韓國經營科學會誌
第23卷 第2號
1998年 6月

확장된 발전시스템에서 지식기반 해법을 이용한 단기운영계획 수립에 관한 연구

김 철 수*

Knowledge-based Approach for Solving Short-term Power Scheduling in Extended Power Systems

Chulsoo Kim*

ABSTRACT

This paper presents an original approach for solving short-term power scheduling in extended power system with two fuels in a unit and a limited fuel using Lagrangian relaxations. The underlying model incorporates the full set of costs and constraints including setup, production, ramping, and operational status, and takes the form of a mixed integer nonlinear control problem. Moreover, the mathematical model developed includes two fuels in a unit and a limited fuel, regulation reserve requirements of prespecified group of units. Lagrangian relaxation is used to disaggregate the model by generator into separate subproblems which are then solved with a nested dynamic program including empirical knowledges. The strength of the methodology lies partially in its ability to construct good feasible solutions from information provided by the dual. Thus, the need for branch-and-bound is eliminated. In addition, the inclusion of two fuels in a unit and a limited fuel provides new insight into the limitations of current techniques. Computational experience with the proposed algorithm indicates that problems containing up to 23 units including 8 unit used two fuels and 24 time periods can be readily solved in reasonable times. Duality gaps of less than 4% were achieved.

* 원광대학교 정보관리학과, 이 논문은 '98년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 연구됨

I. 서 론

본 논문에서는 화력발전 시스템에서 기계적인 특성을 고려한 모형설정과 단기계획을 수립하기 위해 지식해법과 라그랑지안 완화법을 기반으로 개발한 해법을 보이고자 한다. 보통 현장에서 사용하고 있는 급전계획은 총발전연료비를 최소화시키는 등증분 연료비법이 많이 사용되고 있다. 이 등증분 연료비법은 수시로 변동하는 계통 수요에 맞추어 병입 또는 병입가능한 모든 발전기들의 기동 및 정지 그리고 발전량을 적절히 배분하는 해법인데, 이러한 방법은 발전기의 출력을 초과하는 경우가 발생되는 경우에 있어서는 추가되는 출력량 만큼에 대해서 임의로 조정하기 때문에 최적 급전계획을 보장할 수 없다. 그래서 이러한 단점을 보완하기 위해 발전기들의 기동 및 정지 계획과 경제 급전계획간의 전력공급계획 수립시 전력 조정치를 상호교환하는 지식기반 해법을 도입하는 것이 필요하게 된다.

발전 시스템의 단기운영계획이란 일정기간동안 전력수요는 시간에 따라 첨두 부하(peak load)와 비첨두 부하(off peak load) 사이에 심한 변동을 보이게 되는데, 그러한 전력수요를 만족시키면서 총 발전 비용을 최소화시키는 전력공급계획 문제이다. 이 계획문제는 두 가지 차원의 의사결정문제로 구분하는데, 하나는 기동 및 정지계획(Unit Commitment Planning)으로 이는 시간대별로 각 발전기의 운전 상태를 결정하는 것이며, 다른 하나는 경제급전계획(Economic Dispatch Planning)으로 가동되고 있는 발전기가 얼마만큼의 출력을 가지고 발전하는 것이 최적 급전량인가를 결정하는 것이다. 지난 십년 사이에 전력회사의 체계적인 운영기법에 대한 중요성이 증대된 이유는 발전소의 규모가 커지고, 발전기의 기계적 특징의 복잡성이 심화되었을 뿐 아니라, IMF 등을 통한 불완전한 환율 등으로 인한 에너지 가격의 상승과 에너지별 가격 상승의 차이 때문이라 할 수 있다. 보통의 화력발전시스템에서 단기운영계획을 수립하기 위해서 고려하는 사항은 크게 네 가지로 나눌 수 있는데, 첫째는 예비전력의 만족, 둘째는 시간에 따른 가동비용 고려, 셋째는 최소 가동 및 정지시간, 넷째는 램핑율이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 발전기의 기계적 특성인 램핑율과 최소가동 및 정지시간 등을 고려하였으며, 모형의 복잡성을 해결하기 위해서 큰 문제를 부분 문제로 나누는 방법을 택했다. 또한 국내의 발전기의 경우는 복수 연료(B. C.와 LNG)를 사용해서 발전하고 하고 있는데, 그 연료 중에 LNG는 사용제약을 받는 것으로 가정하였다. 이러한 점을 고려하기 위해서는 라그랑지안 완화법을 이용한 새로운 해법이 요구된다.

이 분야에 관한 연구를 살펴보면, Lowery(1966)는 위의 사항을 고려하지 않은 상태에서 전력 수요만 만족시키는 문제로 해서 동적계획법을 이용하여 해를 구했는데, 이것은 단기급전계획이 수리적인 모형에 의해 해결할 수 있는 가능성을 보인 초기 연구였다. 그리고 첫째 제약조건만 고려한 연구로는 Ayoub et al(1971), Pang et al(1976)의 연구 등이 있으며, 이들은 계산상의 어려움으로 둘째 제약조건을 고려하고 있지 못하다. Cohen(1983)과 Honderd(1985)등은 둘째 제약조건을 고려하는데 역점을 두었고, Bertsekas et al(1983), Turgeon(1978)과 Baptistella(1980) 등은 셋째 제약조건도 고려하였으나, 이들 대부분의 연구는 부분적인 조건하

에서 수리적 모형을 제안함으로써, 수리적 해법 과정을 통해서 해를 향상시킬 수 있다는 가능성을 보였다. 그 후에 이들 연구를 바탕으로 하여 Luo et al(1989), Yang(1989), Virmain(1989) 등은 네 번째 조건인 기계적 특성까지 고려한 보다 포괄적인 모형을 제시하였다.

단기운영계획을 수립하기 위한 해법으로 가장 많이 이용되는 방법으로 라그랑지안 완화법(Lagrangian relaxation)이 있는데, 라그랑지안 완화법은 문제를 발전기 별로 나누어 부분 문제를 풀어가기 때문에 계산상의 난점이 크지 않다는 장점이 있어서 많이 연구되고 있다. 이 방법을 처음 제시한 것은 Mucstadt et al(1977)의 연구인데 비록 좋은 계산 결과는 얻지 못했지만 시간상의 난제를 극복할 수 있는 해법을 제시했다는 의미를 가지고 있다. 그리고 Merlin et. al.(1983)은 쌍대계수를 개선하는데 수정된 서브그래이디언트 방법을 이용하여 큰 규모의 문제에도 어렵지 않게 풀 수 있으며 도메인의 특성을 대부분 고려할 수 있다는 장점도 있다. Virmain(1989)은 라그랑지안 완화법을 이용하여 단기 운영계획에 램핑율을 고려할 수 있음을 보였다. 이외에도 분지한계법에 의한 부분적해법(Partial enumeration method of the Branch and Bound), 동적계획법(Dymanic programming method), 밴더스 분할방법(Bender's partitioning method) 등이 있다.

본 연구에서는 발전기의 새로운 특성을 고려한, 즉 두 가지 연료를 하나의 발전기에서 사용하는 복수연료 발전에 의한 급전량 결정과 그 중 하나의 연료가 전체 시간대 동안에 연료제약량이 정해진 점을 고려하는 새로운 모형 설정과 실험적인 지식을 포함한 라그랑지안 완화를 기반으로한 해법을 제시하고자 한다

II. 모형의 설정

전력공급계획을 수립하는데 에는 수력발전기와 화력발전기를 같이 고려할 수 있는데, 수력발전기는 한계비용을 무시할 수 있어서 전력공급계획 수립 시에 전체 전력수요량에서 수력발전량을 제외한 나머지 수요량을 가지고 화력발전기 운영계획을 하는 것이 일반적이다. 또한, 운영비용이 비싸고 최소 가동 및 정지 시간을 갖지 않는 가스터빈 발전기의 경우에는 기대되는 전력 수요가 갑작스런 변동이 발생했을 때에 부족한 전력 수요를 만족시키는 완충작용을 하기 위해서 사용된다. 이 문제에서는 복수연료 발전기의 기동비용이나 램핑율의 제약식을 고려할 시에 전력공급에 사용되는 연료의 종류에는 영향을 받지 않는다고 가정하며, 한 시간대에서는 두 가지 연료가 동시에 사용되지 않고 한가지 연료만 사용하되 한가지 연료가 사용되고 나서 다른 연료가 사용될 시에 추가되는 비용은 없다고 가정하며, 복수연료 중 하나는 연료제약을 갖는다.

1. 용어정의

제안된 모형에 사용되는 용어(Notation)를 정리하면 다음과 같다.

I : 모든 발전기의 집합

I^n : 복수 연료를 사용하는 발전기의 집합. ($I^n \subset I$)

T : 총 발전기의 기간

U_{it} : 발전기 i가 시간대 t동안에 가동되고 있으면 '1'이고 정지되어 있으면

'0'으로 표현되는 상태변수

dP_{it} : 시간 t에서 연료 제약이 없는 발전기 i의 발전 변화량

X_{it} : 가동되어 있었던 시간이나 정지하고 있었던 시간의 수를 나타내는 상태변수

P_{it} : 연료 제약이 없는 발전기 i가 시간대에서의 출력

$C(P_{it})$: 전력 P_{it}를 발전하는데 드는 연료비용 함수

$S_i(X_{it}, U_{it}, U_{i,t+1})$:

시간대 t에서 (t+1)로 이동되었을 때에 전환 비용을 나타내는 함수

$G_{it}(U_{it}, P_{it})$:

발전기 i가 시간대 t에서의 순동 예비력을 표현한 함수

$H_{it}(X_{i,t-1}, U_{it})$:

발전기 i가 시간대 t에서의 최소 가동 및 정지기간을 표현한 함수

D_t : 시간대 t에서의 전력 수요

R_t : 시간대 t에서의 요구되는 순동 예비력

$\overline{P}_i$: 발전기 i의 최대 출력

$\underline{P}_i$: 발전기 i의 최소 출력

$\overline{\triangle}_i$: 한 시간 동안에 발전을 변화시킬 수 있는 최대 출력

$\triangle_i$: 짧은 시간 내에 발전을 변화시킬 수 있는 최대출력

P^n_{it} : 복합 연료 발전기 중에서 제약 연료에 의한 출력발전

dP^n_{it} : 복합 연료 중 제약 연료에 의한 한 시간 동안 전력 변화량

$M_i(P^n_{it})$: 전력 P^n_{it}를 발전하는데 소비되는 제약 연료량 함수

M : 발전계획 기간동안에 사용해야 하는 제약 연료량

2. 제약식

2.1 수요에 대한 제약

$$\sum_{i\in I} P_{it} + \sum_{i\in I^n} P^n_{it} \geq D_t, \forall_t \qquad (1a)$$

(la)는 수요를 만족하는 식으로, 왼쪽 식 중에 두 번째 항은 복수연료 발전기에서 제약 연료로부터 나온 전력의 합을 의미한다.

2.2 순동 예비력 보유에 대한 제약

예측할 수 없는 상황하에서 수요 변동을 만족하려면 충분한 예비력이 필요하다. 가동하고 있는 발전기를 최대로 발전하지 않고 짧은 시간 내에 발전량을 변화시킬 수 있는 시간 내에 발전량을 변화시킬 수 있는 순동 예비력을 보유하고 있어야 하는데, 그것은 일반적으로 전력 수요의 비율로 나타낸다. 그 식은 다음과 같다.

$$\sum_{i\in I} G_{it}(U_{it}, P_{it}) = \sum_{i\in I}[\min(P_{it} + P^n_{it} + \triangle_i, \overline{P}_i) - P_{it}]\, U_{it} \geq R_t, \forall_t \qquad (1b)$$

위의 식에서 $\triangle_i$는 보통 발전기 i가 10분 동안에 증가시킬 수 있는 위급시의 최대출력이다.

2.3 연료의 제약

$$\sum_{i \in I^n} \sum_{t \in T} M_i(P^n_{it}) \geq M \qquad (1c)$$

복수 연료 발전기에서 사용되는 제약연료는 전체 급전계획 기간동안에 M을 사용해야 한다. 보통 $M_i(P^n_{it})$는 열효율 곡선 (Heat Rate Curve)에서 2차 함수식으로 얻을 수 있다.

2.4 최대, 최소 출력 및 램핑율 제약

$$U_{it} \underline{P}_i \leq U_{it}(P_{i,t+1} + P^n_{i,t+1}) + (dP_{it} + dP^n_{it}) \leq U_{it} \overline{P}_i, \forall_t, \qquad (2a)$$

$$-\overline{\Delta}_i \leq dP_{it} + dP^n_{it} \leq \overline{\Delta}_i + (1 - U_{i,t-1}) P_i, \forall_t, \qquad (2b)$$

$$P^n_{it} = dP^n_{it} = 0, \ i \notin I^n, \ \forall_t, \qquad (2c)$$

식 (2a)는 최대 및 최소 출력에 관한 제약식이며, 식 (2b)는 순간적인 발전 변화량을 할 수 있는 램핑율을 나타내는 식이며, 식 (2c)는 복수연료 발전기 이외에는 복수연료에 의한 발전량인 P^n_{it}, dP^n_{it}는 '0' 임을 의미한다.

2.5 복수연료 발전의 비동시성 제약

$$P_{it} \cdot P^n_{it} = 0, \ i \in I^n, \ \forall_t \qquad (2d)$$

복수연료 발전기에서는 한 시간대에 두 연료를 동시에 사용할 수 없다는 제약이다. 본 제약식은 후에 해법과정에서 원문제를 분할하여 동적계획법으로 처리 가능하다.

3. 상태 변환 등식

지금 제시되는 공식은 전체 계획기간동안에 시스템의 상태를 추적할 수 있게 하기 위해서 설정해 놓았다. 여기서

$$X_{i,t+1} = H_{it}(X_{it}\ U_{i,t+1}), \ i = 1, 2, 3, \ldots, I, \ t = 0, 1, 2, \ldots, T\text{-}1 \qquad (3a)$$

$$H_{it}(X_{it}\ U_{i,t+1}) = \begin{cases} X_{i,t}+1 & \text{if } X_{i,t} > 0 \text{ and } U_{i,t+1} = 1 \\ X_{i,t}-1 & \text{if } X_{i,t} < 0 \text{ and } U_{i,t+1} = 0 \\ -1 & \text{if } X_{i,t} > 0 \text{ and } U_{i,t+1} = 0 \\ 1 & \text{if } X_{i,t} < 0 \text{ and } U_{i,t+1} = 1 \end{cases}$$

그리고

$$P_{i,t+1} = F_{it}(P_{it}, \ dP_{i,t+1}, U_{i,t+1}), \ i = 1, 2, 3, \ldots, I, t = 0, 1, 2, \ldots, T\text{-}1 \qquad (3b)$$

여기서

$$F_{it}(P_{it}, dP_{i,t+1}, U_{i,t+1}) = \begin{cases} P_{it} + dP_{i,t+1} & \text{if } U_{i,t+1} = 1 \\ 0 & \text{if } U_{i,t+1} = 0 \end{cases}$$

위 식에서 초기치 X_{i0}, P_{i0}는 주어진다

위의 두 식을 볼 때에 두 시점의 상태 벡터가 이러한 함수를 구성하는 것을 볼 수 있다. 그리고 위의 식들을 만족하는 U_{it}의 값은 최소 가동 및 정지 시간의 제약을 받는다.

4. 목적 함수

단기 운영계획에서, 전통적인 모형의 목적함수식과 같이 여기서도 두 가지의 비용 항으로 구성된다. 첫 번째 항은 전력을 생성하는 연료비용이고 두 번째 항은 시간에 따른 발전기의 상태변화에서 나오게 되는 전환 비용으로 나누는데, 먼저 연료비용은 다음과 같이 2차 함수식

으로 나타낸다.

$$C(P_{it}) = \alpha_{i0} + \alpha_{i1} P_{it} + \alpha_{i2} P_{it}^2 \quad (4a)$$

여기서 α_{i0}, α_{i1}, α_{i2} 등은 양수로 정해진다(Ammons and McGinnis, 1983).

상태 변화로부터 생기는 두 번째 항은 보일러의 온도에 따라 변화하는 운전가동 비용을 들 수 있는데, 그것은 보일러의 온도가 상수 γ_i의 역수의 지수비율로 감소하는 것으로 가정하여,

$$S_i(X_{it}, U_{it}, U_{i,t+1}) = [\beta_{i1}(1-\exp(-(t(X_{i,t-1})/\gamma_i)) + \beta_{i2}]\, U_{i,t+1}(1-U_{it}) \quad (4b)$$

로 나타난다. 여기서 t(X) = max(0, -X)는 발전기가 정지되었던 시간을 나타낸다. 따라서, 원문제(Primal Problem(P))는 다음과 같이 표현할 수 있다.

P : minimize F (U, dP)

$$= \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} [\, C(P_{it}) + S_i(X_{it}, U_{it}, U_{i,t+1})] \quad (5)$$

s.t.

(1) - (3)

초기 상태 조건,

최소 가동 및 정지시간.

위의 원문제(P)는 $I \cdot T$개의 연속변수 dP_{it}와 $I^n \cdot T$개의 dP^n_{it}을 갖는 혼합 정수 비선형 계획문제(mixed integer nonlinear programming problem)가 된다.

III. 라그랑지안 완화법을 이용한 발견적 해법

원문제(P)를 가지고 해를 구하는 것은 구조의 복잡성으로 인해 상당한 시간이 드는데, 이러한 문제는 보통 원문제를 각각의 발전기별 부문제(subproblem)로 나누어서 개별문제로 생각하는 것이 효율적이다. 그래서 전력수요, 순동예비력 및 연료제약식(1a, 1b, 1c)를 목적함수에 완화(Relaxation)하고, 완화된 각각의 제약식에 쌍대변수를 λ, μ, δ로 두면 원문제는 각 발전기별 부문제로 표현할 수 있다.

maximize $\theta(\lambda, \mu, \delta)$

$$= \sum_{i \in I} \theta_i(\lambda, \mu, \delta) + \sum_{t \in T} (\lambda_t D_t + \mu_t R_t) - \delta M \quad (6a)$$

여기서

$$\theta_i(\lambda, \mu, \delta) = \min \sum_{t \in T} [C(P_{it}) + S_i(X_{it}, U_{it}, U_{i,t+1}) - (\lambda_t P_{it} + \mu_t G_{it}) + B] \quad (6b)$$

s.t. (2)-(3)

초기상태조건

최소가동 및 정지시간

$$B = \begin{cases} \delta M_i(P^n_{it}) - \lambda_t P^n_{it} & \text{if } i \in I^n \\ 0 & \text{if } i \notin I^n \end{cases}$$

위의 문제(6b)는 발전기별 부문제이며 동적계획법에 의해서 해를 구하게 되는데, 이 문제에서 다루는 총 변수는 T개의 이상변수(U_{it})와 T개의 연속변수(dP_{it} 또는 dP^n_{it})로 구성되어 있다. 쌍대값 λ, μ, δ 가 주어지면 θ (λ,

μ, δ)를 구할 수 있으며, 좋은 승수를 얻기 위해서는 다음과 같은 쌍대문제(7)을 풀어야 한다.

$$D : \theta^* = \sup \theta(\lambda, \mu, \delta) \qquad (7)$$

$$\text{s.t. } \lambda \ge 0, \mu \ge 0, \delta \subset R$$

만약 F^*가 원문제(5)의 최적값이라면 쌍대문제(7)의 최적값인 θ^*는 F^*의 하한을 의미한다(Geoffrion, 1974). 식 (7)에서 등식은 원문제가 볼록(Convex)일 때 성립하나, 이 경우는 볼록이 아니므로 등식은 성립하지 않는다. 따라서 ($F^* - \theta^*$)는 항상 양의 값을 가지며, 문제의 크기가 커질수록 그 차이는 작아진다. Bertsekas et al(1983)는 I -> ∞인 경우에는 위의 차이가 '0'에 수렴함을 보였다. 그리고 등식을 만족한다고 해서 항상 가능해 임을 보장할 수 없다. 문제(6a)의 최적해가 원문제(5)의 최적해가 되기위한 충분조건은 다음과 같다.

보조정리

최적 상태 벡터(X^*, P^*, P^{n*})와 비음(Nonnegative) 조건을 가진 완화된 원문제(7)의 최적해를 (U^*, dP^*, dP^{n*})라 하자. 이때 (U^*, dP^*, dP^{n*})가 원문제(5)의 최적해가 될 충분조건은 다음의 (1)-(6)식이 된다.

$$(1)\ \sum_{i \in I} P_{it}^* + \sum_{i \in I^n} P^n{}_{it}^* \ge D_t, \forall_t$$

$$(2)\ \sum_{i \in I} G_{it}(U_{it}^*, dP^*) \ge R_t, \forall_t$$

$$(3)\ \sum_{i \in I^n} \sum_{t \in T} M_i(P^n{}_{it}^*) \ge \mathrm{M}$$

$$(4)\ \lambda^*(D_t - \sum_{i \in I} P_{it}^* - \sum_{i \in I^n} P^n{}_{it}^*) = 0$$

$$(5)\ \mu^*(R_t - \sum_{i \in I} G_{it}(U_{it}^*, dP^*)) = 0$$

$$(6)\ \delta^*(\mathrm{M} - \sum_{i \in I^n} \sum_{t \in T} M_i(P^n{}_{it}^*)) = 0$$

일반적으로 위의 조건은 정수계획(Integer Programming)문제의 경우나 기동정지계획 문제의 경우에는 만족하기 힘들다(Merlin and Sandrin, 1983). 본 연구에서는 반복적인 방법으로 쌍대문제(6)을 풀어나가며, ($F^* - \theta^*$)가 충분히 적게 되면 라그랑지안 완화법을 마친다. 전체적인 해법과정을 정리하면 다음과 같으며, 이 중에 단계 3에서는 과거의 경험적인 지식을 이용한 해법이다.

단계 1: λ, μ, δ의 초기값으로 완화된 원문제(6)을 풀어 (U, dP, dP^n)과 θ를 구한다.

단계 2: 단계 1에서 얻은 해를 이용해 원문제(5)의 가능해(연료제약식(1c)를 제외한 문제)를 얻으면 다음 단계로 가고 그렇지 않으면 단계 5로 간다.

단계 3: 단계 2에서 구한 해가 연료제약식(1c)을 만족하면 단계 4로 가고 아니면 단계5로 간다.

단계 4: 쌍대 갭을 계산하여 그 값이 ϵ 보다 적으면 ϵ-최적해를 가지고 끝내며, 그렇지 않으면 단계 5를 수행한다.

단계 5: 승수를 다시 바꾸어 단계 1로 간다.

3.1 단계 1의 해법

단계1은 발전기 자체의 문제로 그 형태는 다음과 같다.

$$\min \sum_{t \in T} [\mathrm{C}(P_{it}) + S_i(X_{it}, U_{it}, U_{i,t-1}) - (\lambda_t P_{it} + \mu_t G_{it}) + \mathrm{B}] \qquad (8a)$$

s.t

$U_{it}\ \underline{P}_i \quad \leq U_{it}(P_{i,t+1} + P^n{}_{i,t+1}) + (dP_{it} + dP^n{}_{it}) \leq U_{it}\ \overline{P}_i,\ \forall t,$ (8b)

$-\overline{\triangle}_i \leq dP_{it} + dP^n{}_{it} \leq \overline{\triangle}_i + (1-U_{i,t-1})P_i, \forall t,$ (8c)

$X_{i,t+1} = H_{it}(X_{i,t}\ U_{i,t+1}),\ i = 1, 2, 3, \ldots, I,\ t = 0, 1, 2, \ldots, T$ (8d)

$P_{i,t+1} = F_{it}(P_{it},\ dP_{i,t+1}, U_{i,t+1}),\ i = 1, 2, 3, \ldots, I,\ t = 0, 1, 2, \ldots, T$ (8e)

초기상태조건

최소가동 및 정지시간

$U_{it} \in \{0, 1\},\ \forall_{it}$

여기서

$B = \delta M_i(P^n{}_{it}) - \lambda_t\ P^n{}_{it}$ if $i \in I^n$

0 if $i \notin I^n$

위의 문제는 목적 함수와 가능 영역이 비선형인 정수계획문제이며 부분문제도 각 시간대에 따라 발전기의 최소가동 및 정지시간, 램핑율과 위급시 발전량을 고려할 수 있는 동적계획법이 효과적이다. 발전기가 가동되고 있거나 최소정지 시간을 만족한 발전기는 발전할 수 있는 발전용량과 램핑율의(8b)식과 같은 기계적인 특성을 고려할 때의 가능한 영역에서 Grid search를 한다. 예를 들면, Cooling상수(γ_i)가 4시간이며 운전 발전량은 650MW이고 램핑한계가 450MW이며 최소가동 및 정지시간이 각각 5시간과 4시간이라면 이에 따른 정지상태의 수는 최대값으로 $(2\gamma_i+1)$을 갖는다. 이때 50MW씩 Grid search를 하면 모든 운전상태의 수는 14가지가 된다. 어느 발전량을 가지고 운전하고 있는 경우에서 가능한 최대 운전상태의 수는 램핑율 제약을 감안하는 경우에서는 10가지로 줄어든다. 이 제약이 약간의 계산과정을 줄이더라도 이 발전기에만 79(=9 + 5(14))가지의 상태가 생길 수 있다. 그러면 $\Omega(U, dP, dP^n)$를 시간대 t에서 발전기 i의 발전량 결정 영역이라 할 때 위의 문제를 동적 계획법의 순환방정식으로 위의 문제를 나타내면 다음과 같다.

$$\Gamma(X_{it}, P_{it}, P^n{}_{it})$$
$$(U, dP, dP^n) \in \Omega$$
$$= \min \sum_{t\in T}[C(P_{it}) + S_i(X_{it}, U_{it}, U_{i,t-1}) - (\lambda_t P_{it} + \mu_t G_{it}) + B] + \Gamma(X_{i,t+1}, P_{i,t+1}, P^n{}_{i,t+1})$$

with $X_{i0}, P_{i0}\ P_{i0}{}^n$, $\Gamma(X_{iT}, P_{iT}, P^n{}_{iT}) = 0$

여기서

$B = \delta M_i(P^n{}_{it}) - \lambda_t\ P^n{}_{it}$ if $i \in I^n$

0 if $i \notin I^n$

이며, $t=0$ 일 때 그 값을 역으로 구하여 해를 구한다.

3.2 단계 2의 해법

이러한 문제의 해를 구하는데 있어서 중요한 것은 좋은 가능해를 얻는데 있으며, 만약 가능해가 좋지 않으면 분지한 해법을 사용할 수밖에 없다. 만약 발전기 각각의 문제(8)의 가능해가 최적조건을 만족하면 원문제의 최적해가 된다. 그러나 만족되지 않더라도 상대적인 운전효율을 고려하여 매 시간대 t에서 발전기의 운전 및 정지를 변화시킴으로써 가능해를 구할 수 있다.

그 기준으로 사용되는 한계비용 MC_{it}는 다음과 같다.

$$MC_{it} = \begin{cases} \alpha_{i1}+2\alpha_{i2}P_{it}+\eta\,\delta(M_i(P^n{}_{it}))/\delta P^n{}_{it} & \text{if } U_{it}=1 \\ \alpha_{i1}+2\alpha_{i2}P_{it}+\eta\,\delta(M_i(P^n{}_{it}))/\delta P^n{}_{it} & \text{if } U_{i,t-1}=1 \text{ and } U_{it}=0 \\ S_i(X_{i,t-1},1,0), & \text{if } U_{it}=0 \text{ and } X_{i,t-1} \text{ <Minimum Down Time} \\ \infty, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

여기서 η은 제약연료의 단가로 발전기 $i \notin I^n$에서는 '0'의 값을 갖는다.

한계비용식(9)에서의 모든 값은 완화된 원문제(8)에서 얻어진 해를 가지고 구해지며 시간대 (8) t에서 MC_{it} 크기 순서대로, 즉 작은 값이 '1'로 우선 순위가 정해진다. 시간대 t가 1에서 시작하여 그 시간대에 운전하고 있는 발전기를 최대 허용량식(2a), 램핑율 만족식(2b) 그리고 순동 예비력 만족식(1b)가 만족하는 한도 내에서 최대로 발전량을 증가시킨다. 만약 그 증가된 발전량이 수요를 초과하면, 우선 순위 역순으로 전력수요 만족식(1a)이 등식이 되도록 발전량을 줄이는데 보통 가동되는 발전기가 정지되는 경우가 생긴다. 그렇지 않고 증가된 발전량이 수요 미만일 때에는 정지된 발전기에서 우선 순위에 따라 운전하여 전력수요 만족식이 등식이 될 때까지 수행한다. 다음으로 예비력 만족식(1b)을 만족하지 않으면, 가능해를 얻지 못하고 단계 5를 수행한다.

3.3 단계 3의 해법

이 단계는 경험적인 지식과 발견적 해법을 시스템에 지식으로 저장하였다가 그것을 이용해서 제약식들을 만족시켜나가는 단계이다. 단계 2에서 얻은 해법을 가지고 복수연료 발전기 I^n에 대하여 연료 제약식(1a)를 만족하는지 여부를 검사한다. 만약 그 식을 만족하게 되면 다음 단계로 가며, 만족하지 않으면 다음과 같은 방법으로 연료 제약식을 만족하는 해를 구한다. 여기서, M을 초과한 경우와 미만인 경우를 나누어 해법을 전개해 보자. 먼저 복수연료 발전기의 한계비용식(9)를 이용하여 MC_{it}^n 를 구한다. 첫 번째로 M을 초과한 경우에는 먼저 복수연료 발전기에서 MC_{it}^n 를 높은 순으로 순위를 매긴다. 즉 첫 번째가 MC_{it}^n 가 가장 적다. M을 초과한 만큼을 한계비용이 높은 발전기 i와 시간대 t를 선정하여 복수연료 발전기의 발전량을 감소시킨다. 그리고 감소된 발전량만큼 발전기 i와 시간대 t의 각각에 대해 앞에서 구한 한계비용식(9)에 따라 낮은 한계비용을 나타내는 발전기에서부터 발전량을 증가시킨다. 두 번째로 M미만인 경우에는 MC_{it}^n 낮은 순으로 발전시키는데, 수요만족식(1a)와 (1b)를 만족하는 선까지 한다. 여기에서는 증가된 발전량만큼을 한계비용이 높은 발전기부터 발전량을 감소시켜 나간다.

3.4 단계 4와 5의 해법

단계 4에서는 쌍대 갭을 계산하여 그 값이 ϵ 보다 적으면 ϵ - 최적해를 가지고 끝내며, 그렇지 않으면 단계5를 수행한다. 단계 5에서는 쌍대 승수를 계산하여 그 값을 가지고 다시 단

계1로 가서 앞서 제시된 해법으로 같은 절차를 거친다. 이 단계에서는 서브 그래디언트 방법을 이용하였다.

$$\lambda_t^{k+1} = \max[0, \lambda_t^k + S(k)(D_t - \sum_{i\in T} P_{it}{}^k - \sum_{i\in\Gamma^n} P^{n_{it}k})]$$

$$\mu_t^{k+1} = \max[0, \mu_t^k + S(k)(R_t - \sum_{i\in I} G_{it}{}^k)]$$

$$\delta^{k+1} = \delta^k + S(k)(\sum_{i\in\Gamma^n}\sum_{t\in T} M_t(P^n{}_{it}{}^k) - M) = 0$$

여기서 S(k)는 스텝 크기이며 k -> ∞에 대해 S(k) -> 0이고

$\sum_{k=0}^{\infty}$ S(k) -> ∞ 이다. 일반적으로

S(k) $= \alpha_k(Z - \theta(\lambda^k, \mu^k, \delta^k))/\Gamma$ 이며, 여기서

$$I = \sum_{t\in T}[(d_T - \sum_{i\in\Gamma} P_{it}{}^* - \sum_{i\in\Gamma^n} P^n{}_{it}{}^*)^2 + (R_t - \sum_{i\in\Gamma} G_{it}(U_{it}{}^*, dP^*, dP^{n*}))^2 + (\sum_{i\in\Gamma^n}\sum_{t\in T} M_t(P^n{}_{in}{}^*) - M)^2$$

이다. 그리고 λ 가 한계비용에 수렴한다는 점을 고려하여 단계1에서 구한 값을 가지고 각 시간대의 한계비용의 평균 한계비용과의 볼록조합(Convex Combination)을 통하여 전력 수요식의 λ 을 개선한다. 위의 α_k는 '0'과 '2' 사이의 값을 갖는 상수(Scalar) 모수이며, Z는 반복 k에서의 가장 작은 원문제의 최적해를 사용하며, $\theta(\lambda^k, \mu^k, \delta^k)$는 반복 k에서의 쌍대값이다. 그리고 Γ의 값은 오른쪽 세개 항의 합인데, 첫 번째 항은 발전량이 전력수요를 만족하지 못한 양이며, 두 번째 항은 예비력을 만족하지 못한 양이고, 세 번째 항은 연료제약량과 발전에 사용된 제약 연료 량과의 차이로 측정단위가 틀리게 되는데, 이것이 Γ값을 구하는데에 영향을 주게 된다. 그리고 개선된 쌍대값도 다르므로 3가지 종류의 쌍대값이 수렴하는 속도가 다르게 된다. 여기서 제시한 두단계 가능해 해법도 이러한 제약식의 단위를 조정함으로써 효율적으로 가능해를 얻게된다.

IV. 모형적용 및 평가

II 장에서 설정한 모형을 국내 전력회사의 단기운영계획을 수립하는데에 실험자료를 가지고 적용하여 설정된 모형을 평가해 보고 III 장에서 언급한 해법과정을 통해서 단기운영계획을 수립하고자 한다. 아래의 예제를 데이터로 해서 급전계획모형을 보면, 552개의 연속변수 dP_{it} 와 192개의 혼합정수 $dP^n{}_{it}$를 갖는 문제이고, 제약식도 1249개이므로, 비선형성을 선형성으로 단순화한다고 해도 분지 및 한계(Branch and Bound) 방법에 푸는 경우에는 해답을 구하는 시간은 300시간에서 500시간 정도로 매우 힘들고 복잡한 문제이기에 새로운 알고리즘 개발에 대한 중요성이 더욱 커지고 있다. 이러한 점에 비추어서 본 연구는 새로운 모형을 설정하고 효과적인 알고리즘을 가지고 많은 실험을 통해서 기존연구들과 비교하여 우수성을 보이고자 한다.

현재 국내 전력회사에서 화력 발전기 중에 발전기 용량이 작은 발전기는 제외하고 발전용량이 100MW 이상인 발전기 중에서 표본으로 23대의 화력 발전기를 가지고 24 시간대에 적용

하였다. 이 중 복수연료 발전기는 8대로 한정하여 발전기 전체 집합에 포함시켰다. 본 해법에 사용된 입력자료는 모의 실험자료이며, 부록에 정리해 두었다. 여기에 복수연료 발전기에 사용되는 제약 연료의 열효율 식은 발표된 자료가 없기 때문에 기존 발전기의 열효율 식을 자료로 삼았고, 화력발전기 중에서도 발전용량이 100MW이하인 것을 제외하고 표본으로 선택한 23대의 발전기를 가지고 분석하였다.

〈표 1〉 발견적 해법에 대한 쌍대 갭

(단위: 백만Kcal)

연료제약량 \ 대수	5000	10000	20000	30000
5 대	3.17% (# 57)	3.37% (# 57)	3.21% (# 53)	2.73% (# 39)
	115	116	114	110
8 대	2.98% (# 57)	3.11% (# 56)	2.62% (# 59)	2.61% (# 48)
	143	141	143	139

본 연구에서 개발한 방법론을 점검해 보면 〈표 1〉과 같다. 복수연료 발전기의 대수와 LNG 제약량의 수준에 구별없이 대부분 40-60 사이의 반복(Iteration) 계산 내에 3%대의 쌍대갭을 얻을 정도로 본 해법이 최적해에 가깝게 접근함을 보이고 있다. 또한, 4%대의 쌍대갭을 보이기 위해서는 20-30 사이의 반복에서 나타남을 보인다. 초기치가 좋을 때에는 3%대의 경우도 있으며, 임의적인 초기치에도 반복적인 횟수가 많은 경우에는 결과에 큰 차이를 주지않고 있으나, 문제에 따라서는 초기치를 주어지는 방법이 최적값의 수렴 속도에 영향을 준다. 본 발견적 해법의 수요 제약식의 쌍대값은 초기치로 현재 거래되고 있는 연료의 단가를 이용하게 되면 수렴되는 시간은 다른 초기치에 비해 줄어들게 된다. 본 연구의 발견적 해법에서 단계 5는 전통적인 쌍대계수 개선법을 사용하지 않았으며, 스탭크기(Step Size)를 제약식에 따라 가중치를 부여하여, 각 제약식이 만족되는 정도에 따라 쌍대계수를 조절해 주는 방법이 문제 크기가 클수록 수렴속도에 큰 차이가 나타나고 있는데, 실제로 이것이 모든 문제에 대해서 효율성을 지니고 있는지는 조사할 필요가 있다고 본다. 본 연구가 실질적 제약식인 램핑율을 고려한 점과 이용되는 발전기가 23대에 불과하다는 점 때문에 쌍대 갭이 3% 대이지만 큰 규모의 전력 시스템에 본 발견적 해법을 적용하게 되면 쌍대 갭이 더 줄어들 것으로 기대된다. 그리고 본 해법이 기동정지 계획을 포함하기 때문에 효율적인 기동정지계획에 대한 해법이 개발된다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 본다.

V. 결 론

국내에 LNG연료로 복수 발전기가 설치됨으로 인해 기존의 고려했던 단기운영계획 모형은 수정되어져야 한다. 그러나 복수연료 발전을 사용하는 경우와 연료 제약을 받는 경우를 고려한 효율적인 발견적 해법을 제시하고, 이 해법을 통해서 복수연료 발전기를 고려한 경우에 대하여 실험자료를 이용하여 모형을 평가하여 보았다. 앞에서 설명된 Luo, Yang, Virmain의 연구결과가 발전기의 기계적인 특성을 고려한 최근

의 논문이라 할 수 있는데, 그에 비해서 본 연구는 기계적인 특성에다가 복수발전기의 형태를 갖는 전력시스템의 단기운영계획을 모형화하고 또한 그 모형에 맞는 알고리즘을 개발하여 짧은 시간 안에 최적해에 가까운 해를 구할 수 있음을 보여주고 있다.

단기 운영계획에서는 전력 수요가 주어진 상태에서 문제를 해결하는데, 이러한 전력수요의 예측 문제가 중요한 관건이 된다. 급전계획으로 보통 단기 계획이면 화력 발전의 운영계획만 다루는 경우가 많은데, 수력발전도 포함시키는 효율적인 급전계획 모형이 개발되어야 하겠다. 수자원을 통한 발전, 홍수 조절기능, 관개기능 등을 고려한 수력발전 모형이 자체적으로도 중요시되고 있다. 그리고 비 첨두 부하때에 이용 가능한 에너지를 수력자원의 형태로 저장해 두었다가, 발전시스템을 초과하는 전력 수요가 발생하거나, 첨두부하 상황하에서 발전 형식으로 전력을 공급하는 양수 발전이 최근에 관심을 보이고 있다. 이와 같이 화력과 수력, 양수 발전까지 고려한 발전 시스템의 급전계획 모형도 함께 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Ayoup, A. K. and A. D. Patton, Optmal Thermal Generating Unit Commintment", IEEE Winter Meeting, Jan. 1971, pp.1752-1756

[2] Baptistella, L. F. and J. C. Germel, Decomposition Approach to Problem of Unit Commitment Schedule for Hydrothermal Systems, IEEE Proceedings, 127(6), 1980, pp.250-258

[3] Bard, J. F., Short-term Scheduling of Thermal Electric Generators using Lagrangian Relaxation, Operations Research, 36(6), 1988, pp.756-766

[4] Bertsekas, D. P., D. S. Lauer, N. R. Sandell, and T. A. Posbergh, Optimal Short-term Scheduling of Large Scale Power System, IEEE Trans. Automatic Control AC-28(1), Jan. pp.1983, 1-11.

[5] Geoffrion, A., Lagrangian Relaxation for Integer Programming, Mathematical Programming Study, Vol.2, 1974, pp.82-114

[6] Habibollahzadeh, H. and J. A. Bubenko, Application of Decomposition Techniques to Short-term Operation Planning of Hydrothermal Power System, IEEE Trans. Power Apparatus and System, PAS-1(1), Feb. 1986, pp.41-47

[7] Honderd, G. and P. P. J. Van den Bosch, A Solution of the Unit Commitment Problem via Decomposition and Dynamic Programming, IEEE Trans. Power Apparatus and System, PAS-104(7), 1985, pp.1684-1690

[8] Lowery, P. G., Generating Unit Commitment by Dynamic Programming, IEEE Trans. Power Apparatus and System, PAS-85, 1966, pp.422-426

[9] Merlin, A. and P. Dandrin, A New Method for Unit Commitment at Electricite De France, IEEE Trans. Power Apparatus and System, PAS-102(5), 1983, pp.

1218-1225

[10] Muckstadt, J. A. and C. A. Gibson, Modeling of Blending/Transloading Facilities for Use in Optimal Fuel Scheduling, IEEE Trans. Power Apparatus and System, PAS-95, 1976, pp.1336-1346

[11] Pang, C. K. and M. C. Chen, Optimal Short-term Thermal Unit Commitment, IEEE Trans. Power Apparatus and System, PAS(4), 1976

[12] Quintana, Y. H. and A. Y. Chikhani, A Stochastics Model for Mid-term Operation Planning Hydro-thermal Systems with Random Reservoir Inflows, IEEE Trans. Power Apparatus and System, PAS-100(3), 1981, pp.1119-1127

[13] Ross, D. W. and Sungkook Kim, Dynamic Economic Dispatch of Generation, IEEE Trans. Power Apparatus and System, PAS-99(6), 1980, pp.2060-2068

[14] Turgeon, A., Optimal Scheduling of Thermal Generating Units, IEEE Trans. Automatic Control AC-23(6), 1978, pp. 1000-1004

[15] Waight, J. G., F. Albuyeh and A. Bose, Scheduling of Generation and Reserve Margin using Dynamic and Linear Programming, IEEE Trans. Power Apparatus and System, PAS-100(5), 1981, pp.2226-2230

부 록

〈표 2〉 발전기별 파라미터와 초기 상태

(단위 : 백만 Kcal)

Units	Max	Min	Emer	Ram	UP	Down	Status	Power
1	150	60	20	90	2	2	1	80
2	230	120	20	150	2	2	-1	0
3	210	120	20	180	2	2	1	140
4	270	170	20	180	2	2	1	190
5	280	170	20	180	2	2	-1	0
6	280	130	20	120	1	1	-1	0
7	260	130	20	180	1	1	1	150
8	190	110	30	120	1	1	-1	0
9	200	110	20	120	2	2	-1	0
10	210	110	20	180	2	2	1	130
11	220	110	20	180	2	2	-1	0
11	220	110	20	180	2	2	-1	0
12	220	110	20	180	2	2	1	130
13	370	250	20	210	2	2	-1	0
14	370	250	20	210	2	2	1	270
15	370	250	20	210	2	2	-1	0
16	240	150	30	150	1	1	-1	0
17	240	150	20	150	1	1	1	170
18	310	170	20	180	2	2	-2	0
19	310	170	20	180	2	2	1	190
20	340	220	30	210	1	1	-1	0
21	340	220	30	210	1	1	-1	0
22	340	220	20	210	2	2	1	240
23	340	220	20	210	2	2	1	240

〈표 3〉 발전기별 비용 계수 자료

(단위: 천원)

Units	a_0	a_1	a_2	b_1	b_2	τ
1	627.170	18.588	0.02226	0	3016.8	4
2	1177.130	12.111	0.01842	0	5279.5	4
3	1356.900	8.940	0.02051	0	5488.6	4
4	889.770	22.091	0.00677	0	13176.0	4
5	889.770	22.091	0.00677	0	13176.0	4
6	520.760	21.760	0.01425	0	5646.5	4
7	1079.310	22.097	0.01342	0	6434.9	4
8	511.450	22.377	0.02224	0	3117.7	4
9	803.750	23.048	0.01817	0	3218.4	4
10	744.670	22.266	0.01767	0	9245.2	4
11	744.670	22.266	0.01767	0	9245.2	4
12	744.670	22.266	0.01767	0	9245.2	4
13	2457.750	12.086	0.01592	0	5213.8	4
14	2457.750	12.086	0.01590	0	5213.8	4
15	2457.750	12.086	0.01590	0	5213.8	4
16	3315.060	14.952	0.04147	0	7646.7	4
17	3315.060	14.952	0.04147	0	7646.7	4
18	2027.400	22.879	0.02108	0	8296.3	4
19	2027.400	22.879	0.02108	0	8296.3	4
20	1232.778	29.818	0.01038	0	5762.2	4
21	1232.778	29.818	0.01038	0	5762.2	4
22	1232.778	29.818	0.01038	0	5762.2	4
23	1232.778	29.818	0.01038	0	5762.2	4

〈표 4〉 혼합연료 발전기별 열효율 계수

Units	a_0	a_1	a_2
16	195.00	0.880	0.00244
17	195.00	0.880	0.00244
18	119.26	1.346	0.00124
19	119.26	1.346	0.00124
20	72.52	1.754	0.00061
21	72.52	1.765	0.00061
22	72.52	1.765	0.00061
23	72.52	1.765	0.00061