

화력기 운전 특성을 고려한 Monte Carlo 발전시뮬레이션

차준민 (대전대학교 전기공학과)      오광해 (한국철도기술연구원 전력연구팀)      송길영 (고려대학교 전기전자전파공학부)

Monte Carlo Production Simulation  
Considering the Characteristics of Thermal Units

Jun-Min Cha (Daejin University)      Kwang-Hae Oh (Korea Railroad Research Institute)      Kil-Yeong Song (Korea University)

**Abstract** - This paper presents a new algorithm which evaluates production cost and reliability indices under various constraints of the thermal generation system.

In order to consider the operational constraints of thermal units effectively, the proposed algorithm is based on Monte Carlo techniques instead of analytical ones which have difficulty in modelling the units with additional constraints.

At that point, generating units are modelled into two types, base load units and peaking units. These generating unit models are used in state duration sampling simulation for which approach can readily consider the peaking unit operating cycles and easily calculates frequency-duration indices.

The proposed production simulation algorithm is applied to the IEEE Reliability Test System, and performs the production simulation under the given constraints. The results show that the proposed algorithm is accurate, reliable and useful.

고리증의 유연성이 우수한 Monte Carlo 기법에 기초한 새로운 발전시뮬레이션 방법론의 개발을 궁극적인 연구 목표로 하였다.

본 연구는 이에 대한 1단계로서, 화력발전 계통에 주안점을 두었다. 화력발전기는 운전특성상 기저부하 담당용 발전기 및 중간부하 담당용 발전기 및 첨두부하 담당용 발전기로 대별되어지므로, 본 연구에서는 이들의 운전모형을 2개상태 모델 및 다개상태 (Derated state 반영) 모델과 첨두부하용 발전상태 모델로 구분하여 모델링 하였다. 한편 시뮬레이션 기법으로는 이들 발전기의 운전 사이클을 반영하기 쉽고 다양한 신뢰도 지수(빈도-지속시간 포함)를 산출할 수 있는 State Duration Sampling 법(이하 SDSM)을 이용하였다.

본 연구의 발전시뮬레이션 알고리즘을 IEEE 신뢰도 시험계통에 적용하고 계산특성을 분석함으로써 유용성을 검토하였다.

2. Monte Carlo 방법에서의 발전기 및 부하 모델

몬테 카를로 기법은 초기에 핵분열시 일어나는 연쇄 반응을 분석하기 위한 방법으로 개발되었지만 계산시간이 과도하게 걸리기 때문에 여러 가지 제약이 많이 따랐다. 하지만, 최근의 디지털 컴퓨터의 발달로 확률론적인 구조분석 문제 등에 많이 적용되고 있다. 즉 몬테 카를로 기법은 확률과정의 결과인 특정한 사건의 기대치를 추정하는데 유용한 수학적 도구로서 자리잡고 있다. 이것은 확률변수와 난수발생, 시행결과의 통계적 분석, 그리고 분산 감소기법의 3가지로 구성되어 있다.

발전시뮬레이션에 대한 Monte Carlo법은 크게 순차적 접근방법인 State Duration Sampling과 비 순차적 접근방법인 System State Sampling으로 구분된다. 그러나 가장 중요한 것은 부하 모형 및 발전기 운전 모형의 모델링이며 이에 따라 계산 알고리즘의 형태와 효율성이 좌우된다.

2.1 발전기 모델

일반적인 화력발전기는 그림 1.과 같은 2개상태 모델로 표현되며 운전시간과 복구시간은 지수분포를 따른다. 여기서  $\lambda$ 와  $\mu$ 는 각각 MTTF, MTTR의 역수이며 복구율, 고장율을 뜻한다.

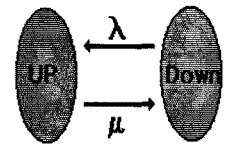


그림 1. 2개상태 모델

State Duration Sampling을 위한 가동시간 TTF와 복구시간 TTR에 대한 샘플링값은 다음 식(1)로부터 구할 수 있으며 운전-정지 사이클은 일련의 난수 U에 의해 연속적으로 모의된다.

$$TTF = -\frac{1}{\lambda} \ln U' \tag{1}$$

$$TTR = -\frac{1}{\mu} \ln U''$$

1. 서 론

전력계통의 발전비용 및 신뢰도지수를 산정하는 발전시뮬레이션은 전원개발계획, 재무계획, 전력요금책정 등 각종 계통계획 수립시 중요한 역할을 담당하고 있다.

종래의 발전시뮬레이션은 등가 부하지속곡선을 사용하는 해석적 방법이 주류를 이루었으며 부하와 발전기 사고등의 불확실성요소를 확률모형으로 반영시키기 위한 계산상의 효율성 극대화 선상에서 개발되어왔다. 이러한 해석적 방법은 압축된 부하자료를 사용함으로써 신속한 계산이 가능하고, 서로 다른 발전기 사고상황을 잘 반영시킬 수 있다. 그러나 이 방법은 알고리즘의 경직성 때문에 발전기 개별운전특성이나 계통 운용상의 제약 및 사회환경의 변화에 기인한 제약을 충분히 고려할 수 없다는 단점을 지니고 있다.

즉, 종래의 해석적인 방법으로는 화력발전기의 다개상태나 수력 및 양수발전기의 개별운전특성을 고려하기가 어렵다. 이는 상이한 운전제약을 갖는 발전기들이 부하지속곡선상에서 이들 제약을 만족하기 위해 발전기 투입순서에 있어서 경합할 수 있으며 이의 계산과정에서는 상충적분 및 역상충적분이 반복되므로 계산시간이 많이 소요되기 때문이다.

더욱이 최근 에너지자원의 수급문제와 사회환경의 변화로 인한 대기환경문제에 대한 관심이 고조됨에 따라 신 에너지원으로 부각되고 있는 각종 발전기들의 다양한 운전특성 및 환경제약과 같은 계통운용상의 제약을 보다 정확히 고려할 수 있는 발전시뮬레이션 알고리즘의 개발이 요구되고 있다.

따라서 본 연구자들은 수력발전기, 양수발전기, 연료 제약 화력발전기 뿐만 아니라 신에너지원의 개별 운전 제약과 함께 사회 환경적 제약을 모의하기 위해서, 알

이때 System State sampling을 위한 각 상태는 식 (2)로 정의된다.

$$S_i = \begin{cases} 0 & (\text{운전상태}) \text{ if } U_i \geq \text{FOR}_i \\ 1 & (\text{정지상태}) \text{ if } U_i \leq \text{FOR}_i \end{cases} \quad (2)$$

그러나, 실제 화력발전기는 밸브, 재열기, 펌프, 팬, 보일러 등과 같은 열사이클내의 부속 기기들의 고장이나 G/T와 같이 외기온도의 영향으로 감발되어 운전될 수 있다. 이와 같은 발전기 출력감소 운전은 그림 2와 같이 온 다개 상태 모델로 표현된다.

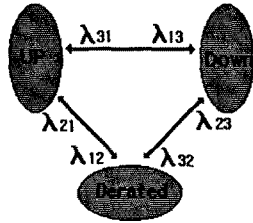


그림 2. 다개상태 모델

발전기가 현재 가동상태에 있는 경우에는 다음상태에 정지 또는 감발운전이 되므로 가동시간에 대한 샘플링 값  $T_{UP}$ 은 다음 식(3)으로 구할 수 있다.

$$T_{UP} = \min(T_{UP1}, T_{UP2}) \quad (3)$$

$$\text{단, } T_{UP1} = -\frac{1}{\lambda_{12}} \ln U'$$

$$T_{UP2} = -\frac{1}{\lambda_{13}} \ln U''$$

식 (3)에서  $T_{UP}=T_{UP1}$ 이면 다음 발전기운전상태는 감발 운전,  $T_{UP}=T_{UP2}$ 이면 다음 발전기운전상태는 고장정지가 되며 이러한 일련의 운전상태는 난수 U를 이용하여 운전-정지-운전 또는 운전-감발-정지 사이클로 모의된다.

이경우에, System State sampling을 위한 각 상태는 식 (2)를 확장하여 식 (4)로 구할 수 있다.

$$S_i = \begin{cases} 0 & (\text{운전상태}) \text{ if } U_i \geq \text{FOR}_i + \text{DER}_i \\ 1 & (\text{감발상태}) \text{ if } \text{FOR}_i \leq U_i < \text{FOR}_i + \text{DER}_i \\ 2 & (\text{고장상태}) \text{ if } U_i < \text{FOR}_i \end{cases} \quad (4)$$

한편 첨두부하 담당용 발전기의 모델은 IEEE Task Group에서 제안한 4개상태 모델[참고문헌 13]을 이용하였다.

## 2.2 부하 모델

본 연구에서의 부하 모델로는 계산소요시간의 단축을 기할 수 있는 부하지속곡선 대신에 전원계통 신뢰도지수를 가장 다양하게 산출할 수 있는 시간별 부하 변동곡선을 이용하였다.

## 3. SDSM에 의한 발전시뮬레이션

Monte Carlo 발전시뮬레이션에서 순차적 접근방법인 State Duration Sampling을 이용하는 경우에는, 먼저 각 발전기들의 운전이력을 작성한다. 각 발전기는 가동-정지-가동 또는 가동-감발-정지-가동 등의 운전주기로 운용되고 각 시간대별로 집계하면 전원계통 전체의 유효용량 이력이 작성된다.

다음에, 전원계통 전체의 유효용량 이력을 시간별 부하변동곡선의 부하레벨과 비교한다. 계통 유효용량이 부하수준을 초과하면 그 여력은 계통의 여유용량의 의미로, 계통 유효용량이 부하수준에 미달되면 공급지장 전력의 의미로 해석한다. 이때 계통의 공급지장이력은 지속시간(LLD<sub>i</sub>), 발생횟수(LLO<sub>i</sub>), 에너지(ENS<sub>i</sub>)로써 저장한다.

마지막으로는 모의 년수, N년간의 계통 공급지장 이력을 집계하여 공급지장 기대치 LOLE, 공급부족 에너

지 기대치 LOEE, 공급지장 빈도 LOLF 및 지속시간 LOLD 등의 신뢰도 지수를 다음과 같이 평가한다.

$$LOLE = \frac{\sum_{i=1}^N LLD_i}{N} \quad [\text{hr/yr}] \quad (5)$$

$$LOEE = \frac{\sum_{i=1}^N ENS_i}{N} \quad [\text{Mwh/yr}] \quad (6)$$

$$LOLF = \frac{\sum_{i=1}^N LLO_i}{N} \quad [\text{occ./yr}] \quad (7)$$

$$LOLD = \frac{LOLE}{LOLF} \quad (8)$$

## 4. 사례 연구

전술한 SDSM 방법을 IEEE 신뢰도 시험계통에 적용하고 그 결과를 해석적 방법에 의한 신뢰도지수 계산결과와 비교하여 계산의 정확도를 검토하였다. 또한 알고리즘의 수렴특성을 보완하기 위한 발전기 초기상태 설정에 대해서도 분석하였다.

### 4.1 시험계통

IEEE 신뢰도시험계통의 부하로는 총 8736시간의 1년 부하(최대부하: 2850 [Mw], 최소부하: 965 [Mw], 부하율 62.32 [%])를 사용하였으며, 발전계통은 32대의 발전기(총 설비용량: 3405[Mw])로 구성하였으며 수력의 에너지제약은 고려하지 않았다. 부하 및 발전기의 특성자료는 그림 3. 및 표. 1과 같다.

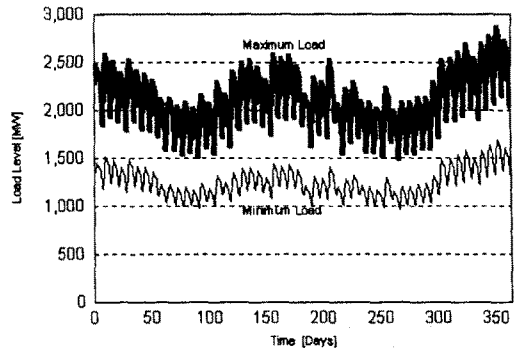


그림 3. IEEE 신뢰도 시험계통의 부하변동곡선

표. 1 IEEE RTS의 발전계통 특성자료

전원종별	용량 [MW]	대수 [EA]	사고율 [PU]	MTTF [Hour]	MTTR [Hour]	평균증분비용 [\$/MWH]
Nuclear	400	2	0.12	1100	150	5.45
Coal 1	350	1	0.08	1150	100	10.883
Coal 2	155	4	0.04	960	40	10.704
Coal 3	76	4	0.02	1960	40	13.494
Oil 1	197	3	0.05	950	50	20.730
Oil 2	100	3	0.04	1200	50	20.853
Oil 3	20	4	0.10	450	50	20.875
Oil 4	12	5	0.02	2940	60	25.875
Hydro	50	6	0.01	1980	20	0.0

## 4.2 결과 및 고찰

먼저 본 연구의 SDSM 방법의 정확성을 검토하기 위해 계통신뢰도지수 LOLE 계산결과를 종래의 해석적 방법의 결과와 비교하여 그림 4.에 보인다.

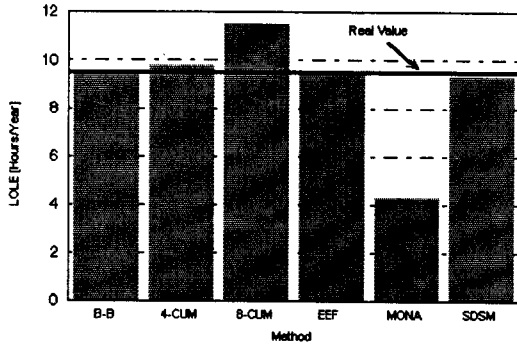


그림 4. 해석적 방법과 제안한 방법의 정확성 비교

그림 4.에서 state duration sampling 방법은 해석적 방법중에서 가장 정확하다고 알려진 Booth-Baleriaux법과 Equivalent Energy Function법의 결과와 거의 일치하는 정확한 결과가 얻어지고 있음을 알 수 있다. Cumulant 방법에서 4개의 Cumulant 와 8개의 Cumulant 를 사용한 경우를 비교하면 4개의 Cumulant 를 사용한 경우에 대해 8개의 Cumulant를 사용하여도 그 결과치의 정확도가 개선되지 않는바 Cumulant 방법의 정확도는 Gram-Charlier A-Type Expansion 을 나타내는 Cumulant 의 갯수에 무관하다는 것을 알 수 있다. 또한 시험계통의 가장 큰 용량의 발전기는 400[Mw]로서 계통 총 용량 3,405[Mw]의 10 [%]를 초과하고 있으며, 각 발전기의 사고율도 대부분이 0.1 이하이므로 Cumulant법의 정확도가 많이 떨어지고 있음을 확인할 수 있다. 한편 Mixture of Normals Approximation법에서는 부하를 표현하는 확률분포의 갯수에 따라 계산결과치가 크게 달라지므로 실제적으로 다수개의 Mode 가 존재하는 분포를 정확히 취급하여야 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 State Duration Sampling 방법의 수렴특성을 개선하기 위해, 발전기 초기상태 설정에 있어서 State Sampling 개념을 도입하였다. 그림 5.는 원래의 SDSM 방법 수렴특성과 개선된 SDSM 방법의 수렴특성을 공급지장에너지 기대치로 비교한 것이다.

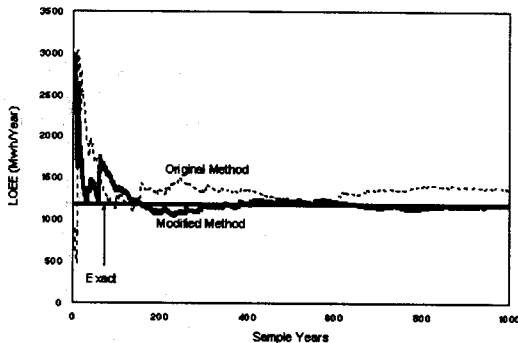


그림 5. SDSM의 수렴특성 개선

그림에서 시뮬레이션의 초기년도에서 원래의 SDSM 방법에서는 모든 발전기가 가동상태라는 가정 때문에 공급지장에너지 기대치가 매우 작고, MTTF에 가까운 다음연도에서는 매우 크게 계산되어 알고리즘의 수렴성

에 문제가 발생되었다고 판단된다. 그러나 발전기 초기 상태를 State Sampling에서와 같이 Random Variable 을 이용하여 지정하게 되면 이러한 문제점이 해소되어 나머지 연도들에서 그 수렴특성이 개선된다.

이러한 수렴성 때문에 화력의 운전특성을 반영한 시뮬레이션에서도 참고문헌의 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 화력발전계통의 운전특성을 충분히 반영하기 위해 Monte Carlo에 기초한 SDSM 발전시뮬레이션 알고리즘을 구현하였다.
2. 발전기 초기상태의 지정시, SSM 방법의 개념을 도입하여 알고리즘의 수렴특성 및 정밀성을 개선하였다.
3. 본 연구는 기존의 발전기 뿐만 아니라 신에너지원의 개별 운전제약과 함께 사회 환경적 제약을 모의하기 위한 발전시뮬레이션 방법론의 개발을 궁극적인 연구목표로 한 기초 연구인바, 이에 대한 연구가 진행중에 있다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 송 길영, '發變電工學', 동일출판사, 1990.
- [2] R.L. Sullivan, 'Power System Planning', McGraw-Hill, 1977.
- [3] X. Wang, J.R. McDonald, 'Modern Power System Planning' McGraw Hill Book Company, 1994.
- [4] M.Mazumdar etc., "Comparison of Algorithms for Computing Generating System Reliability Indexes", EPRI EL-2874, Contract TPS 81822, Feb. 1983.
- [5] M. Lin, Art Breipohl, Fred Lee, "Comparison of Probabilistic Production Cost Simulation Method", IEEE, Vol. 4, No. 4, pp. 1326-1333, October 1989.
- [6] 송 길영, 김 용하, 차 준민, 오 광해, "효율적인 Large Deviation 방법에 의한 발전시뮬레이션에 관한 연구", 전기학회 학술회의논문집, pp. 244-246, 1990년 11월.
- [7] 송 길영, 김 용하, 오 광해, "Mixture of Cumulants Approximation 법에 의한 총괄적인 발전시뮬레이션에 관한 연구", 고려대학교 생산기술연구소논문지, pp. 1-6, Vol. 27, 1991년 3월.
- [8] Kil Yeong Song, Yong Ha Kim, Jun Min Cha, Kwang Hae Oh, Sang Kyu Choi, "A Study on The Assessment of Power Generation Expansion Planning by Sensitivity Analysis", ICEE '95 Symposium P-24, pp.236-239, July 1995.
- [9] Kil Yeong Song, Yong Ha Kim, Jun Min Cha, Kwang Hae Oh, Woo Jang Jo, "Evaluation of Optimum Reliability Level Considering Supply Capability", Proceeding of the 6-th Annual Conference Power and Energy Society, IEE Japan, pp.59-64, August 1995.
- [10] E.O. Crousillat, Péter Dörfner, Pablo Alvarado, Hyde M. Merrill, "Conflicting Objectives and Risk in Power System Planning", IEEE Trans on Powersystems, Vol. 8, No.3 pp. 887-893, August 1993.
- [11] Mukerji, R. et al., "Creating Data Bases for Power Systems Planning", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 4 pp. 1669-1705, November 1988.
- [12] R.R Booth, "Power System Simulation Model Based on Probability Analysis", IEEE Trans, on PAS, Vol. 91, pp. 62-69, January/February 1972.
- [13] Roy Billington, Reliability Assessment of Electric Power System Using Monte Carlo Methods, 1994.