

양수 발전을 고려한 최적장기전원계획

LONG-TERM GENERATION PLANNING INCLUDING
PUMPED-STORAGE OPERATION

박 영 문 서울대 교수
이 봉 용 홍익대 교수
김 정 훈* 홍익대 교수

1. 서 론

장기 전원계획이 방대한 부자규모를 요하는 만큼, 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔으며, 실제 업무에 활용되고 있는 예도 드물지 않다. 이들 연구를 크게 나누면

- 1) 실험계획법을 이용한 모델
- 2) 비선형계획법을 이용한 모델
- 3) 동적계획법을 이용한 모델
- 4) 최대원리법을 이용한 모델
- 5) 기타

와 같이 구분할 수 있으나, 1), 3) 및 4)가 널리 활용되고 있다.

각 모델은 각각의 특징을 가지고 있으며, 그 특징은 대략 표 1과 같이 요약될 수 있다.

표 1. 대표적 전원 계획 모델의 특징

구분	단위경제	생성비용	입수발전	계산량	부하처리	최적해
선형 계획법	불량	우수	우수	보통	이상형	가능
동적 계획법	우수	우수	우수	과다	단일부하지속곡선	일부 문제점
최대원리	불량	우수	우수	약간 많음	확률적 이상형 부하지속곡선	가능

최근에 발표된 박영문 교수의 최대원리에 의한 모델은 해석함수에 의한 모델링을 함으로써 계산의 정확도와 효율면에서 큰 진전을 보였다. 다만 이 모델은 화력만을 대상으로 하고 있다.

본 논문은 박영문 교수의 모델을 확장하여 양수발전소를 포함 시켰으며, 신뢰도의 제약조건인 확률적 지수 대신에 해석함수에 의한 공급지장비율 도입하였다. 본 논문의 주요 내용은 다음과 같다.

- 부하 지속곡선 대신에 부하구선을 사용하였으며, 따라서 부하의 시간성을 보존하였다.

- 부하와 발전용량의 정규분포라는 가정하에서 해석함수에 의한 공급지장비율 유도하였고, 운전비와 결합하므로서 효율적인 목적함수를 결정하였다.

- 양수의 수준 및 첨두부하 삭감의 수준이라는 개념을 도입하여 최적양수 운전을 달성하였다.
- 해석함수에 의한 목적함수를 이용하여, 새로운 최적 보수 계획을 완성하였다.
- 이상의 모델을 결합하여, 최대원리에 의한 전원계획모형을 완성하였다.

제안된 방법은 실험모형에 대하여 충분히 검토되었으며, 기존의 방법(프랑스의 MNI모형)에 의한 결과와 비교하였다.

2. 운전 모형

지면의 제약때문에 생략하며 [3] 참조 바람.

3. 보수 모형

전체 운전비를 제약조건하에서 최소화하는 문제로써 다음과 같이 정식화된다.

$$\min f_T = f_T(m_s^i) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \sum T_s m_s^i = M^i \\ m_s^{i, \min} \leq m_s^i \leq m_s^{i, \max}$$

단, f_T : 전체 운전비 (연료비+공급지장비)

m_s^i : S 분기 i군의 보수율 [P.u]

M^i : i군 전원의 년간 보수입수 [억]

T_s : Scale factor

따라서 확장된 목적함수 \bar{F} 은

$$\bar{F} = \bar{f}_T + \sum \lambda_i (M^i - \sum T_s m_s^i) + \sum \omega_s^i U_s^i (m_s^i - m_s^{i, \min}) + \sum \omega_s^i W_s^i (m_s^i - m_s^{i, \max}) \quad (2)$$

와 같고 최적조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{F}}{\partial m_s^i} &= \frac{\partial \bar{F}}{\partial m_s^i} - \lambda_i T_s + U_s^i + \omega_s^i = 0 \\ \lambda_i (M^i - \sum T_s m_s^i) &= 0 \\ U_s^i (m_s^i - m_s^{i, \min}) &= 0 \\ \omega_s^i (m_s^i - m_s^{i, \max}) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

부등호를 계산과정중에서 범도 처리한다면, 다음 조건만이 남게된다.

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial m_s^i} - \lambda_i T_s = 0 \quad (4)$$

식 (4)는 보수율에 대한 기울기(gradient)이며 따라서 개선된 보수율을 결정할 수 있다.

$$m_s^{i, \text{new}} = m_s^{i, \text{old}} + \Delta m_s^i \quad (5)$$

다만 Δm_s^i 는 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta m_s^i = -\alpha \frac{\partial \bar{F}}{\partial m_s^i}$$

$$\sum T_s \Delta m_s^i = 0 = \alpha (\lambda_i \sum T_s^2 - \sum T_s \frac{\partial \bar{F}}{\partial m_s^i}) \quad (6)$$

4. 최적 전원 계획

최적 전원 계획의 문제는, 총 현재가치의 최소화 로 귀결된다. 따라서

$$\min \sum_{k=0}^N \{ I^k [U(k)] + F^k [x(k), U(k)] + G^k [x(k), U(k)] + S [x(N)] \} \quad (7)$$

$$\text{Subject to } x(k+1) = x(k) + u(k) \\ U(k)^{\min} \leq U(k) \leq U(k)^{\max}$$

단, I^k : 투자비의 현재가치

F^k : 운전비의 현재가치

G^k : 공급 지장비의 현재가치

$x(k)$: k 년도 초에 존재하는 전체용량(m 백백)

$U(k)$: k 년도에 신설되는 용량(m 백백)

S : 수평선년도 이후의 비용의 현재가치

해밀턴니언(Hamiltonian)은

$$H^k = I^k + F^k + G^k - \lambda(k+1) [x(k) + U(k)] \quad (8)$$

와 같이, 부 시스템(Adjoint System)의 방정식은

$$\lambda(k+1) = \lambda(k) + \frac{\partial F^k}{\partial x(k)} + \frac{\partial G^k}{\partial x(k)} \quad (9)$$

$$\lambda(N) = -\frac{\partial S}{\partial x(N)} \quad (10)$$

를 얻는다.

비용 최소화 조건으로부터

$$\frac{\partial H^k}{\partial U(k)} = 0 = \frac{\partial I^k}{\partial U(k)} + \frac{\partial F^k}{\partial U(k)} + \frac{\partial G^k}{\partial U(k)} - \lambda(k+1) \quad (11)$$

를 얻으며, $U(k)$ 는

$$U(k)^{\text{new}} = U(k)^{\text{old}} - \alpha \frac{\partial H^k}{\partial U(k)} \quad (12)$$

와 같이 개선된다.

최적 전원 계획에서 노력이 필요한 부분은 식(9)에서

$$\frac{\partial H^k}{\partial x(k)} + \frac{\partial G^k}{\partial x(k)}$$

이며, 이 값은 한계설비비용이라고 불려지며, 운전 모형으로부터 그 정보를 얻게 된다. 따라서 운전 모형의 정확성과 효율성은 바로 한계설비비용으로 연결되며 투자의 규모를 결정하는 주요인자다 된다. 다음에 노력이 필요한 부분은 α -스텝의 결정인 바, 효율적인 α -스텝의 결정은 [4]에서 제시 되어 있다.

5. 사례 연구

범점 표 참조

6. 결론

본 논문에서는 전력계통 계획의 수단으로서, 새롭고 효율적인 해석적인 방법론을 제시하였다.

본 연구는 3단계로 요약할 수 있는 바

1단계 : 최적 운전

2단계 : 최적 보수 계획

3단계 : 최적 장기 전원 계획

처럼 구분할 수 있다. 각 단계별 주요 심과는 다음과 같다.

1단계 : 1) 새로운 확률 부하 곡선 개념을 도입

하였다. 부하를 있는 그대로 두고,

동일 시간대의 서로 다른 부하는 확률적으로 나

타한다고 취급함으로써, 부하 지속 곡선을 사용

할 때 피할 수 없는 부하의 시간상 보존성 상실

이라는 문제를 해소하였다.

2) 확률에 대한 해석적 운전 모델(박

영본 고수의 모델)을 확장하여 양수

발전이 포함되도록 하였다. 부하와 발전 용량중

적은 쪽이 출력이 된다는 개념하에서 공급 전력

이라는 개념을 얻으며, 이 개념에 입각하여 양수

를 포함한 공급 전력을 결정하였다. 이 공급 전

력은 해석 함수이므로 다른 방법에 비하여 계산

효율이 훨씬 높다.

3) 보통 제약 조건으로서 사용되고 있

는 확률적 지수인 신뢰도 대신에,

신뢰도 자체도 최적화 될 수 있는 변수로 취급하

였고, 이러한 목적으로 해석 함수로 표시되는 공

급 지장비 식을 유도하였다. 이 함수는 해석 함수

인 운전비와 결합하여, 최적화가 용이한 비용 함

Table 2 : 10-Year Optimal Investment

Year	Demand [MW]	Reserve [%]		Nuclear [MW]		Coal [MW]		Pumped-storage [MW]		Present Worth Cost [k\$]		Remarks
		Proposed	MNI	Proposed	MNI	Proposed	MNI	Proposed	MNI	Proposed	MNI	
Initial				3816		2120		400				Coal=850 [MW]
1986	10656	55.48	55.48	900	900	1000	1000	-	-	3655550	3649179	Oil=5791
1987	11679	54.82	56.0	900	900	613	705	-	-	2931590	3001431	Combined =920
1988	12749	51.41	53.65	1000	1000	222	366	-	-	2480390	2490945	Gas Turbine =100
1989	14014	44.88	47.39	1000	1000	-	-	-	-	2136640	2120781	
1990	15360	45.39	48.09	2000	2000	-	-	-	-	2981090	2969619	
1991	16796	44.1	47.53	2000	2000	-	-	-	-	2685280	2677230	
1992	18317	43.05	46.89	2000	2000	-	-	-	-	2433770	2427665	
1993	19977	41.18	45.33	2000	2000	-	-	-	-	2221570	2217750	
1994	21779	38.84	42.83	2000	2000	35	14	-	41	2056880	2063465	
1995	23744	38.14	41.09	2000	2000	561	284	-	108	2122430	2026108	
1996	25881	26.73	29.44	-	-	-	-	-	-	6788270	6702434	
Total Present Worth Cost [k\$]										32,493,456	32,346,607	

Table 3 : 15-Year Optimal Investment

Year	Demand [MW]	Reserve [%]		Nuclear [MW]		Coal [MW]		Pumped-storage [MW]		Present Worth Cost [k\$]	
		Proposed	MNI	Proposed	MNI	Proposed	MNI	Proposed	MNI	Proposed	MNI
Initial											
1986	10656	58.24	59.05	900	900	914	1000	-	-	3577140	3649336
1987	11670	56.83	58.39	900	900	555	650	-	-	2892010	2955486
1988	12749	53.20	54.79	1000	1000	214	236	-	-	2488050	2472826
1989	14014	46.50	47.95	1000	1000	-	-	-	-	2150050	2128781
1990	15360	46.88	48.20	2000	2000	-	-	-	-	2991470	2975783
1991	16796	45.80	47.26	1957	2000	-	-	-	-	2655580	2682288
1992	18317	44.14	45.95	1914	2000	-	-	-	-	2374990	2432065
1993	19977	41.91	44.15	1947	2000	-	-	-	63	2198380	2235132
1994	21779	39.35	42.38	2000	2000	-	-	-	212	2058480	2083159
1995	23744	36.24	40.46	2000	2000	-	-	-	342	1903060	1949174
1996	25881	32.72	38.29	2000	2000	-	42	-	398	1771510	1839755
1997	27984	31.69	38.61	2000	2000	504	613	-	385	1826810	1909215
1998	30260	31.21	38.77	2000	2000	798	826	54	377	1797120	1837632
1999	32723	33.00	39.13	2000	2000	1309	1170	506	366	1870970	1807641
2000	35384	35.99	40.17	2000	2000	2000	1696	600	375	1926030	1821679
2001	38200	25.97	29.84	-	-	-	-	-	-	5990660	5730482
Total Present Worth Cost [k\$]										40,472,304	40,510,384

수가 된다.

4) 3)에서 정의한 비용함수에 의하여 최적함수 운전이 용이하게 그리고 효율적으로 달성되었다.

2단계 : 5) 동일한 비용함수에 의하여, 최적 보수 계획이 효율적으로 결정되었으며, 보수율에 대한 최적 조건이 쉽게 결정된다.

3단계 : 6) 해석 함수를 근간으로 하여, 최대 원리에 입각한 효율적인 최적 장기 전원 계획을 새로이 제시하였다.

7) 전원 계획에서의 주요 노력은 한계 설비 비용인 바, 이 정보를 운전 모형으로부터 얻게 되며, 따라서 운전 모형의 효율화가 매우 중요함을 알 수 있다. 이 효율화는 본 논문에서 제시한 해석 함수에 의하여 달성되었다.

8) 장기 투자 계획에서 최적 보수 계획을 고려함이 필요함을 사페 연구에서 보였다. 그러나 최적 보수 모형은 전원 계획 계산 과정 중의 임의의 계산 과정 중 한 번만 적용해도 매번 적용할 때와 아무런 차이가 없음을 본 연구는 보여 주었다.

9) 제시된 모형의 능력은 표를 통하여 충분히 입증되고 있으며, 기존의 프랑스 모델보다 전혀 손색이 없다.

10) MV-8000에 의한 계산 결과는 10년 계획인 경우 1/4, 15년 계획인 경우 1/8로서 제시된 모형이 프랑스 모델보다 효율적이었으며, 10년 계획에 불과 4분이 소요되었다.

그러나 금후의 연구 과제로서, 휴폐지 문제의 도입, 보다 능률적인 시스템의 검증, 수평선 년도의 적정한 결정 등은 계속 연구됨이 바람직하다.

7. 참고 문헌

- [1] Young Moon Park, et al., "New Analytic Approach for Long-term Generation Expansion Planning Based on Maximum Principle and Gaussian Distribution Function", Accepted Paper for the IEEE PES Summer Meeting, 1984.
- [2] E.D.F., "MNI Computer Programming", 1977.
- [3] 박명훈, 이봉용, 김정훈, "양수발전소의 최적운전 모델", 대한전기학회 1984년도 춘계 학술연구발표회 논문초록집 전력계통분야, pp. 1~3, 1984.6.
- [4] M. Pierre Lederer, "Seminar on MNI" Seoul National University, Korea, June 1, 1983.