

## 에너지제약을 고려한 화력발전기의 주간운영계획

송길영 · 이 범\* · 김용하\*\*

고려대학교 전기공학과, \*여수수산대학교 전기공학과, \*\*인천대학교 전기공학과

### Weekly Operation Planning of Thermal Generators Considering Energy Constraints

Kil Yeong Song, Buhm Lee\* and Yong Ha Kim\*\*

Department of Electrical Engineering, Korea University

\*Department of Electrical Engineering, Yosu National Fisheries University

\*\*Department of Electrical Engineering, Incheon University

#### 요 약

화력발전기의 주간운영계획을 수립함에 있어 여러 에너지사용에 관련된 제약조건의 지배를 받는 발전기를 효율적으로 고려할 수 있는 새로운 방법을 개발하였다. 우선 이를 위하여 에너지제약을 고려한 운영계획문제를 Lagrangian Relaxation법에 의해 모델링하였다. 또한 에너지제약을 만족하는 최적의 화력발전기의 기동정지계획 및 발전출력을 원문제 내에서 구할 수 있도록 하였으며, 쌍대문제를 효율적으로 풀 수 있는 알고리즘을 개발하여 보다 빠르고 정확한 해를 구할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 시험계통 및 대규모 실계통에 적용하여 유용성을 검증하였다.

**Abstract**—This paper proposes a new methodology which can consider energy constraints effectively. The authors formulate a generation-planning problem to consider energy constraints by Lagrangian Relaxation, and develop effective algorithm. As primal problem, this algorithm can obtain unit commitment and its generating power with satisfying energy constraints. As dual problem, this algorithm can obtain fast and accurate results. The usefulness of the method is verified by applying it to the test-set system and the real system.

#### 1. 서 론

최근 하계 냉방부하의 급증 등으로 부하율이 악화됨에 따라 에너지의 절약과 함께 효율적인 운용이 보다 중요시되고 있다. 특히 우리나라의 경우에는 막대한 에너지비용이 요구되는 화력발전소의 비율이 전체 전원구성중 많은 부분을 차지하고 있으며, 이들 발전기의 운용에는 다양한 에너지원이 사용되고 있다. 이중 석탄, LNG와 같은 연료는 공급조건 등의 제약을 갖고 있기 때문에, 따라서 이러한 연료는 경제성에 관계없이 일정량 이상 또는 일정량 이내의 사용이 요구되고 있다.

화력발전기의 경제적인 운용에는 주로 사회의 활동과 관련이 큰 주간단위의 운영계획이 널리 사용되고 있으며, 따라서 에너지제약 조건들을 고려한 화력발전기의

운영계획도 주간단위로 계획하는 것이 바람직하다 할 수 있다. 지금까지 에너지제약을 고려한 화력발전기의 운용으로는 주로 LNG와 같이 일정량의 연료를 일정기간동안 반드시 사용하여야만 하는 에너지소비의 특성을 고려하기 위한 방법<sup>1,2</sup>이 연구되어 오고 있다. 한편 발전소 인근지역에서 채광한 석탄 등의 연료는 지역 및 계절의 특성에 따라 일정량 이상의 연료를 소비해야만 하거나 또는 일정량 이내의 연료만 소비해야 한다는 에너지제약을 갖고 있다. 따라서 LNG 뿐만아니라 석탄 등과 같은 연료까지 포함하여 에너지제약을 갖게 되는데, 이에 따른 효율적인 발전기의 주간운영계획을 수립할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 다양한 종류의 연료소비특성을 고려하여 각 발전기별 에너지 사용량에 대한 에너지

제약조건들을 반영한 화력발전기의 기동정지계획(起動停止計劃, Unit Commitment) 및 발전출력을 결정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이를 위하여 우선 에너지 제약 화력발전기를 일반 화력발전기와 분리한 다음 개개 발전기별로 에너지제약을 고려할 수 있도록 Lagrangian Relaxation법(이하 L.R.법)<sup>14)</sup>에 의하여 모델링하였다. 또한 화력발전기의 운용계획문제를 효율적으로 풀 수 있도록 하는 새로운 방법을 개발하였다. 우선 기동정지계획 및 발전출력을 구하는 문제인 원문제(Primal)를 구성함에 있어 가상가격(Pseudo Price)<sup>15)</sup>을 사용하여 에너지제약을 만족하는 최적의 기동정지계획 및 발전출력을 구할 수 있도록 하였으며, 또한 Lagrange 승수를 구하는 문제인 쌍대문제(Dual)를 구성함에 있어 기존의 Subgradient법 보다 빠르고 정확한 해를 구할 수 있는 Fibonacci법과 경계부하배분을 사용하는 해법<sup>16)</sup>을 사용함으로써 효율적으로 해를 구할 수 있도록 하였다. 이로써 개개 발전기별로 정확한 에너지제약을 만족하면서 최적의 화력발전기 주간운용계획을 결정할 수 있었다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 제안한 방법의 특성을 분석하였으며, 대규모 실제계통에도 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

## 2. 모델링

화력발전기 주간운용계획문제는 각종제약조건을 만족시키면서 총비용을 최소화하는 최적화문제로 구성된 다. 목적함수 및 제약조건은 다음과 같이 구성하였다.

### 2-1. 목적함수

목적함수는 고찰기간동안 운전중인 전체 화력발전기의 에너지비용과 기동 및 정지비용을 더한 총비용을 최소화하도록 구성된다. 그러나 계통에 존재하는 화력발전기에는 에너지 수급상의 제약을 갖는 발전기가 있기 때문에, 이러한 발전기를 일반 화력발전기와 구분 하면 식 (1)과 같다.

$$\text{Min } F \tag{1}$$

$$= \text{Min} \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{i=1}^{N_i} \{C_i^t U_i^t + S_i^t\} + \sum_{j=1}^{N_j} \{C_{Fj}^t U_{Fj}^t + S_{Fj}^t\} \right] \text{ [천원]}$$

여기서  $C_i^t = \alpha_i (P_i^t)^2 + \beta_i P_i^t + \gamma_i$  [천원]  
 $C_{Fj}^t = \alpha_j (P_{Fj}^t)^2 + \beta_j P_{Fj}^t + \gamma_j$  [천원]

### 2-2. 제약조건

제약조건으로는 전체 발전기의 운용에 관계되는 결합

제약조건(Coupling Constraints)과 개개의 발전기의 특성에 관계되는 국지제약조건(Local Constraints)으로 나누어 구성된다.

#### 2-2-1. 결합제약조건

##### (1) 수급 제약조건

계통에 병입되어 운전중인 모든 발전기의 출력의 합은 계통의 부하를 만족시켜야 한다.

$$\sum_{i=1}^{N_i} U_i^t P_i^t + \sum_{j=1}^{N_j} U_{Fj}^t P_{Fj}^t = D^t \tag{2}$$

##### (2) 운전예비력 제약조건

계통에 병입되어 운전중인 발전기가 낼 수 있는 최대 출력의 합은 계통의 부하와 운전예비력의 합보다 커야 한다.

$$\sum_{i=1}^{N_i} U_i^t P_i^{Rt} + \sum_{j=1}^{N_j} U_{Fj}^t P_{Fj}^{Rt} \geq D^t + R^t \tag{3}$$

여기서  $P_i^{Rt} = \text{Min}(P_i^{t-1} + \Delta P_{i,up}^{max}, P_i^{max})$  [MW]

$P_{Fj}^{Rt} = \text{Min}(P_{Fj}^{t-1} + \Delta P_{Fj,up}^{max}, P_{Fj}^{max})$  [MW]

#### 2-2-2. 국지제약조건

##### (1) 출력 상하한치

화력발전기의 출력은 상하한치 내에서 운전되어야 한다.

$$P_i^{min} \leq P_i^t \leq P_i^{max} \tag{4}$$

$$P_{Fj}^{min} \leq P_{Fj}^t \leq P_{Fj}^{max}$$

##### (2) 최소 운전 및 정지시간

화력발전기는 운전을 시작하면 최소운전시간 이상을 운전하여야 하며, 또한 정지하면 최소정지시간 이상을 정지하여야 한다.

$$T_{i,up} \geq T_{i,up}^{min} \tag{5}$$

$$T_{i,dn} \geq T_{i,dn}^{min}$$

$$T_{Fj,up} \geq T_{Fj,up}^{min}$$

$$T_{Fj,dn} \geq T_{Fj,dn}^{min}$$

##### (3) 단위시간당 출력증감발

화력발전기는 단위시간당 출력증감발 한도내에서만 증감발 하여야 한다.

$$P_i^{t-1} - \Delta P_{i,dn}^{max} \leq P_i^t \leq P_i^{t-1} + \Delta P_{i,up}^{max} \tag{6}$$

$$P_{Fj}^{t-1} - \Delta P_{Fj,dn}^{max} \leq P_{Fj}^t \leq P_{Fj}^{t-1} + \Delta P_{Fj,up}^{max}$$

##### (4) 에너지 제약 화력발전기의 사용에너지 제약

화력발전기중에는 LNG와 같이 일정량이상을 반드시

사용하도록 장기간에 걸쳐 계약이 이루어지는 Take-or Pay 연료공급계약, 수송, 저장용량 등 여러 이유에 의해서 에너지의 사용량이 제한되는 발전기가 있으며 이와 같은 에너지제약을 받는 화력발전기는 주어진 에너지량의 사용계약 내에서 운전되어야 한다. 에너지계약조건은 연료의 양으로 제약되지만 운용계획문제에 용이하게 적용하기 위하여 에너지비용으로 처리한다.

$$Q_j^{\min} \leq Q_j \leq Q_j^{\max} \tag{7}$$

$$\text{단, } Q_j = \sum_{i=1}^T (C_{Fj}^i U_{Fj}^i + S_{Fj}^i)$$

$$Q_j^* = \text{사용요구연료량[Ton]} \times \text{단위열량[Gcal/Ton]} \\ \times \text{연료단가[천원/Gcal]}$$

### 3. 화력발전기 주간운용계획문제의 해법

화력발전기의 주간운용계획문제를 수립함에 있어 일반적으로 고려되어온 제약조건이외에 에너지계약 화력발전기의 사용에너지제약을 고려하기 위하여 본 연구에서는 대규모시스템의 운용계획에 적합한 L.R.법을 사용하여 모델링하였다. 이 방법은 목적함수에 결합제약조건만을 더한 확대목적함수를 구성하고 이를 원문제-쌍대문제(Primal-Dual)로 풀어 최적의 운용계획을 구하는 것으로, 시스템의 규모 및 대상기간이 증가 하더라도 계산소요시간은 선형적으로 증가되기 때문에 대규모시스템의 처리에 적합한 방법으로 알려져 있다<sup>3,4)</sup>

#### 3-1. 확대목적함수의 구성

확대목적함수의 구성시 종래에 고려되어온 식 (2), (3)의 결합제약조건 이외에 에너지계약 화력발전기의 사용에너지제약을 고려할 수 있도록 하는 확대목적함수를 구성하였다. 사용에너지제약을 만족하면서 경제적인 운전계획을 수립하기 위하여는 전체 운전계획기간 동안 화력발전기의 에너지사용량을 시간대별로 최적으로 조절하여야 하기 때문에 직접적으로는 해를 구하기 어려우며, 따라서 가상가격의 도입이 필요하다. 따라서 이 제약은 국지계약 조건으로 개개 발전기의 특성에만 관계지만, 가상가격을 사용하여 해를 구하기 위하여는 에너지제약을 포함하는 확대목적함수의 구성이 필요하다.

우선, 에너지계약 화력발전기의 에너지계약은 에너지의 일정량 이상 또는 이내에서 사용되어야 하기 때문에 식 (7)은 다음과 같이 분리할 수 있다.

$$Q_j^{\min} - \sum_{i=1}^T (C_{Fj}^i U_{Fj}^i + S_{Fj}^i) \leq 0 \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^T (C_{Fj}^i U_{Fj}^i + S_{Fj}^i) - Q_j^{\max} \leq 0$$

확대목적함수는 목적함수 F에 결합제약조건인 수급 제약 및 운전예비력제약을 Lagrange 승수  $\lambda, \mu$ 로 포함시키고 식 (8)의 에너지제약을  $\sigma, \delta$ 로 포함시켜 다음과 같이 구성하였다.

$$L(P, U, \lambda, \mu) \tag{9}$$

$$= \sum_{i=1}^T \left[ \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ C_i^i U_i^i + S_i^i \right\} + \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ C_{Fj}^i U_{Fj}^i + S_{Fj}^i \right\} \right] \\ + \sum_{i=1}^T \left\{ \lambda^i \left[ D^i - \sum_{j=1}^{N_i} U_i^i P_j^i - \sum_{j=1}^{N_i} U_{Fj}^i P_{Fj}^i \right] \right\} \\ + \mu^i \left\{ D^i + R^i - \sum_{j=1}^{N_i} U_i^i P_j^{Ri} - \sum_{j=1}^{N_i} U_{Fj}^i P_{Fj}^{Ri} \right\} \\ + \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ \sigma_j \left[ Q_j^{\min} - \sum_{i=1}^T (C_{Fj}^i U_{Fj}^i + S_{Fj}^i) \right] \right\} \\ + \delta_j \left\{ \sum_{i=1}^T (C_{Fj}^i U_{Fj}^i + S_{Fj}^i) - Q_j^{\max} \right\}$$

#### 3-2. 원문제-쌍대문제에 의한 확대목적함수의 해

기동정지계획 수립시 식 (9)로부터  $P^i, U^i, P_{Fj}^{i, U}$ 의 값을 직접적으로 구하는 것은 매우 어렵다. 따라서 Lagrange 승수  $\lambda, \mu$ 를 고정시키고, 이들로 부터  $P^i, U^i, P_{Fj}^i, U_{Fj}^i$ 를 구한 다음 다시  $\lambda, \mu$ 의 수정을 반복하는 원문제-쌍대문제를 사용하여 확대목적함수의 해를 구한다.

##### 3-2-1. 원 문제

원 문제란 쌍대문제에서 결정된  $\lambda, \mu$ 를 사용하여 식 (4)~(7)의 국지계약조건을 만족시키면서 확대목적함수인 식 (9)을 최소화 하는  $P^i, U^i, P_{Fj}^i, U_{Fj}^i$ 를 구하는 문제이다. 즉, 식 (9)를 식 (10)과 같이 개개 발전기별 소문제인  $q_i, q_j$ 로 각각 분할하고, 이들 분할된 소문제를 풀어 화력발전기의 운용계획인 기동정지계획 및 발전출력을 결정하는 방법이다<sup>7)</sup>.

$$L(P, U, \lambda, \mu) = \sum_{i=1}^{N_i} q_i + \sum_{j=1}^{N_j} q_j + \text{상수항} \tag{10}$$

여기서

$$q_i = \text{Min} \sum_{t=1}^T \{C_{ij}^t U_{ij}^t + S_{ij}^t - \lambda^t U_{ij}^t P_{ij}^t - \mu^t U_{ij}^t P_{ij}^{Rt}\}$$

$$q_j = \text{Min} \sum_{t=1}^T \{(C_{ij}^t U_{ij}^t + S_{ij}^t)(1 - \sigma_j + \delta_j) - \lambda^t U_{ij}^t P_{ij}^t - \mu^t U_{ij}^t P_{ij}^{Rt}\}$$

$$\text{상수항} = \sum_{i=1}^T \{\lambda^t D^i + \mu^t (D^i + R^i)\} + \sum_{j=1}^N (\sigma_j Q_j^{\text{min}} - \delta_j Q_j^{\text{max}})$$

식 (10)의  $q_i, q_j$ 를 풀기 위하여 1기 동적계획법(Single Unit Dynamic Programming)을 사용하고, 국지제약조건은 이 과정에서 처리하도록 하면 국지제약조건을 만족하는 각 화력발전기의 기동정지계획 및 발전출력을 구할 수 있다. 그러나  $q_i$ 는 1기 동적계획법에 의해 운영계획을 용이하게 구할 수 있는 반면,  $q_j$ 는 푸는 과정에  $\sigma_j$ 와  $\delta_j$ 가 존재하기 때문에 이들 승수를 적절히 결정하여야만 에너지제약을 만족하는 화력발전기의 운영계획을 수립할 수 있는 문제점이 있다. 따라서 이들 승수를 조절하여 가면서 최적의 운영계획을 결정하는 해법을 필요로 한다.

그러므로 본 연구에서는 에너지제약 화력발전기의 소문제인  $q_j$ 를 푸는 방법을 제시하여 이들 발전기의 기동정지계획 및 발전출력을 구할 수 있도록 하였다.  $q_j$ 는 일반적인 화력발전기의 소문제와 달리 에너지제약을 만족시켜야 하기 때문에,  $\sigma_j, \delta_j$ 를 조정하여 에너지제약을 만족하면서  $q_j$ 를 최소화시키는  $P_{ij}^t, U_{ij}^t$ 를 구해야 한다. 에너지제약과 관련된 승수  $\sigma_j, \delta_j$ 는 가상가격(Pseudo Price)으로  $\sigma_j$ 를 증가시키면 연료단가를 낮추는 효과가,  $\delta_j$ 를 증가시키면 연료단가를 높이는 효과가 발생하게 된다. 따라서 에너지제약을 위반하는 발전기는 식 (11)과 같이 최소 에너지사용량 위반시는 최소 에너지사용량으로, 최대 에너지사용량 위반시는 최대 에너지사용량으로 고정시켜 운전할 수 있도록  $\sigma_j, \delta_j$ 를 수정해 가면서 1기 동적계획법을 사용하여 일반적인 화력발전기와 마찬가지로 방법으로  $P_{ij}^t, U_{ij}^t$ 를 반복하여 구하면 에너지제약을 위반하지 않는 최적의 운영계획을 얻을 수 있다.

$$Q_j^{\text{min}} \leq Q_j \leq Q_j^{\text{max}} \Rightarrow Q_j = Q_j \quad (\sigma_j = 0, \delta_j = 0) \quad (11)$$

$$Q_j < Q_j^{\text{min}} \Rightarrow Q_j = Q_j^{\text{min}} \quad (\sigma_j > 0, \delta_j = 0)$$

$$Q_j > Q_j^{\text{max}} \Rightarrow Q_j = Q_j^{\text{max}} \quad (\sigma_j = 0, \delta_j > 0)$$

에너지제약 화력발전기의 기동정지계획 및 발전출력을 구하는 해법에 대한 흐름도를 Fig. 1에 나타내었다.

3-2-2. 쌍대문제

쌍대문제란 다음과 같이 확대목적함수를 최대화시키는  $\lambda^t, \mu^t$ 를 결정하는 문제이다.

$$\text{Maximize [ Minimize } L(P, U, \lambda, \mu) \quad (12)$$

$$\lambda, \mu \quad P, U$$

쌍대문제를 풀고 있어 관련 승수를 구하는 방법에 따라 화력발전기 운영계획문제의 수렴 상태 등이 크게 영향을 받는다. 또한 화력발전기의 운영계획문제에는 기동정지계획이 포함되기 때문에 미분이 불가능하며, 여러가지 제약조건이 존재 한다. 따라서 종래에는 미분을 사용하지 않고 여러개의 Lagrange 승수를 구할 수 있는 Subgradient법이 사용되어 왔으나, 이 방법은 탐색간격을 결정해야 하는 문제가 따르고 이 크기에 따라 수렴 상태 등이 영향을 받는 문제점이 있다. 따라서 빠른 시간내에 이들 Lagrange 승수를 최적으로 구하는 해법을 필요로 한다.

그러므로 본 연구에서는 이러한 단점을 개선하여 효율적으로 쌍대문제의 해를 구하는 새로운 방법"을 사용하였다. 이 방법은 Lagrange 승수  $\lambda^t, \mu^t$ 중 운전예비력제약관련 승수  $\mu^t$ 는 Fibonacci법으로, 수급제약관련 승수  $\lambda^t$ 는 경제부하배분과정에서 구할 수 있도록 함으로써 종래 Subgradient법에서 발생하는 문제점인 탐색간격의 문

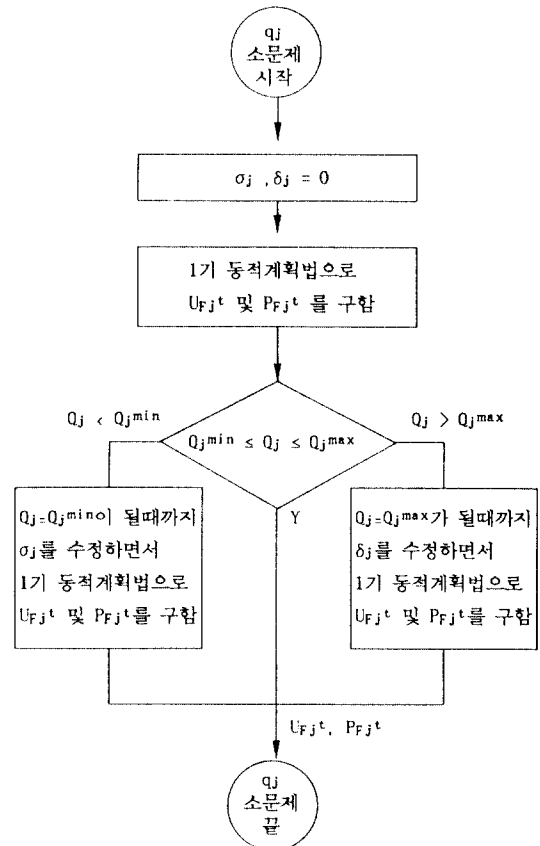


Fig. 1. Energy constrained thermal generator scheduling (S.U.D.P. for solving  $q_j$ ).

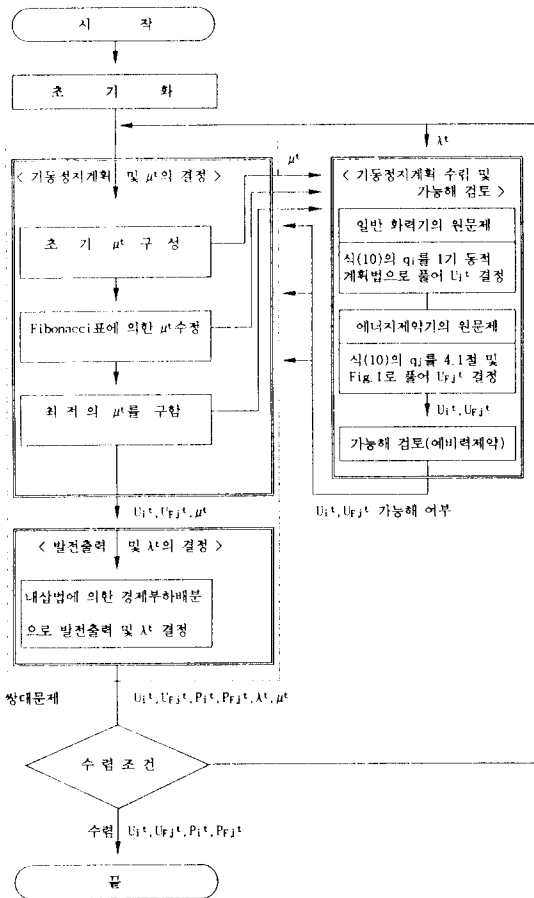


Fig. 2. Flowchart of the proposed algorithm.

제를 해결하여 항상 확실한 수렴을 보장하고 또한 빠른 시간내에 보다 정확한 해를 구할 수 있도록 한 것이다.

(1)  $\mu$ '의 결정

선탐색법(line search procedure)인 Fibonacci법은 Subgradient법에서 문제시 되는 탐색간격 결정의 문제와 관계없이 확실한 수렴의 보장과 함께 최적의 값을 구할 수 있는 장점이 있는 반면, 오직 한개의 승수에 대해서만 최적화를 시킬 수 있는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는  $\mu$ 만 Fibonacci법으로 최적화 시키고 나머지 승수인  $\lambda$ 는 경제부하배분과정에서 직접 구하는 방법으로 해결하였다. 이  $\mu$ '의 결정은 Fibonacci계산과정을 통하여 결정되며, 따라서 각 반복계산과정마다 일정량의 원문제를 풀으로써 최적의  $\mu$ 가 결정된다.

(2)  $\lambda$ '의 결정

경제부하배분법은 각 반복계산마다 기동정지계획이 이루어진 상태에서 가장 경제적인 발전출력을 계산하는

방법으로, 이 과정에서 등증분연료비를 다음과 같이 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이 값을 사용하여 운용계획 문제를 풀 수 있도록 알고리즘을 구성함으로써 최적의  $\lambda$ '의 값을 결정하여 사용할 수 있도록 하였다.

$$\lambda^i = \frac{dC_i^i}{dP_i^i} \tag{13}$$

또한 이와 같은 방법을 사용함으로써 기동정지계획과 경제부하배분을 동시에 구할 수 있어 종래의 기동정지계획이 이루어진 후에 경제부하배분을 시행하는 방법보다 효율적인 계산을 할 수 있도록 한 것이다.

본 연구에서 제안한 알고리즘은 Fig. 2와 같다.

4. 사례연구

본 연구에서는 우선 에너지제약에 따른 화력발전기의 운용계획특성을 분석하기 위하여 제안한 방법을 일간단위의 간단한 시험계통에 적용하였으며, 실용성을 검증하기 위하여 주간단위의 대규모 실제계에 적용하였다.

4-1. 시험계통에의 적용

4-1-1. 시험계통의 특성 자료

본 시험계통은 다양한 특성을 갖는 9기의 화력발전기로 구성되었으며, 이의 특성은 Table 1에 나타내었다. Table 1의  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 개개 발전기의 연료비를 산정할 수 있도록 발전기별로 계수화 한 것<sup>9)</sup>이다. 대상으로는 Fig. 3와 같이 주었으며, 운전예비력은 200 MW로 하였다. 또한 본 계통의 화력발전기중 3번 및 5번 발전기는 일정량 이상 또는 이내의 에너지를 사용해야 한다고 가정하였다.

4-1-2. 적용결과

제안한 방법으로 에너지제약을 고려한 화력발전기의 운용계획을 수립하고, 에너지제약을 고려하지 않은 경우와 비교하였다. 시험계통에 대하여 운용계획을 수립하면 일정량 이상 또는 이내의 에너지사용이 요구되는 3번 발전기 및 7번 발전기는 에너지제약을 위반하게 된다. 그러므로 제안한 방법으로 이들 발전기의 에너지사용량을 사용요구량 이상 또는 이내로 유지할 수 있도록 하는 운전계획을 수립하여야 한다. 에너지제약을 고려함에 따른 기동정지계획의 변화는 Table 2에 나타내었으며, 이때의 발전출력중 시간대 9, 13, 20의 결과를 Table 3에 나타내었다. 또한 에너지제약을 고려함에 따른 총 에너지비용, 발전기별 에너지비용, 관련 승수의 크기는 Table 4에 나타내었다.

Table 2~5로부터 본 연구에서 제안한 방법으로 화력발전기의 운전계획 수립시 3,7번 발전기는 최소 사용에

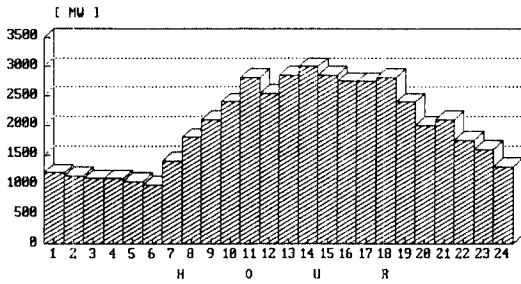


Fig. 3. Load pattern.

너지제약 관련 승수  $\alpha_i$ 와 최대 사용에너지제약 관련 승수  $\delta_i$ 를 수정하여 가면서 에너지제약을 만족시키고 있음을 알 수 있다.

우선 정상적인 기동정지계획 수립시 3번 발전기를 살펴보면 고찰기간 동안에 23,071[천원]의 에너지비용을 사용하는 운전이 이루어진다. 그러나 이 발전기는 15,000[천원] 이내의 에너지비용만으로 발전하여야 하기 때문에, 이를 위하여 최대 사용에너지량제약 관련 승수인  $\delta_i$ 를  $0 \Rightarrow 0.049$ 로 수정하여 에너지제약을 만족하는 운용계획을 수립하고 있다.  $\delta_i$ 가 0.049로 커지게 되

Table 1. Characteristics of the generators.

◎General characteristics of thermal generators										
Unit	$C_i^t = \alpha_i (P_i^t)^2 + \beta_i P_i^t + \gamma_i$			$P_i^{\min}$	$P_i^{\max}$	start-up cost	$\Delta P_{i\uparrow}^{\max}$	$T_{i\uparrow}^{\min}$	$T_{i\downarrow}^{\min}$	Initial state
	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\gamma_i$	[MW]	[MW]	(₩ 1,000)	[MW/min]	[h]	[h]	[h]
1	0.034957	31.811	160.53	50	200	1756	5	2	2	-10
2	0.002355	8.601	173.12	50	200	1756	5	7	5	-16
3	0.002428	8.867	178.47	50	200	1756	5	7	5	-16
4	0.001428	8.381	305.48	100	500	3512	8	10	8	20
5	0.036006	32.765	165.35	50	200	1756	5	2	2	-10
6	0.004433	26.001	248.23	100	400	3512	8	5	3	-16
7	0.002501	9.133	183.82	50	200	1756	5	7	5	-16
8	0.001471	8.633	314.64	100	500	3512	8	10	8	20
9	0.000879	4.526	1042.34	600	1200	21072	1	100	100	30

◎ Characteristics of energy constrained thermal generator				
Energy constrained thermal generator	Required fuel usage [Ton]	Calories [Gcal/Ton]	Unit price [₩ 1,000/Gcal]	Required fuel price [₩ 1,000]
Unit 3	below 100	15.000	10.000	blow 15,000
Unit 7	over 200	15.000	10.000	over 30,000

Table 2. Unit commitment schedule.

Unit	Unit Commitment																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	[Pattern]																							
2	[Pattern]																							
3	[Pattern]																							
4	[Pattern]																							
5	[Pattern]																							
6	[Pattern]																							
7	[Pattern]																							
8	[Pattern]																							
9	[Pattern]																							

[Pattern], Commit whether energy constraint is considered or not; ○, Commit when energy constraint is considered; ×, Decommit when energy constraint is considered.

**Table 3. Generating power of each thermal generator.**

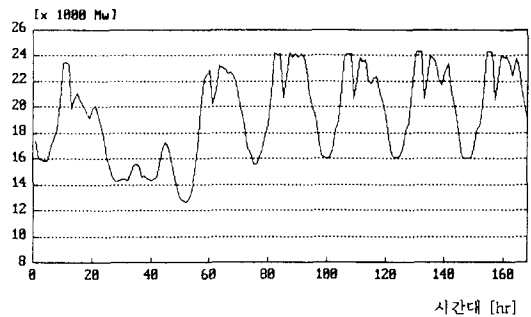
Unit	Stage 9		Stage 13		Stage 20	
	Not Consider	Consider	Not Consider	Consider	Not Consider	Consider
1	-	-	-	-	-	-
2	200	200	200	200	172	-
3	154	-	200	155	-	-
4	432	409	500	500	362	358
5	-	-	-	-	-	-
6	-	-	100	100	-	-
7	-	200	178	200	-	180
8	334	311	472	495	266	262
9	980	980	1200	1200	1200	1200

**Table 4. Changes of energy cost and multipliers under energy constraints.**

		Not Consider	Consider
Energy price [₩ 1,000]	Total price	416,767	417,515
	Unit 3	23,071	14,954
	Unit 7	17,116	30,732
Multiplier $\sigma_i$	Unit 3 $\sigma_3$	0	0
	Unit 7 $\sigma_7$	0	0.063
Multiplier $\delta_i$	Unit 3 $\delta_3$	0	0.049
	Unit 7 $\delta_7$	0	0

면 가상가격인  $1-\sigma_i + \delta_i$ 는 1.049로 커지게 되는데 이 가상가격은 에너지의 단가를 높이는 효과를 갖게 되어 시간대 9,19에서는 정지하며, 시간대 13과 같이 기동정지 계획이 변화하지 않는 시간대에서도 발전출력을 200 MW  $\Rightarrow$  155 MW로 낮추어가며 에너지제약을 만족하는 운전계획이 수립되고 있음을 알 수 있다.

7번 발전기는 17,116[천원]의 에너지비용을 사용하는 운전이 이루어지지만, 30,000[천원] 이상의 에너지를 사용하여야 하는 에너지계약 때문에 최소사용 에너지량 제약 관련 승수인  $\sigma_7$ 를 0  $\Rightarrow$  0.063로 수정하고 있다. 따라서 가상가격인  $1-\sigma_i + \delta_i$ 은 0.937로 작아지게 되어 시간대 8,9,19,20,21에서는 추가로 기동하며, 기동정지 계획이 변화하지 않는 시간대 13에서도 발전출력을 178 MW  $\Rightarrow$  200 MW로 높이면서 에너지제약을 만족시키고 있음을 알 수 있다. 또한 Table 2로 부터 3,7번 발전기의



**Fig. 4. Load pattern of real system.**

운전에 따라 시간대 20,21에서는 과도한 발전이 이루어져서 2번 발전기가 정지하는 새로운 운용계획이 수립되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 에너지제약을 고려함으로써 총 에너지비용은 748[천원](0.18%) 증가하게 되지만, 에너지수급상의 제약을 만족시킬 수 있기 때문에 보다 융통성있는 운전계획을 수립할 수 있음을 알 수 있다.

**4-2. 대규모 실계통에의 적용**

**4-2-1. 실계통의 특성**

대규모 실계통에 대하여 본 연구에서 제안한 방법으로 운용계획을 수립하였다.

본 계통은 화력발전기 92기로 구성되어 있으며, 이중 LNG나 석탄화력 등 에너지수급상의 제약을 갖는 일부 화력발전기의 에너지제약을 Table 5에 나타내었다. 실계통의 부하는 1주일을 주기로 변화하는 특성을 갖고 있어, 이에 대한 운용계획도 주간단위로 시행하고 있다. 따라서 Fig. 4과 같이 주간에 대하여 운용계획을 시행하

**Table 5. Energy constraints in thermal units.**

Energy constrained thermal generator	Required minimum fuel usage [Ton]	Calories [Gcal/Ton]	Unit price [₩ 1,000/Gcal]	Required minimum fuel price [₩ 1,000]
Unit 1,2,3,4	21,000	13,000	12.959	3,537,807
Unit 5,6,7,8	15,000	18,571	11.191	3,117,420
Unit 25,26	8,500	4,550	9.455	365,672
Unit 30,31	12,000	10,667	7.462	955,165
Unit 32,33	13,000	8,800	8.793	1,005,919

**Table 6. Changes of unit commitment schedule by energy constraints.**

Unit	Unit Commitment																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
5																								
6																								
7	○	○	○	○	○	○	○	○																
8	○	○	○	○	○	○	○	○																
17	×	×	×	×	×	×	×	×																
18								×																
64						×																		
65						×																		

□, Commit whether energy constraint is considered or not; ○, Commit when energy constraint is considered; ×, Decommit when energy constraint is considered.

**Table 7. Energy consumption on energy constrained units.**

Energy constrained thermal generator	Required minimum fuel price [₩ 1,000]	Fuel price (Not consider) [₩ 1,000]	Fuel price (Consider) [₩ 1,000]	Pseudo price (1- $\sigma$ + $\delta$ )
Unit 1,2,3,4	3,537,807	3,507,648	3,537,874	0.945
Unit 5,6,7,8	3,117,420	2,386,046	3,257,146	0.794
Unit 25,26	365,672	261,774	365,682	0.665
Unit 30,31	955,165	1,111,252	968,796	1.000
Unit 32,33	1,005,919	913,809	1,011,108	0.806

였으며, 운전예비력은 용량이 가장 큰 발전기의 탈락에도 운전이 가능하도록 1000 MW로 하였다.

#### 4-2-2. 적용결과

에너지제약을 고려하지 않고 운전계획을 수립하면 1, 2,3,4,5,6,7,8,25,26,32,33번 발전기는 에너지제약을 위반하게 된다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법으로 수립한 에너지제약을 만족하는 주간운용계획결과중 4일째의 결과중에서 에너지제약에 따라 기동정지계획이 변하는 발전기만을 Table 6에 나타내었다. 또한 이와 같은 운용계획의 변화로 에너지제약 화력발전기의 에너지사용량의 변화를 Table 6에 나타내었다.

이들 발전기 중 1,2,3,4,25,26,30,31,32,33번 발전기는

항시가동발전기로 기동정지계획에는 변화가 없으며, 발전출력만을 증가시킴으로써 에너지제약을 만족시키고 있다. 기동정지가 가능한 5,6,7,8번 발전기는 발전출력을 증가시키는 이외에 시간대 1~8에서 7,8번 발전기가 추가로 기동하고 있다. 또한 Table 6에서 7,8번 발전기의 기동 및 에너지제약 화력발전기의 출력증가에 따라 에너지제약을 갖지 않는 17,18,64,65번 발전기는 일부 시간대에서 정지하여 수급 및 운전예비력제약을 만족시키고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 에너지제약을 만족시키는 기동정지계획의 결과로 발전비용은 40,273,768천원에서 40,358,479천원으로 84,711[천원](0.21%) 만큼 증가하게 되지만, 순수



하게 경제적으로만 기동정지계획 및 발전출력을 결정시 남거나 부족하게 되는 LNG 또는 석탄과 같은 연료들 사용요구량에 맞도록 사용할 수 있어 보다 합리적인 계통운용이 가능하다고 할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 각 화력발전기의 에너지제약조건들을 만족하는 합리적인 운용계획을 수립하기 위하여 개개 화력발전기의 사용에너지를 일정량 이상 또는 이내로 사용할 수 있도록 L.R.법으로 수식을 유도하였으며, 이를 품으로써 에너지제약을 만족하는 화력발전기의 최적 주간운용계획을 수립할 수 있었다.

2) 화력발전기의 효율적인 주간운용계획 수립을 위하여 원문제내에서 가장가격을 조절하여 가면서 운전계획을 수립할 수 있도록 함으로써 에너지제약을 만족하는 최적의 기동정지계획 및 발전출력을 구할 수 있도록 하였고, 기존의 방법보다 빠르고 정확한 해를 구할 수 있는 Fibonacci법과 경제부하배분법을 사용하는 쌍대문제해법을 사용함으로써 보다 효율적으로 해를 구할 수 있도록 하였다.

3) 제안한 방법을 시험계통의 일간운용에 적용하고 화력발전기의 기동정지계획, 발전출력 및 에너지비용을 검토하여 에너지제약을 만족하는 운용계획의 수립특성을 분석하였으며, 다시 이것을 대규모 실제계의 주간운용에 적용하여 실제계의 적용가능성 및 유용성을 입증하였다.

4) 추후 여러지역에서 환경이 문제시 되고 있는 점을 감안하여 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 등 각종 오염물질의 지역 방출량제약 및 총 방출량제약 등도 함께 고려할 수 있는 화력발전기의 운용기법의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

### 사용기호

- $C_i^t$  : t 시간대에서의 i 화력발전기의 에너지비용  
( $C_i^t = \alpha (P_i^t)^2 + \beta_1 P_i^t + \gamma$ )  
 $\alpha, \beta_1, \gamma$ : i 화력발전기의 에너지비용의 계수
- $D^t$  : t 시간대에서의 부하 [MW]
- $N_i$  : 기동정지대상 일반 화력발전기 수 ( $i=1 \dots N_i$ )
- $N_j$  : 기동정지대상 에너지제약 화력발전기 수  
( $j=1 \dots N_j$ )
- $P_i^t$  : t 시간대에서의 i 화력발전기의 출력 [MW]
- $P_i^{\min}$  : i 화력발전기의 최소출력 [MW]
- $P_i^{\max}$  : i 화력발전기의 최대출력 [MW]

- $\Delta P_{i,up}^{\max}$  : i 화력발전기의 단위시간당 발전출력 증발출  
[MW/hr]
- $P_{i,dn}^{\max}$  : i 화력발전기의 단위시간당 발전출력 감발출  
[MW/hr]  
[단, 첨자 F는 에너지제약 화력발전기를 의미함]
- $Q_j^{\min}$  : j 에너지제약 화력발전기의 최소사용 에너지비  
용 [천원]
- $Q_j^{\max}$  : j 에너지제약 화력발전기의 최대사용 에너지비  
용 [천원]
- $R^t$  : t 시간대에서의 운전예비력 [MW]
- $S_i^t$  : t 시간대에서의 i 화력발전기의 기동 또는 정지  
비용 [천원]
- $T$  : 고찰기간( $t=1 \dots T$ )
- $T_{i,up}$  : i 화력발전기의 운전시간 [hr]
- $T_{i,dn}$  : i 화력발전기의 정지시간 [hr]
- $T_{i,up}^{\min}$  : i 화력발전기의 최소 운전시간 [hr]
- $T_{i,dn}^{\min}$  : i 화력발전기의 최소 정지시간 [hr]
- $U_i^t$  : t 시간대에서의 i 화력발전기의 상태

### 참고문헌

1. A.I. Cohen, S.H. Wan: "A method for solving the fuel constrained unit commitment problem", IEEE Trans., Power Systems, **PWRS-2**(3), 608 (1987).
2. K. Aoki, M. Itoh, T. Satoh, K. Nara, M. Kanazashi: "Optimal long-term unit commitment in large scale systems including fuel constrained thermal and pumped-storage hydro", IEEE Trans., Power Systems, **4**(3), 1065 (1989).
3. A. Merlin, P. Sandrin: "A New Method for Unit Commitment at Electricite de France", IEEE Trans. PAS, **PAS-102**(5), 1218 (1983).
4. S. Virmani, E.C. Adrian, K. Imhof, S. Mukherjee: "Implementation of A Lagrangian Relaxation based Unit Commitment Problem", IEEE Trans. Power Systems, **4**(4), 1373 (1989).
5. Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg: "Power Generation, Operation and Control", John Wiley and Sons (1984).
6. 이범, 김용하, 송길영: "L.R.법에 의한 새로운 기동정지계획 알고리즘의 개발", 전기학회논문지, **44**(10), 1239 (1995).
7. 송길영, 이범, 김용하: "수력 및 양수발전기의 가변출력운전을 고려한 기동정지계획에 관한 연구", 전기학회논문지, **43**(3), 351 (1994).
8. Mokhtar S. Bazaraa, Hanif D. Sherali, C.M. Shetty:

- "Nonlinear Programming Theory and Algorithms", John Wiley and Sons (1979).
9. David G. Luenberger: "Linear and Nonlinear Programming", Addison Wesley (1989).
  10. J.A. Muckstadt, S.A. Koenig: "An application of Lagrangian Relaxation to scheduling in power-generation systems", *Operation Research*, **25**(3), 387 (1977).
  11. K. Aoki, T. Satoh, M. Itoh: "Unit commitment in a large-scale power system including fuel constrained thermal and pumped-storage hydro", *IEEE Trans., Power Systems*, **PWRS-2**(4), 1077 (1987).
  12. F. Zhuang, F.D. Galiana: "Towards a more rigorous and practical unit commitment by Lagrangian Relaxation", *IEEE Trans., Power Systems*, **3**(2), 763 (1988).
  13. S.K. Tong, S.M. Shahidehpour: "An innovative approach to generation scheduling in large-scale hydro-thermal power systems with fuel constrained units", *IEEE Trans., Power Systems*, **5**(2), 665 (1990).
  14. E. Handschin, H. Slomski: "Unit commitment in thermal power systems with long-term energy constraints", *IEEE Trans., Power Systems*, **5**(4), 1470 (1990).
  15. S. Ruzic, N. Rajakovic: "A new approach for solving extended unit commitment problem", *IEEE Trans., Power Systems*, **6**(1), 269 (1991).