

Primal Interior Point 법에 의한 경제급전

정인학 조양행 박규홍
 인천기능대학 영동대학 대림대학

Economic Dispatch based on Primal Interior Point Method

Leen-Hark Jung Yang-Haeng Cho Kyu-Hong Park
 InCheon P. T. College YeungDong College DaeLim College

Abstract - This paper presents a technique that can obtain an optimal solution for the Security-Constrained Economic Dispatch (SCED) problems using the Interior Point Method (IPM) while taking into account of the power flow constraints. The SCED equations are formulated by using only the real power flow equations from the optimal power flow. Then an algorithm is presented that can linearize the SCED equations based on the relationships among generation real power outputs, loads, and transmission losses to obtain the optimal solutions by applying the linear programming (LP) technique.

Finally, the application of the Primal Interior Point Method (PIPM) for solving the optimization problem based on the proposed linearized objective function is presented. The results are compared with the Simplex Method and the promising results are obtained.

1. 서 론

전력계통의 기본목표는 수용가에서 요구하는 양질의 전기를 충분히 공급함과 동시에 경제성향상을 추구함에 있다.

최근, 산업구조의 다변화와 경제의 지속적인 성장으로 전력수요가 증대되고 전력계통운용은 한층 복잡해지고 운용조건 측면에서 많은 악화요인이 발생되어 선로의 전력조류의 제약등 여러 가지의 제약조건이 발생할 수 있다. 따라서 선로의 전력조류제약을 고려함과 동시에 선로손실을 고려한 발전소의 총연료비를 최소화하는 전력계통의 합리적인 운용제어가 필요하다. 전력계통의 최적조류제어 방법으로는 비선형계획법, 2차계획법, Newton based solutions, 선형계획법, 내점법등의 다양한 최적화기법이 적용되는데, 문제의 성격이나 요구되는 정확도 등에 따라 사용되는 최적화기법에 차이가 있다. [1][2][3]

1980년대초에 Karmarkar에 의해 선형계획법을 풀이하는 새로운 방법이 제안되었는데 심플렉스법과는 달리 가능해 영역의 내부를 가로질러 최적해를 찾는 방법으로 내점법 (Interior Method)을 제안하였다. [4]

현재 빠르게 수렴하고 신뢰할 수 있는 최적화 기법으로 내점법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. [5]~[9]

본 논문에서는 선로 전력조류제약을 고려한 경제급전 (SCED: Security-Constrained economic dispatch)에 내점 선형계획법을 이용하여 최적해를 구하는 문제를 다룬다.

먼저, 최적조류제어를 구하는 식으로부터 선로의 유효전력만으로 근사화함으로써 선로 전력조류 제약을 고려한 경제급전(SCED)의 식을 정식화한다. 선형계획법을 적용하여 최적해를 구하기 위해서 발전기출력과 유효전

력, 부하, 손실과의 관계를 이용하여 경제급전의 식을 선형화 하는 알고리즘을 제시한다.

선형화 알고리즘은 목적함수로는 계통 발전기의 총 연료비를 취하고 전력수급평형식으로 발전기출력증분에 대한 선로의 증분손실계수를 이용하며, 선로의 제약조건은 일반화발전분배계수(GGDF: Generalized Generation Distribution Factor)를 이용하여 선형화한다.

최적화 기법으로서 주내점선형계획법(primal interior method)을 적용하고자 하며 사례연구를 통하여 선형계획법중 가장 많이 사용하는 심플렉스(Simplex)법과의 수렴특성을 비교하여 주내점법의 효용성을 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1 경제급전의 정식화

선로 전력조류제약을 고려한 경제급전(SCED)은 전력 수급 평형식, 선로와 발전기의 제약조건을 만족시키면서 총 발전비용이 최소화되도록 각 발전기 와 부하를 배분 하는 것이다.

따라서 이의 최적조류제어를 위한 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

$$P_i^m \leq P_i \leq P_i^M, \quad i \in G \quad (1-c)$$

$$|S_i| \leq S_i^M, \quad i \in T \quad (1-d)$$

$$V_k^m \leq V_k \leq V_k^M, \quad k \in N \quad (1-e)$$

$$Q_i^m \leq Q_i \leq Q_i^M, \quad i \in G \quad (1-f)$$

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

C_i : 총 연료비용

C_i : 각 발전기 i 의 연료비

P_i : 각 발전기 i 의 유효출력

Q_i : 각 발전기 i 의 무효출력

P_D : 계통의 총 부하

P_L : 계통의 총 손실

V_k : 모선 k 에서의 전압

S_i : 선로 i 를 흐르는 피상전력

N, G, T : 각각 총 모선수, 발전기 모선수, 선로수

윗식에서 계통의 최적 운전점은 모선 및 선로의 무효전력에 별로 영향을 받지 않으며 만약 식(1-e)와 (1-f)에서 제약조건 위반시는 지역변전소나 부하 중심지에서 무효전력을 제어 보상할 수 있기 때문에 무효전력분은 무시하고 선로의 제약조건은 선로의 유효전력만으로 근사화 시켜도 지장 없다.

결과적으로 선로 전력조류 제약을 고려한 경제급전 (SCED)의 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

목적함수 $Min. \{ C_i = \sum_{i \in G} C_i(P_i) \}$ (2-a)

제약조건 $\sum_{i \in G} P_i = P_D + P_L$ (2-b)

$P_i^m \leq P_i \leq P_i^M, \quad i \in G$ (2-c)

$|F_l| \leq F_l^M, \quad l \in T$ (2-d)

$\sum_{i \in L} \beta_{i,l} \Delta P_i \leq \Delta F_l^M, \quad l \in L$ (6-e)

여기서 $\Delta P_i^m = P_i^m - P_i^r$
 $\Delta P_i^M = P_i^M - P_i^r$
 $\Delta F_l^M = F_l^M - F_l^r$

2.2 경제급전(SCED)의 선형화 알고리즘

선형계획법을 적용하여 최적해를 구하기 위하여 식(2)를 선형화 하면 다음과 같이 된다.

1) 식(2-b)의 전력수급평형식에서 만약 부하가 일정하다면 발전량의 미소한 변화는 식(3)과같이 선로 손실의 변화로 표시할 수 있다.

$\Delta P_L = \sum_{i \in G} \Delta P_i$ (3)

한편, 선로 손실의 변화를 발전기 출력과 증분손실계수로 표시하기 위해 ITLF(Incremental Transmission losses Factor)를 이용하면 전력수급평형식은 식(4)와 같이 표시된다.

$\sum_{i \in G} (1 - \gamma_i) \Delta P_i = 0$ (4)

2) 선로에 흐르는 유효전력의 변화량과 발전기 출력의 변화량으로 표시하기 위해 GGDF(Generalize Generation Distribution Factor: $\beta_{i,l}$)을 이용하면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$F_l = \sum_{i \in G} \beta_{i,l} P_i$ (5)

따라서 선로조류제약을 고려한 경제급전 선형화 알고리즘은 다음 식(6)과 같이 되며, 흐름도는 그림1과 같다.

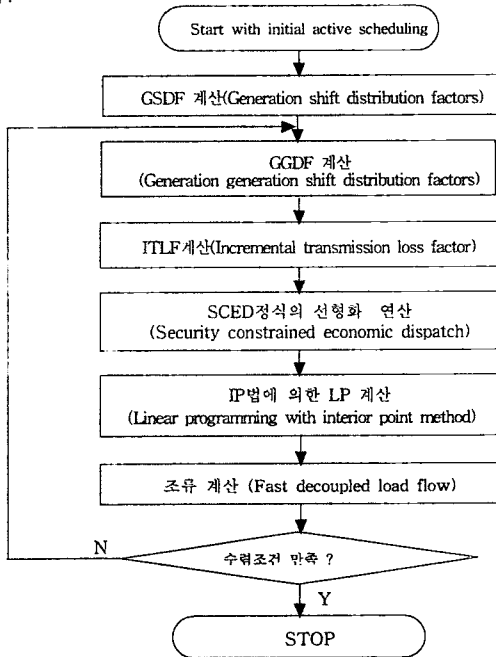


그림 1 선로 전력조류제약을 고려한 경제급전의 흐름도

목적함수 $Min \{ \Delta C_i = \sum_{i \in G} (b_i + 2c_i P_i) \Delta P_i \}$ (6-a)

제약조건 $\sum_{i \in G} (1 - \gamma_i) \Delta P_i = 0, \quad i \in G$ (6-b)

$-\Delta P_i \leq \Delta P_i^m, \quad i \in G$ (6-c)

$\Delta P_i \leq \Delta P_i^M, \quad i \in G$ (6-d)

식(6)의 선형계획문제는 심플렉스법이나 내점법의 최적화 기법에 의해 최적해를 구하게 되며 식(6-d)에서 L'는 전력조류를 제약하고자 하는 선로만을 표시한다.

2.3. 주내점법(primal interior point method)

주내점법의 계산 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

- i) $0 < \rho < 1$ 인 상수 ρ 와 허용오차 ϵ 값을 정한다. $k=0$ 의 내부가능해 x^k 를 구한다
- ii) 최적판정 $\frac{|c^T x - b^T y|}{|(1 + c^T x)|} \leq \epsilon$ 이면 최적해를 찾았기 때문에 종료, 그렇지 않으면 단계 iii)으로 간다.
- iii) 스케일링행렬 D^k 를 구성한다. $D^k = \text{diag}(x_1^k, \dots, x_m^k), D = D^k$
- iv) $[A D^2 A^T] y^k = A D^2 C$ 로부터 쌍대(dual)추정치 y^k 를 구한다.
- v) $z^k = c - A^T y^k, dz^k = -D^2 z^k$ 로부터 z^k 및 방향개선벡터 dx^k 를 구한다
- vi) 스텝폭(step size) α 를 구한다. $\alpha = \text{Min} \left\{ -\frac{x_i}{dx_i} : \forall 1 \leq i \leq n \text{ and } dx_i < 0 \right\}$
- vii) 개선된 해를 구한다. $x_1^{k+1} = x^k + \rho \alpha dx^k$
- viii) 단계 ii)로 간다.

3. 사례연구

본 논문에서 제시한 선로의 전력조류제약을 고려한 경제급전(SCED)방식의 효용성을 입증하기 위하여 모델 계통으로 IEEE 6기 30모선 41선로 계통[11]을 선정 적용하였으며, 경제급전의 최적화 기법으로는 내점선형계획법을 사용하고 그 수렴특성을 Simplex법과 비교하여 우수성을 보여준다.

3.1 운전조건

IEEE 6기 30모선 41선로 모델 계통의 발전기의 상·하한 및 연료비 계수와 병렬커패시터를 표시하면 표5, 표6과 같으며, 선로제약은 초기운전조건에 따른 조류계산 결과로부터 얻은 전력조류를 기준으로 선로용량(또는 지정용량:가정치)을 초과한 선로를 택하여 경우 I 과 경우 II로 구분하여 표7에 나타내었다.

표 5. 발전기 데이터

| 모선 번호 | 발전기 | | 연료비 계수 | | |
|----------|--------|--------|--------|---------|-----------------------|
| | 하한[MW] | 상한[MW] | a[R] | b[R/MW] | c[R/MW ²] |
| 1 | 50 | 200 | 0.0 | 2.0 | 0.00375 |
| 2 | 20 | 80 | 0.0 | 1.75 | 0.0175 |
| 5 | 15 | 50 | 0.0 | 1.0 | 0.0625 |
| 8 | 10 | 35 | 0.0 | 3.25 | 0.00834 |
| 11 | 10 | 30 | 0.0 | 3.0 | 0.025 |
| 13 | 12 | 40 | 0.0 | 3.0 | 0.025 |

표 6. 병렬 커패시터 데이터

| 모선번호 | 병렬커패시터용량[p.u] |
|------|---------------|
| 10 | 0.19 |
| 24 | 0.04 |

표 7. 선로전력조류 제약

| 구분 | 선로 번호 | 모 선 | | 선로조류 [MW] | 선로제약용 량 [MW] |
|-------|----------|-----|----|--------------|--------------------|
| | | 부터 | 까지 | | |
| 경우 I | 1 | 1 | 2 | 131.338 | 120 |
| 경우 II | 1 | 1 | 2 | 131.333 | 120 |
| | 2 | 2 | 5 | 66.468 | 60 |

3.2 경제급전 운용결과 및 계산결과

표8의 선로의 전력조류제약조건 및 발전기 상·하한 제약조건하에서 심플렉스법 및 내점법에 의한 최적제어 경제급전 결과와 계산시간을 표시하면 표8과 같다.

선로제약조건은 경우 I 일때는 1번선로를 120[MW]로 제약하였으며, 이때 등식제약조건(1), 모선제약조건(6*2=12), 선로제약조건(1)이다.

표 8 30모선의 경우 선로 전력조류 제약을 고려한 경제급전 결과(경우1)

| 구분 | 모선번호 | 발전기번호 | 발전기 출력량[MW] | | |
|-------------------|------------|-------|-------------|----------|----------|
| | | | Simplex법 | 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 | | |

경우II는 1번선로는 120[MW], 5번선로는 60[MW]로 제약하였다.

이때 등식제약조건(1), 모선제약조건(6*2=12), 선로제약조건(2)이다.

표 9 30모선의 경우 선로 전력조류 제약을 고려한 경제급전 결과(경우2)

| 구분 | 모선번호 | 발전기번호 | 발전기 출력량[MW] | | |
|-------------------|------------|-------|-------------|----------|----------|
| | | | Simplex법 | 내점법 | |
| 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 | | |

심플렉스법과 내점법에 의한 최적제어 경제급전결과는 경우 I, II 모두 각 발전기출력과 총 연료비용은 거의 같았으며, 총 실행시간은 경우 I 일때 내점법이 심플렉스법의 71.7% 로 28.3% 단축되었으며, 경우 II 일때는 71.2% 로 28.8% 단축되었음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 전력계통의 경제운용을 위해 선로 전력조류제약을 고려한 경제급전에 대해서 기술하였다. 선로 전력조류제약을 고려한 경제급전의 정식을 유도하였으며, 일반화발전분배계수와 중분선로손실계수를 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 사용했을때나 내점법을 사용했을 경우 총연료비용에는 크게 차이가 없지만 총실행시간은 내점법을 사용하였을 때가 훨씬 빠르게 나타났다. 특히 제약조건이 수가 많아지면 시간차이가 더 커져서 내점법이 경우 I 은 71.7%(1.39배), 경우 II는 71.2%(1.40 배) 빠른 결과를 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] H.W Dommel and W.F.Tinney, "Optimal Power Flow Solution", IEEE Trans, Vol PAS-87, No.10, pp.1866- 1876, 1968. 10.
- [2] B. Stott and E. Hobson, "Power System Security Control Calculation Using Linear Programming Parts I" and II, IEEE Trans, Vol PAS-97, NO.5, pp. 1713- 1731, 1978. 9.
- [3] M.Olofsson,G.anderson and L Soder,"Linear Program- ming Based Optimal Power Flow Using Second Order Sensitivities" IEEE Trans.Vol.10, No 3,pp.1691- 1697, 1995. 8.
- [4] I. Adler, M.G.C, Resende,G.Veiga, and N.Karmarkar, "An Implementation of Karmarkar's algorithm for linear programming", Mathematical Programming 4, pp. 297-335, 1989. 3.
- [5] K. Ponnambalam, V.H.Quintana and A.Vannelli, "A Fast Algorithm for Power System Optimization Problem Using an Interior Point Method", IEEE Trans, Vol.7, No.2, pp .892-899, 1992. 5.
- [6] Luis S. Vargas, Victor H. Quintana and Anthony Vannelli, "A Tutorial Description of an Interior Point Method and its Applicatios to Security Constrained Economic Dispatch", IEEE Trans, Vol.8, no.3 , pp. 1315-1324, 1993. 8
- [7] Sergio Granvilles, "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods", IEEETrans, Vol.9, No.1, pp.136-146, 1994. 2.
- [8] J.A. Momoh, Guo S. X., Ogbuobiri C.E. and R. Adapa, "The Quadratic Interior Point Method for Sloving Power System Optimization Problems", IEEE Trans, VOL.9, No.3, pp.1327-1336, 1994 .8.
- [9] Wai, Y.Ng , "Generalized Generation Distribution Factors for Power System Security Evaluation". IEEE Trans, Vol. PAS-100, No. 3, pp.1001-1005, 1981.3.
- [10] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control". John Wiley & Sons ,105-124,435-440,1996
- [11] O. Alsac and B. Stott, "Optimal Load Flow with Steady State Security", IEEE Trans, Vol. PAS-93, No. 3, p745-751, 1974