

Quadratic Interior Point 법을 적용한 전력계통의 경제급전

이홍주*, 정재길*, 이인용*, 김경신*, 박규홍**
 *중앙대학교, **대림대학

Application of Quadratic Interior Point Method to Economic Dispatch

Hong-Joo, Lee, Jai-Gil, Chung, In-Yong, Lee, Kyung-Shin, Kim Kyu-Hong, Park
 Chung-Ang University Daelim college

Abstract - The Paper describes the implementation of a quadratic interior point method for optimal power flow involves the determination of the optimal of a given objectives function subject to given constraints. The scheme developed solves the quadratic or linear optimization problem subject to linear constraints. The algorithm has been evaluated on a 14-bus system, and its accuracy and speed are demonstrated.

1. 서 론

전력계통의 안전성과 경제성을 계속적으로 유지하기 위해서는 몇몇의 option을 계통의 운영과 계획에 대해서 가능하게 해야한다. 전력계통 운영에 대한 최적운영의 개선은 몇 가지 최적화 방법에 의해 성립되었는데 약 30여년전 경제급전의 비선형 프로그램을 carpentier가 일 반화하여 소개하였으며, 후에 Dommel 과 Tinney에 의해 Optimal Power Flow (OPF)라 명명되었다. 현재 기본적인 OPF 방법은 Newton-based 법과 Linear Programming 법이다. 이것은 OPF를 해결하는데 가장 최적화된 방법이라 나타나고 있으며 또 다른 방법으로는 2차법과 비선형 최적화법이 있다. Dommel 과 Tinney의 방법에 기초하고 있는 Newton-based 법은 처음으로 OPF 식을 유도하였으며 반복되는 계산에서 증감 분을 감소시켜 해를 찾고 진행에서 방향을 결정하는데 사용되었다. 이 방법은 Zigzag로 방향을 탐색 하며 각각 다른 제약조건을 포함하고 다른 문제에 대한 알고리즘을 적용 하여 해의 초기 값에 의존하는 각각 다른 최적 해를 포함하는 것 때문에 수렴이 느리다는 약점이 있다. 몇몇의 연구자들은 예전의 OPF의 약점을 보완하기 위해서 제안 된 것들이다. 이 방법들은 LP법과 Q.P법 그리고 유, 무효 전력분할법인 Newton's 법을 기본으로 삼고 있으며, OPF에 성공적으로 적용된 LP법은 선형관계인 최적화 문제의 큰 부분의 해를 구하기 위해서 빠르고 확실하게 증명되었다. 그러나 이 방법들은 1차 영역에서 해를 구해야 하고 만약 LP법의 제약조건이 1차식이 아닌 상태에서 수행된다면 수렴하지 못하는 형태로 나타낼 것이다. 전력조류식과 다른 제약조건인 2차식과 Newton 법은 Dommel 과 Tinney에 의해 해결된 OPF의 고유문제를 개선시킬 것이다. 다른 연구 방법은 Quasi-Newton 법을 포함하여 시도되었으며 이 연구방법은 대형 전력계통에는 적합하지 않으나 비선형 과 선형법의 연구방법은 Han-Powell 알고리즘이나 Fletcher-Powell 알고리즘 등을 활용하여 계산속도를 약간 개선하기도 하였다. 그러던중 Karmarkar에 의해 Polynomial-time 알고리즘이 개발되었으며 이 방법은 Simplex 법보다 계산속도가 빠르다는 장점이 있다. 본 논문에서는 IEEE 14모선에서 Optimal Power Flow에 Quadratic Interior Point법을 적용하여 구현하였으며 연료비와 발전에 대한 계산속도를 경감시키는 최적화 계획법에 개선하여 적용하였다.

2. 전력계통에서의 경제적 운영

연료비, 인건비등을 다 포함하는 발전비용의 최소화는 경제급전문제를 해결하는 것이다. 또한 경제급전에서 발전 비용은 입력연료비용이나 발전의 2차방정식 같은 것을 포함한다. 제약조건은 유, 무효전력 한계와 전력균형과 전압제한을 포함한다.

본 논문에서는 경제급전 문제를 다음과 같이 표현하였다.

(1) 목적함수

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{NG} (\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2) \quad (1)$$

제약조건

$$\sum_{i=1}^{NG} (P_{Gi}) = P_D + P_L \quad (2)$$

$$P_{Gi}^{Min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{Max} \quad (3)$$

α, β, γ 목적함수에서의 상수항과 계수이며 NG는 계통에서의 발전기 수이다. P_i 는 i모선에서의 유효전력이며 P_L 는 송전손실이다.

3. Interior Point 법 과 Quadratic Interior Point법

Karmarkar IP법은 LP 문제를 해결하기 위해서 알고리즘을 활용한 LP법을 발전시킨 것이다. 본 논문에서는 초기상태 와 종결상태의 최적화된 기준과 2차목적함수를 포함하는 것으로 기존의 IP법을 개선시켰다.

3.1. Interior Point법을 적용한 경제급전

손실을 고려하지 않은 경제급전에 대한 식은 선형제약조건에 따른 2차 목적함수로 구성되어 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Min}(A^T E + B^T + \frac{1}{2} x^T Q x)$$

subject to

$$b^{min} \leq \text{Alphax} \leq b^{max}$$

$$F(x) = 0$$

$$xx = (P_{G1}, \dots, P_{GNG}, P_{G1}, \dots, P_{G2NG})^T$$

5. 손실을 고려한 경제급전

선로 손실을 고려한 경제급전에서는 등식 제약조건이 (식 2에서) 비선형이 되며 QIP법은 선형제약 조건을 가진 1차문제나 2차문제를 해결하는 데 사용된다. 이 프로그램은 조건을 충족시킬 때까지 계속적으로 진행이 된다.

6. 구동결과

I.P법을 적용한 경제급전 알고리즘은 IEEE 14 모선에서 구현을 하였으며 14모선 발전기 매개변수 자료는 표 1에 나타내었다. 이 자료를 바탕으로 식(1)에서 식(3)에 따라 주어진 제약조건에 따라 연료비를 최소화하도록 하였다. (제약조건은 발전용량 상, 하한 이다.) Minos법과 비교하였을 때 QIP법의 계산속도 이득은 약 5.45:1이었다. 즉 경제급전의 문제를 해결하는데 Minos 법보다 5.45배 빠른 수렴속도를 구현한 것이다.

Method	P1(p.u)	P2(p.u)	P3(p.u)	Cost	cpu time (sec)
I.P	0.889663	0.890131	0.801624	1.59	1.1
Minos	0.8635	0.8957	0.831	1.60	6.1

IEEE 14 모선

Line No.	Between buses	Line impedance		Half charging susceptance per unit
		R per unit	X per unit	
1	1-2	0.01938	0.05917	0.02640
2	2-3	0.04699	0.19797	0.02190
3	2-4	0.05811	0.17632	0.01870
4	1-5	0.05403	0.22304	0.02460
5	2-5	0.05695	0.17388	0.01700
6	3-4	0.06701	0.17103	0.01730
7	4-5	0.01335	0.04211	0.0064
8	5-6	0.0	0.25202	0.0
9	4-7	0.0	0.20912	0.0
10	7-8	0.0	0.17615	0.0
11	4-9	0.0	0.55618	0.0
12	7-9	0.0	0.11001	0.0
13	9-10	0.03181	0.08450	0.0
14	6-11	0.09498	0.19890	0.0
15	6-12	0.12291	0.25581	0.0
16	6-13	0.06615	0.13027	0.0
17	9-14	0.12711	0.27038	0.0
18	10-11	0.08205	0.19207	0.0
19	12-13	0.22092	0.19988	0.0
20	13-14	0.17093	0.34802	0.0

Bus No	Bus Voltage		Generation		Load	
	Magnitude Per unit	Phase angle degree	Real MW	Reactive Mw	Real MW	Reactive Mw
1	1.060	0.0	232.4	-16.9	0.0	0.0
2	1.045	-4.98	40.0	42.4	21.7	12.7
3	1.010	-12.72	0.0	23.4	94.2	19.0
4	1.019	-10.33	0.0	0.0	47.8	-3.9
5	1.020	-8.78	0.0	0.0	7.6	1.6
6	1.070	-14.22	0.0	12.2	11.2	7.5
7	1.062	-13.37	0.0	17.4	0.0	0.0
8	1.090	-13.36	0.0	0.0	0.0	0.0
9	1.056	-14.94	0.0	0.0	29.0	16.6
10	1.051	-15.10	0.0	0.0	9.0	5.8
11	1.057	-14.79	0.0	0.0	3.5	1.8
12	1.055	-18.07	0.0	0.0	6.1	1.6
13	1.050	-15.16	0.0	0.0	13.5	5.8
14	1.036	-16.04	0.0	0.0	14.9	5.0

7. 결 론

전력계통의 경제급전에 적용한 Quadratic Interior Point 법은 수렴특성이 우수하며 신뢰성이 높고 정확하여 그 효율성이 뛰어난 것을 알 수 있다. 그러므로 향후 Interior Point Method를 이용한 해법이 대단히 많이 적용될 것이라 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Hadi Saadat "Power System Analysis", McGraw Hill, New York, 1999
- [2] James A Momoh, "Improved Interior Point Method For OPF Problems", IEEE Trans. on Power System, Vol 14, No 3, 1996 pp1114-pp1120
- [3] James A Momoh "The Quadratic Interior Point method solving Power System Optimization Problems" IEEE Trans on Power System Vol 9, No. 3, 1994 pp 1327-pp1336
- [4] Ami Arbel "Exploring Interior-Point Linear Programming: Algorithms and Software" The MIT Press, 1993
- [5] M.A. PAI "Computer Techniques in Power System Analysis", Tata McGraw-Hill, New Delhi 1979