

Lagrangian Relaxation 법을 이용한 복합 화력 발전기의 기동 정지 계획

남 영 우* 박 종 근* 김 성 수**
 * 서울대학교 전기공학부 ** 한국전력공사

Scheduling of Combined Cycle Gas Turbine Using Lagrangian Relaxation Method

Young-Woo Nam* Jong-keun Park* Sung_Soo Kim**
 *Seoul National University **KEPCO

Abstract - In Korea, the CCGTs have been installed to about 25% of the total generating capacity. Generally, CCGTs determine the System Marginal Prices(SMP) in Cost Based Generation Pool. So the scheduling of CCGTs is very important in daily generation scheduling.

This paper describes the scheduling of CCGTs which considers the operating characteristics of them. We use lagrangian relaxation method which decomposes the unit committment problem into the subproblems of the individual unit. In the CCGT subproblem, we define the cost function of CCGT in two way.

In Case study, the daily generation scheduling is performed using the data of Korean thermal system.

복합 화력 발전기는 가스터빈 발전기와 스팀터빈 발전기가 연결된 형태이기 때문에 일반 화력 발전기와는 다른 운전 특성을 가진다. 따라서 발전 계획에서 중요한 역할을 담당하는 복합 화력 발전기의 특성을 잘 반영하도록 기동 정지 계획을 수립하는 것이 중요하다.

복합 화력 발전기는 일반 화력 발전기와 달리 운전 모드에 따라 비용 함수가 다르다. 복합화력 발전기는 기본적으로 두 가지 모드로 운전된다. 가스 터빈 발전기만 운전하는 모드(본 논문에서는 모드 1이라 한다)와 가스 및 스팀 터빈 발전기가 동시에 운전하는 모드(본 논문에서는 모드 2라 한다)로 운전된다. 복합 화력 발전기의 초기 운전 시에는 충분한 열이 스팀 터빈에 전달될 때까지 모드 1로 운전을 하고, 스팀 터빈 발전기의 출력이 나오면 모드 2로 운전을 한다. 다시 말하면, 가스 터빈의 출력 후 스팀 터빈의 출력이 나오기까지는 시간 지연이 있다.

1. 서 론

전세계적으로 전력 산업은 독점적 산업 구조에서 경쟁적 구조로의 변화가 진행되어 왔다. 우리 나라에서도 1990년대 중반부터 이에 대한 논의가 이루어져 왔으며, 1998년 1월 21일 산업자원부는 전력 산업 구조 개편 계획을 발표하였다. 전력 산업의 구조 개편의 제 1단계인 발전부분의 경쟁을 도입하기 위하여 한전은 전력 거래소를 설치하였다. 발전 부분은 6개의 사업단으로 나누어졌으며, 전력 시장은 각 사업단이 비용에 근거한 발전 입찰을 하는 Cost-Based Generation Pool (CBGP)의 형태로 운영된다. [1] 전력 거래소는 각 사업단의 발전기 입찰에 근거하여 일일의 일간 발전 계획을 수립하여야 하며, 계통 한계 가격(SMP)을 거래일 전 18시까지 발표하여야 한다. 계통 한계 가격은 유효 발전 가격 중 가장 높은 가격으로 결정된다. [2]

우리 나라 전력 계통의 특성상 복합 화력 발전기가 대부분의 계통 한계 가격을 결정한다. 계통 한계 가격을 결정하는 복합 화력 발전기의 기동 정지 계획은 아주 중요한 관심사가 되고 있다. 그런데, 복합 화력 발전기는 일반 화력 발전기와는 다른 운전 특성을 가지기 때문에, 복합 화력 발전기의 특징을 잘 고려하여 기동 정지 계획을 수립하여야 한다.

복합 화력 발전기는 가스터빈 발전기의 발전 후 나오는 고온의 배기를 이용하여 HRSG(heat recovery steam generator)에서 스팀을 생성시켜 스팀터빈 발전기를 기동시키는 구조로 이루어졌다. 그림 1은 복합 화력 발전기의 일반적인 구성을 나타낸 것이다. 그림과 같이 복합 화력 발전기는 여러 대의 가스터빈 발전기에 1대의 스팀터빈 발전기가 연결된 형태로 구성되어 하나의 모듈을 이룬다. 복합 화력 발전기는 일반 화력 발전기에 비해 효율이 높은 장점이 있다. 그리고 복합 화력 발전기는 빠른 기동 시간, 짧은 공사 기간, 작은 입지 면적 등의 장점으로 인해 수도권에 많이 건설되어 왔으며, 전체 설비 용량의 약 25%를 차지한다.

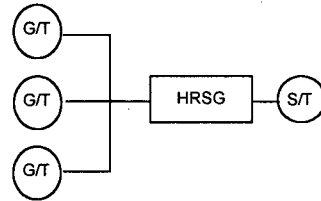


그림 1 복합화력 발전기 모듈

본 논문에서는 LR 방법의 개별 발전기의 최적화 문제에서 복합 화력 발전기의 제약 조건을 고려하여 동적 계획법을 풀었으며, 이때 복합화력 발전기의 비용함수를 두 가지 방식으로 정의하여 각각의 경우에 대해 우리나라 계통을 이용한 사례 연구를 하였다.

2장에서는 기동 정지 계획의 정식화를 설명하고, 3장에서는 LR 방법과 복합 화력 발전기의 기동 정지를 설명한다. 4장에서는 사례 연구를 하였으며, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 기동 정지 계획의 정식화

2.1 Notation

본 논문에서 사용되고 있는 notation은 다음과 같다.

- T : 기동 정지 대상 시간
- N : 화력 발전기 대수, M : 복합화력발전기 모듈 대수
- LD_t : 시간 t 의 부하, R_t : 시간 t 의 예비력
- C_i : 화력 발전기 i 의 발전 비용함수
- SC_i : 화력 발전기 i 의 기동비용
- P_{it} : 시간 t 에서 화력 발전기 i 의 발전량
- U_{it} : 화력 발전기의 기동정지상태 (1:기동, 0:정지)
- P_i^{max} : 화력 발전기 i 의 최대 출력
- P_i^{min} : 화력 발전기 i 의 최소 출력

- C_k : 복합화력 발전기 모듈 k 의 발전 비용함수
- SC_k : 복합화력 발전기 모듈 k 의 기동비용
- P_{kt} : 시간 t 에서 복합화력 발전기 모듈 k 의 발전량
- U_{kt} : 복합화력 발전기 모듈의 기동 정지 상태
- P_k^{max} : 복합화력 발전기 모듈 k 의 최대 출력
- P_k^{min} : 복합화력 발전기 모듈 k 의 최소 출력
- λ_t : 부하 제약조건에 대한 시간 t 에서의 라그랑지 승수
- μ_t : 용량 제약조건에 대한 시간 t 에서의 라그랑지 승수
- λ : 부하 제약 조건에 대한 라그랑지 승수의 벡터
- μ : 용량 제약 조건에 대한 라그랑지 승수의 벡터
- C_{jk} : 복합화력 발전기 모듈 k 의 가스터빈 j 의 모드 1 발전 비용함수
- C_{jk}^2 : 복합화력 발전기 모듈 k 의 가스터빈 j 의 모드 2 발전 비용함수
- P_{jk}^1 : t 시간에서 복합화력 발전기 모듈 k 의 가스터빈 j 의 모드 1 발전량
- P_{jk}^2 : t 시간에서 복합화력 발전기 모듈 k 의 가스터빈 j 의 모드 2 발전량
- P_{jk}^{max} : 복합화력 발전기 모듈 k 의 가스터빈 j 의 최대발전량
- P_{sk}^{max} : 복합화력 발전기 모듈 k 의 스톱터빈의 최대발전량
- G_k : 복합화력 발전기 모듈 k 의 가스터빈 대수

2.2 목적 함수

기동 정지 계획은 주어진 제약 조건하에서 총 비용을 최소화하는 최적화 문제로 정식화 될 수 있다. 목적 함수는 다음 식과 같이 발전비용과 기동비용으로 표현될 수 있다. 발전 비용 함수는 이차 비용 함수를 사용하였으며, 복합 화력 발전기의 발전 비용 함수는 모드에 따라 다른 비용 함수를 사용하였다.

$$\min \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^N (C_i(P_{it}) U_{it} + SC_i) + \sum_{k=1}^K (C_k(P_{kt}) U_{kt} + SC_k) \right\} \quad (1)$$

2.3 제약 조건

제약 조건은 시스템 제약 조건과 발전기 제약 조건으로 나누어 질 수 있다. 시스템 제약 조건은 발전기들 사이에 상호 작용이 있는 제약 조건이며, 발전기 제약 조건은 시스템 제약 조건과 달리 개별 발전기에 대한 제약 조건이다.

2.3.1 시스템 제약 조건

i) 부하 제약 조건

$$\sum_{i=1}^N P_{it} U_{it} + \sum_{k=1}^K P_{kt} U_{kt} = LD_t, \text{ for } t=1, \dots, T \quad (2)$$

ii) 용량 제약 조건

$$\sum_{i=1}^N P_{it}^{max} U_{it} + \sum_{k=1}^K P_{kt}^{max} U_{kt} \geq LD_t + R_t, \text{ for } t=1, \dots, T \quad (3)$$

2.3.2 발전기별 제약 조건

① 화력 발전기 제약 조건

- 화력 발전기는 최대 발전량과 최소 발전량 사이에서 발전하여야 한다.

- 최소 운전 및 최소 정지 시간을 만족해야 한다.

② 복합 화력 발전기 제약 조건

- 복합 화력 발전기는 최대 발전량과 최소 발전량 사이에서 발전한다.

- 스톱터빈 발전기는 최소 운전 및 최소 정지 시간을 만족해야 한다.

- 모드 1과 모드 2 운전 사이에는 시간 지연이 있다. (본 논문에서는 1시간으로 하였다.)

3. Lagrangian Relaxation

기동정지 문제는 라그랑지 승수에 의해 시스템 제약조건을 목적 함수에 결합한 라그랑지안 듀얼 문제를 구성하여 해를 구할 수 있다. 즉, 제약 조건이 이완된

(relaxed) 새로운 목적 함수인 듀얼 목적 함수를 구성하여 원래 문제의 최적해에 접근한다. 듀얼 목적 함수를 최대화함으로써 원래 목적 함수를 최소화 할 수 있다. 듀얼 문제는 개별 발전기의 최적화 문제로 분리될 수 있으며, 분리된 개별 발전기의 최적화 문제는 동적 계획법으로 푼다. 듀얼 함수의 최대값을 구하기 위해서 subgradient 알고리즘을 사용하여 라그랑지 승수를 조정하였다. [3,4,5,6]

본 논문에서는 개별 발전기의 최적화 문제에서 복합 화력 발전기의 제약 조건을 고려하여 동적 계획법을 풀었으며, 이때 복합화력 발전기의 비용함수를 두 가지 방식으로 정의하여 각각의 경우에 대해 사례 연구를 하였다.

3.1 라그랑지안 듀얼 문제 구성

라그랑지안 듀얼 함수는 라그랑지 승수 λ_t, μ_t 에 의해 시스템 제약 조건이 원래 문제의 목적함수에 결합되어 구해진다. 듀얼 문제는 듀얼 함수를 최대화하는 λ, μ 를 구하는 것이다.

$$\max_{\lambda, \mu} d(\lambda, \mu) \quad (4)$$

듀얼 문제의 제약조건은 용량 제약 조건에 대한 라그랑지 승수가 0 이상 ($\mu_t \geq 0$)이며, 발전기별 제약 조건이다.

$d(\lambda, \mu)$ 는 다음 식 (5)과 같이 각 발전기에 대한 최적화 문제와 상수항으로 분리할 수 있다.

$$d(\lambda, \mu) = \sum_{i=1}^N \left\{ \min_{P_{it} U_{it}} \sum_{k=1}^K (C_k(P_{it}) - \lambda_t P_{it} - \mu_t P_{it}^{max}) U_{it} \right\} + \sum_{k=1}^K \left\{ \min_{P_{kt} U_{kt}} \sum_{j=1}^G (C_{jk}(P_{kt}) - \lambda_t P_{kt} - \mu_t P_{kt}^{max}) U_{kt} \right\} + \sum_{t=1}^T (\lambda_t LD_t + \mu_t (R_t + LD_t)) \quad (5)$$

3.2 화력 발전기 부문제

$$\min_{P_{it} U_{it}} \left\{ \sum_{k=1}^K (C_k(P_{it}) - \lambda_t P_{it} - \mu_t P_{it}^{max}) U_{it} \right\} \quad (6)$$

화력 발전기 부문제는 식 (6)을 최적화하는 문제로서 동적 계획법으로 해를 구할 수 있다[3,4]. 상태의 수는 최소 운전 및 최소 정지 시간에 의해 결정되며, 그림 2의 상태도와 같은 탐색 경로를 통해 해를 구한다.

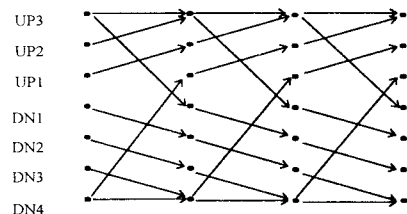


그림 2 화력 발전기 상태도

3.3 복합화력발전기 부문제

$$\min_{P_{kt} U_{kt}} \left\{ \sum_{k=1}^K (C_k(P_{kt}) - \lambda_t P_{kt} - \mu_t P_{kt}^{max}) U_{kt} \right\} \quad (7)$$

복합화력발전기 부문제는 식 (7)을 최적화하는 문제로서 화력발전기 부문제와 같이 동적 계획법에 의해 해를 구할 수 있다. 복합 발전기 그림 3는 복합 화력 발전기의 상태도를 나타낸 것이다.

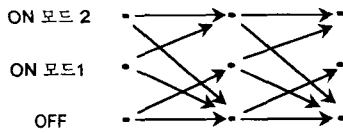


그림 3 복합화력 발전기 상태도

화력발전기 부문제와 달리 복합화력 발전기는 여러 대의 개별 발전기로 구성되어 있으므로 본 논문에서는 두 가지 방식으로 비용 함수를 모델링하였다. 첫 번째는 식 (8), (10)과 같이 개별 가스터빈 발전기의 비용함수의 합으로 복합화력 발전기의 비용함수를 정의하는 것이고, 두 번째는 그림 4와 같이 복합화력 발전기의 운전 특성을 2차 근사 비용 함수로 표현하는 것이다.

$$\text{모드 1 : } C_k(P_{kt}) = \sum_{j=1}^G C_{jk}(P_{jkt}) \quad (8)$$

$$P_{kt} = \sum_{j=1}^G P_{jkt}, \quad P_k^{\max} = \sum_{j=1}^G P_{jkt}^{\max} \quad (9)$$

$$\text{모드 2 : } C_k(P_{kt}) = \sum_{j=1}^G C_{jk}^*(P_{jkt}) \quad (10)$$

$$P_{kt} = \sum_{j=1}^G P_{jkt}, \quad P_k^{\max} = \sum_{j=1}^G P_{jkt}^{\max} + P_{ik}^{\max} \quad (11)$$

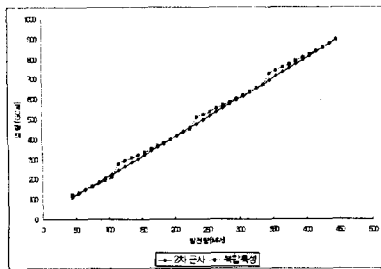


그림 4 비용 함수 근사화

4. 사례 검토

우리 나라 화력 발전기 계통의 자료를 이용하여 사례 검토를 하였다. 71기의 화력 발전기와 30기의 복합 화력 발전기 모듈에 대해 LR 법을 이용하여 일간 발전 계획을 수행하였다. 기동 정지 시간은 전날 19시부터 다음 날의 4시까지이며, 부하는 그림 5와 같다.

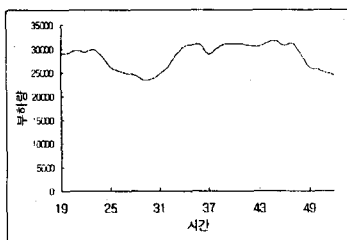


그림 5 부하 곡선

기동 정지를 수행한 결과, 첫 번째 방식의 발전 비용은 12342.8(백만원)이고, 두 번째 방식은 12517.3(백만원)이다. 그리고 두 경우의 계통 한계 가격은 그림 6과 같이 나타난다. 첫 번째 방식의 계통 한계 가격이 두 번째 방식보다 전체적으로 비싸게 나오는데, 그 이유는 다음과 같이 말할 수 있다. 계통 한계 가격을 구성하는 요소는 등증분 비용, 무부하 비용 그리고 기동 비용이다.

이들 중에서 무부하 비용은 2차 비용 함수가 y축과 만나는 점으로 표현되는데, 비용 함수를 2차 근사화하는 경우 무부하 비용이 많이 줄어들기 때문에 해석할 수 있다.

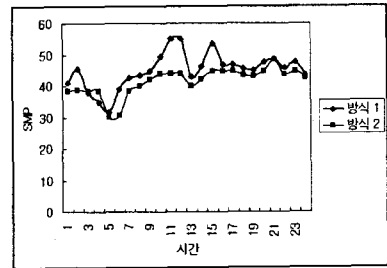


그림 6 계통 한계 가격

5. 결 론

본 논문에서는 LR 방법을 이용한 복합화력 발전기의 특성을 고려한 기동정지 계획에서 비용함수를 두 가지 방식으로 모델링하여 비교하여 보았다. 두 가지 방식 중에서 어느 것이 선호되는지는 전력 시장의 상황에 따라 달라지겠지만, 결론적으로 복합 화력 발전기의 비용 함수에 대한 모델링에 따라 전체 발전기의 기동 정지 계획과 계통 한계 가격이 상당히 바뀔 수 있다고 할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- (1) "Korean Electricity Industry Restructuring and Privatisation Program Information Release". 23. August. 1999
- (2) 산업자원부 전력산업구조개혁단. "전력 시장 운영 규칙". 2000.3.23
- (3) J.A.Muckstadt and S.A.Koenig. "An Application of Lagrangian Relaxation to Scheduling in Power Generation Systems", Operations Research, Vol.25, No.3, pp 387-403, May-June 1977.
- (4) A.Merlin and P.Sandrin. "A New Method for Unit Commitment at Electricite de France", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS_102, No. 5, pp 1218-1225, May 1983.
- (5) F.Zhuang and F.D.Galiana. "Toward a More Rigorous and Practical Unit Commitment by Lagrangian Relaxation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.3, No.2, pp 763-773, May 1988.
- (6) S.Virmani, E.Adrian, K.Imhof, S.Mukherjee. "Implementation of a Lagrangian Relaxation Based Unit Commitment Problem", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.4, No.4, pp 1373-1379, October 1989