내점법에 의한 선로 전력 조류 제약을 고려한 경제급전에 관한 연구

김경신*, 이승철*, 정인학**
*중앙대학교 전기공학과, **인천폴리텍II대학 전기계측학과

Security Constrained Economic Dispatch based on Interior Point Method

Kyoung-Shin Kim, Seong-Chul Lee, Leen-Hark Jung <글씨 크기 9 Point, 글씨체 신명 세나루>
*Dept. of Electrical Engineering Chung-Ang Univ, **Dept. of Electric Measurement & Control Engineering Incheon Polytech College

Abstract - 본 논문에서는 선로 전력조류제약을 고려한 경제급전(SCED : Security-Constrained economic dispatch)에 내점 선형계획법을 이용하여 최적해를 구하는 문제를 다룬다. 최적전력조류(Optimal Power Flow)식으로부터 선로의 유효전력만을 근사화하여 선로 전력조류 제약을 고려한 경제급전(SCED)의 식을 정식화한다. 선형계획법을 적용하여 최적해를 구하기 위해서 발전기출력과 유효전력, 부하, 손실과의 관계를 이용하여 경제급전의 식을 선형화 하는 알고리즘을 제시한다. 선형화 알고리즘은 목적함수로 계통 발전기의 총 연료비를 취하고 전력수급평형식으로 발전기출력증분에 대한 선로의 증분손실계수를 이용하며, 선로의 제약조건은 일반화발전분배계수(GGDF : Generalized Generation Distribution Factor)를 이용하여 선형화한다. 최적화 기법으로서 내점법(Interior Point Method)을 적용하고자 하며 사례연구를 통하여 선형계획법 중 가장 많이 사용하는 심플렉스(Simplex)법과의 수렴특성을 비교하여 내점법의 효용성을 확인하고자 한다.

1. 서 론

Security-Constrained Economic Dispatch(SCED)은 전력계통에서 선로와 발전기의 제약조건을 만족시키면서 발전기들의 최적 경제 배분을 다루는 것이다. 이 SCED Problem을 풀기위한 많은 알고리즘들이 제안되었는데 linear programming, quadratic programming, newton raphson techniques등이 있다. 그러나 계통의 규모가 커짐에 따라 보다 빠르게 수렴하고 신뢰할 수 있는 안정된 최적화 기법이 요구되고 있다. 연속선형계획법(SLP, Successive Linear Programming)은 조류계산의 해를 구하고, 계통의 선형증분모델을 만들고, 선형화된 최적화 문제를 풀게 된다. 그래서 몇 번의 반복후에 정확한 해에 수렴하게 된다. 보통 LP sub-problem은 simplex법이나 수정된 simplex법을 이용하여 풀게 된다. LP의 해를 구하는데 드는 계산시간은 계통의 크기나 제약조건에 따라 증가한다. 따라서 빠른 LP technique를 이용하면 SLP 알고리즘의 효능은 크게 증가할 것이다. 1980년대 초에 Karmarkar에 의해 LP를 푸는 새로운 방법이 제안되었는데 simplex법과 달리 가능해영역의 내부를 가로질러 최적해를 찾는 방법으로 이를 IP(Interior Point)법이라 한다. 본 논문에서는 OPF(Optimal Power Flow)에서 SCED의 식을 유도하고, 최근에 개발된 IP법에 대해 설명하고자 한다. 그리고 SLP의 수렴특성에 대해 알아보고, 마지막으로 SCED문제에 simplex법과 IP법을 적용하여 비교하고자 한다.

2. 본 론

2.1 선로조류제약을 고려한 경제급전의 정식화

선로 전력조류제약을 고려한 경제급전(SCED)은 전력 수급 평형식, 선로와 발전기의 제약조건을 만족시키면서 총 발전비용이 최소화되도록 각 발전기와 부하를 배분 하는 것이다. 따라서 이의 최적조류제어를 위한 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{목적함수} \quad Min.\left\{C_t = \sum_{i\in G} C_i(P_i)\right\} \tag{1-a}$$

$$\text{제약조건} \quad \sum_{i\in G} P_i = P_D + P_L \tag{1-b}$$

$$P_i^m \le P_i \le P_i^M, \qquad i\in G \tag{1-c}$$

$$|S_l| \le S_l^M, \qquad l\in T \tag{1-d}$$

$$V_k^m \le V_k \le V_k^M, \qquad k\in N \tag{1-e}$$

$$Q_i^m \le Q_i \le Q_i^M, \qquad i\in G \tag{1-f}$$

여기서, $C_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2$

C_t : 총 연료비용, C_i : 각 발전기 i의 연료비

P_i : 각 발전기 i의 유효출력, Q_i : 각 발전기 i의 무효출력

P_D : 계통의 총 부하, P_L : 계통의 총 손실

V_k : 모선 k에서의 전압, S_l : 선로 l를 흐르는 피상전력

N, G, T : 각각 총 모선수, 발전기 모선수, 선로수

위 식에서 계통의 최적 운전점은 모선 및 선로의 무효전력에 별로 영향을 받지 않으며, 식(1-e)와 (1-f)에서 제약조건의 위반시 지역변전소나 부하중심지에서 무효전력을 제어할 수 있기 때문에 무효전력분은 무시하고 선로의 제약조건은 선로의 유효전력만으로 근사화시켜도 지장 없다. 결과적으로 선로 전력조류 제약을 고려한 경제급전 (SCED)의 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{목적함수} \quad Min.\left\{C_t = \sum_{i\in G} C_i(P_i)\right\} \tag{2-a}$$

$$\text{제약조건} \quad \sum_{i\in G} P_i = P_D + P_L \tag{2-b}$$

$$P_i^m \le P_i \le P_i^M, \qquad i\in G \tag{2-c}$$

$$|F_l| \le F_l^M, \qquad l\in T \tag{2-d}$$

여기서, F_l은 선로 l에 흐르는 유효전력

2.2 선로조류제약을 고려한 경제급전의 선형화 알고리즘

선형화는 다음과 같은 식에 의해 이루어진다.

1) 선로에 흐르는 유효전력과 발전기 출력과의 관계를 나타내기 위해 GGDF(Generalized Generation Distribut- ion Factor : $\beta_{i,l}$)을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_l = \sum_{i\in G} \beta_{i,l} P_i \tag{3}$$

2) 전력수급평형식을 고려하면,

$$\sum_{i\in G} P_i = P_D + P_L \tag{4}$$

여기서, P_D는 계통의 총 부하, P_L는 계통의 손실을 나타낸다.

식 (4)에서 만약 부하가 일정하다면 발전량의 미소한 변화는 손실의 변화로 나타날 것이다. 따라서,

$$\Delta P_L = \sum_{i\in G} \Delta P_i \tag{5}$$

3) 선로의 손실과 발전기 출력과의 관계를 나타내기 위해 ITLF(Incremental Transmission Losses Factor :γ_i)를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_L = \sum_{i\in G} \gamma_i \Delta P_i \tag{6}$$

위 1)식을 이용하면 다음과 같이 선형화된 식을 얻을 수 있다.

$$Min \ \left\{\Delta C_t = \sum_{i\in G} (b_i + 2c_i P_i^r)\Delta P_i\right\} \tag{7}$$

$s.t.$

$$\sum_{i=1}^{n} (1-\gamma_i^r)\Delta P_i = 0, \qquad i\in G \tag{8}$$

$$\Delta P_i^m \le \Delta P_i \le \Delta P_i^M, \qquad i\in G \tag{9}$$

$$\sum_{i\in G} \beta_{i,l} \Delta P_i \le \Delta S_l^M, \qquad i\in L \tag{10}$$

여기서, $\Delta P_i^m, \Delta P_i^M$은 ΔP_i의 step bound이다. 이 step bound는 각 발전기에 허용되는 변화량을 제어하는 것으로 이 값은 SLP 알고리즘의 수렴에 중요한 역할을 한다.

3. 내점법(Interior Point Method)

Karmarkar가 IP법을 제안한 이후 여러 변형된 방법들이 제시되었는데 본 논문에서는 그중에서 1989년에 Alder, Resende, Veiga, Karmarkar에 의해 제안된 Dual Affine Scaling(DAS)법에 대해 설명할 것이다.

3.1 내점법의 구현

LP의 표준형은,

$$Min \quad b^T y \tag{11}$$

$s.t.$

$$A^T y = c \quad (12)$$
$$y \geq 0 \quad (13)$$
위 식을 dual linear programming 으로 나타내 보면,
$$Max \quad c^T x \quad (14)$$
s.t.
$$Ax \leq b \quad (15)$$
여기서, c와 x는 n-vectors, b는m-vectors, A는 full rank$m \times n$ matrix, $m \geq n$이고 $c \neq 0$ 이다.
slack variable v을 도입하면,
$$Max \quad c^T x \quad (16)$$
s.t.
$$Ax + v = b \quad (17)$$
$$v \geq 0$$
초기값을(x^0, v^0)라 하면, 이 초기값은 물론 위의 제약조건을 만족해야 한다. 즉,
$$v^0 \geq 0 \ , \ Ax^0 + v^0 = b \quad (18)$$
x와 v의 방향벡터를 각각 h_x , h_v라 하고, step size를 α라 한다면, 반복계산후 얻어지는 값은
$$x = x^0 + \alpha h_x \quad (19a)$$
$$v = v^0 + \alpha h_v \ , \quad v \geq 0 \quad (19b)$$
새로 얻어진(x,v)는 물론 (17)식을 만족해야 하고 또한 목적함수의 값을 개선시켜야 한다. 따라서,
$$c^T x \geq c^T x^0 \quad (20a)$$
$$Ax + v = A(x^0 + \alpha h_x) + (v^0 + \alpha h_v) = b \quad (20b)$$
$Ax^0 + v^0 = b$ 이므로, 식 (20b)는,
$$Ah_x + h_v = 0 \quad (21)$$
$$h_v = -Ah_x \quad (22)$$
slack variable v에 scaling operation을 적용하기 위해 우선 diagonal scaling matrix는,
$$D = diag(v_1, \ldots, v_m) \quad (23)$$
그러면 scaled slack variable v'는
$$v' = D^{-1} v \quad (24)$$
이를 이용하여 방향벡터 h_x와 h_v를 구해보면,
$$h_x = (A^T D^{-2} A)^{-1} c \quad (25)$$
$$h_v = -Ah_x \quad (26)$$

3.2 내점법의 계산 알고리즘

i) 초기 가능해 x^0를 구하고, $0 < \rho < 1$인 상수 ρ과 허용오차 ϵ값을 정한다
ii) 최저판정
$\frac{|c^T x^k - c^T x^{k-1}|}{\max\{1, |c^T x^k|\}} \leq \epsilon$ 이면 최적해를 찾았기 때문에 종료하고, 그렇지 않으면 단계 iii)으로 간다.
iii) slack variable의 값을 계산 $v^k = b - Ax^k$
iv) diagonal matrix를 구한다
$$D_k = diag(v_1^k, \ldots, v_m^k)$$
v) 방향벡터 h_x와 h_v를 구한다
$$h_x = (A^T D_k^{-2} A)^{-1} c$$
$$h_v = -Ah_x$$
vi) step size를 구한다
$$\alpha = \rho \times \min\{-v_i^k / (h_v)_i | (h_v)_i \leq 0, i = 1, \ldots, m\}$$
vii) 새로운 interior point를 구한다
$$x^{k+1} = x^k + \alpha h_x$$
Go to ii)

4. 사례연구

본 논문에서 제시한 선로 전력조류제약을 고려한 경제급전(SCED) 방식의 효용성을 입증하기 위하여 모델계통으로 IEEE 6기 30모선 계통을 선정 적용하였으며, 경제급전의 최적화 기법으로는 내점선형계획을 사용하고 그 수렴특성을 Simplex법과 비교하고자 한다.

4.1 운전조건

IEEE 6기 30모선 41선로 모델 계통의 발전기 출력은 전력손실을 무시한 경제 출력 배분 후 조류계산 결과 총 연료비용은806.34(R/h) 이었다. 선로제약은 초기운전조건에 따른 조류계산 결과로부터 얻은 전력조류를 기준으로 선로용량(가정치)을 초과한 선로를 택하여 경우Ⅰ과 경우Ⅱ로 구분하여 표1에 나타내었다.

<표 1> 선로 전력 조류 제약

구분	선로 번호	모선 부터	모선 까지	선로조류 [MW]	선로제약용량 [MW]
경우 Ⅰ	1	1	2	131.338	120
경우 Ⅱ	1	1	2	131.338	120
	5	2	5	66.468	60

4.2.2 경제급전 운용결과 및 계산결과

선로제약조건은 경우Ⅰ일때는 1번선로를 120[MW]로 제약하였으며, 이때 등식제약조건(1), 모선제약조건(6*2=12), 선로제약조건(1)이며, 경우Ⅱ는 1번선로는 120[MW], 5번선로는 60[MW]로 제약하였다. 이때 등식제약조건(1), 모선제약조건(6*2=12), 선로제약조건(2)이다. 심플렉스법과 내점법에 의한 최적제어 경제급전결과는 경우Ⅰ,Ⅱ 모두 각 발전기출력과 총 연료비용은 거의 같았으며, 총 실행시간은 경우Ⅰ일때 내점법이 심플렉스법의 71.7% 로 28.3% 단축되었으며, 경우Ⅱ일때는 71.2%로 28.8% 단축되었음을 알 수 있다.

<표 2> 선로 전력 조류 제약을 고려한 경제급전 결과

구분	모선번호	발전기번호	발전기 출력량[MW] Simplex법	발전기 출력량[MW] 내점법
경우 Ⅰ	1	1	182.0249	182.0249
	2	2	60.9206	60.9203
	5	3	19.1242	19.1242
	8	4	10.0000	10.0000
	11	5	10.0000	10.0000
	13	6	12.0000	12.0000
	총연료비용[R/h]		807.2745	807.2734
	총실행시간[sec]		2.30	1.65
	상대속도(내점법/Simplex)		0.717	
경우 Ⅱ	1	1	178.9374	178.9372
	2	2	50.4779	50.4778
	5	3	31.7018	31.7018
	8	4	10.0000	10.0000
	11	5	10.0000	10.0000
	13	6	12.0000	12.0000
	총연료비용[R/h]		810.8201	810.8190
	총실행시간[sec]		2.33	1.66
	상대속도(내점법/Simplex)		0.712	

3. 결 론

본 논문은 전력계통의 경제운용을 위해 선로 전력조류제약을 고려한 경제급전에 대해서 기술하였다. 선로 전력조류제약을 고려한 경제급전의 정식을 유도하였으며, 일반화발전분배계수와 증분선로손실계수를 이용한 선형화 방법을 제시하였다. 그리고 선형계획법의 최적화 기법으로 최근 각광받고 있는 내점법을 이용하여 선로 전력조류제약을 고려한 경제급전의 최적해를 구했으며, 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 Simplex법과의 비교를 통하여 내점법의 빠른 수렴특성을 입증하였다.
본 논문에서 제시한 내점법을 IEEE 6기 30모선 계통의 선로 전력조류제약을 고려한 경제급전에 적용하였다. 그리고 Simplex법과 비교해본 결과 최적해에 도달했을 때 Simplex법을 사용 했을 때 나 내점법을 사용했을 경우 총 연료비용에는 크게 차이가 없지만 총 실행시간은 내점법을 사용하였을 때가 훨씬 빠르게 나타났다.
계통의 규모와 선로의 전력조류제약수와 제약위반정도에 따라 수렴시간의 차이가 있으며, 만약 수많은 제약조건을 갖고 있는 대규모 계통에 적용된다면 그 차이는 더 크게 나타날 것이고 내점법이 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] Ng W. Y., "Generalized Generation Distribution Factors for Power System Security Evaluation", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 3, pp, 1001-1005, 1981
[2] Adler, I., Resende, M, Veiga, G. and Karmarkar, N. "An Implementation of Karmarkar's algorithm for linear programming", Mathematical Programming 4, pp. 297-335, 1989
[3] Luis S. Vargas, Victor H. Quintana and Anthony Vanneli, "A Tutorial Description of an Interior Point Method and its Application to Security Constrained Economic Dispatch", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1315-1324, 1993
[4] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw Hill, New York, 1999