'94 대한전기학회 추계학술대회 논문집(1994. 11. 18)

# 전력시스템 경제부하배분의 단발적 해법

이 봉 용, 심 건 보°
홍익대학교 공과대학 전기제어공학과

# A Single Step Solution of Economic Load Dispatch in Power System

Bong-Yong Lee, Keon-Bo Shim°
Hong-Ik University, Dept. of Electrical & Control

ABSTRACT

The economic operation in power systems has long been in keen interests for power system engineers. The classical equal incremental fuel cost rule is still the basis for it, even though more elaborate tools such as optimal power flow have been developed already. The classical method requires usually many iterations, while the optimal power flow shows often some difficulties. This paper suggests a single step solution based on the classical method revisited. The concept is shown graphically. Three sample systems are compared. The proposed approach has shown a single step solution regardless system sizes, while the conventional methods require many iterations.

## 1. 서 론

전력시스템에서 경제운용문제는 지난 50여년 동안 등증분 연료비법에 기초를 두고 있으며[1]-[3], 최근에 개발된 최적전력 조류계산법[4],[5],에서도 간혹 있을 수 있는 해의 불안정성때문에 [6], 산업체에서는 고전적인 운용방식을 선호하고 있다[7]. 고전적인 경제운용은 개념이 단순 명료하다는 장점을 가지고 있는 반면, 해에 이르기까지 상당한 반복계산이 필요하다는 불편함을 지니고 있다. 특히 최근에 전력시스템이 대규모화되어, 하나의 시스템에 연결되는 발전기의 수가 우리의 경우 100여대, 보다 큰 시스템에서는 수 100여대에 달한다는 점을 고려할 때, 발전기의 수가 증가할수록 발전출력배분을 위한 반복계산이 증가한다는 점때문에, 경제운용 해법의 개선이 요청된다. 특히 산업현장에서 경제운전이 매 4초마다 이루어지는 경우에 신속한 부하배분이 결정되어야 한다는 점에서 고속의 해법이 필요한 것이다.

본 연구에서는 시스템의 규모와 무관하게 매우 효율적인 경제운용의 해법을 제시한다. 뿐만 아니라 본 해법에서는 반복계산에서 사용되는 허용오차라는 개념이 사용되지 않는 정확한 해를 제공한다. 더구나 실질적으로 반복계산을 필요로 하지 않기 때문에, 해에 이르는 과정이 단발적(single step solution)이어서 계산의 효율성이 보장된다.

몇 개의 표본시스템에 대하여 기존의 방법들과 비교하여 제시된 방법의 유용성이 입증될 것이다.

## 2. 경제부하배분의 목적함수

화력발전시스템에 대한 경제운용의 목표는 각 발전소 운전 연료비의 합을 최소화하는 것으로서, 다음과 같이 요약된다.

$$\min\ F_T=\sum_{i=1}^{n} f_i=\sum_{i=1}^{n}(a_i+b_iP_{Gi}+c_iP_{Gi}^2)$$
$$\text{subject to}\quad \sum_{i=1}^{n} P_{Gi}=P_D \qquad (1)$$
$$P_{Gi}^{\max}\ge P_{Gi}\ge P_{Gi}^{\min}$$

여기서, $f_i$ : i 발전소의 운전비

$a_i, b_i, c_i$ ; 비용계수

$P_{Gi}$ : i 발전소의 출력

$P_D$ : 총 전력수요

$P_{Gi}^{\max}, P_{Gi}^{\min}$ : i 발전소의 상, 하한 출력

$n$ : 총 발전소의 수

식 (1)에 대한 라그란지안(LaGrangian)이

$$L=F_T-\lambda\left(\sum_{i=1}^{n} P_{Gi}-P_D\right) \qquad (2)$$

처럼 정의되며, $\lambda$는 라그란지 미정계수이다. 식 (2)는 $P_{Gi}$와 $\lambda$에 대하여 최소화된다. 그 결과

$$\frac{df_i}{dP_{Gi}}=\lambda$$
$$=b_i+2c_iP_{Gi},\qquad i=1,2,\cdots,n \qquad (3)$$

라는 협조방정식을 얻을 수 있으며, 이 식은 모든 발전소의 증분비용이 $\lambda$ 라는 시스템 증분비용에 같도록 운전해야 한다는 등증분연료비법칙을 나타낸다. 그러나 $\lambda$는 그 값을 미리 알 수 없기 때문에 초기치를 가정해야 하고, 이에 대한 각 발전기의 출력이 식 (3)에 따라 결정되며, 출력의 합이 총전력수요와 일치하지 않는 경우, $\lambda$를 재조정하여 발전출력의 합과 전력수요가 일치될 때까지 반복계산을 하게 된다. 그리고 이 과정에서 발전출력의 상,하한이라는 실제적인 제약조건을 추가해서 고려해야 한다.

## 3. 기존의 해법

$\lambda$의 값을 여하히 재조정해야 하는가가 문제로서, 가장 일반적인 해법의 두 가지는 다음과 같다.

그 첫번째는 $\lambda$ 증분법[2]이라고 부를 수 있는 방법인데, 임의의 $\lambda^0$에 대한 발전출력의 합과 전력수요와의 편차

$$\Delta P_D \equiv \sum_{i=i}^{n} P_{Gi} - P_D \tag{4}$$

의 크기에 따라 증분 $\Delta\lambda$를 결정하는 것이다. 즉

$$\Delta\lambda = \frac{\partial\lambda}{\partial P_{Gi}}\Delta P_{Gi} = \frac{df_i'}{dP_{Gi}}\Delta P_{Gi} = 2c_i\Delta P_{Gi}$$

$$\sum \Delta P_{Gi} = \frac{\Delta\lambda}{2}\sum\frac{1}{c_i} = \Delta P_D \tag{5}$$

$$\Delta\lambda = \frac{2\Delta P_D}{\sum\frac{1}{c_i}}$$

와 같다. 이 방법은 $\Delta P_D$에 상응하는 $\lambda$의 증분을 자동적으로 제공하기 때문에 매우 편리하고 쉽게 해을 찾아갈 것 같으나, 실제의 경험에 의하면 상당수의 반복계산이 불가피하다.

두번째는 뉴톤법이라고 부를 수 있는 방법[8]으로서, $\Delta\lambda$와 $\Delta P_{Gi}$의 값을 동시에 구한다는 점에서 차이가 있다. 각 발전소의 증분비용과 등호제약조건식으로부터 함수를

$$g_i = \frac{df_i}{dP_{Gi}} = b_i + 2c_iP_{Gi}$$

$$h = \sum P_{Gi} - P_D \tag{6}$$

처럼 정의한다. 그러면

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2c_1} & 0 & \cdots & 0 & -1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \frac{1}{2c_n} & -1 \\ 1 & \cdots & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{G1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta P_{Gn} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta g_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta g_n \\ \Delta h \end{bmatrix} \tag{7}$$

의 관계가 식 (2)의 최소조건으로부터 도출된다. 이 식은 원하는 증분량을 동시에 구할 수 있는 형태로서 매우 근사하게 보이나, 실제의 경험은 첫번째의 결과보다도 불만족스럽다.

## 4. 제안하는 해법

이상의 기존 해법에 대한 논의로부터 $\lambda$의 반복계산을 여하히 줄여야 하는가가 과제이다. 최적 증분비용 $\lambda^*$가 구해졌고, 이에 따라 최적 발전출력 $P_{Gi}$ 들이 결정되었다고 하자. 이 때, 발전기의 출력은 3개의 군으로 분류된다. 상한출력에 걸린 집합, 하한출력에 걸린 집합, 그리고 상,하한 출력에 걸리지 않은 집합이다. 그리고 발전출력의 합은 전력수요와 일치된다. 따라서

$$\begin{aligned} P_D = & \sum_{k\in S_f}\frac{1}{2c_k}(\lambda^* - b_k) \\ & + \sum_{j\in S_u}\frac{1}{2c_j}(\lambda_j^{\max} - b_j) \\ & + \sum_{m\in S_L}\frac{1}{2c_m}(\lambda_m^{\min} - b_m) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, $S_f$ : 제약조건에 걸리지 않은 발전기 집합

$S_u$ : 상한출력으로 운전되는 발전기 집합

$S_L$ : 하한출력으로 운전되는 발전기 집합

$\lambda^*$ : 시스템의 최적 증분비용

$\lambda_j^{\max}$: j 발전기의 상한 증분비용

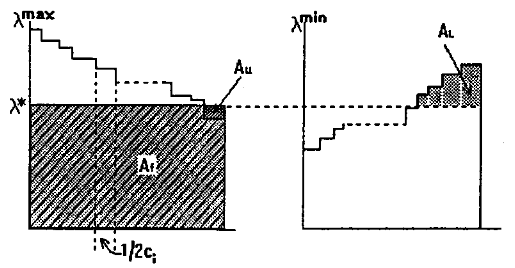
$\lambda_m^{\min}$: m 발전기의 하한 증분비용

의 관계식이 성립된다. 식 (8)은 다시

$$\begin{aligned} P_D' \equiv & P_D + \sum_{i=1}^{n}\frac{b_i}{2c_i} \\ = & \sum_{i\in S_f}\frac{\lambda^*}{2c_i} + \sum_{j\in S_u}\frac{(\lambda_j^{\max} - \lambda^*)}{2c_j} \\ & + \sum_{m\in S_L}\frac{(\lambda_m^{\min} - \lambda^*)}{2c_m} \end{aligned} \tag{9}$$

으로 정리된다. 식 (9)의 의미를 보다 상세하게 설명하기 위해서 그림 1에 경제부하배분의 개념을 제시한다.

그림 1에서 세 개의 면적 $A_f$, $A_u$ 및 $A_L$의 합($A_u$인 경우는 부의 값)이 전력수요 $P_D'$에 일치하도록 $\lambda^*$가 선정되어 있음을 볼 수 있다. 따라서 이러한 $\lambda^*$를 찾아낸다면 경제운용이 달성되는 것이다.




$$A_f = \sum_{i\in S_f}\frac{1}{2c_i},\ A_u = \sum_{j\in S_u}\frac{(\lambda_j^{\max} - \lambda^*)}{2c_j},\ A_L = \sum_{m\in S_L}\frac{(\lambda_m^{\min} - \lambda^*)}{2c_m}$$

그림 1. 경제부하배분의 개념도

산업현장에서 경제운전의 지령신호는 보통 매4초마다 전달되는 것이고, 1일 24시간의 운전기간동안에 21600회의 지령신호가 내보내진다. 그러므로, 그림 1에서 $\lambda_i^{\max}$의 모든 수준에 대한 경제운전시의 면적(총 전력수요)을 미리 구해서 데이터베이스로 저장해 둔다면, 임의의 부하수준에 대한 경제운전은 그 부하수준

보다 높고 낮은 두 개의 면적으로부터, 또는 두 개의 값으로부터 결정될 수 있다. 즉, 경제운전이 단발적이며 순시적으로 수행되는 것이다. 더구나 그림 1에 의하면 부등호 제약조건은 이미 만족되고 있음을 알 수 있으며, 또한 허용오차의 개념이 없이 정확한 면적(전력수요)이 구해질 수 있는 것이다.

## 5. 시뮬레이션에 의한 비교

세 개의 표본시스템에 대하여 경제부하배분의 시뮬레이션을 수행하였다. 화력발전기 5 대, 설비용량 1,000[MW], 부하 730[MW] 및 870[MW]인 시스템, 발전기 10 대, 설비용량 2625 [MW]이고, 부하 1,750[MW] 및 2280[MW], 그리고 발전기 62대, 설비용량 18,372[MW] 이고, 부하 16,430[MW] 및 13,780[MW]인 시스템이 대상이다. 표 1에 그 결과를 요약하였다.

표 1. 경제부하배분의 시뮬레이션 결과

ε=0.1[MW]

| 시스템 | 용량 [MW] | 부하 [MW] | 반복계산회수 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | λ증분법 | 뉴톤법 | 제시된 방법 |
| 5대 | 1,000 | 730 | 14 | 443 | 1 |
| | | 870 | 10 | 634 | 1 |
| 10대 | 2,625 | 1,750 | 170 | 1,337 | 1 |
| | | 2,280 | 36 | 1,261 | 1 |
| 62대 | 18,372 | 16,430 | 136 | 230 | 1 |
| | | 13,780 | 42 | 189 | 1 |

표 1에서 보는 바와 같이, 제시된 방법은 시스템의 규모나 부하수준에 상관없이 반복회수 단 1회로서 해를 얻고 있어서 단발적 초고속 해법이라고 할 수 있으며, 뉴톤법은 수식의 근사함에 비해서 상당히 많은 반복계산회수와 계산량을 필요로 한다는 점이 입증되었으며, λ증분법은 언제나 해를 구할 수는 있으나, 반복회수가 적지 않으므로 그대로 산업현장에서 사용하기에는 다소의 계산부담을 가지게 된다.

## 6. 결 론

전력시스템에서 가장 기본이 되는 경제부하배분의 문제를 근본적으로 재정리하였으며, 그 결과 매우 효율적인 해법을 제시하였고, 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1) 기존의 λ증분법은 대형시스템에서 그대로 사용하기에 많은 반복계산을 필요로 하며 개선이 요청된다.

2) 뉴톤법은 검토결과 상당히 많은 계산량과 반복계산을 필요로 한다는 점이 입증되어 개선이 요청된다.

3) 면적 개념을 도입한 새롭고 효율적인 초고속 경제부하배분 알고리즘을 제안하였다.

4) 제시된 방법은 시스템의 규모와 무관한 효율성을 보였으며, 단 1회에 정확한 해를 구함으로서, 단발적이며 초고속 해법임을 입증하였다.

5) 분기 또는 년간 운전시뮬레이션을 위해서 본 방법은 극히 효과적으로 활용될 수 있으며, 보다 개선된 결과의 도출에 기여할 것이 예상된다.

금후 본 알고리즘을 도입하여 송전손실까지 고려하는 전력시스템의 경제운용문제로 확장될 필요가 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

[1] H.H.Happ, "Optimal Power Dispatch-A Comprehensive Survey" IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, pp.841~854, 1977.
[2] A.J. Wood & B.F. Wollenberg, Power Generation, Operation and Control, John Wiley & Sons, 1984.
[3] F.L.Alvarado, "Penalty Factors from Newton's Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-97,pp. 2031~2040,1978.
[4] H.M.Dommel & W.F.Tinney, "Optimal Power Flow Solutions", IEEE Trans.on PAS, Vol.PAS-87, pp. 1866~1876, 1968.
[5] W.F.Tinney & D.I. Sun, "Optimal Power Flow: Research and Code Development", EPRI EL-4894, Project 1724-1, February 1987.
[6] W.F.Tinney, J.F.Bright, R.D.Demaree & B.A.Hughes, "Some Deficiencies in Optimal Power Flow", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 3, pp.676-683, 1988.
[7] Some Verbal Discussion with KEPCO Operation Staff in 1991.
[8] C.E. Lin, S.T. Chen & C.L. Huang, "A Direct Newton-Raphson Economic Dispach", 91 WM 186-7 PWRS, IEEE/PES 1991 Winter Meeting, New York, Feb. 3-7, 1991.