

환경특성을 고려한 다목적함수의 기간 발전계획 Pareto 최적화

이 범¹ · 김용하² · 최상규³ · 조성린⁴ · 나인규⁵ · 황봉수⁶ · 김동근⁷
¹여수대학교 전기 및 반도체공학과 · ²인천대학교 전기공학과 · ³안양과학대 전기제어과 · ⁴인천광역시⁵

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

Buhm Lee¹, Y.H. Kim², S.K. Choi³, I.G. Na⁵, S.L. Cho⁴, B.S. Hwang⁶
¹Yosu National University, ²University of Incheon, ³Anyang Technical College, ⁴Incheon Metropolitan city

Abstract - This paper describes a new methodology to get pareto-optimal generation planning for decision-making. To get optimal generation planning consider total quantity of contamination for the specified term, authors employ dynamic programming. And, in the course of dynamic programming, pareto-optimal solution can be obtained. So, a most proper solution can be selected by decision-maker. The usefulness is verified by applying it to the test system.

1. 서 론

경제적인 전력계통의 운용을 위하여서는 전체 화력발전기의 연료비를 최소로 하여야 한다. 그러나, 값싼 연료일수록 오염물질 발생량이 많아 환경에 많은 영향을 미치게 되므로, 이를 방지하기 위하여 많은 국가 또는 차단체는 오염물질 발생량을 일정규모 이내로 줄이도록 강제하고 있으며, 또한 LNG 등의 고급연료를 사용하여 오염물질 발생량을 줄이도록 권고하고 있는 실정이다. 이를 위하여 개개 시간대 별로 오염물질 배출량제약을 고려하여 경제적인 운용을 할 수 있는 기법[1]이 개발되어 왔으나, 이 방법은 개개 시간대의 배출량만 고려할 수 있을 뿐, 일정기간동안의 총 배출량을 고려할 수 없는 단점이 있다.

그러므로, 본 연구에서는 시간대와 오염물질발생총량을 사용하는 동적 계획법을 구성하고, 각 격자 점에 대해 오염물질 발생량을 등호제약조건으로 포함시켜 운전계획을 수립할 수 있는 제약경제부하배분을 뚫으로써, 정해진 기간동안의 오염물질발생총량을 만족하면서 총 연료비를 최소로 할 수 있는 기법을 개발하였다. 또한, 일반적으로 시종단 고정으로 운전계획이 결정되는 일반적인 동적계획법과 달리, 시단만 고정하고 종단은 총오염물질 배출총량으로 나타나는 최적해의 집합으로 처리할 수 있도록 하여 파레토최적화를 바로 구할 수 있도록 하였으며, 이 파레토최적해로부터 의사결정자가 후의사 결정을 할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 IEEE RTS-24 시험계통에 적용하여 그 효용성을 검증하였다.

2. 다목적함수 및 제약조건

(1) 연료비용

고찰기간동안의 화력발전기의 총 연료비는 다음과 같다.

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

여기서,

T : 고찰기간 ($t=1..T$)

N : 화력발전기의 수 ($i=1..N$)

C_i^t : t 시간대에서의 i 화력발전기의 연료비[천원]

(2) 오염물질배출량

오염물질의 대부분은 연료에 포함되어 있는 성분에 의 존하기 때문에, 사용하는 연료의 양으로 오염물질배출량을 근사 계산할 수 있다. 또한, 여기에 연료비단가를 포함시키면, 다음과 같이 계산이 가능하다.[1]

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

여기서,

f_i : 연료사용량당 오염물질 발생량 [Kg/연료비(천원)]

(3) 제약조건

제약조건으로는 수급제약, 출력상하한제약 등[2]이 존재한다. 이 이외에도 총 오염물질 배출량제약이 존재하는데, 이 값은 주어진 기간동안 반드시 만족시켜야만 하는 최소한의 기준이다.

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

여기서,

EP^{max} : 고찰기간동안 전체발전기의 오염물질발생 최대치

3. 파레토 동적계획법에 의한 해법

환경문제를 풀기 위하여서는 식(1), 식(2)의 목적함수를 동시에 만족하는 해를 구하면 되나, 이들 목적함수는 상관관계(trade-off)에 있기 때문에 동시에 만족시키지 못한다. 따라서, 식(3)의 제약조건을 만족하는 식(1), 식(2)의 목적함수 값이 최적이 되는 모든 운전계획을 수립한 다음, 이를 집합화한 것이 파레토최적해이다. 이 결과를 사용하여 의사결정자가 최종결과로부터 가장 만족스럽다고 생각되는 해를 나중에 결정할 수 있다. 그럼으로, 본 연구에서는 정해진 기간에 대해 권고되는 오염물질 배출량을 만족하는 최적의 운전계획을 수립할 수 있고, 파레토최적화를 얻을 수 있는 동적계획법을 개발하였다. 본 연구에서 제안한 동적계획법의 과정은 다음과 같다.

(1) 초기화

동적계획법상의 Stage로 시간대를, State로 누적 오염물질배출량으로 정하고, 모든 격자점에 대해 '∞'를 대입한다. 일반적인 동적계획법에서는 시종단을 고정하는데 반하여 본 동적계획법에서는 시단만 고정하며, 시단인 시간대 0의 State 0만 '0'을 대입한다.

(2) 경로탐색

어떤 시간대에서 다음 시간대로 이동함에 있어, 누적 총연료비가 가장 싸고 이동가능한 전 경로를 탐색한다. 이를 계산함에 있어 제약경제부하배분을 사용하며, 누적 총연료비는 식(4)을 사용한다.

$$F(K, I) = \text{Min} \left[\sum_{i=1}^N C_i + e' \sum_{i=1}^N f_i C_i + F(K-1, L) \right] \text{ [천원]} \quad (4)$$

여기서, 오염물질배출량이 최소치와 최대치사이를 벗어나거나 수급제약, 출력상하한제약을 만족하지 못하여 가능해를 얻을 수 없는 경로는 '∞'로 처리하여 다음의 과정을 수행하지 않도록 하여 계산시간을 단축하며, 발전출력, 발전비용 등은 모두 저장한다.

또한, 본 연구에서는 제약경제부하배분은 각 격자점에 상응하는 오염물질배출량을 등호계약으로 하고, 이분계산법(Bi-Section법)[3]을 사용하여 결과를 얻었다.

(3) 전체경로의 탐색

단계 2의 과정을 시간대 T까지 반복하여 계산한다.

(4) 파레토최적해

시간대 T에서 가능해 영역을 찾으면, 이들 가능해가 존재하는 모든 값은 최적해가 되게 되는데, 이 값이 파레토최적해이다. 즉, 본 연구에서 제안한 파레토최적화는 종래의 시종단 고정과 달리, 시단만 고정시키고 종단을 고정시키지 않으며, 종단의 경로중 가능해 모두를 사용함으로써 구현시킨 것이다.

(5) 의사결정

의사결정자가 파레토최적해 중 총연료비와 오염물질발생량을 감안하여 가장 합리적인 결과를 결정한다.

상기의 과정을 그림 1에 나타내었다.

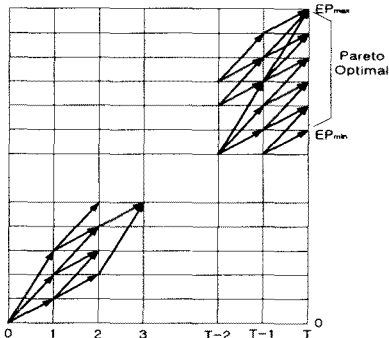


그림 1. 파레토최적화 동적계획법

4. 사례연구

본 연구에서는 RTS-24 계통 및 그림 2와 같은 일주일 부하를 사용하였으며, 오염물질배출량 특성 f_i 는 표 1과 같이 하였다.

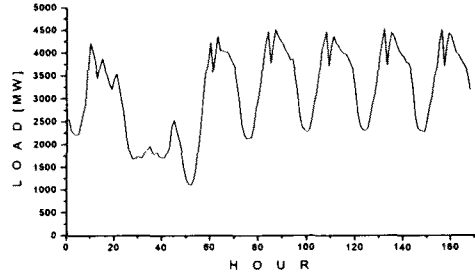


그림 2. 계통부하

표 1. 연료비당 오염물질 배출율

발전기	f_i	발전기	f_i	발전기	f_i	발전기	f_i
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

(1) 동적계획법에 의한 환경문제의 기간처리

종래의 개개 시간대별로 오염물질배출량제약을 만족시키는 방법[1]과 제안한 방법 중 정해진 기간에 대해 오염물질배출량제약을 만족시키는 방법에 대해 운전계획을 수립한 결과를 표 2에 나타내었다. 여기서, 종래의 방법은 오염물질배출량을 시간대로 나누어야 하기 때문에, 각 시간대별로 30[Ton/hr]이하로만 배출할 수 있도록 오염물질제약을 구성하였다. 또한, 제안한 방법은 종래의 방법과 비교하기 위하여, 종래방법에서 배출되는 오염물질배출량과 동일한 량의 오염물질을 배출하는 운전계획을 수립한 것이다.

표 2. 최적화결과

방 법	총연료비 [백만원]	오염물질 배출량[Ton]
종래의 방법[1]	8909.75	3732
제안한 방법	8746.42	3732

표 2로부터 30[Ton/hr]로 168시간동안 오염물질을 배출하면 총 5040[Ton]이 되나, 시간대별로 최대배출가능량

은 제한치 보다 작은 경우가 많기 때문에 실제의 배출량은 3732[Ton]이 된다. 일례로 시간대 1의 오염물질배출량은 9.7~18.2[Ton/hr]까지만 배출할 수 있기 때문에, 이 한도를 초과하여 배출할 수 없다. 따라서, 이 한도와 시간별 제한치를 고려하여 계산하면 오염물질배출량은 3732[Ton]을 배출할 수 있으며, 8909.75[백만원]의 총연료비용이 소요된다. 그러나, 같은 오염물질배출량 3732[Ton]을 기간제약인 식(3)으로 고려하면, 총연료비용이 8746.42[백만원]만 소요된다. 즉, 제안한 방법에 의해 163.33[백만원](1.8[%])의 연료비용을 절감할 수 있음을 알 수 있다.

(2) 파레토최적화

본 연구에서 제안한 방법으로 파레토최적해를 구한 결과를 그림 3에 나타내었다.

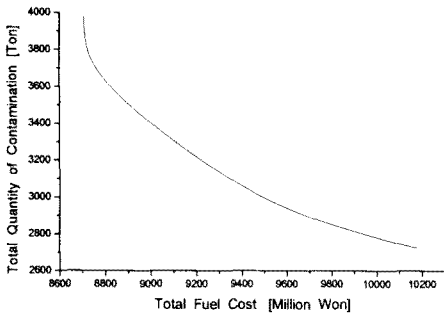


그림 3. 파레토최적화 결과

그림 3은 최적화문제의 최적해의 집합을 나타낸 것으로 이들 모두가 최적해라 할 수 있으며, 최적해는 총오염물질배출량이 3981[Ton](총연료비 8706[백만원])에서 2727[Ton] (총연료비 10178[백만원])까지 변화하고 있음을 나타내고 있다.

그림3으로부터, 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, 그림 3에서 총연료비 8800[백만원](배출량 3633[Ton]) 정도까지는 약간의 비용을 추가하면서도 용이하게 총오염물질배출량을 줄일 수 있음을 보여주고 있어, 상당히 합리적인 오염물질배출저감이 가능하다 하겠다. 또한, 식(3)의 총오염물질배출량제약을 앞의 3732[Ton]으로 제한하여야만 한다면, 그림 3에서 3732[Ton]을 초과하는 부분은 비가능해로 처리하면 되므로, 의사결정자가 쉽게 오염물질배출량 제한치 및 합리적인 저감치를 판단할 수 있도록 하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 파레토최적화를 얻을 수 있는 동적계획법을 개발하여, 오염물질배출량을 기간별로 적용할 수 있고, 또한 파레토최적화를 얻을 수 있도록 하였다. 제안한 동적계획법은 ① Stage로 시간대를, State로 누적오염물질배출량을 적용하여 운전기간동안 최소의 연료비용으로 오염물질배출량을 만족시킬 수 있도록 하였으며, ② 마지막시간대의 결과를 집합으로 처리하여 파레토최적화를 얻을 수 있도록 하여 결과의 집합을 사용하여, 의사결정자가 가장 합리적인 운전계획을 결정할 수 있도록 하였다. 즉, 의사결정자가 다양한 결과의 집합으로부터 연료비용과 오염물질배출량의 상관관계를 파악할 수 있도록 하여, 최상의 운전계획을 선택할 수 있도록 한 것이다. 제안한 방법을 RTS-24 시험제동에 적용하여, 기간별 오염물질배출량의 고려 및 파레토최적해의 특성을 파악할 수 있도록 하였으며, 이 결과로부터 의사결정을 할 수 있음을 보였다.

감사의 글

"본 연구는 한국과학재단 지정 동북아전자물류 연구센터의 지원으로 수행되었음"

[참 고 문 헌]

[1] T. Gjengedal, S. Johansen, O. Hansen, "A Qualitative Approach to Economic-Environmental Dispatch -Treatment of Multiple Pollutants", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.7, No.3, pp.367-372, 1992. 9.
 [2] A.J.Wood, B.F.Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", Wiley, 1984
 [3] David G. Luenberger, 'Linear and Nonlinear Programming', Addison Wesley
 [4] C. C. Su, Y. Y. Hsu, "Fuzzy Dynamic Programming: An Application to Unit Commitment", IEEE Trans. Power System, Vol.6, No.3, pp.1231-1237, 1991. 8.
 [5] B. S. Kermanshahi, Y. Wu, K. Yasuda, R. Yokoyama, "Environmental Marginal Cost Evaluation by Non-inferiority Surface", IEEE Trans. Power Systems, Vol.5, No.4, pp.1151-1159, 1990. 11.
 [6] B. S. Kermanshahi, Y. Wu, K. Yasuda, R. Yokoyama, "Environmental Marginal Cost Evaluation by Non-inferiority Surface", IEEE Trans. Power Systems, Vol.5, No.4, pp.1151-1159, 1990. 11.