

송전선 혼잡 해소를 위한 발전력 재배분 기법 연구

정재옥, 이광호 단국대학교

A Study on The Generation Redispatch for Congestion Management of Transmission Lines

Jae-Ok Jung, Kwang-Ho Lee Dankook University

Abstract - Under an open transmission access, the generation dispatch is determined by the bidding process of market participants. Congestion occurs when the dispatch would result in the violation of operational constraints. Congestion problem is formulated and solved by OPF(optimal power flow) calculation. The objective functions in OPF are given as quadratic cost functions or piecewise linear functions of bidding functions. In this study, the optimization technique of generation dispatch is presented for the combination of two types of quadratic and linear cost functions.

1. 서 론

전력산업의 구조가 다수의 민영화 사업자들의 자율 경쟁 형태로 변화되면서 수직형태의 독점형 전력회사가 종합적으로 계통운용을 계획하는 기존의 방식에서 시장 경제 원리에 의한 경쟁형 발전계획 방식으로 바뀌고 있다. 경제성을 추구하는 발전사업자와는 달리 계통 운전자(System Operator)는 계통의 신뢰성과 안전성 등을 종합적으로 검토하여 경쟁형 발전시장을 조정할 필요가 있다. 이때 고려되어야 하는 사항중에 선로조류의 이상 여부를 검사하는 계통 안전성 문제가 중요하게 대두된다. 구조개편 하에서의 전력조류는 전력거래에 의해 발생하는 것이므로 선로의 이용이 밀집되는 경우 선로에서의 혼잡현상이 발생하게 되고 이는 계통 운전자에 의해 조정되어야 한다.[1-3]

이를 위해서는 입찰에 참여한 발전사업자들의 발전가격 정보와 계통의 제약조건을 고려하여 최적의 발전력 배분을 계산해야 한다. 최적조류계산(OPF)을 수행하면 최적의 발전력 배분은 물론 여러 가지 잠재가격 등이 계산된다. 발전비용 함수가 2차 형태이면 최적화 기법은 SQP(Sequential Quadratic Programming), IP(Interior Point) 등의 기법이 주로 사용되고, 구간별 1차의 발전비용 함수인 경우는 LP(Linear Programming) 형태로 변환하여 선형 형태의 IP 알고리즘이 주로 사용된다.[4] 본 연구에서는 발전비용 함수가 2차와 구간별 1차 형태로 혼합되어 있는 경우에 적용할 수 있는 최적화 알고리즘을 제안하고 사례연구를 통해 타당성을 검증한다.

2. 최적화 문제의 표현

발전력의 결정은 수급조건, 선로계약조건, 발전력 범위 등을 만족하면서 발전비용이 최소가 되도록 결정된다. 따라서 다음식(1)과 같은 최적화 문제로 표현된다.

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^m C_i(P_{Gi}) \tag{1a}$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^m P_{Gi} - \sum_{k=1}^n P_{Dk} - P_L = 0 \tag{1b}$$

$$P_i(P_{Gi}) \leq P_i^{\max} \tag{1c}$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \tag{1d}$$

식 (1a)에서는 발전기 i 의 발전비용 함수이며 발전력 (P_{Gi})에 $C_i(P_{Gi})$ 대한 2차 함수로 표현되거나 전력거래의 입찰시에 주로 나타나는 구간별 1차함수 형태가 된다.[5] 그림1은 두 가지 형태의 발전비용을 발전가격 함수로 나타낸 것이다. 또한 식 (1b)에서의 P_{Dk} 와 P_L 은 각각 k 모선에서 부하와 송전손실을 나타낸다. P_{Gi}^{\min} , P_{Gi}^{\max} 는 발전력의 하한과 상한값이고 P_i , P_i^{\max} 는 i 선로의 선로조류와 한계값이다. 선로조류 식은 발전력에 대해 선형화를 하거나 DC 조류계산식에 의한 선형 형태로 표현된다. 본 연구에서는 후자의 식을 사용한다.

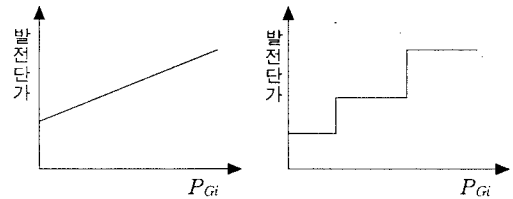


그림 1 발전 단가 함수
Fig. 1 Functions of Generation Price

식(1)의 라그랑지안 방정식은 라그랑지 승수 v , u 를 사용하여 다음식(2)과 같이 표현된다.

$$L(P_G) = \sum_{i=1}^m C_i(P_{Gi}) - v(\sum_{i=1}^m P_{Gi} - \sum_{k=1}^n P_{Dk} - P_L) + \sum_{i=1}^m u_i(P_i - P_i^{\max}) + \sum_{i=1}^m [u_i^{\min}(P_{Gi}^{\min} - P_{Gi}) + u_i^{\max}(P_{Gi} - P_{Gi}^{\max})] \tag{2}$$

여기서 v 는 전력수급조건에 해당되는 승수이고, u_i 은 송전선 혼잡에 대한 승수이고, u_i^{\min} , u_i^{\max} 는 발전력 최소값과 최대값에 대한 승수이다. 전력거래에서 특정 송전선의 사용이 집중되어 혼잡현상이 발생되면 발전력 재배분이 요구되고 이는 발전비용의 증가를 야기한다. 따라서 혼잡송전선의 사용에 대한 추가비용의 분담을 계산해야 하는데 이때에 라그랑지안 승수 u_i 가 사용된다.[5]

3. SQP 최적화 기법

SQP 기법은 목적함수를 2차 형태로, 제약조건을 1차 형태로 근사화하여 최적조건식을 계산하는 방식이다. 이러한 근사화로 인해 최종해는 반복계산을 통해 구해진다.

다. 본 연구에서 선형의 제약조건이 사용되지만 1차 함수로 주어지는 입찰 함수를 2차함수로 적용 근사화하기 때문에 반복계산을 수행해야 한다. 다음은 일반적 최적화 문제에 대한 SQP 해법을 소개한다.[4]

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & h(x)=0, \\ & g_i(x) \leq 0, \quad i=1, \dots, m \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)의 KKT 최적조건식에 대해 임의의 변수 (x_k, u_k, v_k) 에서 Taylor 전개를 적용하면 다음식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \nabla f(x_k) + \nabla^2 L(x_k)d + \nabla g(x_k)u + \nabla h(x_k)v &= 0 \\ u_i [g_i(x_k) + \nabla g_i(x_k)d] &= 0, \quad i=1, \dots, m \\ h(x_k) + \nabla h(x_k)d &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 L은 라그랑지안 방정식이고 $d = x - x_k$ 이다. 부등식 조건을 $g(x) = Ax + b \leq 0$ 라 하고 식(4)의 해를 구하면 다음식(5)과 같이 유도된다.

$$u = -[A'(C_d - \bar{C}^{-1})A]^{-1} * [A'(C_d - \bar{C}^{-1})f_x + g] \quad (5a)$$

$$v = (e'C^{-1}f_x + e'C^{-1}Au) / (e'C^{-1}e) \quad (5b)$$

$$d = vC^{-1}(e - Au - f_x) \quad (5c)$$

여기서 $C = \nabla^2 L(x_k)$, $C_d = C^{-1}e(C^{-1}e)' / (e'C^{-1}e)$, $e = [1, \dots, 1]'$ 이고 최종해는 $x = x_k + d$ 로 구해진다.

4. 입찰함수의 적용

전력거래의 입찰시에 사용되는 발전단가 함수는 그림1에서와 같이 계단형태의 함수로 주어진다. 이는 비용함수의 1차 형태가 되므로 SQP 기법을 직접 적용할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 2차 형태의 발전비용 함수와 동일하게 처리할수 있도록 2차 근사화하고 이 때 발생하는 오차는 SQP의 반복 계산으로 최소화하는 알고리즘을 제안한다.

다음 그림2는 입찰함수를 2차로 변형한 예를 보인다.

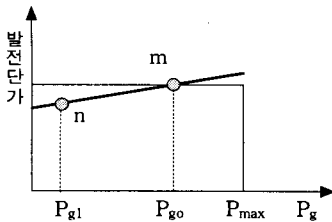


그림 2 입찰함수의 수정
Fig. 2 Modification of Bidding Function

초기 상태를 만족시키기 위해 변형된 1차의 가격 함수가 초기 발전력(P_{g0})과 가격의 좌표(m)를 지나도록 하고, 기울기는 임의의 작은값으로 고정시킨다. 사례연구에서는 2차 발전비용함수의 1/10 정도의 값을 사용하였다. 이와같이 수정된 목적함수에 대해 SQP를 적용하여 구해진 발전력(P_{g1})은 그림2에서의 좌표 n과 같이 원래의 입찰함수를 만족하지 않을 수가 있다. 따라서 이에 대한 보정을 해야 한다. 보정은 계산된 발전력(P_{g1})에서 원래의 입찰함수를 만족하도록 근사화 함수를 그림3에서와 같이 이동시켜 좌표 m'을 지나도록 한다. 이 때 기울기는 변화시키지 않는다.

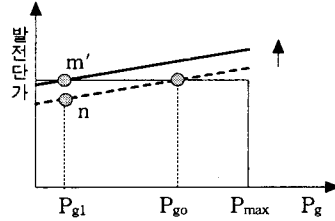


그림 3 입찰함수의 반복 수정
Fig. 3 Successive Modification of Bidding Function

이와 같이 SQP의 결과인 발전력 값을 이용하여 입찰 함수의 수정이 반복적으로 이루어진다. SQP의 반복과정을 통해 입찰함수 수정의 기준점(m, m' 등)은 한점으로 수렴하게 된다. 이러한 반복 수정은 2차함수에서 1차항의 계수만을 조정하는 것이므로 수렴은 빠르게 이루어진다.

5. 사례 연구

5.1 대상 계통

사례연구는 다음 그림4와 같이 5모선 7선로 계통[6]에 적용하였다. 선로 데이터는 표1, 발전기 데이터는 표2와 같다. 발전기1과 2는 2차의 연료비 함수 형태이고 발전기3과 4는 구간별 입찰 함수 형태로서 그림5와 같다. 부하는 L2=20, L3=20, L4=50, L5=60MW이다.

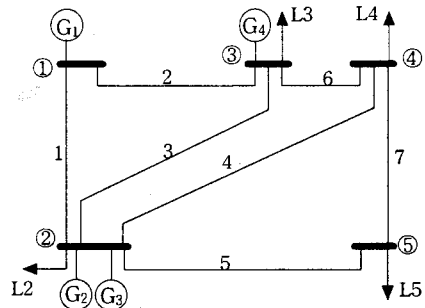


그림 4 사례연구 대상 계통
Fig. 4 Sample System for Case Study

표 1 선로 데이터와 선로조류
Table 1 Line Data and Line Flows

선로	1	2	3	4	5	6	7
X pu	0.06	0.24	0.18	0.18	0.12	0.03	0.24
최대용량 [MW]	20	20	20	10	60	60	20
초기상태 선로조류	26	14	10	17.33	48.67	44	11.3

표 2 발전기 연료비 함수(2차 형태)
Table 2 Quadratic Cost Functions

발전기	상, 하한	연료비 함수
G1	10, 85	$200 + 7.0 P_{G1} + 0.008 P_{G1}^2$
G2	10, 80	$180 + 6.5 P_{G2} + 0.009 P_{G2}^2$

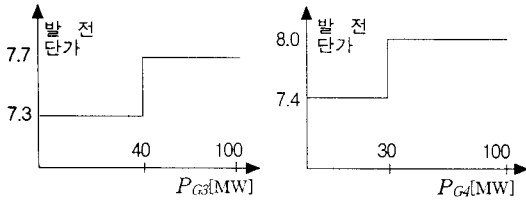


그림 5 발전력 입찰 함수 (G3, G4)
Fig. 5 Bidding Functions of Generator 3 and 4

5.2 적용 결과

구간에 따라 정의되는 입찰함수는 일반적으로 구간별 독립적 발전기로 간주한다. 발전기 3과 4는 각각 2개씩의 발전기로 다루어지므로 전체 6개의 발전기로 정식화되며 SQP를 적용하기 위한 발전력 초기값, $x_1 \sim x_6$ 는 각각 40, 40, 20, 10, 30, 10 MW로 정하였다.

초기상태에서의 DC 조류계산 결과 선로조류는 표1에서와 같으며 선로1과 4에서 용량을 초과함을 알 수 있다. 각 발전력에 대한 각 선로에서의 조류 감도를 계산하면 다음 표3과 같다.

표 3 선로조류 감도
Table 3 Sensitivities for Line Flows

선로	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	0.7857	-0.0571	-0.0571	-0.0571	0.1571	0.1571
2	0.2143	0.0571	0.0571	0.0571	-0.1571	-0.1571
3	0.0238	0.0952	0.0952	0.0952	0.2619	-0.2619
4	0.0635	0.1206	0.1206	0.1206	-0.1651	-0.1651
5	0.6984	0.7270	0.7270	0.7270	0.5841	0.5841
6	0.2381	0.1524	0.1524	0.1524	0.5810	0.5810
7	0.3016	0.2730	0.2730	0.2730	0.4159	0.4159

기울기를 0.001로 하였을 때의 수정된 입찰함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f(x_3) &= 7.28 * x_3 + 0.0005 * x_3^2 \\
 f(x_4) &= 7.69 * x_4 + 0.0005 * x_4^2 \\
 f(x_5) &= 7.37 * x_5 + 0.0005 * x_5^2 \\
 f(x_6) &= 7.99 * x_6 + 0.0005 * x_6^2
 \end{aligned} \quad (6)$$

이와같은 2차형태의 목적함수에 SQP를 적용하면 발전력과 라그랑지안 승수는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 x_1 \sim x_6 &: 25.63, 43.99, 11.85, 0, 30, 38.53 \\
 u_1 \sim u_4 &: 0.03627, 2.60570, 0.39815, 0.62853 \\
 v &: 7.60403
 \end{aligned}$$

여기서 u_1, u_2 는 선로1, 4에서의 부등식 제약조건에 대한 승수이고 u_3, u_4 는 x_4 의 하한값, x_5 의 상한값에 조건에 해당하는 승수이다. v 는 수급조건에 대한 승수로서 시스템 λ 와 같은 것이다. 이 값을 기준으로 입찰함수를 수정하면 식(6)에서의 1차항 계수는 각각 7.28815, 7.7, 7.37, 7.96 이 된다. 수정된 목적함수에 다시 SQP를 적용한 결과 발전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x_1 \sim x_6 &: 25.63, 44.42, 11.42, 0, 30, 38.53 \\
 u_1 \sim u_4 &: 0.03687, 2.47926, 0.40043, 0.60000 \\
 v &: 7.59646
 \end{aligned}$$

이 값을 기준으로 입찰함수를 수정한 결과 x_3 의 입찰함수만이 1차항 계수가 7.28858 로서 10^{-4} 정도의 차이를 보인다. SQP에 적용하면, 발전력은 다음과 같으며 이는 최적해와 10^{-3} MW 정도로 일치하는 결과이다.

$$\begin{aligned}
 x_1 \sim x_6 &: 25.63, 44.44, 11.40, 0, 30, 38.53 \\
 u_1 \sim u_4 &: 0.03727, 2.47815, 0.40000, 0.60000 \\
 v &: 7.59671
 \end{aligned}$$

따라서 발전기 G1~G4의 최적발전력과 이때의 한계비용을 나타내면 다음 표4와 같다.

표 4 최적발전력과 한계비용
Table 4 Optimal Dispatch and Marginal cost

발전기	G1	G2	G3	G4
발전력	25.6291	44.4444	11.3966	68.5300
한계비용	7.41	7.3	7.3	8.0

이때의 조류계산 결과, 각 선로의 선로조류는 다음 표5와 같이 선로1, 4을 포함한 모든 선로에서 한계범위 내에 존재함을 알 수 있다.

표 5 OPF 결과의 선로조류
Table 5 Line Flows of OPF Results

선로	1	2	3	4	5	6	7
선로조류	20	5.6	0.8	10	45	55	15

이와 같이 3회의 SQP 적용으로 전체 변수에서 10^{-3} 정도의 오차를 나타내었으며 문제의 형태를 2차 목적함수와 1차의 제약조건으로 통일시킴으로써 SQP 기법을 효과적으로 활용할 수 있게 된다.

6. 결 론

본 연구에서는 경쟁적 전력거래에서 필수적인 혼잡처리시에 발생하는 발전력 재배분 계산 기법에 새로운 알고리즘을 제안하였다. 최적조류계산에 의해 최적의 발전력 배분과 잠재가격 등이 구해지지만 정식화의 형태에 따라 계산이 용이하지 않는 단점이 있다. 목적함수로서 2차 형태의 발전비용 함수와 구간별 선형 형태인 입찰함수가 혼재되어 있는 경우 최적화 계산 기법의 적용이 복잡해진다. 본 연구에서는 입찰함수를 2차 근사화하고 제약조건을 선형화하여 SQP 기법을 적용하고 계산된 결과를 이용하여 입찰함수를 반복 조정하는 알고리즘을 제안하였다. 최적화 기법 중 적용이 간단한 SQP 기법을 일관된 방식으로 적용할 수가 있으며 수렴성이 우수한 장점을 확인하였다.

본 연구는 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음

(참 고 문 헌)

- [1] S. Hunt, G. Shuttleworth, *Competition and Choice in Electricity*, John Wiley & Sons, 1996.
- [2] H. Singh, A. Papalexopoulos, "Transmission Congestion Management in Competitive Electricity Markets," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.2, pp.672-680, May 1998.
- [3] T.W. Gedra, "On Transmission Congestion and Pricing," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.14, No.1, pp.241-248, February 1999.
- [4] M.S. Bazaraa, H.D. Sherali, C.M. Shetty, *Nonlinear Programming*, John Wiley & Sons, 1993.
- [5] J.D. Finney, H.A. Othman, W.L. Rutz, "Evaluation Transmission Congestion Constraints in System Planning," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.3, pp.1143-1148, August 1997.
- [6] H. Suddat, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1999.