

지진 재해에 대한 전력 송전 네트워크 시스템의 신뢰성 평가 모형

A Model for Seismic Reliability Assessment of Electric Power Transmission Network System

고 현 무^{*} 김 영 호^{**} 박 원 석^{***}
Koh, Hyun Moo Kim, Young Ho Park, Won Suk

국문요약

지진 하중을 받는 전체 네트워크 시스템 및 네트워크 구성 절점에 대한 신뢰성 지수를 구할 수 있는 지진 재해 신뢰성 평가 방법을 전력 송전 네트워크 시스템을 대상으로 개발하였다. 전력 송전 시스템에 대하여 절점과 링크로 구성된 네트워크 모형을 개발하였으며, 절점인 변전소의 지진 취약도 곡선은 변전소 구성 기기의 개별 취약도 곡선으로부터 구하였다. 입력 지진 모형으로서 점 지진원 모형을 사용하였고, doubly truncated Gutenberg-Richter 관계식과 감쇠공식을 적용하였다. 몬테 카를로 시뮬레이션을 적용하여 전력 송전 네트워크 시스템의 신뢰성을 평가한 결과 한국의 전력망에 대한 지진 재해의 효과는 무시할 수 있는 수준은 아닌것으로 평가되었다.

주요어 : 지진 재해 신뢰성, 네트워크 시스템, 전력 송전 시스템, 몬테 카를로 방법

ABSTRACT

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

Key words : seismic reliability, network system, electric power transmission network, Monte-Carlo method

1. 서 론

전력의 안정적 공급에 대한 중요성과 전력 공급 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 신뢰성 평가 및 향상에 대한 연구가 이루어져 왔다.⁽¹⁾ 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 California의 Northridge 지진(1994)과 일본 Kobe 지진(1995), 대만 Chi-Chi 지진(1999), 터키 Izmit 지진(1999) 등의 최근 대형 지진의 경우에는, 변전소 등의 전력시설물들이 손상을 입을 수 일 동안의 정전사태가 발생함으로써 최고 23억 달러의 피해가 발생한 사례가 보고되었다.^{(2),(3)} 따라서 이들 강진 지역을 중심으로 하여 전력계통 시스템의 지진 신뢰성 평가 연구가 수행되었으며^{(4),(5)}, 이들 연구에 따르면, 발전, 송전, 배전으로 이루어지는 전력계통시스템 중에서 지진으로 인한 손상 및 피해는 주로 송전계통에 집중되어 있고, 또

한 일반적으로 송전계통의 전력 시설 구조물 및 기기는 PGA 0.05g 미만의 약한 지진력에 대해서도 손상을 입을 수 있음이 알려졌다.⁽⁶⁾ 국내에서는 최근에 이르러 전력계통 시스템의 내진 성능 연구에 대한 필요성이 인식되기 시작하여, 송·변전 기기들에 대한 내진설계에 대한 연구⁽⁷⁾, 전력계통 시스템에 대한 지진 신뢰성 평가 연구⁽⁸⁾ 등에 대한 초기 연구 결과들이 나오고 있다. 이 논문에서는 대규모의 네트워크 시스템에 적합한 지진 재해 신뢰성 평가 기법을 개발하였다. 전력송전 시스템의 신뢰성 평가에 적합한 다섯 가지의 신뢰성 지수를 제안하고, 국내의 345kV 송전시스템에 대하여 몬테카를로(Monte-Carlo) 시뮬레이션 방법을 통해 지수를 평가함으로써 국내 전력송전 시스템의 성능에 미치는 지진의 영향을 분석하였다.

2. 전력송전시스템의 지진 신뢰성 평가 방법

일반적인 신뢰성 해석 방법은 크게 일차신뢰성방법(FORM, first order reliability method), 이차신뢰성방법(SORM, second order reliability method) 등의 해석적 방법과, Monte-Carlo 방법과 같은 시뮬레이션 방법으로 크게 나눌 수 있는데, 전력 송전 시스템의 지진 신뢰성 평가를 위한 이 연구에서는 Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 사용하였다. 이는 지진에 의한 파괴에 의해 변화하는 복잡한 망 모형과, 그에 따른 전력량 흐름의 변화를 용이하게 고려하여 해석을 수행할 수 있기 때문이다. 또한 지진 사건의 발생의 확실성과 지진에 대한

* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수(대표저자 : khm@gong.snu.ac.kr)

** 서울대학교 지구환경시스템공학부, 석사

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사후 연구원

본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2003. 3. 26 / 심사종료일 : 2003. 4. 4)

전력 시설 구조물 및 기기의 저항력의 확률적 분포를 해석에 도입하는 것도 용이하다. 일반적으로 Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 사용하여 신뢰성 해석을 할 경우, 시뮬레이션의 실행횟수가 충분히 커야만 의미 있는 해를 얻을 수 있다. 따라서, 전력망과 같이 해석 대상 시스템이 방대하여 일회 시행 시 해석에 소요되는 시간이 클 경우 해석의 효율성이 떨어지게 된다. 전력계통 시스템의 경우, 지진에 의한 변전소의 파괴에 의해 망이 재구성되면, 이 때 망 전체에 흐르는 전력량을 전력조류해석을 통하여 구하여야 한다. 이 연구에서는 선형최적전력조류 해석 방법을 도입하여, 해석에 필요한 시간을 최소화하여 효율적인 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 하였다.

전력송전 시스템의 지진 신뢰성을 평가기 위한 신뢰성 지수로서, 전체 시스템에 대한 지수들과, 망을 구성하고 있는 변전소에서 평가되는 지수들을 함께 제안하였다. 전체 시스템에 대한 지수로서 성능상태지수(performance state index)와 전력공급지장지수(energy not supplied index)를 사용하였고, 변전소의 지진 신뢰성 지수로서 분리확률(probability of disconnectivity), 공급지장전력량의 기대치(expected energy not supplied)와 손상비용(damage cost)을 제시하였다.

3. 신뢰성 해석을 위한 전력송전 시스템 모형 및 지진 발생 모형

전력송전 시스템의 지진 신뢰성 평가를 위해서는 변전소의 지진취약도 정보와, 지진 발생 모형, 그리고 전력송전 시스템의 망 모형이 필요하다. 이 장에서는 이 논문에서 사용된 각 모형에 대하여 기술한다.

3.1 변전소의 지진취약도

지진에 의한 변전소의 상태(fail or survival)를 결정하기 위해 변전소의 지진취약도 정보를 사용하는데, 변전소의 지진취약도는 그 구성기기와 구조물들의 지진에 대한 취약도에 의해 좌우된다.

변전소 설비 자체는 일반적으로 그 진동 특성이 지진의 주진동구간을 벗어나 있고, 진동에 대한 내력이 크기 때문에 지진에 의한 설비 기기 자체의 피해는 빈번하지 않다.⁽⁷⁾ 그러나, 변전소의 지진 피해 사례로부터, 기기 자체의 손상보다는 설비 기기를 지지하거나 구성하는 연결요소의 파손으로 인해 기기의 파손이 유발되며, 결국 변전소가 지진에 취약한 면을 보임이 밝혀졌다.^{(2),(3)} 이러한 취약성을 유발하는 주 파괴 형태로는 기기의 활동(sliding)과 전도(overturning), 그리고 애자의 인장력에 의한 파손 등이 있다. 지진 시에 변압기(transformer)와 같은 기기가 활동이나 전도에 의해 파괴될 경우, 기기의 동적 거동은 탄성거동이라기 보다는 강체(rigid body)거동에 가깝게 된다. 따라서, 이러한 파괴 거동은 지진파의 주파수 성분 보다는 PGA(peak ground acceleration) 값에 의한 영향이 지배적이 된다. 그러므로, 변전소 설비 기기의 지진 취약도는 PGA값에 대한 파괴확률로서 나타낼 수 있다.

이 논문에서는 변전소의 구성기기와 구조물들의 파괴가 독립시행이라고 가정하고 n 개의 구성기기로 이루어지는 변전소의 지진취약도를 다음과 식 (1)과 같이 계산하였다.^{(4),(5)}

$$F_z = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_{z_i}] \quad (1)$$

여기서 F_z 는 누적확률분포로서 표현되는 변전소의 지진취약도이며 F_{z_i} 는 변전소 구성 요소의 개별적인 지진취약도이다. 구성 요소의 개별적인 지진취약도 F_{z_i} 는 실제 지진 피해 자료를 이용하거나 실험 또는 해석적인 방법을 통하여 구할 수 있다. 이 연구에서는 Hwang and Huo⁽⁶⁾가 중·약진 지역이라고 할 수 있는 美 Tennessee 州의 Memphis市에 위치하고 있는 Substation 21 변전소의 구성기기와 구조물에 대해 해석적인 방법으로 구한 그림 1의 지진취약도를 이용하여 식 (1)에 의해 변전소의 지진취약도를 먼저 구하였다. 그 다음, 변전소의 지진에 대한 저항력 모의의 편의를 위하여 식 (1)의 지진취약도 곡선을 그림 2와 같이 $\mu = \ln(0.0803)$,

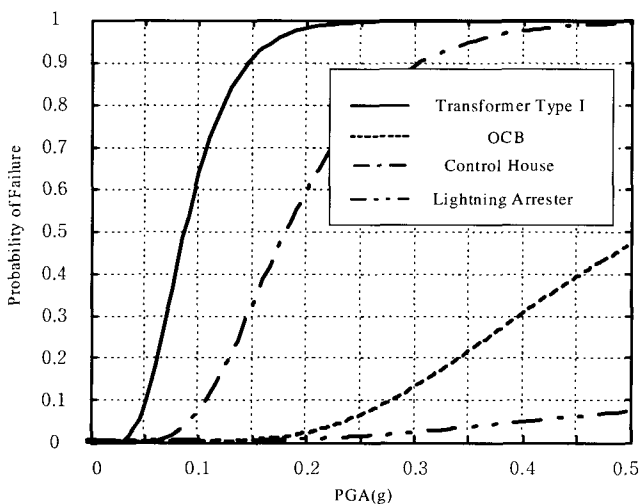


그림 1 변전소 기기들의 지진취약도 곡선

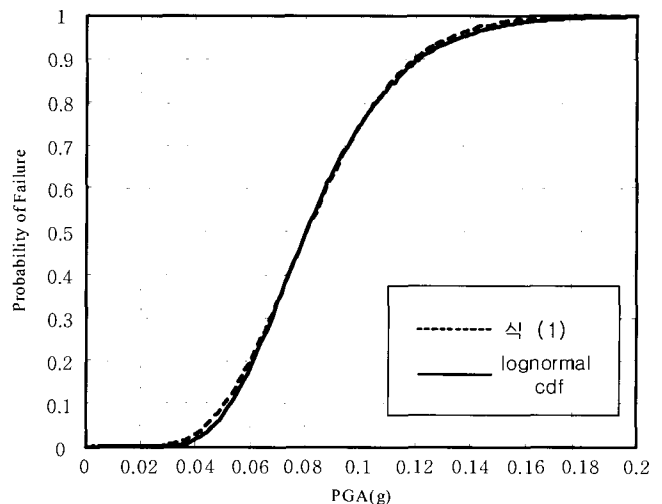


그림 2 변전소의 지진취약도 곡선

$\sigma=0.3241$ 인 lognormal 누적확률분포함수로 가정하였다. 그림 1에 나타난 변전소 구성 기기들의 지진취약도를 살펴 보면 변압기가 전도/활동에 대해서 가장 취약한 특성을 보이며, 이에 따라 변전소의 경우 PGA 0.1g의 지진력에 대해서도 파괴확률이 70% 이상으로 평가되어, 변전소는 중·약진 지역에서 지진에 대해 취약한 면을 보이는 것으로 나타났다.

3.2 지진 발생 모형

변전소의 지진 취약도는 입력 지진의 PGA에 대한 파괴확률로 표현되므로, 전력송전시스템의 신뢰성 평가를 위해 사용되는 지진 모형은 최종적으로 각 변전소 위치에서의 PGA 값으로 표현할 필요가 있다. 이 연구에서는 국내 지진의 공간 및 세기 분포를 고려하여 PGA값을 산출할 수 있는 지진 발생 모형을 사용하였다. 공간 분포를 위한 지진원 모형으로서 강진 지역에서의 연구에서는 고전적인 Cornell 모델과 면적 지진원(area source)을 사용한 바 있다.⁽⁵⁾ 국내에서는 원자력발전소의 확률론적 지진재해도 분석에서 지진원 모형을 사용하고 있지만, 연구마다 서로 다른 모형을 사용하고 있다. 이는 국내의 지진 기록의 불확실성과 자료의 부족으로 인해 지진원 모형에 대한 연구가 미비하기 때문이다. 따라서 이 연구에서는 과거 지진활동이 그 지역 지진 활동을 표현한다는 전제와 작은 지진의 분포로부터 큰 지진의 발생 가능 위치를 판단할 수 있다⁽⁹⁾는 가정하에 그림 3에 나타난 1905년 이후의 계기지진 기록⁽¹⁰⁾과 1978년 이후의 기상청 지진 기록의 진앙지 분포의 점 지진원(point source)을 사용하였다.

지진 발생이 random process가 아니지만 이를 예측할 수

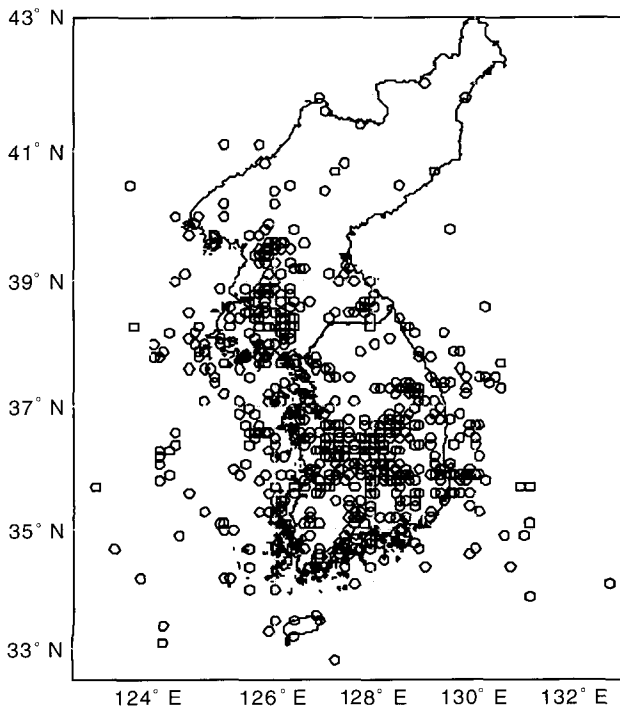


그림 3 계기지진의 진앙지 분포

있는 결정론적인 방법이 없으므로 확률론적 분석을 위하여 지진 발생이 Poisson 분포를 따른다고 가정하고, 지진 세기의 누적확률분포로서 다음과 같은 doubly truncated Gutenberg-Richter 관계식을 사용하였다.⁽¹¹⁾

$$F_M(m) = 1 - \frac{\exp(-\beta \cdot m) - \exp(-\beta \cdot m_{\max})}{\exp(-\beta \cdot m_{\min}) - \exp(-\beta \cdot m_{\max})} \quad (2)$$

여기서 $\beta = b \cdot \ln 10$ 이고, b 는 지진규모에 따른 발생 빈도수를 나타내는 Gutenberg-Richter 관계식의 계수이다. 또한 m_{\min} , m_{\max} 는 각각 발생할 수 있는 지진 규모의 최소값과 최대값이다. 국내에서는 통계적으로 처리할 수 있을 정도의 충분한 계기 지진 기록이 누적되어 있지 않기 때문에 정확한 b 값과 최대지진 m_{\max} 의 추정이 어렵다. Lee and Jung⁽¹²⁾이 1900년대 초에 관측된 63개의 지진자료를 분석하여 한반도에서의 b 값을 0.8 정도로 평가하였으며, 이기화와 김정기⁽¹³⁾는 역사 지진 자료와 계기 지진 자료를 이용하여 0.6 정도로 추정하였다. 그리고 신진수 등⁽¹⁴⁾은 1998년 9월부터 2002년 7월까지 KSRS 관측망에 기록된 약 7800여 개의 관측 기록으로부터 b 값을 0.9 정도로 평가하였다. 한반도의 최대지진은 이기화⁽¹⁵⁾가 대략 $m_{\max} = 7.0$ 으로 추정하였다.

이 논문에서는 최대지진을 7.0으로, 최소지진은 3.0으로 설정하고 0.6, 0.8, 0.9의 b 값들에 대해서 지진 규모의 누적확률분포를 구하였고, 이로부터 발생할 지진의 규모가 모의된다. 모의된 지진은 각 변전소 위치까지 감쇠가 이루어지게 되는데, 이 연구에서 사용된 지진파 감쇠는 다음의 세가지 모델을 이용하였다.

$$\ln A = 0.40 + 1.2M - 0.76 \ln \Delta - 0.0094\Delta \quad (3)$$

$$A = 403.8 \times 10^{0.265M} \times (R + 30)^{-1.218} \quad (4)$$

$$\log A = -1.83 + 0.386M - \log R - 0.0015R \quad (5)$$

식 (3)은 Baag 등⁽¹⁶⁾의 감쇠 공식이며, 식 (4)는 Kawashima 등⁽¹⁷⁾, 그리고 식 (5)는 이기화와 조광현⁽¹⁸⁾의 지진파 감쇠 모델이다. 여기서 A 는 PGA(cm/sec^2)이며 M 은 진앙에서 발생한 지진의 규모이며, Δ 은 진원깊이를 10km로 가정한 진원거리(km)이고 R 은 진앙거리(km)이다. 이 연구에서는 감쇠 모델의 불확실성과 지역의 지질학적 특성 등의 요소들을 고려하기 위해, 지진파 감쇠를 식 (3)~(5)로부터 계산된 PGA를 평균값으로 하고 평균값의 10%를 표준편차로 하는 정규분포(normal distribution)로 가정하여 매 시행 시 각 변전소 위치에서의 PGA 값을 모의하여 변전소의 상태를 판단하는데 사용하였다.

3.3 전력송전시스템의 망 모형과 망 해석

3.3.1 전력송전시스템의 망 모형

전력송전시스템은 발전소와 변전소, 그리고 송전탑과 송

전선으로 구성된다. 이러한 시스템은 공급 절점과 수요 절점, 그리고 이들을 연결하는 링크를 갖는 망으로 나타낼 수 있다.^{(4),(5)} 공급 절점은 수요 절점으로 전력을 공급하는 발전소나 변전소를 나타내며, 수요 절점은 변전소나 변전소의 모선 등을 나타낸다. 각각의 절점을 연결하여 주는 송전선이나 기타의 장치는 링크로 표현된다. 원자력발전소 등의 발전소에서는 내진설계가 충분히 이루어지고 있고, 전력송전시스템의 지진에 의한 피해 사례를 살펴보면 송전탑과 송전선에 비해 상대적으로 변전소가 지진에 취약한 특성을 보이므로 이 연구에서는 수요 절점에서만 파괴가 발생한다고 가정하였다.

여타의 라이프라인 시스템과 마찬가지로, 전력송전 시스템의 망 모형도 다음과 같은 두 종류의 망 해석을 수행한다. 첫 번째의 망 해석은 지진으로 인한 공급 절점과 수요 절점간의 연결관계를 파악하는 연결성 해석(connectivity analysis)이며 두 번째는 사용성 해석(serviceability analysis)으로 망 시스템의 개별 요소들의 파괴에 의한 계통 변화 시 시스템이 발휘할 수 있는 성능의 정도를 결정하는 것이다. 이 연구에서는 사용성 해석으로 최적 전력조류 해석을 수행하였다.

3.3.2 연결성 해석

수요 절점의 분리(disconnectivity)란 그 절점의 모든 공급 절점과의 연결이 끊김을 말한다. 망 모형에서 그래프의 연결성은 인접행렬(adjacency matrix) $A=[a_{ij}]$ 로써 나타낼 수 있다. 또한 절점간의 연결관계는 연결행렬(connectivity matrix) $C=[c_{ij}]$ 로써 판단할 수 있다. 연결행렬은 다음과 같이 인접행렬로부터 계산된다.

$$C = A + A^2 + \dots + A^n \quad (6)$$

여기서 n은 망 시스템의 총 절점 개수이며, 절점 i와 j가 서로 분리되어 있으면 $c_{ij} = 0$, 서로 연결되어 있으면 $c_{ij} \neq 0$ 이다.

이와 같은 연결성 해석을 수행하면 지진으로 인해 전력송전시스템이 피해를 입을 시 각 수요 절점의 공급 절점과의 연결 상태를 파악할 수 있고 이로부터 연결이 끊긴 절점을 제거하여 새로운 망을 재구성 할 수 있다.

3.3.3 사용성 해석 - 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. 전력조류 해석에는 교류해석법(AC load flow model)과 직류해석법(DC load flow model)이 있다. 교류해석법은 다음과 같은 전력방정식을 풀게 된다.

$$P_i + jQ_i = V_i \cdot \bar{I}_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n \bar{Y}_{ik} \cdot \bar{V}_k \quad (7)$$

여기서 P_i 와 Q_i 는 각각 모선 i에서의 유효 전력(active power)와 무효 전력(reactive power)를 나타내며, Y_{ik} 는 모선 i와 k를 연결하는 선로의 어드미턴스(admittance)이며, V_i 는 모선의 전압을 나타낸다. Upper bar는 공액(conjugate)를 의미한다.

식 (7)의 교류계산법에서는 모든 변수를 벡터로 취급하므로 계산을 통해 정확한 값을 알 수는 있으나 비선형 방정식을 풀어야 하므로 복잡하다. 따라서 계통이 커질수록 계산의 반복 횟수가 증대되고 계산 시간도 많이 필요하게 된다. 반면에 직류 조류 계산법은 비선형 전력방정식을 선형 모델로 근사화하여 개략적인 조류 값을 구하고자 하는 간편 계산법이다. 직류계산법은 선로의 유효 전력과 모선 전압의 위상각만을 근사적으로 구하기 때문에 그 해법과 취급이 용이하여 계통 계획 입안이라든지 상정 사고 해석시의 계통 상태 검사 등에 널리 이용되고 있다.

몬테 카를로 방법을 사용한 전력망 신뢰성 해석을 위해서는, 매 시행시마다 지진에 의한 절점의 상태 변화에 따라 망이 재 구성되고, 재 구성된 망에 대하여 최적 전력조류 해석을 수행해야 한다. 최적 전력조류 해석에는 전력방정식과 제한조건으로 이루어진 최적화 문제의 해를 구하여야 하므로, 망의 규모가 상대적으로 크고 몬테 카를로 방법과 같이 시행횟수가 많은 해석에서는 비선형 방정식의 교류계산법보다 선형의 방정식으로 이루어진 직류계산법이 적합하다. 따라서 이 연구에서는 다음과 같이 직류계산법에 선형계획법(linear programming)을 결합시켜 최적 전력조류 해석을 수행함으로써, 해석의 효율성을 높일 수 있도록 하였다.

먼저 중요한 부하는 가능한 한 차단하지 않고 전 계통의 부하차단을 최소로 함을 목적함수로 설정하였는데 다음 식과 같이 표현할 수 있다.^{(1),(19)}

$$\min \sum_{i \in NC} \left[W_i \sum_{j=1}^{MS} \beta_j (PD_{ij, peak} - PD_{ij}) \right] \quad (8)$$

여기서 NC는 수요 절점의 집합이고 MS는 부하 종류의 개수, W는 절점의 가중치, β 는 부하 종류의 가중치를 나타낸다. 또한 PD는 수요 절점에 도달하는 부하이며 PD_{peak} 은 수요 절점에서의 최대부하량이다. 선로에 흐르는 전력조류 벡터 T는 다음과 같이 직류 조류 해석으로써 구할 수 있다.

$$T = A(PG - PD) \quad (9)$$

여기서 PG와 PD는 각각 발전량 벡터와 부하 벡터이며, 행렬 A의 m번째 열, A_m 은 다음과 같이 계산된다.

$$A_m = \frac{Z_i - Z_j}{X_{ij}} \quad (10)$$

여기서 X_{ij} 는 모선 i와 j간의 선로의 리액턴스(reactance)이며 Z_i 와 Z_j 는 각각 모선 임피던스(impedance) 행렬의 i와

j 번째 열이다.

계약조건으로는 발전량에 대한 제약, 송전선로의 용량 조건, 부하의 한계에 대한 조건이 있다. 먼저 공급 절점 i 에서의 발전 용량에 대한 제약 조건은 다음과 같다.

$$0 \leq PG_i \leq PG_{i,max} \quad (11)$$

여기서 $PG_{i,max}$ 는 공급 절점 i 에서의 최대 발전 용량이다. 수요 절점 i 에서의 부하에 대한 제약 조건은 다음과 같다.

$$0 \leq PD_i \leq PD_{i,peak} \quad (12)$$

송전선로의 용량제한에 대한 조건식은 다음과 같다.

$$-T_{ij,max} \leq T_{ij} \leq T_{ij,max} \quad (13)$$

여기서 $T_{ij,max}$ 는 절점 i 와 j 간 송전선로의 최대 송전 용량이다.

임의의 주어진 계통 상태에 대해서 식 (11)~(13)의 제약조건들을 만족하면서 식 (8)을 최소화하는 각 수요 절점의 공급부하전력 PD_i 와 선로조류량 T_{ij} 등을 선형계획법을 이용하여 구할 수 있다. 이와 같은 최적 전력조류 해석을 수행하면 지진으로 인해 유발된 전력송전시스템의 계통 변화에 대해 시스템의 각 절점에서의 전력공급에 대한 상태를 파악할 수 있다.

3.4. 전력송전시스템의 지진 신뢰도 지수

이 연구에서는 전력송전시스템의 지진 신뢰도를 '지진에 대해 소비자가 요구하는 전력을 공급할 수 있는 전력송전시스템의 성능에 대한 정도'로 정의하였다. 전력송전시스템과 같이 망 모형으로 해석하는 시스템의 신뢰도는 그 시스템을 구성하는 각 절점에서의 신뢰도 지수와 시스템 전체의 지수로 구성된다. 각 절점에서의 신뢰도 지수와 시스템 전체의 지수는 상·하의 개념이 아닌 서로 보완적인 관계로서 망 시스템의 지진 신뢰성 평가는 각 절점에서와 시스템 전체에서 이루어져야 한다. 이 연구에서는 절점에서의 지진 신뢰도 지수로서 분리확률(P_d)과 공급지장전력량의 기대치(EENS)와 손상비용(DC)을 사용하였고, 전체 시스템의 신뢰도 지수로서 성능상태지수(η)와 전력공급지장지수(ENSI)를 사용하였다. 각 신뢰도 지수의 내용은 다음과 같다.

3.4.1 분리확률(Probability of disconnectivity : P_d)

이 연구에서 전력송전시스템의 절점 신뢰도 지수 중 하나인 분리확률은 수요 절점이 어떠한 공급 절점과도 연결되지 않을 확률이다. 이는 변전소, 즉 수요 절점이 지진에 의해 파괴되거나 혹은 파괴가 되지 않더라도 망 시스템의 다른 절점의 파괴로 인해 발전소인 공급 절점과의 연결이 차단될 확률을 의미한다. 이 확률은 망 해석 중 연결성해석으로부터 구할 수 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$P_{d,i} = \frac{(S_i = 1) \text{인 시행의 갯수}}{\text{총 모의 시행의 수}} \quad (14)$$

여기서 $S_i = 1$ 이란 수요 절점 i 가 파괴된 상태를 의미한다.

3.4.2 공급지장전력량의 기대치

(Expected energy not supplied : EENS)

지진에 의해 전력송전시스템이 손상을 입게 되면 각 수요 절점에서의 전력 공급에 지장이 발생하게 된다. 이러한 수요 절점에서의 원래 상태의 공급 전기에너지와 지진 사건 발생으로 인한 전기에너지 공급의 차에 대한 기대값을 공급지장전력량의 기대치라고 정의하였다. 절점 i 에서의 공급지장전력량의 기대치는 직류 전력조류 해석에 대해 최적화 문제를 구성한 최적 전력조류 해석으로부터 구한 절점에서의 도달 전력(PD_i)으로부터 다음과 같이 평가하였다.

$$EENS_i = \left(\sum_{k=1}^N (PD_{i,peak} - PD_i^{(k)}) \times t \right) / N \quad (15)$$

여기서 k 는 모의 시행 단계이며, t 는 전력 공급이 끊긴 시간, N 은 총 시행 횟수를 나타낸다.

3.4.3 손상비용(Damage cost : DC)

각 수요 절점에서의 지진에 의한 영향을 분리확률과 공급지장전력량의 기대치를 이용하여 손상비용으로 평가하였다. 절점 i 에서의 지진으로 인한 손상비용 DC_i 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$DC_i = (C_0)_i (1+r)^n (P_d)_i + EENS_i \times P_E \quad (16)$$

여기서 C_0 는 변전소의 건설 비용이며 n 과 r 은 각각 소년수와 평균이자율을 나타낸다. P_d 와 $EENS$ 는 각각 분리확률과 공급지장전력량의 기대치를 뜻하며, P_E 는 전력에너지의 공급단가이다. 위 식 (16)에서 수요 절점의 손상비용은 그 절점의 손상이나 또는 발전소와의 연결 차단으로 인해 발생한 비용과 공급지장 전력량에 대한 비용의 항목으로 구성되었다. 이는 공급자적인 입장에서의 손상비용으로서 지진으로 인한 전력송전시스템의 손상으로 발생한 사회비용(social cost)을 나타내는 값은 아니다.

3.4.4 성능상태지수(Performance state index : η)

지진에 의해 전력송전시스템이 손상을 입게 되면 각 절점에서의 원활한 전력 공급이 이루어지지 않게 된다. 전력송전시스템의 전체적인 상태는 각 절점에서의 전력 공급 상황에 따라 결정될 수 있으므로 다음 식 (17)와 같이 시스템의 정상적인 전력공급량에 대해 각 모의 시행에서의 전력공급량의 비로 전력송전시스템의 전체적인 상태를 정의하였다.

$$q^{(k)} = \frac{\sum_{i \in NC} \left[PD_i^{(k)} \cdot H \left(\alpha - \left| \frac{PD_{OC,i} - PD_i^{(k)}}{PD_{OC,i}} \right| \right) \right]}{\sum_{i \in NC} PD_{OC,i}} \quad (17)$$

여기서 NC는 수요 절점의 집합을 나타내며 $PD_{OC,i}$ 는 재해를 입지 않은 원래 상태에서의 i 절점에서의 공급 전력[MW]이며 $PD_i^{(k)}$ 는 k 번째 모의 시행에서의 i 절점의 공급 전력[MW]이다. 전력송전시스템의 목적이 각 수요 절점으로의 전력 공급이므로 식 (17)의 지수 q 는 지진으로 인한 시스템의 전력 공급 상태를 나타낸다. 즉 $q=1$ 은 시스템이 전혀 손상을 입지 않아 정상적인 전력 공급 상태를 나타내며, $q=0$ 은 시스템이 지진으로 인해 완전히 파괴되어 수요 절점으로의 전력 공급이 전혀 이루어지지 않음을 의미한다. 절점에 도달하는 전력이 정상적인 전력 공급에 대해 일정 비율 이하가 될 때, 그 절점에는 전력 공급이 이루어지지 않은 것으로 보기 위해서 Heviside function $H(\cdot)$ 와 임계 비율 값 α 를 사용하였다.

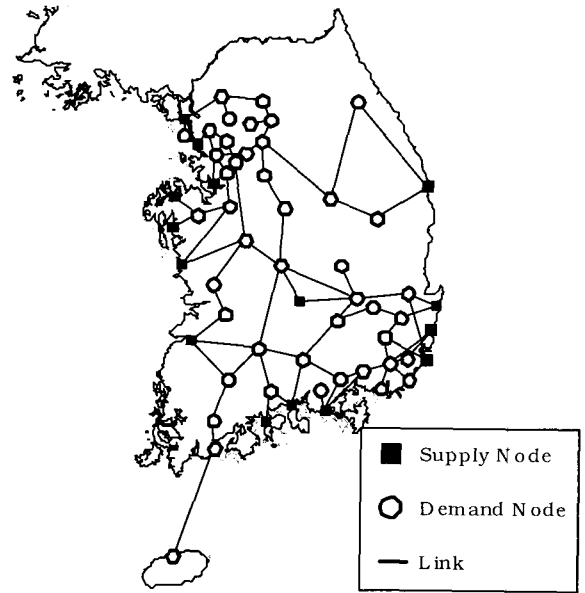


그림 4 국내 345kV 송전시스템 모형

3.4.5 전력공급지장지수(Energy not supplied index: ENSI)

전력송전시스템에서 전력의 공급지장에 대한 척도로서 다음 식 (18)과 같은 지수를 정의하였다. 이는 연간 최대 공급이 가능한 전력량에 대한 공급지장 전력량의 기대치의 비를 나타내는 것으로 전력송전시스템의 전력공급의 지장 정도를 의미한다.

$$ENSI = \frac{\sum_{i \in NC} EENS_i}{\sum_{i \in NC} PD_{i,peak} \times 8760} \times 100(\%) \quad (18)$$

4. 국내 전력송전시스템의 지진 신뢰성 평가

국내의 전력송전시스템은 345kV의 초고압 계통이 근간을 이루고 있으며 그 아래에 154kV 계통이 전국을 담당하는 송전망을 형성하고 있고, 최근에 756kV의 송전계통이 건설되고 있다. 이 연구에서는 국내 송전망의 근간이 되는 345kV 송전계통에 대하여 지진 신뢰성 평가를 수행하였다. 그림 4와 같이 국내 345kV 송전시스템을 15개의 공급 절점과 45개의 수요 절점 그리고 77개의 링크로 개략적으로 모델링하였다. 공급절점의 총 발전용량은 30,936MW이고 수요절점 최대부하의 합은 24,430MW이다. 이 연구에서는 확률론적 지진 신뢰성 평가를 위해 지진발생 모델과 변전소의 지진취약도 정보를 이용하여 그림 5와 같은 몬테 카를로법을 구성하였다.

그림 5의 흐름도에 나타난 전력송전시스템의 지진 신뢰성 평가는 다음과 같은 순서로 진행된다.

i) 계기 지진의 진앙지 분포로부터 임의의 진앙을 모의하고 지진 규모의 분포함수인 식 (2)로부터 진앙에서의 지

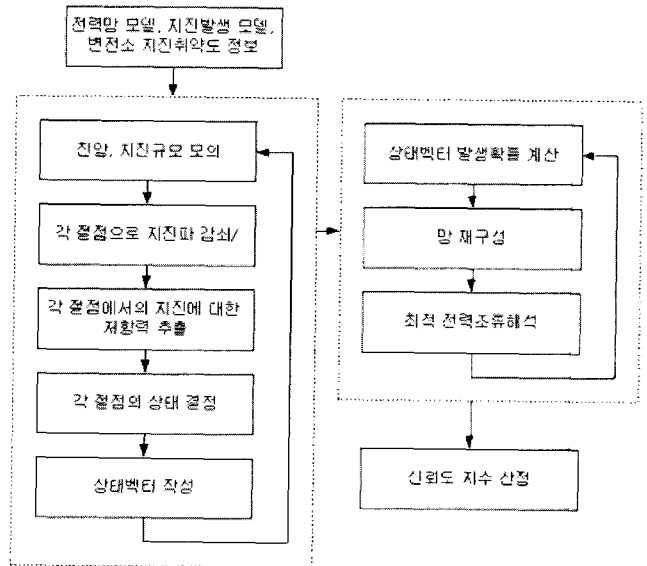


그림 5 지진재해 신뢰성 평가를 위한 흐름도

진 규모 m 를 모의한다. 진앙 오차는 $0.25^\circ \sim 0.5^\circ$ 의 범위로 추정됨이 알려졌는데⁽²⁰⁾ 이 연구에서는 이 오차 범위 내에서 임의로 진앙을 모의하였다.

- ii) 식 (3)~(5)의 감쇠 공식을 이용하여 각 수요 절점에서의 PGA를 계산한다.
- iii) 식 (1)의 변전소의 지진취약도 함수로부터 각 수요 절점에서의 지진에 대한 저항력 Z_i 를 모의한다.
- iv) 각 수요 절점에서의 상태를 판단하여 시스템의 상태벡터 $\mathbf{S} = \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_n\}$ 를 구한다. 이 때, 절점 I 에서 $R_i \geq Z_i$ 이면 파괴상태이며 $S_i = 1$ 로 설정한다. 파괴되지 않으면 $S_i = 0$ 로 설정한다.
- v) i) 단계부터 iv) 단계까지 충분한 횟수만큼 시행한다. 이 연구에서는 총 100,000번의 모의실험을 시행하였다.
- vi) 각 상태벡터에 대해서 발생 확률을 계산하고 파괴된 절점을 제거하여 새로운 망을 구성한다.

- vii) 새로이 구성된 망에 대해서 최적 전력조류해석을 수행한다. 이 때 분리된 망이 존재하면 각 망에 대해서 해석을 수행한다.
- viii) 식 (14)~(18)의 신뢰도 지수를 산정한다.

이 연구에서는 한반도의 지진 특성을 고려하여 지진 규모 분포 모형에서 b 값이 0.6, 0.8, 그리고 0.9인 모형을 이용하였고, 지진과 감쇠 모형은 Baag의 모형, Kawashima의 모형, 그리고 이기화와 조광현의 모형을 사용하여 총 9개의 지진 발생 모형을 이용하였다. 9개의 지진 발생 모형에 따른 전력 공급지장지수는 다음 그림 6과 같다. 그림 6에서 attenuation model I, II, III은 각각 Baag의 모형, Kawashima의 모형, 그리고 이기화와 조광현의 모형을 나타낸다. 그림 6에 나타난 바와 같이 지진 발생 모형에서의 b 값과 지진과 감쇠 모형에 따라 상이한 지진 신뢰도 지수 값을 보여준다. 따라서 이 연구에서는 9개의 지진 발생 모형으로부터 계산된 식 (14)~(18)의 신뢰도 지수(ϕ)에 대해 ENSI를 가중치로 사용하여 다음과 같이 식 (14)~(18)의 신뢰도 지수를 재평가하였다.

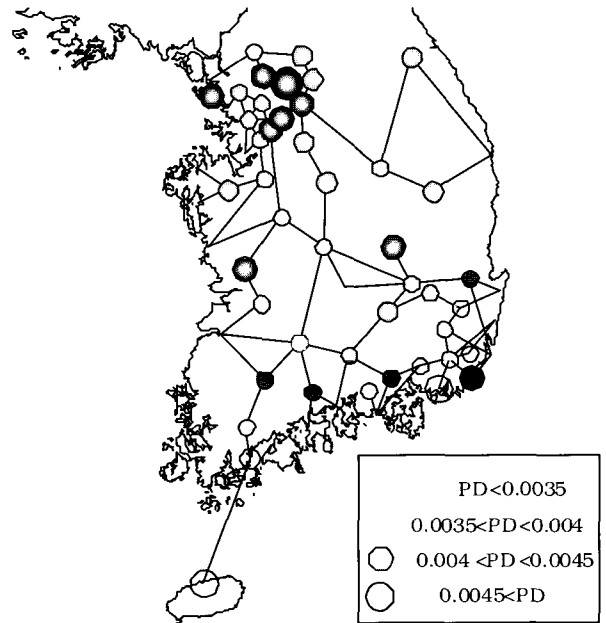
$$\Phi = \frac{\sum_{i=1}^9 ENSI_i \phi_i}{\sum_{i=1}^9 ENSI_i} \quad (19)$$

여기서 ϕ_i 와 $ENSI_i$ 는 각각 i 번째 지진 발생 모델에서의 식 (14)~(18)의 신뢰도 지수와 전력공급지장지수를 나타낸다.

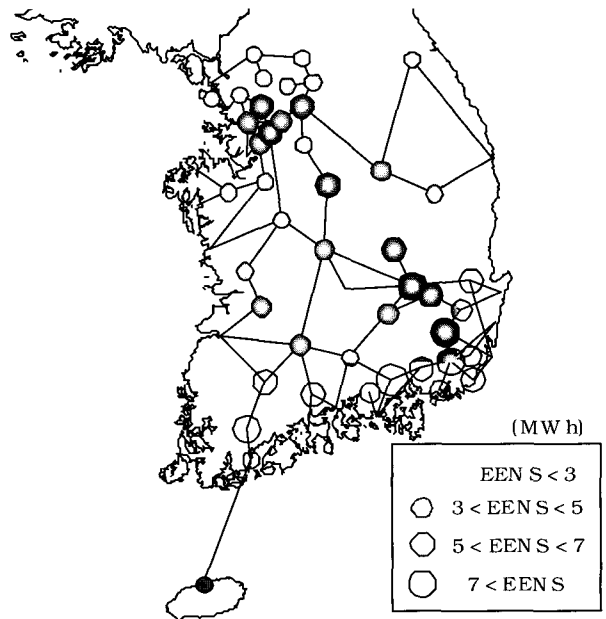
모의 시행 횟수에 따른 지진 신뢰도 지수의 수렴성을 살펴보면 그림 8, 9와 같다. 그림 8은 임의의 절점에서의 시행 횟수에 따른 분리확률의 분포와 COV(coefficient of variation)의 변화 양상을 나타낸 것이다. 또한 그림 9는 시행 횟수에 따른 공급지장전력량의 기대치의 분포와 그 COV의 변화 양상을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 시행 횟수가 이 연구에서 수행한 100,000번 정도이면 COV가 0.2 이하로 충분한 수렴성을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

각 절점에서의 분리확률과 공급지장전력량의 기대치는 표 1에 요약하여 나타내었고, 각 절점에서의 지진 신뢰도

지수의 분포는 그림 7과 같다. 공급지장전력량의 기대치의 산정은, 공급이 중단된 시간을 지진에 의한 피해 복구 시간으로 보고 그 시간은 각 절점에서 1시간으로 동일하다는 가정하에 이루어졌다. 지진으로 인한 전력송전시스템의 손상 비용은 132억 원에 이르며, 전력공급지장지수 ENSI는 각 절점의 지진에 의한 피해 복구 시간이 1시간일 때 1.2757×10^4 의 값을 구하였다. 각 절점에서의 피해 복구 시간이 동일하다는 가정은 유효한 채로 지진으로 인한 피해 복구 시간이 늘어나면 이 값은 그에 비례하여 증가하게 된다. 이러한 전력공급지장지수는 상시운용상태의 신뢰도 평가에도 이용되는 값으로서, 상시운용상태의 전력공급지장지수값과 지진신뢰도 평가시의 값을 비교함으로써, 지진 신뢰도 값을 정성적으로 판단하는데 사용될 수 있다. 일반적으로 전력계통공학



(a) 분리확률



(b) 공급지장전력량의 기대치

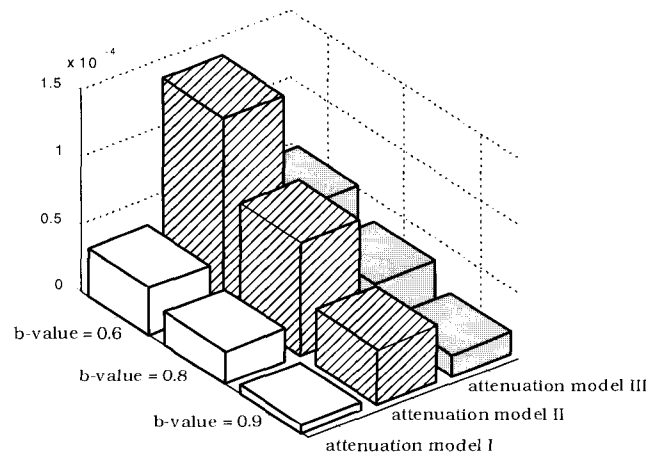


그림 6 지진 발생 모델 별 전력공급지장지수(ENSI)

그림 7 각 절점에서의 지진재해 신뢰도 지수 분포

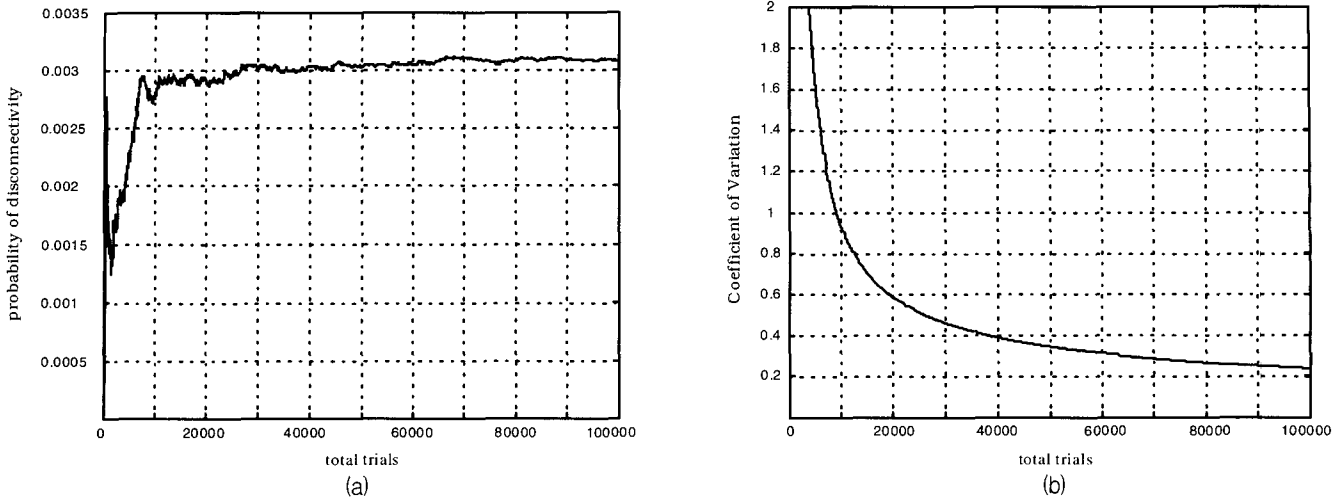


그림 8 모의 시행 횟수에 따른 분리확률의 변화

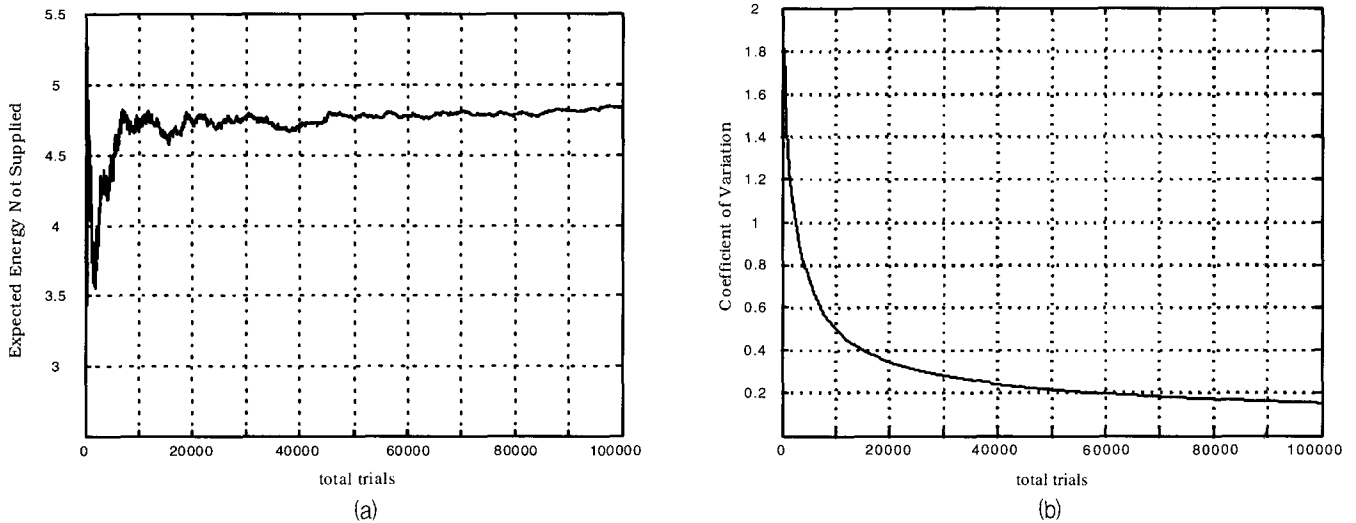


그림 9 모의 시행 횟수에 따른 공급지장전력량의 기대치의 변화

표 1 분리확률과 공급지장전력량의 기대치

	분리확률	공급지장전력량의 기대치
최대값	0.005	7.948MWh
최소값	0.0024	1.098MWh
평균값	0.0033	3.792MWh

에서 사용되는 상시 운용 상태의 신뢰성 평가 방법중 대표적인 것으로는, 발전계통과 송전계통으로 구성된 복합계통 시스템의 상시 운용 상태에서의 신뢰성 평가 방법이 있으며, IEEE-RTS 또는 신뢰성 평가를 위한 가상의 시스템을 대상으로 하고 있다. 이 연구에서는 복합계통시스템에 대한 신뢰성 평가에서의 ENSI 값으로 최재석⁽¹⁹⁾의 MRBTS(modified Roy Billinton test system)의 해석값을 사용하였다. 최재석⁽¹⁹⁾의 연구에서 얻은 복합계통시스템의 ENSI값 1.75×10^2 과 이 연구의 지진 신뢰도 평가에서의 ENSI 값을 비교하면, 각 절점에서 피해 복구 시간이 5.7일을 초과할 때 지진으로 인한 값이 복합계통시스템의 값과 비슷한 수준이 됨을 알 수 있다. 강진 지역에서의 지진으로 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 고려한다면, 전력지장공급량 기대값으로 표현되는 전력송전시스템에 대한 지진 신뢰도는 중·약진 지역인 국내에서도 무시할 수 있는 수준이 아닌 것으로 판단된다.

또한, 시스템 신뢰도 지수인 성능상태지수 q 값을 통해서도 중약진 지역인 국내의 지진신뢰도 값을 평가할 수 있다. 이 연구에서는 성능상태지수 q 값이 평균 0.9989, 표준편차 0.0138의 값으로 평가되었는데, 이 값은 강진 지역인 이탈리아의 고압송전시스템(high voltage transmission system)에 대한 지진 신뢰성 평가에 대한 연구 결과⁽⁶⁾에서의 성능상태지수 $q=0.9974$ 의 값과 크게 차이가 나지 않음을 확인할 수 있다. 그림 10에서는 성능상태지수의 누적 확률 분포를 나타내었다.

5. 결 론

전력송전시스템의 효율적인 지진 신뢰성 평가 방법을 개발하였다. 몬테카를로 방법을 사용한 해석에서 매 시행시 시간이 많이 소요되는 최적 전력 조류 해석 문제를 선형 최적

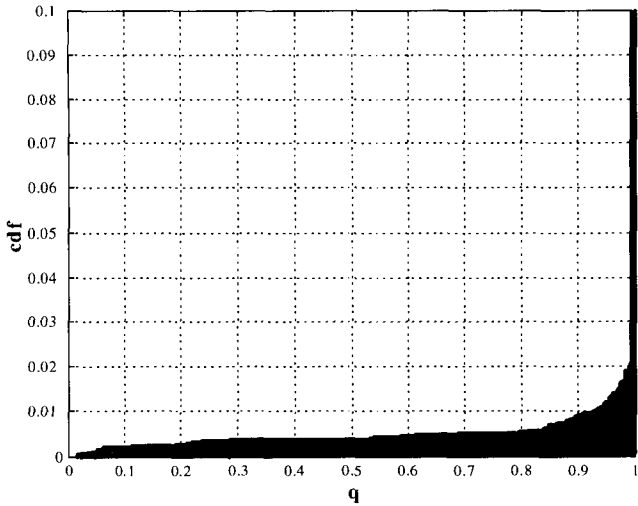


그림 10 성능상태지수 q의 누적확률분포

화 문제로 구성할 수 있는 직류법을 사용함으로써 효과적으로 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 신뢰성 평가를 위한 지수로서, 전력망 전체의 신뢰도를 평가할 수 있는 성능상태지수, 전력공급지장지수를 사용하였다. 또한 전력망을 구성하는 각 절점의 신뢰도를 평가할 수 있는 지수로서, 분리확률, 공급지장전력량의 기대치, 손상비용을 제시하였다. 신뢰성 해석을 위한 지진 모형으로는, 중약진 지역으로 분류되는 한반도의 지진 특성을 충실히 모사하기 위하여, 국내 지진의 공간 및 세기 분포를 고려하여 PGA값을 산출할 수 있는 지진 발생 모형을 사용하였다. 국내 전력송전시스템의 근간을 이루는 345kV 초고압 계통에 대하여 제안한 방법을 통해 지진신뢰성을 평가한 결과, 시스템의 성능상태지수의 값으로부터 강진 지역과 중약진 지역의 지진 신뢰도는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 상시운용상태의 신뢰성 해석에 사용되는 복합계통시스템의 신뢰도와는 간접 비교를 통해서, 전력지장공급량 기대값으로 표현되는 전력송전시스템에 대한 지진 신뢰도는 중, 약진 지역인 국내에서도 무시할 수 있는 수준이 아닌 것으로 판단되었다. 이 연구에서는 각 절점에서의 지진에 의한 피해 복구 시간과 각 변전소의 지진 취약도가 동일하다는 가정 하에서 지진 신뢰도가 평가되었다. 추후 연구에서는 국내 실정에 보다 적합한 각 변전소의 지진취약도 모형과 파괴 유형별 복구 시간에 대한 정보를 사용한다면, 더 정밀한 평가가 가능할 것으로 기대되며, 계산된 신뢰성 지수들에 대한 민감도 분석 등을 통해 지수값들의 불확실성을 정량화하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 이의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Billinton, R. and Li, W., *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*, Plenum Press,

1994.
 2. Goltz, J. D., "The Northridge, California earthquake of January 17, 1994: General reconnaissance report," *Technical Report NCEER-94-0005*, NCEER, 1994.
 3. Shinozuka, M., "The Hanshin-Awaji Earthquake of January 17, 1995 performance of lifelines," *Technical Report NCEER-95-0015*, NCEER, 1995.
 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. 7-22.
 5. Vanzi, I., "Seismic reliability of electric power networks : Methodology and application," *Structural Safety*, Vol. 18, No. 4, 1996, pp. 311-327.
 6. 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.
 7. 조양희, 박형기, 송영철, 방기성, "송변전기기의 내진설계기준 제안", 2002년도 추계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 2002, pp. 163-170.
 8. 고현무, 김영호, 박원석, "중약진 지역에서의 전력송전시스템의 지진재해 신뢰성 평가", 2002년도 추계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 2002, pp. 155-162.
 9. 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.
 10. 이기화, *Catalog of Korean Instrumental Earthquakes*, 2002.
 11. 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.
 12. Lee, K. and Jung, H. O., "A study of instrumental earthquake data of the Korean Peninsula," *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 16, 1980, pp. 32-45.
 13. 이기화, 김정기, "한반도 주요 지체구조별 지진학적 특성", 1999년도 추계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 1999, pp. 64-71.
 14. 신진수, 강익범, 김근영, "KSRS 관측자료에 의한 b-값 평가", 2002년도 추계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 2002, pp. 28-34.
 15. 이기화, "한반도의 최대지진", 2001년도 추계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 2001, pp. 41-50.
 16. 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.
 17. Kawashima, K., Aizawa, K., and Takahashi, K., "Attenu-

- ation of peak ground motions and absolute acceleration response spectra," *Report of PWRI*, Vol. 166, 1985, p. 106.
18. 이기화, 조광현, "Sino-Korea Craton에서 최대수평가속도의 감쇠", 2002년도 추계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 2002, pp. 3-10.
19. 최재석, "송전계통망의 신뢰도 평가", 전기학회지, 제50권, 제3호, 2001, pp. 15-23.
20. Bath, M, *Introduction to Seismology*, Birkhauser Verlag, Basel and Stuttgart, 1973.