

## The Implementation of Probabilistic Security Analysis in Composite Power System Reliability

金 炯 徹<sup>†</sup> · 車 濬 敏<sup>\*</sup> · 權 世 嫻<sup>\*\*</sup>  
(Hyungchul Kim · Junmin Cha · Sae-hyuk Kwon)

**Abstract** - The security analysis relates to the ability of the electric systems to survive sudden disturbances such as electric short circuits or unanticipated loss of system elements. It is composed 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 of a new operating point. On the other hand, dynamic security analysis deals that the transition will 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 will cause additional outages. They make the present steady state analysis of the post-contingency condition inadequate for unstable cases. This is the reason of the need for dynamics of systems. Probabilistic criterion can be used to recognize the probabilistic nature of system components and shows the possibility of system security. 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). Also, a case study of the extended IEEE Reliability Test System (RTS) shows the efficiency of this approach.

**key word** : Security, Monte-Carlo Simulation, Adequacy, Reliability, Stability, Clearing Time

### 1. 서 론

최근에 선진국에서 발생한 대 정전사고 이후 확률론적 신뢰도 평가 및 이의 활용에 대한 관심이 집중되고 있는 실정이다. 확률론적 접근방식은 복합계통의 구성요소 각각의 확률적인 특성을 반영할 수 장점 때문에 전력계통 신뢰도 평가에 적합하다고 할 수 있다. 결정론적 해석은 계통신뢰도를 유지하기 위해서 어떤 상정사고에 관하여 계통이 단지 안전한지를 판별하는 것이다. 그러므로 이 결정론적 평가해석방법은 간단하나 계통신뢰도를 직접적으로 표현할 수 없으며, 계통요소들의 불확실성을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. 반면 확률론적 해석은 계통요소의 확률론적 특성을 내포하기 때문에 계통이 얼마만큼 안전한지를 나타낼 수 있다. 오늘날 신규설비투자의 어려움으로 계통의 신뢰도는 감소할 수 있으며, 경제성과 신뢰도를 고려한 효과적인 계통운영 및 계획을 위해서는 확률론적 해석이 필요하다.

현재 전력계통 신뢰도해석[1, 2]에서는 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.

일반적으로 전력계통에 있어서 신뢰도란 적정성 해석과 안전도해석으로 크게 두 가지로 나뉘어 진다. 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 되어 진다. 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 문제로 대두되고 있다.

본 논문에서는 복합전력계통 해석에 있어서 안전도 해석의 개념과 안전도 해석에서 사용되고 있는 분석방법을 비교 평가하고 WSCC(Western System Coordinating Council)계통과 IEEE RTS(Reliability Test System)에 그 결과를 증명한다.

### 2. 전력계통 안전도 개념

전력계통 안전도 해석에 있어서 가장 기본적인 사항중의 하나가 안전도 판별이다. 이것은 전력계통의 신뢰도 평가에 있어서 적정성연구와 안전도연구를 구별하는 척도이기도 하다. 적정성연구에서 신뢰도 평가에 사용되는 신뢰도 지수는 공급지장 확률(LOLP) 와 공급지장빈도수(LOLF)를 많이 사용한다. 적정성해석에서의 이 신뢰도 지수는 공급지장 확률

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓國鐵道技術硏究員 先任硏究員 · 工博  
E-mail : hckim0930@naver.com

<sup>\*</sup> 正 會 員 : 大 眞 大 學 電 氣 情 報 系 統 工 學 科 副 教 授 · 工 博

<sup>\*\*</sup> 正 會 員 : 高 麗 大 學 電 氣 工 學 科 正 教 授 · 工 博

接受日字 : 2005年 12月 9日

最終完了 : 2006年 3月 16日

은 어떤 운영조건하에서 발전용량이 부하수요를 만족하는 정도를 나타낸다.[3]

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 500[MW]라고 할 때, 그림 1-(a)는 계통 운영상에서 아무런 문제가 발생하지 않은 정상적인 계통이라고 할 수 있다. 이 계통상태는 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.

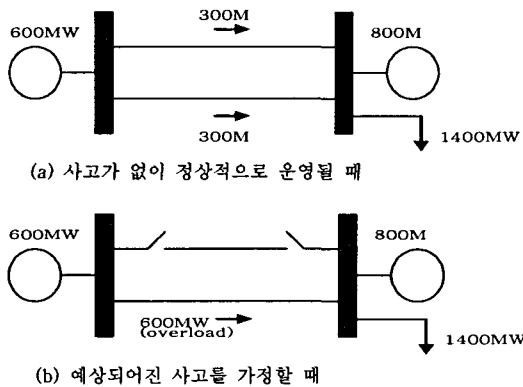


그림 1 전력계통 안전도해석을 위한 간단한 계통  
Fig. 1 A simple system for power system security

그림 1-(b)에서와 같이 어떤 계통의 요소 하나(여기서는 송전선 사고)의 상정사고를 가정했을 때, 다른 송전선의 부하수송 능력한계를 벗어난다. 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 600[MW]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 다음 표 1에서 차이점을 알 수 있다.

표 1 적정성 해석과 안전도 해석의 비교  
Table 1 The comparison of adequacy and security

	적정성 해석	안전도 해석
해석범위	정상상태 해석	정상상태 해석 / 과도상태 해석(단 정태 상태 안전도 해석은 정상상태해석만 수행)
신뢰도 판별	현 계통상태의 상정사고에 국한	현 계통상태에서 추가 상정사고도 고려
시뮬레이션 소요 시간	안전도 해석에 비해 적음	적정성해석에 비해 많음(시스템 크기의 증가에 따라 더욱 많이 소요)
프로그램 Load	안전도 해석에 비해 적음	적정성해석에 비해 많음
신뢰도 지수	LOLP/LOLF 등	계통운영 조건에 따른 신뢰도 지수
수학적 해석 방법	Analytical/Simulation	Analytical/Simulation

안전도해석[4]은 크게 정태안전도 해석과 동태안전도 해석으로 나뉜다. 정상상태 해석이란 계통의 Thermal Limit와 같은 제약조건 하에서 부하

탈락이 있는가를 판별하는 것과 전압안정도 해석, 미소신호 안정도 해석 등 정상상태에서 계통의 특성을 분석하는 것이다. 과도상태 해석은 일반적으로 과도안정도 해석과 과도전압안정도 해석에 관한 것이다. 또한 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 신뢰도지수가 더 엄격함에 유의해야 한다. 또한 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( $N_C1+N_C2+---+N_Ci+---+N_CN$ )의 계통상태에 대한 분석론적 해석이 요구되어진다. 그러나 안전도 해석은 그림 1에서 나타내듯이 적정성해석에 나오는 각 계통상태에서 추가적인 예상된 사고를 고려하여 안전도 판별해야 하여야 하므로 더욱 복잡하다. 적정성해석의 신뢰도 지수는 부하공급 지장확률 또는 부하공급 지장빈도수 등으로 표현되지만, 안전도해석의 신뢰도지수는 계통운영조건에 따라 신뢰도 지수로 표현하는 것이 바람직하며 이 신뢰도 지수는 적정성해석의 신뢰도 지수의 의미를 포괄적으로 포함하는 것으로 볼 수 있다.

### 3. 전력계통 안전도의 수학적 모델링

전력 계통에서 안전도 평가는 상정사고의 정상 상태의 평가 뿐만 아니라 과도 상태 평가를 다루고 있다. 정상 상태에서 시스템은 작동 조건을 어기거나 부하를 줄이는 일 없이 일정 부하를 공급해야 한다. 반면, 과도 상태에서는 고장 하에서 안정적으로 시스템이 유지됨이 필수적이다. 과도안정도 해석에 있어 first-swing 모델은 과도안정도를 평가하기 위한 간단하면서도 효율적인 모델이다. 전력 계통은 임계 고장제거 시간(CCT: critical clearing time) 이전에 고장이 제거(CT: clearing time) 된다면 안정적일 것이라고 간주된다. 과도 안정도의 제약조건을 만족하기 위한 첫번째 단계는 CCT를 계산하는 것이다. 여기서 CT는 표준분포로서 추정될 수 있다.

정상상태 해석에는 부하차단을 최소화하는 최적조류계산과 전압안정도 평가로 해석되어진다. 부하차단을 최소화하기 위한 최적 조류계산[7]은 다음과 같다.

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

$$\text{Subject to: } P_{gs} - P_{Ls} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}),$$

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

$$X_i = P_{lreq} - P_{li} P_{li} / P_{lreq} = Q_{li} / Q_{lreq} P_{gi,min} \leq P_{gi} \leq P_{gi,max} ,$$

$$Q_{gi,min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi,max} , \quad PT_{ij}^2 + QT_{ij}^2 \leq S_{ij,max}^2 ,$$

$$V_{l,min} \leq V_l \leq V_{l,max} \quad 0 \leq P_{li} \leq P_{lreq} ,$$

$$0 \leq Q_{li} \leq Q_{lreq} ,$$

- 단,  $X_i$  : 버스  $i$ 의 부하차단
- $P_{lreq}, Q_{lreq}$  : 버스  $i$ 의 유효 무효전력 수요,
- $P_{li}, Q_{li}$  : 버스  $i$ 의 유효 무효전력
- $P_{gi}, Q_{gi}$  : 버스  $i$ 의 유효 무효전력 발전
- $V_i, V_j$  : 버스  $i, j$ 의 전압크기
- $G_{ij} + jB_{ij} = Y_{ij}$ : 어드미턴스행렬의  $ij^{th}$  항
- $\delta_{ij}$  : 버스  $i$ 의 위상각 차이
- $V_{i,min}, V_{i,max}$ : 버스  $i$ 의 최소최대 전압크기
- $P_{gi,min}, P_{gi,max}$ : 버스  $i$ 의 최소최대 유효전력 크기
- $Q_{gi,min}, Q_{gi,max}$ : 버스  $i$ 의 최소최대 무효전력 크기
- $PT_{ij}, QT_{ij}$ : 버스  $i, j$  사이의 유효 무효전력
- $S_{ij,max}$  : 버스  $i, j$  사이의 최대 허용된 전력

이 부하차단해석의 주목적은 최적조류계산이 식 (1)의 모든 제약조건을 만족하는 가에 달려있다. 제약조건을 만족할 경우 부하차단이 필요 없이 부하에 전력공급이 원활하다는 것을 의미한다. 반면 제약조건이 만족하지 못하면 부하차단을 하여 제약조건을 만족하도록 한다. 그러나 이때는 부하차단이 일어나므로 시스템측면에서는 불안정하다고 볼 수 있다.

전압안정도는 전압안정도 지수[8]에 의해 나타내 질 수 있다. 이 전압안정도 지수는 0에서 1사이의 값으로 표현되어진다. 전압안정도 지수가 0일 때는 시스템의 부하가 없을때를 나타내며, 전압-부하 곡선에서 전압붕괴점을 전압안정도 지수 1로 표현한다. 전압안정도 지수가 전압안정 임계값이상[9]일 경우 불안정하다고 판별한다. 그에 대한 전압안정도 지수는 다음과 같이 표현되어진다.

$$L_i = \frac{(S_i + V_i \sum_{j \in load, j \neq i} \frac{Z_{ij}^* S_j}{Z_{ii}^* V_j})^*}{Z_{ii}^{-1} V_i^2} \quad \dots (2)$$

- 단,  $S_i^*$  :  $S_i$ 의 복소공액
- $S_i$ : 버스  $i$ 의 전력
- $Z_{ij}$ : 계통  $Z$  행렬의  $ij^{th}$  요소,
- $Z_{ij}^*$  :  $Z_{ij}$ 의 복소공액
- $V_i$ : 버스  $i$ 의 전압

#### 4. 확률론적 전력계통 안전도 해석 방법

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 규

모가 큰 시스템에서는 모든 상정사고를 다 고려하는 것은 불가능하기 때문에 상용 프로그램에서는 이러한 상정사고를 축소하거나 실제계의 적용시에는 다소 단순화된 모델링을 사용하고 있다.

시뮬레이션방법으로 많이 사용되는 기법중의 하나가 몬테칼로 시뮬레이션 해석 기법이다. 이것은 통계적인 실험에 의해 샘플링 되어진 데이터를 분석하고 취합하여 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 빈도수를 계산하기 어려운 단점이 있다. 반면 순차적 시뮬레이션 방법은 상태 지속시간을 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. 표 2는 분석적 방법과 시뮬레이션 방법을 비교하고 있다.

표 2 전력계통 안전도연구에 있어서 분석적방법과 시뮬레이션 방법의 비교

Table 2 The comparison of analytical methods and simulation methods

	분석적 방법 (Analytical)	시뮬레이션 방법 (Simulation)
정의	수학적 해석에 의해 상정사고의 열거에 의해 신뢰도 지수를 계산	통계적인 실험에 의해 샘플링 되어진 데이터를 분석하고 취합하여 신뢰도 지수에 관한 결과를 얻는 방식
장점	모든 가능한 상태(상정사고)들이 나열되어 평가할 수 있다면 정확한 결과를 얻을	대규모시스템에 적합
단점	전력계통과 같은 규모가 큰 시스템에서는 모든 상정사고를 다 고려하는 것은 불가능	만족스러운 수렴을 얻기 위해서는 많은 계산시간이 소요
대책	- 상용 프로그램에서는 이러한 상정사고를 축소하여 사용 - 계통의 간략화	- Variance reduction technique - 계통의 간략화
해석 방법	- State enumeration method - Network Reduction method - Fault tree method	- 비순차적 Simulation - 순차적 Simulation (Fixed-interval method / Next-event method)

여기서는 전력계통 안전도해석을 위한 순차적 몬테칼로 시뮬레이션 알고리즘 절차를 나타내고 있다.

**Step 1:** 모든 요소들의 변수, 전이율 및 상태를 초기화한다. 복합전력계통에서 요소들은 발전기 및 송전라인 등으로 볼 수 있다. 요소의 상태는 Up일 경우는 1, Down일 경우는 0로 나타낸다. 요소들의 초기상태는 Up 이다.

**Step 2:** 각 요소에 대해 무작위 값을 선택하여 시간에 따라 계통 상태를 변화시킨다. 계통상태는 기본계통, 하나의 상정사고(1-depth), 두 개의 동시적 상정사고(2-depth) 등으

로 나눌 수 있다.

Step 3 : 샘플링된 계통 상태에 따른 정상상태 및 과도상태의 계통 해석을 수행한다. 이때 계통상태가 만족스럽지 못하다면 계통불안전 지수를 증가시킨다. 만약 계통상태가 정상상태 및 과도상태 해석을 모두 만족한다면 추가적인 상정사고를 고려해야 된다. 이때 계통안전 지수를 증가해서는 안된다. 추가적인 상정사고까지도 만족한다면 계통안전 지수를 증가하고, 그렇지 않을 경우 계통 불안전 지수를 증가한다.

Step 4: 시뮬레이션을 편차 혹은 정해진 최대 횟수가 될 때까지 수행한다.

Step 5: 계통안전지수와 계통불안전지수를 계산한다. 계통안전지수와 계통불안전지수는 식(3)과(4)에서 각각 나타나 있다.

$$P_n = \frac{\sum_{i=1}^N (D'_n)}{N \cdot 8760} \quad F_n = \frac{\sum_{i=1}^N (n'_n)}{N} \quad (3)$$

$$P_e = 1 - P_n - P_a \quad F_e = \frac{\sum_{i=1}^N (n'_e)}{N} \quad (4)$$

단,  $D'_n = \sum d_n$  :  $i$  번째 년(year)의 안전상태에서의 지속기간  
 $n'_n = \sum n_n$  :  $i$  번째 년(year)의 안전상태 횟수  
 $N$  : 실험 년수  
 $n'_e$  :  $i$  번째 년(year)의 불안전상태 횟수

### 5. 사례 연구

#### 5.1 WSCC (Western System Coordinating Council) 계통

여기서는 3개의 발전기와 9개의 버스를 가지고 있는 WSCC 계통에 안전도해석을 적용한다. 그에 대한 발전기 여자의 데이터는 참조문헌[10]에 설명되어 있다.

표 3 전력계통 과도상태 및 정상상태 시스템 해석

Table 3 The state characterization of transient and steady-state

고장라인 No.	고장라인		과도안정도		부하차단	전압안정도		상대평가
	From	To	확률	결과		지수	결과	
T1	1	4	0.0000	위반	부하차단	0.4311	위반	상대평가 위반 위반 위반 위반 위반 위반 위반 위반
T2	2	7	0.0000	위반	부하차단	0.2433	만족	
T3	3	9	0.0000	위반	부하차단	0.2027	만족	
T4	4	5	0.9332	만족	만족	0.5023	위반	
T5	4	6	0.9772	만족	만족	0.2972	만족	
T6	5	7	0.9332	만족	만족	0.2563	만족	
T7	6	9	0.9332	만족	만족	0.2092	만족	
T8	7	8	0.9994	만족	만족	0.2108	만족	
T9	8	9	0.9599	만족	만족	0.1840	만족	

모든 송전라인의 평균 고장제거시간과 표준편차데이터는 참조문헌[11]에 나타나 있다. 모든 발전기의 고장율과 회복율은 각각 0.0015[1/hour]과 0.1[1/hour]로 가정하고, 모든 송전라인의 고장율과 회복율은 각각 0.000015[1/hour]과 0.1[1/hour]로 계산상의 편의로 설정하였다.

표 3는 과도상태 및 정상상태 해석을 이용하여 각 상태에 대한 시스템 해석의 결과를 나타내고 있다. 예를들어 과도안정도에서 판별에서 보면 송전라인 8-9에 사고가 나더라도 발전기탈조가 나지 않을 확률이 0.9599를 의미하며, 송전라인 1-4, 2-7, 3-9는 어떠한 사고가 일어나더라도 과도 불안정한 상태에 놓여 있음을 알 수 있다. 또한 정상상태에서의 전압안정도의 경우 송전라인 1-4의 사고의 경우 버스 5에서 나타나는 전압안정도 지수가 가장 높게 나타나므로 가장 전압붕괴점에 가까운 것을 의미하고 전체 계통을 대표하는 수치를 나타낸다. 시스템해석의 결과는 어떠한 위반이 하나라도 일어나면 각 상태의 결과는 '위반'으로 정의되어 진다.

안전도해석을 위하여 분석론적 방법과 몬테칼로 시뮬레이션 방법을 비교 하였다. 분석적인 방법은 상태 열거법을 사용하였다. 3개의 발전기와 9개의 전송라인을 가지고 있는 WSCC 계통은 총 12개의 요소를 가지고 있기 때문에 기본 계통을 포함하여  ${}_{12}C_1 + {}_{12}C_2 + \dots + {}_{12}C_{11} + {}_{12}C_{12}$ 의 계통상태를 가지고 있다. 각 상태에 대한 빈도수는 등가 전이율 (equivalent transition rate) 관계를 이용하였다. 또한 시

뮬레이션방법은 순차적인 기법을 이용하여 앞 절에서 설명한 절차를 이용하였다. 그에 대한 결과를 표 4에 나타나 있다. 표 4 에서와 같이 두 가지 해석방법은 거의 일치된 값을 보여주고 있다.

표 4. 안전도해석에 있어서 분석적방법과 시뮬레이션방법과의 비교

Table 4. The Comparison of analytical method and Monte-Carlo Simulation

	불안전 확률	불안전 빈도수
분석론적 방법	0.0443	38.178
몬테칼로 시뮬레이션	0.0431	39.88

#### 5.2 IEEE RTS(Reliability Test System)

IEEE Reliability Test System (RTS)는 24개 버스와 38개 송전라인으로 구성되어 있다. 연간 시스템의 피크 부하는 2850MW이고 총발전량은 3405MW이다. 자세한 IEEE RTS의 데이터는 문헌 [12]에 나타나 있다.

여자는 모든 발전기에 IEEE Type I으로 설치되어 있으며, 발전기 모델링은 two-axis model로 정의되어 진다. 문헌[9]에서 나타나 있지 않는 고장제거시간, 발전기 및 여자기 데이터는 표 5에 나타나 있다. 표 6은 전력계통 신뢰도 해석식 적정성이론과 안전도 해석과 비교한 것을 나타내고 있

다. 예상된바와 같이 안전도해석의 신뢰도 지수는 적정성해석의 신뢰도 지수보다 훨씬 낮게 나온다. 왜냐하면 적정성해석은 정상상태해석에 국한한 반면 일반적으로 안전도 해석은 정태안전도 해석뿐만 아니라 과도상태 해석을 포함하며, 추가적인 예상된 사고를 고려하기 때문이다.

몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 결과가 그림 2에서 나타나 있다. 앞에서 말한바와 같이 몬테칼로 시뮬레이션은 큰 계통에 적용하기에 적절하므로 이 예제에서는 몬테칼로 시뮬레이션 방법을 이용하였다. 시뮬레이션은 최대 반복횟수 혹은 수렴편차가 만족할 때까지 반복되었다. 부하의 비율은 피크 부하를 100%로 하고 그에 대한 퍼센트로서 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과는 100%, 95%, 90%, 75% 부하의 변화에 따라 그림 2에서 나타내고 있다. 부하가 감소할 수록 계통은 더욱 안전해지며 계통안전지수는 증가함을 알 수 있다.

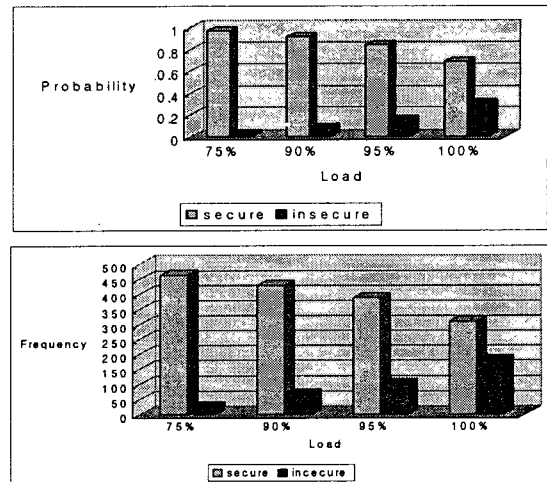


그림 2. 부하의 변화에 따른 안전도 확률 및 빈도수  
Fig. 2 The frequency and probability by load for security assessment

표 5 발전기 및 여자기 데이터.

Table 5 The Data for generator and exciter

발전기 No.	발전기							여자기							
	H(s)	Xd	Xd'	Xq	Xq'	Td0'	Tq0	KA	KE	KF	TA	TE	TF	KSe	Tse
1,13,16,23	23.64	0.15	0.06	0.09	0.09	8.96	0.31	20.0	1.0	0.063	0.2	0.314	.350	.0039	1.555
2,14,18,22	6.4	0.89	0.11	0.86	0.19	6.0	0.53	20.0	1.0	0.063	0.2	0.314	.350	.0039	1.555
7,15,21	3.01	1.31	0.18	1.26	0.25	5.89	0.6	20.0	1.0	0.063	0.2	0.314	.350	.0039	1.555

표 6 적정성 해석 및 안전도 해석의 비교

Table 6 The probability and frequency of adequacy and security

	확률	빈도수
적정성해석	0.002121(LOLP)	2.741(LOLF)
안전도해석	0.3079(불안전)	181.73

### 6. 결 론

본 논문은 전력계통 신뢰도 해석 중 효과적인 계통운영 및 계획을 위한 확률론적 안전도해석에 관한 것으로서, 몬테칼로 시뮬레이션을 이용하여 확률론적인 신뢰도해석을 수행하였다. 본 논문을 요약정리하면 다음과 같다.

첫째, 전력계통 안전도 위반을 검증하기 위하여 부하차단, 전압안정도와 같은 정상상태에서의 해석 뿐만 아니라 과도 안전도해석을 통해 과도상태에까지 안전도 위반을 각각 검증하고, 계통상태를 평가 하였다.

둘째, WSCC 계통을 통하여 안전도해석에 몬테칼로시뮬레이션과 분석론적 방법을 비교하여 계산의 정확성을 입증 하였다.

마지막으로, 본 논문에서는 IEEE RTS에 신뢰도해석에 있어서 순차적 몬테칼로시뮬레이션을 적용하였다. 또한 적정성해석과 안전도해석을 비교하여 안전도해석의 중요성을 증명하였으며, 부하의 변동에 따라 안전도지수가 변화하는 것을 나타내었다.

본 논문은 전력계통 안전도 평가 체계에 관한 이론정립을

하였으며, 한전계통과 같은 실제계통에 적용하기 위해서는 프로그램의 확장성 및 계산용량이 선결과제라 볼 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] Vittal, V. "Consequence and impact of electric utility industry restructuring on transient stability and small-signal stability analysis" Proceedings of the IEEE, Volume: 88 Issue: 2, Feb. 2000 Page(s): 196 - 207
- [2] C. Singh and R. Billinton, "System Reliability, Modeling and Evaluation", Hutchinson, London, 1977.
- [3] 김형철, 트란트롱 톤, 최재석, 전동훈, 추진부, 허연, 한경남, "TRELSS를 이용한 전력계통의 확률론적 신뢰도 평가 VI", 대한전기학회 2004 추계학술대회
- [4] A.M., Silva, J. Endrenyi J., L. Wang, "Integrated treatment of Adequacy and Security in Bulk power System Reliability Evaluation" IEEE Trans. on power systems Vol.11, No.1 Mar.1993
- [5] Aboreshaid, S, Billinton, R., Fotuhi-Firuzabad, M. "Probabilistic transient stability studies using the method of bisection", IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 11 Issue: 4, Nov. 1996 Page(s): 1990 - 1995
- [6] Billinton, R., Aboreshaid, S., "Security evaluation of composite power system", IEE Proc.-Gener.Transm. Distrib., Volume: 142 No: 5, Sep. 1995 Page(s): 511 - 515
- [7] X. Luo, C. Singh and A .D. Patton, "Loss-of-Load State Identification using Self-Organizing Map" Proceedings of IEEE Power Engineering Society 1999 Summer Meeting, Vol. 2, pp. 670-675.

- Stability of a Power System", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol 1, No. 3, Jul. 1986, pp.346-354.
- [9] Aboreshaid, S, Billinton, R, "Probabilistic evaluation of voltage stability", IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 14 Feb 1999 Page(s): 342 - 348
- [10] Peter W. Sauer, M. A. Pai "Power system dynamics and stability", Prentice Hall
- [11] 김형철, 차준민, 김진오, 권세혁 "복합전력계통 신뢰도 평가에 있어서 확률론적 안전도연구", 대한전기학회 2005추계학술대회
- [12] IEEE RTS Task Force of APM Subcommittee, "IEEE Reliability Test System", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98,, No.6, Nov/Dec. 1979, pp. 2047-2054.

## 저 자 소 개



### 김형철 (金炯徹)

1967년 9월 30일생. 1991년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 Texas A&M University(공박). 2004년부터 현재 한국철도기술연구원 선임연구원



### 차준민 (車濬敏)

1964년 5월 9일생. 1989년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년부터 현재 대전대학교 전기정보시스템공학과 부교수.



### 권세혁 (權世爓)

1949년 5월 14일생. 1974년 서울대학교 공업교육과 졸업. 1976년 동 대학원 공업교육과 졸업(석사). 1980년 Iowa주립대졸업(석사). 1984년 동 대학원 졸업(공박). 현재 고려대학교 전기공학과 교수.