

중약진 지역에서의 전력송전시스템의 지진재해 신뢰성 평가 Seismic Reliability Evaluation of Electric Power Transmission Systems in Low and Moderate Seismicity Regions

고현무* 김영호** 박원석***
Koh, Hyun-Moo Kim, Youngho Park, Wonsuk

ABSTRACT

A technique for the seismic reliability evaluation of electric power transmission systems(EPTS) adapted to ground motion characteristics of Korea has been developed to evaluate reliability indices corresponding to the whole system and to each node within. A network model with nodes and links for EPTS has been established, and a seismic substation-fragility curve obtained from seismic fragilities of power system facilities has been derived. A point source model, the doubly truncated Gutenberg-Richter relationship, and earthquake intensity attenuation formula have been applied to simulate seismic events. Using Monte-Carlo simulation method, the seismic reliability of EPTS is evaluated and, it appeared that seismic effect on EPTS in low and moderate seismicity regions has to be considered.

1. 서 론

전력의 안정적 공급에 대한 중요성과 전력 공급의 요구량의 증가에 따라 전력계통 시스템은 일반적으로 높은 효율성과 신뢰성이 요구된다. 전력계통 시스템은 상시 운용시 각 계통 기기의 고장 등으로 인한 문제 발생의 가능성을 항상 지니고 있으므로, 이에 대한 신뢰도 평가 및 향상에 대한 연구가 이루어져 왔다[Billinton and Li,1994]. 최근에는 사회기간망으로서 수십 년 이상 운용되는 전력망의 중요도를 고려하여, 이러한 상시운용상태 뿐만 아니라 지진과 같은 자연 재해에 대한 전력망의 신뢰성 연구의 필요성이 점차 증가하고 있다. 실례로 미국 California 주와 일본, 터키 등에서 발생한 대형 지진은 전력계통 시스템에 막대한 피해를 입혔으며[Goltz(1994),Shinozuka(1995)], 이들 강진 지역을 중심으로 하여 전력계통 시스템 중 지진피해의 손상이 집중된 송전계통의 지진 신뢰성 평가 연구가 수행되었다[Ang et al(1996),Vanzi(1996)]. 또한 일반적으로 전력 시설 구조물 및 기기는 0.05g 미만의 약한 지진력에 대해서도 손상을 입을 수 있음이 알려졌다[Hwang and Huo,1998]. 따라서, 이 연구에서는 중·약진 지역인 국내의 지진 특성을 고려하여 국내 전력송전

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원
** 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 석사과정
*** 서울대학교 공학연구소 연구원, 공학박사

시스템의 지진재해 신뢰성 평가 기법을 개발하고 전력송전시스템의 성능에 미치는 지진의 영향을 분석하였다.

2. 전력송전시스템의 지진재해 신뢰성 평가 방법

중·약진 지역에서의 전력송전시스템의 지진재해 신뢰성 평가를 위한 방법으로서 Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 사용하였는데, 이는 지진 사건의 발생의 불확실성과 지진에 대한 전력 시설 구조물 및 기기의 저항력의 확률적 분포를 용이하게 고려하여 망 해석을 수행할 수 있기 때문이다. 전력송전시스템의 지진재해 신뢰성 평가를 위해서는 다음과 같은 전력송전시스템의 망 모형과 모의 시행 단계에서 시스템의 상태를 결정하기 위한 지진 발생 모델과 시스템을 구성하고 있는 변전소의 지진취약도 정보를 필요로 한다.

2.1 전력송전시스템의 망 모형

전력송전시스템은 발전소와 변전소, 그리고 송전탑과 송전선으로 구성된다. 이러한 시스템은 공급절점과 수요절점, 그리고 이들을 연결하는 링크를 갖는 망으로 나타낼 수 있다[Ang et al(1996), Vanzi(1996)]. 공급절점은 수요절점으로 전력을 공급하는 발전소나 변전소를 나타내며, 수요절점은 변전소나 변전소의 모선 등을 나타낸다. 각각의 노드를 연결하여 주는 송전선이나 기타의 장치는 링크로 표현된다. 이 연구에서는 송전탑과 송전선에 비해 상대적으로 지진에 취약한 특성을 가지고 있는 변전소의 특성을 고려하여, 수요절점에서만 파괴가 발생한다고 가정하였다.

2.2 지진 발생 모델

전력송전시스템의 신뢰성 평가를 위해 사용되는 지진 모형은 최종적으로 PGA값으로 표현되어 지진 발생 시 각 절점(변전소)의 지진취약도 곡선으로부터 파괴 여부를 결정하게 된다. 이 연구에서는 지진 발생 모델로서 국내 지진의 공간 및 세기 분포를 고려하였다. 공간 분포를 위한 지진원 모델로서는 과거 지진활동이 그 지역 지진 활동을 완전하게 표현한다는 전제하에 그림 1에 나타낸 1905년 이후의 계기지진 기록[이기화,2002]과 1978년 이후의 기상청 지진 기록의 진앙지 분포의 점 지진원(point source)을 사용하였다. 이는 작은 지진의 분포가 큰 지진의 발생 가능 위치를 나타내 주기 때문이다[Kafka and Levin,2000].

지진 발생이 random process가 아니지만 이를 예측할 수 있는 결정론적인 방법이 없으므로 확률론적 분석을 위하여 지진 발생이 Poisson 분포를 따른다고 가정하고, 지진 세기의 누적확률분포로서 다음과 같은 doubly truncated Gutenberg-Richter 관계식을 사용하였다[Cosentino et al(1977)].

$$F_A(i) = 1 - \frac{\exp(-\beta \cdot i) - \exp(-\beta \cdot i_{\max})}{\exp(-\beta \cdot i_{\min}) - \exp(-\beta \cdot i_{\max})} \quad (1)$$

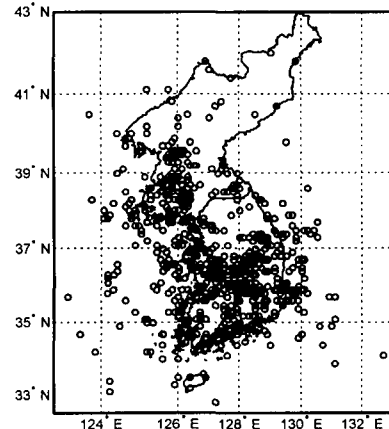


그림 1. 계기지진의 진앙지 분포

여기서 $\beta = b \cdot \ln 10$ 이다. 이 식에서 b 값과 i_{max} 값은 한반도의 역사 및 계기지진 자료를 이용하여 통계적으로 추정된 값을 사용하였다[이기화,김정기,1999].

한편, 진앙지와 변전소의 거리를 고려하여 다음과 같은 지진파의 감쇠 모형을 사용하였다 [Lee,1984]. 각 절점에서의 지진 세기 I 는 다음의 식 (2)에서와 같이 계산할 수 있고,

$$I = I_0 + 0.191 - 0.834 \ln R - 0.0068R \quad (2)$$

여기서 I_0 는 진앙지점에서의 지진 세기이고, R 은 진원거리이다. 각 절점에서의 PGA 값은 다음 변환식으로부터 구할 수 있다[Trifunac and Brady,1975].

$$\log a = 0.14 + 0.30I \quad IV < I < X \quad (3)$$

모의된 지진 사건에 대해 각 절점에 작용하는 PGA와 변전소의 지진취약도 곡선으로부터 각 절점의 상태(fail or survival)를 결정할 수 있고 이로부터 각 모의 사건에 대한 시스템의 상태 벡터를 구할 수 있다.

2.3 변전소의 지진취약도 해석

절점의 상태를 결정하기 위해 필요한 변전소의 지진취약도는 그 구성기기와 구조물들의 지진에 대한 취약도에 의해 좌우되는데, 변전소의 구성기기와 구조물들의 파괴가 독립시행이라고 가정하면 변전소의 지진취약도는 다음과 같이 계산할 수 있다[Ang et al(1996),Vanzi(1996)].

$$F_Z = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_{Z_i}] \quad (4)$$

여기서 F_Z 는 누적확률분포로서 표현되는 변전소의 지진취약도이며 F_{Z_i} 는 변전소 구성 요소의 개별적인 지진취약도이다. 변전소 구성 요소의 개별적인 지진취약도 해석은 실제 지진 피해 자료를 이용하거나 실험 또는 해석적인 방법을 통하여 이루어진다. 이 연구에서는 Huo and Hwang(1998)이 중·약진 지역이라고 할 수 있는 美 Tennessee 州의 Memphis市에 위치하고 있는 Substation 21 변전소의 구성기기와 구조물에 대해 해석적인 방법으로 구한 지진취약도를 이용하였고, 변전소의 지진에 대한 저항력 모의의 편의를 위하여 그림 2와 같이 식 (4)의 지진취약도 곡선을 $\mu = \ln(0.0803)$, $\sigma = 0.3241$ 인 lognormal 누적확률분포함수로 가정하였다.

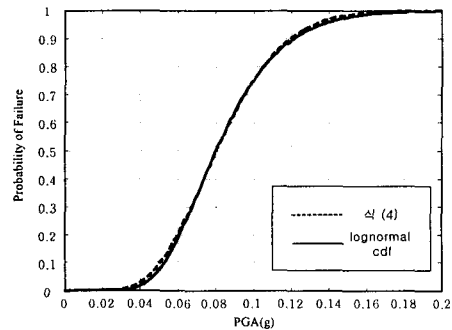


그림 2. 변전소의 지진취약도 곡선

2.4 최적 전력조류 해석

지진으로 인해 절점의 파괴는 전력송전시스템의 계통 변화를 유발시키고 변화된 전력송전시스템은 각 수요절점으로 최적의 전력 분배가 이루어져야 한다. 이러한 최적의 전력 분배 하에서 각 수요절점에 도달하는 최대가능 전력을 산정하기 위해서는 전력조류 해석에 대한 최적화 문제를 구성하게 된다.

이 연구에서는 중요한 부하는 가능한 한 차단하지 않고 전 계통의 부하차단을 최소로 함을 목적함수로 설정하였는데 다음 식과 같이 표현할 수 있다[Billinton and Li(1994),최재석(2001)].

$$\min \sum_{i \in NC} \left[W_i \sum_{j=1}^{MS} \beta_j (PD_{ij, peak} - PD_{ij}) \right] \quad (5)$$

여기서 NC 는 수요 절점의 집합이고 MS 는 부하 종류의 개수, W 는 절점의 가중치, β 는 부하 종류의 가중치를 나타낸다. 또한 PD 는 수요 절점에 도달하는 부하이며 PD_{peak} 은 최대부하이다. 선로에 흐르는 전력 조류 벡터는 다음과 같이 직류 조류 해석으로써 구할 수 있다.

$$\{T\} = [A] (\{PG\} - \{PD\}) \quad (6)$$

여기서 $\{T\}$ 는 선로조류벡터이며 $\{PG\}$, $\{PD\}$ 는 각각 발전량 벡터와 부하 벡터이다. 행렬 $[A]$ 의 m 번째 열, $[A]_m$, 은 다음과 같이 계산되어진다.

$$[A]_m = \frac{[Z]_i - [Z]_j}{X_{ij}} \quad (7)$$

여기서 X_{ij} 는 모선 i 와 j 간의 선로의 리액턴스(reactance)이며 $[Z]_i$ 와 $[Z]_j$ 는 각각 행렬 모선 임피던스(impedance) 행렬 $[Z]$ 의 i 와 j 번째 열이다.

제약조건으로는 발전량에 대한 제약, 송전선로의 용량 조건, 부하의 한계에 대한 조건이 있는데, 임의의 주어진 계통 상태에 대해서 이러한 제약조건들을 만족하면서 식(5)을 최소화하는 각 수요 절점의 공급부하전력 PD_i 와 선로조류량 T_{ij} 등을 선형계획법을 이용하여 구할 수 있다.

이와 같은 최적 전력조류 해석을 수행하면 지진 재해로 인해 유발된 전력송전시스템의 계통 변화에 대해 시스템의 각 절점으로의 전력공급에 대한 상태를 파악할 수 있다.

3. 전력송전시스템의 지진재해 신뢰성 평가 결과 및 분석

그림 3과 같이 15개의 공급절점과 45개의 수요절점 그리고 77개의 링크로 모델링한 국내 345kV 송전시스템을 대상으로 하여 지진재해 신뢰성 평가를 수행하였다. 이 연구에서 대상으로 한 전력 송전시스템의 공급절점의 총 발전용량은 30,936MW이고 수요절점 최대부하의 합은 24,430MW이다. 이 연구에서는 확률론적 지진재해 신뢰성 평가를 위해 지진발생 모델과 변전소의 지진취약도 정보를 이용하여 그림4와 같은 Monte-Carlo 법을 구성하였다.

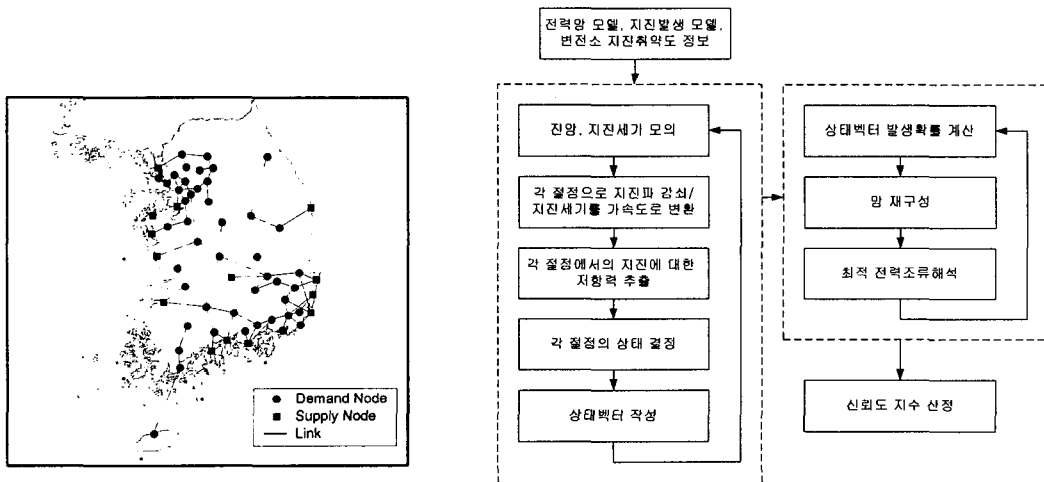


그림 3 국내 345kV 송전계통 시스템의 모델링

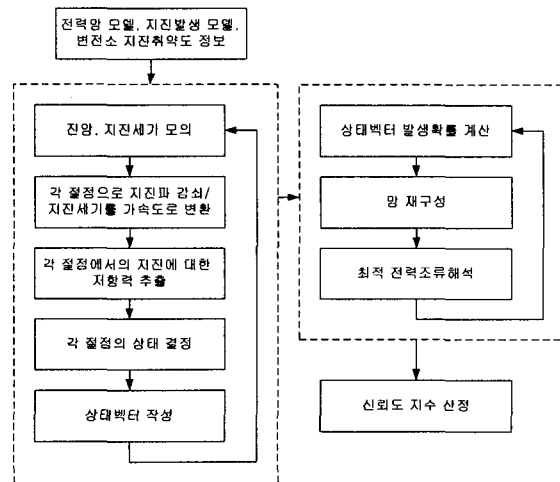


그림 4 지진재해 신뢰성 평가를 위한 흐름도

그림 4의 흐름도에 나타난 전력송전시스템의 지진재해 신뢰성 평가는 다음과 같은 순서로 진행된다.

- i) 계기 지진의 진앙지 분포로부터 임의의 진앙을 모의하고 지진 세기의 분포함수로부터 진앙에서의 지진 세기 I_0 를 모의한다. 진앙 오차는 $0.25^\circ \sim 0.5^\circ$ 의 범위로 추정됨이 알려졌다는데 [Bath(1973)] 이 연구에서는 이 오차 범위 내에서 임의로 진앙을 모의하였다.
- ii) 감쇠 공식을 이용하여 각 수요 절점에서의 I_i 를 계산한다. 지진 세기와 가속도의 변환 공식을 이용하여 각 수요 절점에서의 최대지반가속도 R_i 를 구한다.
- iii) 변전소의 지진취약도 함수로부터 각 수요 절점에서의 지진에 대한 저항력 Z_i 를 모의한다.
- iv) 각 수요 절점에서의 상태를 판단하여 시스템의 상태벡터 $S = \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_n\}$ 를 구한다. 이 때, 절점 i 에서 $R_i \geq Z_i$ 이면 파괴상태이며 $S_i = 1$ 로 설정한다.
- v) i)단계부터 iv)단계까지 충분한 횟수만큼 시행한다. 이 연구에서는 총 100,000 번의 모의실험을 시행하였다.
- vi) 각 상태벡터에 대해서 발생 확률을 계산하고 파괴된 절점을 제거하여 새로운 망을 구성한다.
- vii) 새로이 구성된 망에 대해서 전력조류해석을 수행한다. 이 때 분리된 망이 존재하면 각 망에 대해서 해석을 수행한다.
- viii) 신뢰도 지수를 산정한다.

위와 같은 순서로 전력송전 시스템의 지진 신뢰성 평가를 수행하여 각 절점에서의 신뢰도 지수와 시스템 전체의 신뢰도 지수를 구하였고, 상시 운용 상태의 다른 모델의 신뢰도와 비교하였다.

3.1 각 절점에서의 신뢰도 지수

연결성 해석으로부터 각 수요 절점에서의 분리확률(probability of disconnectivity)을 계산하였다. 또한 절점에서 파괴 발생 시 복구 시간은 모든 절점에서 동일하다고 가정하고 복구 시간을 1 시간으로 하여 최적 전력조류해석을 통해 각 절점에서의 공급지장 전력량의 기대치(EENS: Expected Energy Not Supplied)를 계산하였다(그림5~7). 그림 6에서 보는 바와 같이 수도권 이남의 내륙 지방에서 지진 재해에 의한 수요 절점의 분리 확률이 다른 지역에 비해 높게 나타나고 있다. 이 연구에서 사용한 지진원 모델로서 계기지진의 진앙을 살펴보면 주로 수도권 이남의 내륙 지방에 집중하고 있음을 알 수 있다(그림1). 또한 이 연구의 지진 재해 신뢰성 평가는 각 변전소의 지진 취약도가 동일하다는 가정 하에 이루어졌다. 따라서 수도권 이남 내륙지방의 변전소들은 다른 지역의 변전소에 비해 상대적으로 많은 지진의 영향을 받으며 또한 수도권 이남 내륙지역에서의 전력망의 redundancy가 상대적으로 다른 지역에 비해 떨어지기 때문에 분리 확률이 더 높게 나타난 것으로 보인다. 그림 7에서는 각 절점의 공급지장 전력량의 기대치를 나타냈는데, 남부 지방에서 다른 지역에 비해 지진으로 인한 공급지장 전력량에 대한 기대치 값이 상대적으로 크게 나타나고 있다.

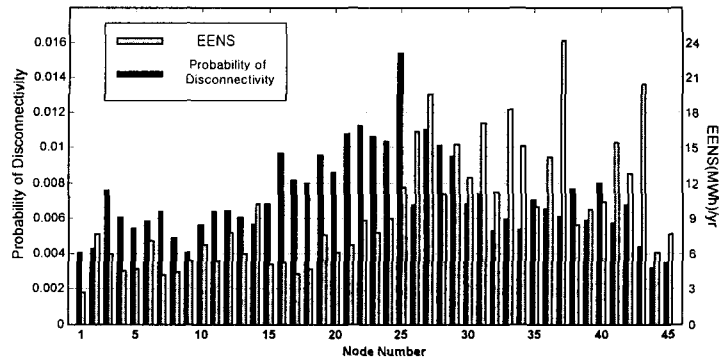


그림 5. 각 절점에서의 분리확률과 EENS

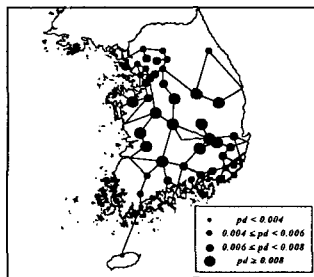


그림 6 각 절점에서의 분리확률

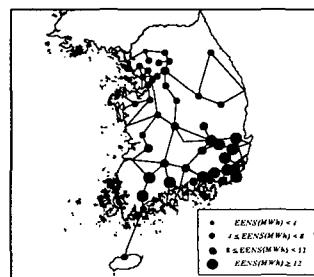


그림 7 각 절점에서의 EENS

3.2 전체 송전시스템의 신뢰도 지수

지진재해에 의해 전력송전시스템이 손상을 입게 되면 각 절점으로의 원활한 전력 공급이 이루어지지 않는다. 전력송전시스템의 전체적인 상태는 각 절점으로의 전력 공급 상황에 따라 결정될 수 있으므로 다음 식(8)과 같이 시스템의 정상적인 전력공급량에 대해 각 모의 시행에서의 전력공급량의 비로 전력송전시스템의 전체적인 상태를 정의하였다.

$$q^{(k)} = \frac{\sum_{i \in NC} \left[PD_i^{(k)} \cdot H \left(\alpha - \left| \frac{PD_{oc,i} - PD_i^{(k)}}{PD_{oc,i}} \right| \right) \right]}{\sum_{i \in NC} PD_{oc,i}} \quad (8)$$

여기서 NC 는 수요 절점의 집합을 나타내며 $PD_{oc,i}$ 는 재해를 입지 않은 상태에서의 i 절점의 공급전력 [MW]이며 $PD_i^{(k)}$ 는 k 번째 모의 시행에서 i 절점의 공급전력[MW]이다. $H()$ 는 Heaviside function 으로, $\alpha=0.3$ 으로 하여 절점으로의 공급전력이 그 절점의 최대부하량의 70%미만이면 전력 공급이 이루어지지 않는 것으로 하였다. 이 때 시스템의 상태 지수 q 의 누적확률분포는 다음 그림 8과 같다. 지수 q 는 지진으로 인한 시스템의 전력공급 상태를 나타내는데 $q=1$ 은 시스템이 전혀 손상을 입지 않아 정

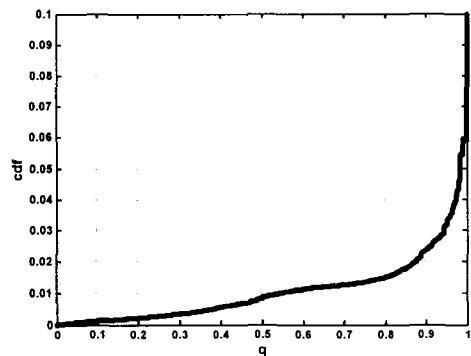


그림 8 상태 지수 q의 누적확률분포

상적인 전력공급 상태를 나타내며 $q=0$ 이면 시스템이 완전히 파괴되어 전력공급이 완전 두절된 상태이다.

3.3 지진 재해 신뢰성과 상시 운용 상태의 신뢰성 비교

전력송전시스템에서 전력의 공급지장에 대한 척도로서 다음 식 (9)와 같은 지수를 정의하였다. 이는 연간 최대로 공급이 가능한 전력량에 대한 공급지장 전력량의 기대치의 비를 나타내는 것으로 서로 다른 전력송전시스템의 신뢰성 비교에 사용될 수 있다.

$$\gamma = \frac{\sum_{i \in NC} EENS_i}{\sum_{i \in NC} PD_{i, beak} \times 8760} \quad (9)$$

각 절점에서의 복구 시간이 1시간으로 동일하다는 가정 하에 식 (9)의 γ 는 최대 $2.0332e-6$ 의 값을 보인다. 각 절점에서의 피해 복구 시간이 동일하다는 가정은 유효한 채로 지진 재해로 인한 피해 복구 시간이 늘어나면 식 (9)의 γ 값은 그에 비례하여 증가하게 된다. 즉, 지수 γ 의 값은 피해 복구 시간에 좌우된다. 이 연구에서는 절점에서의 상태만을 고려하지만, 상시 운용 상태의 신뢰도 평가는 송전선과 발전기의 상태 확률과 파괴 복구 시간을 고려하는 등 지진 신뢰성 평가와 상시 운용 신뢰성 평가는 모델과 평가 방법에 있어서 많은 차이를 보인다. 따라서 지진 신뢰도와 상시 운용 신뢰도의 직접적인 비교는 불가능하므로 식 (9)와 같은 지수를 이용하여 두 신뢰도를 비교하여 보았다. 이 연구에서의 γ 값을 최재석(2001)의 MRBTS에 대한 상시 운용 상태의 신뢰도 평가에서의 γ 값 $1.7498e-4$ 와 비교하여 보면 각 절점에서의 피해 복구 시간이 3.5일을 초과하면 지진 재해로 인한 γ 값이 상시 운용 상태의 값과 비슷한 수준이 됨을 알 수 있다. 실제 강진 지역에서의 지진 재해로 인한 전력 시스템의 피해 복구 시간이 최대 1주일 이상 소요된 사례가 있고 현재까지 국내의 전력 시설 구조물 및 기기에 대한 내진 설계가 이루어지지 않고 있음을 고려할 때, 중·약진 지역인 국내에서도 전력송전시스템에 대한 지진의 영향은 무시할 수 있는 수준이 아닌 것으로 판단된다.

4. 결론

전력송전시스템의 각 절점에서 분리확률, 공급지장 전력량의 기대치의 지수를 이용하여 지진재해에 대한 신뢰성 해석을 수행하였고, 지진에 의한 시스템 전체의 상태를 나타내는 상태 지수를 평가하였다. 전력송전시스템과 같이 망으로 모델링할 수 있는 시스템의 지진 신뢰도는 이 연구에서와 같이 시스템 전체의 신뢰도 지수뿐만 아니라 시스템의 구성 요소인 각 절점에서의 신뢰도 지수를 통해 평가된다. 이 연구에서는 시스템의 전체 신뢰도 지수로는 공급전력량비를 이용한 상태지수를 사용하였고, 절점 신뢰도 지수에는 분리확률과 공급지장 전력량의 기대치를 이용하였다.

절점 신뢰도 지수인 분리 확률과 공급지장 전력량의 기대치의 해석 결과, 국내 지진 분포 모형에 의해 수도권 이남의 내륙 지방에 위치한 변전소에 상대적으로 지진의 영향이 크게 미치며, 남부 지방의 변전소에서 전력공급지장이 발생할 가능성이 더 큰 것으로 나타났다. 시스템 신뢰도 지수인 상태 지수 q 는 지진위험계수에 따라 최소 0.979에서 최대 0.9947의 값을 나타내었다. 또한 다

른 시스템의 상시 운용 상태의 신뢰도와 간접적인 비교 결과, 국내와 같은 중·약진 지역에서의 전력송전시스템에 미치는 지진의 영향이 상당한 수준인 것으로 판단되었다.

이 연구에서는 각 절점에서의 지진에 의한 피해 복구 시간과 각 변전소의 지진취약도가 동일하다는 가정 하에서 지진 신뢰도가 평가되었는데, 국내 각 변전소의 지진취약도 모형과 파괴 유형별 복구 시간에 대한 정보를 사용한다면, 더 정밀한 평가가 가능할 것으로 기대된다.

이 연구는 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업의 일환으로 수행된 것입니다.

5. 참고문헌

1. 이기화, 김정기, "한반도 주요 지체구조별 지진학적 특성," 1999년도 추계 한국지진공학회 학술 발표회 논문집, 1999, pp.64-71.
2. 이기화, Catalog of Korean Instrumental Earthquakes, 2002.
3. 최재석, "송전계통망의 신뢰도 평가," 전기학회지, 제50권, 3호, 2001, pp.15-23.
4. 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-pp.22.
5. Bath, M, *Introduction to Seismology*, Birkhäuser Verlag, Basel and Stuttgart. 1973.
6. Billinton, R. and Li, W., *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*, Plenum Press, 1994.
7. 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.
8. Goltz, J.D., "The Northridge, California Earthquake of January 17, 1994: General Reconnaissance Report," Technical Report NCEER-94-0005, NCEER, 1994.
9. Hwang, H.H.M. and Huo, J.R., "Seismic Fragility Analysis of Electric Substation Equipment and Structures," *Prob. Engng. Mech.*, Vol. 13, No. 2, 1998, pp.107-116.
10. Kafka, A.L. and Levin, S.Z., "Does the spatial distribution of smaller earthquakes delineate areas where larger earthquakes are likely to occur?," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 90, No. 3, 2000, pp.724-738.
11. Lee, K.(1984), "A Study on Intensity Attenuation in the Korean Peninsula," *Jour. Geol. Soc. Korea*, Vol.20, pp.140-146.
12. Shinozuka, M., "The Hanshin-Awaji Earthquake of January 17, 1995 Performance of Lifelines," Technical Report NCEER-95-0015, NCEER, 1995.
13. Trifunac, M.D., and Brady, A.G., "On the Correlation of Seismic Intensity Scales with the Peaks of Recorded Strong Ground Motion," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.65, 1975, pp.139-162.
14. Vanzi, I., "Seismic Reliability of Electric Power Networks: Methodology and Application," *Structural Safety*, Vol. 18, No. 4, 1996, pp.311-327.