

기동정지계획을 위한 경제급전 알고리즘

박정도, 이용훈, 김구한, 문영현
연세대학교 전기공학과 에너지 시스템 연구실

Economic Dispatch Algorithm for Unit Commitment

Jeong-Do Park, Yong-Hoon Lee, Ku-Han Kim, Young-Hyun Moon,
*Dept. of Electrical Engineering, Yonsei Univ. Seoul 120-749, KOREA

Abstract - This paper presents a new economic dispatch algorithm to improve the unit commitment solution while guaranteeing the near optimal solution without reducing calculation speed. The conventional economic dispatch algorithms have the problem that it is not applicable to the unit commitment formulation due to the frequent on/off state changes of units during the unit commitment calculation. Therefore, piecewise linear iterative method have generally been used for economic dispatch algorithm for unit commitment. In that method, the approximation of the generator cost function makes it hard to obtain the optimal economic dispatch solution. In this case, the solution can be improved by introducing a inverse of the incremental cost function. The proposed method is tested with sample system. The results are compared with the conventional piecewise linear iterative method. It is shown that the proposed algorithm yields more accurate and economical solution without calculation speed reduction.

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 기동정지계획과 선정된 발전기의 최적 경제 발전량을 선정하는 경제급전(ED: Economic Dispatch)의 두 가지에 의하여 수행된다[1]. 기본적인 기동정지계획 계산법에서는 경제급전을 수행하지 않으므로 필요이상으로 발전비용이 증가될 수 있다. 이와 같은 비경제적인 측면은 기동정지 계획의 계산에 ED를 연동 하여 해를 구함으로써 해결이 가능하다. 80년대 이후 다양한 기동정지 계획 알고리즘이 등장하면서 기동정지계획과 경제급전을 병행하는 사례가 등장하였으나, 각각의 기동정지계획 알고리즘이 가지는 특성상 대체로 기동정지계획을 두 부분 - 1. 필수 제약조건만 고려하여 기동정지계획을 계산, 2. 계산된 기동정지계획의 해를 바탕으로 전 시간대에 대해 동적 제약조건 및 부가적인 제약조건을 고려하여 경제급전 수행 - 으로 나누어 수행하는 방안이 연구되었다[1, 2, 3]. 이것은 고려되는 발전기 수의 지수승으로 복잡해지는 기동정지계획의 계산과정과, 시간대별 부하와 발전기들의 상태에 따라 계산에 투입/제외되는 발전기들의 조합이 계속적으로 변화되어야 하는 조건 때문에 일반적인 ED 계산법을 기동정지계획의 계산과정에 적용하기에는 다소 무리가 있기 때문이다. 따라서 현재 기동정지계획에는 주로 구간 선형 반복법 (PLI: Piecewise Linear Iterative method)이 주로 사용되고 있으나 제한된 선형 구간 수를 사용하기 때문에 비용함수의 근사화가 심하여 해의 최적성을 보장하기가 어렵다.

본 논문에서는 기동정지계획에 있어서 빈번한 발전기

투입/제의 상황의 변화에 따른 해를 고속으로 구하면서 해의 최적성을 보장하는 경제급전 알고리즘을 제시한다. 제안한 방법은 각 발전기의 비용함수를 직접 사용하는 대신 발전량과 증분 비용관계를 함수 관계로 표시하고 발전비용을 증분비용함수로 나타내어 총 발전비용을 최소화하는 문제로 정식화하였다. 이 방법에서는 비용함수의 고차 비선형을 쉽게 처리할 수 있을 뿐 아니라 간단한 산술계산으로만 발전기의 최적화된 해를 계산하므로 빠른 시간에 경제급전의 해를 구할 수 있다. 제안된 방법은 3차로 근사화된 발전기 비용함수를 사용하며, 기존의 구간 선형 반복 계산법에 대해 비교계산을 수행함으로써 기존의 방법에 비해 계산시간 및 해의 경제성 면에서 우수함을 확인하였다.

2. 본 론

구간 선형 반복법을 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/제의 상태는 기존의 경제급전 알고리즘이 기동정지계획과 연동하여 수행되기 힘들게 한다. 따라서 대부분의 기동정지계획 계산과정에서 빠른 수행 시간 및 알고리즘의 적용성 때문에 구간 선형 반복법이 사용되었으나, 이것은 구간의 수에 따라 비용함수의 근사화가 심하여 해의 최적성은 다소 문제점을 안고 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 해의 최적성을 보장하면서 구간 선형 반복법과 같이 고속의 경제급전 계산을 수행할 수 있는 방안을 제시한다.

2.1 경제급전 문제의 정식화

경제급전은 식(2)와 같이 시스템의 부하를 만족하는 상태에서 식(1)을 최소화하는 P_i 를 구하는 최소화 문제이다.

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_N \quad (1)$$

$$= \sum_{i=1}^N F_i(P_i)$$

단, F_i : i 번째 발전기의 발전비용함수

P_i : i 번째 발전기의 출력

N : 발전기 수

$$\phi = 0 = P_{load} - \sum_{i=1}^N P_i \quad (2)$$

대부분의 경제급전 알고리즘은 식(2)를 식(3)과 같은 라그랑지 함수 L 로 구성하여 식(4)를 만족하는 λ 를 계산함으로써 식(1)을 최소화하는 발전기들의 최적 발전량 P_i 를 결정한다.

$$L = F_T + \lambda \phi \quad (3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0, \quad \lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_N \quad (4)$$

발전비용함수를 2차 근사화 할 경우 비용함수는 식(5)의 형태로 나타내고,

$$F_i(P_i) = \frac{1}{2} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (5)$$

발전량과 증분비용관계는 다음 식과 같다.

$$\lambda_i = \frac{dF_i}{dP_i} = a_i P_i + b_i \quad (6)$$

식(6)의 역함수를 다음과 같이 정의하고

$$P_i = g_i(\lambda_i) = \frac{1}{a_i} \lambda_i - \frac{b_i}{a_i} \quad (7)$$

식(2)에 대입하면,

$$\sum_{i=1}^N g_i(\lambda_i) - P_{load} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{a_i} \lambda_i - \frac{b_i}{a_i} \right) - P_{load} = 0 \quad (8)$$

을 얻고, 식(4)에서 $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_N$ 이므로 다음이 성립한다.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{b_i}{a_i} + P_{load}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{a_i}} \quad (9)$$

즉, 2차 근사화된 발전비용함수를 사용할 경우 경제급전의 문제는 식(9)에 의해 단순한 산술 연산만으로 λ 값을 쉽게 구할 수 있으므로, 경제급전을 기동정지계획에 병합하여 수행할 경우 빈번한 발전기의 투입/제외에 따른 알고리즘의 복잡성은 식(9)의 경우 발생하지 않는다.

2.2 경제급전 문제의 확장

일반적으로 발전기의 비용함수는 발전기 제작사에 의해 구간 선형 비용 함수(piecewise linear cost function)의 형태로 주어진다[4]. 실제 발전기의 입출력 특성은 다분히 비선형적이므로 구간 선형 비용 함수를 사용하여 경제급전을 수행하는 구간 선형 반복법이 널리 사용되게 되었다. 그러나 비용함수의 구간의 수는 구간 선형 반복법의 해의 정확성에 많은 영향을 미친다.

구간 선형 비용 함수를 curve fitting 등의 알고리즘을 통해 n 차의 비용함수로 나타내고, 그것을 바탕으로 경제급전을 수행한다면 획기적으로 해의 정확성을 높일 수 있을 것이다. 그러나 n 차의 비용함수를 식(9)와 같이 일반화하여 나타내기는 쉽지 않다. 따라서 본 절에서는 기존의 비용함수에 발생하는 문제점 해결을 위해 발전비용함수의 선형구간의 위치를 파악하여 발전 비용함수를 고차함수로 표현함으로써 경제급전을 수행하는 새로운 방안을 제시한다.

발전비용함수를 식(10)과 같이 가정하면,

$$F_i(P_i) = a_1^i (P_i)^n + a_2^i (P_i)^{n-1} + \dots + a_n^i \quad (10)$$

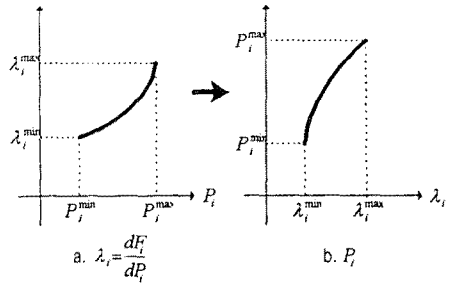


그림. 1 역함수 관계

그림.1과 같은 역함수 관계를 이용하여 P_i 에 대한 λ 함수의 역함수를 curve fitting 알고리즘 등을 사용하여 다음과 같은 n 차 식으로 근사화하여 나타낼 수 있다.

$$P_i = G_i(\lambda) = \left(\frac{dF_i}{dP_i} \right)^{-1}(\lambda) \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_1 = \alpha_1^1(\lambda)^n + \alpha_2^1(\lambda)^{n-1} + \dots + \alpha_n^1 \\ P_2 = \alpha_1^2(\lambda)^n + \alpha_2^2(\lambda)^{n-1} + \dots + \alpha_n^2 \\ \vdots \\ P_N = \alpha_1^N(\lambda)^n + \alpha_2^N(\lambda)^{n-1} + \dots + \alpha_n^N \end{cases}$$

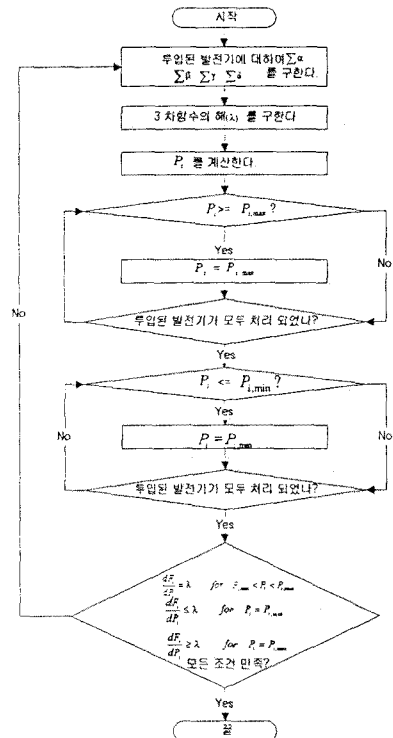


그림. 2 제안된 경제급전 알고리즘의 흐름도

기존의 경제급전 알고리즘들이 식(6)이 나타내는 그림.1 a.에 대해 연산을 취한 것에 반해, 제안된 알고리즘은 식(11)이 나타내는 그림.1의 b.에 대해 연산을 취함으로써 단순 산술계산으로 경제급전의 해를 구한다. 한편,

식(2)를 다음과 같이 나타낼 수 있으므로

$$\sum P_i(\lambda_i) = \sum_{i=1}^n \alpha_i (\lambda_i)^n + \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \beta_i (\lambda_i)^{n-1} \dots \quad (12)$$

λ 를 구하는 경제급전 문제는 단순한 n 차 방정식의 해를 구하는 것으로 해결된다. P_i 계수들 각각의 합으로 식(12)의 계수들이 결정되므로 기동정지계획 계산과정에서 발전기의 투입/제외 상태가 변경될 경우 산술계산 과정에서 단순히 추가/제외시킴으로써 발전기의 투입/제외 변경 상태를 적절히 반영할 수 있다. 그림. 2에 제안된 경제급전 알고리즘의 개략적인 흐름도를 나타내었다.

3. 사례 연구

제안된 경제급전 알고리즘을 다음과 같은 테스트 시스템에 적용하여 타당성을 검증하였다. 기동정지계획은 우선순위 기반의 DP-STC(Dynamic Programming - Sequential & Truncated Combination)법을 사용하였고, 우선순위 인덱스로는 FLAC(Full Load Average Cost)를 사용하였다. DP의 Forward Path 처리 과정에서 매 시간대의 가능한 발전기 조합에 대하여 경제급전을 수행함으로써, 할당발전량과 발전비용을 계산하였다. 구간 선형 반복법은 $P_i(\lambda)$ 의 역함수(그림. 1의 a.)를 구하고 P_i^{min} 과 P_i^{max} 를 그림. 3과 같이 임의로 등분하여 구간 선형 비용함수를 계산한 후 경제급전을 실행한다.

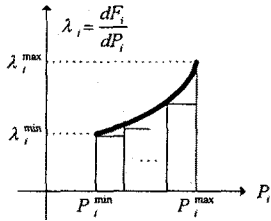


그림. 3 구간 선형 비용함수

표. 1 기동정지계획 발전기 데이터

| Unit | Max | Min | No-Load Cost | Full Load Average Cost | Min Up Time | Min Down Time | Hot Start Up Cost | Cold Start Up Cost |
|------|-----|-----|--------------|------------------------|-------------|---------------|-------------------|--------------------|
| 1 | 180 | 25 | 213 | 23.54 | 4 | 5 | 150 | 350 |
| 2 | 250 | 60 | 585 | 20.34 | 5 | 8 | 170 | 400 |
| 3 | 300 | 75 | 684 | 19.34 | 5 | 8 | 500 | 1100 |
| 4 | 120 | 20 | 252.0 | 28.44 | 0 | 6 | 0 | 820 |

표. 2 부하 곡선

| 시간 | 부하 (MW) | 시간 | 부하 (MW) |
|----|---------|----|---------|
| 1 | 450 | 5 | 400 |
| 2 | 530 | 6 | 280 |
| 3 | 600 | 7 | 290 |
| 4 | 540 | 8 | 500 |

표. 3 발전기 비용 함수

| Unit | a | b | c | d |
|------|---------------|----------|-----------|--------|
| 1 | -0.0000481041 | 0.034146 | 3.382852 | 194.84 |
| 2 | -0.0000964912 | 0.060657 | -1.236842 | 376.68 |
| 3 | -0.0000599647 | 0.051507 | -4.714285 | 689.14 |
| 4 | -0.0000865801 | 0.059090 | 0.740259 | 122.15 |

표. 4 $P_i(\lambda)$ 함수의 계수

| Unit | a | b | c | d |
|------|-------------|-----------|----------|----------|
| 1 | 0.00039922 | -0.114397 | 18.7932 | -204.569 |
| 2 | 0.00114391 | -0.44395 | 56.1114 | -1615.55 |
| 3 | -0.00060687 | 0.315556 | -34.4444 | 1314.29 |
| 4 | -0.0008744 | 0.251971 | -10.8957 | 374.113 |

샘플 시스템에 기존의 구간 선형 반복법을 적용한 결과와 제안된 방법을 적용한 결과를 각각 그림. 4와 그림. 5에 나타내었다.

Calculated Schedule

| Unit/Stage | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 |
|------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Unit 4 | On | On | On | On | On | On | On | On | On |
| Unit 1 | On | On | On | On | On | On | On | On | On |
| Unit 2 | On | On | On | On | On | On | On | On | On |
| Unit 3 | On | On | On | On | On | On | On | On | On |
| Generation | 460 | 460 | 530 | 600 | 540 | 400 | 290 | 290 | 500 |
| Cost | 0 | 3238 | 3636 | 4658 | 4015 | 2798 | 1854 | 1921 | 3810 |



Total Cost: 26143.46

그림. 4 구간 선형 반복법에 의한 기동정지계획

Calculated Schedule

| Unit/Stage | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 |
|------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Unit 4 | On | On | On | On | On | On | On | On | On |
| Unit 1 | On | On | On | On | On | On | On | On | On |
| Unit 2 | On | On | On | On | On | On | On | On | On |
| Unit 3 | On | On | On | On | On | On | On | On | On |
| Generation | 460 | 460 | 530 | 600 | 540 | 400 | 290 | 290 | 500 |
| Cost | 0 | 3257 | 3872 | 4643 | 3602 | 2783 | 1874 | 1946 | 3739 |



Total Cost: 25977.48

그림. 5 제안된 방법에 의한 기동정지계획

그림.4, 그림.5에 나타난 바와 같이 제안된 방법은 기존의 구간 선형 반복 계산법에 비해 약 0.6%의 비용의 차이를 나타내었다. 한편, 제안된 방법의 수행 시간을 비교하기 위하여 기존의 방법과 각각, 1000, 5000, 10000 번의 수행에 소요되는 계산 시간을 표. 5에 나타내었다.

표. 5 계산시간 비교

| 반복횟수 | 구간 선형 반복법 | 제안된 방법 |
|--------|-----------|--------|
| 1,000 | 0.06 | 0.06 |
| 5,000 | 0.16 | 0.16 |
| 10,000 | 0.33 | 0.34 |

제안한 방법은 구간 선형 반복법과 거의 동등한 계산 수행 능력을 보였다. 기존의 방법의 경우 계산 결과의 정확성을 높이기 위해서는 구간의 수가 많아져야 하고, 구간의 수가 많아질 수록 계산 시간이 증가되는 점을 고려할 때, 해의 최적성과 계산 시간의 두 가지 측면을 모두 만족시킨다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 기동정지계획에 있어서 빈번한 발전기 투입 제외의 상황의 변화에 따른 해를 고속으로 구하면서 해의 최적성을 보장하는 경제급전 알고리즘을 제시하였다. 제안한 방법은 각 발전기의 비용함수를 직접 사용하

는 대신 발전량과 증분 비용관계를 함수 관계로 표시하고 발전비용을 증분비용함수로 나타내어 총 발전비용을 최소화하는 문제로 정식화하였다. 이 방법에서는 비용함수의 고차 비선형을 쉽게 처리할 수 있을 뿐 아니라 간단한 산술계산으로만 발전기의 최적화된 해를 계산하므로 빠른 시간에 경제급전의 해를 구할 수 있다.

제안된 방법을 3차로 근사화된 발전기 비용함수를 사용하여 기동정지계획과 통합하여 계산한 결과, 경제급전 알고리즘 자체에 소요되는 계산 시간은 기존의 구간 선형 반복 계산법과 대등하게 나타났고, 기존의 방법에 비해 전체 발전비용을 상당히 감소시키는 것으로 나타났다.

[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] 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.
- [3] 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.
- [4] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation And Control", 2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication, 1996.
- [5] X. Wang, J. R. McDonald, "Modern Power System Planning", McGraw-Hill, 1994.