

실계통에서 수화력 발전기의 기동정지 계획

박 원 심            울산 대학교  
 황 갑 주            울산 대학교

A Study on the Hydro-thermal Unit Commitment  
 for Practical Power Systems

Park, Won-Sim    University of Ulsan  
 Hwang, Kab-Ju    University of Ulsan

I. 서론

최근 전력계통은 원자력 및 신에너지 화력발전의 점유율이 높아감에 따라 발전기의 기동정지 계획(Unit Commitment)에 의한 비용 절감효과가 더욱 기대되고 있다. 발전기의 병렬대수 결정은 고찰기간중 주어진 계약을 만족시키면서 총 발전비용이 최소가 되도록 하는 발전기의 상태조합을 찾는 문제인데, 아직도 결정적인 방법은 알려져 있지 못하다. [1]

필자들은 이러한 형태의 문제해결에 널리 쓰이고 있는 동적 계획법(Dynamic Programming Method; DP)을 이용하여 대규모 계통의 적용산법을 제안한 바 있으며, [2] 신뢰도나 선로용량등을 고려한 논문도 발표된 바 있다. [3] 특히 우리나라와 같이 수력기가 많은 계통의 발전계획에는 수력기의 협조가 중요한 과제가 된다. 수력기(LNG기 포함)의 기동정지 계획은 고찰기간내의 사용수량 조건까지 만족시켜야 하므로 계산량이 많을 뿐만 아니라 종래의 반복법으로는 수렴이 되지 않는 경우도 많다. 본 연구는 해석적 기법에 의해 수력기의 제약조건을 만족시키는 산법 [4]을 동적 계획법에 적용하여 매우 효과적으로 수화력을 협조시키는 방안을 제안한다. 본 산법은 실계통 규모를 마이크로 컴퓨터 정도에서 신속하게 해를 구할 수 있을 뿐만 아니라 사례연구 결과 수렴성도 매우 좋음을 밝혔다.

II. 산법

가. 문제의 정식화

널리 알려진 수화력기의 협조산법은

$$\text{최소화: } J = \int_0^T (F_T + \sum_{j \in Rh} \nu_j Q_j) dt \quad (1)$$

$$F_T = \sum_{i \in Rs} F_i(P_i) \quad (2)$$

$$\text{계약: } P_D(t) + P_L(t) = \sum_{i \in Rs} P_i(t) + \sum_{j \in Rh} P_j(t) \quad (3)$$

$$W_j = \int_0^T Q_j(t) dt, \quad j \in Rh \quad (4)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}, \quad i \in Rs \quad (5)$$

$$Q_j^{\min} \leq Q_j \leq Q_j^{\max}, \quad j \in Rh \quad (6)$$

에서 등계약식 (3)을 만족시키는 목적함수

$$J = \int_0^T \{ F_i(t) + \sum_{j \in Rh} \nu_j Q_j(t) + \lambda(t) [P_D(t) + P_L(t) - \sum_{i \in Rs} P_i(t) - \sum_{j \in Rh} P_j(t)] \} dt \quad (7)$$

의 최적화 조건은

$$(dF_i/dP_i) + \lambda [(\partial P_L/\partial P_i) - 1] = 0, \quad i \in Rs \quad (8)$$

$$\nu_j (dF_j/dP_j) + [(\partial P_L/\partial P_j) - 1] = 0, \quad j \in Rh \quad (9)$$

이다. 위 두식에서 협조식

$$\lambda = (dF_i/dP_i) + \lambda (\partial P_L/\partial P_i) = \nu_j (dQ_j/dP_j) + \lambda (\partial P_L/\partial P_j) \quad (10) \text{을 식}$$

(3)-(6)의 제약하에 풀어야 한다. 이때 화력기의 연료비 특성과 수력기의 사용수량 특성은 각각

$$P_i(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2, \quad i \in Rs \quad (11)$$

$$Q_j(P_j) = a_j + b_j P_j + c_j P_j^2, \quad i \in Rh \quad (12)$$

로 모형화하여 사용한다.

(\* 변수설명은 문헌 [5] 참조.)

발전기의 병렬대수 결정시는 기동정지에 따른 전이계약(Transition Constraints)을 고려해야 한다.  $F_t^*(k)$ 를 시각  $t$ , 상태  $J$ - $k$ 까지의 최소비용이라 하면 DP에 의한 범함수 식은

$$F_t^*(k) = \text{Min}(F_{t-1}^*(j) + C(J, k)), \quad t \in T \quad (13)$$

식 (13)에서 전이비용  $C$ 에는 시변(Time Varying) 기동비용, 정지비용, 신뢰도등의 계약비용이 포함된다. [2-3]

각 상태에서 해가능 조합을  $U$ 라 하면

$$\Phi_t^*(t^{-1}U^j, tU^k) = F_T + \text{전이비용} \quad (14)$$

을 동적계획법에 의해 구하게 된다.

나. 수력기의 협조

전술한 해과정에서 수력기는 화력기로 증가화 하여 식 (14)에 포함시킬 수도 있겠으나 식 (4)의 계약을 고려해야 하므로 번거로움이 따른다. 본 연구에서는 식 (9)의 중분수단가  $\nu$ 를 중분연료비  $\lambda$ 의 함수로 표현하여 해석적 기법에 의해 식 (4)를 만족시키는 수력기의 출력을 구하여 적용한다. 즉, 식 (12)로부터

$$Q_j(t) = \lambda^2(t) / (4c_j \nu^2 j) - b_j^2 / (4c_j) + a_j, \quad j \in Rh \quad (15)$$

로 되며, 수력기가 배분가능한 고찰기간의 집합을  $R_t$ 라 할때 이 기간동안의 총 사용수량은

$$W_j = \sum_{t \in R_t} Q_j(t) = \sum_{t \in R_t} \lambda^2(t) / (4c_j \nu^2 j) - \sum_{t \in R_t} \{b_j^2 / (4c_j) - a_j\} \quad (16)$$

와 같이 표현된다. 따라서 고찰기간 중의 평균 중분수단가  $\nu_j$ 는 식 (16)으로부터

$$\nu_j = \left[ \sum_{t \in R_t} \lambda^2(t) / (4c_j A_j) \right]^{0.5}, \quad j \in Rh \quad (17)$$

$$\text{단, } A_j = W_j + \sum_{t \in R_t} \{b_j^2 / (4c_j) - a_j\} \quad (18)$$

이 되고, 식 (17)을 식 (14)에 대입하면

$$Q_j(t) = A_j D(t) - B_j, \quad t \in R_t, \quad j \in Rh \quad (19)$$

$$\text{단, } D(t) = \lambda^2(t) / \sum_{t \in R_t} \lambda^2(t) \quad (20)$$

$$B_j = b_j^2 / (4c_j) - a_j, \quad j \in Rh \quad (21)$$

이제 수력기의 출력  $P_j(t)$ 는

$$P_j(t) = \left\{ (b_j - [4c_j (a_j - Q_j(t))])^{0.5} - b_j \right\} / (2c_j) \quad (22)$$

로 구해지게 된다.

수력 및 LNG 배분시의 계약식 (6)의 고려는 화력과 마찬가지로, 한계치를 벗어난 발전력은  $p_{\min}$  (정지) 또는  $p_{\max}$ 로 고정시킨 다음 이를 고정 발전력에 해당하는 수량  $q_{\min}$  또는  $q_{\max}$ 를 총 사용수량  $W$ 에서 뺀 다음 배분이 가능한 시간대에 재배분하게 된다. 식 (19)의  $Q_j(t)$ 는 고찰기간내에서 수급평형과 사용수량 제약조건을 고려하면서 중분 연료비  $\lambda(t)$ 의 상대적인 크기에 의하여 결정된다. 따라서 수급평형과 사용수량 제약조건을 비교하여 수정해 가는 종래의 방법과 달리 총 발전 연료비를 비교하여 수정시키므로서 수렴성과 계산속도가 개선된다. 그림 1은 개략적인 산법의 흐름도이다.

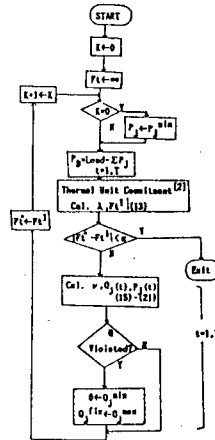


그림 1. 흐름도

III. 사례연구

이해를 쉽게하기 위해 논문[8]의 모형계통에 수력기 와 LNG기름 추가한 표 1~3 과 같은 입력자료를 적용해 본다.

제안한 방법은 표 4와 같은 수렴특성을 가지며, 표에서 조합수는 탐색과 선택기법(Search & Selection)[2]에 의한 해 가능 조합이다. 표에서 알 수 있듯이 3회 정도의 반복에서 가능해가 얻어지며 6회의 반복으로 최적해가 얻어진다. 이 경우 화력기름 기동정지 시키지 않았을 때 (954,479원)에 비하여 1.88(%)의 연료비 절감이 되었다. 여기서 흥미롭게 고찰해 볼 점은 그림 2에서,

- i) 수력이 부하곡선의 윗 부분 만을 점유하도록 하는 종례의 방안(A)
- ii) 수력출력의 하한제약( $Q_j^{min} \leq Q_j$ )을 만족시키며 상시운전하는 방안(B)
- iii) 본 연구에서 처럼 수력출력이 하한제약 이하일 경우 정지시키는 방안(C)의 비용이다. 그림 4는 제안한 산법에 의한 발전력 배분을 나타낸 것이다.

표 3. 부하 특성

Load Pattern											
2400.0	2300.0	2340.0	2300.0	2240.0	2270.0	2220.0	2100.0				
1910.0	1810.0	1720.0	1640.0	1553.0	1519.0	1463.0	1324.0				
1640.0	1700.0	1740.0	2100.0	2220.0	2300.0	2350.0	2390.0				

표 1. 연료비 특성

No	Id	Name	Fmin MW	Fmax MW	a P/Wh	b P/Wh	c	Cost Won	P, J	Usage Ton
1	T	TP01	15.0	60.0	.00510	2.20340	15.000	11.00	1.000	
2	T	TP03	20.0	80.0	.00394	1.91610	25.000	11.00	1.000	
3	T	TP05	25.0	110.0	.00382	1.67660	32.000	11.00	1.000	
4	T	TP06	75.0	200.0	.00261	1.53540	72.000	10.00	1.000	
5	T	TP02	30.0	100.0	.00393	1.50180	40.000	10.00	1.000	
6	T	TP04	50.0	140.0	.00212	1.60150	24.000	10.00	1.000	
7	T	TP07	120.0	320.0	.00208	1.26430	48.000	10.00	1.000	
8	T	TP08	125.0	443.0	.00148	1.21360	82.000	10.00	1.000	
9	T	TP09	250.0	520.0	.00127	1.19540	105.000	10.00	1.000	
10	T	TP10	350.0	550.0	.00135	1.12850	100.000	10.00	1.000	
11	H	HP11	15.0	60.0	.00510	2.20340	15.000	1.00	1.000	2000.
12	H	HP12	20.0	80.0	.00394	1.91610	25.000	1.00	1.000	2700.
13	L	LN13	25.0	110.0	.00382	1.67660	32.000	1.00	1.000	3500.

1020.0 2077.0

표 2. 기동정지 특성

No	Name	I TH	SA (TA)	SB (TB)	SC	SD TL	TH
1	TP01	0 - 5.0	4.1 2.01	11.1 4.01	3.50	1. -3.0	4.0
2	TP03	1 5.0	4.1 2.01	11.1 4.01	3.50	1. -3.0	4.0
3	TP05	1 5.0	3.1 2.01	13.1 3.01	2.67	1. -3.0	4.0
4	TP06	1 5.0	3.1 2.01	13.1 3.01	2.67	1. -3.0	4.0
5	TP02	1 5.0	3.1 2.01	12.1 3.01	2.53	1. -3.0	4.0
6	TP04	1 5.0	3.1 2.01	13.1 3.01	2.67	1. -4.0	5.0

Ng = 10 Na = 6

표 4. 수렴 특성

K	Cost x10 <sup>7</sup>	V11	Gamma V12	V13	U
1	984	9.763	10.929	11.586	305
2	933	9.569	10.775	11.277	345
3	938	9.599	10.759	11.309	337
4	937	9.591	10.751	11.299	338
5	936	9.591	10.752	11.299	338
6	936	9.591	10.752	11.299	338

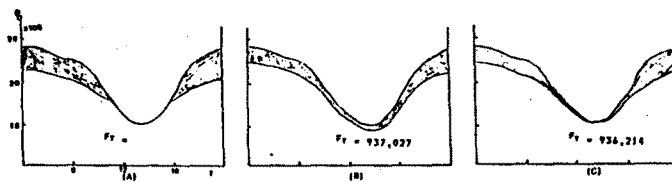


그림 2. 수력배분 방안

IV. 결론

요약하면, 본 연구에서는 수력, LNG기를 포함한 실계통 규모의 발전기 기동정지 문제를 효과적으로 해결할수 있는 방법을 제안하였는데,

- 1) 실계통 규모를 마이크로 컴퓨터정도로 신속하게 해를 구할 수 있으며,
- 2) 화력기의 배분은 등가화기법, 수력기는 해석적 기법에 의해 별도로 최적화한 후 협조시킴으로서 수렴성도 양호하다.
- 3) 제안한 산법은 현재 우리나라의 일간-주간 발전계획에 그대로 사용할 수 있다. 곧, 발전기의 연료비 특성모형이 같으며, 계산된 수력기의 증분 수단가름 자동급전 시스템의 입력자료로 활용할 수 있다.
- 4) 본 산법은 양수에도 쉽게 확장할 수 있으며, 현재 다양한 실계통에 대한 실증연구 중에 있다.

References

- 1) A.J.Wood, B.F.Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons, pp.111-51, 1984
- 2) J.H.Kim, K.J.Hwang, I.K.Yu, "A Unit Commitment Study in Electric Power Systems by Hybrid Dynamic Programming", Trans of KIEE, Vol.33, No.4, pp.22-30, Apr. 1984
- 3) J.H.Kim, I.K.Yu, "A Unit Commitment Study considering Generation System Reliability", Trans of KIEE, Vol.33, No.10, pp.7-15, Oct. 1984
- 4) J.H.Kim, K.J.Hwang, "Economic Dispatch Using Equivalent Representation Method", Trans of KIEE, Vol.30, No.12, pp.69-73, Dec. 1982
- 5) M.E.El-Hawary, G.S.Christensen, "Optimal Economic Operation of Electric Power Systems", Academic Press, New York, 1979
- 6) J.D.Guy, "Security Constrained Unit Commitment", IEEE Trans., Vol. PAS-90, No.3, pp.1385-90, 1971

> Optimal Scheduling ( IEEE-13 System )

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
TP01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
TP03	46.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
TP05	76.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
TP06	186.	203.	196.	189.	183.	186.	180.	168.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	168.	180.	189.	198.	205.
TP02	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	97.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.	100.	100.	100.	100.	100.
TP04	148.	148.	148.	148.	148.	148.	144.	141.	129.	130.	122.	111.	106.	101.	107.	122.	137.	148.	144.	148.	148.	148.	148.	148.	148.
TP07	215.	231.	224.	218.	212.	215.	210.	199.	197.	187.	188.	183.	174.	171.	167.	171.	183.	194.	201.	199.	210.	218.	226.	232.	232.
TP08	439.	443.	443.	442.	431.	436.	427.	405.	401.	383.	385.	374.	357.	350.	343.	351.	374.	396.	410.	405.	427.	442.	443.	443.	443.
TP09	517.	520.	520.	520.	509.	515.	505.	479.	475.	454.	455.	443.	423.	415.	407.	417.	443.	468.	485.	479.	505.	520.	520.	520.	520.
TP10	511.	544.	530.	516.	504.	510.	499.	476.	471.	452.	453.	441.	423.	416.	408.	417.	441.	465.	481.	476.	499.	516.	534.	547.	547.
HP11	40.	49.	46.	42.	38.	40.	37.	31.	29.	24.	24.	21.	-	-	-	-	21.	28.	32.	31.	37.	42.	47.	50.	
HP12	53.	63.	59.	54.	50.	52.	49.	41.	40.	34.	34.	30.	25.	22.	-	23.	30.	38.	43.	41.	49.	54.	60.	64.	
LN13	69.	79.	74.	70.	66.	68.	65.	57.	56.	50.	50.	47.	41.	39.	36.	39.	47.	54.	59.	57.	65.	70.	75.	80.	80.

2400.2380.2340.2300.2240.2270.2220.2100.1910.1810.1720.1660.1553.1519.1463.1524.1660.1780.1960.2100.2220.2300.2350.2390  
Total = 48,169 Mw

> Energy Usage of Each Times (T-Won or Cube M)

48093.	46589.	45884.	45178.	43968.	44577.	43564.	41160.
36490.	34737.	32565.	31418.	29718.	29046.	28338.	29137.
31418.	33728.	37678.	41160.	43564.	45178.	46660.	46767.

> Energy Usage of Each Units (T-Won or Cube M)

0.	1338.	2025.	58633.	37937.	75437.	100902.	196991.
233426.	229444.	2000.	2700.	3500.			

> Total Cost of IEEE-13 System is 936213.6 T-Won Equ.

그림 3. 기동정지 계획 결과