

나. 연간 총에너지 수요의 기대치

$$\bar{D}_i = \sum_{s=1}^S n_s \sum_{t=1}^T \tau_t \bar{L}_{\Delta} \quad [\text{MWH}] \quad (2)$$

- τ_t : t시간대의 길이
- T : 시간대의 수
- n_s : s계절의 load cycle수
- S : 연간 계절의 수

다. 가능출력의 기대치

$$\bar{Y}^j = p^j (1 - v_{i,s}^j) \beta_{\Delta}^j x_i^j \quad [\text{MW}] \quad (3)$$

$$\sigma_{\Delta}^{j2} = p^j (1 - p^j) (1 - v_{i,s}^j) \beta_{\Delta}^j a^j x_i^j \quad [\text{MW}^2] \quad (4)$$

- p^j : j-type 발전기의 availability
- $v_{i,s}^j$: i년도, s계절, j-type발전기의 보수율
- β_{Δ}^j : j-type발전기의 에너지 분포계수
- a^j : j-type발전기의 단위용량
- x_i^j : i년도, j-type발전소의 총설비용량

여기서 β_{Δ}^j 가 나타내는 의미는 다음과 같다.

$$\left[\begin{array}{ll} \beta_{\Delta}^j = 0 & \text{정지} \\ 0 < \beta_{\Delta}^j < 1 & \text{용량보다 낮은 수준으로 발전} \\ \beta_{\Delta}^j = 1 & \text{최대 가능출력으로 발전} \end{array} \right.$$

이는 총에너지의 제한을 받는 수력발전소의 운전상태를 표현하기 위해 필요한 에너지 분포계수로서 총 운전비용을 최소로 하는 β_{Δ}^j 의 값을 결정해야 한다.

라. 발전출력의 기대치 및 연간 발전에너지

발전소 type 별 기동순서 (loading order)는 운전단가가 산 것 부터 배열하여 경제적인 운전이 되게 한다. 단, 수력발전소는 경우에 따라 base 및 peak에 배열한다. 주어진 부하의 크기에 대응한 1~j 까지의 총 발전출력은 다음과 같다.

$$P_{\Delta}^j = \min \left(L_{\Delta}, \sum_{k=1}^j Y_{\Delta}^k \right) \quad [\text{MW}] \quad (5)$$

$$P_{\Delta}^j = \bar{L}_{\Delta} - \bar{Y}_{\Delta}^j [0.5 + \text{erf}(\frac{Y_{\Delta}^j - \bar{Y}_{\Delta}^j}{\sigma_{\Delta}^j})] - \frac{\sigma_{\Delta}^j}{\sqrt{2\pi}} \exp[-\frac{(Y_{\Delta}^j - \bar{Y}_{\Delta}^j)^2}{2\sigma_{\Delta}^{j2}}] \quad (6)$$

$$\bar{Y}_{\Delta}^j \triangleq \bar{L}_{\Delta} - \sum_{k=1}^j \bar{Y}_{\Delta}^k \quad [\text{MW}] \quad (7)$$

$$\sigma_{\Delta}^{j2} = \sigma_{\Delta}^{j2} + \sum_{k=1}^j \sigma_{\Delta}^{k2} \quad [\text{MW}^2] \quad (8)$$

각 type별 발전출력 기대치는

$$P_{\Delta}^j = \begin{cases} P_{\Delta}^j - P_{\Delta}^{j-1} & [\text{MW}], j=2, \dots, J \\ P_{\Delta}^j & [\text{MW}], j=1 \end{cases} \quad (9)$$

j-type의 연간 발전에너지 \bar{E}_i^j 와 연간 총 발전에너지 \bar{E}_i 는 다음과 같다.

$$\bar{E}_i^j = \sum_s \sum_t n_s \tau_t P_{\Delta}^j \quad [\text{MWH}] \quad (10)$$

$$\bar{E}_i = \sum_j \bar{E}_i^j \quad [\text{MWH}] \quad (11)$$

마. 연간 운전비용

연간 운전비용은 연료비와 보수비용으로 구성된다.

$$G_i(x_i^j, \beta_{\Delta}^j) = F_i + M_i = \sum_j [f_i^j \bar{E}_i^j + m_i^j x_i^j] \quad (12)$$

f_i^j : 운전비 단가 [W/MWH]

m_i^j : 보수비용 단가 [W/MW]

이 중에서 연료비는 수력발전의 에너지 분포계수 β_{Δ}^j 에 영향을 받으므로 연료비를 최소로 하는 수력운전계획을 결정해야 한다.

3. 수력 운전계획 문제

가. 연료비 최소화 문제

주어진 설비용량 x_i^j ($j=1, \dots, J$)에 대해 연료비 F_i 는 수력발전소 운전(β_{Δ}^j)에 의해 결정된다. 그러므로 연료비를 최소로 하는 β_{Δ}^j ($j \in J$)를 결정하는 최적화 문제를 다음과 같이 정식화할 수 있다. 본 논문에서는 수력에너지의 제한이 계절별로 주어지는 것으로 가정하였다.

$$\min F_{i,s}(\beta_{\Delta}^{jh}) = \min \left[\sum_j f_{E_{i,s}}^{jh} \right]$$

$$= \min \left[\sum_j f_{n_s}^j \sum_{\tau} \tau P_{\Delta}^{jh} \right] \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} g(\beta_{\Delta}^{jh}) = n_s \sum_{\tau} \tau P_{\Delta}^{jh} \leq W_{i,s}^{jh} & (14) \\ 0 \leq \beta_{\Delta}^{jh} \leq 1 & (15) \end{cases}$$

for $jh \in JH$

$W_{i,s}^{jh}$: i년도, s계절, jh-type수력의 에너지제한

JH : 수력 type의 index set

나. 공액 경사 투영법

경사 투영법은 다음과 같이 선형제약 조건하에서 비선형 목적함수를 최소화하는데 매우 효과적인 방법이다.

$$\min f(x) \quad (16)$$

$$\text{s.t. } AX \leq b \quad (17)$$

단, X : $n \times 1$ 벡터

A : $m \times n$ 매트릭스

본 연구에서 사용하고 있는 공액경사 투영법의 특징을 열거하면 다음과 같다.

첫째, active 제약조건들의 교차공간에서 공액 경사법을 적용하여 수렴 속도를 개선하였다.

둘째, 상한 하한을 나타내는 제약조건을 별도로 처리하여 계산시간, 누적오차를 크게 감소시켰다.

또한 소요 기억용량도 대폭 감소되었다. 예로서 만일 식(17)의 제약조건이 모두 상한 하한을 나타내는 제약조건이라면 여기서는 A 를 기억시킬 필요가 없고 b 만을 입력하면 된다.

투영 매트릭스로서 임의의 벡터를 active 제약조건들의 교차공간에 투영시킬 때에도 급셈의 횟수가 대폭 줄어들어서 누적오차를 억제시킬 수 있다.

셋째, 초기허용해와 active 제약조건 집합을 알 수 있을 때 이를 초기설정할 수 있도록 하였다.

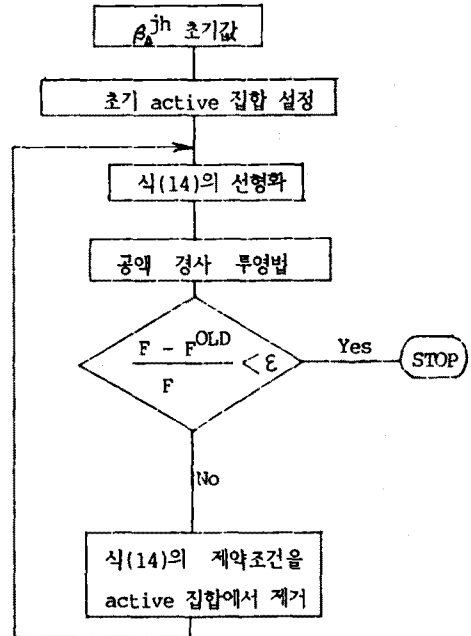
이는 식 (13)~(15)와 같은 문제를 해결할 때 매우 효율적인 계산을 가능하게 한다.

우선 β_{Δ}^{jh} 가 peak시에는 1의 값을 가진다는 것을 쉽게 알 수 있으므로 식(15)에서 그에 해당하는 상한을 초기 active 집합에 넣는다. 그리고 나머지는 0에 가까운 값을 갖도록 하면 초기허용

해와 초기active 집합을 쉽게 얻을 수 있다.

또한 일단 식(14)를 선형화해서 풀은 후에 다시 선형화하는 반복과정을 거칠 때 앞의 과정에서 선형 제약조건에 active 집합과 그에 대응하는 투영 매트릭스를 그대로 이용할 수 있다.

다. 연료비 최소화 상세 흐름도



4. 사례연구

표 1. 계산결과의 비교

TIME BAND	PEAK SHAVING			GRADIENT PROJECTION		
	1	2	3	1	2	3
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.6584	0.1273	0.4784	0.4814	0.0902	0.4571
3	0.0000	0.0453	0.4784	0.0518	0.0000	0.1845
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0546	0.1273	0.4784	0.1871	0.0000	0.2786
6	1.0000	0.6635	0.4874	1.0000	0.8899	1.0000
7	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
8	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
24	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
TOTAL ENERGY (GWh)	15015.22			15015.22		
TOTAL COST [\$1000]	249789.74			249772.61		

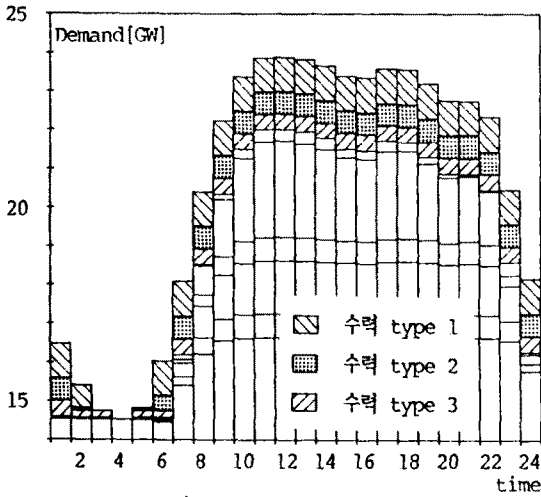


그림 1. peak shaving

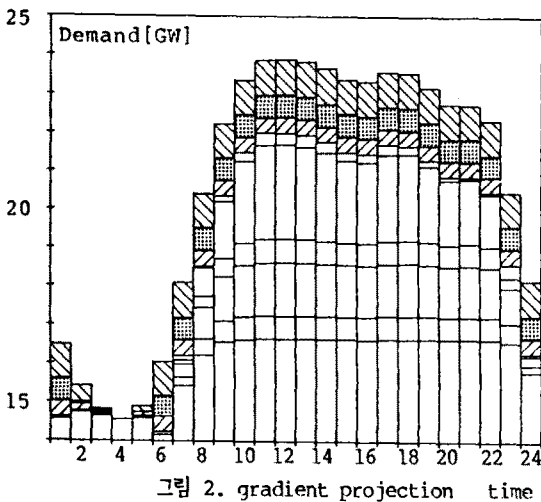


그림 2. gradient projection time

계산 데이터는 참고문헌(2)와 동일하다. 그림 1.과 같이 첨두부하 삭감 개념으로 수력운전을 모의하면, 수력 type 1, 2, 3의 순서가 비좁에 따라 β 의 값이 완전히 달라지는 것을 예측할 수 있다. 그러나 실제로는 수력이 base에 위치하고 있기 때문에 수력 type기리의 순서가 β 의 값에 그다지 영향을 미치지 않는다.

표 1.에서 보면 운전비용도 최적화기법으로 계산한 쪽이 작은 결과를 얻었다.

5. 결 론

이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 해석적 운전비 모형에서 수력에너지 제한을 최적화 문제로써 해결하는 것이 실제 문제에 부합한다.

나. 새로이 개량된 공역경사투영법이 수력에너지 문제를 푸는데 매우 효율적인 최적화기법이다.

다. 경사투영법에서 감도해석에 의해 한계비용을 비롯하여 여러가지 정보를 얻을 수 있다.

라. 본 연구에서 제시한 운전비 계산모형을 양수운전 및 보수계획에까지 확장하여 종합적인 장기전원개발계획에 적용하는 연구가 계속될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Y.M. Park, K.Y. Lee, L.T.O. Youn, "New Analytical Approach for Long-Term Generation Expansion Planning Based on Maximum Principle and Gaussian Distribution Function", IEEE Trans., PAS-104, No. 2, pp.390-398, February 1985
- [2] L.T.O. Youn, K.Y. Lee, Y.M. Park, "Optimal Long-Range Generation Expansion Planning for Hydro-Thermal System Based on Analytical Production Costing Model", IEEE '86 PES Winter meeting
- [3] J.A. Bloom, "Long-Range Generation Planning Using Decomposition and Probabilistic Simulation", IEEE Trans., PAS-101, No. 4, April 1982, pp. 797-801
- [4] R.R. Booth, "Optimal Generation Planning Considering Uncertainty", IEEE Trans., PAS-91, Jan./Feb. 1972, pp.70-77
- [5] N. Levin, J. Zahavi, "Optimal Mix Algorithms with Limited-Energy Plants", IEEE Trans., PAS-104, No 5., May 1985
- [6] 박영문, 신형섭, "공역경사법을 적용한 경사투영 알고리즘", 1985 춘계 학술연구발표회