

유전알고리즘과 Complex Method를 이용한 전력시스템의 신뢰도 지수 산정

유현호 · 김진오

한양대학교 전기공학과

Evaluation of Reliability Indices for Power Systems using Genetic Algorithm and Complex Method

Hyun-Ho Yoo and Jin-O Kim

Department of Electrical Engineering, Hanyang University

요 약

본 연구에서는 전력 시스템의 신뢰도 지수의 산정을 위하여, 모멘트 대입방법을 사용하여 정전 빈도수와 지속시간 계산에 대한 새로운 접근 방법을 제시하였다. 두 가지의 방식이 표현되었으며 그 첫 번째로 공급지장 기대치(LOLE)와 두 번째로 공급지장 빈도수(LOLF)를 계산하였다. 이러한 표현은 지수의 조합으로 되어 있으며 따라서 쉽게 적분이 가능하며 빠른 계산이 가능하다. 본 논문에서는 이러한 지수 분포 함수의 계수를 구하기 위하여 유전알고리즘과 콤플렉스 방법을 사용하였으며 제안된 계산 방식은 정확성과 효율성 측면에서 다른 방법과 비교하여 매우 우수함을 보이고 있다.

Abstract— This paper proposes a new approach for calculating the reliability indices of generation system, such as interruption frequency and duration, by using the moment matching technique. Two separate expressions are derived, one for the loss of load expectation(LOLE) and the other for the loss of load frequency (LOLF). These expressions are combination of exponentials and are therefore easily integrable and can be readily evaluated. In this paper, the parameters of the distribution functions of the LOLE and LOLF are evaluated by using Genetic Algorithm and Complex Method, and the proposed approach is quite comparable with the other methods at the aspect of accuracy and efficiency.

1. 서 론

현대의 전력계통에 있어서 산업화와 전산화에 따른 수요자의 양질의 전력공급 요구로 인하여, 신뢰도의 중요성은 점점 비중이 높아 가고 있다. 또한 여러 발전 회사가 경쟁 체제에 있는 선진국의 경우에는 전력회사의 신뢰성에 의하여 전력 수요가 좌우되기도 한다. 이에 따라 신뢰도 지수의 산출은 점점 그 중요성이 더해가고 있다고 할 수 있다.

신뢰도의 개념은 확률과 통계의 수학적 표현을 빌어 과거의 경험을 기초로 하여 미래를 예측할 수 있도록 일찌기 전력 산업에 도입되었으며, 전력 계통의 신뢰도는 현대와 같이 매우 크고 복잡한 전력 시스템에 있어서 시

스템의 적정 운전과 안전에 관해서 시스템의 성능을 평가할 수 있는 정량적인 평가수단을 제공해 준다.

전력 계통의 신뢰도는 크게 발전, 송전 및 배전 계통에 대한 3분야로 나뉘어질 수 있으며 발전 계통의 신뢰도 평가는 계산 과정상 다음의 3단계로 분류될 수 있다.

1. 공급 지장 용량(Capacity Outage)의 확률과 빈도수를 기술해 주는 발전 모델(Generation Model)의 계산
2. 매일 첨두 부하(Daily Peak Load) 혹은 시간당 부하(Hourly Load)를 묘사하는 부하 모델(Load Model)의 계산
3. 이 2 모델을 합성하여 공급지장 기대치(Loss-of-Load Expectation: LOLE), 공급지장 빈도수(Loss-of-Load Frequency: LOLF), 비공급 에너지 기대치(Expected

Unserved Energy· EUE) 등의 신뢰도 지수를 산정할 수 있도록 발전 예비력 모델(Generation Reserve Model)의 계산

발전 시스템의 신뢰도 지수를 계산하기 위한 방법들이 여러 문헌 속에 제시된 바 있는데, 이들은 공급지장 기대치(LOLE)의 계산에 초점을 맞춘 것과 빈도-지속시간 지수(Frequency & Duration Indices: F&D Indices)에 초점을 두어 개발된 것으로 대별될 수 있다. 일반적으로 전력 시스템의 신뢰도 지수로는 공급지장 기대치(LOLE)가 많이 쓰이고 있으나, 이외에 빈도-지속시간 지수(F&D Indices)를 추가로 계산하여 사용하는 방법을 빈도-지속시간 방법(F&D Method)이라 일컬어지고 있다.

이러한 신뢰도 지수들은 계산 방법에 따라 크게 2가지 범주로 분류될 수 있다 하나는 재귀 알고리즘(recursive algorithm)을 근거로 개발된 것^{[1][2]}과, 또 하나는 무한 전개식의 처음 몇 항을 사용하여 발전 시스템을 근사치로 표현하는 것^{[3][4]}이다 이 후자에 속한 방법들은 주로 공급지장 기대치에 관련되어 있으나 빈도-지속시간 지수(F&D Indices)도 이 방법을 이용하여 계산한 논문^[5]도 찾아 볼 수 있다

이상과 같이 신뢰도 평가를 위한 여러 방법이 개발되었지만, 각 방법은 그 나름대로 장점과 단점을 보유하고 있다. 해석적 방법은 전개식의 항의 수를 늘리는 대신 다변수 연속 분포 함수를 도입하여, 사용된 모멘트의 수를 증가시켜 근사해를 구할 수 있으며, 이를 위하여 확률과 빈도수의 모멘트 표현식이 개발되었다. 그러나 이러한 방법들은 근래의 복잡한 전력시스템에 적용할 때 발전 설비가 증가함에 따라 상태의 수가 지수적으로 증가하여 신뢰도 지수의 계산에 어려움이 따르고 있으며 이에 따라 신뢰도 지수의 계산 시간과 계산 과정이 갈수록 복잡해지고 있으며 과중한 계산 시간이 부담이 되고 있다. 본 논문에서는 확률에 대한 분포함수를 이용하여 발전 시스템의 공급지장 용량의 확률과 빈도수에 대한 다변수 분포함수를 가정하고 발전 설비의 주어진 각 계수로서 모멘트 대입방법(Moment Matching Method)을 이용하여 분포함수의 계수를 결정하여 이를 지수의 근사치로 사용함으로써 계산시간을 단축하고자 한다. 모멘트 대입방법으로 얻어진 비선형 방정식의 해는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)과 콤플렉스 방법(Complex Method)을 병용하는 2단계의 알고리즘을 사용하여 해결하였다. 즉 일반적으로 제약조건이 많고 비선형성을 갖는 문제에서는 전 탐색영역을 고루 탐색하는 광역 탐색 특성과 극부 최적값에 빠지지 않는 특성을 지닌 유전 알고리즘을 이용하여 계수를 구한 후 비선형 계획법의 일종인 콤플렉스 방법으로 그 해의 탐색 속도를 빠르게 하였다.

2. 발전 모델링(Generation Modeling)

일반적으로 여러개의 발전기로 구성되어 있는 시스템에서 각 발전기는 통계적으로 고장 확률을 지니고 있으며 이러한 발전기의 고장은 각각 독립적인 확률변수(random variable)로 취급될 수 있다. 즉, 발전용량 Q_i 를 가지고 있는 i 번째 발전기가 고장날 확률을 p_i 라고 한다면, 이 발전기는 다음과 같은 이산분포(discrete distribution)을 갖는 확률변수 Y_i 로 취급된다.

$$\text{Prob}[Y_i=Q_i]=p_i \quad (1)$$

따라서 전체 발전시스템의 공급지장 용량은 다음과 같이 각 발전기 확률변수 Y_i 의 산술합으로 표현되나

$$Y=Y_1+Y_2+\dots+Y_n \quad (2)$$

이의 실제 계산은 각 이산분포를 갖는 확률변수의 상승과정(Convolution Process)이 필요하게 되어, 시스템의 발전기 개수 G 가 많을 경우 그 계산시간은 지수적으로 증가하게 된다. 공급지장 용량의 누적확률(Cumulative Probability) $P_g(X)$ 과 누적 빈도수(Cumulative Frequency) $F_g(X)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} P_g(X) &= \text{Prob}[Y>X] \\ F_g(X) &= \text{Freq}[Y>X] \end{aligned} \quad (3)$$

재귀 알고리즘에서 공급지장 용량의 누적확률과 누적 빈도수는 한번에 한 발전기씩 차례로 더해짐(Unit Addition Algorithm)으로서 구해진다. 이러한 과정은 조건부 확률(Conditional Probability) 개념을 이용하여 다음의 식으로 표현될 수 있다^[6].

$$\begin{aligned} P_g(X) &= (1-p_i)P_{g-1}^+(X) + p_i P_{g-1}^+(X-Q_i) \\ F_g(X) &= \sum_{i=1}^G [P_{g-1}^+(X-Q_i) - P_{g-1}^+(X)] f_i \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $P_{g-1}^+(X)$ 와 $P_g(X)$ 는 i 번째 발전기가 더해지기 전과 후의 X [MW]와 같거나 큰 공급지장 용량의 누적 확률, $F_{g-1}^+(X)$ 는 X [MW]와 같거나 큰 공급지장 용량의 누적 빈도수, 그리고 Q_i , p_i , f_i 는 각각 i 번째 발전기의 공급지장 용량, 강제고장 확률(Forced Outage Rate: FOR), 고장 빈도수를 나타낸다. 이 식을 이용하여 사례연구에 나타나 있는 IEEE-RTS(Rehability Test System)^{[6][7]}에 대하여 각 공급지장 용량 X [MW]에 대한 누적확률 $P_g(X)$ 와 누적 빈도수 $F_g(X)$ 를 구하여 Table 1에 나타내었다. 이 Table에서 볼 수 있듯이 IEEE-RTS와 같이 32개의 발전기만을 갖는 시스템에서도 이산 분포의 상태의 수가 무한히 많으며, 10^8 order에서 절단하였을 때 그 상태의 수가 1872였다. 따라서 이러한 재귀 알고리즘은 그 과도

Table 1. Generation Model of IEEE-RTS.

Capacity Outage (X)	Probability P _g (X)	Frequency F _g (X)
0	1.00000000	0.00000000
12	0.76360488	0.00665996
20	0.73948294	0.00692931
24	0.63441843	0.00755452
⋮	⋮	⋮
230	0.35228154	0.00439818
231	0.35228130	0.00439814
232	0.34906480	0.00432293
⋮	⋮	⋮
1300	0.00040052	0.00002074
1301	0.00039753	0.00002053
1302	0.00039740	0.00002051
⋮	⋮	⋮
1811	0.00000028	0.00000003
1812	0.00000027	0.00000003
1813	0.00000025	0.00000003
⋮	⋮	⋮

1872 states when truncated at probability of 10⁻⁸.

한 계산시간 때문에 실제 시스템에 적용하기가 곤란하며, 이의 근사적인 접근법으로 이러한 이산분포를 연속 분포함수로서 근사화함으로써 실제 시스템에의 적용 가능성을 보였다

3. 연속 분포함수로의 근사화

발전 시스템의 공급 지장 용량의 확률과 빈도수에 대한 연속 다변수 분포함수를 가정하고, 이 연속 분포함수의 모멘트와 원래의 이산분포를 갖는 발전 설비의 모멘트를 비교하여 연속 분포함수를 결정짓는 방법을 모멘트 대입 방법(Moment Matching Method)이라 일컫는다. 비교대상이 되는 2 분포함수의 모멘트가 무한히 일치하면 2 분포함수는 동일하다고 할 수 있으나, 실제적으로 처음 몇 모멘트만 일치시킴으로서 근사적으로 사용된다. 이렇게 일단 공급지장 용량 X에 대한 누적확률 P_g(X)와 누적 빈도수 F_g(X)가 이산분포 대신 연속 분포함수로서 근사적으로 표현되면 누적확률과 빈도수는 쉽게 구해질 수 있다. 연속 분포함수로는 감마 분포(Gamma Distribution)와 와이블 분포(Weibull Distribution)를 사용하였으며 확률과 빈도수에 대한 분포함수를 각각 나누어 고려하였다

3-1. 공급 지장 확률과 빈도수

어떤 이산 분포에 대한 평균값이 주어지면 감마 분포는 계수들을 일정 비율로 변화시킴으로서 넓은 범위의 다양한 모양을 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 공급 지장 용량을 모델링하기 위해 n개의 감마 분포의 가

중치 합으로서 구성된 분포를 사용하였으며, 이 (3n-1) 계수를 갖는 분포는 식(5)에 주어져 있다.

$$g(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha_i)} \sum_{i=1}^n w_i \rho_i e^{-\rho_i x} (\rho_i x)^{\alpha_i - 1} \tag{5}$$

여기서 ρ_i=i번째 감마 분포의 크기계수
 α_i=형태 계수
 w_i=가중인자
 Γ(·)=감마 함수
 이며 가중인자의 합은

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \tag{6}$$

이 된다. g(x)의 (3n-1)개의 계수는 α₁, ..., α_n과 ρ₁, ..., ρ_n과 w₁, ..., w_n이며 w_n은 식 (6)으로부터 w₁, ..., w_{n-1}로 얻을 수 있으므로 (3n-1)개의 계수에서 제외된다. 감마 분포 g(x)의 k번째 모멘트는 식(7)과 같으며,

$$m_k = \alpha_i^{[k]} \left(\frac{w_1}{\rho_1^k} + \frac{w_2}{\rho_2^k} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n^k} \right) \tag{7}$$

여기서 α_i^[k]는 α_i(α_i+1)⋯(α_i+k-1)로 정의된다. 따라서 주어진 발전 시스템의 공급 지장 용량의 모멘트와 식(5)에 나타난 g(x)의 처음 (3n-1)개의 모멘트를 대응시키면 이산분포 대신 연속 분포함수의 (3n-1)개의 계수가 결정되어 g(x)를 구할 수 있다. 따라서 식(3)의 정의로부터 누적 공급 지장 확률은 식(8)과 같이 표현된다

$$P_g(X) = \sum_{i=1}^n \left[w_i e^{-\rho_i X} \sum_{j=1}^{\alpha_i} \frac{(\rho_i X)^{j-1}}{(j-1)!} \right] \tag{8}$$

이상과 같이 이산분포를 갖는 공급지장 확률은 연속 분포인 다변수 감마 분포함수로 근사적으로 표현될 수 있으나, 위의 식(8)의 Σ의 중복에 따른 계산의 복잡성과 계산시간을 더욱 더 줄이기 위하여, 와이블 분포를 이용하여 같은 결과를 얻을 수 있다. 와이블 분포 또한 계수에 따라 다양한 모양을 나타낼 수 있으므로 신뢰도 계산 분야에서 많이 사용되고 있으며, 감마 분포보다 그 계산 과정이 용이하므로 본 논문에서 연속 분포함수로 채택하여 그 결과를 감마 분포함수와 비교하였다. n개의 와이블 분포로 구성된 복합 와이블 분포함수는

$$g(x) = \sum_{i=1}^n w_i a_i b_i x^{a_i - 1} \exp[-a_i x^{b_i}] \tag{9}$$

이며, 여기서 가중인자 w_i의 합은 1로서 주어지므로, 감마 분포함수와 마찬가지로 a₁, ..., a_n, b₁, ..., b_n과 w₁, ..., w_{n-1}의 (3n-1)개의 미지수를 갖게 된다. 감마 분포함수와 같은 방법으로 식(9)의 와이블 분포 g(x)의 k번째 모멘

트는 식(10)과 같이 주어지며

$$m_k = w_1 a_1 \frac{k}{b_1} \Gamma\left(1 + \frac{k}{b_1}\right) + \dots + w_n a_n \frac{k}{b_n} \Gamma\left(1 + \frac{k}{b_n}\right) \quad (10)$$

여기서 Γ 는 다음과 같이 정의되는 감마함수이다.

$$\Gamma(X) = \int_0^{\infty} t^{X-1} e^{-t} dt \quad (12)$$

이때의 와이블 분포함수에 의한 누적 공급지장 확률은

$$P_g(X) = \sum_{i=1}^n w_i \exp[-a_i x^{b_i}] \quad (11)$$

와 같이 간단히 표현된다.

감마, 혹은 와이블에 의한 공급지장 빈도수의 표현은 공급지장 확률과 동일한 방법으로 적용된다. 즉, 원래의 발전설비의 공급지장 용량의 모멘트 대신 공급지장 빈도수의 모멘트를 구하여 식(7) 혹은 (10)에 대입하면 누적 빈도수에 대한 감마 혹은 와이블의 계수를 구하고 따라서 누적 공급지장 빈도수 $F_g(X)$ 를 구할 수 있다

3-2. 지수의 계산

신뢰도 지수는 앞서 구한 확률분포 함수 $P_g(X)$ 와 $F_g(X)$ 를 이용하여 구하여 질 수 있다. 즉, 공급지장 기대치(LOLE)의 정의로부터

$$\begin{aligned} LOLE &= \sum \text{Prob} [\text{발전 가능 용량} < \text{부하}] \\ &= \sum P_g(C-L_j) \end{aligned} \quad (12)$$

로 표현되며, 여기서 C 는 시스템의 총 설비용량, L_j 는 j 시간 동안의 부하를 의미한다. 본 논문에서는 사례연구에 나타나 있는 IEEE-RTS^{[6],[7]}의 연간 부하 모델을 사용하였으며 참고로 이 부하를 그래프로 표현하면 Fig. 1과 같다. 같은 방법으로 공급지장 빈도수(LOLF)는

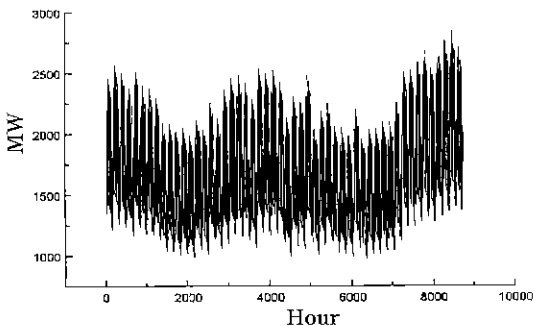


Fig. 1. Annual Hourly Load Model for the IEEE-RTS.

$$LOLF = \sum_j [F_1^j + F_2^j] \quad (13)$$

와 같이 표현되며, 여기서 F_1^j 와 F_2^j 는 각각 j 시간 동안의 발전과 부하에 의해 발생한 전력 부족 빈도수를 나타낸다. 즉

$$\begin{aligned} F_1^j &= F_g(C-L_j) \\ F_2^j &= [P_{g, j-1}(C-L_{j+1}) - P_{g, j}(C-L_j)] \end{aligned} \quad (14)$$

4. 유전자 알고리즘과 컴플렉스 방법

앞에서의 모멘트 대입 방법에 의하여 근사화된 감마 혹은 와이블 같은 연속 분포함수의 계수를 구한 후, 구해진 함수에 식(12) 혹은 (13)과 같이 부하모델을 적용하여 신뢰도 지수인 전력 부족 기대치와 전력 부족 빈도수를 구할 수 있었다. 이러한 모멘트 대입 방법에 의해 식(7) 혹은 (10)에서와 같이 $(3n-1)$ 개의 방정식이 얻어지는 바, 이 $(3n-1)$ 개의 연립 방정식의 해를 구함으로써 연속 분포함수의 계수가 결정된다. 이 연립 방정식의 해를 구하는 방법으로서, 일반적인 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 방법이나 그밖의 여러 방법이 있을 수 있겠으나, 이 방정식은 비선형으로서 그 미분항을 구하기가 쉽지 않을 뿐 아니라, 구해진 자코비안(Jacobian)이 심한 악조건(ill-conditioned) 행렬이 되므로, 일반적인 수치해법으로는 그 해를 구하기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 2단계의 알고리즘으로 분포함수의 계수를 결정하였다. 즉 식(7)을

$$f(x) = m_k - \alpha_i \left(\frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n} \right) \quad (15)$$

라 놓고 $\min f(x)$ ($f(x) \geq 0$)를 구하는 비선형 계획법으로 간주하였으며, 1) 유전 알고리즘을 이용하여 $f(x)$ 의 최소값을 만족하는 $(3n-1)$ 개의 계수의 근사해를 구하고 2) 이를 초기치로하여 비선형 계획법의 일종인 컴플렉스 방법을 적용하여 확률과 빈도수에 대한 분포함수의 계수를 결정하였다.

제약조건이 많고 비선형성을 갖는 문제에서는 일반 최적화 방법이 시간이 빠른 반면에 초기치에 매우 민감하므로, 전 탐색 영역을 고루 탐색하고 국부 최적값에 빠지지 않기 위해서 유전 알고리즘을 이용하여 초기치를 설정하였다. 유전 알고리즘을 수행시 모두 3번 반복 수행하였으며, 한 번 수행에서 총 세대수 2,000세대로 하였다. 사용된 진화 연산자로는 교배 연산자의 경우 발견적 학습 교배(Heuristic Crossover)이며, 돌연변이 연산자의 경우 비균일 돌연변이 연산자(Non-Uniform Mutation)를 사용하였다. 유전 알고리즘의 탐색 방법은

다음과 같다. 처음 탐색시에는 탐색 영역(Searching Boundary)을 매우 넓게 선정하고, 여기서 얻은 최적해에 정해진 퍼센트 값을 곱하여 다음 수행시 필요한 탐색 영역을 정하게 한다. 또한, 퍼센트 값도 반복 수행과정 중 조정하게 되어 탐색 영역은 반복 수행할수록 좁아지게 만든다. 마지막 과정에서 얻은 최상값을 해로 선정하게 된다. 그러나 유전 알고리즘의 경우 국부해에 빠지지 않을 가능성은 매우 큰 반면, 일단 최적해에 근접한 뒤에 접근하는 소요시간이 크므로 유전 알고리즘 탐색 과정을 수행후 일반 최적화 과정을 이용한다. 일반 최적화 방법으로는 컴플렉스 방법을 사용하였으며 이의 개략적인 알고리즘은 Fig. 2와 같다.^[8]

컴플렉스 방법은 난수를 발생하여 해를 탐색하는 임의 탐색(Random Search)법의 일종이므로 feasible 영역에 들어오는 초기치를 선정하는 것이 무엇보다 중요하다

며, 일단 feasible한 초기치를 가지면 빠른 시간내에 탐색을 완료한다. 따라서 본 논문에서 사용한 유전 알고리즘과 컴플렉스 방법의 결합은 이 2방법의 장점을 취한 탁월한 알고리즘이라 할 수 있으며, 이 방법은 다른 최적화 문제에도 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 사례연구

본 논문에서는 IEEE-RTS^{[6][7]}를 사용하여 몇가지의 사례 연구 결과가 보고되었다. 이 RTS 시스템은 12 MW 부터 400 MW까지의 용량을 갖는 32 개의 발전 설비로서 구성되어 있고 총 설비용량은 3405 MW, 첨두 부하는 2850 MW이다. 참고로 이 시스템의 발전 설비 시스템의 데이터가 Table 2에 나타나 있다. 또한 이 설비는 1년을 8736시간으로 구분하여서 각 시간별 요일별 월별 부하량을 표시하였으며, 이 시스템의 연간 부하변동은 앞의 Fig. 1에 나타나 있다. 이 시스템은 크고 작은 여러대의 발전 설비의 혼합체이므로 본 논문에서 제안된 방법과 기존의 다른 방법과 비교 분석하기에 적절하며, 이러한 목적으로 이 시스템을 이용하여 결과를 계산, 비교 분석하였다. 이 모든 경우에 있어서 공급지장 기대치는 (시간년), 공급지장 빈도수는 (빈도수/년)의 단위로 해서 계산되었다.

강제고장 확률에 대한 공급지장 기대치와 공급지장 빈도수의 정확도와 민감도를 비교하기 위하여 정상적인 FOR과 FOR/2, FOR/4를 구하였다. FOR/2, FOR/4를 구하기 위하여 사고발생율(Mean Time to Failure MTTF)은 각각 2와 4로 나누어졌으며, 사고복구율(Mean Time to Repair: MTTR)은 그에 따라 조정되었다. 각 함수의 (3n-1)개의 변수에 대하여 n을 2, 3, 4로 변화시켜 가며 각 함수의 계수를 구하여 보았다. 공급지장 확률에 대한 감마와 와이블 계수의 값들이 Table 3에 나타나 있으며 공급지장 빈도수에 대한 값들이 Table 4에 나타나 있다. 또한 이렇게 구해진 계수들을 가지고 신뢰도 지수를 산

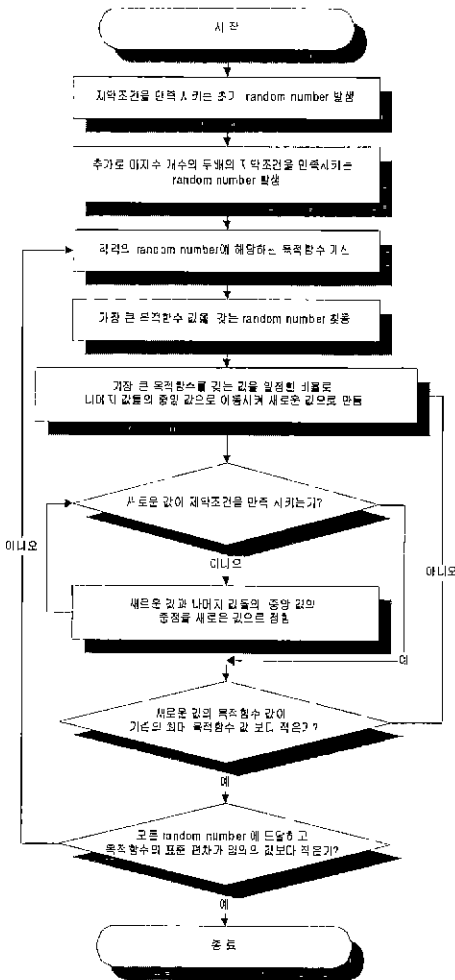


Fig. 2. Flow Chart of The Complex Method.

Table 2. Generation System for IEEE-RTS.

Number of Units	Capacity [MW]	Forced Outage Rate	MTTF [hours]	MTTR [hours]
5	12	0.02	2940	60
4	20	0.1	450	50
6	50	0.01	1980	20
4	76	0.02	1960	40
3	100	0.04	1200	50
4	155	0.04	960	40
3	197	0.05	950	50
1	350	0.08	1150	100
2	400	0.12	1100	150

Table 3. The Parameters of Gamma and Weibull Distributions for Loss of Load Probability(LOLP).

Distributions	<i>n</i>	Parameters	Normal FOR	FOR/2	FOR/4
Gamma	2-Term	α	4.98440	3.82744	3.64998
			4.02786	3.67065	4.59711
		ω	0.50186	0.67527	0.83244
			0.49850	0.32453	0.16848
		ρ	0.21477	0.64416	0.93866
			0.01019	0.01188	0.01584
	3-Term	α	3.63219	15.3656	8.14127
			8.99456	57.9201	3.94813
			2.17862	4.72930	1.00004
		ω	0.45624	0.68304	0.80868
			0.14879	0.05741	0.18685
			0.39493	0.25948	0.00444
	ρ	0.01368	2.17018	5.38060	
		0.01537	70.0162	0.01448	
		1.68419	60.0171	7.96443	
Weibull	4-Term	α	8.99979	8.83872	8.99652
			6.73473	8.99974	5.94155
			7.80706	4.04967	7.84008
			9.00000	8.07363	7.95114
		ω	0.18928	0.22775	0.02168
			0.41209	0.07129	0.15692
			0.01479	0.69451	0.71487
			0.38374	0.00649	0.10677
		ρ	0.01575	0.03181	0.01967
			4.68471	0.01801	0.02279
			7.89792	0.55324	6.78056
			0.03457	0.17514	2.46982
2-Term	ω	0.60860	0.38543	0.20511	
		0.39107	0.61464	0.79487	
	a	378.223	298.709	279.661	
		7.27007	1.56860	1.27720	
	b	1.62432	1.57981	1.72069	
		9.30192	73.7289	1.00004	
3-Term	ω	0.55072	0.01680	0.00057	
		0.00145	0.62160	0.16382	
		0.44724	0.36175	0.83591	
	a	405.755	421.942	949.893	
		1235.80	2.64341	328.716	
		18.6138	294.260	4.69920	
	b	1.81442	14.8042	225.718	
		597.429	477.895	2.33641	
		573.056	1.53885	69.3494	
4-Term	ω	0.11713	0.75805	0.16378	
		0.39503	0.02812	0.00962	
		0.48750	0.00062	0.00612	
			0.00043	0.21311	0.82042
	a	202.061	15.1878	288.581	
		0.01045	698.200	474.475	
		425.495	1150.25	604.716	
			1312.82	340.912	3.22469
	b	675.228	196.012	2.13751	
		1043.72	168.208	11.6326	
		1.82892	152.218	2.96937	
			117.040	424.977	44.5544

Table 4. The Parameters of Gamma and Weibull Distributions for Loss of Load Frequency(LOLF).

Distributions	<i>n</i>	Parameters	Normal FOR	FOR/2	FOR/4
Gamma	2-Term	α	2.14470	1.88008	1.64868
			6.52689	4.43106	3.78879
		ω	0.53571	0.55805	0.58861
			0.46426	0.44185	0.41142
		ρ	0.01128	0.02326	0.02479
			0.01274	0.01233	0.01327
	3-Term	α	8.99999	8.98527	1.55810
			7.88830	8.54278	6.30615
			4.33621	3.58448	1.00385
		ω	0.35355	0.33184	0.75698
			0.54046	0.14173	0.15678
			0.10598	0.52645	0.08623
	ρ	0.01559	0.23429	0.01216	
		0.03147	0.01694	0.01660	
		4.03309	0.01576	1.57406	
Weibull	4-Term	α	12.1941	18.6945	4.79062
			7.42124	1.00629	12.4961
			18.9959	12.1876	19.9612
			1.81263	12.8596	13.3340
		ω	0.22175	0.28743	0.40929
			0.63900	0.35450	0.42620
			0.05382	0.28896	0.14194
			0.13919	0.06911	0.02261
		ρ	0.01862	0.14683	0.01774
			0.02444	0.01695	0.16122
			9.99976	0.03373	9.47096
			7.96464	0.02124	0.02357
2-Term	ω	0.76197	0.28703	0.08851	
		0.23798	0.71287	0.91145	
	a	418.164	409.423	442.377	
		61.9561	141.229	135.893	
	b	1.71229	1.99396	3.14948	
		23.2587	1.02196	1.04770	
3-Term	ω	0.19171	0.88995	0.92143	
		0.08624	0.01057	0.00696	
		0.72199	0.09952	0.07155	
	a	636.428	169.692	134.927	
		543.067	893.028	778.563	
		213.356	500.831	430.467	
	b	2.47097	1.12483	1.08646	
		416.260	294.065	412.018	
		1.24339	538.696	498.701	
4-Term	ω	0.28537	0.78435	0.13023	
		0.05204	0.02338	0.01449	
		0.39494	0.19065	0.64259	
			0.26765	0.00165	0.21288
	a	342.965	254.555	381.124	
		669.226	653.216	145.497	
		72.3513	29.5830	87.7973	
			582.809	1054.32	291.187
	b	723.730	1.41666	1.91538	
		28.6507	820.451	179.950	
		108.936	4.67034	1.04055	
			2.23928	540.199	2.07258

Table 5. Comparison of LOLEs calculated by Recursive, Gamma and Weibull Distributions.

Method	Normal FOR	FOR/2	FOR/4	
Recursive	9.394159	1.301942	0.209324	
Gamma	2-Term	9.095530	1.266320	0.184030
	3-Term	9.441911	1.313365	0.211362
	4-Term	9.437521	1.311051	0.210346
Weibull	2-Term	9.269092	1.233549	0.166022
	3-Term	9.279100	1.273834	0.232115
	4-Term	9.397852	1.288474	0.216482

Table 6. Comparison of LOLFs calculated by Recursive, Gamma and Weibull Distributions.

Method	Normal FOR	FOR/2	FOR/4	
Recursive	2.021	0.3102	0.05515	
Gamma	2-Term	1.913481	0.298154	0.049271
	3-Term	1.936721	0.302671	0.053728
	4-Term	1.973154	0.308312	0.054212
Weibull	2-Term	1.949528	0.3041368	0.048377
	3-Term	1.994970	0.3089078	0.051071
	4-Term	1.997143	0.3104286	0.054684

출하여 보았으며, 이에 따른 공급지장 기대치와 공급지장 빈도수의 결과가 Table 5와 Table 6에 나타나 있다. 표에서 보듯이 감마와 와이블 분포함수를 이용하여 얻어진 공급지장 기대치와 공급지장 빈도수 값들이 재귀 알고리즘 방법에 의한 값에 근접함을 알 수 있다. 또한 각 분포함수의 Term수를 증가시킬수록, 즉 대입하는 모멘트의 수를 증가시킬수록 재귀 알고리즘 방법에 의한 값에 더욱 더 접근하여 그 정확도가 향상됨을 볼 수 있다. 또한 감마보다는 와이블 분포함수에 의한 접근이 보다 재귀 알고리즘에 의한 값에 가까우며 정확도 면에서 감마보다 우수함을 볼 수 있다.

고장 확률 FOR을 변화시켜 가며 정상 FOR, FOR/2, FOR/4 의 3가지 경우에 대한 재귀 알고리즘 방법에 의한 공급지장에 대한 누적 확률분포 곡선과 감마 분포함수, 와이블 분포함수에 의한 공급지장 누적 확률분포 곡선이 Fig. 3~Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 9, Fig. 10은 Fig. 3과 Fig. 4에서 재귀 알고리즘에 의한 값을 기준으로 하였을 때, 누적 감마 분포함수와 와이블 분포함수의 값과의 오차를 나타내고 있다. 그림에서 볼 때, 감마 분포함수와 와이블 분포함수를 이용한 누적 확률분포 곡선은 형태계수, 크기계수, 가중인자, 이 3가지 계수들을 변화시켰을 때 재귀 알고리즘 방법과 비교해서 원만한 곡선을 가지며 근사화시킴을 알 수 있다. 또한, 공급지장 기대치와 공급지장 빈도수에 대해서 두 개의 분포함

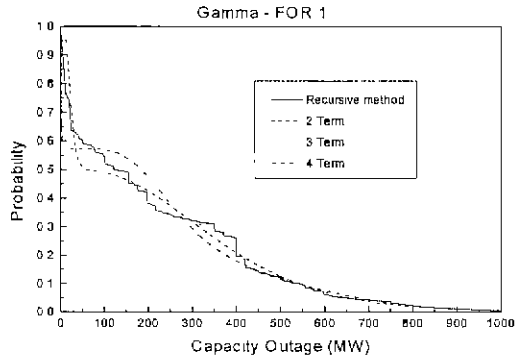


Fig. 3. Cumulative Probability Curves for Normal FOR Using Gamma Distribution.

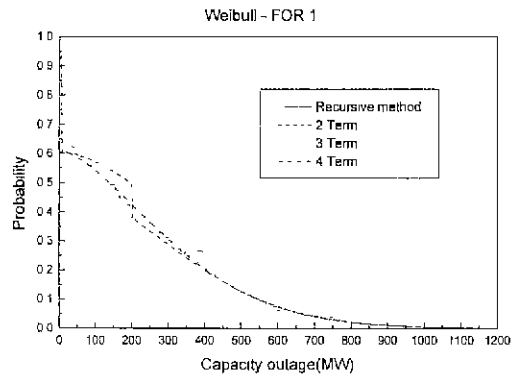


Fig. 4. Cumulative Probability Curves for Normal FOR Using Weibull Distribution.

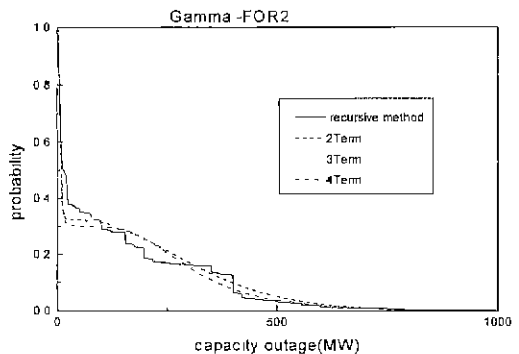


Fig. 5. Cumulative Probability Curves for FOR divided by 2 Using Gamma Distribution.

수 모두에서 2-term(6모멘트)보다는 3-term(9모멘트), 혹은 4-term(12모멘트)에서 원래의 재귀 알고리즘에 의한 곡선에 보다 접근함을 보이며, 이는 모멘트 대입시 대입되는 모멘트가 증가할 경우 더욱 정확한 값을 가짐을 알 수 있다. 또한 공급지장 기대치와 공급지장 빈도수

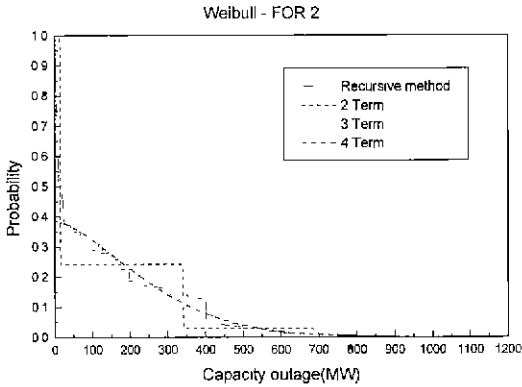


Fig. 6. Cumulative Probability Curves for FOR divided by 2 Using Weibull Distribution.

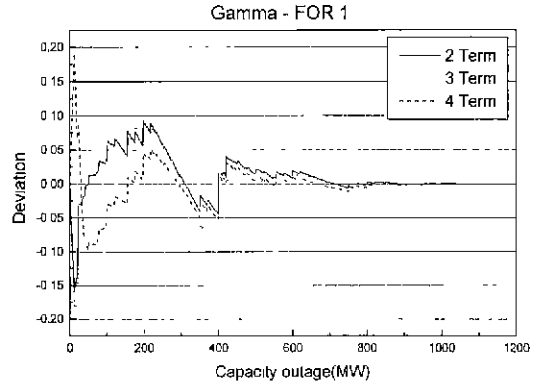


Fig. 9. The Deviation of Gamma Distribution from Recursive Method for Normal FOR.

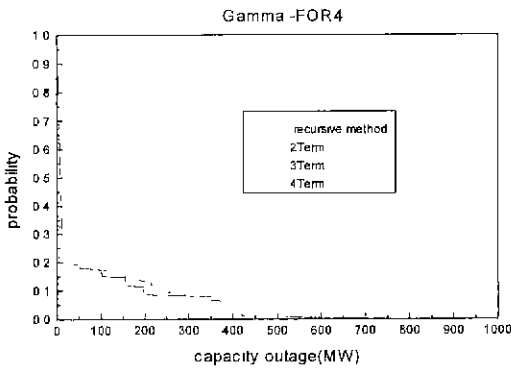


Fig. 7. Cumulative Probability Curves for FOR divided by 4 Using Gamma Distribution.

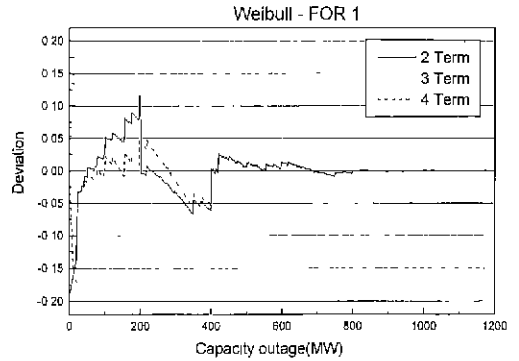


Fig. 10. The Deviation of Weibull Distribution from Recursive Method for Normal FOR.

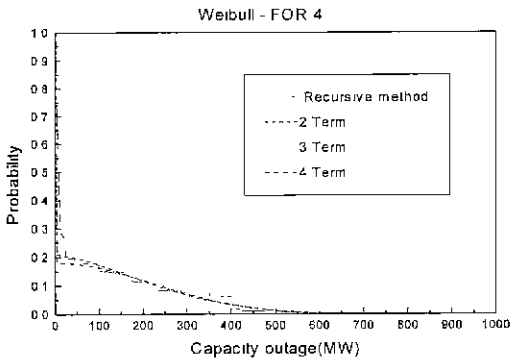


Fig. 8. Cumulative Probability Curves for FOR divided by 4 Using Weibull Distribution.

계산시, 통상적으로 매우 낮은 확률값에서 계산되며 이는 곡선의 Tail-end 부분에 해당하여 곡선의 앞에서 중간부분까지의 불규칙한 변이는 계산상의 지수값에 그리 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

6. 결 론

공급지장 기대치와 공급지장 빈도수를 계산하는데 있어서 발전기의 수가 증가 할수록 수치적 상승적분에 의한 방법은 이산분포 함수로 인해 상태의 수가 지수적으로 증가하여 계산시간의 과도한 부담이 생긴다. 그러나 본 논문에서 사용한 발전기 데이터의 모멘트를 구하고 이를 이용하여 적절한 분포함수를 선정(Gamma 분포함수, Weibull 분포함수)하여 이 분포함수에 모멘트를 대입한 후, 유전 알고리즘으로 계수를 구하고 이를 초기치로하여 콤플렉스 방법을 사용하여 얻은 $(3n-1)$ 개의 계수를 갖는 연속 분포함수를 구하여 공급지장 기대치와 공급지장 빈도수를 구하는 방법을 개발하였으며 이에 따라서 증가하는 발전설비에 대하여 정확도를 해치지 않고 가능한 계산시간 내에 신뢰도 지수값을 산출할 수 있음을 확인하였다.

또한 기존의 방법에서는 발전설비 하나의 추가에 따라 신뢰도 지수의 계산은 매우 복잡하고 많은 시간을 요

구해은 것이 사실이다. 그러나 새로운 알고리즘에서는 일단 확률과 빈도수에 대한 분포 함수가 결정되면 새로운 발전 설비에 대한 모멘트를 대입함으로써 단지 분포 함수의 계수만을 변화시켜서 값을 산출할 수 있기 때문에 한번의 함수만 구해 놓으면 계산시간의 부담이 줄어들며, 재귀 알고리즘 방법과 비교하였을 때에도 비교적 정확한 값을 얻을 수 있었으며, 새로운 설비에 대한 적용 또한 매우 용이해 질 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한양대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Anders, G.J.: "Probability Concepts in Electric Power Systems". John Wiley & Sons. Inc. (1990).
2. Chen, Q. and Singh, C.: "Equivalent Load Method for Calculating Frequency & Duration Indices in Generation Capacity Reliability Evaluation". IEEE Trans. on Power Systems, 1(1), 101-107 (1986).
3. Jorgensen, P.: "A New Method for Performing Probabilistic Production Simulations by Means of Moments and Legendre Series", IEEE Trans. on Power Systems, 6(2), 567-575 (1990).
4. Alavi-Sereshki, M.M and Singh C.: "A Generalized Continuous Distribution Approach for Generating Capacity Reliability Evaluation and Its Applications", IEEE Trans on Power Systems, 6(1), 16-22 (1990).
5. Wang, X. and Pottle, C.: "A Concise Frequency and Duration Approach to Generating System Reliability Studies". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 102(8), 2521-2530 (1983).
6. IEEE Committee Report: "IEEE Reliability Test System", IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 98(6), 2047-2054 (1979).
7. Allan, R.N., Billinton, R and Abdel-Gawad, N.M.K.: "The IEEE Reliability Test System - Extensions to and Evaluation of the Generating System". IEEE Trans. on Power Systems, 1(4), 1-7 (1986).
8. Rao, S.S.. "Optimization theory and applications", Wiley Eastern Limited (1977).
9. Billinton, R. and Allan, R.N. "Reliability Evaluation of Power Systems". 2nd Ed., Plenum Press (1996).