

고속 Hartley 변환을 이용한 확률론적 발전 시뮬레이션에 관한연구

- 수력 및 양수발전기의운전을 고려한경우 -

송길영
고려대학교

최제석^o
포항전문대학

김용하
고려대학교

A Study on the Probabilistic Production Costing Simulation using Fast Hartley Transform
- with considering Hydro and Pumped-Storage Plants -

K.Y. Song
Korea University

J.S. Choi^o
Pohang Junior College

Y.H. Kim
Korea University

Abstract

The production costing plays a key role in power system expansion and operations planning especially for the calculation of expected energy, loss of load probability and unserved energy. Therefore, it is crucial to develop a probabilistic production costing algorithm which gives sufficiently precise results within a reasonable computational time. In this respect, a number of methods of solving production simulation have been proposed. In previous paper we proposed the method used Fast Hartley Transform in convolution process with considering only the thermal units. In this paper, the method considering the scheduling of pumped-storage plants and hydro plants with energy constraints is proposed.

1. 서론

전력계통이 복잡해지고도 다양하게 성장해감에따라 더욱 효율적인 확률론적 발전시뮬레이션의 기법이 요구되고 있다. 또한, 전력계통에서는 발전기의 종류도 다양하여 원자력, 화력발전기외에도 그 운전특성이 이들과 다른 수력이나 양수발전기도 존재하고있다.

본 연구에서는 앞서 원자력, 화력발전기 만을 고려한 고속 Hartley 변환을 이용한 확률론적 발전비계산 알고리즘의 개발에 이어서, 이들과는 운전특성이 다른 수력이나 양수발전기의 운전모의까지 고려한 고속 Hartley 변환에의한 기법을 제시하며 또한 발전기의 운전 상태를 다계상태및 다계불특으로 모델링하는 방법도 고려하여 보았다. 본 알고리즘을 실제통규모의 모델계통에 적용하여 그 유용성을 검증하였고 심야울등에 대하여 몇가지 파라메트릭 분석을 하여보았다.

2. 정식화

일반적으로 유효부하의 확률 분포함수(PDF) $\Phi_1(x_0)$ 는 식(2.1)와 같이 정의된다.(2)

$$\begin{aligned} \Phi_1(x_0) &= \Phi_{1-1}(x_0) \otimes fo_1(x_0) \\ &= \int \Phi_{1-1}(x_0-x_{0i}) fo_1(x_{0i})dx \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서, \otimes :상승 적분을 의미하는 연산자

$\Phi_{1-1}(x_0)$: (i-1)번째 ELDC

$fo_1(x_{0i})$: i번째 발전기의 사고용량확률분포함수

그러므로 i 번째 발전기의 발전량 기대치 E_i 는식(2.2)와 같이 구할 수 있으며, $\Phi_{NG}(x)$ 로부터 계통 LOLP 및 EDNS를 식(2.3)및 식(2.4)와 같이 각각 구할 수 있다. 그러므로 확률론적 발전비율 식 (2.5)와 같이 구할 수 있다.

$$E_i = T p_i \int_{U_{i-1}}^{U_i} \Phi_{1-1}(x) dx \quad [\text{MWh}] \quad (2.2)$$

$$\text{LOLP} = \Phi_{NG}(U_{NG}) \quad [\text{hr/yr}] \quad (2.3)$$

$$\text{EDNS} = T \int_{U_{NG}}^{\infty} \Phi_{NG}(x) dx \quad [\text{MWh}] \quad (2.4)$$

$$\text{PCOST} = \sum_{i=1}^{NG} \{a_i T p_i \int_{U_{i-1}}^{U_i} \Phi_{NG}(x) dx + b_i\} \quad [\$] \quad (2.5)$$

여기서, $U_i = \sum_{j=1}^i C_j$

$U_0 = 0$

C_i = i 번째 발전기의 용량 [MW]

p_i = i번째 발전기의 가동율 (=1- q_i)

T = 연구 대상 기간 [hours]

3. 고속 Hartley 변환법

3.1 기본식

R.V.L. Hartley에 의해서 제시된 임의의 함수 $f(x)$ 의 Hartley 변환의 정의식은 식(3.1)과 같다.(3)

$$H(w) = (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) (\cos wx + \sin wx) dx \quad (3.1)$$

여기서, w 는 각속도를 의미한다.

실제응용을 위한 이산화된 Hartley 변환은 식(3.2)와 같다. 이를 식 (3.3)과 같이 표시 하기로 한다.

$$H(w) = N^{-1/2} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) (\cos wx + \sin wx) \quad (3.2)$$

$$= \text{DHT } f(x) \quad (3.3)$$

여기서 N 는 주기를 의미하는 이산화된 자료의 갯수이며 DHT 는 이산화된 Hartley 변환을 의미하는 연산자이다.

3.2 고속 알고리즘

Stretch 정리와 Shift 정리를 이용하여 분할식을 유도할 수 있으며 이를 이용하면 임의의 함수 $f(x)$ 를 2개의 함수로 분할해서 만든 $f_1(x)$ 와 $f_2(x)$ 에 대한 $H_1(v)$ 및 $H_2(v)$ 에서 부터 $H(v)$ 를 구할 수 있다. DHT의 계산 시간이 N^2 인 반면 이와 같은 고속 알고리즘을 이용하면 $N \log_2 N$ 으로 감속된다. (4)

3.3 화력 발전기의 운전모의

고속 Hartley 변환을 이용해서 식(2.1)과 같은 ELDC를 식(3.4)와같이 정식화 할 수있다.

$$\Phi_i(x) = \text{FHT}[\text{FHT} \Phi_{i-1}(x) * \text{FHT} f_{o,i}(x)] \quad (3.4)$$

$$i = 1, 2, \dots, \text{NG}$$

여기서, $\Phi_i(x) = \sum_{m=0}^{N-1} \alpha_m \delta(x-Lm) \quad i=0, 1, 2, \dots, \text{NG}$

$f_{o,i}(x) = \sum_{m=0}^{N-1} \beta_m \delta(x-Gm) \quad i=1, 2, 3, \dots, \text{NG}$

α_m : 부하 Lm 이 존재할 확률

β_m : 발전기 사고용량 Gm 이 발생할 확률

δ : delta 함수

FHT: 고속 Hartley 변환을 의미하는 연산자

FHT 법에 의한 화력 발전기 만을 운전모의하는 알고리즘은 다음과 같다.

단계.1 주어진 역부하 지속곡선의 확률 분포 함수(PDF) $\Phi_0(x)$ 로부터 그 Hartley 변환 $H_0(v)$ 를 구한다.

단계.2 $i=1$ 로 놓는다.

단계.3 $H_{i-1}(v)$ 로부터 $(i-1)$ 번째 발전기까지 상승적분된 ELDC 인 $\Phi_{i-1}(x)$ 를 식(3.5)와 같이 구한다.

$$\Phi_{i-1}(x) = N^{-1/2} \sum_{x=0}^{N-1} H_{i-1}(v) \{ \cos(2 vx/N) + \sin(2 vx/N) \} \quad (3.5)$$

여기서의 $\Phi_{i-1}(x)$ 로부터 식(2.2)를 사용하여 i 번째 발전기의 발전량 E_i 를 구할 수 있다.

단계.4 i 번째 발전기의 사고용량 확률분포함수 $f_{o,i}(x)$ 를 세우고 그 Hartley 변환 $T_i(v)$ 를 구한다.

단계.5 식(3.6)에 따라 $T_i(v)$ 와 $H_{i-1}(v)$ 의 상승을 나타내는 $H_i(v)$ 를 계산한다.

$$H_i(v) = H_{i-1}(v)T_{i0}(v) + H_{i-1}(N-v)T_{i0}(v) \quad (3.6)$$

여기서, $T_{i0}(v) = [T_i(v) + T_i(N-v)]/2$

$T_{i0}(v) = [T_i(v) + T_i(N-v)]/2$

단계.6 $i=\text{NG}$ 이면 단계.7로 가고, 아니면 $i=i+1$ 로 하고 단계.3으로 되돌아간다.

단계.7 식(2.3) 및 식(2.4)에 의하여 LOLP, EDNS를 각각 계산하고 마친다.

3.4 수력 발전기의 운전모의

실계통에는 그 발전량이 저수지의 크기와 강우량등에 의해 제약을 받는 수력발전기도 존재하고있다. 이의 일반적인 운전모의는 그설정된 발전량 만큼, 경제적 우선

순위의 역순으로 화력발전기의 발전량을 감소하므로써 이루어진다. 그러므로 ELDC의 $\Phi_i(x_0)$ 가 역상승 되어져야 한다. 본 연구에서는 식(3.7)과 같이 고속 Hartley 변환에서의 역상승식을 유도하므로써 이를 가능케하였다.

$$H_{i-1} = \frac{[H_{i0}(T_{i0}-T_{i0}) + H_{i0}(T_{i0}+T_{i0})]}{(T_{i0} + T_{i0})} \quad (3.7)$$

위의 식(3.7)를 사용해서 $\Phi_i(x)$ 로부터 $\Phi_{i-1}(x)$ 를 구할 수 있으며 용량 C_H 인 수력발전기의 발전량 E_H 는 화력발전기의 발전량 감소치와 같아야 한다는 조건아래 그운전모의를 다음과 같이 수행할 수 있다.

단계.1 $i=\text{NG}$ 로하고 식(3.8)처럼 i 번째 화력발전기의 감소 발전량 $ED_{H,i}$ 를 계산한다.

$$ED_{H,i} = E_{i1} - (p_H E_{i2} + q_H E_{i3}) \quad (3.8)$$

단, $E_{i1} = T_{p1} \int_{U_{i-1}}^{U-i} \Phi_{i-1}(x) dx$

$E_{i2} = T_{p1} \int_{U_{i-1}+C_H}^{U+C_H} \Phi_{i-1}(x) dx$

$E_{i3} = E_{i1}$

p_H : 수력발전기의 가동율

단계.2 수력발전기의 발전량이 화력발전기의 감발량의 총합과 같아야하므로 이의 조건식(3.9)가 성립 하는지를 검토한다.

$$\sum_{j=\text{NG}}^i ED_{H,j} \geq C_H T C_F \quad (3.9)$$

여기서, C_F : 수력 발전기의 설비이용율

단계.3 만족되면 $\sigma_T=i$ 로한 후 단계.4로 가고 아니면 $i=i-1$ 로한 후 단계.2로간다.

단계.4 위 조건이 만족되면 σ_T 지점이 수력발전기의 최적부하 담당 지점이되고 그러므로 여기서 식(3.10)과 같이 화력기의 감발에 의한 발전량이 미리 설정한 수력발전량의 제약조건을 만족하도록 이들의 발전량을 조정한다.

$$E_{H\sigma T} = E_{H\sigma T} - E_x \quad (3.10.a)$$

$$E_{\sigma T 2} = E_{\sigma T 2} + E_x \quad (3.10.b)$$

여기서, $E_x = \sum_{j=\text{NG}}^{\sigma T} ED_{H,j} - C_H T C_F$

3.5 양수발전기의 운전모의

양수에 의하여 저장될 수 있는 양은 상부저수지의 용량한계에 의하여 제약을 받으며 미리 저장되기전에는 방수할 수 없다. 그러므로 연구대상기간 동안에 걸쳐서 양수 발전기의 운전 시뮬레이션을 하자면 시각의 흐름(Chronological)을 고려하여서 운전모의를 해야 한다. 그러나 이러한 모델은 장기계획에 있어서 큰 계산시간을 요구한다. 그러므로 여기서는 연구대상 기간동안 양수량과 방수량을 각각 합쳐서 고려키로 하고 강제 및 경제양수발전운전의 두개로 나누어 모의한다.

3.5.1 강제양수발전운전

원자력 발전기는 부하 추종 능력이 거의 없으므로

심야시에는 잉여 발전량이 발생할 수도 있다. 그러므로 이를 흡수하기 위한 강제 양수 운전에 의한 양수발전량 TEcp를 식(3.11)처럼 구할 수 있다.

$$TE_{cp} = T \sum_{i \in CG} \frac{U_{i-pgcap}}{U_{i-1-pgcap}} \int \Phi_i(x) dx - \sum_{i \in U_{i-1}} \Phi_{i-1}(x) dx \quad (3.11)$$

여기서, pgcap : 양수발전기의 총 용량

CG : must-run 발전기의 집합

3.5.2 경제양수발전운전

양수 발전기의 운전은 양수와 양발사이의 경제성이 기대될 때까지 이루어진다. 그러므로 이의 운전은 최적화 문제로 구성되어지고 이를 직접 최적화기법으로 해석한다는것은 어렵다고 알려져있다. (3) 일반적으로 상승적분방법에서는 양수발전기의 경제운전에 의한 최적부하담당지점을 탐색법으로 찾고 있다. 여기서도 양수운전에 의해 발전량 증가가 일어나는 화력발전기의 한계비용이 양수발전운전에 의해 발전량 감소가 일어나는 화력발전기의 한계비용이 같아지는 지점까지 찾아가는 탐색법을 사용하기로한다.

3.6 다개모델

발전기는 기기들의 고장으로 인하여 고장상태가 다개상태로 된다. 또한, 발전기의 경제운전 상태를 본다면 부하가 증가해나갈 경우 이에 따라 임의의 한 발전기가 전출력으로 담당하기 전에 다른 발전기를 투입해서 부하의 증가분을 담당하는 쪽이 더 경제적일 수도 있다. 고속 Hartley 변환을 사용하면 다개상태의 고려는 단 한번의 변환으로 고려될 수있고, 다개분류는 기대치 값을 계산해서 사용하기로 한다. (1)

4. 적용예

이번에 제안한 방법을 수력및 양수발전기를 제외한 총 발전기 수가 40대이고 총 설비용량이 13877[MW]인 실규모 계통에 적용하여 보았다. 수력발전기는 그의 용량이 480[MW]이고 연간 설비용용이 20%인 한개의 등가 발전기로 가정하였고 양수발전기도 그의 용량이 1000[MW], 효율이 70%, 상부저수지의 용량이 500[Gwh]인 한개의 등가발전기로 가정했다. 한편 부하로는 최대치가 13270[MW]인 연간부하를 적용했다.

그림.1(a)는 발전량기대치와 신뢰도 지수를 보인것이며, 그림.1(b)는 양수발전기 운전에 의한 각발전기의 발전량 증가및 감소량을 나타낸 것이다. 또한, 그림.2는 원자력 발전기의 추가대수및 부하의 심야율 등에 대하여 파라메트릭 분석을 하여본 결과이며, 표.1은 다개모델의 경우에 있어서의 계산결과이다.

5. 결론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 고속 Hartley 변환을 이용하여 화력발전기는 물론

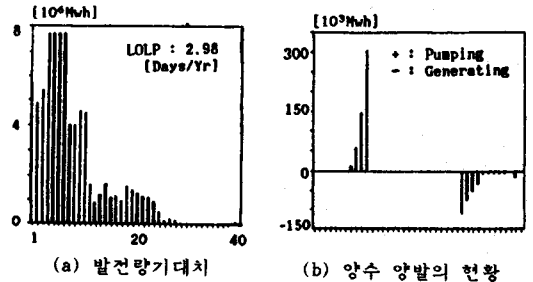


그림.1 고속 Hartley 변환법의 시뮬레이션 결과

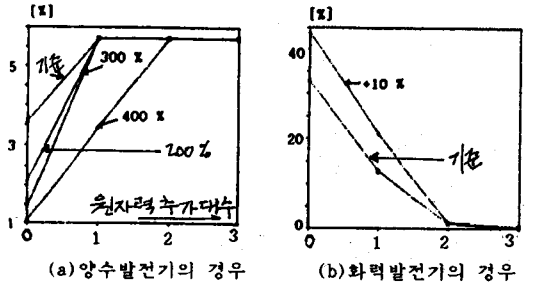


그림.2 파라메트릭 분석결과

표.1 다개모델의 적용예

	단개모델	다개모델
총 발전비용[Gwh]	857.158	856.113
LOLP [days/yr]	3.540	3.468

발전량제한조건을 갖는 발전기로 볼 수있는 수력및 양수발전기의 운전모의까지 포함한 확률론적 발전 시뮬레이션을위한 효과적인 알고리즘을 개발하였으며 이를 위하여 고속 Hartley 변환에서의 역상승식을 정식화했다.

(2) 본 알고리즘을 실제규모의 모델계통에 적용하여 그 유용성을 살펴보았으며 그의 점차 비중이 높아가고있는 원자력을 중심으로 심야율, 양수발전기의 설비용을 등에대한 파라메트릭분석을 하여보았다.

참고문헌

- (1) 송 길영 등; '확장된 EIGC법에 의한 확률론적 발전비계산에 관한 연구', 대한전기학회논문지, 36-12-1, pp.839-847, 12월, 1987.
- (2) R.T. Jenkins, D.S. Joy; 'Wien Automatic System Planning Package(WASP)-An Electric Utility Optimal Generation Planning Computer Code', ORNL-4945, 1974.
- (3) J.A. Bloom, etc; 'Long Range Generation Planning with Limited Energy and Storage Plants', IEEE, PAS-102, No.9, Sep., 1983.
- (4) R.N. Bracewell; 'The Hartley Transform', Oxford University Press, 1986.
- (5) K.Y. Song, J.S. Choi, Y.H. Kim; 'A Study on the Probabilistic Simulation using Fast Hartley Transform', IFAC, pp.231-235, August, 1989.