

## 간략화 모의 기법을 이용한 대전력 계통 신뢰도 계산

\*김 동 회, 김 진 오  
한양대학교 전기공학과

### The Evaluation of Reliability in a Composite Power System using Simplified Simulation Techniques

\*Dong Hee Kim, Jin O Kim  
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

#### Abstract

This paper presents the Simplified Simulation Technique that evaluates the adequacy of an electric power system using only a portion of the outage period instead of each hour. Reliability evaluation may be performed at various hierarchical levels, generation, transmission and distribution system. The Simplified Simulation Technique simplifies the adequacy evaluation process reducing the number of calculations considerably. Therefore the computation time can be significantly reduced. This paper is done to compare the results of the simulation model with the Simplified Simulation Technique against the results of the simulation model without the Simplified Simulation Technique. The reliability indices such as the Loss of Load Probability (LOLP), the loss of load frequency (LOLF), the average duration of load curtailment(DLC) and the average demand of load curtailment(ADLC) are calculated. The proposed methods and procedures are tested by using the IEEE-RTS with 24-bus system.

#### 1. 서론

신뢰도 계산, 장기 전원 공급 계획을 하기 위한 확률적 분석은 대전력 계통의 대형화와 운영시 고려할 사항이 많아 복잡한 작업 중 하나이다. 확률적 분석은 크게 시뮬레이션법과 상태 분석법(State enumeration)으로 구분할 수 있다. 해석적 방법인 상태 분석법은 시스템을 수학적으로 모델링하여 전상태 공간 중에서 우선 순위에 의하여 상정사고를 선정하여 선택된 상정사고만을 대상으로 각 위험 지수를 산출하는 방법이다. 이 방법은 복잡하고 대규모의 계통에서는 수학적으로 모델링하기가 힘들고 여러 운용 제약 조건을 실 계통에 맞게 반영하기가 어려운 단점이 있으나, 계산속도가 빠르고 항상 일정한 값을 산출할 수 있다. 이에 반해 시뮬레이션법은 복잡한 실제 시스템을 모의하여 반영하기 쉽고 전력분배, 과부하에 따른 부하 차단, 계획된 운용 정책 등의 실제적인 상황을 모두 고려할 수 있고 또한 사후 정책 변경이나 시스템의 변화를 쉽게 반영하여 수정할 수 있다. 그러나 이러한 장점을 갖고 있는 반면, 정해진 정확도로 수행하기 위해 많은 계산 시간이 필요한 문제는 여전히 남아 있다. 또 대전력 계통 신뢰도 계산의 가장 중요한 부분은 각 성분의 운전 한계 내에서 부하량을 충족시키는 적당도 계산이다. 이 계산 과정에서 많은 계산 부담이 있다. 따라서 본 연구에서는 발전기와 송전선로를 포함한 대전력 시스템에서 여러 가지 상황을 고려하면서도 계산량과 계산시간을 현저하게 줄일 수 있는 간략화된 모의 기법(Simplified Simulation Technique)을 제시하고자 한다. 전력 계통의 신뢰도 산정에 필요한 송배전 시스템의 각 성분은 발전기, 송전선로, 변압기 및 모선으로 구성하고 IEEE-RTS 24버스 시스템을 이용한다. 모델링한 시스템을 Monte Carlo 시뮬레이션법을 이용하고, 또 순

차오의법(Sequential Simulation) 중 차기 사건 선택법(Next Event method)을 이용하여 신뢰도 지수를 계산한다.

#### 2. 대전력 계통의 신뢰도 계산

##### 2.1 선형 전력 조류(Linear Power Flow)

송전선로나 변압기는 전력을 전달할 수 있는 한계가 있다. 이러한 정격용량 한계를 고려한 전력 조류 계산은 각 선로나 변압기에 과부하가 발생할 수 있다. 과부하가 발생했을 때, 시스템은 정상적으로 운전할 수 없게 되므로 과부하 검사를 위해 전력 조류 계산이 필요하다. 신뢰도 계산시 대전력 계통에서는 유효 전력만을 고려하여 과부하를 검사한다. 유효 전력을 구하기 위해 직류 전력 조류 계산을 바탕으로 한 선형 전력 조류식은

$$[\theta] = [X][P] \quad (1)$$

으로 나타내고, (1)식을 다시 버스  $i$ 와  $j$ 를 연결한 송전 선로  $ij$ 의 전력 조류 계산식으로 변환하면

$$PF_{ij} = \sum_{k=0}^N \frac{(X_{ik} - X_{jk})}{x_{ij}} P_k \quad (2)$$

$$PF_{ij} = \sum_{k=0}^N a_{ij,k} P_k \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 위 식으로 각 성분의 전력 조류식을 행렬식 표기로 간단히 하면

$$[PF] = [a][P] \quad (4)$$

표현할 수 있다. (4)식은 선로와 변압기에 대한 전력조류계산이다. 각 버스에서 투입하는 전력의 작은 변화에도 각 선로에서는 영향을 받으므로 전력 조류를 다시 계산해야 한다. 그러나 식(4)를 다시 계산하여 전력 조류를 계산하는 것보다 이전에 구한 전력 조류에 변화된 버스만 고려하여 시스템의 전력 조류를 빠른 시간에 구할 수 있다. 이러한 수정된 전력 조류 방정식은

$$[PFN] = [PF] + [a][\Delta P] \quad (5)$$

으로 표현하고 여기서  $[a]$ 는 발전량 배분 계수이고  $[\Delta P]$ 는 전력 변화량이다.

##### 2.2 전력 재분배와 부하 차단 (Generation Redispatch/Load Curtailment)

전력 재분배와 부하 차단은 발전기의 상태가 고장 상태로 부하를 만족할 수 없을 때와 전선과 변압기의 허용현도를 초과했을 때와 고장 상태로 전력을 공급할 수 없을 때, 시스템

의 부하량이 커 발전량이 이를 충족하지 못할 때, 그리고 위의 경우가 복합적으로 일어날 경우 전력 조류 계산식으로 각 성분의 과부하를 제거하기는 어렵다. 시스템의 전력 평형을 만족하면서 각 성분의 운전 정격 용량을 초과하지 않는 범위에서 선로에 걸린 큰 과부하를 부하 차단을 최소화하는 데 발전량 분배 계수(generation shift factor)를 이용한 선형 계획법을 사용한다.

선형 계획법을 적용에 사용되는 변수는 각 발전 버스에서 전력량과 각 부하 버스에서 부하 차단량이다. 각 부하 버스의 부하 차단량을 최소화하는 것을 목적으로 각 제약조건은 i) 시스템의 전력 평형을 유지하기 위해 시스템의 총 발전량과 부하 차단량의 합은 총 부하가 되어야 하고[식(7)], ii) 송전 선로와 변압기는 정격 용량 내에서 운전해야 한다[식(8),(9)], iii) 발전량은 양의 값을 갖고 발전 버스의 발전한도내에서 결정되고[식(10)] iv) 부하 차단량은 양의 값을 갖고 부하 버스의 총 부하량보다 커서는 안된다[식(11)]. 이러한 목적과 제약을 수식적으로 표현하면 목적 함수는

$$\min \sum_{m=1}^N R_m \quad (6)$$

로 나타내고, 각 제약 조건은 아래 식(7)~(11)과 같다.

$$\sum_{k=1}^N P_k + \sum_{m=1}^N R_m = TLOAD \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^N a_{ik} P_k + \sum_{m=1}^N a_{im} R_m \leq P_i^{\max} + \sum_{l=1}^N a_{il} P_{Lm} \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^N a_{ik} P_k + \sum_{m=1}^N a_{im} R_m \geq -P_i^{\max} + \sum_{l=1}^N a_{il} P_{Lm} \quad (9)$$

$$0 \leq P_k \leq P_k^c \quad (10)$$

$$0 \leq R_m \leq RL_m \quad (11)$$

위에서  $R_m$ 은  $m$ 부하 버스에서 부하 차단량을  $P_k$ 는  $k$ 발전 버스에서 발전량이다.  $TLOAD$ 는 시스템의 총 부하량을 나타내고  $RL$ 은 각 부하 버스에서 최대 부하량이다.

### 3. 간략화된 모의 기법 (Simplified Simulation Technique)

대전력 계통의 신뢰도 계산의 일반적인 과정은 각 발전 버스의 발전기를 계획하고, DC 전력조류계산을 이용하여 시스템의 상태를 해석한다. 그리고 송전선로 또는 변압기에 과부하를 검사하여 용량을 초과하면 발전량을 재분배하거나 부하를 차단하여 신뢰도 지수를 구한다. 이러한 과정을 그림 1에 나타냈다. 여기서 모든 시스템의 구성 성분에 최적화하여 재분배와 부하 차단량을 결정하므로 많은 계산량이 필요하며 많은 계산 시간을 요구한다. 이러한 계산 시간을 단축하기 위하여 간략화된 모의 기법(Simplified Simulation Technique :SST)을 본 논문에서 제안하였다. 여기서 SST는 발전 버스에서 가능한 발전량과 성분에 과부하정도에 따라 두 가지의 과정으로 나누며, 각 과정은 SST-I, SST-II로 표기한다. SST의 전반적인 계산 과정은 다음과 같다.

- Step-1. 고장구간을 선정  
각 발전기와 송전 선로 그리고 변압기의 상태 지속 시간을 구하여 고장 구간을 찾는다.
- Step-2. 각 버스에서 가능한 발전량과 시스템의 총 발전량을 계산한다. 각 구성성분의 상태를 선별하여 발전 가능한 발전기의 최대 발전량을 계산한다. 각 발전 버스에서 발전량의 총 합이 시스템의 총 발전량이다.
- Step-3. 시스템의 총 발전량과 총 부하량을 비교한다. 총 발전량이 총 부하량보다 크거나 같으면 Step-4로, 작으면 SST-II의 알고리즘을 따른다.
- Step-4. 각 성분에 대해 전력조류계산을 한 다음 SST-I의 알고리즘을 따른다.

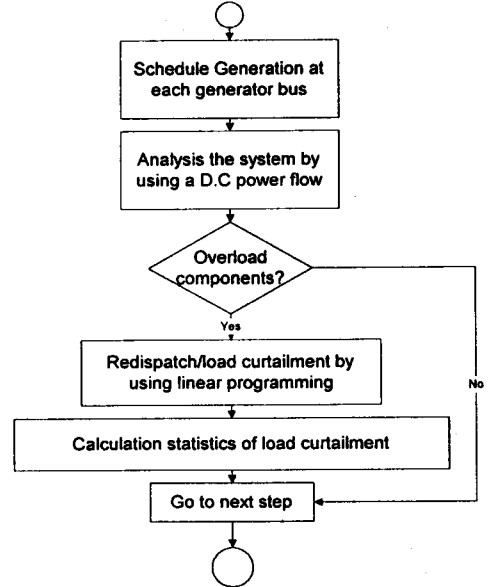


그림 1. 대전력 계통에서 신뢰도 계산을 위한 알고리즘

#### 3.1. SST-I

고장 구간에서 시스템의 총 발전량이 총 부하량보다 크거나 같을 경우 SST-I의 알고리즘을 적용한다. 이 알고리즘은 변압기 또는 송전선로의 과부하를 정격용량 한도내로 내리고 전력 재분배를 하기 위해 발전 용량이 충분하다는 가정으로 구성된다. SST-I의 알고리즘은 다음과 같다.

- Step-1. 부하량에 따라 발전 버스에서 발전량(%)을 계산
- Step-2. 각 버스에 정해진 전력과 발전량 분배 계수를 이용한 선형 전력 조류 계산법을 적용하여 송전선로와 변압기의 전력을 계산한다.
- Step-3. 어떠한 성분이 과부하라면, 세 가지의 경로를 통해 진행한다. 만약 과부하 정도가 10% 미만이라면 Step-4로 진행하고, 만약 과부하 정도가 10% 이상 30%미만이고 발전 예비력이 30%보다 크다면 Step-5로 진행하고, 과부하가 30%를 초과하고 발전 예비력이 30%미만이라면, Step-6으로 진행한다.
- Step-4. 발전량 분배 계수를 이용한 전력 재분배하는 과정이다. 각 전력 재분배한 후 선로의 전력 조류계산은 각 버스의 변화량만을 가지고 기존의 계산값을 수정하여 구하는 방식을 택한다. 여기서 다시 과부하 성분을 검사하여 과부하를 발견한다면, Step-6으로 진행하고 아니면 다음 시스템 상태로 진행하게 된다.
- Step-5. 과부하에 따른 전력 재분배를 하기 위해 축약한 선형 계획법을 사용한다. 축약한 선형 계획법은 과부하 선로만을 고려하여 발전량 배분 계수를 이용한 것이다. 각 전력을 재분배한 후 과부하 성분을 검사하여 과부하가 없으며 다음 시스템 상태로 진행하고 아니면 Step-6으로 진행한다.
- Step-6. 모든 과부하 성분을 포함하여 선형 계획법을 사용하여 전력 재분배를 수행한다. 이 과정에서 최종적으로 남은 과부하량을 차단하게 된다.
- Step-7. 다음 시스템의 상태를 계산한다. 이 논리적인 알고리즘은 그림 2에서 각 단계별로 나타냈다.

#### 3.2. SST-II

고장 구간에서 시스템이 총 발전량으로 총 부하량을 공급

할 수 없을 때 SST-II를 적용한다. 이 과정은 시스템이 이미 부하 차단율 결정된 상태이므로 부족한 발전량으로 시스템에 공급하기 위한 부하량을 결정한다. 이 부하량은 선형

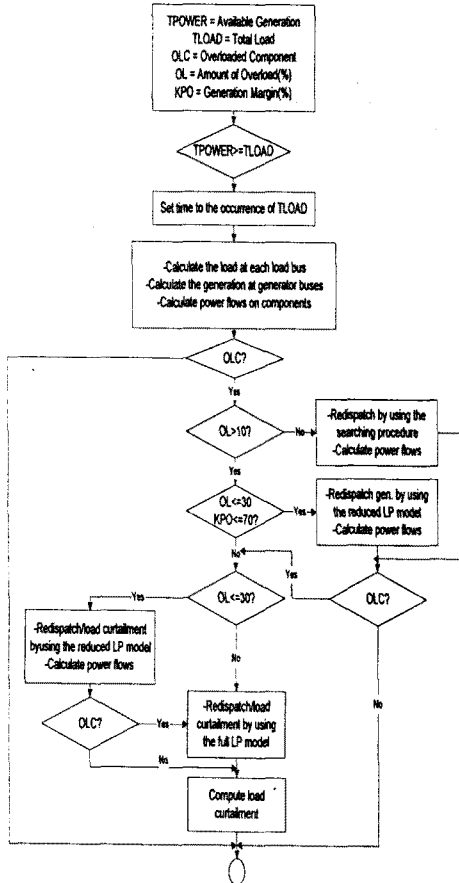


그림 2. SST-I의 알고리즘

계획법을 이용하여 부하 차단량을 계산하여 결정한다.

#### 4. 사례 연구

본 논문에서는 SST를 적용한 신뢰도 계산을 하기 위해 총 발전 용량 3405MW를 발전할 수 있는 10개의 발전 버스와 17개의 부하 버스로 구성된 IEEE-RTS 24버스 시스템에 적용하였다. SST를 적용하여 부하손실 확률(LOLP: Loss of Load Probability), 부하손실 빈도수(LOLF: Loss of Load Frequency), 평균 부하차단시간(DLC: average Duration of Load Curtailment), 평균 부하차단량(ADLC: Average Demand of Load Curtailment)을 구하였다.

Reliability Indices	With SST	Without SST
LOLP	0.08451	0.8485
LOLF(failure/year)	71.73	66.18
DLC(hours)	9.62	10.48
ADLC(MW/failures)	185.05	177.67
CPU(hour:min:sec)	3:08:16.8	8:40:33.9

표 1. SST를 적용하여 비교한 지수와 계산 시간

표 1에서는 SST를 적용하여 구한 지수와 기존의 방법으로 구한 지수를 비교하였다. SST의 적용함으로써 계산시간이 74% 줄어들었음을 알 수 있다. 그림 3에서는 각 지수를

SST를 적용하여 시뮬레이션한 것과 기존의 방법으로 시뮬레이션한 것을 비교했다.

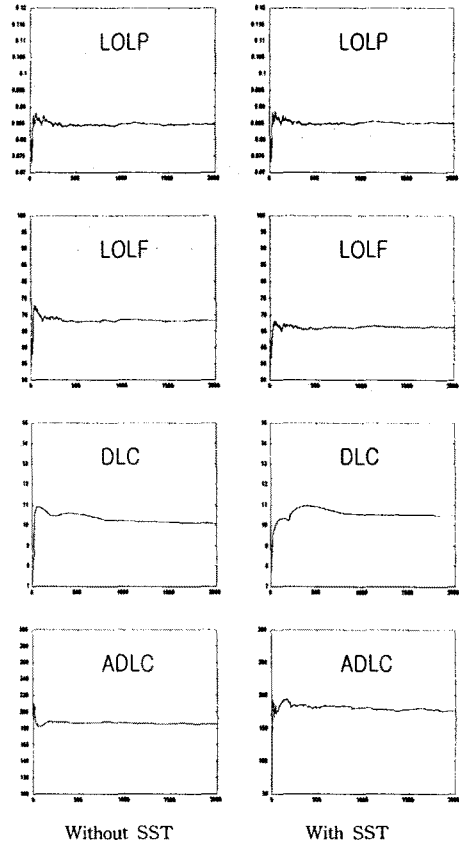


그림 3. SST와 기존의 방법을 시뮬레이션하여 얻은 지수

#### 5. 결론

본 논문에서는 대전력 계통의 신뢰도 계산에서 전력 재분배와 부하 차단하기 위해 기존의 선형 계획법을 사용하는 대신 SST를 적용하여 계산량을 줄여 기존의 방법의 단점인 많은 계산시간을 현저하게 감소시켰다. 제시한 SST를 사용하여 전력 재분배와 부하 차단을 빠른 시간에 수행하면서 각 신뢰도 지수들은 거의 일치하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R.Billinton and W.Li, *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods* Plenum Press, New York, 1994.
- [2] R.Billinton and W.Li, "A System State Transition Sampling Method for Composite System Reliability Evaluation," *IEEE Trans. of Power System*, Vol.8, No 3, pp. 761-770, Aug. 1993.
- [3] J.R.Ubeda and R.N.Allan, "Sequential Applied to Composite System Reliability Evaluation," *IEE PRECE.-C*, Vol.139, No.2, pp.81-86, Mar. 1992.
- [4] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, *Power Generation Operation and Control*, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [5] M.P.Bhavaraju, R.Billinton, N.D.Reppen, R.J.Ringlee and P.F.Albrecht, "Requirements for Composite System Reliability Evaluation Models," *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 3, No. 1, Feb. 1988.