

최대원리에 의한 화력-양수발전시스템의 확률적 운전시물레이션 모델

이 봉 용, 심 건 보

홍익대학교 공과대학 전기제어공학과

Probabilistic Optimal Weekly Coordination of Thermal-Pumped Storage
Power System based on the Maximum Principle

Bong-Yong, Lee Keon-Bo, Shim

Hong-Ik University, Dept. of Electrical & Control Engr.

<Abstract> Operation simulation is a key factor to evaluate investment and operation in a power utility. Probabilistic production simulation is of major concern. With pumped-storage plant, production simulation is not an easy task, because its economy should fully be exploited. In addition, usual operation interval is a week rather than a day.

Most existing models are based on approximate production simulation such as adopting simple priority orders of generations. This study is based on the more elaborate model developed by authors.

Further, a policy of weekly coordination is established based on the Maximum Principle. Chronological load curve instead of usual load duration curve is used and the accuracy in simulation is enhanced.

Resulting economics are compared. Deviation between these two load curve is shown.

등에 대한 방법론이 확립되어야 하는 바, 본 연구는 이미 필자들에게 의하여 개발된 방법론들[4]~[6]을 종합하고, 특히 화력-양수 발전시스템의 경제운영에서 최적화에 이르는 수렴 과정을 개선하였다. 또한 종래에 일반적으로 사용되는 부하 지속곡선에 의한 화력-양수 발전시스템의 경제운영이, 기존의 운전모델에서 양수 발전시스템을 유리하도록 과대평가하고 있음을 밝히고자 한다.

1. 서론

전력시스템에서 운전시물레이션은, 전력산업의 계획이나 운전의 경제성 평가에서 매우 중요한 부분으로 알려져 있다. 운전시물레이션의 여러 기법중에서 대표적인 것은, 전천계획용 패키지인 WASP[1]에서 사용되는 유효부하법, MNI[2]에서 사용되는 이산화 상층적분법 및 최근에 발표된 해석적 상층적분법[3] 등이 있다.

이런 기존의 방법들이 가지고 있는 공통점은, 화력발전설비의 경제운영원리가 연료비가싼 전원에서 투입하는 우선순위법에 의한다는 점이다. 이 우선순위법은 계산의 효율면에서 바람직하지만, 시물레이션의 정밀성 면에서는 문제가 될 수 있다.

운전시물레이션의 정밀성 개선은

- 원자력이나 대용량 화력등과 같은 기저부하용 전원의 증가와 관련된 양수발전시스템의 필요성
- 시간대별 한계비용에 따른 전력요금의 산정 요구
- 부하관리 및 그 효과분석을 위한 보다 정확한 시스템 상태 정보제공의 필요성

등의 이유때문에 앞으로 더욱 그 필요성이 제기될 것으로 전망된다.

본 연구는 이러한 필요성에 부응하고자 하는 것이며, 화력-양수 발전시스템의 확률적 정밀 운전시물레이션을 목표로 한 것이다. 화력-양수 발전시스템의 실제 운전상태에 보다 접근하기 위해서는

- 화력 발전설비의 기동-정지계획
- 화력 발전시스템의 확률적 운전시물레이션
- 화력-양수 발전시스템의 경제운영원리

2. 정밀 운전시물레이션을 위한 고려 사항

전력시스템에서 정밀 운전시물레이션을 위해서는 다음의 사항이 고려되어야 한다.

• 화력 발전설비의 기동-정지계획

실제의 화력발전은 주어진 부하수준에 대한 기동-정지계획이 선행되어야 하며, 이 때 적정한 수준의 운전 예비력이 유지되어야 한다. 다만, 운전시물레이션을 위한 기동-정지계획은 효율적이어야 하는데, 문헌[4]는 이러한 요건들을 충족시키고 있다.

• 화력 발전설비의 실제적인 경제운영

화력 발전설비의 동종분연료비법에 의하고 있음은 익히 잘 알려진 바이며, 연료비가싼 순위에 의한 우선순위법은 근사적인 경제운영이다. <표 1>은 두가지 방법을 비교한 것이다. 기저부하용 전원의 경우, 그 출력에 차이가 없으나, 연료비가싼 상위군 발전설비 쪽으로 갈수록 출력이 상당히 라리진다는 점을 볼 수 있다. 이 특성은 양수발전의 평가나 전력요금 등의 관점에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 문제는 동종분연료비법에 의한 확률운영이 여하히 가능할 것인가 하는 것인데, 문헌[5]에서 이 문제가 해결되고 있다.

• 화력-양수 발전시스템의 경제운영원리

화력-양수 발전시스템의 운전주기는 1주일일 일반적이며, 그 경제운영원리는 1일의 경우와 다르며, 문헌[6]에서 최대원리로부터 도출될 수 있음을 보였다. 동일한 경제운영원리를 확률운영에 적용할 수 있게 하기 위해서는 수렴특성의 개선이 필요하였으며, 최적 운전조건 및 부동호제약의 만족을 위하여 상당한 노력이 필요하였다. 또한, 종래의 부하지속곡선의 사용은 상부제수지의 용량을 7배로 하기 때문에, 그만큼 용량제약을 받지 않게 되며, 본 연구에서는 일력순부하곡선이 사용되었으며, 부하지속곡선의 사용이 어느 만큼 양수운전을 과대평가하는지 보일 것이다.

<표 1> 화력설비의 경제운영 비교

번 호	유 형	대 수	설 비 용	부하 9125MW		부하12310MW		부하15332MW		
				방법A	방법B	방법A	방법B	방법A	방법B	
1	1	6	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0	
2	1	1	587.0	587.0	587.0	587.0	587.0	587.0	587.0	
3	5	1	250.0	0.0	0.0	45.4	0.0	227.2	250.0	
4	5	1	137.0	0.0	0.0	45.5	0.0	137.0	137.0	
5	4	2	325.0	0.0	0.0	0.0	0.0	325.0	325.0	
6	4	2	309.0	0.0	0.0	97.7	0.0	309.0	309.0	
7	5	3	200.0	0.0	0.0	0.0	0.0	90.3	0.0	
8	5	3	400.0	0.0	0.0	21.1	400.0	134.1	400.0	
9	4	4	350.0	0.0	0.0	307.6	203.5	350.0	350.0	
10	4	1	315.0	0.0	0.0	315.0	0.0	315.0	315.0	
11	5	1	162.0	0.0	0.0	11.5	0.0	136.0	0.0	
12	3	1	125.0	0.0	0.0	0.0	0.0	125.0	125.0	
13	5	1	200.0	7.0	0.0	85.9	0.0	200.0	200.0	
14	3	2	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	0.0	
15	3	1	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.0	0.0	
16	3	1	75.0	0.0	0.0	21.6	0.0	75.0	0.0	
17	3	1	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	
18	3	2	60.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.0	0.0	
19	5	2	105.0	0.0	0.0	0.0	0.0	92.3	105.0	
20	2	2	280.0	0.0	0.0	280.0	280.0	280.0	280.0	
21	2	2	500.0	365.3	194.5	500.0	500.0	500.0	500.0	
22	2	2	560.0	385.7	560.0	560.0	560.0	560.0	560.0	
23	1	1	679.0	679.0	679.0	679.0	679.0	679.0	679.0	
24	1	1	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	
25	7	1	55.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
26	7	36	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
운전비[백만원]				5.57	4.90	14.10	11.85	24.48	19.91	

참고1(유형) : 1 = 원자력, 2 = 유연탄, 3 = 무연탄, 4 = LNG, 5 = 석유, 6 = C/C, 7 = G/T
 참고2(방법) : 방법A = 동종분연료비법, 방법B = 연료비 우선순위에법

3. 주간 화력-양수발전시스템의 경제 운용

3.1 주간 경제운용의 원리[6]

일련된 부하곡선을 사용하는 경우에 1주일을 대상으로 하는 화력-양수 발전시스템의 협조문제는 양수를 할 때 운전비가 증가하고, 발전을 할 때 운전비의 절감이 이루어지므로, 운전비의 증가와 절감에 대한 한계 수준을 찾는 문제로 귀착된다. 여기에 미일미일의 양수와 발전에 대한 제약조건이 추가될 것이다. 이런 화력-양수 발전시스템의 최적 경제운영 문제는 최대원리(Maximum Principle)[8]를 이용하여 다음과 같이 정식화될 수 있다.

- min $\sum_k f_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N$ (1)
- subject to $x_{k+1} = x_k + \eta \cdot E_{pk} - E_{sk}$ (2)
- $0 \leq E_{pmax} - x_k / \eta - E_{sk}$ (3)
- $0 \leq x_k + \eta \cdot E_{pk} - E_{sk}$ (4)
- $0 \leq E_{pk} \leq E_{pmax}$ (5)
- $0 \leq E_{sk} \leq \eta \cdot E_{pmax}$ (6)
- $\eta \sum_k E_{pk} - \sum_k E_{sk} = 0$ (7)

여기서, f_k : k일의 연료비 [원]
 x_k : k일 시작시의 유효저수에너지 [MWh]
 E_{pk} : K일의 양수에너지 [MWh]
 E_{sk} : K일의 발전에너지 [MWh]
 E_{pmax} : 양수에너지의 최대값(상부저수지 용량)
 η : 양수-발전간의 차이율
 N : 경제운영 대상기간

식(1) ~ (7)은 라그랑지안(Lagrangian)을 정의하므로써

$$L = \sum_{k=0}^{N-1} f_k + \sum_{k=0}^{N-1} \lambda_{k+1} [x_k + \eta \cdot E_{pk} - E_{sk} - x_{k+1}] + f_N - \sum_{k=0}^{N-1} \mu_k [E_{pmax} - x_k / \eta - E_{sk}] - \sum_{k=0}^{N-1} \nu_k E_{pk} - \sum_{k=0}^{N-1} \omega_k E_{sk} + \gamma [\eta \sum_{k=0}^N E_{pk} - \sum_{k=0}^N E_{sk}] \quad (8)$$

여기서, $\lambda, \mu, \nu, \gamma, \omega, \nu$: 라그랑지 미정계수와 같이 정리된다.

여기에서 해밀터니언(Hamiltonian)을 다음과 같이 정의한다.

$$H(k) = f_k + \lambda_{k+1} [x_k + \eta \cdot E_{pk} - E_{sk}] - \mu_k [E_{pmax} - x_k / \eta - E_{sk}] - \nu_k E_{pk} - \omega_k E_{sk} + \gamma [\eta E_{pk} - E_{sk}] \quad (9)$$

해밀터니언을 식 (8)에 대입하여 정리하면,

$$L = \sum_{k=0}^{N-1} [H(k) - \lambda_k x_k] + H(0) + f_N - \lambda_N x_N \quad (10)$$

와 같다. 이 식의 변분(variation)을 취하면

$$dL = \sum_{k=0}^{N-1} [(\frac{\partial H(k)}{\partial x_k} - \lambda_k) dx_k] + \sum_{k=0}^{N-1} [\frac{\partial H(k)}{\partial E_{pk}} dE_{pk}] + \sum_{k=0}^{N-1} [\frac{\partial H(k)}{\partial E_{sk}} dE_{sk}] + \frac{\partial H(0)}{\partial x_0} dx_0 + [\frac{\partial f_N}{\partial x_N}] dx_N \quad (11)$$

이 되어, L 이 최소화되기 위한 조건으로부터 상미분수에 대하여 다음의 관계를 얻게 된다. 이 식을 특히 접가 방정식(adjoint equation)이라 불리우며 물리적으로 중요한 의미를 갖는다. 즉,

$$\frac{\partial f_N}{\partial x_N} = \lambda_N \quad (12)$$

$$\frac{\partial H(k)}{\partial x_k} = \frac{\partial f_k}{\partial x_k} + \lambda_{k+1} + \mu_k / \eta - \nu_k = \lambda_k \quad (13)$$

x_N 의 증분은 이득(발전)을 의미하며, 따라서 x_N 의 증분에 대한 비용 이득이 λ_N 임을 나타낸다. x_k 의 증분에 대한 비용이득은, 전일의 증분이득 λ_{k+1} 과 합산되어 현재의 증분이득을 구성한다. 즉 현재의 증분이득은 미래의 증분이득까지 합산된 결과이다.

라는 물리적인 개념을 제공하기 때문이다. 그런데 양수발전에서 이 증분이득은, 이미 x_k 가 비용을 발생시켜 저장된 에너지인 점을 고려할 때, " x_k 가 가지고 있는 비용과 x_k 에 의하여 발생 되는 이득과의 차이"인 증분이득임이 분명하다. 따라서

$$f_k = f_k(x_k) - f_k(\frac{1}{\eta} x_k = E_{pk-1}) \quad (14)$$

인 함수에 대하여 평가되어야 하며, 결국

$$\frac{\partial f(k)}{\partial x_k} = \frac{\partial f_k(x_k)}{\partial x_k} - \frac{\partial f_k(E_{pk-1})}{\partial E_{pk-1}} \cdot \frac{1}{\eta} \leq 0 \quad (15)$$

라는 결론에 이르게 된다.

또한, 식 (11)은 제어변수인 E_{pk} 와 E_{sk} 에 대한 최소화 조건으로부터

$$\frac{\partial H(k)}{\partial E_{pk}} = \frac{\partial f_k}{\partial E_{pk}} + \eta \lambda_{k+1} + \eta \gamma + \mu_k \lambda_k - \nu_k \quad (16)$$

$$\frac{\partial H(k)}{\partial E_{sk}} = \frac{\partial f_k}{\partial E_{sk}} - \lambda_{k+1} - \gamma + \nu_k - \omega_k = 0 \quad (17)$$

라는 최적 운용조건을 얻게 된다. 그런데, 만일 부동호제약 조건이 항상 만족되는 경우라면 식(12), (13), (16) 및 (17)은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial f_N}{\partial x_N} = \lambda_N \quad (18)$$

$$\lambda_k = \frac{\partial f_k}{\partial x_k} + \lambda_{k+1} \quad (19)$$

$$\frac{\partial f_k}{\partial E_{pk}} + \eta \lambda_{k+1} + \eta \gamma = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial f_k}{\partial E_{sk}} - \lambda_{k+1} - \gamma = 0 \quad (21)$$

이 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 저수지에 저장된 물(에너지)은 이득을 발생시킨다.
- 현재의 이득은 현재이후 미래까지의 이득의 합이 된다.
- 양수는 이득수준(증분비용)과 일주일의 양수 및 발전 에너지가 같아야 한다는 증분수준(γ)의 합이 되도록 운전 해야 하며,
- 발전은 역시 이득수준과 일주일 에너지에 대한 증분수준에 맞추어서 해야 한다.

이러한 1주일의 운용원리를 1일의 단기운용시의 경제 원리와 비교할 때, 저장에너지에 의한 이득수준이 추가되어 있는 점에서 구별되며, 적어도 이론적으로는 일요일의 부하가 극단적으로 낮고 또한 상부저수지 용량이 충분하다고 할 때, 일요일에 일주일분을 양수하여 1주일중 기타요일은 발전만 하여도 경제적이라고 할 수 있다. 최대원리에 의하여 얻어진 이러한 주간운용에 대한 경제원리는 더 나아가서

- 양수발전소의 상부저수지 용량의 경제적 규모 결정

에도 실제적인 근거를 제공할 수 있게 한다.

3.2 최적운전조건 및 부동호제약의 만족

양수발전설비에 대한 주간운용의 경제원리는 일단 식(3)~(6)의 부동호제약조건의 만족을 전제로 도출되었다. 이론적으로는 부동호제약을 나타내는 라그랑지 미정계수가 결정되면 식(16) 및 (17)에 의한 경제 운용이 가능하다. 그리고 다행히 양수운전에 관한 한 부동호제약에 대한 라그랑지 미정계수 역시, 그 물리적인 의미가 명백하기 때문에 값의 결정은 비교적 용이하다. 그러나 실제적으로 운용해 본 결과 최적 해에 이르는 반복회수가 상당히 증가되었으며, 해의 수렴과정 역시 불안정한 경향을 보였다(6).

본 연구에서는 이런 수렴의 불안정성과 반복회수의 감소를 위해서, 다음과 같은 과정으로 부동호제약조건을 위반 하지 않도록 하는 실제적인 접근법을 개발하였다.

- 1) 부동호제약조건을 위반하지 않도록 초기에너지 E_{pk} , E_{sk} 를 주어 운전한다.
- 2) 이론적으로는 일주일 에너지에 대한 증분비용수준 γ 가 하나의 값으로 되어 있으나, 실제로는 양수시의 발전 시에 이 값이 상당히 다르다. 초기에너지에 의한 운전으로부터

$$\bar{\gamma}_p = \frac{1}{N} \sum \gamma_{pk} \quad (\gamma_p = -\eta \gamma) \quad (22)$$

$$\bar{\gamma}_s = \frac{1}{N} \sum \gamma_{sk} \quad (\gamma_s = \gamma) \quad (23)$$

인 평균 증분비용이 먼저 결정된다.

- 3) 평균 증분비용수준에 대하여 초기에너지를 재분배하고, 이 때 부동호제약을 위반할 수 있다. 부동호제약의 위반량은 단계6)의 방법으로 배분된다.

- 4) 식 (18) 및 (19)의 λ_{k+1} 을 도입하여, 매일매일의 양수 및 발전에 대한 최적 증분비용 수준이 주어진다.

$$\gamma_{pk}' = \bar{\gamma}_p - \eta \lambda_{k+1} \quad (24)$$

$$\gamma_{sk}' = \bar{\gamma}_s + \lambda_{k+1} \quad (25)$$

- 5) 식(24) 및 (25)는 최적 운전조건이다. 이 증분비용 수준에 맞추어 에너지가 조정(증가 또는 감소)된다.

- 6) 조정된 에너지는 부동호 제약조건을 위반할 수 있다. 그런데 최적조건이 의미하는 바가

- 초기시간으로 갈수록 γ_{pk}' 값은 높아지며,
- 종기시간으로 갈수록 γ_{sk}' 값은 낮아진다.

는 것을 의미하므로, 이것은 처음에 양수를 많이 해야 하며, 뒤로 갈수록 발전을 더 해야 한다는 뜻이다. 따라서,

- E_{pk} 의 위반량은 k이전의 γ_{pk}' 가 높은 시간대부터 배분된다.
- E_{sk} 의 위반량은 k이후의 γ_{sk}' 가 낮은 시간대부터 배분된다.

- 7) 단계 6)의 결과 만일 위반량이 없으면 최적 운전조건을 만족한 것이며, 아니면 단계 8)로 이행한다.

- 8) 위반량이 E_{pk} 가 클 때

- 만일 운전비가 증가되었다면 위반량을 소멸시킨 후, 단계 7)로 이행하며,
- 만일 운전비가 감소되었다면 E_{pk} 의 잉여분에 해당하는 만큼 양수 에너지가 증가된 후 단계 2)로 이행하며,

위반량이 E_{sk} 의 잉여분이 클 때

- 만일 운전비가 증가되었다면 위반량을 소멸시킨 후, 단계 7)로 이행하며,
- 만일 운전비가 감소되었다면 E_{sk} 의 잉여분에 해당하는 만큼 발전에너지가 증가된 후 단계 2)로 이행한다.

이상의 최적운전과 부동호제약의 만족는 동시적이며, 또한 항상 최적운전조건에 맞도록 배려되고 있기 때문에 결과는 매우 성공적이며서, 반복회수 3~4회에서 최적 운전 상태가 결정되었고, 해의 안정성이 보장될 수 있었다.

4. 화력-양수발전시스템의 확률적 운전 시뮬레이션

화력 - 양수발전시스템의 확률적 운전시뮬레이션 문제는 앞에서 설명된 내용에 따라 그림 1과 같이 전체과정을 정리할 수 있다.

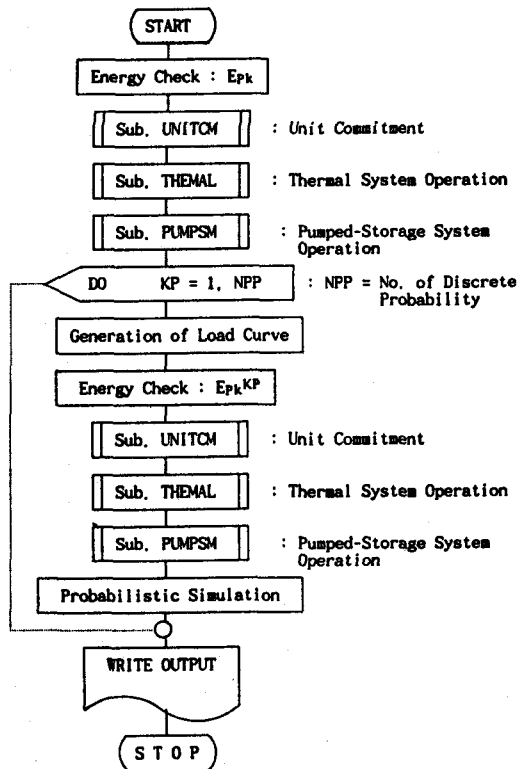


그림 1. 화력-양수발전시스템의 확률적 경제운영 흐름도

5. 사례 연구

본 연구의 효용성을 입증하기 위한 사례연구 시스템으로 17,768[MW]의 발전설비(양수설비 1,000[MW] 포함)와 첨두부하 12,275 [MW]인 시스템을 선택하였으며, 경제운영 대상기간을 168 [hr] (1 주일)로 하였다.

<표 2> 화력 발전설비의 특성

번호	유형	대수	설비 용량	연료비계수			가동률
				상수항	1차항	2차항	
1	1	6	950.0	56514.43	3710.0000	0.185500	0.880
2	1	1	587.0	54381.81	3570.0000	0.178500	0.880
3	5	1	250.0	1154459.00	20445.3242	11.383910	0.902
4	5	1	137.0	1154459.00	20445.3242	11.283910	0.902
5	4	2	325.0	1051076.75	24921.8496	3.489760	0.897
6	4	2	309.0	1051076.75	23421.8496	3.989760	0.919
7	5	3	200.0	1864512.13	28152.3848	21.402361	0.902
8	5	3	400.0	1229276.25	21397.4883	6.571660	0.916
9	4	4	350.0	1066868.38	21659.7676	4.130750	0.912
10	4	1	315.0	1066868.38	21659.7676	4.030750	0.912
11	5	1	162.0	2577327.25	22814.5781	60.402119	0.920
12	3	1	125.0	542096.50	26468.0078	21.435749	0.926
13	5	1	200.0	2366400.50	13189.8291	44.077759	0.920
14	3	2	50.0	1183040.25	28022.4316	49.688251	0.886
15	3	1	45.0	196154.23	30030.0898	53.248150	0.902
16	3	1	75.0	1614451.75	20400.8691	88.004547	0.920
17	3	1	30.0	1677727.50	30115.4297	58.670639	0.919
18	3	2	60.0	1297375.13	28907.9805	53.574108	0.902
19	5	2	105.0	286619.59	27862.4297	51.636429	0.920
20	2	2	280.0	798513.88	18400.1895	5.793780	0.820
21	2	2	500.0	1063509.75	11153.2266	4.009540	0.820
22	2	2	560.0	1268065.38	10936.3662	4.078670	0.820
23	1	1	679.0	51639.87	3390.0000	0.169500	0.880
24	1	1	650.0	56514.43	3710.0000	0.185500	0.880
25	7	1	55.0	3843628.00	53626.8047	33.606220	0.950
26	7	36	5.0	3843628.00	52623.6133	32.753429	0.950

참고 : 1 = 원자력, 2 = 유연탄, 3 = 무연탄, 4 = LNG, 5 = 석유, 6 = C / C, 7 = G / T

<표 2>는 표본시스템의 화력 발전설비의 특성을 보인 것으로서, 총 81 대의 설비가 원자력 7,616 [MW], 유연탄 화력 2,680[MW], 무연탄화력 495[MW], LNG 화력 2,983[MW] 및 가스 터빈 235 [MW]로 구성되어 있다.

<표 3>은 사용된 1주일의 시간대별 부하를 보인 것으로 첨두부하 12,275 [MW], 최저부하 7,734[MW] 및 부하율 86 [%]이며, 총부하에너지는 1,771,935 [MWh]인 규모이다.

<표 3> 샘플시스템의 부하자료

단위 : MW

시간대	SUN	MON	TUE	WED	THU	FRI	SAT
1	9461	10192	8923	9477	9396	9465	9619
2	9034	10456	8861	9251	9123	9082	9166
3	8871	10684	8891	9125	9051	9146	9106
4	8621	10912	9033	8917	8906	8916	9015
5	8657	11464	9161	9033	8962	9024	8895
6	8700	11695	9431	9269	9262	9223	9282
7	8754	11887	9739	9957	9937	9506	9784
8	8855	12087	10329	10399	10182	10270	10335
9	9068	12146	11345	11309	11256	11572	11393
10	9264	12227	12275	12168	12122	12228	12204
11	9367	11964	12195	12275	12243	12192	12172
12	9361	11061	12051	12098	12153	12098	12148
13	9038	11740	11041	11163	11035	10939	11270
14	9100	12151	11612	11594	11721	11544	11756
15	9077	11690	12007	12004	12031	11994	12210
16	8770	11540	11946	11847	11844	11803	12061
17	8231	11005	11858	11927	11939	11821	12014
18	7805	10509	11682	11696	11661	11676	11885
19	7734	10104	11515	11637	11486	11525	11478
20	7751	9802	11139	11199	11057	11161	11548
21	7894	9509	11575	11288	11317	11521	11216
22	8398	9478	11457	11439	11606	11711	10612
23	9170	9231	10211	11322	11286	11370	10234
24	9742	9011	9901	10387	10483	10535	9924

5.1 화력-양수시스템의 최적운영 결과

확정적 운전(Deterministic Operation)의 경우에는 발전기의 고장정지가 없으므로, 발전기가 보는 부하수준은 하나만 존재하나, 확률적 운전(Probabilistic Operation)의 경우에는 발전기의 고장때문에 발전기가 보는 부하수준이 정규분포를 갖는다는 점은 문헌[5]에서 언급된 바와 같다. 이 정규분포는 본 사례에서 12분마다 이산화 처리되었다.

<표 4>는 그 결과를 보인 것이다. 확정적 운전에 비해서 확률운전의 경우에는 총운전비가 약 34 [%] 정도 상승됨을 알 수 있으며, 이득 또한 일주일당 6천만[원]에서 1억 4천만[원]으로 증가되고 있다. 그러나 총운전비에 대한 비율은 불과 0.38 [%]에서 0.66 [%]로서 매우 근소한 값을 보이고 있다. 이미 지적된 바와 같이 일력순부하를 사용하면, 상부제수지의 용량제약으로 인하여 매우 근소한 이득이 예상되었다.

<표 4> 일력순부하곡선상의 화력-양수시스템의 경제운영

구분	확정적 운전	확률적 운전
화력만의 운전비[억원]	158.1	212.5
양수시의 운전비[억원]	157.5	211.1
양수 에너지 [MWh]	19766.5	21910.2
양수운전 이득[천만원]	6.04	14.06
양수운전 이득 [%]	0.382	0.66

그림2에 일주일의 일력순부하곡선상에 최적 양수운전 결과를 보였다. 본 연구에서 제시된 주간 경제운영의 원리는, 부하가 낮은 일요일 및 일주일의 앞부분에서 양수를 많이 하고, 제약조건을 만족하면서 시간이 흐름수록 더 많이 발전하는 것이 본래의 내용이었다. 그러나 실제로는 제약조건 때문에 경제원리가 충분히 반영되고 있지는 않다.

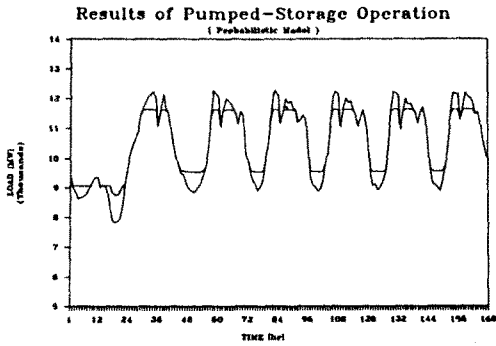


그림 2. 화력-양수시스템의 주간 경제운영 결과

5.2 일력순 부하곡선과 부하지속곡선의 결과 비교

이미 일력순부하곡선과 부하지속곡선 사용시의 문제점이 지적된 바가 있다. <표 5>는 그 결과의 일부를 보인 것이다. 부하지속곡선은 종래에 흔히 사용되고 있는 것이며, 또한 화력의 경제운영 역시 실제와는 상당한 차이가 예상되는, 연료비가 낮은 권천부터 순서대로 투입된다는 단순한 경제 원리에 의존하고 있다. 또한 상부저수지의 용량이 7배가 되므로서 제약조건이 크게 완화되어 양수운전이 과대평가될 것이라는 점이 이미 언급된 바 있다. 따라서 운전비의 차이(약 8%)는 별개로 하더라도, 양수에너지에서 무려 42.8 [%](확정적 운전) 및 54.5 [%](확률적 운전)나 과대평가 됨이 본 연구에서 자명하게 확인되고 있으며, 종래의 양수운전 시뮬레이션이 재검토되어야 함을 보여주고 있다.

<표 5> 일력순부하곡선과 부하지속곡선 사용시의 비교

구 분	확정적 운전		확률적 운전	
	부하곡선 A	부하곡선 B	부하곡선 A	부하곡선 B
화력만의 운전비[억원]	158.10	144.80	212.50	195.60
양수운전시의 운전비[억원]	157.50	142.80	211.10	194.20
양수 에너지 [MWh]	19766.60	28233.90	21910.20	33843.30
이득 [천만원]	6.04	19.50	14.06	14.40

참고 : 부하곡선 A = 일력순 부하곡선, 부하곡선 B = 부하지속곡선

그림 3은 부하지속곡선을 사용한 경우의 확률적 운전 결과를 나타낸 것이다.

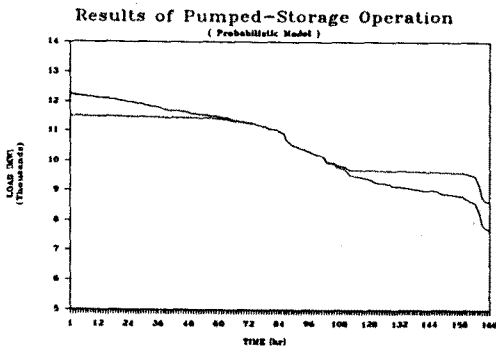


그림 3. 부하지속곡선의 화력-양수시스템 경제운영 결과

<표 6>은 발전기군별 공급에너지의 내용을 요약한 것이다. 화력만의 운전시에 상위군의 출력에 차이가 있음이 확인되는 바, 원자력과 유연탄 화력의 출력에는 별다른 차가 보이지 않으나, 상위군의 출력은 모두 상당한 차이를 보이고 있다. 한계한 공급에너지가 모두 일치되는 점에서 만일, 설비용량과 부하가 달라진다면 경제운전원리의 차이에 따라 상당한 폭의 출력변화를 예상해야 한다.

<표 6> 발전기군별 공급에너지의 비교

단위 : GWh

전 원	확정적 운전		확률적 운전	
	부하곡선 A	부하곡선 B	부하곡선 A	부하곡선 B
원자력	1125.94	1125.94	1125.53	1125.90
유연탄	341.92	351.58	341.86	354.84
무연탄	12.50	11.04	8.60	7.17
L N G	229.60	230.70	250.40	256.50
석 유	60.00	56.30	42.30	33.60
G / T	0.81	0.61	0.49	0.37
합 계	1770.73	1776.	1769.28	1778.38

참고 : 부하곡선 A = 일력순 부하곡선, 부하곡선 B = 부하지속곡선

부하지속곡선을 사용한 시뮬레이션은 계산의 효율면에서 일력순부하곡선을 사용하는 경우보다 약 5 배정도의 우수성을 보였다. 따라서, 제시된 본 연구의 확률적 양수발전설비의 운전모델은 계산의 효율성을 개선할 필요가 있을 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 실제의 시스템 상태에 매우 근접된 시뮬레이션기법을 개발하였으며, 특히 화력-양수발전시스템의 최적 운영을 고려한 정밀 운전시뮬레이션 모델을 개발하였다. 본 연구의 주된 내용은 다음과 같이 요약된다.

- 1) 화력-양수발전시스템의 시뮬레이션이 실시시스템의 제연에 충실할 수 있도록 저자들에 의하여 이미 개발된 실제적인 기동-정지계획 역시 저자들에 의해 기개발된 화력시스템의 확률적 운전 시뮬레이션 모델을 근간으로 하였다.
- 2) 화력-양수 발전시스템의 경제운영은 일주일을 대상으로 해야 함을 재확인하였으며, 최대원리에 의한 경제운영 원리의 수렴과정을 개선하였다.
- 3) 특히, 일력순부하곡선을 사용하여, 실제의 운영에서 예상되는 제약조건들이 반영될 수 있도록 기법을 정비하였다.
- 4) 부하지속곡선을 사용하는 경우에 양수에너지의 과대평가 가능성을 지적하였으며, 사례연구를 통하여 약 50 [%]의 과대평가가 될 수 있음을 보였다.
- 5) 본 연구의 결과는 종래의 시뮬레이션 기법과 상당한 차이를 보임으로서, 실제의 시스템 평가에서 더 좋은 결과를 줄 것으로 전망이 된다.

후속연구로서 수력 및 양수가 혼합된 일반 전력시스템에 대한 최적 전원보수계획 모델이 개발되어야 할 것으로 사료된다.

< 참고 문헌 >

1. R.T. Jenkins, D.S. Joy, "Wien Automatic System Planning Package (WASP)-an Electric Utility Optimal Generation Expansion Planning Codes", Oak - Ridge National Lab., pp.11-65, 1974.
 2. Electricite De France, Computer Program for Model of National Investment, EDF, 1977.
 3. Y.M. Park, B.H. Seo, "An Analytic Algorithms to Estimate Expected Generation and Marginal Costs", Trans. KIEE, vol. 31, No. 7, pp.1-10, 1982.
 4. 이 병용, 심 건보, 김 정훈, "확률적 운전예비력 및 운전비 단가 우선순위에 의한 화력시스템의 실제적인 기동-정지 계획", 대한전기학회 논문지, 제37권 6호, pp. 331-338, 1988.
 5. B. Y. Lee, K. B. Shim & J. R. Shin, "Probabilistic Production Costing Simulation Model based on the Real Economic Dispatch", Power Systems and Power Plant Control 1989, pp. 207-211, 1990.
 6. Bong-Yong Lee, Keon-Bo Shim & Young-Moon Park, "Optimal Weekly Coordination of Thermal - Pumped Storage Power System based on the Maximum Principle", Proceeding of 1988 KIEE Annual Conference International Sessions, pp. 163-166, 1988.
 7. L. K. Kirchmayer, Economic Operation of Power Systems, John Wiley & Sons, 1958.
 8. A. E. Bryson, Jr. & Yu-Chi Ho, Applied Optimal Control, John Wiley & Sons, pp.42-55, 1975.
-