

# 水力, 揚水 및 多重모델을 고려한 새로운 確率論的 發電시뮬레이션

## A New Probabilistic Generation Simulation Considering Hydro, Pumped-Storage Plants and Multi-Model

宋 吉 永\* · 崔 在 錫\*\*  
(Kil-Yeong Song · Jae-Seok Choi)

**Abstract-** The probabilistic generation simulation plays a key role in power system expansion and operational planning especially for the calculation of expected energy, loss of load probability and unserved energy expected. However, it is crucial to develop a probabilistic generation simulation algorithm which gives sufficiently precise results within a reasonable computation time. In a previous paper, we have proposed an efficient method using Fast Hartley Transform in convolution process for considering the thermal and nuclear units. In this paper, a method considering the scheduling of pumped-storage plants and hydro plants with energy constraint is proposed. The method also adopts FHT techniques. We improve the model to include multi-state and multi-block generation. The method has been applied for a real size model system.

### 1. 서 론

전력계통의 전원개발계획이나 발전기운용계획을 수립하기 위해서는 발전비용과 신뢰도지수의 산정이 필수적이며 이들은 확률론적 발전시뮬레이션을 통해서 보다 실용적인 값을 얻을 수 있다.

본 저자들은 원자력과 화력발전기만을 대상으로 하여 고속 Hartley 변환을 이용한 확률론적 발전

시뮬레이션 알고리즘을 개발한 바 있다. [1]

실제계통에는 원자력과 화력발전외에도 에너지 제약조건을 갖는 수력이나 운전특성에 특별한 주의 기울여야 하는 양수발전도 존재한다. 또한 최근에는 고도의 기술개발에 힘입어 대용량 화력발전이 많이 등장하였으며 그 비중은 더욱 늘어날 전망이다. [2] 이러한 대용량 화력발전기들에 대해서는 그 운전상태를 모델링함에 있어 보다 상세한 고려가 필요할 것이다. 즉, ① 기기들의 고장으로 인하여 발생할 수 있는 多重狀態나 ② 임의의 한 발전기가 전 출력으로 운전되기 전에 다른 발전기

\*正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博  
\*\*正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 專任講師 · 工博  
接受日字 : 1990年 7月 11日  
1次修正 : 1991年 5月 9日

를 투입해서 부하의 증가분을 담당하는 쪽이 더욱 경제적일 수도 있는 상황을 모델링한 다중블록등을 고려하는 것이 바람직하다. [3][4].

본 연구에서는 이미 발표한[1] 원자력과 화력발전기만을 대상으로하여 개발한 고속 Hartley 변환에 의한 확률론적 발전시물레이션기법을 더욱 확장하여 수력과 양수발전까지를 포함해서 고속 Hartley 변환에 의한 확률론적 발전시물레이션 방법을 개발하였다. 이를 위해서 고속 Hartley 변환으로 유효부하지속곡선을 역상승적분할 수 있는 식을 유도하였으며 또한 대용량 화력발전의 운전상황을 多重狀態로 취급하는 경우의 발전량 계산식을 정식화 하였다.

사례연구로서 1992년도 한전계통규모로 예상되는 시계계통을 연구대상으로 삼아서 본 방법의 유용성을 살펴보았으며 또한 원자력발전기의 대수증가와 부하의 변동에 따른 공급예비율과 신뢰도지수와의 상관관계 및 각종 전원의 설비 이용율도 살펴보았다.

## 2. 문제의 정식화

발전기 사고율을 고려하는 확률론적 발전시물레이션 방법의 우수성은

- (1) 계산속도(Computational Efficiency)
- (2) 정확도(Accuracy)
- (3) 유연성(Flexibility)

에 의하여 결정되고 이는 결국 발전기의 운전모양이나 유효부하지속곡선의 작성방법등에 좌우된다.

본 연구에서는 발전기의 운전모의를 더욱 상세히 고려하기 위해 발전기 운전의 다중상태에 대한 발전량 계산식을 정식화하였으며 또한, 이미 발표한바 있는 화력발전기만에 대한 고속 Hartley 변환법을 수력발전기 및 양수발전기까지 고려할 수 있도록 확장하였다.

본 장에서는 우선, 발전기의 2개상태 및 다중상태 운전모형에 대한 발전량계산식과 기본식을 정식화 한다.

- (1) 2개상태로 모의할 경우

$i$ 번째 발전기의 운전상태를 ‘운전(Up)’과 ‘정지(Down)’라는 2개상태로 모델링할 경우 그 발전기의 사고용량확률분포함수  $f_{oi}$ 는 식(2.1)과 같이 되고 따라서 유효부하 지속곡선의 점화식은 식(2.2)와 같이 된다[4.5.6].

$$f_{oi}(x_{oi}) = p_i \delta(o) + q_i \delta(x - c_i) \quad (2.1)$$

$$\Phi_i(x) = \Phi_{i-1}(x) p_i + \Phi_{i-1}(x - C_i) q_i \quad (2.2)$$

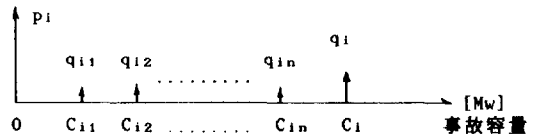


그림 1 多重狀態의 事故容量 確率分布函數

Fig. 1 Outage capacity probabilistic distribution function for multi-state model.

단,  $p_i, q_i$  : 각각  $i$ 번째 발전기의 가동율 및 사고율

$C_i$  :  $i$ 번째 발전기의 용량[Mw]

$\delta(\cdot)$  : delta 함수

$x_{oi}$  : 발전기의 사고용량확률변수

그러므로 발전량기대치  $\epsilon(E_i)$ 는 식(2.3)처럼 구해진다. [5] (유도과정은 부록 1 참조. 여기서  $\epsilon(DNS)_i$ 는  $i$ 번째 발전기까지 계통에 투입된 후의 공급지장전력량의 기대치이며,  $L_p$ 는 부하의 최대치임)

$$\epsilon(E_i) = (1 - q_i) \int_{u_{i-1}}^{u_i} \Phi_{i-1}(x) dx \text{ [Mwh]} \quad (2.3)$$

단,  $u_i = \sum_{j=1}^i C_j$  [Mw]

- (2) 다중상태로 모의할 경우의 발전량

$i$ 번째 발전기가 그림 1과 같이  $n$ 개의 감발상태(Derating State)가 더 존재하면 그 발전기의 사고용량 확률분포함수는 식(2.4)와 같이 정식화되므로 유효부하지속곡선의 점화식은 식(2.5)와 같이되고 이때의 발전량기대치를 식(2.6)과 같이 정식화할 수 있다. (유도과정은 부록2 참조)

$$f_{oi}(x_{oi}) = p_i \delta(o) + \sum_{j=1}^n q_{ij} \delta(x - C_{ij}) + q_i \delta(x - C_i) \quad (2.4)$$

$$\Phi_i(x) = \Phi_{i-1}(x) p_i + \sum_{j=1}^n \Phi_{i-1}(x - C_{ij}) q_{ij} + \Phi_{i-1}(x - C_i) q_i \quad (2.5)$$

$$\epsilon(E_i) = (1 - q_i) \int_{u_{i-1}}^{u_i} \Phi_{i-1}(x) dx - \sum_{j=1}^n q_{ij} \int_{u_{i-1}}^{u_i} \Phi_{i-1}(x) dx \text{ [Mwh]} \quad (2.6)$$

단,  $q_{ij}$  :  $i$ 번째 발전기의  $j$ 번째 사고용량  $C_{ij}$ 에서의 사고율

- (3) 기본식의 정식화

총 발전비용 TPcost 그리고 신뢰도지수인 LOLP(Loss of Load Probability) 및 EDNS(Expected Demand Not Served)를 식(2.7)~식(2.9)처럼 각각 구할 수 있다.

$$TPcost = \sum_{i=1}^{NG} \{A_i \epsilon(E_i) + B_i \Phi_i(u_i)\} [\text{원}] \quad (2.7)$$

$$LOLP = \Phi_{NG}(U_{NG}) [P.u] \quad (2.8)$$

$$EDNS = \int_{UNG}^{LP} \Phi_{NG}(x) dx [Mwh] \quad (2.9)$$

단,  $NG$  : 고려대상 화력 및 원자력발전기의 수

$T$  : 고찰대상기간 [Hours]

$A_i, B_i$  : 발전비용함수의 1차계수 [원/Mwh] 및 상수 [원/h]

### 3. 고속 Hartly 변환을 이용한 확률론적 발전 시뮬레이션

확률론적 발전시뮬레이션중에서 가장 중요한 부분들중 하나가 유효부하지속곡선을 어떻게 작성하느냐인데 이는 상승적분과정을 통해 이루어진다. 본 연구에서는 상승적분과정을 효율적으로 수행시킬 수 있다고 알려져 있는 고속 Hartley 변환을 이용하여 화력, 원자력발전기 및 수력, 양수발전기도 고려한 고속 Hartley 변환법을 개발하였다.

#### 3.1 Hartley 변환의 기본식

임의의 함수  $h(x)$ 에 대한 Hartley 변환의 정의식은 식(3.1)과 같다[7].

$$H(\omega) \mathcal{A} (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} h(x) (\cos \omega x + \sin \omega x) dx \quad (3.1)$$

단,  $\omega$  : 각속도 [rad/sec]

실제응용에서는 식(3.2)와 같은 이산화된 Hartley 변환을 이용한다.

$$H(\nu) = N^{-1/2} \sum_{x=0}^{N-1} h(x) \left( \cos \frac{2\pi\nu}{N} x + \sin \frac{2\pi\nu}{N} x \right) \quad (3.2)$$

단,  $N$  : 주기를 의미하는 이산화된 자료의 갯수

식(3.1)에서 보는바와 같이  $h(x)$ 가 실수함수이면 그 변환된 함수  $H(\nu)$ 도 실수함수가 되므로 상승적분이 용이함을 알수 있다.

또한 Hartley 변환에서 성립하는 식(3.3)과 같은 분할식(Decomposition Formula)을 이용하므로써  $N^2$ 에서  $N \log_2 N$ 으로 계산횟수를 줄일 수 있으며 이와같은 분할식을 이용한 Hartley 변환은 고속 Hartley 변환(FHT ; Fast Hartley Transform)이라 불리우고 있다.

$$H(\nu) = H_{a1}(\nu) + H_{a2}(\nu) \cos(2\pi\nu/N) + H_{a2}(N-\nu) \sin(2\pi\nu/N) \quad (3.3)$$

단,  $H_{a1}(\nu), H_{a2}(\nu) : h(x)$ 의 함수를 임의의 2개의 함수로 분할했을 경우의 각 함수의 Hartley 변환 함수임

#### 3.2 각 발전기의 운전모의

이번에 개발한 수력 및 양수발전기까지 고려한 FHT법에 의한 확률론적 발전시뮬레이션의 방법은 다음과 같으며 그림2는 이의 개념도이다. 여기서 수력 및 양수발전기는 각각 1대씩 증가화시켜서 고려하였으며 단계 1~단계 5까지가 원자력과 화력발전기의 발전시뮬레이션이며 단계 6~단계 12까지가 수력이고 그 이하가 양수발전기에 대한 것이다.

여기서 수력발전기를 고려하자면 설정된 수력발전량만큼 화력발전기의 발전량을 삭감시키기위해서 유효부하지속곡선상에서 오른쪽 화력발전기부터 차례대로 꺼집어내어 보아야하며 이 과정은 유효부하지속곡선의 역상승적분과정을 통하여 이루어진다. 본 연구에서는 이 과정을 위해 고속 Hartley 변환을 사용해서 수행할 수 있는 식을 유도했다.

단계 1 주어진 부하지속곡선으로부터 부하확률분포함수인  $\Phi_0(x)$ 를 작성한 후 이의 Hartley 변환인  $H_0(\nu)$ 를 구하고  $i=1$ 로 한다.

단계 2  $\Phi_{i-1}(x)$ 로 부터 식(2.3)을 이용하여  $i$ 번째 발전기의 발전량기대치인  $\epsilon(E_i)$ 를 계산하고 이 발전기의 사고용량확률분포 함수  $f_{oi}(x)$ 를 작성한 후 이의 고속 Hartley 변환인  $T_i(\nu)$ 를 구한다.

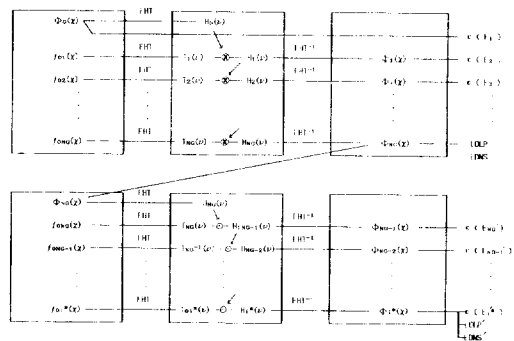


그림 2 FHT법에 의한 확률론적 발전시뮬레이션의 개념도

Fig. 2 The concept of the simulation by FHT method

(단,  $\otimes$  : 상승적분,  $\odot$  : 역상승적분)

단계 3 Hartley 변환에서의 상승적분공식을 이용해서  $i-1$ 번째 유효부하지속곡선의 고속 Hartley 변환인  $H_i(\nu)$ 와  $i$ 번째 발전기의 사고용량확률분포함수의 고속 Hartley 변환인  $T_i(\nu)$ 와의 상승적분을 식(3.4)처럼 구한다.

$$H_i(\nu) = H_{i-1}(\nu)T_{ie}(\nu) + H_{i-1}(N-\nu)T_{io}(\nu) \quad (3.4)$$

단,  $T_{ie}(\nu) = [T_i(\nu) \pm T_i(N-\nu)]/2$

단계 4  $H_i(\nu)$ 를 다시 한번 고속 Hartley 변환시켜서  $i$ 번째 발전기까지 투입된 유효부하지속곡선인  $\Phi_i(x)$ 를 구한다.

단계 5  $i=NG$ 가 될때까지 단계2에서 단계4까지의 작업을  $i=i+1$ 로 하여 반복한다.

단계 6 수력발전기의 운전을 모의하기 위해  $\Phi_{NG}(x)$ 를 고속 Hartley 변환하여  $H_{NG}(\nu)$ 를 구한 뒤  $i=NG$ 로 놓는다.

단계 7  $i$ 번째 화력또는 원자력발전기의 사고용량확률분포함수  $f_{oi}(x)$ 의 고속 Hartley 변환인  $T_i(\nu)$ 를 구한다.

단계 8 수력발전기에의한 화력발전기의 발전감소량을 구하기 위해 새로이 유도한 고속 Hartley 변환에서의 역상승적분식(유도과정은 부록 3 참조)을 이용하여 식 (3.5)처럼  $\Phi_{i-1}(x)$ 를 구한다.

$$\Phi_{i-1}(x) = \text{FHT}^{-1} \left[ \frac{H_{ie}(\nu)T_i(N-\nu) + H_{io}(\nu)T_i(\nu)}{T_{ie}^2(\nu) + T_{io}^2(\nu)} \right] \quad (3.5)$$

단,  $H_{ie}(\nu) = [H_i(\nu) \pm H_i(N-\nu)]/2$

단계 9 앞에서 구한  $\Phi_{i-1}(x)$ 을 이용해서 수력발전기에의한  $i$ 번째 화력발전기의 발전감소량인  $\Delta E_{Hi}$ 를 식(3.6)처럼 구한다.

$$\Delta E_{Hi} = p_H \{ \epsilon(E_{i1}) - \epsilon(E_{i2}) \} \quad (3.6)$$

단,  $\epsilon(E_{i1}) = (1 - q_i) \int_{u_{i-1}}^{u_i} \Phi_{i-1}(x) dx$  [Mwh]

$$\epsilon(E_{i2}) = (1 - q_i) \int_{u_{i-1} + C_H}^{u_i + C_H} \Phi_{i-1}(x) dx$$
 [Mwh]

$C_H$  : 등가 수력발전기의 용량[Mw]

$p_H$  : 등가수력발전기의 가동율

단계 10 식(3.7)에 따라  $i$ 번째 화력발전기의 발전량  $\epsilon(E_i)$ 를 조정한다.

$$\epsilon(E_i') = \epsilon(E_i) - \Delta E_{Hi} \quad (3.7)$$

단계 11 식(3.8)의 조건이 만족될때까지  $i=i-1$ 로하여 단계 6에서 단계 10까지의 작업을 반복한다. 식(3.8)의 조건이 만족되는  $i$ 를  $i^*$ 라 한다.

$$\sum_{j=NG}^i \Delta E_{Hj} \geq C_H C_F T$$
 [Mwh] (3.8)

단,  $C_F$  : 수력발전기의 설정된 년설비이용율

단계 12 식(3.8)에서  $\Delta E_{Hj}$ 의 값은 선형적이 아니고 정수적이다. 그러므로 마지막으로 감소되는  $i^*$ 번째 화력발전기는 오히려 과잉감소 될 수 있다. 따라서 식(3.9)와 같이  $i^*$ 번째 발전기의 발전량을 재조정함으로써 수력발전기의 설정된 발전량만큼 감소도록 한다.

$$\epsilon(E''_{i^*}) = \epsilon(E'_{i^*}) + \left( \sum_{j=NG}^{i^*} \Delta E_{Hj} - C_H C_F T \right) \quad (3.9)$$

단,  $\epsilon(E''_{i^*})$  : 재조정된  $i^*$ 번째 발전기의 발전량 [Mwh]

단계 13 원자력발전기는 부하추종능력이 거의 없으므로 심야시에는 잉여 발전량이 발생될 수도 있다. 그러므로 이를 양수발전기로 흡수하는 것이 계통운용상 필요하다. 이러한 강제양수량  $TE_{CP}$ 를 식(3.10)처럼 구한다.

$$TE_{CP} = \sum_{i \in CG} \left\{ \int_{u_{i-1} - pgcap}^{u_i - pacap} \Phi_i(x) dx - \int_{u_{i-1}}^{u_i} \Phi_{i-1}(x) dx \right\} \quad (3.10)$$

단,  $pgcap$  : 양수발전기의 용량[Mw]

$C_G$  : 부하추종능력이 없는 발전기들의 집합

단계 14 양수발전기의 운전은 단계 13과 같은 강제양수나 양발운전의에도 양수와 양발사이의 경제성이 기대될때도 이루어진다. 그러므로 이의 운전은 최적화문제로 구성된다. 여기서는 양수발전에 의해 감소발전되는 발전기의 발전증분비용이 양수 운전에 의해 증가발전되는 발전기의 발전증분비용과 같아지는 지점까지 그 증분비들을 상호비교하면서 찾아가는 탐색법을 사용한다.

### 3.3 다중모델의 고려방법

#### 다중상태

발전기의 고장상태는 기기들의 고장등을 감안하면 다중상태로 표현할 수 있다. 이때의 확률분포함수와 증분비( $\lambda$ ) 값을 나타내면 그림3과 같다.

[3][4] 이와 같은 다중상태를 기존의 상승적분과정 방법으로 고려하자면 고려하려는 상태수 만큼 그 상승적분과정이 필요하므로 쉽지가 않다.

그러나 고속 Hartley 변환을 이용할 경우에는 다중상태들이 발전기 사고용량확률 분포함수인  $f_{oi}(x_{oi})$  내에 포함되어 있으므로 2개상태일 경우와 동일한 계산횟수로서 끝낼 수 있으며 다만 앞서의 식(2.6)에 따라 계산하므로써 정확한 다중상태 에너지를 계산할 수 있다.

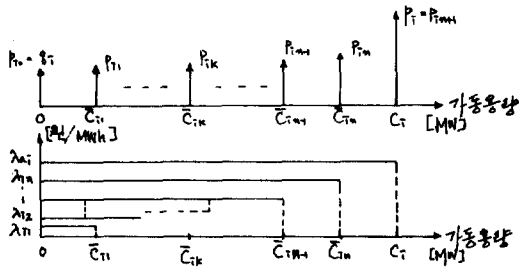


그림 3 多重狀態의 稼動容量 確率分布函數 및 増分費 표현

Fig. 3 Representation of incremental cost and available capacity PDF in multi-state system.

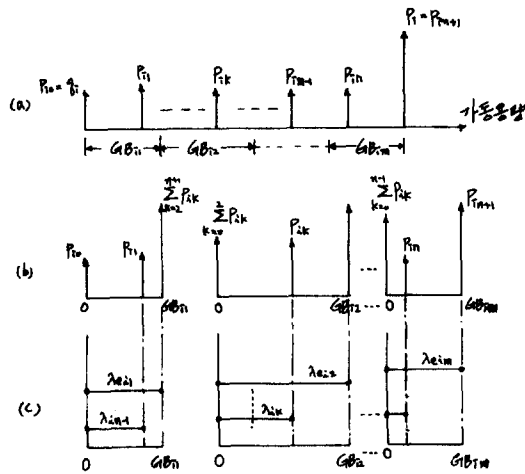


그림 4 多重狀態 및 多重블록의 等價化 모델  
Fig. 4 Equivalent model of multi-state, multi-block.

다중블록

한편, 현실적으로 발전기의 경제운전 상태를 본다면 부하가 증가할 경우 이에 따라 임의의 한 발전기가 전출력으로 그 부하를 담당하기 전에 다른 발전기의 출력을 증가시켜서 부하의 증가분을 담당하도록 하는 것이 더 경제적인 수도 있으며 또한 부하가 낮을 경우에는 발전기를 정지시키지 않는 상태에서 최대용량보다 낮은 용량에서 발전하는 경우도 자주 있다. 이러한 상황까지 고려해서 발전비 계산을 하기 위해서는 발전기 운전모델을 多重블록으로 모델링할 필요가 있다. 여기서는 그림4(a)와 같은 n개의 다중상태 및 m개의 다중블록으로 표현되는 발전기 운전상태를 그림4(c)와 같이 다중블록모델을 단일블록의 합으로 등가화시켜서 고려한다. [3][4]

또한, 그림 4(c)처럼 단일블록으로 등가화 했을 때 해당블록의 중분비는 복수개로 나타날 수 있기 때문에 다시 이들을 하나의 등가 중분비로 조정하여야만 투입 순위를 결정할 수 있다. 따라서, 여기서는 확률론적인 개념을 도입해서 해당 블록의 중분비에 관한 기대치를 식(3.11)처럼 계산하고 이것을 이때의 대표치로 삼는 방법을 사용하기로 한다. [3][4]

$$\lambda_{ei} = \frac{\sum_{k \in K_{ij}} \lambda_{ik} P_{ik}}{\sum_{k \in K_{ij}} P_{ik}} \text{ [원/Kwh]} \quad (3.11)$$

단,  $K_{ij} : 0 < x \leq GB_{ij}$ 에 속하는 발전기 사고용량 확률분포 함수 값들의 집합

$\lambda_{ei}$ ,  $GB_{ij}$ ,  $P_{ik}$  : i번째 발전기의 j번째 블록의 등가중분비 [원/Kwh], 용량 [Mw] 및 가동용량 확률치

즉, 식(3.11)에 의해서 구한  $\lambda_{ei}$  값이 적은 순서대로 유효부하지속곡선을 작성하고 발전량 및 발전비를 계산하므로써 다중블록으로 모델링한 것을 운전모의할 수 있다 [3.4.6].

3.4 Rounding Size의 결정법

Rounding Size ( $\Delta x$ )는 계산속도나 정확도에 미치는 영향이 크므로 이의 적절한 량을 계통에 따라 결정하는 것은 중요하다. 여기서는 식(3.12)에 따라 N를 변동시켜가면서 LOLP 및 EDNS의 오차량을 검토하고 나서 정확도에 크게 영향을 미치지 않는 범위내에서 그 량을 결정하는 방법을 사용했다.

$$\Delta x = \left( \sum_{i=1}^{NG} C_i + L_p \right) / N \quad (3.12)$$

4. 사례연구

이번에 개발한 방법을 표1과 같이 수력 및 양수 발전기를 제외한 총 발전기수가 54대이고 총 설비용량이 19434[Mw]인 1992년도의 한전계통규모로 예상되는 시험계통에 적용하여 보았다. [10]

수력발전기는 그의 용량이 1499[Mw]이고 사고율 및 연간 설비이용율이 각각 0.04297 및 20%인 한개의 등가발전기로 가정하였고, 양수발전기도 그의 용량이 1000[Mw], 종합효율이 70[%], 상부저수지의 용량이 8000[Mw]인 한대의 등가발전기로 가정하였다. 한편, 부하로는 최대치가 17567

표 1 實規模 系統의 發電系統入力資料

Table 1 Input data of real size model system

投入 順位	發電所 名	容量 番號	容量 [MW]	事故率 [P.U]	A(i) [10 <sup>3</sup> 원 / Kwh]	B(i) [10 <sup>3</sup> 원/h]	補修日 數 [days]
1	WSG	3	679.	.15200	.992	15.233	56.6
2	GRI	1	580.	.08208	1.951	15.233	56.
3	GRI	2	650.	.08008	1.952	15.233	56.
4	GRI	5	950.	.07708	1.966	15.233	56.
5	GRI	6	950.	.07721	1.966	15.233	56.
6	YKG	7	950.	.07723	1.966	15.233	56.
7	YKG	8	950.	.07724	1.966	15.233	56.
8	UGN	9	950.	.07724	1.966	15.233	56.
9	UGN	10	950.	.07724	1.966	15.233	56.
10	BRG	1	500.	.03291	16.925	153.842	56.
11	BRG	2	500.	.03356	16.925	153.842	56.
12	SCP	1	560.	.01756	17.139	183.432	56.
13	SCP	2	560.	.02056	17.139	183.432	56.
14	SUL	5	250.	.03756	19.964	138.999	56.
15	SUL	4	138.	.03742	20.891	67.889	28.
16	SCN	2	200.	.03755	23.388	126.107	28.
17	HNM	2	210.	.01481	23.443	84.071	28.
18	YDG	2	200.	.02350	23.649	224.917	28.
19	HNM	2	210.	.02760	23.867	84.071	28.
20	YNM	1	200.	.06520	23.867	84.071	28.
21	YNM	2	190.	.08010	23.867	84.071	28.
22	SCN	1	200.	.03247	24.520	126.107	28.
23	PTG	1	350.	.00579	26.756	66.170	28.
24	PTG	2	350.	.00209	26.756	66.170	28.
25	PTG	3	350.	.01020	26.756	66.170	28.
26	PTG	4	350.	.01020	26.756	66.170	28.
27	USN	4	400.	.04691	27.317	74.079	49.
28	USN	5	400.	.04604	27.317	74.079	49.
29	USN	6	400.	.04672	27.317	74.079	28.
30	USN	1	200.	.06972	27.317	74.079	49.
31	USN	2	200.	.06972	27.317	74.079	49.
32	USN	3	200.	.06972	27.317	74.079	28.
33	YDG	1	125.	.02019	27.473	44.256	56.
34	HNM	1	270.	.06019	23.867	84.071	28.
35	HNM	2	270.	.06019	23.867	84.071	28.
36	ICN	2	250.	.01298	27.972	69.570	56.
37	ICN	1	250.	.00209	28.362	196.503	56.
38	ICN	3	325.	.05715	29.140	63.226	28.
39	ICN	4	325.	.07786	29.140	63.226	28.
40	LNG	1	400.	.07786	29.140	63.226	28.
41	LNG	2	800.	.07786	29.140	63.226	28.
42	YSU	1	200.	.00886	29.619	53.723	56.
43	YSU	2	300.	.03104	29.619	53.723	56.
44	BSN	3	105.	.01214	30.480	25.366	28.
45	BSN	4	105.	.01214	30.480	25.366	28.
46	BSN	1	60.	.01214	30.480	25.366	28.
47	BSN	2	60.	.01214	30.480	25.366	28.
48	GSN	1	66.	.01492	30.893	30.928	28.
49	YWL	2	47.	.03721	31.799	17.866	28.
50	GIN	1	162.	.01698	32.336	76.975	28.
51	GIN	2	162.	.01218	32.336	76.975	28.
52	YWL	1	47.	.29244	39.010	17.866	28.
53	GGG	1	300.	.00000	746.819	.000	28.
54	DPB	1	78.	.00000	744.157	.000	28.

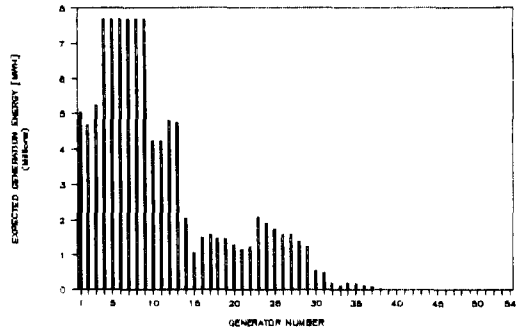


그림 5 各發電機의 發電量 期待值  
Fig. 5 Expected generation energy.

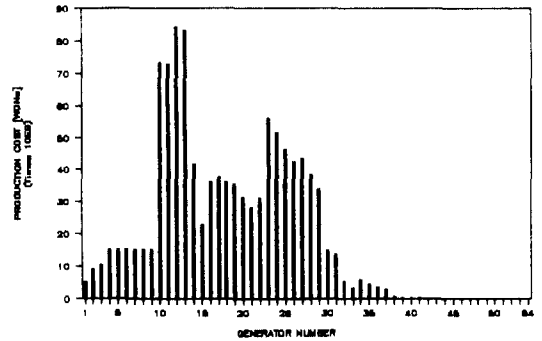


그림 6 各發電機의 發電費用  
Fig. 6 Production cost.

[Mw]이고 부하율이 70.1[%]인 년간부하(8760[hr])를 이용하였다.

(1) 본 연구에서 개발한 알고리즘에 의해 계산된 각 발전기의 발전량 기대치 및 발전비용은 각각 그림 5 및 그림 6과 같으며 총 발전량, 총 발전비 및 신뢰도 지수등은 표2와 같다.

표2에서 신뢰도 지수중 하나인 LOLP 값이 0.63[일/년] 정도로 얻어지는 것으로 보아 우리나라의 경우 LOLP기준치를 0.7[일/년]로[10] 정하고 있는 것과 비교해 볼 때 본 시험계통의 전원의 공급력은 이 부하에 대하여 기준한계치에 달하고 있는 것으로 여겨진다.

(2) 수력발전기의 운전에 의한 화력발전기의 발전량감소 및 양수발전기의 운전에 의한 각 발전기의 양수 및 양발담당을 보이면 그림 7 및 그림 8과 같다. 그림7에서 #31 화력발전기가 수력발전기에 의해 감발 운전되는 마지막 화력발전기임을 알 수 있으며, 그림 8에서는 #10~#14발전기들이 양수부분을 차지하고 있는데 #1~#9까지가 원자력발전기들이므로 이 경우 강제양수운전모드에서 양수운전

丑 2 實規模 系統의 總 發電量, 總 發電費 및 信賴度指數

Table 2 Total generation energy, total production cost and reliability index of real size model system

총 발전량 [10 <sup>6</sup> Mwh]	108.022936
총 발전비 [10 <sup>9</sup> 원]	1098.804935
평균 발전비용[원/Kwh]	10.172
LOLP [days/year]	0.62702
EDNS [10 <sup>6</sup> Mwh]	0.017354

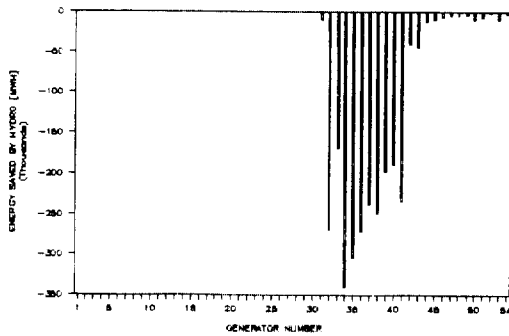


그림 7 水力發電機 運轉에 의한 各 發電機의 發電 감소량  
Fig. 7 Thermal generating energy saved by operating hydro power plant.

모의는 없으며 경제운전모드에서 #10~#14발전기가 운전모의 되었음을 알 수 있다.

(3) 다음의 그림 9 및 그림 10은 원자력발전기의 추가대수에 따라 원자력 및 양수발전기의 설비이용율 그리고 공급예비율과 신뢰도지수와의 관계를 살펴본 것이다.

설비이용율

먼저 그림 8에서 원자력발전기의 대수가 증가할 수록 양수발전기의 설비이용율은 일반적으로 증가하는 성격을 지니고는 있지만 원자력발전기의 4대 추가점에서 그 설비이용율이 오히려 감소하는 현상을 보이고 있다. 이는 원자력발전기의 대수가 증가하면 이로 인해서 양수발전기의 강제양수운전 모드에서의 운전량은 늘어나지만 화력발전기의 부하담당은 유효부하지속곡선에서 더욱 위로 밀려나고 양수발전기의 [Mw]용량 한계성과 더불어서 경제운전모드에서의 운전량이 오히려 줄어들기 때문인 것으로 해석된다.

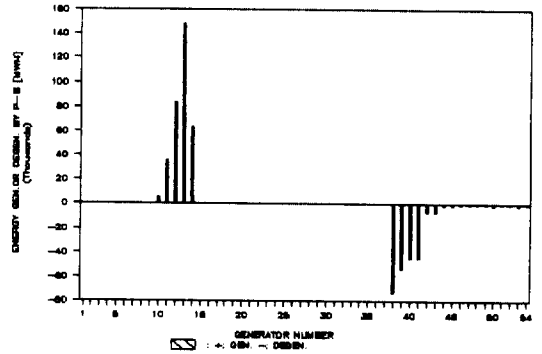


그림 8 揚水發電機 運轉에 의한 各 發電機의 出力 增減  
Fig. 8 Thermal energy variations under operating pumped-storage power plant.

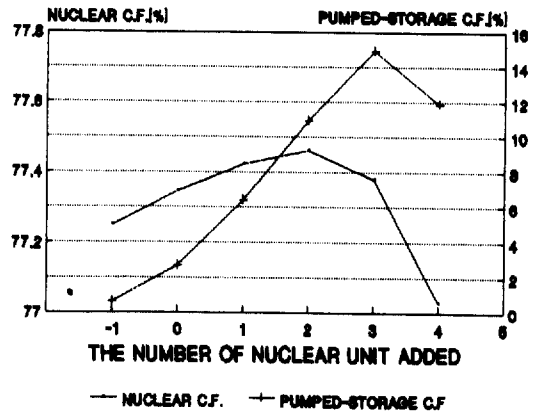


그림 9 原子力發電機의 추가대수에 따른 揚水發電機 및 原子力發電機의 年平均設備利用率  
Fig. 9 Capacity factor of pumped-storage power plant and nuclear by nuclear generators addition.

또한 원자력발전기의 설비대수가 증가할 수록 원자력발전기의 년 평균설비이용율이 증가에서 감소로 돌아서는 현상을 볼 수 있다. 이는 원자력발전기의 총용량이 부하최소치와 양수발전기의 용량합계치보다 적을 경우까지는 원자력발전기가 모두 감발없이 운전될 수 있으므로 년 평균설비이용율이 증가하지만 그 이상이되는 경우에는 원자력발전기의 감발운전이 불가피하게 되므로 그 설비이용율이 떨어지는 것으로 판단된다.

공급예비율과 LOLP

그림 9는 원자력발전기의 추가대수에 따른 공급예비율과 LOLP관계를 나타낸 것인데 상호간에 지

표 3 多重狀態모델의 入力資料

Table 3 Input data for multi-state model.

#.10	Outage Cap.	500	400	300	200
Gen.	Probability	0.030	0.001	0.001	0.00091
#.11	Outage Cap.	500	400	300	200
Gen.	Probability	0.030	0.0015	0.0015	0.00056
#.12	Outage Cap.	560	460	360	200
Gen.	Probability	0.010	0.0035	0.0035	0.00056
#.13	Outage Cap.	560	460	360	260
Gen.	Probability	0.020	0.000	0.000	0.00056

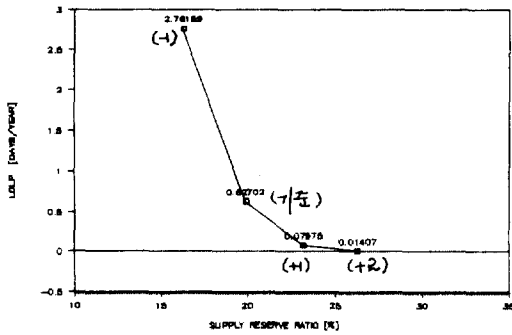


그림 10 原子力發電機 추가대수에 대한 供給豫備率과 LOLP

Fig. 10 Supply reserve ratio vs. LOLP for nuclear unit addition.

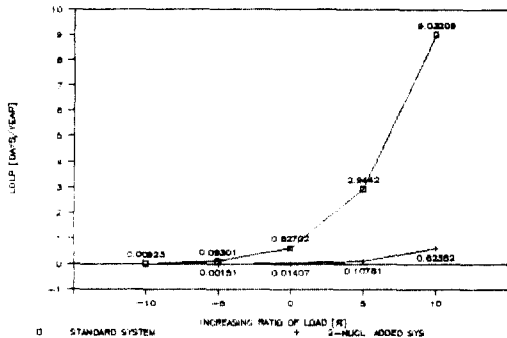


그림 11 負荷變動에 대한 LOLP의 感度解析

Fig. 11 Sensitivity analysis of LOLP for demand.

수함수적으로 반비례하는 상관관계에 있음을 확인할 수 있다. 한편, 이 그림에서 우리나라의 상한 LOLP인 0.7[일/년]에 해당하는 공급예비율 값은 약 19.8[%]인 것으로 판단된다.

(4) 이번에는 부하의 변동에 대한 신뢰도지수의

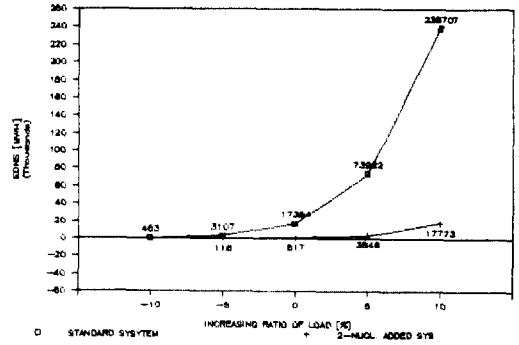


그림 12 負荷變動에 대한 EDNS의 感度解析

Fig. 12 Sensitivity analysis of EDNS for demand.

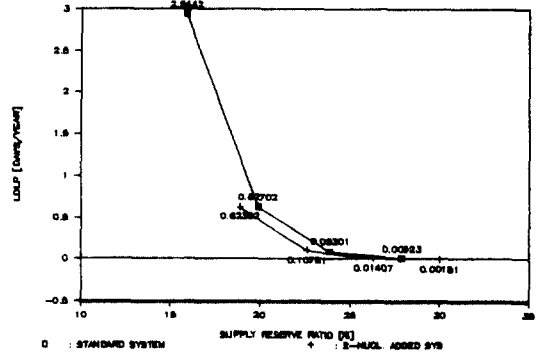


그림 13 負荷變動에 대한 供給豫備率과 LOLP

Fig. 13 Supply reserve ratio vs. LOLP for demand.

변화 및 공급예비율과의 상관성등을 살펴보았다. 그림 11, 그림 12 및 그림 13은 이의 계산결과이며, 여기서 '+'는 '0'에 대하여 950[Mw]의 원자력발전기가 2대 더 추가된 56기 계통인 경우이다.

신뢰도지수의 변화

먼저, 그림 11과 그림 12는 각각 LOLP 및 EDNS의 감도해석 결과이다. 이들 그림에서 2개의 곡선이 상호 일정한 간격으로 진행하고 있음을 알 수 있다. 이는 동일한 값의 신뢰도를 유지하기 위해서 추가된 2대의 원자력발전기가 담당하는 부하량은 부하의 패턴만 같다면 크기에는 상관없이 항상 일정함을 말해주고 있다. 그러므로 원자력발전기를 2대 더 신설한다면 부하가 약 110[%]까지 증가하여도 54기 계통과 같은 신뢰도 수준을 유지할 수 있다고 예상된다.

공급예비율과 LOLP

또한 그림 13은 부하의 변동에 대한 공급예비율과 LOLP와의 관계를 살펴 본 것인데 앞서 원자력



표 4 多重狀態모델의 운전모의 계산결과  
Table 4 Simulated results for multi-state model.

	2個 狀態 모델	多重 狀態 모델*
총 발전비 [10 <sup>9</sup> 원]	1184.180	1181.520
LOLP [days/year]	1.1675	1.1652
EDNS [Mwh]	17354	17128

(\* 볼록수는 2개로 하였음)

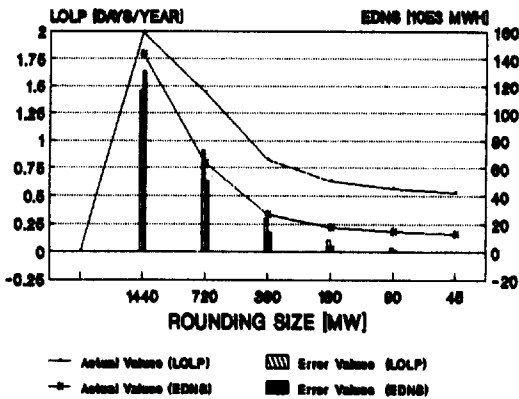


그림 14 Rounding size( $\Delta x$ )에 따른 신뢰도지수의 오차

Fig. 14 Errors of reliability index for rounding size.

발전기의 추가대수에 따른 영향분석에서 얻어진 바와 같이 상호간에 지수함수적으로 반비례하는 상관관계에 있음을 확인할 수 있다.

특히, 이 그림에서 예측부하치보다 실제부하치가 1~2[%]정도만 증가해도 본 모델계통의 공급 신뢰도는 연구대상년도에서 위험수준을 넘어갈 것으로 예상된다. (본 그림에의하면 부하 2[%] 증가시 1.5[일/년]로 상정됨)

(5) 한편, Rounding Size( $\Delta x$ )는 계산속도나 정확도에 미치는 영향이 크므로 이의 적절한 량을 결정하는 것이 중요하다.

여기서는 이를 식(3.12)를 이용해서 그림 14와 같이  $\Delta x$ 의 크기에 따른 LOLP 및 EDNS의 오차 량을 검토하고나서 적절한 량을 결정할 수 있었다. 즉, 그림 14에서 LOLP 및 EDNS의 실제값이  $\Delta x=45$ [Mw]일때의 값인 0.53[일/년] 및 13[10<sup>3</sup> Mwh]이라고 볼 수 있는데  $\Delta x$ 의 량이 가능한 큰

양이면서 실제값과 오차가 적은 값은  $\Delta x=180$ [Mw]일때라고 판단된다. 그러므로 본 모델계통에서는  $\Delta x=180$ [Mw]로 설정하는 것이 계산속도 및 정확도면에서 효율적이라 여겨진다.

(6) 끝으로 화력발전기들 중에서 타 발전기보다 큰 #10~#13발전기들을 표3처럼 다중상태로 모델링하여 계산한 결과를 보이면 표4와 같다.

표4에서 총 발전비용과 신뢰도지수가 2개상태일 경우보다 낮아진 것은 2개 상태모델의 사고율을 다중상태모델에서는 각 사고용량별로 분산하였기 때문으로 보이며 그러나 그 값에서 크게 차이가 없음을 다중모델 고려시 증분비용을 평균하였기 때문으로 사료된다.

### 5. 결 론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 고속 Hartley 변환을 이용해서 원자력, 화력발전기는 물론 발전량 제약조건을 갖는 수력 및 양수발전기의 운전모의까지 포함하는 새로운 확률론적 발전시물레이션을 위한 효율적인 방법을 개발하였다.

(2) 특히, 수력발전기의 운전모의를 위해 고속 Hartley 변환으로 유효부하지속곡선을 역상승적분할 수 있는 식을 유도했으며 현재 발전계통에서 늘어나고 있는 대용량 화력발전기들의 실제운전특성을 더욱 상세하게 고려하기 위해서 다중 상태에서의 발전량 산정식을 정식화 하였다.

(3) 다중상태의 고려시 기존의 방법들은 그 상태수 만큼 상승적분과정을 거쳐야 하지만 본 방법을 이용할 경우에는 그 상태들이 발전기 사고용량 확률분포함수내에 모두 포함되어있으므로 특별한 계산과정이 필요없으며 다중상태 발전량계산식을 이용하므로써 더욱 정확한 산정법을 도입하였다.

(4) 본 방법을 1992년도 한전계통구모의 시험계통에 적용하여 최근 우리나라에서 그 구성비가 더욱 증대되고 있는 원자력발전기와 불확실성이 큰 부하를 중심으로 검토한 결과 다음과 같은 몇가지 사항을 알 수 있었다.

첫째, 본 계통의 공급예비율과 신뢰도지수인 LOLP와의 관계는 상호 지수함수적 반비례관계이며 우리나라의 경우 허용기준 LOLP로 삼고있는 0.7[일/년]에 해당하는 공급예비율은 약 19.8[%]임을 밝혔다.

둘째, 본 계통의 신뢰도는 0.627[일/년]로서 기준 한계치에 있다고 판단되며 예측한 부하에서

2[%]만 증가해도 LOLP가 1.5[일/년]로서 위험수준에 도달하게 되는 바 본 시험계통은 이를 해결하기 위한 대책이 필요하다고 판단된다.

세제, 양수발전기의 설비이용율이 본 연구대상 시점에서는 상당히 저조하게 나타나고 있으나 공급신뢰도 확보측면에서 유용하게 운전될 것으로 판단되며 심야율과 원자력발전기의 추가대수에 크게 영향을 받고 있으므로 다각적인 방향으로 부하를 향상을 위한 전력에너지 저장 시스템의 개발이 필요하다고 생각된다.

(5) 본 연구에서는 부하가 부하지속곡선으로 주어지는 것으로 가정했으나 부하의 불확실성(Uncertainty)을 고려하는 방법을 개발하는 것은 앞으로의 연구과제라 생각된다.

**부 록1**

$$\begin{aligned}
 \epsilon(E_i) &= \epsilon(\text{DNS})_{i-1} - \epsilon(\text{DNS})_i \\
 &= \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx - \int_{U_i}^{LP+U_i} \Phi_i(x) dx \\
 &= \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx - \int_{U_i}^{LP+U_i} [\Phi_{i-1}(x) \\
 & p_i + \Phi_{i-1}(x - C_i)q_i] dx = \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx \\
 & - \int_{U_i}^{LP+U_i} \Phi_{i-1}(x) p_i dx - \int_{U_i}^{LP+U_i} \Phi_{i-1}(x - C_i)q_i dx \\
 & = \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx - \int_{U_i}^{LP+U_i} \Phi_{i-1}(x) p_i dx \\
 & - \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) q_i dx = p_i \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx \\
 & - p_i \int_{U_i}^{LP+U_i} \Phi_{i-1}(x) dx = (1 - q_i) \int_{U_{i-1}}^{U_i} \Phi_{i-1}(x) dx
 \end{aligned}$$

(부 1.1)

**부 록2**

$$\begin{aligned}
 \epsilon(E_i) &= \epsilon(\text{DNS})_{i-1} - \epsilon(\text{DNS})_i \\
 &= \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx - \int_{U_i}^{LP+U_i} \Phi_i(x) dx \\
 &= \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx - \int_{U_i}^{LP+U_i} [\Phi_{i-1}(x) p_i \\
 & + \sum_{j=1}^n \Phi_{i-1}(x - C_{ij})q_{ij} + \Phi_{i-1}(x - C_i)q_i] dx \\
 &= \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx - \int_{U_i - C_i}^{LP+U_i - C_i} [\Phi_{i-1}(x + C_i) p_i \\
 & + \sum_{j=1}^n \Phi_{i-1}(x - C_{ij} + C_i)q_{ij} + \Phi_{i-1}(x)q_i] dx \\
 &= \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) - \Phi_{i-1}(x + C_i) p_i \\
 & - \sum_{j=1}^n \Phi_{i-1}(x - C_{ij} + C_i)q_{ij} - \Phi_{i-1}(x)q_i dx
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} [(1 - q_i)\Phi_{i-1}(x) - (1 - q_i - \sum_{j=1}^n q_{ij}) \\
 & \Phi_{i-1}(x + C_i) - \sum_{j=1}^n \Phi_{i-1} \\
 & (x - C_{ij} + C_i)q_{ij}] dx = (1 - q_i) \left[ \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) \right. \\
 & - \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x + C_i) dx + \sum_{j=1}^n q_{ij} \\
 & \left. \left[ \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x + C_i) dx - \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x - C_{ij} + \right. \right. \\
 & \left. \left. C_i) dx \right] \right] \\
 &= (1 - q_i) \left[ \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx + \int_{LP+U_{i-1}+C_i}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx \right. \\
 & \left. + \int_{LP+U_{i-1}}^{U_i} \Phi_{i-1}(x) dx \right] + \sum_{j=1}^n q_{ij} \left[ \int_{U_{i-1}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x + C_i) \right. \\
 & dx \\
 & \left. + \int_{LP+U_{i-1}+C_{ij}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x + C_i) dx + \int_{LP+U_{i-1}}^{U_i - C_{ij}} \Phi_{i-1}(x + C_i) \right. \\
 & \left. dx \right] \\
 &= (1 - q_i) \int_{U_{i-1}}^{U_i} \Phi_{i-1}(x) dx - \sum_{j=1}^n q_{ij} \int_{U_i - C_{ij}}^{U_i} \Phi_{i-1}(x) dx
 \end{aligned}$$

(부 2.1)

여기서,  $\int_{LP+U_{i-1}+C_i}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx = 0$   
 $= \int_{LP+U_{i-1}-C_{ij}}^{LP+U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x + C_i) dx = 0$

**부 록3**

식 (3.5)의 증명  
 $f(x)$ ,  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ 의 Fourier 변환을 각각  $F(\nu)$ ,  $F_1(\nu)$ ,  $F_2(\nu)$ 라 하면 다음식이 성립한다.

$$F_1(\nu) = F(\nu) / F_2(\nu) \tag{부 3.1}$$

단,  $f(x) = f_1(x) \otimes f_2(x)$   
 위의식에 Fourier 변환과 Hartley 변환의 관계식을 대입하면 다음식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 F_1(\nu) &= \frac{H_e(\nu) - jH_o(\nu)}{H_{2e}(\nu) - jH_{2o}(\nu)} \\
 &= [(H_e(\nu)H_{2e}(\nu) + H_o(\nu)H_{2o}(\nu)) - j(H_o(\nu)H_{2e}(\nu) - \\
 & H_e(\nu)H_{2o}(\nu))] / [H_{2e}^2(\nu) + H_{2o}^2(\nu)]
 \end{aligned}$$

(부 3.2)

그러므로,  
 $H_{1e}(\nu) = F_{\text{real}}(\nu) = \frac{(H_e(\nu)H_{2e}(\nu) + H_o(\nu)H_{2o}(\nu))}{H_{2e}^2(\nu) + H_{2o}^2(\nu)}$   
 $H_{1o}(\nu) = -F_{\text{imag}}(\nu) = \frac{(H_o(\nu)H_{2e}(\nu) - H_e(\nu)H_{2o}(\nu))}{H_{2e}^2(\nu) + H_{2o}^2(\nu)}$

이다. 그러므로

$$\begin{aligned}
 H_1(\nu) &= H_{1e}(\nu) + H_{1o}(\nu) \\
 &= [(H_o(\nu)H_{2o}(\nu) + H_o(\nu)H_{2o}(\nu)) + (H_o(\nu)H_{2e}(\nu) \\
 &\quad - H_e(\nu)H_{2o}(\nu))] / H^2_{2e}(\nu) \\
 &\quad + H^2_{2o}(\nu) \\
 &= \frac{[H_e(\nu)(H_{2e}(\nu) - H_{2o}(\nu)) + H_o(\nu)(H_{2e}(\nu) + H_{2o}(\nu))]}{H^2_{2e}(\nu) + H^2_{2o}(\nu)} \\
 &= \frac{H_e(\nu)H_2(N-\nu) + H_o(\nu)H_2(\nu)}{H^2_{2e}(\nu) + H^2_{2o}(\nu)}
 \end{aligned}$$

(부 3.3)

이므로 다음식을 얻을 수 있다.

$$\Phi_{i-1}(x) = \text{FHT}^{-1} \left[ \frac{H_{ie}(\nu)T_i(N-\nu) + H_{io}(\nu)T_i(\nu)}{T^2_{ie}(\nu) + T^2_{io}(\nu)} \right]$$

(부 3.4)

단,  $H_i(\nu) = \text{FHT} \Phi_i(x)$   
 $T_i(\nu) = \text{FHT} f_{oi}(x_{oi})$

### 참 고 문 헌

[1] 송길영 등, "고속 Hartley 변환을 이용한 확률론적 발전시물레이션에 관한 연구," 대한전기학회논문지, 제39권, 4호, pp. 341~348, 1990, 4.  
 [2] 한국전력공사 기술연구원, 전력계통의 장기전망과 운용전략에 관한 연구 (전력계통 장

기전망 분야), 한국전력공사 기술연구원 연구보고서, KRC-85S-T05, 1986, 11  
 [3] K.F. Schenk, etc, "A New Method for the Evaluation of Expected Energy Generation and Loss of Load Probability", IEEE, PAS-103, No. 2, pp. 294~303, 1984.  
 [4] 송길영 등, "확장된 EIGC법에 의한 확률론적 발전비계산에 관한 연구" 대한전기학회논문지, 제36권, 12호 pp. 839~847, 1987. 12  
 [5] R.L. Sullivan, Power System Planning, McGraw-Hill, 1977  
 [6] 한국전력공사 전원계획부, 발전연료비 계획기법 및 모형개발, 한국전력공사 연구보고서, 1982, 12.  
 [7] R.N. Bracewell, The Hartley Transform, Oxford University Press, 1986.  
 [8] EPRI, Electric Generation Expansion Analysis System, EL-2561, Vol. 2, R.P. 1529-1, Final Report, Aug., 1982.  
 [9] 박영문, 이봉용, "해석적 비용함수와 최대원리에 의한 양수 운전을 포함하는 최적전원계획" 대한전기학회논문지, 제34권, 제8호, pp. 308~316, 1985, 8.  
 [10] 에너지 경제연구원, 장기전원개발계획 적정화 방안 연구, 연구보고서, 1987.