

기동정지계획의 새로운 해법

이 상 도 · 백 영 식
 경북대학교 공과대학 전기공학과

A New Algorithm for Unit Commitment

Sang-Do Lee · Young-Sik Baek
 Dept. of Electrical Eng. Kyung Pook Univ.

Abstract - This paper presents a new algorithm of unit commitment for optimal operation in power system. The proposed method developed algorithm that determined generators considering load variations at each stages. It has established forecast unit commitment over time horizon at first and next calculated quality cost of generators and then committed generator that has minimum quality cost at unit commitment schedule over time horizon. It is used that Objet-Oriented Programming for effective realization and simple handling of complex program. The proposed method has applied at example system and the results has shown superior economics and computational requirement than the conventional method.

1. 서 론

기동정지계획은 전력계통운용의 계획에 있어서 매우 중요한 문제로서, 계통의 신뢰도를 유지하면서 전체시간동안의 최소의 발전기 운전비용을 목표로 하는 발전기의 기동 및 정지 상태를 알아내는데 목적이 있다.

발전기의 최적 기동 및 정지 상태는 결과적으로 발전기의 운전 비용을 최소화되게 하므로, 계통의 신뢰도 유지 및 발전기의 특성에 기인하는 여러 가지 제약조건을 만족하면서 전체 발전기의 운전비용의 최소화문제를 목적으로 설정할 수 있다.

이러한 기동정지계획 최적화 문제는 C.J.Baldwin[1] 등에 의해 최초로 시작된 이래 지금까지 여러 가지 방법의 해법들이 개발되고 있다.

우선순위법[2], 동적계획법[3-4], 혼합동적계획법[5], 라그랑지 미정계수법[6-8]과 최근에는 신경회로망의 원리를 이용한 신경회로망법[9] 등이 연구되고 있으며, 이들을 두 가지 목적으로 분류한다면 가장 근본적인 목적인 최적 해를 구하기 위한 방법과 준최적해를 구하지만 최적해 계산방법에서의 단점인 계산시간의 증가를 감소시키기 위한 방법으로 분류할 수 있다.

본 연구에서는 우선 단계별 전 시간대를 고찰기간으로 하여 예상 기동정지계획을 수립하고, 예상기동정지계획에 따른 발전기의 특성비용을 계산한다. 다음으로 계산된 특성비용중 최소 특성비용을 찾고, 최소 특성비용을 가지는 발전기를 그 단계의 발전기로 선택하여 선택된 발전기의 예상 기동정지계획을 단계별 기간 기동정지계획에 투입한다. 각 단계는 부하량과 전체 발전예비력의 합인 충분부하량이 남아있을때까지 계속 설정된다. 충분 부하량이 0 이 되었을 때 전체 시간의 발전기들의 발전량을 전체단계 기동정지계획에 따라 경제배분하여 전체 운전비용을 계산한다는 알고리즘을 설정하였고, 복잡한 프로그램의 효율적 구현과 조작용이성을 위해 최근 활발하게 연구되고 있는 프로그램 기법[10]인 재제지향 프로그래밍 기법을 도입하였다.

제한한 방법을 예제시스템에 적용하였고, 그 결과로 기존의 다른 방법보다 우수한 경제성과 계산시간을 얻을 수 있었다.

II. 기동정지계획의 정식화

2.1 목적함수

$$\text{MIN} [\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C(P_i^t)] \quad (1)$$

$$C(P_i^t) = SC(P_i^t) + GC(P_i^t) + DC(P_i^t) \quad [\$] \quad (2)$$

$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C(P_i^t)$: 전체 발전기의 전시간에서의 운전비용
 ($i=1,2, \dots, N$; $t=1,2, \dots, T$)

$SC(P_i^t)$: t 시간에서의 발전기 i 의 시동비용

$GC(P_i^t)$: t 시간에서의 발전기 i 의 운전비용

$DC(P_i^t)$: t 시간에서의 발전기 i 의 정지비용

2.1.1 시동비용

$$SC(P_i^t) = C_f + C_c * (1 - e^{(-\frac{dt}{\sigma})}) * F \quad [\$] \quad (3)$$

C_f : 고정비용(운전원 비용, 유지비용포함)

C_c : 냉각기동 운전비 F : 연료비계수

a : 발전기의 온도계수 dt : 발전기가 냉각된 시간

2.1.2 운전비용

$$GC(P_i^t) = a * (P_i^t)^2 + b * (P_i^t) + c \quad [\$] \quad (4)$$

a, b, c : 발전기 특성 상수

2.1.3 정지비용

$$DC(P_i^t) = \delta \quad [\$] \quad (5)$$

2.2 제약 조건

2.2.1 전력 수급 균형

$$\sum_{i=1}^N P_i^t = P_D^t \quad [\text{MW}] \quad (6)$$

$\sum_{i=1}^N P_i^t$: t 시간에서의 전체발전기의 발전량의 합

P_D^t : t 시간에서의 전체수요량

2.2.2 발전용량 제약

$$P_i^{\text{min}} \leq P_i \leq P_i^{\text{max}} \quad [\text{MW}] \quad (7)$$

2.2.3 시간 제약

$$\text{MINUp} \leq \text{Uptime} [\ell, \ell] \quad [\text{Hour}] \quad (8)$$

$$\text{MINdn} \leq \text{Dntime} [\ell, \ell] \quad [\text{Hour}] \quad (9)$$

$\text{Uptime} [\ell, \ell]$: 발전기의 가동시간(t_1 에서 t_2 까지의 시간)

$\text{Dntime} [\ell, \ell]$: 발전기의 정지시간(t_1 에서 t_2 까지의 시간)

MINUp

: 발전기의 최소가동시간

MINdn

: 발전기의 최소정지시간

2.2.4 발전 예비력제약

$$\sum_{i=1}^N [(P_i^t)^{\text{max}} - P_i^t] \geq R_N \quad [\text{MW}] \quad (10)$$

R_N : 전체 예비력 [MW]

III. 기동정지계획의 새로운 방법의 객체 지향적 모델링

객체지향 프로그래밍(Object Oriented Programming)이란 프로그램을 데이터타입과 그들의 상호작용을 중심으로 하는 객체를 구성하여 모듈화 함으로써 실제계에 가까운 프로그램을 설계하는 것으로서 프로그램의 가시성과 효율의 향상 및 유지, 보수,의 편리를 추구함에 목적이 있다. 본 논문에서는 제안한 알고리즘을 객체지향 프로그램으로 구성하였다.

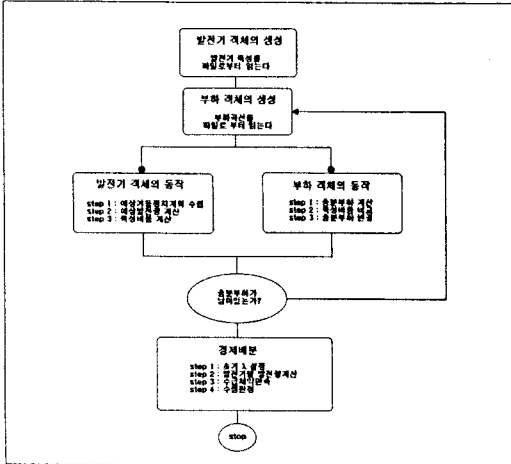


그림 1. 전체알고리즘의 구성

Fig. 1 Construction of Total Algorithm

3.1 객체의 구성 및 메시지전달

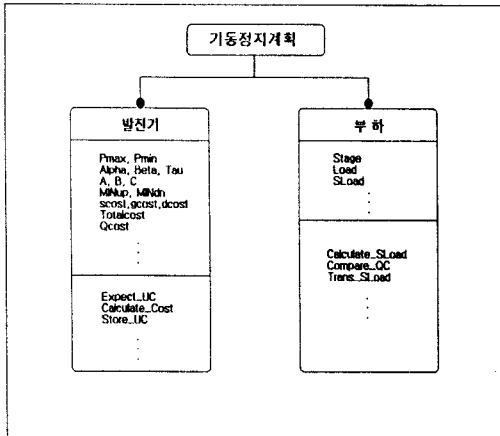


그림 2. 객체의 구성

Fig. 2 Construction of Objects

3.2 전체객체의 연결

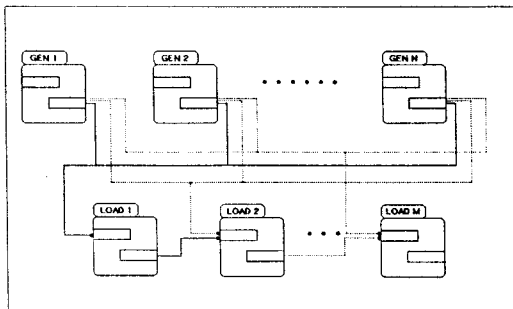


그림 3. 전체객체의 메시지 전달

Fig. 3 Message passing of All Objects

3.3 발전기객체의 동작

3.3.1 예상기동정지계획 수립

1) 발전기의 기동정지를 각 시간에서의 충분부하의 유무에 따라 예상한다.

$$load(t) > 0 ; U_i^t = 1 \quad (11)$$

$$load(t) \leq 0 ; U_i^t = 0 \quad (12)$$

U_i^t : i 번째 발전기의 t 시간에서의 기동정지 상태 (1 or 0)

2) 발전기의 최소운전 및 정지시간 제약조건을고려한다.

• CASE 1 :

$$Uptime[\Delta, \Delta] \geq MINup ; U_i^t = 1 \quad (13)$$

• CASE 2 :

$$Uptime[\Delta, \Delta] < MINup ; U_i^t = 0 \quad (14)$$

• CASE 3 :

$$Downtime[\Delta, \Delta] \geq MINdn \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^D C_i(P_{min}) < SC(P_{min}) ; U_i^t = 1 \quad (16)$$

• CASE 4 :

$$Dntime[\Delta, \Delta] \geq MINdn \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^D C_i(P_{min}) > SC(P_{min}) ; U_i^t = 0 \quad (17)$$

• CASE 5 :

$$Dntime[\Delta, \Delta] < MINdn ; U_i^t = 1 \quad (18)$$

3.3.2 예상발전량 계산

• CASE 1 :

$$P_i^{max} \leq load(t) ; P_i^t = P_{max} \quad (19)$$

• CASE 2 :

$$P_{min} \leq load(t) \leq P_i^{max} ; P_i^t = load(t) \quad (20)$$

• CASE 3 :

$$load(t) < P_{min} \text{ and } MINdn > Dntime ; P_i^t = P_{min} \quad (21)$$

• CASE 4 :

$$load(t) < P_{min} \text{ and } MINdn < Dntime \text{ and } ON ; P_i^t = P_{min} \quad (22)$$

• CASE 5 :

$$load(t) < P_{min} \text{ and } MINdn < Dntime \text{ and } OFF ; P_i^t = 0 \quad (23)$$

3.3.3 특성비용계산

1) 시동비용계산

$$SC_i^t = C_f + C_c * (1 - e^{-\frac{dt}{a}}) * F \quad [\$] \quad (24)$$

2) 운전비용계산

$$GC(P_i^t) = a * (P_i^t)^2 + b * (P_i^t) + c \quad [\$] \quad (25)$$

3) 정지비용계산

$$DC_i^t = \delta \quad [\$] \quad (26)$$

4) 전 비용계산

$$\sum_{i=1}^N \alpha(P_i^t) = \sum_{i=1}^N [GC(P_i^t) * U_i^t] + \sum_{i=1}^N [SC_i^t * K_i^t] + \sum_{i=1}^N [DC_i^t * L_i^t] \quad (27)$$

K_i^t : i 번째 발전기의 t 시간에서의 시동상태 (1 or 0)

L_i^t : i 번째 발전기의 t 시간에서의 정지상태 (1 or 0)

5) 특성비용계산

$$QC_i = \frac{\sum_{t=1}^T C(P_i(t))}{UPTIME} \quad [\$/MWH] \quad (28)$$

$UPTIME$: 전 시간대에서 발전기가 가동하는 시간

QC_i : i 발전기의 예상된 발전시간동안의 단위 비용의 값을 i 발전기의 특성비용이라 하고, QC_i 로 나타낸다.

3.4 부하객체의 동작

3.4.1 충분부하 계산

계통의 신뢰도를 위하여 부하량과 함께 발전예비력을 고려해야 하므로 각시간 대별로 발전기가 담당해야할 발전량은 부하량과 발전예비력량의 합으로 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 부하소비량과 발전예비력의 합을 충분부하량으로 명시하였다.

$$SLoad_k(t) = load_k(t) + R_N \quad [MW] \quad (29)$$

3.4.2 발전기별 특성비용비교

계산된 각 발전기들의 특성비용중 최소의 특성비용이 드는 발전기를 구한다.

$$MIN [QC_1, QC_2, QC_3, \dots, QC_N] \quad (30)$$

3.4.3 충분부하의 변경

부하객체의 생성을 위하여 충분부하의 값을 변경하여야 한다.

$$SLoad_k(t) = SLoad_k(t) - P'_i \quad [MW] \quad (31)$$

1) 전체 예비력 고려

$$R'_i = P_i^{max} - P'_i \quad (32)$$

$$R_N \leq \sum_{i=1}^N R'_i \quad (33)$$

R'_i : i 발전기의 t 시간에서의 예비력 [MW]

2) 발전기별 예비력고려

부하가 발전기 배정에서 Pmax 값보다 작은 값으로 배정될 경우

$$SLoad_k(t) = SLoad_k(t) - R'_i \quad [MW] \quad (34)$$

충분부하에서 발전기의 예비력만큼을 감소시킨다.

3.5 경제 배분

단계별 기동정지계획에서 설정된 발전기들로 전 시간대에 걸쳐 경제배분(Economic Load Dispatch)을 한다. 경제배분후 각 발전기의 운전비용 및 총비용을 계산한다.

STEP 1 : 임의의 초기 λ를 설정한다.

STEP 2 : 계획된 발전기별 발전량을 계산한다.

STEP 3 : 수급계약조건으로서 소비부하량과 발전량의 합이 일치하는지 확인한다.

STEP 4 : 오차가 허용오차로 수렴할 때까지 위의 세 가지 단계를 반복한다.

각 시간마다 경제배분을 하여 최종시간까지 위의 과정을 반복한다.

IV. 사례연구

4.1 시험계통에의 적용

번호	최대 용량 [MW]	최소 발전 [MW]	발전기특성상수			시동비용계수			최소 운전 시간 (h)	최소 경제 시간 (h)	초기 운전 시간 (h)
			a	b	c	α	β	γ			
1	2.4	12	0.02543	25.5472	24.3801	0	0	1	0	0	-1
2	2.4	12	0.02649	25.6753	24.4110	0	0	1	0	0	-1
3	2.4	12	0.02801	25.8027	24.3801	0	0	1	0	0	-1
4	2.4	12	0.02842	25.9318	24.6382	0	0	1	0	0	-1
5	2.4	12	0.02855	25.0611	24.7005	0	0	1	0	0	-1
6	4.0	20	0.01191	37.5510	34.8882	20	20	2	0	0	-1
7	4.0	20	0.01211	37.6537	117.7561	20	20	2	0	0	-1
8	4.0	20	0.01359	37.7770	117.1043	20	20	2	0	0	-1
9	4.0	20	0.01433	37.8805	117.4576	20	20	2	0	0	-1
10	15.2	76	0.00876	13.3272	118.8295	50	50	3	3	2	3
11	15.2	76	0.00885	13.3538	81.1394	50	50	3	3	2	3
12	15.2	76	0.00910	13.3805	81.2980	50	50	3	3	2	3
13	15.2	76	0.00932	13.4073	81.4641	50	50	3	3	2	3
14	25.0	100	0.00823	18.0500	81.6259	70	70	4	4	2	-3
15	25.0	100	0.00812	18.1000	217.8852	70	70	4	4	2	-3
16	25.0	100	0.00588	18.2000	218.3250	70	70	4	4	2	-3
17	34.25	152	0.00483	10.8940	218.7552	150	150	4	5	3	5
18	54.25	152	0.00473	10.7154	142.7348	150	150	4	5	3	5
19	54.25	152	0.00481	10.7367	143.0288	150	150	4	5	3	5
20	54.25	152	0.00487	10.7583	143.3072	150	150	4	5	3	5
21	68.95	197	0.00258	23.0000	258.1310	200	200	6	5	4	-4
22	68.95	197	0.00230	23.1000	258.6490	200	200	6	5	4	-4
23	68.95	197	0.00283	23.2000	260.1790	200	200	6	5	4	-4
24	140.0	350	0.00153	10.2616	177.0575	300	300	8	8	5	10
25	100.0	400	0.00194	7.4921	310.0021	300	300	10	8	5	10
26	100.0	400	0.00195	7.5031	311.9102	300	300	10	8	5	10

표 1. 발전기 데이터
Table 1. Generator Data

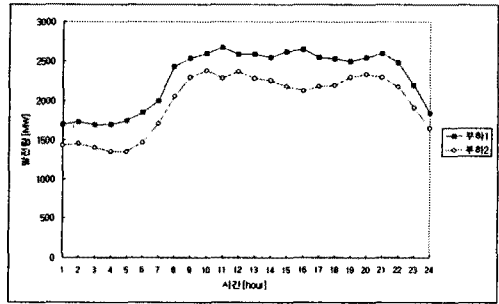


그림 4. 부하곡선 1, 2
Fig. 4 Load curve 1, 2

4.2 결과 비교

알고리즘의 시뮬레이션을 위하여 컴퓨터는 SUN SPARC SDT-200을 사용하였다.

	시동비용[동]	운전비용[동]	전체비용[동]	계산시간[sec]
(1)예제 1의 비용	1599.5	722399	723998	12
본 논문의 비용	1499.0	721903	723402	0.9
(2)예제 2의 비용	1633.8	605463	607097	14
본 논문의 비용	1187.5	584534	586271	0.8

표 2 결과 비교
Table 2. Compare of Results

V. 결론

본 연구에서는 전력계통의 경제적 운용을 위하여 계획된 부하 소비량에 따라 단계별 전 시간대를 고려하여 예상기동정지계획을 수립하여 발전기의 특성비용을 계산한 후 최소 특성비용발전기를 단계별 기간 기동정지계획에 투입하는 새로운 알고리즘을 구현하였고, 프로그램의 효율적인 모델링 및 유지, 보수를 위하여 객체 지향적 모델링 기법을 도입하였다.

이러한 방법을 이용한 결과로 최적에 가까운 기동정지계획을 수립하여 운전연료비를 최소화하였고, 계산시간을 획기적으로 단축하였다.

VI. 참고문헌

- [1] C.J.Baldwin, K.M.Dale, R.F.Dittrich, "A study of the economic shutdown of generating units in daily dispatch" AIEE Trans., PAS, pp.1272-1284, December, 1959.
- [2] A.J.Wood and B.F.Woolenberg, "Power Generation, Operation, and Control." John Wiley and Sons, 1984.
- [3] A.K. Ayoub and A.D. Patton, "Optimal Thermal Generating Unit Commitment", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-90, pp.1752-1756, 1971.
- [4] Walter L. Snyder, H.David Powell, John C.Rayburn, "Dynamic Programming Approach to Unit Commitment" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWR-2, No. 2, May 1987 pp339-350
- [5] F.Eugenio Villaseca, Behruz Fardanesh, "Fast Thermal Generation Rescheduling" IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-2, No. 1, February 1987
- [6] A.Merlin P.sandrin "A New Method For Unit Commitment at Electricite De France" IEEE Tans on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 5, May 1983
- [7] R.Nieva, A.Inda, I.Gwillen, "Lagrangian Reduction of Search-Range for Large-Scale Unit Commitment" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWR-2, No.2, May 1987 pp 465-473
- [8] C.Wang, S.M. Shahidepour "Ramp-Rate Limits in Unit Commitment and Economic Dispatch Incorporating Rotor Fatigue Effect" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No.3 August 1994
- [9] C.Wang, S.M.Shahidepour, "Effects of Ramp-Rate Limits on Unit Commitment" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, August 1993
- [10] Z.L.Gaing, C.N.Lu, B.S.Chang, C.L.Cheng "An Object-Oriented Approach for Implementing Power System Restoration Package" IEEE Trans. in Power System, Vol. 11, No. 1, February 1996