

선형계획법에 의한 효과적인 발전력재분배에 관한 연구

김준현* · 송현선** · 류승현***
 한양대학교* · 동양공업전문대학** · 한양대학교***

A Study on the effective Generation Rescheduling using Linear Programming

Kim, Joon-Hyun* · Song, Hyun-Seon** · Lyu, Seung-Heon***
 Hanyang Univ* · Dongyang Tech College** · Hanyang Univ***

1. 서론

주어진 제약조건을 만족하면서 총 운용비용이 최소가 되도록 발전기출력을 on-line으로 배분 및 제어하는 문제는 전력계통 운용의 중요한 과제중의 하나로, 주로 NLP(Non linear Programming)와 LP(Linear Programming)법에 의하여 해석되고 있다.¹⁻⁴⁾

NLP법은 LP법에 비하여 해의 정확도면에서는 우수하나 계산시간 및 해의 수렴성이 불안정하여 대전력계통이나 선로과부하의 발생빈도가 심각한 불안정한 계통(emergency system)의 과부하 해소를 위한 on-line제어에는 부적당하여 주로 LP법에 의한 각 발전기의 최적부하 배분방법이 최근 널리 이용되고 있는데,⁵⁾ Scott등은⁶⁾ 발전기출력의 변화량을 최소로 하면서 선로 과부하를 제거하였으나 계통의 sparsity특성을 고려하지 않고 발전력 재배분문제를 정식화 함으로써 계산기의 막대한 용량이 소요되어 과부하가 발생된 서로의 수를 제한하여야 하는 문제점을 가지고 있다.

또한, Chan과 Schweppe⁷⁾ 문제의 정식화과정에 여분의 변수(전압의 크기와 위상각)를 사용하여 SLP(Sparse Linear Programming)법으로 해석하였으나 LP의 규모(LP tableau size)가 크게 되었다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 상한기법(upper-bounding technique)과 듀얼 심플렉스법⁸⁾ 적용하여 해를 구하였으나 계산속도를 저해하는 문제점이 여전히 남게 된다.

본 연구는 이점에 착안하여 전압크기(Δ|V|), 위상각(Δθ) 및 부하차단량(ΔP^{LC})을 변수로 문제를 정식화 함으로써 sparse하고 간단한 LP모형이 되게 하였고, 여기에 하한기법(lower-bounding technique)과 쌍대법을 사용하여 해를 구함으로써 계산시간도 단축하였다.

2. 본론

2-1. 문제의 정식화

주어진 제약조건을 만족하면서 부하차단량을 고려하여 발전기 출력의 증분비용을 최소화하는 발전력 재배분문제를 선형화하여 정식화하였다.

(1). 전력 방정식의 선형화

분리법(decoupling technique)을 적용하여 2n개의 비선형 방정식을 선형화하면

$$\left[\left(\frac{\Delta P_G - \Delta P_L}{|V|} \right)_n \right] = [B'_{nn}] [\Delta \theta_n] \quad (1)$$

$$\left[\left(\frac{\Delta Q_G - \Delta Q_L}{|V|} \right)_n \right] = [B''_{nn}] [\Delta |V|_n] \quad (2)$$

단, ΔP_G, ΔQ_G : 발전기출력의 증분량
 ΔP_L, ΔQ_L : 모선부하의 증분량
 |V|, θ : 전압의 크기 및 위상각
 [B'_{nn}], [B''_{nn}] : n×n 어드미턴스 행렬

로 되고 부하차단량 ΔP^{LC}를 부하의 감소량으로, 모선전압의 크기를 1 [p.u], n번째 모선을 기준모선(Δθ_n=0, Δ|V_n|=0)으로 하면 식 (1) 및 식 (2)는 다음과 같아 된다.

$$[\Delta P_G]_n = [B'_{n(n-1)}] [\Delta \theta_{(n-1)}] - [\Delta P_n^{LC}] \quad (3)$$

$$[\Delta Q_G]_n = [B''_{n(n-1)}] [\Delta |V|_{(n-1)}] - [\Delta Q_n^{LC}] \quad (4)$$

단, ΔP^{LC} = -ΔP_L
 ΔQ^{LC} = -ΔQ_L

(2). 선로 조류제어

II형 등가회로에서, 송전선로 i-j를 통하여 흐르는 유요 전력 조류방정식은

$$P_{ij} = |V_i||V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - |V_i|^2 G_{ij} + |V_i|^2 G'_{ij} \quad (5)$$

단, G'_{ij} = 1/2 line charging conductance

로 되고, 분리법을 적용하여 식 (5)를 선형화하면 다음과 같아 된다.

$$\Delta P_{ij} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j \approx |V_i||V_j| B_{ij} \Delta \theta_{ij} \quad (6)$$

$$\text{단, } \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} = -\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} = M_{ij}k - G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij} \\ \cos \theta_{ij} \approx 1 \\ G_{ij} \sin \theta_{ij} \ll B_{ij}$$

식 (6)으로부터 모든선로 \$l\$ 에 대하여 선로 유효전력조류의 제약조건을 행렬로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\left[\left(\frac{P_B^{max} - P_B^0}{|V|} \right)_l \right] \leq [B_{l(n)}] [\Delta Q_n] \leq \left[\left(\frac{P_B^{max} - P_B^0}{|V|} \right)_l \right] \quad (7)$$

단, \$P_B\$: 선로의 유효전력조류
 \$P_B^0\$: 선로 유효전력조류의 초기값

(3). 전압과 발전기 출력의 제약
 전압의 제약은

$$[(V^{min})_n - (V^0)_n] \leq [V]_n \leq [(V^{max})_n - (V^0)_n] \quad (8)$$

로 되고 식 (3), (4)에 의하여 발전기 유효 및 무효 출력의 제약조건을 나타내면 다음과 같다.

$$[(P_g^{min} - P_g^0)_n] \leq [B_{n(n)}] [\Delta P_n] - [\Delta P_n^0] \leq [(P_g^{max} - P_g^0)_n] \quad (9)$$

$$[(Q_g^{min} - Q_g^0)_n] \leq [B_{n(n)}] [\Delta Q_n] - [\Delta Q_n^0] \leq [(Q_g^{max} - Q_g^0)_n] \quad (10)$$

(4). 부하차단 제약

부하차단량의 한계값을 유효분(\$P^{LC}\$)과 무효분(\$Q^{LC}\$)으로 나누어 표현하면

$$[\Delta P_n^{LC}] \leq [(P_n^{LC})] \quad (11)$$

$$[\Delta Q_n^{LC}] \leq [(Q_n^{LC})] \quad (12)$$

로 된다.

그러나 전력계통에서 \$P^{LC}\$와 \$Q^{LC}\$를 독립적으로 분리하여 차단시키는 것은 불가능하므로 power factor로 부터 상호관계를 나타내면

$$[\Delta Q_n^{LC}] = \left\{ \text{diag} \left(\frac{P_n^{LC}}{Q_n^{LC}} \right)_n \right\} [\Delta P_n^{LC}] \quad (13)$$

단, \$\text{diag} \left(\frac{P_n^{LC}}{Q_n^{LC}} \right)_n\$: 대각행렬

로 된다.

또한, 식 (13)으로부터 식 (10)은

$$\begin{aligned} [(Q_g^{min} - Q_g^0)_n] &\leq [B_{n(n)}] [V]_n - \left\{ \text{diag} \left(\frac{P_n^{LC}}{Q_n^{LC}} \right)_n \right\} [\Delta P_n^{LC}] \\ &\leq [(Q_g^{max} - Q_g^0)_n] \end{aligned} \quad (14)$$

로 표현되므로 \$\Delta Q^{LC}\$는 LP문제의 변수에서 제외시킬수 있어 간단한 모델이 된다

(5). 목적함수

부하의 차단을 고려한 발전기 출력의 재배분문제는 가장 경제적으로 계통의 과부하를 해소하기 위한 것으로 증분비용 \$f\$를 목적함수로 한다.

$$f = \sum_{i=1}^n (a_i \Delta P_{gi} + b_i \Delta Q_{gi} + c_i \Delta P_{li}^{LC} + c_i \Delta Q_{li}^{LC}) \quad (15)$$

여기서, \$a_i, b_i\$는 \$i\$모선에서 발전기 출력의 단위변화량에 대한 비용이고 \$c_i\$는 부하차단비용으로 유효분과 무효분이 같다고 가정하였다.

식 (3), (4)와 식 (13)을 식 (15)에 대입하여 행렬로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} f = & [a_n]^T [B_{n(n)}] [\Delta Q_n] + [b_n]^T [B_{n(n)}] [\Delta V_n] + [c - a_n]^T [\Delta P_n^{LC}] \\ & + [c - b_n]^T \left\{ \text{diag} \left(\frac{P_n^{LC}}{Q_n^{LC}} \right)_n \right\} [\Delta P_n^{LC}] \end{aligned} \quad (16)$$

2-2. 해법

하한기법에 의하여 제약조건식 (7), (8), (9), (11), (14)와 목적함수에 관한식 (16)을 수정한 다음, 듀얼 심플렉스법을 적용함으로써 제약조건의 수가 대폭 감소되므로 반복계산에 소요되는 시간을 단축시킬수 있다.

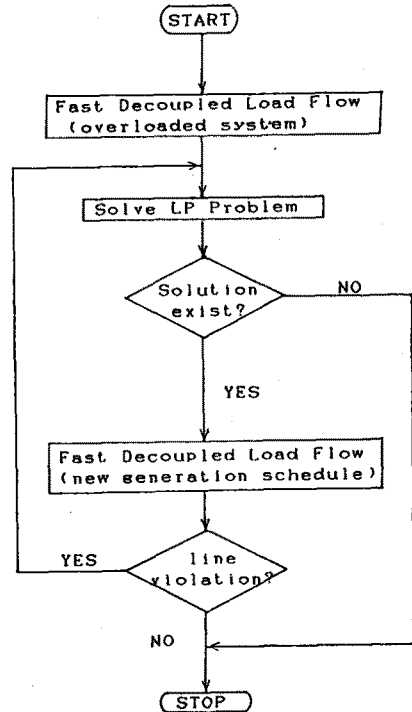


그림 1. 계획적인 계산흐름도

2-3. 사례연구

본 논문에서 제안한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 그림 2와 같은 5모선, 7선로 계통에 적용하고, 그 결과를 검토하였다.

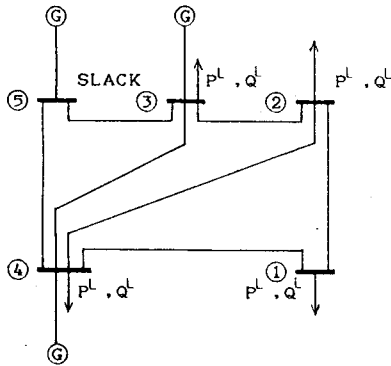


그림 2. 모델계통

표 1. 발전기 및 부하차단 비용계수

(단위: MW, MVAR)

모선번호	a_L	b_L	c_L	F_G^{min}	F_G^{max}	Q_G^{min}	Q_G^{max}
1			111.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2			120.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	22.8	22.8	130.0	0.0	110.0	-70.0	110.0
4	26.0	26.0	132.0	0.0	110.0	-72.0	110.0
5	21.0	21.0	129.0	0.0	110.0	-70.0	110.0

표 2. 발전기 출력을 재배열한 결과

(단위: MW, MVAR)

발전출력	초기값	결과값
P_{G3}	52.18	48.2067
P_{G4}	22.97	22.0276
P_{G5}	94.04	98.9557
Q_{G3}	3.92	3.92
Q_{G4}	70.95	-70.95
Q_{G5}	78.93	98.93

표 2는 송전선로 3에서 50%의 과부하가 발생한 경우에 대해 발전기 출력을 재배열한 결과이다.

3. 결론

본 연구에서는 전력계통의 안정운용 방안으로 경제성용 고려한 과부하 해소를 위한 발전력 재분배법을 제안하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1). power factor와 하한기법을 도입 적용하여 제약조건의 수를 줄임으로써 선로과부하가 심각한 불안정계통의 제어에 적합하게 되었다.
- 2). 목적함수의 최적화에는 듀얼 심플렉스법을 사용함으로써 계산시간을 단축시켰다.
- 3). 불안정 계통의 제어에서 2회에 걸쳐 발전력을 재배분한 결과 선로 과부하는 5%이내로 해소되었다.

참고 문헌

- 1) S.M.Chan and F.C.Schweppe, "A Generation Reallocation and Load Shedding Algorithm", IEEE Trans., Power Apparatus and System, Vol. PAS-98, No. 1, pp. 26-34, Jan./Feb. 1979.
- 2) B.Scott and J.L.Marinho, "Linear Programming for Power System Network Security Applications", IEEE Trans., Power Apparatus and System, Vol. PAS-98, No. 3, pp. 837-848, May/June 1979.
- 3) S.M.Chan and E.Yip, "A Solution of the Transmission Limited Dispatch Problem by Sparse Linear Programming", IEEE Trans., Power Apparatus and System, Vol. PAS-98, No. 3, pp. 1044-1053, May/June 1979.
- 4) C.M.Shen and M.A.Laughton, "Power System Load Scheduling with Security Constraints using Dual Linear Programming", Proc. IEE, Vol. 117, No. 11, pp. 2117-2127, Nov. 1970.
- 5) B.Fox and H.McCracken, "Load Curtailment Model for Economic Loading of Thermal Generation", IEE Proc., Vol. 129, Pt. c, pp. 233-238, Nov. 1982.