

발전력 상하한치를 고려한 경제조류계산

신만철*, 김건중*, 이병일*, 허형*, 최장흠*, 오성균*

*충남대

Economic Load Flow Considering Generation Power Limits

M.C.Shin, K.J.Kim, B.Rhee, H.Huh, J.H.Choi, S.K.Oh.
Chungnam National Univ.

Abstract - This paper deals with economic load flow which have objective function about generation fuel cost and constraints about power flow equation and generation power limits. A algorithm using penalty method with newton approach is presented. The proposed algorithm is verified through the comparison with lossless ELD on the IEEE 14 system.

1. 서 론

국내 전력 산업은 최근의 구조개편으로 인해 1개 독점기업에 의해 운용되던 전력산업이 1개의 송전사업자와 1개의 전력거래소, 그리고 다수의 발전사업자로 분리되었다. 이에 따라 전력시장에는 자유경쟁이 도입되게 되었으며 발전부분의 효율 개선에 의존하던 과거와 달리 경영 효율개선의 시대로 접어들게 되었다. 그래서 경영 효율개선을 위한 발전력배분이 새로이 대두되고 있다.

발전력배분을 위해 사용되는 가장 기본적인 기법은 경제급전이다. 경제급전은 발전연료비를 최소화하면서 전체발전전력과 전체부하전력의 값이 일치하도록 발전력을 배분을 하는 문제이다. 경제급전은 전력방정식을 만족시키지 않기 때문에 계통의 물리적 상태를 전혀 반영하지 못한다. 이 때문에 발전력 배분을 위하여 계통의 상태를 거의 모두 반영하고 있는 최적조류계산이 계통 운용의 기본적인 수단으로 새로이 대두되고 있다. 하지만 최적조류계산은 수많은 부등호 제약조건과 등호제약조건을 가진 비선형 최적화 문제이기 때문에 수렴도 보장과 수렴 속도면에서 많은 문제를 내포하고 있다.

본 논문에서는 계통의 상태를 나타내는 전력방정식을 고려하는 경제급전을 제안하고 이것을 경제조류계산이라 하였다.

2. 본 론

2.1 부등호 제약조건을 가진 최적화문제

전기에너지는 생산과 소비가 동시에 일어난다. 따라서 발전기에서 공급한 전력은 바로 수용가의 부하나 선로손실의 형태로 소비하게 된다. 그런데 총 발전설비용량은 부하보다 많은 것이 일반적이므로 선로손실을 포함하여 필요한 만큼의 부하전력을 공급하기 위하여 일부 발전기는 정격이하의 출력으로 운전하거나 정지상태에 있기도 한다. 이때 필요한 만큼의 전력을 공급하기 위하여 어느 발전기에 얼마만큼의 출력을 배분하여 총 발전비용을 최소화시킬 것인가, 또 선로손실을 어떻게 하면 최소화시킬 수 있는가 하는 문제가 대두되는데 주어진 계통의 조건에서 이러한 문제들을 풀기 위하여 최적조류계산이 행해지게 된다. 즉, 최적조류계산이란 계통의 주어진 조건, 즉 계통의 안정도 유지조건, 물리적 제약조건, 전압 유지조건등을 만족시키면서 발전비용을 최소화시키는 것을 목적으로 한다. 하지만 최적조류계산은 수많은 부등

호 제약조건과 등호제약조건을 가진 비선형 최적화 문제이기 때문에 수렴도 보장과 수렴 속도면에서 많은 문제를 내포하고 있다.

따라서 본 논문에서 계통의 전력방정식과 발전력 상하한치를 고려하면서 발전연료비를 최소화시키는 것을 목적으로 하는 경제조류계산을 제안한다. 그러므로 경제조류계산의 발전연료비 함수를 목적함수로 하고, 계통 수급 조건을 등호제약조건으로 가지면서 발전기 출력의 상하한치를 만족하도록 하는 조건을 부등호제약조건으로 가지는 최적화 문제로 모델링 된다. 따라서 본 논문에서 다루는 문제는 식(1)과 같이 등호제약조건과 부등호제약조건을 가지는 최적화 문제로 정식화된다.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(\mathbf{x}) = \mathbf{a} + \mathbf{b}^T \cdot \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \cdot [\mathbf{c}] \cdot \mathbf{x} \\ \text{s.t} \quad & \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned} \tag{1}$$

2.2 KKT 조건

식 (1)에 대한 최적해는 Karush-Kuhn-Tucker 최적조건을 만족해야 한다. 식 (1)에 대한 최적조건은 Lagrangian 함수 L 을 공식화함으로써 유도할 수 있다.

$$L = F(\mathbf{x}) + \lambda^T \cdot \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mu^T \cdot \mathbf{h}(\mathbf{x}) \tag{2}$$

KKT 이론은 다음의 사항을 말하고 있다. 만일 $\hat{\mathbf{x}}$ 가 식 (1)의 모든 제약조건을 만족하는 동시에 목적함수 $f(\mathbf{x})$ 의 상대적인 극값이라면, 라그랑지안 상수 λ , μ 는 다음의 방정식들을 만족한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \{f(\mathbf{x}) + \lambda^T \cdot \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mu^T \cdot \mathbf{g}(\mathbf{x})\} &= 0 \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) &= 0 \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) &\leq 0 \\ \text{diag}\{\mu\} \cdot \mathbf{g}(\mathbf{x}) &= 0 \\ \mu &\geq 0 \end{aligned} \tag{3}$$

2.3 Penalty를 이용한 해법

KKT조건을 만족하는 식 (1)의 해법으로는 조류계산 해법의 강점을 이용하면서 주어진 문제를 선형화한 LP 법과 주어진 문제를 근사화하지 않으면서 식 (3)의 KKT조건중 4번째 조건인 complementary condition 과 5번째 조건인 Lagrangian multiplier μ 가 양의 값을 가져야 한다는 조건을 만족시키기 위한 Penalty 법, Barrier법, Interior point법이 이용되고 있다.

본 논문에서는 Newton-approach가 가능한 방법들 중에서 Penalty법을 이용한 경제조류계산의 해법을 제시하였다. 부등호 제약조건에 대한 penalty term을 더 해줌으로써 목적함수를 증가시켜 문제를 변형하면 다음과 같다.

$$\text{Min } F(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \sum r_i \cdot \text{Max}\{0, g_i(\mathbf{x})\}^2 \quad (4)$$

$$\text{s.t } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0$$

i번째 부등호 제약조건이 feasible이면 $r_i = 0$

i번째 부등호 제약조건이 infeasible이면 $r_i \gg 0$

식 (4)에 대한 Lagrangian Dual Function을 정의하면

$$L(\mathbf{x}, \lambda) = f(\mathbf{x}) + \lambda^T \cdot \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \sum r_i \cdot \text{Max}\{0, g_i(\mathbf{x})\}^2 \quad (5)$$

가 된다. 식 (5)로부터 식 (1)을 만족하는 최적 조건을 구하면

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} + \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \cdot \lambda + \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \cdot [r] \cdot \mathbf{g} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \quad (7)$$

이 된다. (6)~(7)의 연립방정식의 해를 구하기 위하여 뉴턴-랩슨법을 적용하면

$$\begin{bmatrix} [H_0] & [J_h]^T \\ [J_h] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{L}_x \\ \mathbf{L}_\lambda \end{bmatrix} \quad (8)$$

이다. 이때 계수행렬의 각 부분들은

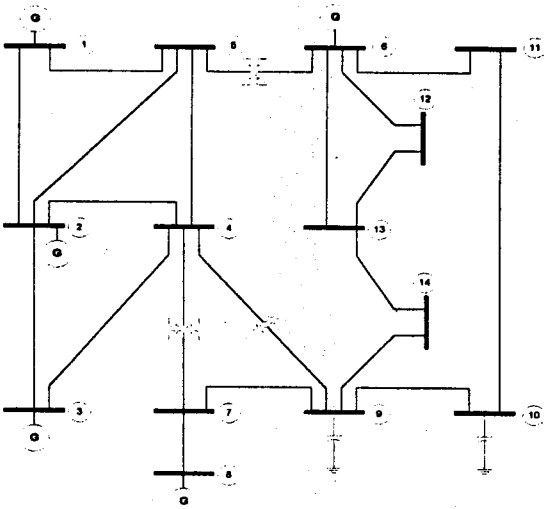
$$[H_0] = \frac{\partial^2 f}{\partial \mathbf{x}^2} + \lambda^T \cdot \left(\frac{\partial^2 \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}^2}\right) + \mathbf{g}^T [r] \cdot \left(\frac{\partial^2 \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}^2}\right) + \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T [r] \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}}\right) \quad (13)$$

$$[J_h] = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \quad (14)$$

이다.

2.4 사례연구

사례연구는 [그림 1]과 같은 IEEE 14 샘플 계통에 대해 수행하였다.



[그림 1] IEEE 14 모선 시스템

[표 1] IEEE 14 모선 입력 데이터

모선 번호	타입	모선이름	전압 (크기)	전압 (각)	유효 전력	무효 전력
1001	3	swing0	1	0	0	0
1002	2	gen001	1	0	21.7	12.7
1003	2	gen002	1	0	94.2	19
1004	1	load01	1	0.1	47.8	-3.9
1005	1	load02	1	0	7.6	1.6
1006	2	gen003	1	0	11.2	7.5
1007	1	load03	1	0	0	0
1008	2	gen004	1	0	0	0
1009	1	load04	1	0	29.5	16.6
1010	1	load05	1	0	9	5.8
1011	1	load06	1	0	3.5	1.8
1012	1	load07	1	0	6.1	1.6
1013	1	load08	1	0	13.5	5.8
1014	1	load09	1	0	14.9	5

[표 2] IEEE 14 발전기 입력 데이터

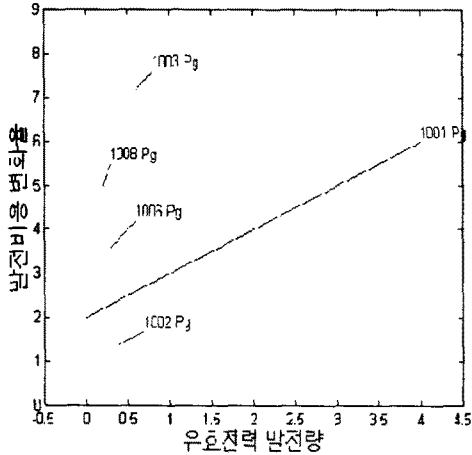
모선 번호	유효 최대값	무효 최대값	유효 최소값	무효 최소값	상수항	일차항	이차항
1001	400	100	0	-100	100	2	1
1002	70	50	40	-40	150	1	1
1003	80	40	60	0	200	6	2
1006	60	24	30	-6	500	3	2
1008	30	24	20	-6	300	4	5

[표 3] IEEE 14 선로 입력 데이터

Num	From	To	R	X	C	Ratio
1	1007	1009	0	0.11001	0	1
2	1009	1010	0.03181	0.0845	0	1
3	1006	1011	0.09498	0.1989	0	1
4	1006	1012	0.12291	0.25581	0	1
5	1006	1013	0.06615	0.13027	0	1
6	1009	1014	0.12711	0.27038	0	1
7	1010	1011	0.08205	0.19207	0	1
8	1012	1013	0.22092	0.19988	0	1
9	1013	1014	0.17093	0.34802	0	1
10	1001	1002	0.01938	0.05917	0.0528	1
11	1002	1003	0.04699	0.19797	0.0438	1
12	1002	1004	0.05811	0.17632	0.0374	1
13	1001	1005	0.05403	0.22304	0.0492	1
14	1002	1005	0.05695	0.17388	0.034	1
15	1003	1004	0.06701	0.17103	0.0346	1
16	1004	1005	0.01335	0.04211	0.0128	1
17	1005	1006	0	0.25202	0	0.932
18	1004	1007	0	0.20912	0	0.978
19	1007	1008	0	0.17615	0	1
20	1004	1009	0	0.55618	0	0.969

[그림 1]의 계통에 대한 각 모선의 전압과 요구 전력을 나타내는 입력데이터는 [표 1]과 같고 각 발전기의 전압과 발전량을 나타내는 입력 데이터는 [표 2]와 같다. 그리고 각 선로의 임피던스와 충전용량, 변압기 탭비를 나타내는 입력 데이터는 [표 3]과 같다.

발전비용 변화율곡선



(그림 2) IEEE 14 발전비용 변화율 곡선

(그림 2)는 [표 2]에서 주어진 IEEE14 계통의 발전기 데이터를 바탕으로 각 발전기의 발전비용 변화율을 도식한 것이다. 그림에서 1002번이 가장 싸고 1003번이 가장 비싼 것으로 나타나고 있다.

[표 4] IEEE 14 무손실 ELD 수행결과

모선 번호	유효전력 발전량	유효 최대값	유효 최소값
1001	81.59	400	0
1002	70.00	70	40
1003	60.00	80	60
1006	30.00	60	30
1008	20.00	30	20

모선번호	모선명	Pg (p.u)	Qg (p.u)	Vmag	Vang	Lambda P
1001	swing0	0.820650	-0.004742	1.100000	0.000000	2.820650
1002	gen001	0.700000	0.154958	1.092607	-1.363683	2.860923
1003	gen002	0.600000	0.180527	1.075968	-4.549479	2.948457
1004	load01	0.000000	0.000000	1.070534	-4.324203	2.952461
1005	load02	0.000000	0.000000	1.070918	-3.523727	2.925371
1006	gen003	0.300000	-0.036692	1.100000	-5.560643	2.911680
1007	load03	0.000000	0.000000	1.094045	-5.367649	2.960552
1008	gen004	0.200000	0.040117	1.100000	-3.690122	2.960438
1009	load04	0.000000	0.000000	1.090844	-6.974944	2.964955
1010	load05	0.000000	0.000000	1.085111	-6.997560	2.971950
1011	load06	0.000000	0.000000	1.088946	-6.411995	2.951741
1012	load07	0.000000	0.000000	1.086060	-6.416595	2.955895
1013	load08	0.000000	0.000000	1.081469	-6.560050	2.972770
1014	load09	0.000000	0.000000	1.069299	-7.731252	3.026016

(그림 3) IEEE 14 OPF 수행결과 (p.u로 표시)

모선번호	모선이름	전압(크)	전압(각)	유효발전	무효발전
1001	swing0	1.002893	0.000000	82.812396	-11.325007
1002	gen001	1.000249	-1.756623	70.000000	18.016742
1003	gen002	0.997473	-5.808706	60.000000	34.511659
1006	gen003	1.001151	-6.828566	30.000000	0.135352
1008	gen004	1.000498	-4.520014	20.000000	4.038416

(그림 4) IEEE 14 경제조류계산 수행결과 (발전모선)

모선번호	모선이름	전압(크)	전압(각)	모선무효 발전	모선무효 부하
1004	load01	0.977856	-5.304634	-47.800000	3.900000
1005	load02	0.977350	-4.339234	-7.600000	-1.600000
1007	load03	0.994012	-6.550117	0.000000	0.000000
1009	load04	0.987976	-8.497135	-29.500000	-16.600000
1010	load05	0.982174	-8.531564	-3.000000	-5.800000
1011	load06	0.987640	-7.837204	-3.500000	-1.800000
1012	load07	0.985501	-7.864143	-6.100000	-1.600000
1013	load08	0.980196	-8.019548	-13.500000	-5.800000
1014	load09	0.965209	-9.439442	-14.900000	-5.000000

(그림 5) IEEE 14 경제조류계산 수행결과 (부하모선)

[표 4]는 무손실 ELD 수행결과를 나타낸 것이고 [그림 3]은 OPF의 수행결과를 나타낸 것이다. 그리고 [그림 4]는 경제조류계산 수행결과를 나타낸 것이다. 세 경우 모두 발전단가가 가장 싼 1002번 발전기가 최대발전을 하고 상대적으로 발전단가가 비싼 1006번, 1008번, 1003번 발전기는 최소발전으로 하고 있으며 나머지 부하에 대해서는 발전여력이 가장 큰 1001번 발전기가 감당하고 있다.

3. 결론

본 논문에서는 경제급전과 조류계산을 동시에 수행하는 경제조류계산 문제를 구성하고 발전력 상하한을 고려하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 기존 경제급전에서 고려할 수 없었던 계통의 전력방정식을 고려하여 각 모선의 전압을 결정할 수 있다. 또한 전력방정식뿐만 아니라 발전력 상하한을 고려함으로써 경제조류계산에 의한 해는 최적조류계산의 해에 거의 근접한 해를 도출할 수 있다.

비록 본 논문에서 제안하는 경제조류계산이 최적조류계산에 비해 전압제약이나 선로조류에 대한 제약 등 계통의 각종 제약조건을 모두 고려하지 않아 최적해가 아닌 최적해에 근접하는 해를 도출하지만 최적조류계산에 비해 연산량이 적고 계산속도가 빠르며, 부동소수점조건에 의한 진동 현상이 없어 안정적인 수렴이 보장된다.

[참고 문헌]

- [1] Mokhtar, S. Bazaraa, "Nonlinear Programming", John Wiley & Sonss, Inc., 1979
- [2] 최장흥, 김건중, 전동훈, 임종호, 이병일, 한현규, "부동소수점 제약조건을 등호제약조건화를 통한 OPF 해석 알고리즘", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, A권, pp. 197-199, 1999
- [3] M.E.EL-HAWARY, "Optimal Economic Operation of Electric Power System", ACADEMIC PRESS, INC. 1979
- [4] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, And Control", John Wiley & Sonss, Inc., 1996
- [5] Giorgio Tognola, Rainer Bacher, "Unlimited Point Algorithm For OPF Problems", IEEE Transaction on Power System, Vol 14, No. 3, Aug. 1999, pp 1046-1054
- [6] 한현규, 김건중, 최장흥, 최익순, 엄계선, 이병일, "계통의 전력방정식을 고려한 경제급전 알고리즘", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A권, pp. 52-54, 2000