

MONA 및 MOCA법에 의한 발전시뮬레이션에 관한 연구

송길영\*      최재석\*\*      김용하\*

\* : 고려대학교      \*\* : 포항전문대학

A STUDY ON THE PROBABILISTIC POWER SYSTEM PRODUCTION  
COSTING SIMULATION BY MONA AND MOCA METHOD

K.Y. SONG\*      J.S. CHOI\*\*      Y.H. KIM\*

\* : Korea University      \*\* : Pohang Junior College

ABSTRACT

In probabilistic production costing simulation, cumulant method is widely used. But this method have some limitations in some cases. To overcome these serious drawbacks, MONA(Mixture of Normals Approximation) method was proposed. The MONA method uses multiple normals to represent the Equivalent Load Duration Curve. In this paper we investigate the MONA's characteristics by comparing other methods and derive the efficient formulae for MONA. Also, we propose the fundamental algorithm for Mixture of Cumulants Approximation(MOCA) which is the general case of MONA.

1. 서      론

전력계통에 있어서 발전시뮬레이션은 계통의 발전비용 및 신뢰도지수등 여러가지 정보를 제공하여 주므로 계통확충계획 및 운용계획에 있어서 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러므로 이의 정확하고도 신속한 계산이 요구되어진다. 이를 위하여 여러가지 방법들이 제안된바 있으며 이들 방법의 주된 차이는 수요에 발전기의 사고용량을 더한 동가부하 지속곡선의(이하ELDC라함)표현방법에 있다. 이러한 견지에서 확률론적 발전비용계산 알고리즘은 부하와 발전기의 사고용량을 직접 상승적분하는 exact방법과 이를 해석적인 방법으로 구하는 approximation방법으로 크게 나누어지며 이들 중 approximation 방법의 대표적인 방법이라 할 수 있는 cumulant방법이 계산속도가 빠르고 정확한 결과를 얻을 수 있으므로 근래 많이 사용되고 있다. 그러나 cumulant 방법은 이 방법자체가 정규분포를 가정하고 있으므로 규모가 적은 계통 및 사고율이 낮은 발전기를 포함하고 있는 계통에서는 그 결과치의 정확도가 떨어지는 결점을 지니고 있다. 이러한 cumulant법의 결점을 보완하기 위하여 본 논문에서는

첫째로, 계통부하 및 발전기를 여러개의 정규분포의 합으로 각각 표현하고 이를 상승적분함으로써 계통의 ELDC를 구하여 발전량 및 신뢰도 지수를 구하는 방법인 Mixture of Normals Approximation(이하 MONA라함)방법의 특성을 분석하여 이의 개선점을 제안하였으며, 둘째로 MONA방법의 일반화된 방법인 Mixture of Cumulants Approximation(이하 MOCA라함) 방법으로서 발전시뮬레이션을 행할 수 있는 기본적인 알고리즘을 제안하고 이를 IEEE신뢰도 시험계통(IEEE Reliability Test System)에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. 정식화

계통의 부하는 random variable ( $r.v$ )  $L$ 로 모델링 되어지며 이의 누적분포함수(c.d.f)인  $F_L(x)$ 는 식(2.1)과 같이 표현되어진다.

$$F_L(x) = 1 - \Omega(x) \tag{2.1}$$

단,  $\Omega(x)$ 는 식(2.2)로 정의되어지는 전지된 부하지속곡선이다.

$$\Omega(x) = \text{Prob} [L > x] \tag{2.2}$$

계통의 발전기 또한  $r.v$ 로써 모델링 되어진다. 여기서  $C_i$ 를  $i$ 발전기의 용량이라 하고  $A_i$ 를  $i$ 발전기의 가동용량이라 정의하면, 첫번째 발전기에서  $k$ 번째 발전기까지 투입된 후의 계통부하와 발전기 사고로 인한 사고용량의 합인 유효부하  $L_k$ 는 식(2.3)과 같이 표현되어지며

$$L_k = L + \sum_{i=1}^k (C_i - A_i) \tag{2.3}$$

계통의 ELDC인  $F_{L_k}(x)$ 는 식(2.4)와 같다.

$$\Omega_k(x) = \text{Prob} [L_k > x] \tag{2.4}$$

그러므로  $k$ 발전기의 발전량 기대치  $E_k$  및 공급부족전력량 EUE(Expected Unserved Energy)는 식(2.5), (2.6) 및 (2.8)과 같이 계산되어진다.

$$E_k = T \int_{\sum_{i=1}^k C_i}^{\sum_{i=1}^k C_i} C_i f_{k-1}(x) dx \tag{2.5}$$

$$= T \cdot [w_{k-1} (\sum_{i=1}^{k-1} C_i) - w_k (\sum_{i=1}^k C_i)] \quad (2.6)$$

여기서,  $w_k (\sum_{i=1}^k C_i) = \int_{\sum_{i=1}^k C_i}^{\infty} \mathcal{L}_{k+1}(x) \cdot dx$  (2.7)

$$EUE = T \cdot \int_{\sum_{i=1}^n C_i}^{\infty} \mathcal{L}_N(x) \cdot dx \quad (2.8)$$

여기서, T : 부하의 총지속시간  
N : 계통의 총발전기수

### 3. MONA 및 MOCA법에 의한 발전시물레이션

#### 3.1 MONA법

MONA법에 의한 발전시물레이션은 크게 다음과 같은 3단계로 행하여진다.

##### (1) 계통부하의 표현

고력대상 기간동안의 부하지속곡선은 시간부하를 크기순으로 나열한것이므로 이를 첨두부하, 중간부하 및 기저부하의 집단으로 구분지을 수 있다. 그러므로 부하지속곡선은 식(3.1)과 같이 근사화 되어진다.

$$\mathcal{L}^a(x) = \sum_{k=1}^K \alpha_k [1 - N(x; \mu_k, \sigma_k)] \quad (3.1)$$

여기서,  $\alpha_k = \frac{\text{k번째 집단의 부하의 지속시간}}{\text{고력대상기간동안 부하의 지속시간}}$  (3.2)

$$N(x; \mu_k, \sigma_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_k} \int_x^{\infty} e^{-\frac{(x-\mu_k)^2}{2\sigma_k^2}} \cdot dx \quad (3.3)$$

$\mathcal{L}^a(x)$  : 근사화된 계통의 부하지속곡선  
k : 부하집단의 갯수  
 $\mu_k$  : k번째 부하집단의 평균  
 $\sigma_k$  : k번째 부하집단의 표준편차

##### (2) 발전기의 표현

발전기가 계통에 투입될때마다 발전기의 고장대수에 따른 발전기군의 subset를 구성하고 이를 정규분포로 근사화시키기 위하여 각 subset에 대한 평균과 분산을 구하여 식(3.4)와 같이 발전기의 사고용량 r.v를 근사화 시킨다.

$$F_n^a(x) = \sum_{j=0}^r N(x; \mu_{nj}, \sigma_{nj}) \cdot P_{nj} \quad (3.4)$$

여기서, n : 계통에 투입된 발전기수  
 $P_{nj}$  : n대의 발전기가 투입되었을때 발전기 상태가 subset j에 존재할 확률

$\mu_{nj}$  : n대의 발전기가 투입되었을때의 subset j의 평균  
 $\sigma_{nj}$  : n대의 발전기가 투입되었을때의 subset j의 표준편차  
r : subset의 수

그러나 계통의 발전기수가 증가함에 따라 각 subset의 평균과 표준편차를 구하는데는 많은 계산량이 필요하므로 전체적인 계산소요시간이 증가하게 된다. 예를들어 계통에 n대의 발전기가 투입된 경우 j대의 발전기가 고장날 경우의 수는  $nC_j$ 가 된다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 아래와 같은 식(3.5) 및 (3.6)을 유도함으로써 각 subset의 평균과 표준편차를 직접계산하도록 하여 계산소요시간의 단축을 도모하였다.

$$\mu_{nj} = \sum_{i=1}^m C_i \cdot \frac{n-1 C_{j-1}}{nC_j} \quad (3.5)$$

$$\sigma_{nj} = [n-2 C_{j-2} \cdot (\sum_{i=1}^m C_i)^2 + (n-1 C_{j-1} - n-2 C_{j-2}) \cdot \sum_{i=1}^m C_i^2] / n C_j - (\mu_{nj})^2 \quad (3.6)$$

##### (3) ELDC계산 및 발전량, 신뢰도지수의 계산

계통부하와 발전기사고용량 r.v를 결합시킨 ELDC는 각부하 집단의 평균과 분산에 발전기 subset의 평균과 분산을 각각 더하여 이들의 가중치를 곱하여 식(3.7)과 같이 구할수 있다

$$\mathcal{L}_n^a(x) = \sum_{k=0}^K \sum_{j=c}^r \alpha_k P_{nj} [1 - N(x; (\mu_k + \mu_{nj}), [\sigma_k^2 + \sigma_{nj}^2]^{1/2})] \quad (3.7)$$

이로부터 발전량 및 EUE를 식(2.5), (2.6) 및 (2.7)을 사용하여 구한다. 본 연구에서는 MONA법이 근사법이므로 계산의 정확성을 위하여 식(2.6)을 사용하여 발전량을 계산하였다.

#### 3.2 MOCA법

본 방법에서는 ELDC를 Gram-Charlier Expansion으로 표현하였으며, 발전량기대치의 계산은 정확성을 위하여 Unserved Energy의 개념을 사용하였다. 이를 위하여 부하는 고력대상기간동안의 시간별 부하로써 모델링하였다. MOCA법에 의한 발전시물레이션 계산절차는 다음과 같다.

- (1) 부하를 k개의 구간으로 나누어 각 구간에 대한 Cumulant를 구하고 가중치  $\alpha_k$ 를 식(3.2)에 의하여 구한다.
- (2) 발전기의 Cumulant를 계산한다.
- (3) 부하의 구간별로 부하의 Cumulant와 발전기의 Cumulant를 더하여 Gram-Charlier Expansion의

계수를 계산한다.

- (4) 실제적으로 분포함수는  $-\infty$  에서  $\infty$  사이에 존재하나 EUE개념을 사용하기 위하여 이를 0에서  $\infty$  까지 계산한 zero order moment 및 first order moment인  $m_0$  및  $m_1$ 은 식(3.8) 및 (3.9)로 구하여진다.

$$m_0 = \sum_{k=1}^K \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(a^k)^2}{2}\right) \left[ \frac{\sigma_k}{6} (a^k)^2 - \frac{\sigma_k}{24} (3a^k - (a^k)^3) - \frac{(\sigma_k)^2}{72} (10(a^k)^2 - (a^k)^2 - 15a^k) \right] \right\} \quad (3.8)$$

$$m_1 = \sum_{k=1}^K \left\{ \frac{\sigma_k}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}(a^k)^2\right) \left[ 1 + \frac{\sigma_k}{6}(a^k)^2 - \frac{\sigma_k}{24}(1+2(a^k)^2 - (a^k)^2) - \frac{(\sigma_k)^2}{72}(9(a^k)^2 - (a^k)^2 - 9(a^k)^2 - 3) \right] \right\} + \sum_{k=1}^K (a^k \sigma_k) \cdot m_0 \quad (3.9)$$

여기서,  $a^k = -\mu^k / \sigma^k$

- (5) 그러므로 EUE는 식(3.10)과 같이 구해지며,

$$EUE = T \cdot m_1 \quad (3.10)$$

i번째 발전기의 발전량기대치는 식(3.11)로 구해진다.

$$E_i = EUE_{i-1} - EUE_i \quad (3.11)$$

4. 적용예

전술한 MONA 및 MOCA법에 의한 발전시뮬레이션 알고리즘을 표.1의 발전계통 및 그림.1과 같은 년간부하를 갖는 IEEE 신티도시험계통에 적용하였다.

표.1 발전기 특성자료

Type of unit	Size MW	NO. of unit	FOR	Ave. $\lambda$ S/MWh
Nuclear	400	2	0.12	5.45
Coal	350	1	0.08	10.883
Coal	155	4	0.04	10.704
Coal	76	4	0.02	13.494
Oil	197	3	0.05	20.730
Oil	100	3	0.04	20.853
Oil	20	4	0.10	25.875
Oil	10	5	0.02	37.500
Hydro	50	6	0.01	0
Total	3405	32		

단, 수력기의 에너지제약조건은 고려하지 않는 것으로 하였다.

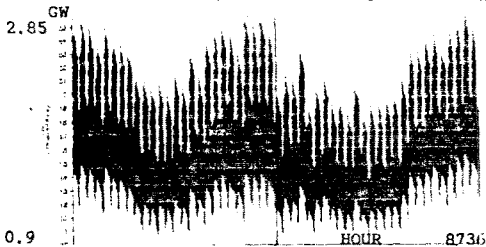


그림.1 년간부하변동곡선

우선, MONA법의 정확성을 알아보기 위해 MONA법에 의한 부하 지속곡선을 실제의 부하지속곡선 및 cumulant법에 의한 그것과 비교한 결과가 그림.2이며, 그림.3은 실제의 부하지속곡선을 기준으로 MONA법 및 cumulant법에 의한 부하지속곡선의 오차를 나타낸 것이다. 이때 MONA법의 부하집단의 갯수는 3개로 하였으며 부하집단 경계점의 선정은 결과에 큰영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

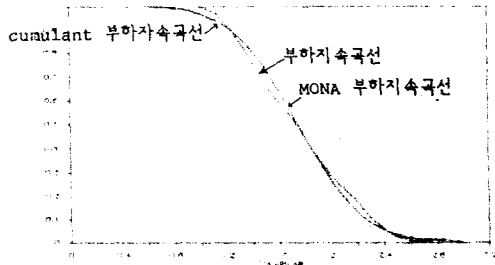
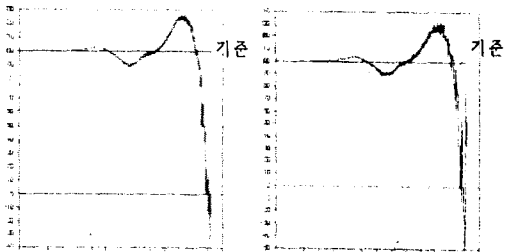


그림.2 각방법에 의한 부하지속곡선



a) Cumulant법의오차 b) MONA 법의 오차  
그림.3 각방법에 의한 부하지속곡선의 오차

그림.2 및 그림.3에서 보는바와 같이 MONA법에 의한 부하지속곡선은 실제의 부하지속곡선에 거의 일치하며 특히 첨두부하부근에서의 오차는 cumulant법에 비해 작음을 알 수 있다.

그러므로 MONA 법에 의한 발전시뮬레이션은 계통의 조건에 따라 신뢰도지수값이 부정확해지는 cumulant법의 단점을 보완하고 있음을 알 수 있다.

한편 그림.4는 Booth법에 의한 각발전기의 발전량을 기준으로 한 경우 각방법에 의한 발전량 기대치의 오차를 표시한 것이며, 그림.5는 Booth법, cumulant법, MONA법, 및 MOCA법의 순서로 각발전기의 발전량을 나타낸 것이다.

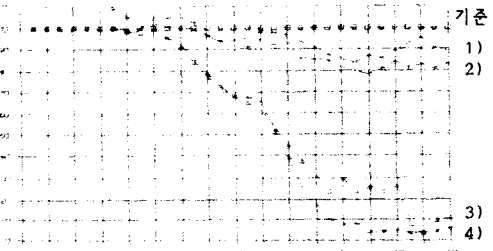


그림.4 각방법에 의한 발전량기대치의 오차

단, 그림.4에서 1); MOCA법 2); cumulant법 3); 식(2.6)에 의한 MONA법 4); 식(2.5)에 의한 MONA법을 나타내고 있다.

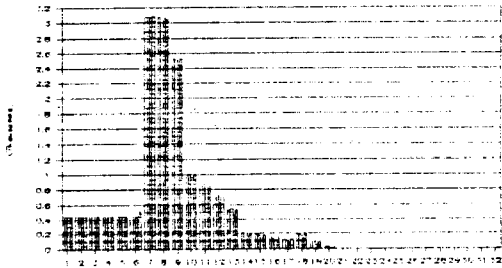


그림.5 각방법에 의한 발전량기대치

그림.4 및 그림.5에서 보논바와 같이 각방법에 의한 발전량은 첨두부하로 갈수록 차이가 나고 있으며 이는 Approximation방법의 특성에 기인하는것이다. 그림.4의 3), 4)에서 Approximation방법의 발전량계산은 식(2.5)보다 식(2.6)을 사용하는것이 정확함을 알 수 있다. 그러므로 이의 계산을 효율적으로 행할수 있는 알고리즘의 개발이 요구되어 진다. 또한 MOCA법에 의한 발전량이 Booth법과 가장 일치하고 있으며 이는 MOCA법의 유용성을 입증하는것이라 판단되어진다.

마지막으로 계통의 총발전량 및 신뢰도지수를 비교한 결과는 표2와 같다.

표.2 총발전량 및 신뢰도지수

	Energy Demand	Energy Gen	EDNS	EIR
Booth	15297.075	15295.898	1.177	0.999923
cumulant	15258.02	15261.547	-3.527	1.000231
MONA	15258.002	15257.831	0.171	0.999988
MOCA	15258.02	15256.934	1.085	0.999929

### 5. 결론

본 논문에서 연구한 MONA 및 MOCA법에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서는 MONA법의 적용에 있어서 각 subset에 대한 parameter를 직접계산할수 있는 계산식을 유도함으로써 계산량의 감소를 도모하였다.
- (2) MONA법의 일반적인 경우인 MOCA법으로써 발전시뮬레이션을 행할수 있는 기본적인 알고리즘을 제안하였으며, EUE의 개념을 사용하여 에너지계산을 함으로써 첨두부하를 담당하는 발전기의 에너지가 부정확한 Approximation 방법의 결점을 개선하였다.
- (3) 본 연구를 기초로하여 발전기까지 cumulant의 혼합으로 표현할 수 있는 더욱 일반화된 MOCA법 및 에너지의 효율적인 계산을 위한 알고리즘을 개발하여 보다 신속하고 정확한 결과를 얻을 수 있도록 발전시켜 나갈 계획이다.

### 참 고 문 헌

- [1] R.R. Booth : 'Power System Simulation Model Based on Probabilistic Analysis', IEEE PAS-91, No.1 pp62-69, 1972.
- [2] K.F Schenk, etc. 'A New Method for the evaluation of Expected Energy Generation and Loss of Load Probability', IEEE, PAS-103, No.2 pp294-303, 1984.
- [3] J.P. Stremel, etc : Production Costing using the Cumulant Method of Representing the Equivalent Load Curve : IEEE, PAS-99, No.5 Sept/oct. 1980, pp.1947-1956.
- [4] ZiaA.Yamagee, 'Production Simulation For Power System Studies : IEEE, PAS-104 No.12 Dec. 1985, pp3376-3381.
- [5] Rau.etc 'An Investigation of two Methods for the Probabilistic Energy Production Simulation' IEEE PAS-102 No.8 August. 1983 pp. 2543-2551.
- [6] Smith, 'Cumulant Method Equivalent Load Curve Calculation Performance for Small Generation Systems : IEEE PAS-102, No5. May 1983. pp.1302-1307
- [7] Allan etc 'The IEEE Reliability Test System', IEEE PWR5-1, No.4 NOV. 1986. pp1-7.
- [8] Pacific Gas and Electric Company, 'The Mixture of Normals Approximation of Equivalent Load Duration Curves', EPRI EA/EL-4266 oct. 1985.