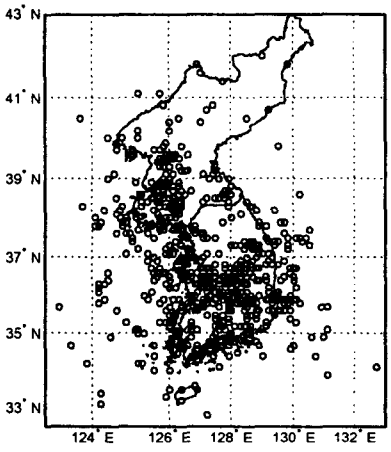


그림 2. 계기지진의 진앙지 분포

2.1 지진 발생 모델

전력망의 신뢰성 평가를 위해 사용되는 지진 모형은 최종적으로 PGA(Peak Ground Acceleration)값으로 표현된다. 이 연구에서는 지진 발생 모델로서 국내 지진의 공간 및 세기 분포를 고려하였다.

공간 분포를 위한 지진원 모델로서는 과거 지진활동이 그 지역 지진 활동을 완전하게 표현하며, 작은 지진의 분포로부터 큰 지진의 발생 가능 위치를 판단할 수 있다[6]는 가정 하에 1905년 이후의 계기지진 기록[7]과 1978년 이후의 기상청 지진 기록을 통해 그림 2와 같이 진앙지 분포를 모의하였다.

세기 분포는 지진 발생이 포아송 분포를 따른다고 가정하고, 지진 세기의 누적확률분포로서 식(1)과 같은 doubly truncated Gutenberg-Richter 관계식을 사용하였다[8].

$$F_I(m) = 1 - \frac{\exp(-\beta \cdot m) - \exp(-\beta \cdot m_{\max})}{\exp(-\beta \cdot m_{\min}) - \exp(-\beta \cdot m_{\max})} \qquad (1)$$

여기서, $\beta = b \cdot \ln 10$ 이고, b값은 지진 규모에 따른 발생 빈도를 나타내는 Gutenberg-Richter 관계식의 계수이다. $m_{\max}$, $m_{\min}$ 값은 한반도의 역사 및 계기지진 자료를 이용하여 통계적으로 추정된 값으로 각각 3과 7을 사용하였다[9],[10],[11],[12].

이로부터 공간과 세기가 모의된 지진은 각 변전소 위치까지 감쇠가 이루어지게 된다. 이 연구에서는 다음의 3가지 지진파 감쇠 모델을 사용하였다.

$$lnA = 0.40 + 1.2M - 0.76ln\triangle - 0.0094\triangle \quad (2)$$

$$A = 403.8 \times 10^{0.265M} \times (R+30)^{-1.218} \quad (3)$$

$$logA = -1.83 + 0.386M - logR - 0.0015R \quad (4)$$

식(2)는 Baag 등의 감쇠모델[13]이며, 식(3)은 Kawashima 등[14], 그리고 식(4)는 이기화와 조광현의 지진파 감쇠모델[15]이다. 여기서 A는 PGA이며, M은 진앙에서 발생한 지진의 규모이고, $\triangle$은 진원깊이를 10km로 가정한 진원거리(km)이고, R은 진앙거리(km)이다. 감쇠모델의 불확실성과 지역의 지질학적 특성 등의 요소들을 고려하기 위해, 지진파 감쇠를 식(2)~(4)의 평균치와 평균치의 10%에 해당하는 값을 표준편차로 한 정규분포로 가정하여 매 시행 시 각 변전소 위치에서의 PGA 값을 모의하여 변전소의 상태를 판단하는 데 사용하였다.

2.2 변압기의 병렬운전을 고려한 변전소 상태 결정

이 연구에서는 변압기가 변전소의 지진취약도 정보를 충분히 대표할 수 있다고[1),4)] 가정하고 변전소의 지진에 대한 상태 결정 과정에서 변압기의 지진취약도 정보만을 고려하였다. 일반적으로 변전소의 운용은 복수의 변압기를 사용하여 하나의 변압기 고장 시 나머지 변압기를 이용하여 전력을 부분적이나마 정상적으로 공급하여 전력공급의 지장이나 피해를 최소화하고, 신속한 복구가 가능하도록 한다[5]. 따라서 지진에 의한 변전소의 피해는 이와 같은 변압기의 병렬운전 방식을 고려한 다중상태로 표현하는 것이, 정상-파괴만으로 표현하는 이중상태보다 현실적이라고 할 수 있다. 변전소 내 각각의 변압기는 지진 발생 사건에 대한 각각의 생존여부가 상호 독립적으로 모의될 수 있으며, 지진에 의한 변전소의 피해 상태는 피해를 입지 않은 정상 상태의 용량을 P_{oc}, 피해시의 용량을 P_{dc} 라 할 때, 다음 식(5)와 같은 부하 분담율 P_{ratio}로 나타낼 수 있다.

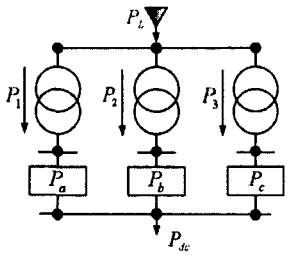


그림 3. 변압기 3대 운용 시 급전방식

$$P_{ratio} = \frac{P_{dc}}{P_{oc}} \quad (5)$$

이때 그림 3과 같이 3대의 변압기에 의해 운용되는 변전소의 피해시의 용량 P_{dc}는 다음 식 (6)과 같이 계산된다.

$$P_a + P_b + P_c = P_{dc} \quad (6)$$

여기서,

$$P_a = \frac{\%Z_2 \times P_1 + \%Z_3 \times P_1}{\%Z_1 \times P_2 + \%Z_1 \times P_3 + \%Z_2 \times P_1 + \%Z_2 \times P_3 + \%Z_3 \times P_1 + \%Z_3 \times P_2} \times P_L,$$

$$P_b = \frac{\%Z_1 \times P_2 + \%Z_3 \times P_2}{\%Z_1 \times P_2 + \%Z_1 \times P_3 + \%Z_2 \times P_1 + \%Z_2 \times P_3 + \%Z_3 \times P_1 + \%Z_3 \times P_2} \times P_L,$$

$$P_c = \frac{\%Z_1 \times P_3 + \%Z_2 \times P_3}{\%Z_1 \times P_2 + \%Z_1 \times P_3 + \%Z_2 \times P_1 + \%Z_2 \times P_3 + \%Z_3 \times P_1 + \%Z_3 \times P_2} \times P_L$$

이고, $\%Z$는 변압기에 정격전류가 흘렀을 때 변압기 자체 임피던스에 의한 전압 강하에 대한 2차 정격전압의

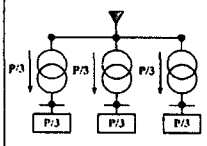
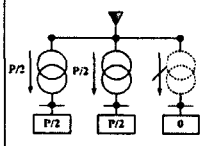
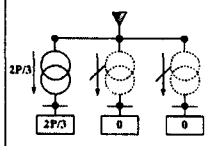
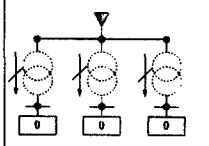
백분율을, P는 용량을 의미한다. 지진에 의하여 변압기가 피해를 입었을 경우에는 위의 부하분담식에서 피해를 입은 변압기의 $\%Z$와 P는 zero가 된다. 일반적으로 변압기의 부하 분담 가능 전력량은 정상 상태 시 부하분담 전력량의 2배로 설계되며, 이 연구에서는 전력설비 권고기준에 따라 각 변압기는 전력량을 균등하게 나누어 부하를 분담한다고 가정하였고[16]. 표1의 자료를 토대로 변전소 당 변압기의 대수를 3대로 가정하였다.

표 1. 송전계통별 총 변전소 및 변압기 수[17]

구분 / 전압	무인 변전소	유인변전소	스위치 야드	합계	변압기 대수
345kV	45	·	20	65	128
154kV	140	287	22	449	1,329

변전소 내에서 변압기가 3대가 운용될 때, 변압기 파괴 상태에 따른 변전소의 부하 분담율을 표 2에 정리하였다.

표 2. 변전소 내 변압기 파괴에 따른 부하 분담율

상태	정상	1대 파괴	2대 파괴	모두 파괴
급전 방식				
변전소 내 변압기 생존율	1	2/3	1/3	0
부하 분담율	1	1	2/3	0

한편, 변압기의 지진에 대한 저항력 모의의 편의를 위하여 변압기의 지진취약도 곡선을 μ=ln(0.085), σ=0.42인 lognormal누적확률분포함수로 가정하였다.[4]

2.3 연결성 해석 및 최적전력조류 해석

이중상태에서는 변전소가 파괴되었다면, 파괴된 변전소를 중심으로 모든 공급절점과 수요절점과의 연결이 차단된다. 마찬가지로 다중상태에서도 변전소가 완전히 파괴된다면, 파괴된 변전소를 중심으로 모든 공급절점과 수요절점과의 연결이 차단된다. 하지만, 이중상태 해석에서는 변전소 용량을 모두 표현하는 하나의 변압기가 파괴되면 변전소는 그 기능을 발휘하지 못하는 파괴상태로 간주하지만, 다중상태에서는 병렬로 운전되는 변압기의 특성상 변전소 내의 변압기가 모두 파괴되었을 때에만 변전소가 파괴되었다고 간주하고 연결성 해석을 시행한다. 또한 다중상태에서는 부하 분담율에 따라 변전소의 부하용량이 달라지며, 이는 최적 전력 조류 해석에 영향을 미친다. 이 연구에서는 직류 계산법을 사용하여 최적 전력 조류 해석을 수행하였다[3],[18].

3. 국내 전력계통 시스템의 내진 신뢰성 해석

개발된 신뢰성 해석 방법을 사용하여, 국내 전력계통 시스템에 대한 내진 신뢰성 해석을 수행 하였다. 국내 전력계통 시스템은 345kV 초고압 계통을 중심으로 하여, 154, 66, 22 또는 22.9kV 계통이 전국을 담당하는 송전망을 형성하고 있다. 이 연구에서는 국내 송전망의 근간이 되는 345kV 초고압 송전계통에 대하여 내진 신뢰성 평가를 수행하였다(그림4). 345kV 초고압 송전계통은 15개의 발전소, 45개의 변전소, 77개의 송전선로로 구성되어 있으며, 발전소의 총 발전용량은 30,936MW, 변전소의 총 부하용량은 24,430MW 이다. 그림 1과 같이 몬테카를로 방법을 사용하여 해석을 수행하였으며, 총 200,000회의 모의실험을 수행하였다. 이 연구에서는 수요절점인 변전소의 신뢰성 지수와, 망 전체의 신뢰성 지수를 사용하여 전력망의 신뢰성 평가를 수행하였다.

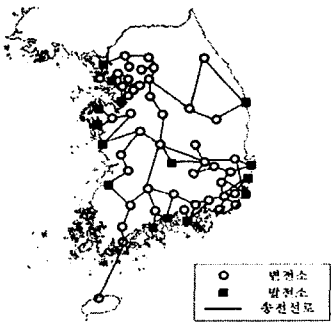
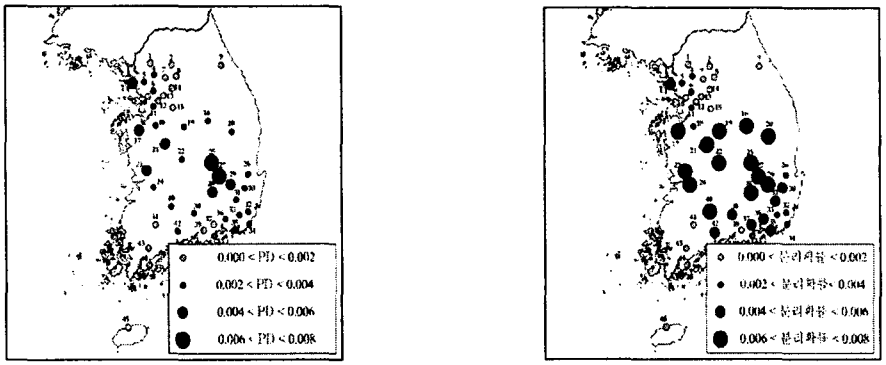


그림 4. 국내 345[kV] 초고압 송전계통

3.1 수요절점 신뢰성 지수

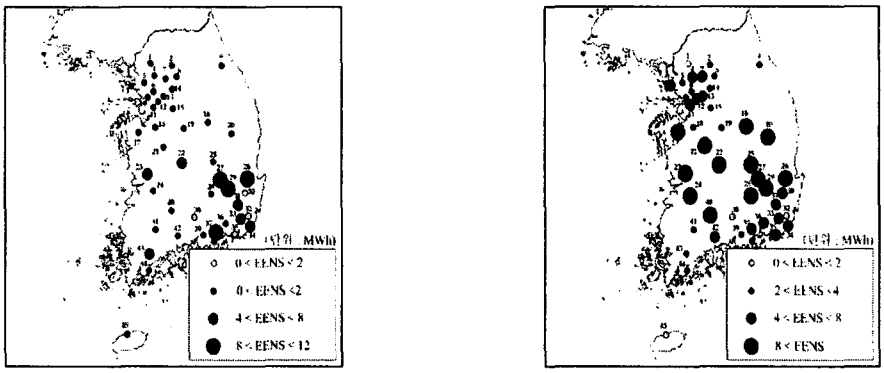
부하분담 지장확률(PD)은 이중상태에서의 분리확률과 유사한 신뢰성 지수이다. 이중상태에서의 분리확률은 수요절점이 어떠한 공급절점과 연결되지 않거나, 혹은 수요절점이 지진에 의해 파괴될 확률을 나타내었다. 하지만, 다중상태에서의 부하분담 지장확률은 수요절점이 어떠한 공급절점과 연결되지 않거나 수요절점인 변전소 내 변압기가 모두 파괴된 확률에 추가하여 변전소의 변압기의 부분적인 파괴에 의한 부하분담 지장까지 고려한 신뢰성 지수이다. 그림 5에 다중상태에서의 부하분담 지장확률과 이중상태에서의 분리확률을 나타내었다. 전반적인 분포는 비슷하게 나타나고 있으나, 이중상태에서 분리확률이 비교적 크게 나왔던 중부 및 중서부 지역의 경우 다중상태에서는 낮은 부하부담 지장확률을 보임으로써, 예상한 바와 같이 이중상태 해석이 보다 보수적인 결과를 내고 있음을 확인할 수 있다.



(a) (b)

그림 5. (a)다중상태에서의 부하분담 지장확률 (b)이중상태에서의 분리확률

공급지장 전력량 기대치(EENS : Expected Energy Not Supplied)는 지진에 의해 피해를 입지 않은 원래 상태에서의 전력량과 지진에 의해 피해를 입은 상태에서 최적 전력조류해석을 통해 공급되는 전력량의 차이에 대한 기대치를 계산한 신뢰성 지수이다. 그림 6에 다중상태에서의 공급지장 전력량 기대치와 이중상태에서의 공급지장 전력량의 기대치를 나타내었다. 부하분담 지장 확률의 해석 결과와 마찬가지로 전반적으로 이중 상태 보다 낮은 지수의 공급지장 전력량을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 다중상태에 의한 변전소의 부분 운용 결과가 해석에 반영된 결과로 생각할 수 있다.



(a) (b)

그림 6. (a)다중상태에서의 공급지장 전력량 기대치 (b)이중상태에서의 공급지장 전력량 기대치

그림 5와 6에 나타낸 수요절점의 신뢰성 해석 결과에서, 다중상태와 이중상태 모두에서 영남지역의 내진 신뢰성이 비교적 낮은 것으로 평가되었다. 이 같은 결과는 해석에 사용된 진앙지 분포의 특성 및 망 자체의 연결 특성에 따른 것으로 판단된다. 진앙지 분포의 경우, 과거 역사지진에 있어서 큰 지진이 발생했던 단층대가 영남지역에 분포되어 있다는 것을 생각할 수 있으며, 망 자체의 연결 특성은 망의 기하학적 연결 상태에 의해 특정 절점들이 피해에 의해 쉽게 고립될 수 있는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 두 가지 중에서 어느 것이 더 지배적인 요소인지는 밝힐 수 없었으며, 각 변전소 변압기의 지진 취약도가 모두 동일하게 가정되었다는 점도 좀 더 신중한 해석 결과의 판단을 위해 간과되어서는 안 될 점으로 생각된다.

3.2 망 신뢰성 지수

망 전체의 신뢰성을 나타낼 수 있는 지표중 하나인 성능상태 지수 q 는 식(7)과 같이 전력계통 시스템의 정상적인 전력공급량에 대해 각 모의 시행에서의 전력공급량의 비로 전체 시스템의 상태를 정의한 신뢰성 지수이다.

$$q^{(k)} = \frac{\sum_{i \in NC} \left[PD_i^{(k)} \cdot H\left(\alpha - \left| \frac{PD_{oc,i} - PD_i^{(k)}}{PD_{oc,i}} \right| \right) \right]}{\sum_{i \in NC} PD_{oc,i}} \qquad (7)$$

여기서 NC는 수요 절점의 집합을 나타내며, $PD_{oc.i}$ 는 재해를 입지 않은 상태에서의 i절점의 공급전력을, $PD_i^{(k)}$는 k번째 모의 시행에서 i절점의 공급전력을 나타낸다. 식(7)에서 사용된 H함수는 step function이다. 여기서, a=0.3으로 하여 절점으로의 공급전력이 그 변전소의 최대 부하의 70% 미만이면 전력 공급이 이루어지지 않는다고 보았다. q=1은 시스템이 전혀 손상을 입지 않아 정상적인 전력공급 상태를 나타내며 q=0은 시스템이 완전히 파괴되어 전력공급이 차단된 상태를 나타낸다.

공급지장 지수 γ 는 전력계통 시스템에서 전력의 공급지장에 대한 척도로서 다음 식(8)과 같은 지수로 정의된다. 이는 각 절점에서의 복구 시간이 1시간으로 동일하다는 가정 하에 연간 최대공급가능 전력량에 대한 공급지장 전력량의 기대치의 비를 나타낸다.

$$\gamma = \frac{\sum_{i \in NC} EENS_i}{\sum_{i \in NC} PD_{i,\,peak} \times 8760} \tag{8}$$

따라서, 각 절점에서의 피해 복구 시간이 동일하다면 지진 재해로 인한 피해 복구 시간이 늘어남에 따라 γ값은 복구시간에 비례하여 증가하게 된다. 즉, 지수 γ의 값은 피해 복구 시간에 좌우된다. 시스템 전체에서의 신뢰성 지수에 대한 해석 결과를 표 3에 정리하였다

표 3. 시스템 전체에서의 신뢰성 지수

구분	성능상태 지수	공급지장 지수
다중상태	0.9988	5.9810e-7
이중상태	0.9989	2.0322e-6

표 3의 결과에서 확인 할 수 있듯이, 망 전체의 신뢰성 해석에 있어서도 다중상태 해석의 경우가 이중상태보다 높은 신뢰성을 보임을 알 수 있었다. 성능상태 지수의 경우 매우 다중상태를 고려한 경우가 약간 높은 신뢰성을 보이는 것으로 평가되었다. 공급지장 지수는 다중상태의 해석에서 5.9810e-7의 신뢰성 지수를 보였는데, MRBTS에 대한 상시운용 시의 공급지장 지수[20] 1.7498e-4와 비교하면 각 변전소에서의 지진에 의한 피해 복구 시간이 12.2일을 초과하면 지진 재해로 인한 공급지장 지수가 상시운용 상태의 값과 비슷한 수준에 이르는 것을 알 수 있다. 이 결과는 이중상태를 통해 계산된 공급지장 지수 2.0322e-6, 즉 복구 시간이 3.5일을 초과하면 상시운용 시의 공급지장 지수와 동일하다는 결과와 비교하면 약 3.5배 정도 차이가 나는 값으로서, 변전소의 부분적인 운용이 망 전체의 공급지장 전력량을 줄이는 데에 기여한 것으로 보인다.

4. 결론

기존의 연구에 변압기의 병렬운전과 부하분담 효과를 표현할 수 있는 변전소의 다중 상태를 고려한 내진 신뢰성 평가를 수행방법을 개발하였다. 국내 345[kV] 초고압 송전계통 시스템에 대한 신뢰성 해석 결과, 부분적인 변전소 운용이 해석에 반영됨에 따라, 전반적으로 이중상태에서의 해석 결과에 비하여 신뢰성을 좀 더 높게 평가하는 결과를 나타내었다. 수요 절점의 신뢰성 해석의 경우, 이중상태의 결과에서는 수요절점에서의 신뢰성 지수에서 영남지역과 충청지역의 차이를 나타내기가 힘든 반면, 다중상태에 의한 해석을 통해 영남지역의 전력망이 보다 낮은 수준의 내진 신뢰성을 보임을 확인하였다.

그러나 국내 각 변전소의 변압기의 수에 대한 정확한 정보, 국내 변전소에 대하여 계산된 지진 취약도 모형과 파괴 유형별 복구 시간에 대한 정보가 추가되어야만 더 정확한 평가가 가능할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. Shinozuka, M., Cheng, T.C., Feng, Mario Q., Mau, S.T., "Seismic Performance Analysis of Electric Power Systems", MCEER/NSF, 2000.
2. Vanzi, I., "Seismic Reliability of Electric Power Networks: Methodology and Application," Structural Safety, Vol.18, No.4, 1996, pp.311-327.
3. 고현무, 김영호, 박원석, "지진 재해에 대한 전력 송전 네트워크 시스템의 신뢰성 평가 모형", 한국지진공학회 논문집, Vol.7, No.2, 2003 pp.93-102.
4. Hwang, H.H.M. and Huo, J.R., "Seismic Fragility Analysis of Equipment and Structures in a Memphis Electric Substation", Technical Report NCEER-95-0014, The University of Memphis, 1995.
5. 남시복, 홍일선, 송영복, 신태현, 윤성도, "발변전공학, 광문각", 2000, pp.273-418.
6. Kafka, A.L. and Levin, S.L., "Does the spatial distribution of smaller earthquakes delineate areas where larger earthquake are likely to occur", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.90, No.3, 2000, pp.724-738
7. 이기화, Catalog of Korean Instrumental Earthquakes, 2002.
8. Cosentino, P., Ficarra, P., and Luzio, D., "Truncated exponential frequency-magnitude relationship in earthquake statistics", Bull. Seism. Soc. Am, Vol.67, No.6, 1977, pp.1615-1623.
9. Lee, K. and Jung, H.Q., "A study of instrumental earthquake data of the Korean Peninsular", Journal of the Geological Society of Korea, Vol.16, 1980, pp.32-45.
10. 이기화, 김정기, "한반도 주요 지체구조별 지진학적 특성", 추계 한국지진공학회 학술발표대회 논문집, 1999, pp.64-71.
11. 신진수, 강익범, 김근영, "KSRS 관측자료에 의한 b값 평가", 추계 한국지진공학회 학술발표대회 논문집, 2001, pp.28-34.
12. 이기화, "한반도의 최대지진", 춘계 한국지진공학회 학술발표대회 논문집, 2001, pp.41-50.
13. Baag, C.E., Chang, S.J., Jo, N.D., and Shin, J.S., "Evaluation of seismic hazard in the southern part of Korea", 2nd International Symposium on Seismic Hazards and Ground Motion in the Regional of Moderate Seismicity, 1998, pp.31-50.
14. Kawashima, K. Aizawa, K., and Takahashi, K., "Attenuation of peak ground motions and absolute acceleration response spectra", Report of PWRI, Vol.166, 1995, p.106.
15. 이기화, 조광현, "Sino-Korea Craton에서 최대수평가속도의 감쇠", 추계 한국지진공학회 학술발표대회 논문집, 2002, pp.3-10.
16. 이강완, 강용철, "조류계산을 이용한 변압기 병렬운전 검토(1)", 한국전력기술인협회, 제228권, 2001.
17. 한국전력공사, http://www.kepco.co.kr/kepco_plaza/a/a3/html/a3_01.html
18. 송길영, "신편 전력계통공학, 동일출판사", 1998.
19. Bath, M. Introduction to Seismology, Birkhäuser Verlag, Basel and Stuttgart. 1973.
20. 최재석, "송전계통망의 신뢰도 평가", 전기학회지, 제50권, 제3호, 2001, pp.15-23.
21. Ang, A.H.-S., Pires, J.A., and Villaverde, R., "A Model for the Seismic Reliability Assessment of Electric Power Transmission Systems", Reliability Engineering and System Safety, Vol.51, 1996, pp.7-22.