

환경특성을 반영한 급전계획의 파레토 최적화기법 개발

이범* · 김용하** · 최상규***

*여수대학교 전자통신전기공학부, **인천대학교 전기공학과, ***안양과학기술대 전자통신정보학부

E-mail : buhmlee@yosu.ac.kr

Development of Pareto-Optimal Technique for Generation Planning According to Environmental Characteristics in Term

Buhm Lee*, Yong-ha Kim** and Sang-kyu Choi***

*Electrical Engineering, Yosu National University

**Electrical Engineering, University of Incheon

***School of Electronic, Communication and Information, Anyang Technical College

요 약

본 연구에서는 급전계획의 파레토최적해를 구하는 새로운 방법을 제시하였다. 이를 위하여, 고찰기간에 대해 총오염물질배출량을 고려하여 최적경제부하배분을 할 수 있는 동적계획법을 도입하였으며, 최적급전계획의 결과를 군으로 얻을 수 있는 파레토최적해를 얻는 방법을 개발하였다. 이 결과, 의사결정자는 파레토최적해를 얻을 수 있으며, 이 중에서 하나의 해를 선택하여 사용할 수 있게 되었다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 유용성을 검증하였다.

Abstract — This paper presents a new methodology to get pareto-optimal solution for generation planning. First, we apply dynamic programming, and we can get an optimal economic dispatch considering total quantity of contamination for the specified term. Second, we developed a method which can get pareto-optimal solution. This solution is consisted of a set of optimal generation planning. As a result, decision maker can get pareto-optimal solutions, and can choose a solution. We applied this method to the test system, and showed the usefulness.

1. 서 론

전력계통을 경제적으로 운용하기 위하여 화력발전기를 경제적으로 운용할 수 있는 기법^[1]이 개발·사용되어 왔으며, 이들 기법은 현재 운전중인 발전기의 출력을 조절하여 가장 경제적으로 운용토록 하는 것이라 할 수 있다. 반면, 화력발전은 많은 양의 연료를 사용하기 때문에, 오염물질 배출량으로 인한 환경의 영향 역시 매우 크다 하겠다. 여기서, 화력발전기연료중 상대적으로 값이 싼 석탄 등의 연료는 오염물질발생량이 많은 반면, 오염물질발생량이 작은 LNG 등의 연료는 상대적으로 값이 비싸 연료비와 오염물질 배출량은 서로 상관관계에 있는 것이 일반적이다.

이러한 문제를 해결하고자, 개개 시간대 별로 오염물

질 배출량제약을 고려하여 경제적인 운용을 할 수 있는 기법^[2]이 개발되어 왔다. 그러나, 이들 방법은 오염물질 배출량을 개개 시간대별로 할당하고, 각 시간대별로 오염물질배출량을 만족하는 운전계획을 수립하는 방법에 주로 의존하여 왔다. 즉, 의사결정자가 얼마만큼의 오염 물질을 허용할 것인가를 미리 결정하여 운전계획을 수립하여야 하기 때문에, 오염물질 배출량과 발전비용의 상관관계를 파악하여 종합적으로 판단하기 어려웠다.

그러므로, 본 연구에서는 정해진 기간동안의 오염물질 발생총량을 만족하면서 총연료비를 최소로 할 수 있는 기법을 개발하였다. 또한 가능해가 존재하는 모든 최적해의 집합을 구할 수 있도록 하여, 의사결정자가 후의 사결정을 할 수 있는 파레토최적화(Pareto-Optimal)를 수립할 수 있는 방법을 개발하였다. 우선, 단계(Stage)로 시

간대와 상태(State)로 누적오염물질배출총량을 사용하는 동적계획법을 구성하고, 각 격자점에 대해 오염물질배출량을 등호제약조건으로 포함시킨 운전계획을 수립(Constrained Economic Dispatch; 이하 CED)토록 하여 전체 기간에 대해 총오염물질배출량을 만족하는 최적의 운전계획을 수립할 수 있도록 하였다. 또한, 일반적으로 시중단 고정으로 운전계획이 결정되는 일반적인 동적계획법과 달리, 시단만 고정하고 종단은 총오염물질배출총량으로 나타나는 최적해의 집합으로 처리할 수 있도록 하여 파레토최적화를 바로 구할 수 있도록 하였다. 이결과, 파레토최적화 결과로부터 의사결정자가 오염물질배출량과 발전비용의 상관관계를 종합적으로 판단하여 가장 적합하다고 판단되는 운전계획을 사용할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 그 특성 및 유용성을 검증하였다.

2. 이론적배경 및 정식화

2-1. 다목적함수의 정식화

본 연구에서는 목적함수로 연료비용과 오염물질배출량을 각각 최소화하는 것으로 하였다.

(1) 목적함수(연료비용)

고찰기간 동안의 화력발전기의 총연료비는 다음과 같다.

$$F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_i^t \quad [\text{천원}] \quad (1)$$

여기서,

T : 고찰기간 (t=1...T)

N : 화력발전기의 수 (i=1...N)

C_i^t : t 시간대에서의 i 화력발전기의 연료비[천원]

(2) 목적함수(오염물질배출량)

화력발전소에서 발생하는 오염물질의 대부분은 연료에 포함되어 있는 성분에 의해 발생량이 결정되기 때문에, 이들 발전기가 사용하는 연료의 양에 따라 오염물질배출량을 계산할 수 있다. 또한, 여기에 연료비단가를 포함시키면, 근사적이지만 f_i라는 계수를 사용하여 다음과 같이 발생량을 계산할 수 있다^[2].

$$EP = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T f_i C_i^t \quad [\text{kg}] \quad (2)$$

여기서,

f_i: 연료사용량당 오염물질 발생량[kg/연료비(천원)]

(3) 제약조건

제약조건으로는 수급제약, 출력상하한제약 등^[3]이 존재하며, 이 이외에도 발전출력 증감발율, 항시운전 및 정

지 등의 제약이 있다. 이러한 경제운용관련제약이외에도, 총 오염물질배출량제약이 존재하는데, 이 값은 주어진 기간동안 반드시 만족시켜야만 하는 최소한의 기준이다.

$$EP \leq EP^{\max} \quad [\text{kg}] \quad (3)$$

여기서,

EP^{max} : 고찰기간동안 전체발전기의 오염물질발생 최대치

2-2. 환경문제의 기간 처리

환경문제를 풀기 위하여는 식(1), 식(2)의 목적함수를 동시에 만족하는 해를 구하면 되나, 이들 목적함수는 상관관계(trade-off)에 있기 때문에 이들 목적함수를 모두 최적화시키지는 못한다. 따라서, 다목적함수를 단목적함수로 변환하여 푸는 방법으로 문제를 풀 수 있다. 즉, 식(2)를 제약조건화하여 식(1)에 포함시켜 푸는 방법이다.

(1) 특정시간대에서의 환경문제의 처리^[2]

지금까지 환경문제의 처리는 특정한 시간대에 대하여 시행하여 왔으며, 이는 식(1)의 목적함수에 식(3)의 제약조건을 포함시켜 시간대별로 처리하는 것이다. 이를 풀기 위하여, 식(2)를 e^t라는 미정계수를 도입해 푸는 방법이 주로 사용되어 왔는데, 이는 식(4)와 같이 다목적함수를 단일목적함수로 구성한 후 반복법에 의해 해를 구하는 것이다.

$$F = \sum_{i=1}^N C_i^t + e^t \sum_{i=1}^N f_i C_i^t \quad [\text{천원}] \quad (4)$$

(2) 정해진 기간에 대한 환경문제의 처리

앞의 방법은 특정 시간대에서의 환경문제를 처리할 수 있다. 그러나, 환경문제를 할 수 있는 오염물질배출량은 1일 또는 1주일 동안 누적되어 나타나므로 대상기간 동안 허용된 오염물질배출량 이내에서 최소의 연료비용으로 발전할 수 있도록 하여야 하며, 이를 정식화하면 다음과 같다.

$$F = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N C_i^t + e^t \sum_{i=1}^N f_i C_i^t \right] \quad [\text{천원}] \quad (5)$$

여기서, 각 시간대별로 오염물질배출량을 만족시킨 최적해의 집합이 전체 기간에 대한 최적을 나타내는 것은 아니다. 따라서 식(5)는 식(4)의 방법으로 풀 수 없으며, 따라서 식(5)를 풀기 위한 새로운 방법을 필요로 한다.

2-3. 다목적함수의 파레토최적화

앞의 기간단위의 해법은 식(2)를 제약조건화하여 목적함수를 하나로 줄여 해결한 방법이라 할 수 있다. 그러나, 상관관계에 있는 식(1), 식(2)의 목적함수는 각기 최적화가 가능하며, 또한 이들 목적함수를 모두 적절히 만

족시키는 최적화도 가능하다. 즉, 이 최적화 결과들은 어떤 것이 하나의 최적이라고 하기 어려우며, 의사결정자의 의지에 따라 각기 다른 결과가 얻어지게 된다.

따라서, 식(3)의 제약조건을 만족하는 식(1), 식(2)의 목적함수 값이 최적이 되는 모든 운전계획을 수립한 다음, 이를 집합화할 수 있으며, 이들 최적해의 집합이 파레토최적화이다. 이 결과를 사용하여 의사결정자가 최종 결과로부터 가장 만족스럽다고 생각되는 해를 나중에 결정할 수 있다.

3. 동적계획법에 의한 다목적함수의 파레토최적화

본 연구에서는 정해진 시간에 대해 권고되는 오염물질배출량을 만족하는 최적의 운전계획을 수립할 수 있고, 파레토최적화를 얻을 수 있는 동적계획법을 적용하였다. 이의 방법으로 상태로 시간대를, 단계로 누적오염물질배출량을 구성하였다. 또한, 파레토최적화를 얻기 위하여 종래의 시종단고정의 동적계획법을 변형한, 최적해를 집합으로 구할 수 있는 방법을 개발하였다. 이의 과정은 다음과 같다.

단계 1 : 초기화

동적계획법상의 단계로 시간대(단위 : h)를, 상태로 누적 오염물질배출량(단위 : kg)으로 정하고, 모든 격자점에 대해 '∞'를 대입한다. 일반적인 동적계획법에서는 시종단을 고정하는데 반하여 본 동적계획법에서는 시단만 고정하며, 시단인 시간대 0의 상태 0만 '0'을 대입한다.

단계 2 : 경로탐색

시간대 0에서 1로 이동하기 위하여는 시간대 1에서 전 시간대로부터 이동가능한 전 경로를 탐색한다. 이때, 가장 누적연료비가싼 경로를 추적하여야 하는데, 각 격자점의 오염물질배출량을 만족하는 운전계획을 CED를 사용하여 계산하며, 누적 총연료비는 식(6)을 사용한다. 이 과정에서 발전출력, 발전비용 등은 모두 저장한다.

$$F(K, I) = \text{Min} \left[\sum_{i=1}^N C_i + e' \sum_{i=1}^N f_i C_i + F(K-1, L) \right] \text{ [천원]} \quad (6)$$

여기서, 가능해를 얻을 수 없는 경로는 '∞'로 처리하여 다음의 과정을 수행하지 않도록 하여 계산시간을 단축한다. 가능해를 얻을 수 없는 경로로는 식(2)의 오염물질배출량이 최소치와 최대치사이를 벗어나거나 수급 제약, 출력상하한제약을 만족하지 못하는 경우가 된다.

(1) 운전계획의 수립

운전계획은 경제부하배분을 사용하여 계산하였다.

(2) CED

CED는 각 격자점에 상응하는 오염물질배출량을 등호

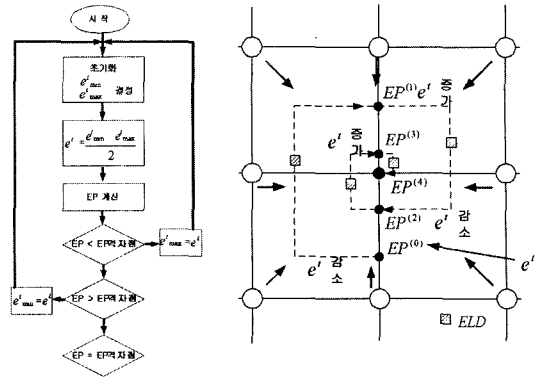


Fig. 1. Calculating procedure for CED.

제약으로 하여 식(4)을 계산하였다. 본 연구에서는 이분계산법(Bi-Section법)³⁾을 사용하여 결과를 얻었으며, CED의 계산과정을 Fig. 1에 나타내었다.

단계 3 : 단계 2의 과정을 시간대 T까지 반복하여 계산한다.

단계 4 : 시간대 T에서 가능해 영역을 찾아 EP^{min}, EP^{max}를 결정한다. 여기서, EP^{min}에서 EP^{max}까지의 값은 모두 최적해가 되며, 이 값이 파레토최적해이다.

단계 5 : 의사결정자가 파레토최적해중 가장 합리적인 결과를 결정한다. 결정된 EP에 상응하는 격자점으로부터 시간대 T에서 시간대 0까지의 경로를 탐색하여 발전출력 및 연료비용을 구한다. 만약, 식(3)을 만족하는 해를 구하면, 식(5)를 최적화하는 결과를 얻을 수 있다. 상기의 과정을 Fig. 2에 나타내었다.

본 연구에서 제안한 파레토최적화는 종래의 시종단 고정과 달리, 시단만 고정시키고, 종단을 고정시키지 않으며, 종단의 경로중 가능해 모두를 사용함으로써 구현시

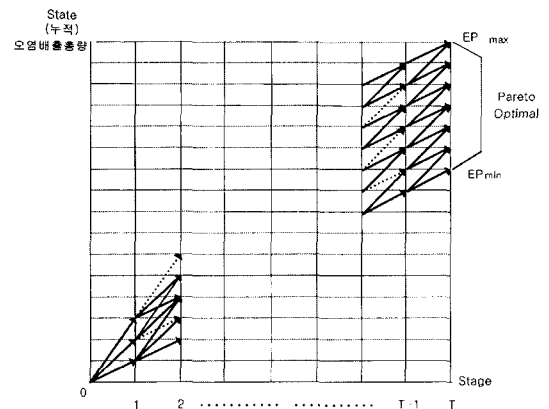


Fig. 2. Pareto-optimization by dynamic programming.

킨 것이다.

또한, 단계 4의 결과를 가로축은 발전비용으로, 세로축은 오염물질배출량으로 그려 파레토최적화를 도식적으로 나타내면, 단계 5의 의사결정을 용이하게 할 수 있다.

4. 사례연구

4-1. 계통 자료

본 연구에서는 RTS-24 계통사용을 사용하였으며, 오염물질배출량 특성은 Table 1과 같이 하였다. 또한, 본 연구에서 사용한 부하는 Fig. 3과 같은 RTS-24 계통의 일주일부하를 사용하였다. 여기서, 기동정지계획은 끝나 있는 것으로 하였으며, 제약조건중 발전출력 증감발율은 고려하지 않았다.

또한, 대상기간인 1주일간의 오염물질배출량은 3732 [Ton]으로 제한토록 하였으며, DP상의 격자점간격은 3[Ton/격자점]으로 하였다.

4-2. 결과분석

4-2-1. 동적계획법에 의한 환경문제의 기간처리

본 연구에서 제안한 방법으로 운전계획을 수립하고, 이를 종래의 방법과 비교하였다. 여기서, 종래의 방법은 식

Table 1. Contamination ratio per fuel cost.

발전기	f_1	발전기	f_1	발전기	f_1	발전기	f_1
1	0.154	9	0.318	17	0.109	25	0.001
2	0.154	10	0.318	18	0.109	26	0.001
3	0.725	11	0.318	19	0.109	27	0.001
4	0.725	12	0.443	20	0.917	28	0.001
5	0.054	13	0.443	21	0.917	29	0.001
6	0.054	14	0.443	22	0.001	30	0.917
7	0.725	15	0.109	23	0.001	31	0.917
8	0.725	16	0.109	24	0.001	32	1.317

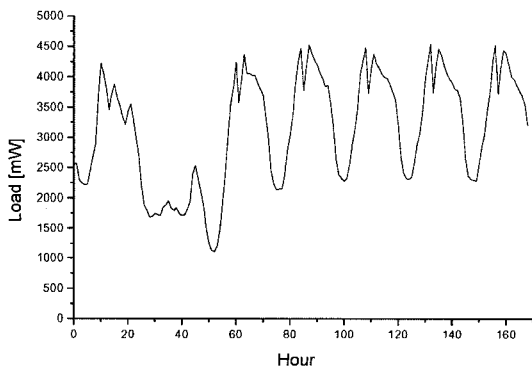


Fig. 3. System load pattern.

Table 2. Result of optimum.

방 법	총연료비 [백만원]	오염물질 배출량[Ton]
종래의 방법	8909.75	3732
제안한 방법	8746.42	3732

(4)를 사용하여 오염물질배출량을 시간대별로 나누어(시간대별로 30[Ton/hr]) 개개 시간대별로 오염물질제약을 만족시키는 방법을 사용하였다. 제안한 방법은 파레토의 형태로 결과가 얻어지기 때문에, 제한치인 3732[Ton]의 오염물질을 배출하는 최적화결과를 사용하였다. 종래의 방법과 제안한 방법으로 운전계획을 수립한 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2로부터 종래의 방법은 30[Ton/hr]로 시간당 오염물질을 배출할 수 있지만, 시간대에 따라서는 이보다 작은 오염물질을 발생하게 된다. 이는 부하를 만족시키는 발전계획을 수립함에 있어, 각 시간대별로 최소배출가능량과 최대배출가능량이 존재하게 되는데, 시간대에 따라서는 최대배출가능량이 제한치 보다 작기 때문이다. 일례로 시간대 1의 오염물질배출량은 9.7~18.2[Ton/hr]까지만 배출할 수 있는데, 이 시간대의 기준치가 30[Ton/hr]이라 하여도, 18.2[Ton/hr]까지만 배출이 가능하기 때문이다. 이 때문에, 30[Ton/hr]×168[hr]의 오염물질총량이 발생하는 것이 아니라, 실제로는 3732[Ton]의 배출만 이루어지게 되며, 이때의 총연료비용은 8909.75[백만원]이 된다. 반면, 제안한 방법은 총연료비용 8746.42[백만원]으로 제한치인 3732[Ton]의 오염물질제약을 만족시키고 있다. 즉, 제안한 방법에 의해 1.8[%]의 연료비용을 절감할 수 있음을 알 수 있다.

4-2-2. 파레토최적화

본 연구에서 제안한 방법으로 파레토최적해를 구한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4는 최적화문제의 최적해의 집합을 나타낸 것으

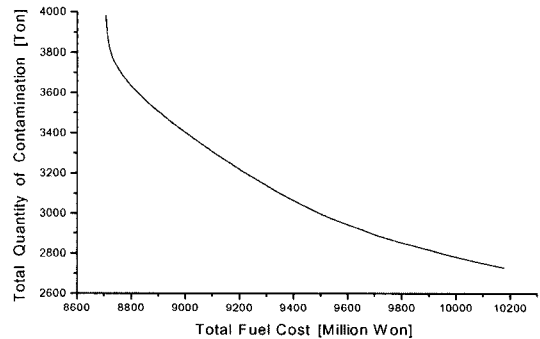


Fig. 4. Result of pareto-optimum.

로 이들 모두가 최적해라 할 수 있으며, 최적해는 총오염물질배출량이 3981[Ton] (총연료비 8706[백만원])에서 2727[Ton] (총연료비 10178[백만원])까지 변화하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4로부터, 결과를 알지 못하는 상태에서 단순히 오염물질배출량제약을 일정량으로 정한다음, 제약에 맞는 운전계획을 정하는 것과 달리, 제안한 방법은 모든 결과를 하나의 그림으로 표시한 다음 의사결정자가 어떤 수준의 오염물질배출량이 적합한지를 판단하여 운전계획을 결정할 수 있다는데 장점이 있다. 특히, Fig. 4에서 총연료비 8800[백만원](배출량 3633[Ton] 정도까지는 약간의 비용을 추가하면서도 용이하게 총오염물질배출량을 줄일 수 있음을 보여주고 있어, 상당히 합리적인 오염물질배출저감이 가능하다 하겠다.

만약, 식(3)의 총오염물질배출량제약을 앞의 3732[Ton]으로 제한하여야만 한다면, Fig. 3에서 3732[Ton]을 초과하는 부분은 비가능해로 처리하면 되므로, 의사결정자가 쉽게 배출량제한치 및 합리적인 저감치를 판단할 수 있도록 하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 오염물질배출량을 기간별로 적용할 수 있고, 또한 파레토최적화를 얻을 수 있도록 하기 위하여 동적계획법에 의한 파레토최적화기법을 개발하였다. 우선, 단계로 시간대를, 상태로 누적오염물질배출량을 적용하여 운전기간동안 최소의 연료비용으로 오염물질배출량을 만족시킬 수 있도록 하였으며, 마지막시간대의 결과를 집합으로 처리하여 파레토최적화를 얻을 수 있도록 하였다. 이와 같은 후처리방법을 통해, 종래의 단순히 오염배출량을 얼마이하라는 방법에서 더 나아가, 발생하는 오염물질배출량과 이에 따른 비용을 종합적으로 파악한후, 어떤 운전계획을 수립하는 것이 합리적인지를

파악할 수 있도록 하였다. 즉, 의사결정자가 연료비용과 오염물질배출량의 상관관계를 파악할 수 있도록 하여, 최적의 결과들 중 최상의 운전계획을 선택할 수 있도록 하였다. 만약 의사결정자가 경제성을 중요시한다면 총오염물질발생량이 많더라도 값싼 운영계획을, 환경을 중요시한다면 총연료비가 많이 들더라도 총오염물질발생량이 작은 운영계획을, 적절히 조화로운 운영계획을 원한다면 총오염물질발생량과 총연료비중 만족할 만한 운영계획을 파레토결과로부터 선택하면 될 것이다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여, 기간별 오염물질배출량의 고려 및 파레토최적해의 특성을 파악할 수 있도록 하였으며, 이 결과로부터 의사결정을 할 수 있음을 보였다. 추후, 파레토최적화의 결과로부터 최상의 운전계획을 선택할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 인천대학교 동북아전자물류연구센터의 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. Wood, A.J. and Wollenberg, B.F.: "Power Generation, Operation, and Control", Wiley (1984).
2. Gjengedal, T., Johansen, S. and Hansen, O.: "A Qualitative Approach to Economic-Environmental Dispatch-Treatment of Multiple Pollutants", IEEE Trans. Energy Conversion, 7(3), 367 (1992).
3. David G. Luenberger: "Linear and Nonlinear Programming", Addison Wesley.
4. Kermanshahi, B.S., Wu, Y., Yasuda, K. and Yokoyama, R.: "Environmental Marginal Cost Evaluation by Non-inferiority Surface", IEEE Trans. Power Systems, 5(4), 1151 (1990).