

확률적 운전예비력 및 운전비단가 우선순위법에 의한 화력시스템의 실제적인 기동-정지계획

An Efficient Priority Based Unit Commitment using the Unit Operation Costs and the Probabilistic Reserve Requirements

李 鳳 容* 沈 建 輔** 金 正 勳+
(Bong-Yong Lee, Keon-Bo Shim, Jung-Hoon Kim)

요 약

본 논문에서는 전력시스템의 경제운용중에서 중요한 분야의 하나인 화력시스템의 기동 정지 계획 (Unit Commitment) 문제에 대한 새로운 알고리즘을 제시하였다. 화력시스템의 기동정지 계획을 수립 하는데 총 운전비의 단가에 의한 우선순위를 사용하고, 해석적인 안전성함수와 예비유기대치를 도입 하여 운전예비력 조건을 만족하는 계산이 매우 단순하고 효율적인 화력시스템의 기동정지계획 알고리즘을 개발하였으며, 제시된 방법이 종래의 우선순위법이나 다른 방법보다 경제성을 보였고, 예제 시스템을 대상으로 사례연구를 수행하였다.

Abstract - A simple algorithm is presented for solving the thermal unit commitment problem which is one of very important areas in economic operation of power systems. This algorithm is based on simple priority ordering by the unit operation cost and it is shown that the operation cost of chosen sets of generators is the minimum. The proposed method differs from the conventional priority-based formulations in that the unit operation are calculated in every load level. Further the operating reserve requirements are satisfied by the newly derived analytical security function or the expectation of reserve. The proposed method is proven to be very simple, accurate and efficient in a sample system.

1. 서 론

전력 시스템의 경제운용중에서 매우 중요한 분야의 하나인 화력시스템의 기동 정지 계획 (Unit Commitment) 문제는 고찰대상 기간 중의 모든 시간대에서 적절한 운전예비력을 만족하면서 부하에 공급하는 총 운전 비용의 최소화를 달성하는 운전 발전

기의 집합을 결정한다는 목표를 설정하게 된다.

전통적으로 이러한 화력 시스템의 기동정지 계획 문제는 우선순위법¹⁻⁹⁾, 즉 효율이 높은 전원부터 시스템의 운전에 투입한다는 방법이 오랫동안 사용되어 왔으나, 이 방법은 계산이 단순한 반면에 해가 근사적이어서 경제적 목표가 충분히 달성될 수 없다는 이유때문에 동적 계획법 (Dynamic Programming)에 의한 모델^{6-8), 16)}, 정수 계획법 (Integer Programming)에 의한 모델⁹⁾⁻¹¹⁾과 Lagrangian relaxation method에 의한 모델^{12), 13)} 등의 보다 정교한 모델들이 개발되기에 이르렀다.

이러한 동적 계획법이나 정수 계획법 등에 의한 모델을 사용하면 경제적 목표는 충분히 달성될 수

*正 會 員 : 弘益大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
**正 會 員 : 弘益大 大學院 電氣工學科 博士課程
+正 會 員 : 弘益大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博
接 受 日 字 : 1987年 7月31日
1 次 修 正 : 1987年 11月 5日
2 次 修 正 : 1988年 1月 3日
3 次 修 正 : 1988年 5月18日

있으나, 후보 발전기의 수가 많아지고 고찰 대상기간이 길어지는 경우에 계산량의 엄청난 증가로 인하여 해를 얻기 위한 상당한 계산 노력이 필요하게 된다. 따라서 이런 계산 노력은 온 라인 운전에 의한 후보 발전기의 변경시에 변경된 해를 쉽게 얻을 수 없다는 불편이 있다.

이와 같이 화력 시스템의 기동정지 계획문제는 전력 시스템의 경제운용문제 중에서 가장 우선적으로 해결되어야 하는 문제이면서도 현재까지 그 해법이 충분히 개발되어 있다고는 할 수 없는 분야로서, 언급된 동적 계획법과 정수 계획법 등에 의한 연구가 현재도 계속되고 있으며^{15), 16)}, 보다 간편하면서도 능률적인 해법의 개발이 요청된다고 하겠다.

본 논문에서는 매우 단순하고 효율적이며, 또한 해석적인 안전성 함수(Security function)와 예비율 기대치를 도입하여 운전예비력 조건을 만족하고, 운전비단가에 의한 우선순위에 입각하여 화력 시스템의 기동정지 계획문제를 해결하는 알고리즘을 개발하였다. 또한 제시된 방법이 가장 경제적인임을 보이고, 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 샘플 시스템을 대상으로 사례연구를 수행하여 기존의 다른 방법과 비교 검토하였다.

2. 기동 정지 계획의 정식화

화력 시스템의 기동정지 계획문제는 운전비용, 기동비용 및 정지비용의 총 비용이 대상기간 동안에 최소가 되는 운전발전기의 집합을 결정하는 문제이다. 따라서,

$$\min F_T = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^N f_{it} \cdot U_{it} \right\} + \sum_{i=1}^N K_i \cdot SC_i + \sum_{i=1}^N D_i \cdot DC_i \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^N P_{it} \cdot U_{it} = P_t^k \quad (2)$$

$$P_i^{\min} \leq P_{it} \leq P_i^{\max} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N P_i^{\max} \cdot U_{it} \geq L_t \quad (4)$$

$$0 \leq K_i \leq K_i^{\max} \quad (5)$$

$$0 \leq D_i \leq D_i^{\max} \quad (6)$$

- 단, f_{it} : i 발전기의 연료비
 K_i : i 발전기의 기동회수
 SC_i : i 발전기의 기동비용
 D_i : i 발전기의 정지회수

- DC_i : i 발전기의 정지비용
 P_{it} : i 발전기의 출력 [MW]
 P_t^k : t 시간대의 시스템 부하 [MW]
 P_i^{\max}, P_i^{\min} : i 발전기 출력의 상하한 [MW]
 L_t : t 시간대의 부하 + 운전예비력
 T : 고찰대상기간
 N : 시스템의 총 발전기 수
 U_{it} : 정수 $\begin{cases} 1 : i\text{발전기 운전 상태} \\ 0 : i\text{발전기 정지 상태} \end{cases}$

처럼 정식화할 수 있는데, 이 외에도 제약조건으로 각 발전기의 최소 운전시간 제약, 최소 정지시간 제약 등이 고려되어야 한다.

화력 시스템의 기동정지 계획에 의한 병렬운전발전기 집합이 결정되면 고찰대상기간중의 임의의 시간대 t 에서 i 발전기의 출력과 운전 연료비와의 관계는 다음식으로 표시된다.

$$P_{it} = \frac{1}{2c_i} (\lambda^t - b_i), \quad i=1, 2, \dots, n^t \quad (7)$$

$$P_{it} = P_i^{\max}, \quad \text{if } P_{it} > P_i^{\max} \quad (8)$$

$$P_{it} = P_i^{\min}, \quad \text{if } P_{it} < P_i^{\min} \quad (9)$$

$$f_{it} = a_i + b_i P_{it} + c_i P_{it}^2 \quad (10)$$

- 단, a_i, b_i, c_i : 발전기의 연료비 계수
 λ^t : t 시간대에서 시스템의 증분 연료비
 n^t : t 시간대에서 병렬 운전중인 총 발전기의 수

3. 운전비 단가에 의한 우선 순위법 및 기동정지 계획

3.1 운전비 단가에 의한 우선 순위법

N 대의 시스템 발전기 모두에 대하여 임의의 시스템 증분연료비 λ 에 대한 경제 출력 및 운전 비용이 식 (7)과 (10)에 의하여 결정될 수 있다. 이 때 임의의 λ 에 대한 모든 발전기의 출력 상태는 다음 집합으로 구분된다.

$$P_k \in A, \quad k=1, 2, \dots, K$$

$$P_l \in B, \quad l=K+1, K+2, \dots, L \quad (11)$$

$$P_m \in C, \quad m=L+1, L+2, \dots, N$$

단, A : $P_k = P_k^{\max}$ 의 발전기 집합

$$B : P_i = \frac{1}{2c_i} (\lambda - b_i) \text{의 발전기 집합}$$

$$C : P_m = P_m^{\min} \text{의 발전기 집합}$$

이 출력 상태에서 각 발전기의 운전 비용이 결정될 수 있고, 운전 비용이 정해지면 운전비 단가가

결정되어, 다음과 같이 발전기의 투입 우선 순위가 결정되며, 이렇게 투입된 발전기 집합의 운전비가 가장 경제적이다.

N대로 구성되는 발전기 집합이 모두 병렬 운전중이라고 할 때의 증분연료비를 λ 라고 가정하면, 각 발전기의 출력상태는 식 (11)처럼 표현될 수 있으며, 출력이 결정되면 운전비가 결정되어 운전비의 단가가 정해진다. 이 때 운전비의 단가가 낮은 발전기부터 예비력 조건을 만족할 때까지 투입 운전되는 발전기 집합의 운전비가 가장 경제적이다.

그 이유는 자명한 것일 수 있으나, 현재까지의 기동정지 계획이 이렇게 수행되고 있지 않을 뿐만 아니라 우선 순위법 자체가 마치 근사해만을 얻는 해법으로 다루어지고 있는 점에 비추어, 제시된 내용에 의한 집합이 실시스템에서 가장 최적해임이 제시될 필요가 있으므로 이하에 설명을 부연함이 바람직한 것으로 보인다.

임의의 i 발전기의 연료비는

$$f_i = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (12)$$

이고, 운전비 단가를

$$y_i \triangleq \frac{f_i}{P_i} \quad (13)$$

와 같이 정의하면, 연료비는

$$y_i P_i = f_i \quad (14)$$

처럼 표현할 수 있다.

만일, $y_i \leq y_j$ 이고 $P_i = P_j$ 인 경우를 가정하면

$$f_i \leq f_j \quad (\because y_i P_i = y_j P_j \rightarrow y_i \leq y_j) \quad (15)$$

인 관계를 얻게 된다.

일반적으로 $y_1 \leq y_2 \leq y_3 \leq \dots \leq y_N$ 인 발전기 집합 중에서 예비력 조건을 만족하면서 연료비가 최소인 n 집합을 선택하여 보자.

단 계 1 : y_1 보다 싼 발전기는 없으므로 조건식 (15)로부터 y_1 인 발전기가 먼저 투입됨.

단 계 2 : y_2 보다 싼 발전기는 없으므로 조건식 (15)로부터 y_2 인 발전기가 투입됨.

.....

단 계 n : y_n 보다 싼 발전기는 없으므로 조건식 (15)로부터 y_n 인 발전기가 투입되고 예비력 조건을 만족하게 된다.

따라서 $y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_n$ 인 발전기의 집합이 연료비가 가장 최소가 되는 유일한 발전기 집합이 된다.

여기서 한 가지 언급되어야 할 점은, 실제의 시스템에서는 거의 모든 경우에 우선순위가 앞서는 발전기의 용량이 크다는 점이며, 특히 이러한 경우 제시된 내용이 설득력을 갖는다.

총래의 우선순위법^{1)~5)}은 정격 출력에 대한 평균 연료비 단가이거나 각 발전기의 증분비용에 의한 것인데, 평균 연료비 단가에 의한 우선순위법이 최적해가 아님은 널리 알려진 바로서 본 논문의 사례 연구에서도 비교 검토되었다. 한편 각 발전기의 증분비용에 의한 우선순위법이 현실적으로 고려될 수 있으나, 이 방법 또한 충분하지 않음을 입증할 수 있다.

3.2 운전비의 단가 결정 및 기동 정지 계획

본 논문에서 제시하는 화력 시스템의 기동정지계획 문제에서는 총 운전비의 단가에 의한 우선순위가 사용되는데, 임의의 시간대 t 에서 총 운전비용의 단가는 다음과 같이 정의된다.

$$y_{it} = (f_{it} + \frac{K_i \cdot SC_i}{TS_i} + \frac{D_i \cdot DC_i}{TD_i}) / P_{it} \quad (16)$$

단, TS_i : i 발전기의 총 운전시간

TD_i : i 발전기의 총 정지시간

식 (16)으로부터 각 운전점에서 개별발전원의 운전비 단가가 결정되므로, 정리에 따라 경제적인 운전 발전기 집합이 결정될 수 있다. 따라서 초기의 우선 순위는 부하에 상응하게 미리 만들어 놓은 증분비용표를 이용하여 결정된 출력으로부터 운전비단가가 정해지고, 초기운전집합이 결정된다. 그러나 이 초기의 운전집합은 운전비만의 우선순위에 의한 것이므로 기동비용과 정지비용을 추가로 고려하면 추가비용에 의하여 운전비단가가 변할 수 있고 우선 순위도 바뀔 수 있다. 이런 이유때문에 기동 및 정지회수가 정해져야하며, 식 (16)에 의한 새로운 운전비단가와 새로운 운전집합이 결정될 수 있다. 만일 새로운 운전집합 중에 기동 및 정지의 변화가 있다면 그 변화를 반영하여 다시 위의 과정을 반복한다. 이러한 계산 과정을 그림 1의 흐름도에 요약하였다.

4. 기동 운전비 및 정지 비용¹⁶⁾

기동 운전비는 각 발전기의 정지시간에 영향을 받게 된다. 만일 정지된 시간이 길었다면 기동운전비는 증가하게 될 것이고, 그 반대이면 감소하게 될 것이다. 따라서 기동 운전비는 다음과 같이 표현된다.

$$SC = SC_0 \cdot \frac{R \cdot Td}{1 + R \cdot Td} \quad (17)$$

단, SC : 각 발전기의 기동 운전비

SC_0 : 각 발전기의 냉각 기동 운전비

R : 각 발전기의 냉각률

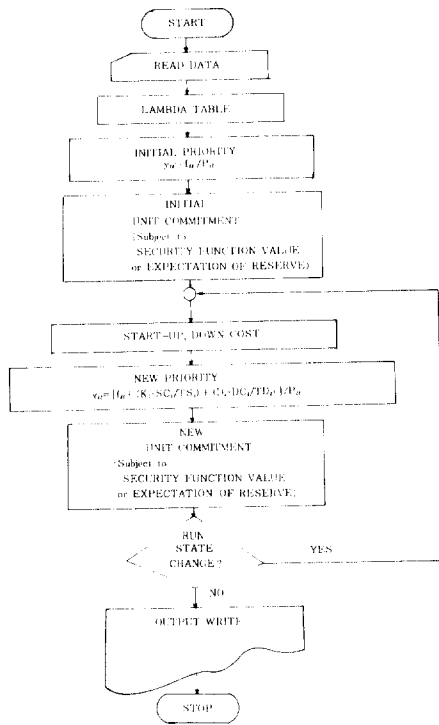


그림 1 운전비 단가 우선 순위법에 의한 기동정지 계획의 흐름도
Fig.1 Flow chart of Priority based unit commitment

T_d : 각 발전기의 정지 시간

또한, 각 발전기의 정지 비용은 일반적으로 일정한 값으로 사용한다.

5. 해석적 안정성 함수 및 예비율 기대치

시스템의 발전기가 부하를 공급하지 못할 확률과 시스템이 그러한 상태에 존재할 확률의 곱이 한 상태에서의 안정성 함수로 정의되며, 모든 상태에 대하여 고려한 것이 그 시스템의 안전성 함수가 된다.^{3),19)} 그런데 이 안정성 함수는 보통 이산형으로 표현되어 모든 이산 상태를 고려해야 하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 보다 효율적인 방법으로서 해석적인 표현을 유도하였다.

임의의 i 발전기가 운전 및 정지라는 두 상태의 모델로 주어질 때 t 시간대에서의 운전 및 고장 정지 확률은 각각 다음과 같이 표현된다²⁰⁾.

$$p_i(t) = \frac{1}{\mu_i + \lambda_i} (\mu_i + \lambda_i \text{EXP}^{-[\mu_i + \lambda_i]t}) \quad (18)$$

$$q_i(t) = \frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} (1 - \text{EXP}^{-[\mu_i + \lambda_i]t}) \quad (19)$$

단, $p_i(t)$: i 발전기의 운전 확률
 $q_i(t)$: i 발전기의 정지 확률
 λ_i : i 발전기의 사고 발생률
 μ_i : i 발전기의 복구율

시스템에서 운전되는 발전기의 수가 많으면, 운전 및 정지라는 두 상태로 모델화될 때, 운전 가능출력의 확률 분포는 정규 분포로 근사화될 수 있으며, 가능출력의 기대값 \bar{P} 와 분산 σ_p^2 은 각각

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^N p_i(t) \cdot P_i^{\text{max}} \quad (20)$$

$$\sigma_p^2 = \sum_{i=1}^N p_i(t) \cdot q_i(t) \cdot (P_i^{\text{max}})^2 \quad (21)$$

처럼 표현될 수 있다. 가능출력의 확률 밀도를 그림 2에 나타내었는데, 만일 부하가 P_R^i 이라면 부하보다 작은 발전출력은 부하를 공급하지 못하므로 공급지장 상태가 되며, 그림에 사선으로 표시되어 있다. 발전기 출력이 Z 인 점에서는 그 왼편의 사선면적이 공급지장 확률($E_p(Z)$)이 되고, 모든 공급지장인 발전기 출력상태는 $-\infty \sim P_R^i$ 까지이므로 다음과 같이 안정성 함수가 정의될 수 있다. t 시간 대에서 안정성함수 $S(t)$ 는

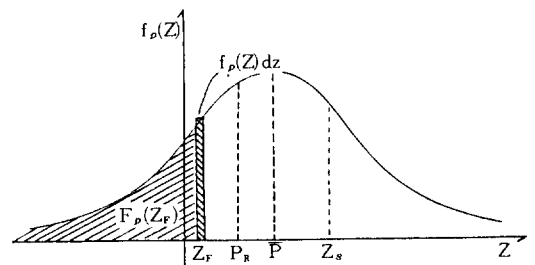


그림 2 가능출력의 확률 밀도 함수
Fig.2 Probability density function of generation.

$$S(t) = \sum_i (P_i(t) \cdot Q_i(t)) \\ = \int_{-\infty}^{P_R^i} F_p(Z) \cdot f_p(Z) dZ \quad (22)$$

단, $P_i(t)$: t 시간대에서 시스템이 상태 i 에 있을 확률

$Q_i(t)$: t 시간대에서 상태 i 가 공급지장을 일으킬 확률

P_R^i : i 시간대의 시스템 부하
 $f_p(Z)$: 발전 가능 출력의 확률 밀도 함수
 $F_p(Z)$: 발전 가능 출력의 확률 분포,

$$F(P_R^i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_p} \int_{-\infty}^{P_R^i} \text{EXP}\left[-\frac{(x - \bar{P})^2}{2\sigma_p^2}\right] dx \quad (23)$$

와 같고,

$$\frac{d}{dZ} F_p(Z) = f_p(Z) \quad (24)$$

이므로

$$S(t) = \frac{1}{2} F_p^2(P_R^i) \quad (25)$$

와 같이 간단히 나타내진다. 식 (25)은 해석적 표현식이므로 계산이 직접적이며, 이산형으로 표시되는 경우보다 효율적임은 너무나 당연하다.

안정성 함수를 위와 같이 결정할 수 있으므로 우선순위에 따라 발전기가 투입될 때, 안정성 함수의 기준값을 만족할 만큼의 예비력을 갖도록 운전 발전기 집합이 결정될 수 있다.

그러나 안정성함수는 그 수치개념이 직접적으로 예비율개념과 연결되지 않아 인식에 곤란을 줄 수 있다. 따라서 직접적인 예비율의 지수가 주어질 수 있다면 보다 편리할 것임은 자명하며, 본 논문에서는 그러한 지수로서 예비율기대치를 제시하였다.

이러한 부하의 일정배수 예비율을 생각하는 경우에 그 예비율은 발전기 집합의 고장정지 특성에 따라서 상당한 개념상의 차이를 줄 수 있다. 그런데 예비율 기대치는 발전기집합의 고장정지 특성이 반영된 것이기 때문에 일관된 개념을 제공할 수 있다. 그림 2로부터 단위분율로 표시되는 예비율은 $(Z_s - P_R) / P_R^i$ 이므로 예비율기대치를 \bar{R} 라고 하면, \bar{R} 는

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \int_{P_R^i}^{+\infty} \left(\frac{Z - P_R}{P_R}\right) f_p(Z) dZ \\ &= \frac{1}{P_R} \left[\int_{P_R^i}^{+\infty} Z f_p(Z) dZ - \int_{P_R^i}^{+\infty} P_R f_p(Z) dZ \right] \\ &= \frac{1}{P_R} \left\{ [1 - F(P_R^i)] (\bar{P} - P_R^i) + \frac{\sigma_p}{\sqrt{2\pi}} \text{EXP} \left[-\frac{(P_R^i - \bar{P})^2}{2\sigma_p^2} \right] \right\} \quad (26) \end{aligned}$$

인 해석적 함수로 표현된다. 일반적인 예비율이라 할 때, 이 표현은 막연한 표현으로서 발전기의 고장정지 특성이 반영되어 있지 않으나, 식 (26)의 예비율기대치는 전 발전기의 고장정지 특성이 고려되어 있으므로, 서로 다른 시스템에 대해서도 일관된 개념의 예비력을 나타낸다.

안정성 함수의 경우와 동일하게, 일정 예비율기대치 기준에 적합한 운전발전기의 집합이 결정될 수 있다.

6. 사례 연구

본 논문에서 제안한 운전비단가에 의한 우선순위법의 유용성을 입증하기 위하여 표 1의 발전기특성을 갖는 샘플 시스템3)에 대하여 일간의 화력 발전소 기동정지 계획문제에 대한 사례 연구를 수행하였다. 이 샘플 시스템의 발전기의 총수는 10대로서 총 설비 규모가 2625[MW]이고, 일간의 첨두 부하는 2000[MW]이다. 또한, 각 발전기의 냉각률은 모두 0.25[p.u.]로 사용하였으며, 안정성 함수의 기준값은 0.011 및 예비율기대치의 기준값은 13[%]로 하였다.

표 2는 본 논문에서 제안된 우선순위법에 의하여 계산한 샘플 시스템에 대한 기동정지 계획의 계산

표 1 화력발전기의 특성

Table 1 Characteristics of Thermal Units

발전기 번호	용량 [MW]	최소출력 [MW]	연료비계수			냉각기동비 [\$]	사고율 [1/yr]	복구율 [1/yr]
			a	b	c			
1	550	250	100.0	1.1285	0.00135	282.0	4.0	219.0
2	520	250	105.0	1.1954	0.00127	267.0	4.0	638.0
3	445	125	82.0	1.2136	0.00148	227.0	2.6	638.0
4	320	120	49.0	1.2643	0.00289	187.0	2.6	638.0
5	280	75	72.0	1.5354	0.00261	176.0	2.6	638.0
6	150	50	29.0	1.8015	0.00212	113.0	2.5	585.0
7	120	25	32.0	1.6966	0.00382	94.0	2.5	585.0
8	100	30	40.0	1.8518	0.00393	114.0	1.2	151.0
9	80	20	25.0	1.9161	0.00396	101.0	1.2	151.0
10	60	15	15.0	1.2035	0.00510	85.0	1.2	151.0

표 2 기동 정지 계획의 결과

Table 2 Results of Unit Commitment

시간대	부하 [MW]	안정성함수기준값 0.011 [p.u.]				예비율기대치기준값 13 [%]									
		투입용량 [MW]	발전기 상태				투입용량 [MW]	발전기 상태							
			1~4	5	6	7		8~10	1~4	5	6	7	8~10		
			실제 [%]					실제 [%]							
1	2000.0	2385.0	1	1	1	1	0	19.25	2385.0	1	1	1	1	0	19.25
2	1980.0	2385.0	1	1	1	1	0	20.45	2385.0	1	1	1	1	0	20.45
3	1940.0	2385.0	1	1	1	1	0	22.94	2385.0	1	1	1	1	0	22.94
4	1900.0	2385.0	1	1	1	1	0	25.53	2385.0	1	1	1	1	0	25.53
5	1840.0	2235.0	1	1	0	1	0	21.47	2235.0	1	1	0	1	0	21.47
6	1870.0	2385.0	1	1	1	1	0	27.54	2235.0	1	1	0	1	0	19.52
7	1820.0	2235.0	1	1	0	1	0	22.80	2235.0	1	1	0	1	0	22.80
8	1700.0	2115.0	1	1	0	0	0	24.41	2115.0	1	1	0	0	0	24.41
9	1510.0	1835.0	1	0	0	0	0	21.52	1835.0	1	0	0	0	0	21.52
10	1410.0	1835.0	1	0	0	0	0	30.14	1835.0	1	0	0	0	0	30.14
11	1320.0	1835.0	1	0	0	0	0	39.02	1835.0	1	0	0	0	0	39.02
12	1260.0	1835.0	1	0	0	0	0	45.63	1835.0	1	0	0	0	0	45.63
13	1200.0	1835.0	1	0	0	0	0	52.92	1835.0	1	0	0	0	0	52.92
14	1160.0	1835.0	1	0	0	0	0	58.19	1835.0	1	0	0	0	0	58.19
15	1140.0	1835.0	1	0	0	0	0	60.96	1835.0	1	0	0	0	0	60.96
16	1160.0	1835.0	1	0	0	0	0	58.19	1835.0	1	0	0	0	0	58.13
17	1260.0	1835.0	1	0	0	0	0	45.63	1835.0	1	0	0	0	0	45.67
18	1380.0	1835.0	1	0	0	0	0	32.97	1835.0	1	0	0	0	0	32.98
19	1560.0	2115.0	1	1	0	0	0	35.58	2115.0	1	1	0	0	0	35.51
20	1700.0	2115.0	1	1	0	0	0	24.41	2115.0	1	1	0	0	0	24.40
21	1820.0	2235.0	1	1	0	1	0	22.80	2235.0	1	1	0	1	0	22.80
22	1900.0	2385.0	1	1	1	1	0	25.53	2385.0	1	1	1	1	0	25.53
23	1950.0	2385.0	1	1	1	1	0	22.31	2385.0	1	1	1	1	0	22.31
24	1990.0	2385.0	1	1	1	1	0	19.85	2385.0	1	1	1	1	0	19.85

결과를 나타내는 것으로서, No. 1~No. 4의 발전기들은 이 시스템의 기저부하용으로서 항상 운전되고 있다는 점을 알 수 있으며, 안정성 함수 및 예비율 기대치의 평가로부터 운전예비율이 충분히 확보되는 운전 발전기의 집합이 결정됨을 보여준다. 두 기준값에 대한 결과에서 발전기 상태중 5, 6, 7시간대에서 6번 발전기의 경우에 정지-기동-정지라는 운전양상이 정지-정지-정지라는 형태를 나타내는 점을 제외하고, 모든 시간대에서 동일한 운전양상을 얻고 있다.

표 3은 본 논문에서 제안된 방법에 의하여 샘플 시스템에 대한 기동정지 계획으로 운전한 결과의 총 운전비를 종래의 우선순위법 및 동적 계획법과 비교한 것으로서, 이미 결과가 발표된 우선순위법에 의하면 총 운전비가 80,258.79[\$]이고, 동적계획법에 의하면 79,471.66[\$]인데 반하여 본 논문의 방법에 의하면 79,228.53[\$] 및 79,221.57[\$]로 나타나서 종래의 우선순위법에 대하여 1.28[%] 및 1.29[%]

표 3 총 운전비의 비교

Table 3 Total Operating Cost

비 용	우선순위법 [3]	동적계획법 [14]	제안된 방법	
			안정성함수	예비율기대치
유전료비 [\$]	79,950.79	79,105.00	78,919.13	78,932.50
기동 비용 [\$]	308.00	367.00	309.40	289.07
총 운전비 [\$]	80,258.79	79,472.00	79,228.53	79,221.57

동적계획법에 대하여는 0.30[%] 및 0.31[%]의 운전비 절감 효과를 얻고 있다. 결과만을 비교할 때 동적계획법이나 제안된 방법이 거의 일치하고 있으나, 동적계획법에 의한 기동정지 계획은 그 계산노력이 엄청나게 많다는 점이 지적되어야 할 것이다. 따라서 본 논문에서 제안된 방법의 효율성이 강조되어도 좋다.

그림 3.은 일간 부하곡선과 각 방법들에 대한 기

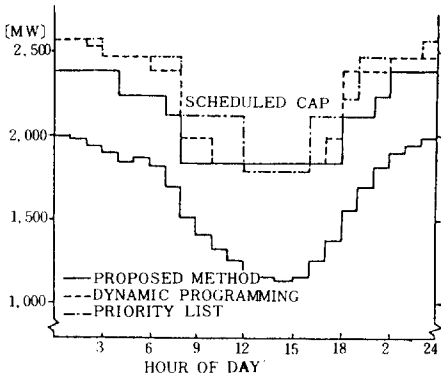


그림 3 샘플시스템의 부하 곡선과 운전 전원용량
Fig.3 Load curve and capacity schedules of sample system

동정지계획의 결과로 나타나는 매 시간대의 발전기 조합의 설비용량을 표시한 것이다.

7. 결 론

본 논문에서는 전력시스템에서 경제운영의 목표를 달성하기 위한 화력시스템의 기동정지 계획문제에 대하여 해석적 안정함수와 예비율기대치에 의해서 운전예비력을 고려하고, 운전비단가에 입각한 우선순위법을 제안하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 종래의 우선순위법이 정확한 경제적 목표를 쉽게 달성할 수 없다는 점때문에 보다 정교한 동적 계획법이나 정수 계획법 등이 개발되었으나, 본 논문에서 제안된 운전비단가에 의한 우선순위법은 종래의 어느 방법보다 가장 정확한 해를 얻었다.

2. 안정성 함수를 해석적으로 표현하므로써 이산화된 표현보다 훨씬 능률적인 운전예비력 조건이 쉽게 달성된다.

3. 발전기의 고장정지 특성을 반영한 예비율기대치의 개념을 제시하였고, 해석적인 결과식을 유도하였으며, 안정성함수의 경우와 마찬가지로 합리적인 운전예비력 기준을 제공한다.

4. 샘플 시스템에서 종래의 우선순위법이나 동적 계획법에 의한 기동정지 계획에서의 총 운전비보다 제안한 방법의 총 운전비가 각각 1.28[%], 1.29[%] 및 0.30[%], 0.31[%]의 절감효과를 얻어, 보다 더 경제성을 달성하였다.

5. 제안된 방법은 종래의 어느 방법보다도 해를 얻기 위한 과정이 간편하며, 특히 동적 계획법과 비교하는 경우 거의 일치된 결과를 얻고 있다는 점에

서 본 방법의 효율성이 강조된다.

본 논문에서는 샘플시스템에 대한 일간의 기동정지 계획만을 다루었으나 앞으로 대규모의 실 계통과 장기의 기동정지 계획에 대한 검토가 요망된다.

참 고 문 헌

- 1) R.H. Kerr, A.J. Fontana Jr, et.al., "Unit Commitment", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-85, pp. 417~421, 1966.
- 2) H.H. Happ, et. al., "Large Scale Hydrothermal Unit Commitment", *ibid.*, Vol. PAS-90, pp. 1373~1384, 1971.
- 3) J.D. Guy, "Security Constrained Unit Commitment", *ibid.*, Vol. PAS-90, pp. 1385~1390, 1971.
- 4) A.J. Wood, B.F. Wollenberg, *Power Generation, Operation and Control*, John Wiley & Sons, New York, pp. 111~153, 1984.
- 5) C.K. Pang, H.C. Chen, "Optimal Short-term Thermal Unit Commitment", IEEE Trans., Vol. PAS-95, pp. 1336~1346, 1976.
- 6) P.G. Lowery, "Generating Unit Commitment by Dynamic Programming", *ibid.*, Vol. PAS-85, pp. 422~426, 1966.
- 7) S. Yamashiro, "The Schedule for Start-up and Shutdown of Thermal Generating Units Considering Reliability.", Trans. IEEJ, Vol. 94-B, No. 6, pp. 279~285, 1974.
- 8) C.K. Pang, G.B. Sheble & F. Albuyeh, "Evaluation of Dynamic Programming Based Methods and Multiple-Area Representation Thermal Unit Commitment", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-100, No. 3, pp. 1212~1218, 1981.
- 9) J.A. Muckstadt, R.C. Wilson, "An Application of Mixed Integer Programming Duality to Scheduling Thermal Generating Systems", *ibid.*, Vol. PAS-87, pp. 1968~1978, 1968.
- 10) T.S. Dillon, "Integer Programming Thermal Generating Systems", *ibid.*, Vol. PAS-87, pp. 2154~2166, 1968.
- 11) Andre Turgeon, "Optimal Scheduling of Thermal Generating Units", IEEE Trans. AC, Vol. AC-23, pp. 1000~1005, 1978.
- 12) J.A. Muckstadt, S.A. Koenig, "An application of Lagrangian Relaxation to scheduling in power-generating systems", *Operations Research*, Vol. 25, May /

- June, pp. 387~403, 1977.
- 13) G.S. Lauer, N.R. Sandell, et. al., "Solution of large scale optimal unit commitmnt problems", PICA 1981, IEEE Conference Philadelphia, 5~8, May, 1981.
 - 14) A.K. Ayoub, A.D. Patton, "Optimal Thermal Generating Unit Commitment", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-90, pp. 1752~1756, 1971.
 - 15) H.P. Van Meeteren, J.L. Farah, et. al., "Extensive Unit Commitment Function Including Fuel Allocation and Security Area Constraints", IEEE Trans. PWRS, Vol. PWRS-1, No. 4, pp. 228~232, 1986.
 - 16) W.L. Snyder, H.D. Powell & J.C. Rayburn, "Dynamic Programming Approach to Unit Commitment", ibid., Vol. PWRS-2, No. 2, pp.339~350, 1987.
 - 17) R. Nieva, A. Inda & I. Guillen, "Lagrangian Reduction of Search-Range for Large-Scale Unit Commitment", ibid., Vol. PWRS-2, No. 2, pp. 465~473, 1987
 - 18) K. Aoki, T. Satoh, M. Itoh, "Unit Commitment in A Large Scale Power System including Fuel Constrained Thermal and Pumped-Storage Hyduo", ibid., Vol. PWRS-2, No. 4, pp. 1077~1084, 1978.
 - 19) S. Yamashiro, "A Scheduling Method for Power System Operation using a Short-range Reliability Index.", Trans. IEEJ, Vol. 95 -B, No. 9, pp. 447~452, 1975.
 - 20) R. Billinton, R.N. Allan, Reliability Evaluation of Power System, Plenum Press, New York, pp. 139~171, 1984.
-