

복합전력계통 신뢰도평가에 있어서 확률론적 안전도연구

김형철* 차준민** 김진오*** 권세혁****
 *한국철도기술연구원 **대전대학교 한양대학교*** 고려대학교****

Probabilistic Security Analysis in Composite Power System Reliability

H. Kim J. Cha J-O, Kim S. Kwon
 Korea Railroad Research Institute Daejin University Hanyang University Korea University

Abstract - This paper discusses a probabilistic method for power system security assessment. The security analysis relates to the ability of the electric power systems to survive sudden disturbances such as electric short circuits or unanticipated loss of system elements. It consists of both steady state and dynamic security analyses, which are not two separate issues but should be considered together. In steady state security analysis including voltage security analysis, the analysis checks that the system is operated within security limits by OPF (optimal power flow) after the transition to a new operating point. Until now, many utilities have difficulty in including dynamic aspects due to computational capabilities. On the other hand, dynamic security analysis is required to ensure that the transition may lead to an acceptable operating condition. Transient stability, which is the ability of power systems to maintain synchronism when subjected to a large disturbance, is a principal component in dynamic security analysis. Usually any loss of synchronism may cause additional outages and make the present steady state analysis of the post-contingency condition inadequate for unstable cases. This is the reason for the need of dynamic studies in power systems. Probabilistic criterion can be used to recognize the probabilistic nature of system components while considering system security. In this approach, we do not have to assign any predetermined margin of safety. A comprehensive conceptual framework for probabilistic static and dynamic assessment is presented in this paper. The simulation results of the Western System Coordinating Council (WSCC) system compare an analytical method with Monte-Carlo simulation (MCS).

1. 서 론

전력계통에 있어서 가장 중요한 역할은 소비자들에게 끊임없이 신뢰성 있는 전력을 제공하는 것이 주목적이라 할 수 있다. 전력계통은 전기를 생산하는 발전계통, 전기를 전송하는 송전계통, 송전계통으로부터 받은 전력을 분배하는 배전계통으로 크게 3가지로 나눌 수 있다. 현재 전력계통 신뢰도분석에서는 발전계통 뿐만 아니라 송전계통도 고려한 복합전력계통 신뢰도 해석이 많은 관심을 받고 있다.

넓은 의미에 있어서 전력계통 신뢰도란 양질의 전력을 부하에 적절히 공급하는 것으로 정의 되어진다. 복합전력계통에 있어서 신뢰도란 적정성 해석과 안전도 해석으로 크게 두 가지로 나뉘어진다. 적정성해석이란 일반적으로 소비자에게 만족스러운 전력을 공급하는 능력에 관한 것으로 정의되어진다. 이 전력계통 적정성해석은 정상상태 해석으로 국한되므로 과도현상의 반응은 포함되지 않는다. 반면 전력계통 안전도해석은 단락이나 예상치 못한 시스템 부분의 탈락과 같은 갑작스런 외란을 지탱하는 능력으로 정의 되어진다.

과거에는 전력계통 신뢰도해석은 주로 적정성 이론에 국한되었다. 그러나 전력계통 안전도해석은 전력계통 계획 및 운영이 더욱 중요한 이슈가 되고 있고 건설비 투자에 효과적으로 대처하기 위해서는 현실적인 문제 대두되고 있다. 일반적으로 전력계통 안전도 해석에는 두 가지 방법으로 나뉜다.

- 결정론적 해석 : 계통신뢰도를 유지하기 위해서 결정론적 신뢰도 해석은 어떤 상정사고에 관하여 계통이

단지 안전한지를 판별하는 것이다. 그러므로 이 평가 해석방법은 간단하나 계통신뢰도를 직접적으로 표현할 수 없으며, 계통요소들의 불확실성을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다.

- 확률론적 해석 : 이 평가해석 방법은 계통요소의 확률론적 특성을 내포하기 때문에 계통이 얼마만큼 안전한지를 나타낼 수 있다. 오늘날 계통이 더욱 복잡해짐에 따라 계통의 신뢰성은 줄어들고 있으므로, 효과적인 계통운영 및 계획을 위해서는 확률론적 해석이 필요하다.

본 논문에서는 복합전력계통 해석에 있어서 안전도 해석의 개념과 안전도 해석에서 사용되고 있는 분석방법을 비교 평가하여 WSCC(Western System Coordinating Council)에 그 결과를 증명한다.

2. 전력계통 안전도 개념

전력계통에 있어서 안전도 해석에 있어서 가장 기본적인 사항중의 하나가 안전도 판별이다. 이것은 전력계통의 신뢰도 평가에 있어서 적정성연구와 안전도연구를 구별하는 척도이기도 하다. 적정성연구에서 신뢰도 평가에 사용되는 신뢰도 지표는 공급지장 확률을 많이 사용한다. 이 공급지장 확률은 어떤 운영조건하에서 발전용량이 부하수요를 만족하는 정도를 나타낸다.

예를 들어 그림 1에서 두 개의 발전기가 부하에 1400MW를 공급하고 있다고 가정하자. 두 개의 발전기 중 하나가 탈락했다고 하더라도 충분히 부하에 전력을 공급할 능력을 가지고 있고 각 송전선의 부하수송능력은 500MW라고 할 때, 그림 1-(a)는 계통 운영상에서 아무런 문제가 발생하지 않은 정상적인 계통이라고 볼 수 있다. 이것은 전력계통 적정성해석시에도 공급지장이 없는 상태라고 판별할 수 있다. 그러나 그림 1-(a)의 계통이 안전하다고 판별할 수는 없다. 계통 안전도 판별은 추가적인 하나의 사고를 더 가정하여 그 사고에서도 계통의 전력공급과 시스템의 제약조건을 모두 만족하여야 계통이 안전하다고 말할 수 있다.

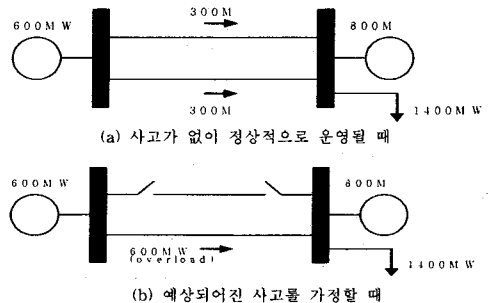


그림 1 전력계통 안전도해석을 위한 간단한 계통
 Fig. 1 A simple system for power system security

그림 1-(b)에서와 같이 어떤 계통의 요소 하나(여기서는 송전선 사고)의 상정사고를 가정했을 때, 다른 송전선의 부하수송 능력한계를 벗어났다. 그러므로 이 시스템은 비록 그림 1-(a)에서는 계통운영 상 모든 제약조건 및 전력공급에 차질이 없지만, 계통안전도 측면에서 볼 때는 이 그림 1-(a)의 계통은 안전하다고 볼 수 없다. 만약 1-(b)에서 송전선의 부하수송능력이 600MW 이상이고 모든 계통 제약조건을 만족한다고 한다면, 송전선의 과부하가 발생하지 않기 때문에 계통이 안전하다고 말할 수 있다. 이것이 계통이 안전한지 불안정한지를 판별하는 안전도 판별의 기본 개념이라 할 수 있다.

전력계통 신뢰도 해석에 있어서 적정성이론과 안전도 해석이론을 비교 요약하면 다음과 같은 차이점을 알 수 있다.

첫째, 안전도해석은 크게 정태안전도 해석과 동태안전도 해석으로 나뉜다. 정상상태 해석이란 계통의 Thermal Limit와 같은 제약조건 하에서 부하탈락이 있는가를 판별하는 것과 전압안정도 해석, 미소신호 안정도 해석 등 정상상태에서 계통의 특성을 분석하는 것이다. 과도상태 해석은 일반적으로 과도안정도 해석과 과도 전압안정도 해석에 관한 것이다.

둘째, 적정성해석은 정상상태해석에 국한한 반면 일반적으로 안전도 해석은 정태안전도 해석뿐만 아니라 과도상태 해석을 포함한다. 그러나 비록 정태안전도 해석이 적정성해석과 같이 정상상태에 국한되더라도, 추가적인 예상된 사고를 고려하기 때문에 정태안전도의 신뢰도 지수가 더 엄격함에 유의하다.

셋째, 안전도해석은 적정성해석보다 더욱 많은 시뮬레이션 시간이 소요된다. 일반적으로 안전도해석은 과도상태해석을 포함하기 때문에 계통의 같은 조건과 상태 하에서도 계산시간이 많이 소요한다. 또한 안전도 해석은 그림 1에서 나타내듯이 적정성해석에 나오는 각 계통상태에서 추가적인 예상된 사고를 고려하여 안전도판별을 해야 하므로 더욱 많은 프로그램 양을 요구한다. 예를들어 N개의 요소를 가진 전력계통을 고려했을 때, 적정성해석시에는

이론적으로 $(N C_0 + N C_1 + N C_2 + \dots + N C_i + \dots + N C_N)$ 의 계통상태에 대한 분석론적 해석이 요구되어진다. 그러나 안전도 해석은 그림 1에서 나타내듯이 적정성해석에 나오는 각 계통상태에서 추가적인 예상된 사고를 고려하여 안전도판별해야 하므로 더욱 복잡하다.

넷째, 적정성해석의 신뢰도 지수는 부하공급 저장확률 또는 부하공급 지장 주파수 등으로 표현되지만, 안전도해석의 신뢰도지수는 계통운영조건에 따라 신뢰도 지수로 표현하는 것이 바람직하며 이 신뢰도지수는 적정성해석의 신뢰도 지수의 의미를 포괄적으로 포함하는 것이다.

3. 확률론적 안전도 해석

안전도 해석에 있어서 확률론적 기법은 적정성 해석과 마찬가지로 분석론적 방법과 시뮬레이션 방법 두 가지로 나뉜다. 분석론적 방법은 수학적 해석에 의해 상정사고의 열거에 의해 신뢰도 지수를 계산하게 된다. 어떤 상정사고에 대하여 안전도 위반평가가 수행되어진다. 이러한 안전도 위반평가는 앞에서 언급한 동적 정적인 해석을 통하여 수행되어진다. 이 분석론적 방법의 장점은 상태공간에서 모든 가능한 상태(상정사고)들이 나열되어 평가할 수 있다면 정확한 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 분석론적 해석 방법은 가능한 모든 상정사고를 다 고려하는 것이 바람직하나, 전력계통과 같은 규모가 큰 시스템에서는 모든 상정사고를 다 고려하는 것은 불가능하기 때문에 상용 프로그램에서는 이러한 상정사고를 축소하여 사용되고 있다.

시뮬레이션방법으로 많이 사용되는 기법중의 하나가 몬테칼로 시뮬레이션 해석 기법이다. 이것은 통계적인 실험에 의해 샘플링 되어진 데이터를 분석하고 취합하

여 신뢰도 지수에 관한 결과를 얻는 방식이다. 이 몬테칼로 시뮬레이션 기법에도 순차적 시뮬레이션과 비순차적 시뮬레이션 두 가지 방법으로 나뉘고 있다.

비순차적 시뮬레이션 방법은 사고발생의 순서와 관계없이 계통요소의 확률분포에 따라 무작위 샘플링에 의해 계통의 상태를 결정하고 이 계통의 상태에 따라 안전도 위반 판별을 시행하고 있다. 그러나 이 방법은 신뢰도 주파수를 계산하기 어려운 단점이 있다. 반면 순차적 시뮬레이션 방법은 상태 지속기간을 전제로 사고의 시간적인 순서에 따라 신뢰도 지수를 계산하는 방법이라고 할 수 있다. 그러므로 계통 상태는 사건의 발생에 따라 변하게 된다. 일반적으로 몬테칼로 시뮬레이션은 전력계통과 같은 복잡한 시스템에 적당한 방법이지만 만족스러운 수렴을 얻기 위해서는 많은 계산시간이 소요되는 단점이 있다.

전력 계통에서 안전도 평가는 상정사고의 정적 상태의 평가 뿐 만 아니라 과도 전류의 평가를 필요로 한다. 정적 상태에서 시스템은 작동 조건을 여기거나 부하를 줄이는 일 없이 일정 부하를 공급해야 한다. 반면, 과도 전류 상태의 억제는 고장 하에서 안정적으로 시스템이 유지됨이 필수적이다.

● 과도상태 해석

과도안정도해석에 있어 first-swing 모델은 과도 전류 안정성[1][6]을 평가하기 위한 간단하면서도 효율적인 모델이다. 전력 계통은 임계 고장제거 시간(CCT: critical clearing time) 이전에 고장이 제거(CT: fault clearing time) 된다면 안정적일 것이라고 간주된다. 과도 전류 안정성 억제를 위한 첫 번째 단계는 CCT를 계산하는 것이다. 여기서 CT의 가능성 밀도 상관관계는 가우시안 분포로서 추정된다. 각 단계에서 CCT를 계산하기 위해 요구되는 산정하는 데 걸리는 시간이 방대하므로 이분법이 사용된다.

● 정상상태 해석

과도 전류 상태의 억제는 고장 하에서 안정적으로 시스템이 유지됨이 필수적이다. 정상상태 해석에는 부하차단을 최소화하는 최적조류계산과 전압안정도 평가로 해석되어진다. 부하차단을 최소화하기 위한 최적 조류계산은 다음과 같다.

$$\text{Objective function : } f = \min \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{--- (1)}$$

$$\text{Subject to: } X_i = P_{i,req} - P_{ii}$$

$$P_{gi} - P_{ii} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

$$Q_{gi} - Q_{ii} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

$$P_{ii} / P_{i,req} = Q_{ii} / Q_{i,req} \quad P_{gi, \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi, \max}$$

$$Q_{gi, \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi, \max}$$

$$PT_{ij}^2 + QT_{ij}^2 \leq S_{ij, \max}^2$$

$$0 \leq P_{ii} \leq P_{i,req}$$

$$0 \leq Q_{ii} \leq Q_{i,req}$$

$$V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max}$$

where

X_i : 버스 i의 부하차단

$P_{i,req}, Q_{i,req}$: 버스 i의 유효 무효전력 수요

P_{ii}, Q_{ii} : 버스 i의 유효 무효전력(after rescheduling)

P_{gi}, Q_{gi} : 버스 i의 유효 무효전력 발전

V_i, V_j : 버스 i, j의 전압크기

$G_{ij} + jB_{ij} = Y_{ij}$: 어드미턴스행렬의 ijth 항

δ_{ij} : 버스 i의 위상각 차이

$V_{i, \min}, V_{i, \max}$: 버스 i의 최소 최대 전압 크기

$P_{gi, \min}, P_{gi, \max}$: 버스 i의 최소 최대 유효전력 크기

$Q_{gi, \min}, Q_{gi, \max}$: 버스 i의 최소 최대 무효전력 크기

PT_{ij}, QT_{ij} : 버스 i, j 사이의 유효 무효전력

$S_{ij, \max}$: 버스 i, j 사이의 최대 허용된 전력

