

고차 발전 비용 함수를 고려한 새로운 경제급전 알고리즘

論 文

51A-12-3

A New Economic Dispatch Algorithm Considering Any Higher Order Generation Cost Functions

朴正道* · 文永鉉**

(Jeong-Do Park · Young-Hyun Moon)

Abstract - In this paper, a new economic dispatch algorithm for unit commitment is proposed to improve both the accuracy of the final solution and the calculation speed of economic dispatch. By using the inverse incremental cost functions, economic dispatch can be transformed into a simple optimization problem associated with an n-th order polynomial equation. The proposed method remarkably reduces the computation time with adaptability to any higher order generation cost functions. The proposed method is tested with sample systems, which shows that the proposed algorithm yields more accurate and economical generation scheduling results with high computation speed.

Key Words : Economic Dispatch, Unit Commitment, Generation Cost Functions

1. 서 론

고도로 발달한 산업과 도시화에 따라 에너지 사용량이 막대한 수치를 이르고 있어 경제성이 고려된 전력수급계획은 큰 액수의 경비 절감 효과를 얻을 수 있다. 전력계통의 경제적인 운용은 크게 발전기의 투입 여부를 결정하는 기동정지계획(UC: Unit Commitment)과 선정된 발전기의 최적 경제 발전량을 선정하는 경제급전(ED: Economic Dispatch)의 두 가지에 의하여 수행된다[1]. 기동정지계획은 시간대별 전력 부하와 많은 시스템 제약조건을 만족시키면서 발전 비용을 최소화하는 발전기 투입 스케줄을 결정하며, 경제급전은 연료비용을 최소화하기 위해 선정된 발전기에 부하를 최적 분배하는 것이다. 최적의 발전기 투입 스케줄을 계산하기 위해, 일반적으로 경제급전은 기동정지계획의 계산과정에 포함되어 수행된다.

기동정지계획에 관한 오랜 기간에 걸친 많은 연구 결과로써 우선순위법(Priority List Method), 동적계획법(DP: Dynamic Programming), 라그랑지법(Lagrange Relaxation), 인공지능, 유전알고리즘, 진화알고리즘, DUC(Decommit Unit Commitment) 등 다양한 수학적 알고리즘이 등장하였다[1-4]. 기존의 방법들 중 일부는 계산 속도를 위해 주로 구간선형(piecewise linear)함수를 발전 비용 함수로 사용하였다. 그러나 발전 비용 함수의 정확성이 발전 비용 최소화의 결과에 매우 큰 영향을 미치기 때문에, 구간선형함수를 사용할 경우 비용 함수의 근사화가 심하여 해의 최적성을

보장하기 어렵다는 문제가 대두되어, 해의 정확성을 높이기 위해서는 구간의 수를 늘려야만 했다. 이후 실제에 가까운 발전 비용 함수를 사용하려는 많은 노력이 있었으나, 발전 비용의 비선형 특성을 반영한 함수를 사용하여 발전 비용을 계산하는 데에는 어려움이 많아, 현재 2차 근사화된 발전 비용 함수를 가장 많이 사용하고 있다[5].

발전 비용 함수의 근사화가 심할수록 경제급전의 해는 최적에서 멀어진다. 따라서 경제급전의 해의 정확성을 높이기 위해서는 보다 적은 근사화가 이루어져야 하며, 발전 비용 함수를 고차화 할수록 2차 근사화된 발전 비용 함수를 사용할 때보다 해의 정확성은 높아진다. 그러나 고차 발전 비용 함수를 기존의 경제급전 알고리즘에 적용하여 정식화하는 데에는 많은 어려움이 따르며 계산 시간 또한 늘어나게 된다.

본 논문에서는 기동정지계획의 해를 향상시키기 위해 발전 비용 함수의 역함수를 사용하여 경제급전을 수행하는 새로운 경제급전 알고리즘을 제안한다. 충분한 발전 비용 함수의 역함수를 사용하는 것에 의해 경제급전 문제를 단순한 n 차 다항식의 최적화 문제로 정식화함으로써, 고차 발전 비용 함수를 쉽게 경제급전 문제에 적용할 수 있게 하였다. 이 방법은 고차 비용 함수를 쉽게 처리할 수 있을 뿐만 아니라, 간단한 산술 계산만으로 최적의 해를 계산하므로 빠른 시간에 경제급전의 해를 구할 수 있다. 따라서 제안한 방법은 고차 발전 비용 함수를 사용하여 해의 정확성을 높이며, 단순 산술 계산만을 반복하여 최적의 해를 계산하므로, 경제급전 알고리즘 중 계산 속도가 가장 빠른 것으로 알려진 구간 선형반복법(PLI: Piecewise Linear Iterative Method)의 계산 속도와 대등한 속도를 나타낸다. 제안된 경제급전 알고리즘을 샘플 계통에 대해 모의 실험하였고, 그 결과를 PLI법과 비교하여 기존의 방법에 비해 계산 시간 및 해의 정확성 면에서 우수함을 확인하였다.

* 正 會 員 : 威德大 工大 情報電子工學部 傳任講師 · 工博

** 正 會 員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2002年 4月 12日

最終完了 : 2002年 9月 17日

2. 본 론

PLI법을 제외한 대부분의 경제급전 알고리즘은 구간 선형 비용 함수의 불연속점 처리와 같은 문제 때문에 비용 함수를 대체로 2차 근사화된 함수를 사용하고 있다. 그러나 기동정지계획의 계산 과정에서 수없이 발생하는 발전기의 투입/제외 상태와 기동정지계획에 주어지는 증분 발전 비용 곡선이 구간 선형인 경우 기존의 경제급전 알고리즘은 기동정지계획과 연동되어 수행되기 힘들다. 따라서 대부분의 기동정지계획 계산과정에서 빠른 수행 시간 및 알고리즘의 적용성 때문에 PLI법이 사용되었으나, 이것은 구간의 수에 따라 비용함수의 근사화가 심하여 해의 최적성에는 다소 문제점을 안고 있다. 따라서 본 논문에서는 해의 최적성을 보장하면서 PLI법과 같이 고속의 경제급전 계산을 수행할 수 있는 방안을 제시한다.

2.1 발전 출력 모델과 전력 수급 평형 조건

발전기의 발전 비용 함수가 다음과 같은 3차 다항식이라고 할 때,

$$F_i(P_i) = a_i P_i^3 + b_i P_i^2 + c_i P_i + d_i \quad (1)$$

증분 발전 비용은 다음과 같다.

$$\lambda_i = f_i(P_i), \quad f_i(P_i) = \frac{dF_i}{dP_i} \quad (2)$$

여기서,

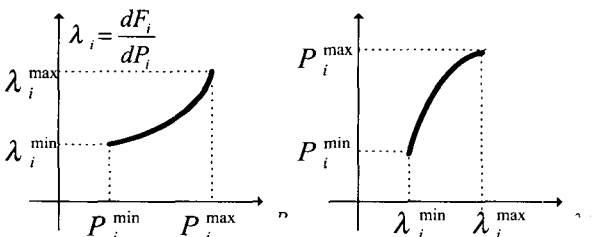
P_i : i 번째 발전기의 출력

$F_i(P_i)$: 발전 출력이 P_i 일 때, 발전기 i 의 연료 비용

λ_i : i 번째 발전기의 증분 발전 비용

a_i, b_i, c_i, d_i : i 번째 발전기의 발전 비용 함수의 계수

이때, 발전기의 증분 발전 비용은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.



(a) 증분 발전 비용 함수
(a) the incremental cost
(b) 증분 발전 비용 함수의 역함수
(b) the inverse of the incremental cost

그림 1 증분 발전 비용 함수와 증분 발전 비용 함수의 역함수

Fig. 1 The incremental cost curve vs. the inverse of the incremental cost curve

증분 발전 비용 함수의 역함수는 그림 1. (b) 와 같이 쉽게 알 수 있으며, 증분 발전 비용 함수의 역함수는 그림 1. (b)에서 얻은 점들에 곡선 보정(curve fitting) 알고리즘을 적용하면 쉽게 얻을 수 있다. 한편, 각 발전기의 발전 출력을 증분 발전 비용 함수의 역함수로 나타내면 다음과 같다.

$$P_i = g_i(\lambda_i) = f_i^{-1}(\lambda_i) \quad (3)$$

여기서, 곡선 보정 알고리즘을 사용하면 증분 발전 비용 함수의 역함수는 n 차 다항식으로 근사화 될 수 있다. 즉,

$$P_i = g_i(\lambda_i) = \sum_{k=0}^n \alpha_i^{(k)} \lambda_i^k \quad (4)$$

여기서, $\alpha_i^{(k)}$: i 번째 발전기의 증분 발전 비용 함수의 역함수를 근사화한 다항식의 계수

그러므로 전력 수급 평형 조건을 λ 에 대한 간단한 n 차 다항식 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Total} = \sum_{i=1}^N P_i(\lambda) = \sum_{k=1}^n \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i^{(k)} \right) \lambda^k = L_t \quad (5)$$

여기서,

N : 기동정지계획에서 투입된 발전기의 대수

L_t : t 시간대에서의 부하

$\lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_N$ (손실을 고려하지 않은 경우, 최적점에서)

발전기의 투입/제외 상태는 해당되는 발전기의 계수만을 식(5)에 추가/삭제하면 반영되므로 식(5)는 기동정지계획의 계산 과정에서 발생하는 발전기의 투입/제외 상태를 쉽게 반영할 수 있다. 또한 위의 식(5)는 다음 식(6)으로 간략화하여 나타낼 수 있다.

$$P_{Total} = \beta_0 + \beta_1 \lambda + \dots + \beta_n \lambda^n = L_t \quad (6)$$

여기서, $\beta = \sum_{k=1}^N \alpha_k^{(j)}$

따라서, 고차 발전 비용 함수를 고려한 경제급전 문제는 식(6)의 단순한 n 차 다항식의 최적화 문제로 정식화된다. 또한 발전기의 발전 비용 함수가 3차 이상인 경우에도 곡선 보정 알고리즘을 사용하여 증분 발전 비용 함수의 역함수를 구하면 식(5), (6)의 형태로 전력 수급 평형 조건을 나타낼 수 있으므로, 어떠한 고차 발전 비용 함수를 사용하더라도 경제급전 문제를 n 차 다항식의 최적화 문제로 정식화할 수 있다.

한편, 식(6)의 해를 널리 알려진 Newton-Rhapson 알고리즘을 사용하여 계산할 경우 그 반복계산 과정은 다음과 같다.

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} - \frac{P_{Total}(\lambda^{(k)})}{dP_{Total}(\lambda^{(k)})/d\lambda}$$

$$= \lambda^{(k)} - \frac{\beta_0 + \beta_1\lambda^{(k)} + \dots + \beta_n(\lambda^{(k)})^n}{\beta_1 + 2\beta_2\lambda^{(k)} + \dots + n\beta_n(\lambda^{(k)})^{n-1}} \quad (7)$$

여기서, $\lambda^{(k)}$: k 번째 반복계산에서의 λ 의 값

식(7)의 계산 과정은 단순 산술 계산에 불과하며 Newton-Rhaphson 알고리즘의 특성상 대체로 3~6회의 반복 계산 내에 최적의 해를 구할 수 있으므로, 제안한 고차 발전 비용 함수를 고려한 경제급전의 계산에는 많은 시간이 소요되지 않는다.

2.2 고차 발전 비용 함수를 고려한 경제급전 알고리즘

만일 발전 비용 함수가 구간선형함수이거나 2차 다항식이 라면, 기동정지계획의 계산 과정에서 수없이 발생하는 발전기의 투입/제외 상태에 계산상의 문제를 야기하지 않는다. 그러나 발전 비용 함수가 2차 이상의 고차 함수인 경우, 기존의 경제급전 알고리즘들은 식(5)와 같이 간단한 형태로 발전기의 투입/제외 상태를 반영할 수 없다. 그러므로 기존의 경제급전 알고리즘들은 고차 발전 비용 함수를 사용할 경우 기동정지계획 계산 과정 중 고속의 경제급전 계산을 수행하는 데에 많은 어려움을 안고 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법은 발전 비용 함수를 사용하지 않고 증분 발전 비용 함수의 역함수를 사용하여 이러한 문제를 해결하였고, 또한 이 방법은 경제급전 문제를 n차 다항식의 최적화 문제로 단순화시켰다.

제안한 경제급전 알고리즘은 다음과 같은 6단계로 최적의 해를 찾는다.

Step 1) 시간대 t에서의 부하 L_t 에 대하여, 식(6)의 해 λ 를 식(7)로 부터 구한다.

Step 2) $P_i = g_i(\lambda)$ 에 의해 각 발전기의 발전량을 계산한다.

Step 3) 계산한 P_i 값이 발전 출력 상/하한에 포함되지 않을 경우 그 값을 다음과 같이 수정한다.

$$P_i = P_i^{\min} \quad : P_i(\lambda) < P_i^{\min} \text{ 인 경우} \quad (8)$$

$$P_i = P_i^{\max} \quad : P_i(\lambda) > P_i^{\max} \text{ 인 경우} \quad (9)$$

여기서, P_i^{\min} : i 번째 발전기의 발전출력 하한

P_i^{\max} : i 번째 발전기의 발전출력 상한

Step 4) 모든 발전기가 (8), (9)의 조건에 해당되지 않으면 계산을 마치고, 그렇지 않은 경우 다시 λ 를 계산한다.

Step 5) 다음 조건을 검사한다.

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \quad : P_i^{\min} < P_i < P_i^{\max} \text{ 인 경우} \quad (10)$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} \leq \lambda \quad : P_i = P_i^{\max} \text{ 인 경우} \quad (11)$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} \geq \lambda \quad : P_i = P_i^{\min} \text{ 인 경우} \quad (12)$$

Step 6) 조건 (10), (11), (12)를 모두 만족하면 계산을 마치고, 그렇지 않은 경우 Step 1)부터 다시 수행한다.

3. 사례연구

제안된 경제급전 알고리즘을 샘플 시스템에 적용하여 모의 실험을 행하고, 그 결과를 PLI법과 비교함으로써 타당성을 검증하였다. 발전기 데이터는 참고문헌 [1]과 같고, 부하곡선은 표 1에, 발전 비용 함수의 계수는 표 2에 나타내었다.

표 1 기동정지계획의 부하 곡선

Table 1 Load demand in test cases

시간	부하 (MW)	시간	부하 (MW)	시간	부하 (MW)	시간	부하 (MW)
1	2070	7	2260	13	2980	19	2580
2	1980	8	2510	14	3080	20	2460
3	1920	9	2620	15	3010	21	2520
4	1870	10	2740	16	2940	22	2310
5	1990	11	2800	17	2720	23	2230
6	2120	12	2830	18	2540	24	2190

표 2 발전 비용 함수의 계수

Table 2 Cost function coefficients of generating units

$$F_i(P_i) = a_i P_i^3 + b_i P_i^2 + c_i P_i + d_i$$

발전기	a	b	c	d
1	5.08e-9	0.025	25.54	24.38
2	-1.01e-8	0.026	25.67	24.41
3	1.01e-8	0.028	25.80	24.63
4	5.08e-9	0.028	25.93	24.76
5	-5.72e-16	0.028	26.06	24.88
6	8.31e-8	0.011	37.55	117.75
7	8.56e-8	0.012	37.66	118.10
8	8.15e-8	0.013	37.77	118.45
9	8.29e-8	0.014	37.88	118.82
10	-5.80e-10	0.008	13.32	81.13
11	-5.47e-10	0.008	13.35	81.29
12	-5.49e-10	0.009	13.38	81.46
13	-5.50e-10	0.009	13.40	81.62
14	1.25e-18	0.006	18.00	217.89
15	-1.19e-18	0.006	18.09	218.33
16	2.44e-18	0.005	18.20	218.77
17	1.11e-10	0.004	10.69	142.73
18	1.03e-10	0.004	10.71	143.02
19	1.03e-10	0.004	10.73	143.31
20	1.03e-10	0.004	10.75	143.59
21	1.07e-10	0.002	23.00	259.13
22	1.04e-10	0.002	23.10	259.64
23	1.00e-10	0.002	23.20	260.17
24	4.42e-19	0.001	10.86	177.05
25	-1.10e-19	0.001	7.49	310.00
26	3.55e-20	0.001	7.50	311.91

모의실험에서 기동정지계획 계산법으로는 DP의 계산 속도 및 효율성을 높인 DP-STC(Dynamic Programming - Sequential & Truncated Combination)법[6]을 사용하였다. DP-STC법에서 우선 순위 리스트의 인덱스로는 최대 부하 시 평균 발전 비용(full load average cost)을 선택하였고 매 시간대에 대하여 전방 DP 탐색을 수행하였다. 기동정지계획의 제약조건으로 시간대별 시스템 부하, 발전기 별 발전 상/하한, 최소 정지 시간, 최소 가동 시간, 증/감발을 제약, 시동 제약 조건 등을 고려하였다. 시동 제약 조건은 다음과 같다.

$$P'_i = P_i^{\min} : S_i^{t-1} = 0, S_i^t = 1 \text{ 인 경우} \quad (13)$$

여기서, P'_i : t 시간대에서 i 번째 발전기의 발전출력
 S_i^t : t 시간대에서 i 번째 발전기의 기동/정지 상태 (1 또는 0)

기동정지계획의 반복계산 과정 중, 발전 출력 P'_i 는 제안된 경제급전 알고리즘과 PLI법을 사용하여 계산하였고, 발전기의 기동 비용은 다음 식으로 계산하였다.

$$Su_i(H'_i) = TC_i + (1 - e^{-H'_i/CH_i}) \times BC_i + SMC_i \quad (14)$$

여기서, $Su_i(H'_i)$: i 번째 발전기의 H'_i 시간 정지 후 기동시 소요 비용

H'_i : t 시간대에서 i 번째 발전기의 기동/정지 지속 시간

$$H'_i > 0 \text{ if } S_i^t = 1$$

$$H'_i < 0 \text{ if } S_i^t = 0$$

S_i^t : t 시간대에서 i 번째 발전기의 기동/정지 상태 (1 또는 0)

TC_i : i 번째 발전기의 터빈 시동 비용

CH_i : i 번째 발전기의 보일러 냉각에 소요되는 시간

BC_i : i 번째 발전기의 보일러 시동 비용

SMC_i : i 번째 발전기의 시동 관리 비용

증분 발전 비용의 역함수는 표 2의 발전 비용 함수를 미분하고 x, y 축의 값을 서로 치환한 후, 곡선 보정을 통하여 계산한 값으로 사용하였으며, 이 값은 부록에 나타내었다.

본 논문에서는 표 3과 같이 다섯 가지 경우에 대하여 모의실험을 행하였고, 각 경우에 대한 모의실험 결과를 그림 2 - 그림 6에 나타내었다. 각 그림의 수치는 각 시간대별 해당 발전기에 할당된 발전량(MW)을 나타낸다.

표 3 모의실험 종류

Table 3 Test Cases

Case	경제급전 알고리즘	증/감발을 고려 여부
1	수행하지 않음	무시
2	PLI법	무시
3	제안된 방법	무시
4	PLI법	고려
5	제안된 방법	고려

Unit/Stage	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Unit 9																									
Unit 8																									
Unit 7																									
Unit 6																									
Unit 5																									
Unit 4																									
Unit 3																									
Unit 2																									
Unit 1																									
Unit 23																									
Unit 22																									
Unit 21																									
Unit 20																									
Unit 19																									
Unit 18																									
Unit 17																									
Unit 16																									
Unit 15																									
Unit 14																									
Unit 13																									
Unit 12																									
Unit 11																									
Unit 10																									
Unit 20																									
Unit 19																									
Unit 18																									
Unit 17																									
Unit 24																									
Unit 23																									
Unit 26																									
Unit 25																									
Unit 24																									
Unit 23																									
Unit 22																									
Unit 21																									
Unit 20																									
Unit 19																									
Unit 18																									
Unit 17																									
Unit 16																									
Unit 15																									
Unit 14																									
Unit 13																									
Unit 12																									
Unit 11																									
Unit 10																									
Unit 9																									
Unit 8																									
Unit 7																									
Unit 6																									
Unit 5																									
Unit 4																									
Unit 3																									
Unit 2																									
Unit 1																									
Gen	2074	1998	1922	1937	2038	2174	2270	2510	2640	2768	2837	2965	3065	3013	2965	2768	2768	2768	2571	2571	2374	2274	2274	2274	2274
Cost	23687	22532	21381	21659	22494	25761	28385	33845	36671	39757	41829	44689	49350	49010	46039	44689	39757	39757	34646	34846	29355	27855	27855	27855	27855

Total Cost: 823841.90

그림 2 Case 1 - 경제급전과 증/감발을 고려하지 않은 경우의 기동정지계획 결과

Fig. 2 Case 1 - UC results with no ED calculation and no ramp rate constraints

Case 1 - Case 5를 고찰해보면 경제급전 알고리즘에 따라 발전기의 기동정지 스케줄이 변경된다는 것을 한 눈에 알 수 있고, 이것으로부터 발전기 기동정지계획의 최종 결과는 경제급전 알고리즘에 매우 의존적이라는 것을 알 수 있다.

시간대에 대한 비용의 합의 차이는 6이므로, 제한한 경제급전 알고리즘은 전체 발전 비용의 차이에 있어 71.4%의 기여도를 나타내었다.

Unit/Stage	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Unit 9																									
Unit 8																									
Unit 7																									
Unit 6																									
Unit 5																									
Unit 4																									
Unit 3																									
Unit 2																									
Unit 1																									
Unit 23																									
Unit 22																									
Unit 21																									
Unit 16																									
Unit 15																									
Unit 14																									
Unit 13																									
Unit 12																									
Unit 11																									
Unit 10																									
Unit 20																									
Unit 19																									
Unit 18																									
Unit 17																									
Unit 24																									
Unit 26																									
Unit 25																									
Gen																									
Cost	22627	222692	1352	20702	22483	24974	2786	3364	08622	239083	407414	1447	45112	88819	45959	44035	38604	34333	35277	82211	93627	28726	27014	26258	

Total Cost: 794958.26

그림 3 Case 2 - PLI법과 중/감발율을 고려하지 않은 경우의 기동정지계획 결과
Fig. 3 Case 2 - UC results with piecewise linear iterative ED and no ramp rate constraints

Case 2를 Case 3과 비교해보면, 2, 5, 12, 18 시간대에 대한 Case 3의 비용이 Case 2의 비용 보다 경제적이다. 두 경우에 있어서 전체 발전 비용의 차이는 8.4이며 2, 5, 12, 18

Unit/Stage	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Unit 8																									
Unit 7																									
Unit 6																									
Unit 5																									
Unit 4																									
Unit 3																									
Unit 2																									
Unit 1																									
Unit 23																									
Unit 22																									
Unit 21																									
Unit 16																									
Unit 15																									
Unit 14																									
Unit 13																									
Unit 12																									
Unit 11																									
Unit 10																									
Unit 20																									
Unit 19																									
Unit 18																									
Unit 17																									
Unit 24																									
Unit 26																									
Unit 25																									
Gen																									
Cost	23627	222682	1352	20702	22482	24974	2786	3364	08622	239083	407414	1447	45112	88819	45959	44035	38604	34333	35277	82211	93627	28726	27014	26258	

Total Cost: 794949.86

그림 4 Case 3 - 제안된 경제급전 방법과 중/감발율을 고려하지 않은 경우의 기동정지계획 결과
Fig. 4 Case 3 - UC results with the proposed ED and no ramp rate constraints

전체 발전 비용의 차이에 있어 경제급전 알고리즘 자체만으로 기여한 부분(71.4%)을 제외한 나머지 부분에 대한 경제성은, 경제급전 방법에 따라 매 시간대별 각 발전기에 할당된 발전량이 서로 다르기 때문에, 기동정지계획의 최적화 과

정에서 발생하는 상태 천이 비용(transition cost)이 달라지게 됨으로써 비롯된 것이다.

확성에 있어서의 미세한 차이가 발전기 기동정지계획에 얼마나 큰 영향을 미치는가를 알 수 있다.

Unit Stage	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Unit 9																								
Unit 8													40	150										
Unit 7												40	200											
Unit 6												40	200											
Unit 5												24	120											
Unit 4												24	120	90										
Unit 3												24	120	120										
Unit 2									24	111	24	100												
Unit 1									24	111	24	100												
Unit 23									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 22									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 21									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 20									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 19									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 18									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 17									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 16									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 15									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 14									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 13									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 12									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 11									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 10									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 9									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 8									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 7									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 6									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 5									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 4									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 3									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 2									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Unit 1									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Gen									UP	UP	690	1240	1789	1970	1870	1720	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN
Cost	23627	122269	21404	20696	22480	25286	27823	33777	35623	159155	540741	147548	488194	595944	865866	104184	353527	133224	133666	128726	70141	26258		

Total Cost: 795698.33

그림 5 Case 4 - PLI법과 모든 제약조건을 고려한 경우의 기동정지계획 결과

Fig. 5 Case 4 - UC results with piecewise linear iterative ED and all constraints

Case 4와 Case 5를 비교해보면, 발전기의 기동정지 스케줄이 상이한 것을 발견할 수 있다. 이것 또한 경제급전에 의해 매 시간대별 각 발전기에 할당된 발전량이 서로 달라서 기인된 결과이다. 이것으로부터 경제급전 알고리즘의 정

Unit Stage	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Unit 9																								
Unit 8													40	150										
Unit 7												40	200											
Unit 6												40	200											
Unit 5												24	120											
Unit 4												24	120											
Unit 3												24	120	93										
Unit 2												24	120	117										
Unit 1												24	120	120										
Unit 23																								
Unit 22																								
Unit 21																								
Unit 20																								
Unit 19																								
Unit 18																								
Unit 17																								
Unit 16																								
Unit 15																								
Unit 14																								
Unit 13																								
Unit 12																								
Unit 11																								
Unit 10																								
Unit 9																								
Unit 8																								
Unit 7																								
Unit 6																								
Unit 5																								
Unit 4																								
Unit 3																								
Unit 2																								
Unit 1																								
Gen																								
Cost	23627	122269	21352	20702	22483	25287	27783	36403	36251	139155	407414	147548	488194	595944	865866	104184	353527	133224	133666	128726	70141	26258		

Total Cost: 795489.09

그림 6 Case 5 - 제안된 경제급전 방법과 모든 제약조건을 고려한 경우의 기동정지계획 결과

Fig. 6 Case 5 - UC results with the proposed ED and all constraints

Case 4와 Case 5를 시간대 별로 비교해보면, 시간대 2-8과 20-21에 대한 Case 5의 비용이 Case 4의 비용보다 다소 경제적이다. Case 5의 경우, 제안한 경제급전 알고리즘은 전체 발전 비용의 차이에 있어 43.4%의 기여를 하고있고, Case 4

에 비하여 0.06%의 전체 발전 비용을 절감하였다. 전체 발전 비용의 실제 규모를 감안할 때 0.06%의 비용 절감이 전대로 무시할 수 있는 수치가 아님은 두말할 나위가 없다.

모의실험 종류별 전체 발전 비용과 각 경우별 비용 절감율을 표 4에 나타내었다.

표 4 모의실험 종류별 전체 발전 비용
Table 4 The total generation cost of each case

case	전체 발전 비용	Case 1에 대한 비용 절감율	Case 2에 대한 비용 절감율	Case 4에 대한 비용 절감율
1	823841.90	N/C	N/C	N/C
2	794958.26	3.505 %	N/C	N/C
3	794949.86	3.506 %	0.001 %	N/C
4	795698.33	3.383 %	N/C	N/C
5	795489.09	3.441 %	N/C	0.06 %

그림 2 - 그림 6에 나타난 바와 같이, 24시간 중 발전기의 기동/정지 상태가 변경된 발전기들의 대부분은 상대적으로 최대 발전량이 작은 발전기들이다. 만일 발전기 용량이 모의실험에 사용된 발전기의 용량 보다 큰 시스템을 사용하여 모의할 경우 더 많은 비용 절감 효과를 가져올 수 있을 것이다.

한편, 제안된 방법의 수행 시간을 비교하기 위하여 기존의 방법과 PLI법을 각각, 1000, 5000, 10000 번을 수행하여 계산에 소요되는 시간을 표 5에 나타내었다. 공정한 계산 속도 비교를 위하여 PLI법의 구간 수를 3으로 제한하여 PLI법이 다소 비실용적인 발전 비용 곡선을 사용하더라도 아주 빠른 계산 속도를 낼 수 있는 경우와 비교하였다.

표 5 계산 시간 비교
Table 5 Comparison of calculation time

반복횟수	PLI법	제안된 방법
1,000	0.06	0.06
5,000	0.16	0.16
10,000	0.33	0.34

표 5에 나타난 바와 같이 제안한 경제급전 알고리즘은 PLI법이 빠른 속도를 낼 수 있는 경우와 대등한 속도를 나타내었다. 해의 정확성을 보장하기 위하여 구간의 수를 늘릴수록 PLI법의 계산 시간이 증가한다는 점을 감안할 때, 제안한 경제급전 알고리즘은 해의 최적성을 향상시키는 동시에 계산 시간도 단축시킨다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 해의 정확성과 계산 속도를 동시에 개선할 수 있는 새로운 경제급전 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법은 증분 발전 비용 함수의 역함수를 사용하는 것에 의

해 경제급전 문제를 단순한 n차 다항식의 최적화 문제로 정식화함으로써, 고차 발전 비용 함수를 쉽게 경제급전 문제에 적용할 수 있게 하였다. 따라서 이 방법은 보다 실제 응답에 가까운 고차 발전 비용 함수를 쉽게 처리할 수 있을 뿐만 아니라, 간단한 산술 계산만으로 최적의 해를 계산하므로, 빠른 시간에 경제급전의 해를 구할 수 있다. 제안된 방법을 3차로 근사화된 발전기 비용함수를 사용하여 기동정지 계획과 통합하여 계산한 결과, 기존의 방법에 비해 전체 발전 비용을 상당히 감소시키는 것으로 나타났고, 계산 시간 비교를 위하여 경제급전 부분을 반복 수행한 결과 경제급전 알고리즘 자체에 소요되는 시간은 기존의 PLI법과 대등하게 나타났다. 발전기 용량이 모의실험에 사용된 발전기의 용량 보다 큰 시스템을 사용하여 모의할 경우 더 많은 비용 절감 효과를 가져올 수 있을 것으로 기대되며, 모의실험에서 곡선 보정 알고리즘을 일반적으로 알려진 라그랑지 고전 공식(Lagrange's classical formula)을 사용하였으나, Neville 알고리즘과 같은 보다 정확한 알고리즘을 적용한다면 해의 정확성을 한층 더 높일 수 있을 것으로 기대된다. 한편 제안한 경제급전 알고리즘에 손실을 포함하는 문제나 발전비용 함수의 불연속점 처리와 같은 문제에 대해서는 추후 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] C. Wang, S. M. Shahidehpur, "Effects Of Ramp-Rate Limits On Unit Commitment And Economic Dispatch", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 3, Aug. 1993.
- [2] Fulin Zhuang, F.D. Galiana, "Towards A More Rigorous And Practical Unit Commitment By Lagrangian Relaxation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 763-773, May, 1988.
- [3] Chao-an Li, et al., "A New Unit Commitment Method", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 1, pp. 113-119, Feb. 1997.
- [4] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation And Control", 2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication, 1996.
- [5] M. Yoshikawa, et al., "On-line Economic Load Dispatch Based on Fuel Cost Dynamics", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 1, pp. 315-320, Feb. 1997.
- [6] Jeong-Do Park, Young-Hyun Moon, et al., "Unit Commitment Algorithm Considering the Effects of Economic Dispatch", Presented at the IEEE/PES Winter Meeting, Singapore, Jan. 2000.
- [7] C. Wang, S. M. Shahidehpour, "Optimal Generation Scheduling With Ramping Costs", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 10, No. 1, pp. 60-67, Feb. 1995.
- [8] X. Wang, J. R. McDonald, "Modern Power System Planning", McGraw-Hill, 1994.

부 록

표 A1 증분 발전 비용 함수의 역함수의 계수
 Table A1 Coefficients of the inverse of the incremental generation cost functions

$$g_i(\lambda_i) = f_i^{-1}(\lambda_i) = u\lambda_i^2 + v\lambda_i + w_i$$

발전기	u	v	w
1	-1.175e-04	19.75	-504.37
2	2.049e-04	18.86	-484.48
3	-1.739e-04	17.86	-460.72
4	8.303e-05	17.59	-456.17
5	-3.834e-10	17.51	456.41
6	-1.987e-02	43.14	-1592.68
7	-1.749e-02	40.92	1517.19
8	-1.310e-02	37.76	-1408.01
9	-1.130e-02	35.73	1337.84
10	3.236e-04	57.07	-760.62
11	2.862e-04	55.86	-745.96
12	2.731e-04	54.94	735.14
13	2.551e-04	53.64	-719.22
14	8.719e-11	80.26	-1444.62
15	1.556e-12	81.70	-1478.76
16	1.062e-10	83.61	-1521.74
17	-4.212e-04	108.00	-1154.92
18	3.651e-04	105.72	1132.76
19	-3.483e-04	103.96	-1116.13
20	3.366e-04	102.68	-1104.59
21	-2.334e-03	193.16	-4441.46
22	-2.225e-03	192.41	-4443.57
23	-2.071e-03	190.21	-4411.83
24	2.548e-10	326.80	-3549.54
25	3.621e-11	257.73	-1930.95
26	7.962e-11	256.41	-1923.87

저 자 소 개



박 정 도 (朴 正 道)

1969년 10월 6일생. 1992년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동대학원 졸업(석사). 2000년 동대학원 졸업(공학박). 2001년~현재 위덕대학교 정보전자공학부 전임강사

Tel : 054-760-1663

E-mail : jdpark@uiduk.ac.kr



문 영 현 (文 永 鉉)

1952년 3월 11일생. 1975년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1978년 동대학원 졸업(석사). 1983년 오레곤주립대 대학원 졸업(공학박). 1983년~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수

Tel : 02-2123-2771

E-mail : moon@yonsei.ac.kr