

에너지제약을 갖는 발전기의 운전을 고려한 기동정지계획에 관한 연구

송길영* 이범[⊙] 김용하**

* : 고려대학교 전기공학과

** : 인천대학교 전기공학과

Unit Commitment Considering Operation of Energy Constrained Units

K.Y. SONG*

B. LEE*

Y.H. KIM**

* : Korea University

** : Incheon University

Abstract

This paper presents a new method for solving unit commitment problem including hydro and pumped storage hydro units in a large scale power system. The proposed method makes it possible to get variable power of hydro and pumped storage hydro units and results in the better unit commitment with good convergency. Moreover this paper proposes an unit commitment algorithm to consider variable power of these units effectively by Lagrangian Relaxation method. By applying the proposed method to the test system, it is verified the usefulness of this method.

1. 서론

기동정지계획은 수요, 운전예비력, 발전기 운전조건 등의 제약조건 하에서 화력발전기의 총 연료비를 최소화하는 최적화 문제로 구성되며, 이는 각각의 발전기에 대한 보수·유지 계획, 수요예측, 신뢰도해석등이 이루어진 후에 시행된다.

이러한 기동정지계획을 위하여 여러가지 방법이 개발되었으나, 대규모 계통에서도 상대적으로 소요시간이 작으며 최적에 가까운 결과를 얻을 수 있는 Lagrangian Relaxation법(이하 L.R.법)이 최근 널리 이용되고 있다.[1][2][4]

L.R.법은 John A. Muckstadt 등[6]에 의해 기동정지계획의 수립에 도입된 이래 다각적인 연구가 진행되고 있으며, 이중한 방안으로 수력 및 양수발전기등 실계통에 존재하는 다양한 종류의 발전기를 고려할 수 있는 알고리즘 개발[3][4][5]에 관한 연구가 진행되고 있다. 그러나 이제까지는 수력 및 양수발전기를 취급함에 있어서 이들 발전기의 운전으로 발생하는 화력발전기의 동종분 연료비의 변화가 운전계획에 반영되지 않아 수력 및 양수발전기를 최대출력 또는 정지의 두가지 상태로만 계획하였으며, 따라서 정확한 기동정지계획을 수립하지 못하였다. 또한 이와 같은 수력 및 양수발전기의 운전계획에 따라 화력발전기의 동종분 연료비의 과도한 변화가 발생하여 기동정지계획 계산과정에서 운전계획이 반복하여 변하는 진동현상이 나타나는 단점이 있었다.

그러므로 본연구에서는 수력 및 양수발전기의 출력을 조절할 수 있는 새로운 방법을 제안하여 수력 및 양수발전기의 운전계획을 가변출력으로 수립할 수 있게 하였으며, 이와 같은 특성을 효율적으로 고려할 수 있는 L.R.법에 의한 기동정지계획 알고리즘을 개발하였다. 이 결과 보다 정확한 기동정지계획을 가능하게 하였으며, 동시에 해를 구하는 과정에서 수력 및 양수발전기가 최대출력 또는 정지의 두가지 상태로만 운전함에 따라 발생하는 진동현상문제도 해결하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 본 방법의 유용성을 검증하였다.

2. 기동정지계획문제의 구성

기동정지계획문제는 주어진 제약조건을 만족시키면서 화력발전기의 총연료비를 최소화 하는 최적화문제로 구성된다.

2.1 목적함수

목적함수는 고려대상기간동안 전체 기동정지대상 발전기의 연료비와 기동 및 정지비용을 더한 총연료비 F로 구성된다.

$$\text{Minimize } F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_i} (C_i^t U_i^t + SCOST_i^t) \quad (2.1)$$

단, $C_i^t = a_i(P_i^t)^2 + \beta_i P_i^t + \gamma_i$ [원]

P_i^t : t시간대에서의 발전기 i의 출력 [Mw]

U_i^t : t시간대에서의 발전기 i의 상태

($U_i^t = 1$: 운전, 0 : 정지)

$SCOST_i^t$: 발전기 i의 기동 및 정지 비용 [원]

T : 기동정지대상 기간 ($t=1 \dots T$)

N_i : 기동정지대상 발전기 수 ($i=1 \dots N_i$)

(* = i: 화력, h: 수력, p: 양수)

2.2 제약조건

제약조건은 계통의 특성에 따라 계통전체에 관계하는 결합 제약조건(Coupling Constraints)과 개별발전기의 운전특성인 국지제약조건(Local Constraints)으로 구분된다.

2.2.1 결합제약조건

(1) 수급 제약조건

$$\sum_{i=1}^{N_i} U_i^t P_i^t + \sum_{h=1}^{N_h} P_h^t + \sum_{p=1}^{N_p} P_p^t = D^t \quad (2.2)$$

(2) 운전예비력 제약조건

$$\sum_{i=1}^{N_i} U_i^t P_i^R + \sum_{h=1}^{N_h} P_h^{\max} + \sum_{p=1}^{N_p} P_p^{\max} \geq D^t + R^t \quad (2.3)$$

단, D^t : t시간대에서의 부하 [Mw]

$P_i^R = \text{Min}(P_i^t + \Delta P_i^{\max}, P_i^{\max})$ [Mw]

R^t : t시간대에서의 운전예비력 [Mw]

ΔP_i^{\max} : t시간대에서 발전출력증감발출 [Mw/h]

P_i^{\max} : i 발전기의 최대출력 [Mw]

2.2.2 국지제약조건

(1) 화력발전기의 제약조건

- ① 출력 상하한치
- ② 최소 운전 및 정지시간
- ③ 단위시간당 출력 증감발출

(2) 수력발전기의 제약조건

- ① 출력 상하한치
- ② 사용가능한 수력에너지량

(3) 양수발전기의 제약조건

- ① 양수, 양발출력 상하한치
- ② 저장에너지의 상하한치

3. 에너지제약 발전기의 운전을 고려한 L.R.법에 의한 기동정지계획

본 연구에서는 기동정지계획중에서 수력 및 양수발전기를 취급함에 있어 이들 발전기를 가변출력으로 운전할 수 있도록 개선하고, 이와 같은 특성을 효율적으로 반영할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이 결과 보다 효율적인 기동정지계획 수립이 가능하도록 하였으며, 아울러 해로의 수력과정에서 발생하는 진동문제를 해결하였다.

3.1 확대목적함수의 구성

확대목적함수는 목적함수에 결합제약조건인 수급제약조건과 운전예비력제약조건을 더하여 식(3.1)로 구성한다.

$$L(P, U, \lambda, \mu) = F + \sum_{t=1}^T [\lambda^t (D^t - \sum_{i=1}^{N_i} U_i^t P_i^t - \sum_{h=1}^{N_h} P_h^t - \sum_{p=1}^{N_p} P_p^t) + \mu^t (D^t + R^t - \sum_{i=1}^{N_i} U_i^t P_i^t R - \sum_{h=1}^{N_h} P_h^{max} - \sum_{p=1}^{N_p} P_p^{max})] \quad (3.1)$$

본 연구에서는 수력 및 양수기를 가변출력으로 취급하기 위하여 이들발전기의 운전계획에 λ^t 의 변화를 고려한 새로운 확대목적함수를 구성하였다. 우선 수력 및 양수발전기의 운전에 따른 λ^t 의 변화특성을 고려하기 위하여 다음과 같이 수화력의 문제로 부터 정식화 한다.

$$\text{Min } F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_i} [\alpha_i (P_i^t - \Delta P_i^t)^2 + \beta_i (P_i^t - \Delta P_i^t) + \gamma_i] U_i^t + \text{SCOST}_i^t \quad (3.2)$$

또한 제약조건인 수급조건은 다음과 같이 만족되어야 한다.

$$\sum_{i=1}^{N_i} \Delta P_i^t U_i^t = \sum_{h=1}^{N_h} \Delta P_h^t + \sum_{p=1}^{N_p} \Delta P_p^t = \sum_{h=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_i} \Delta P_h^t U_i^t + \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_i} \Delta P_p^t U_i^t \quad (3.3)$$

단, ΔP_i^t : * 발전기의 운전에 의한 i 화력발전기의 출력변화 (*h: 수력, p: 양수)

식(3.2)를 수력 및 양수기의 운전에 따른 화력기의 출력변화분 ΔP_i^t 와 관계하는 부분만을 분리하고, 다시 수력 및 양수기 개개의 출력변화분으로 분리하면 식(3.4)처럼 된다.

$$\text{Min } F = \sum_{t=1}^T [\sum_{h=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_i} \{ -(2\alpha_i P_i^t + \beta_i - \alpha_i \Delta P_i^t) \Delta P_h^t U_i^t \} + \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_i} \{ -(2\alpha_i P_i^t + \beta_i - \alpha_i \Delta P_i^t) \Delta P_p^t U_i^t \}] \quad (3.4)$$

한편 L.R.법에서 소문제는 Lagrange 승수 λ^t 를 이용하여 기동정지계획, 출력등을 결정하기 때문에, 수력 및 양수기의 소문제는 λ^t 및 λ^t 의 변화량을 사용하여 이들 발전기의 출력변화 ΔP_h^t , ΔP_p^t 를 결정할 수 있도록 구성되어야 한다. 그러나 ΔP_h^t , ΔP_p^t 에 의해 변화하는 화력기의 출력에는 상하한치 제약이 있기 때문에 각각의 화력기가 수용가능한 λ_i^t 로서 처리되어야 한다. 수력 및 양수기의 출력변화에 따른 λ^t 의 변화량 $\Delta \lambda^t$ 는 다음과 같다.

$$\Delta \lambda_i^t = \lambda_i^t - \lambda_i^{t_{new}} = 2\alpha_i \Delta P_i^t \quad (3.5)$$

$$\Delta P_i^t = \Delta \lambda_i^t / 2\alpha_i \quad (3.6)$$

식(3.6)을 식(3.4)에 대입하여 수력 및 양수기의 문제를 정식화하면 다음과 같으며, 식(3.7)를 최소화 하는 $\Delta P_h^t, \Delta P_p^t$ 를 구하므로써 기동정지계획을 얻는다.

$$\text{Min } F = \sum_{t=1}^T [\sum_{h=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_i} \{ -(\lambda_i^t - \Delta \lambda_i^t / 2) \Delta P_h^t U_i^t \} + \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_i} \{ -(\lambda_i^t - \Delta \lambda_i^t / 2) \Delta P_p^t U_i^t \}] \quad (3.7)$$

이 결과 식(3.7)의 목적함수 F를 식(3.1)에 대입하여 새로운 확대목적함수를 구성하면 다음과 같다.

$$L(P, U, \lambda, \mu) = \sum_{t=1}^T [\sum_{i=1}^{N_i} (C_i^t U_i^t + \text{SCOST}_i^t - \lambda^t U_i^t P_i^t - \mu^t U_i^t P_i^t R) + \sum_{h=1}^{N_h} \{ -\lambda^t (P_h^t - \Delta P_h^t) \} + \sum_{p=1}^{N_p} \{ -\lambda^t (P_p^t - \Delta P_p^t) \} + \sum_{h=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_i} \{ -(\lambda_i^t - \Delta \lambda_i^t / 2) \Delta P_h^t U_i^t \} - \mu^t P_h^{max} \} + \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_i} \{ -(\lambda_i^t - \Delta \lambda_i^t / 2) \Delta P_p^t U_i^t \} - \mu^t P_p^{max} \} + (\lambda^t D^t + \mu^t (D^t + R^t))] \quad (3.8)$$

식(3.8)은 식(3.1)의 확대목적함수로 부터 수력 및 양수기의 운전에 따른 화력발전기의 동중분연료비의 변화를 반영할 수 있도록 새로이 확대목적함수를 정식화 한 것이다. 이로써 수력 및 양수발전기의 가변출력운전이 가능해지며, 따라서 보다 정확한 기동정지계획을 수립할 수 있다.

3.2 원문제-쌍대문제에 의한 확대목적함수의 해

기동정지계획의 수립시 식(3.8)로 부터 해를 직접적으로 구하는 것은 매우 어렵다. 따라서 Lagrange 승수 λ^t, μ^t 를 일단 고정시키고 이들로 부터 $P_i^t, U_i^t, \Delta P_h^t, \Delta P_p^t$ 를 구한 다음 다시 λ^t, μ^t 의 수정을 반복하는 원문제-쌍대문제로 처리하면 용이하게 확대목적함수의 해를 구할 수 있다.

3.2.1 원 문제

원 문제란 쌍대문제에서 결정된 λ^t, μ^t 를 사용하여 기동정지계획을 결정하는 것으로서, 국지제약조건을 만족시키면서 식(3.8)를 최소화 하는 $P_i^t, U_i^t, \Delta P_h^t, \Delta P_p^t$ 를 구하는 것이다.

$$\text{Min}_{P, U} L(P, U, \lambda, \mu) = \sum_{i=1}^{N_i} q_i + \sum_{h=1}^{N_h} q_h + \sum_{p=1}^{N_p} q_p + \text{상수항} \quad (3.9)$$

단, q_i, q_h, q_p : 화력, 수력, 양수기의 소문제

3.2.2 쌍대 문제

쌍대 문제란 다음과 같이 λ^t, μ^t 를 조절하여 확대목적함수를 최대화 시키는 문제로 정식화되며, 이는 λ^t, μ^t 를 어떤 값으로 하여야 결합제약조건을 만족하면서 목적함수가 최소가 되는가 하는 문제이다.

$$\text{Max}_{\lambda, \mu} [\text{Min}_{P, U} L(P, U, \lambda, \mu)] \quad (3.10)$$

수력 및 양수기를 포함하는 기동정지계획문제에서 이들 발전기가 최대출력 또는 정지의 두가지상태로만 운전하게 되면 화력기의 기동정지계획에 심한 진동을 유발하게 되고 따라서 해의 수립이 어렵게 된다.

본 연구에서는 앞서 식(3.8)에서 정식화한 방법으로 수력 및 양수기를 가변출력으로 운전할 수 있게 하여 이러한 문제를 해결하였다. 즉, 수력 및 양수기를 가변출력으로 운전할 수 있도록 하면 이들발전기의 운전에 따른 λ^t 의 변화가 충분히 반영되어, 반복계산시에도 수력 및 양수기의 운전에 의해 화력기의 기동 또는 정지가 반복되지 않는 안정적인 기동정지계획이 이루어진다.

4. 사례연구

4.1 시험계통의 특성 자료

본 시험계통은 원자력, 석탄 및 석유화력, 수력, 양수등의 다양한 발전기로 구성되어있으며, 이의 특성은 표.1과 같다. 대상부하는 그림.1과 같으며, 순동예비력은 200MW로 하였다.

표. 1 발전기의 특성

Unit	종별	α_i	β_i	γ_i	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	SCOST 천원	중감율 (MW)	최소가동시간	최소정지시간
1	N	0.0009	4.52	1042	600	1200	21072	1	100	100
2	C	0.0014	8.38	305	100	500	3512	8	10	8
3	C	0.0014	8.38	305	100	500	3512	8	10	8
4	C	0.0024	8.86	178	50	200	1756	5	7	5
5	C	0.0024	8.86	178	50	200	1756	5	7	5
6	C	0.0024	8.86	178	50	200	1756	5	7	5
7	O	0.0044	26.00	248	100	400	3512	8	5	3
8	O	0.0350	31.81	160	50	200	1756	5	2	2
9	O	0.0350	31.81	160	50	200	1756	5	2	2

수력 발전기		양수 발전기	
사용가능에너지 [Mwh]	800	저장가능 에너지 [Mwh]	1000
발전출력 하한치 [Mw]	0	양수, 양발 하한치 [Mw]	0
발전출력 상한치 [Mw]	200	양수, 양발 상한치 [Mw]	100
		양수발전기의 효율	0.667
		초기, 최종에너지 [Mw]	0

4.2 적용 결과

시험계통에 대하여 기존의 방법 과 본 연구에서 제안한 방법으로 기동정지계획을 수립하고, 이의 결과를 비교 검토하였다. 우선 두가지 방법에 의한 결과가 상이한 시간대 11~18에 대하여 살펴보았으며, 이 시간대의 수력 및 양수기의 운전계획과 이에 따른 λ^t 의 변화를 그림.2에 나타내었다.

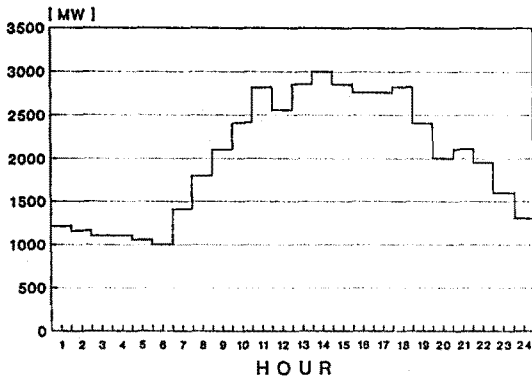


그림. 1 대상 부하

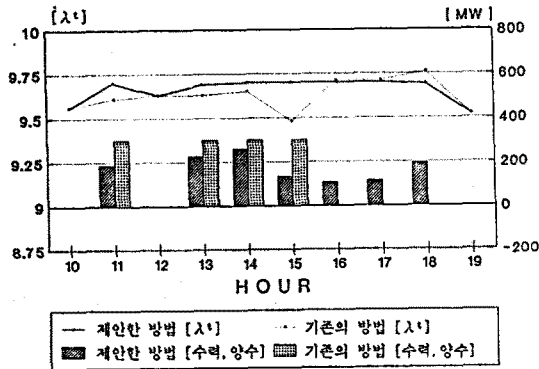


그림. 2 수력 및 양수발전기의 운전계획 과 λ

그림.2 에서 기존의 방법은 시간대 11,13,14,15에서 수력 및 양수발전이 최대출력으로 운전됨에 따라 이 시간대의 λ 는 이들이 운전되지 않는 시간대16,17,18의 λ 보다 낮아지고 있다. 반면 제안한 방법은 수력 및 양수발전의 가변출력운전이 이루어질에 따라, 발전중인 시간대 11,13,14,15,16,17,18의 λ 가 발전하지 않는 시간대12의 λ 보다 낮아지지 않는다. 즉, λ 의 최고치는 9.70으로 기존의방법의 9.76보다 낮게 유지되고 있으며, 이는 시간 t에서의 전력량에 대한 비용을 낮추는 것을 의미한다. 이때의 기동정지계획은 표.2와 같다.

표. 2 화력발전기의 기동정지계획

발전기	시간 별 기 동 및 정 지 상 태													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5														
6														
7														
8														
9														

화력기의 기동 (-:기존만, *:제안만, +:두방법 모두)

우선 시간대14를 살펴보면 이 시간대는 λ 가 높아서 수력 및 양수발전이 이루어진다. 그러나 수력 및 양수가 발전됨에 따라 #1~6 발전기의 운전만으로는 운전예비력이 모자라서, 기존 및 제안한 방법 모두 #7 또는 #8,9의 추가기동이 이루어져야 한다. 한편 시간대 18에서는 기존의 방법은 수력 및 양수가 발전되지 않기 때문에 #1~6 발전기의 운전만으로는 출력이 모자라서 추가기동이 필요하나, 제안한 방법은 수력 및 양수가 발전됨으로서 이 시간대의 추가기동은 필요하지 않는다. 따라서 기존의 방법에서는 시간대 14,18의 운전예비력 및 부하를 만족시키기 위하여 최소운전시간이 긴 #7이 기동되고 있는반면, 제안한 방법에서는 시간대 14의 운전예비력만을 만족시키기만 하면 되기 때문에 최소운전시간이 짧은 #8,9가 기동되고 있다. 이와같은 수력 및 양수기의 가변

출력에 의한 결과로 총연료비는 398,965천원에서 392,895천원으로 절감되어 보다 나은 기동정지계획이 이루어지고 있다.

다음에는 기동정지계획 계산시 해 수립과정에서의 진동현상에 대하여 살펴보고자 한다. 기존 및 제안한 방법으로 계산시 확대목적함수의 수렴상태는 그림.3과 같다.

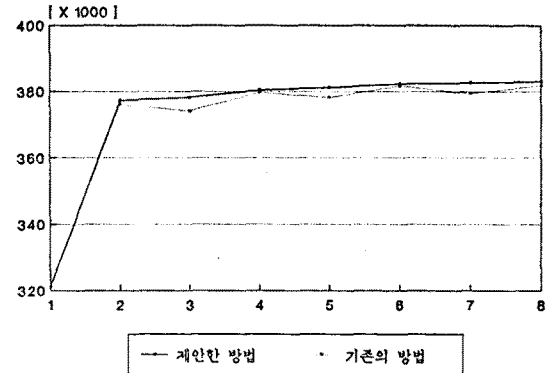


그림. 3 확대목적함수의 수렴 (단, $\epsilon = 0.3\%$)

그림.3으로 부터 기존의 방법에서는 계산상의 진동이 발생해서 해가 수립하지 못하고 있는데 반하여, 수력 및 양수기를 가변출력으로 운전하는 제안한 방법은 8회의 반복계산으로 해가 수립하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서 얻은 중요한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 수력 및 양수발전기의 운전계획을 최대 출력 또는 정지의 두가지 상태로 밖에 세울 수 없는 종래 방법의 단점을 개선하여 이들 발전기의 운전계획을 가변출력으로 세울 수 있도록 하였다. 이 결과 보다 정확한 기동정지계획을 수립할 수 있었으며, 기존의 방법에서 발생하는 해 수립과정에서의 진동현상을 해결 하였다.
- 2) 수력 및 양수발전기의 가변출력운전을 효율적으로 고려할 수 있도록 L.R.법에 의한 알고리즘을 구성하여, 대규모 계통의 기동정지계획도 용이하게 수립할 수 있게 하였다.
- 3) 또한 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 그 유용성을 검증하였다. 그 결과, 제안한 방법이 기존의 방법보다 최적의 결과를 얻을 수 있음을 확인 하였다.
- 4) 추후, 다양한 전선 및 송전선로의 제약등을 모두 고려할 수 있는 기동정지계획기법의 개발이 필요할 것으로 사료 된다.

참고문헌

- [1] A. Merlin, P. Sandrin, 'A New Method for Unit Commitment at Electricite de France', IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-102, No.5, pp.1218~1225, May 1983
- [2] S. Virmani, E. C. Adrian, K. Imhof, S. Mukherjee, 'Implementation of A Lagrangian Relaxation based Unit Commitment Problem', IEEE Trans. Power Systems, Vol.4, pp.1373~1380, October 1989
- [3] 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, Vol. pwr-2, No.4, November 1987
- [4] K. Aoki, M. Itoh, T. Satoh, K. Nara, M. Kanezashi, 'Optimal Long-Term Unit Commitment in Large Scale Systems Including Fuel Constrained Thermal and Pumped-Storage Hydro', IEEE Trans. Power Systems, Vol.4, No.3, pp.1065~1073, August 1989
- [5] S.K. Tong, S.M. Shahidepour, 'An Innovative Approach to Generation Scheduling in Large-Scale Hydro-Thermal Power Systems with Fuel Constrained Units', IEEE Trans. Power Systems, Vol.5, No.2, pp.665~673, May 1990
- [6] John A. Muckstadt, Sherri 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