

부등호의 등호화를 통한 OPF 해석 알고리즘의 실계통 적용

최정흠*, 김건중*, 이병일*, 엄재선*, 주운표*, 전동훈**
 *충남대학교, **전력연구원

Application of OPF algorithm with changing inequality constraints to equality constraints to real systems

J.H.Choi*, K.J.Kim*, B.Rhee*, J.S.Eum*, O.P.Jhu*, D.H.Jeon**
 *Chungnam National Univ. **KEPRI

Abstract - This paper deals with optimal power flow, which is optimal problem with equality constraints and inequality constraints. An algorithm of changing inequality constraints problem to equality constraints problem is applied to real systems.

조건을 등호제약조건으로 가지면서 식 (5), (6)과 같이 발전기 출력의 상하한치를 만족하도록 하는 조건과 식 (7)과 같이 각 모선의 전압을 일정범위로 유지시키도록 하는 신뢰도 조건을 부등호제약조건으로 가지는 최적조류계산 문제를 정의하였다. 아래 문제에 대한 해석방법은 참고문헌에서 자세히 나타내었다.

1. 서 론

최적조류계산은 등호제약조건과 부등호제약조건을 가지는 비선형 최적화문제이다. 이러한 최적화문제를 해석할 때 부등호제약조건은 적당히 가변하거나 특별한 함수를 추가시켜 등호제약조건으로 변환하거나 목적함수에 추가시키고 있다. 하지만 이러한 기법들은 알고리즘에 의존하여 부등호 제약조건들 중에서 active constraint만을 분리하는 기법을 사용하고 있다. 하지만 active constraint만을 따로 분리하는 작업으로 인해 함수의 연속성이 깨져 최적화 문제를 해석적으로 접근할 수 없도록 하고 있으며, 정확한 최적조류계산의 해를 구하는 데 많은 어려움을 주고 있다.

이에 최적조류계산의 부등호제약조건을 등호제약조건으로 변환하여 최적조류계산에 대한 해석적 접근이 가능하도록 하는 알고리즘을 개발하였으며 IEEE14-모선 샘플계통을 통해 그 타당성을 검증한 바 있다.

본 논문에서는 IEEE57-모선 샘플계통과 우리나라의 실계통에 적용하여 그 결과를 고찰해 보았다. 이때 적용한 우리나라의 실계통은 1997년 10월 3일의 데이터로써 발전기의 비용함수는 본 연구진에 의해 임의로 제작되었다.

2. 본 론

2.1 최적조류계산의 모델링과 해석

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. 따라서 최적조류계산 문제는 몇가지의 제약조건을 가지면서 발전연료비함수를 최소화시키는 비선형 문제로 정의될 수 있다.

본 논문에서는 다음의 수식과 같이 식 (1)의 발전연료비 함수를 목적함수로 하고 식 (2), (3)의 계통 수급

$$\text{Min } f(P_G) = b_C^T \cdot P_G + \frac{1}{2} P_G^T \cdot C_C \cdot P_G \quad (1)$$

$$\text{s.t } P_B(\theta, V) - A_{PG} \cdot P_G + P_D = 0 \quad (2)$$

$$Q_B(\theta, V) - A_{QG} \cdot Q_G + Q_D = 0 \quad (3)$$

$$\theta_s = 0 \quad (4)$$

$$P_{GL} \leq P_G \leq P_{GH} \quad (5)$$

$$Q_{GL} \leq Q_G \leq Q_{GH} \quad (6)$$

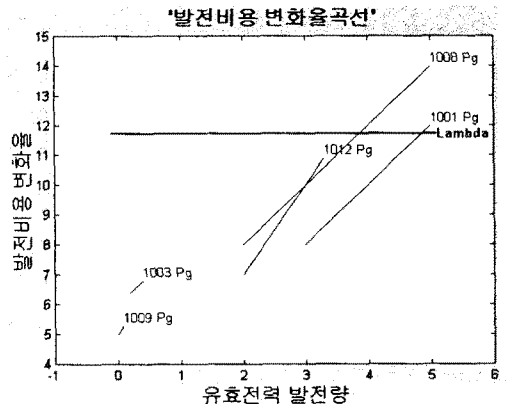
$$V_L \leq V \leq V_H \quad (7)$$

2.2 IEEE57모선-샘플계통 사례연구

IEEE57모선 샘플계통에 대해 발전기 입력 데이터는 (그림 1)과 같이 결정하였다.

BusNum	Pg	Qg	Max Pg	Max Qg	Min Pg	Min Qg	B	C
1001	4.780000	1.289000	5.000000	1.000000	3.000000	3.399900	2.000000	2.000000
1002	0.000000	-0.008000	0.000000	0.500000	0.000000	-1.170000	5.000000	3.000000
1003	0.400000	-0.010000	0.400000	0.600000	0.200000	-1.100000	6.000000	2.000000
1006	0.000000	0.008000	0.000000	0.250000	0.000000	-1.080000	7.000000	1.000000
1008	4.500000	0.621000	5.000000	2.000000	2.000000	-3.400000	4.000000	2.000000
1009	0.000000	0.022000	0.100000	0.050000	0.000000	-1.030000	5.000000	3.000000
1012	3.100000	1.285000	3.300000	0.950000	2.000000	-1.500000	1.000000	3.000000

(그림 1) IEEE57계통의 발전기 입력데이터



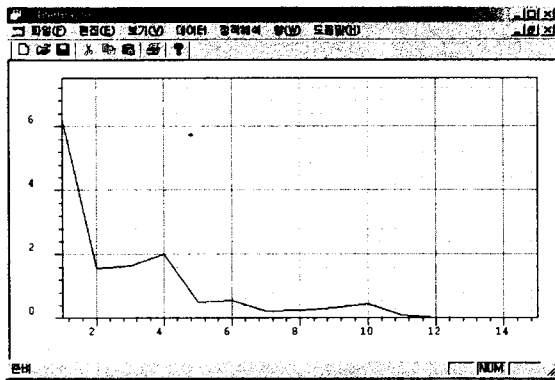
(그림 2) IEEE57계통의 발전비용 변화율곡선

[표 1] IEEE57계통의 무손실 ELD 수행의 결과

모선번호	유효전력발전량
1001	4.8540
1008	3.8540
1012	3.3000
1003	0.4000
1009	0.1000
1006	0
1002	0

[그림 2]는 각 발전기의 발전량에 따른 각 발전기의 발전비용을 도시한 것이다. 그리고 [표 1]은 무손실 ELD를 수행한 결과이다. 이때 계산되는 등중분비용은 약 $\lambda_p = 11.7080$ 이 되며 그때의 발전력 배분상태는 1012번, 1003번, 1009번 발전기가 발전력 상한치에 걸리고 1001번과 1008번 발전기가 나머지 부하를 감당하는데 그때 발전비용이 비싼 1001번 발전기가 더 많은 발전을 한다.

[그림 3] IEEE57계통의 OPF 수행결과



[그림 4] IEEE57계통의 OPF 수렴 특성

[그림 3]은 OPF 수행결과이고 [그림 4]는 OPF의 수렴특성을 나타낸 것이다. [그림 3]에서 보면 무손실 ELD의 경우와 마찬가지로 1012번, 1003번, 1009번 발전기가 발전력 상한치에 걸리고 1001번과 1008번 발전기가 나머지 부하를 감당하는데 그때 발전비용이 비싼 1001번 발전기가 더 많은 발전을 하는 것을 알 수 있다.

무손실 ELD와 OPF의 총발전비용을 비교해 보면 무손실 ELD는 86.2486이 되는 반면에 OPF는 89.1259이 되어 OPF를 수행하는 경우의 총발전비용이 약 3정도 더 많다. 이것은 OPF의 경우에는 손실이 고려되고 무효전력의 상하한치와 전압의 신뢰도 조건이 고려되었기 때문인데 이것은 무손실 ELD에 비해 OPF의

경우에는 1001번 발전기의 발전량은 감소하고 1008번 발전기의 발전량이 상당히 증가한 결과로써 알 수 있다.

[그림 3]에서 보면 1045번, 1046번, 1051번 모선의 전압이 발전모선의 전압보다 높다는 것을 알 수 있다. 1046번 모선의 경우는 1014번과 1046번 모선을 연결하는 선로에 설치된 변압기 때문에 발전모선보다 높은 전압을 나타내고, 1051번 모선의 경우는 1010번과 1051번 모선을 연결하는 선로에 설치된 변압기 때문에 발전모선보다 높은 전압을 나타낸다. 1045번 모선의 경우는 모선에 연결된 부하가 없으면서 1044번 모선과 1045번 모선을 연결하는 선로의 정전용량으로 인하여 무효전력 발전기가 설치된 것과 같은 효과를 나타내기 때문에 발전 모선보다 높은 전압을 나타낸다.

2.3 실계통 사례연구

실계통 데이터는 1997년 10월 3일에 측정된 데이터를 사용하였으며 그때의 발전기 입력데이터는 [그림 1]과 같이 결정하였다.

[그림 5] 실계통의 발전기 입력데이터

[표 2] 실계통 발전기의 분류

첨두부하담당 발전기	중간부하 담당 발전기	기저부하 담당 발전기
23375 25426 24472	21822 23354 25436	27921 23363 23366
23353 21924 21923	23452 23453 30156	25632 25631 26531
27151 24623 24624	23624 21921 21926	26532 23362 27251
23476 30155 23373	30153 30154 23365	29822 26521 25721
21928 24473 23622	24451 23364 23376	25722 27271 27272
23623 24471 24526	23352 23454 24622	25421 25442 25621
21922 23481 23477	23383 23382 24525	29521 23371 23372
23355 25437 21925	24625 24528 24529	28673 28674 25622
	29322 29323 23386	26104 26151 26152
	23388 23482 27152	26153 26155 26156
		26251 26252 29151
		26821 29152 24475
		29251 25152 24522
		25431 26534 26535
		27252 26533 25446
		26101 26102 26103
		21724 23356

[표 2]는 [그림 2]와 같은 실계통의 발전비용 변화율 곡선으로부터 각 발전기들을 기저부하, 중간부하, 첨두부하 담당용 발전기로 분류하여 놓은 것이다. 그리고 [표 3]은 실계통에 대해 무손실 ELD를 수행한 결과중 중간부하에 해당하는 발전기들의 결과를 나타내고 있다. 이때 계산되는 등중분비용은 $\lambda_p = 6.4$ 이 된다. 각 발전기의 중분비용이 등중분비용과 거의 일치하는 30153번, 30153번, 23365번, 24451번, 23364번 발전기들이 발전상하한치에 걸리지 않고 운전되고 있으며 30153번 발전기보다 중분비가 낮은 발전기들은 최대출력을 하고 23364번 발전기보다 중분비가 낮은 발전기들은 최소출력을 한다.

[표 2] 실계통의 무손실 ELD 수행의 결과(중간부하)

모선번호	발전량	Max P	Min P
21822	2.5	2.5	1
23354	1.5	1.5	0.4
25436	0.27	0.27	0.05
23452	2.5	2.5	1.25
23453	3.25	3.25	2.2
30156	5	5	2.5
23624	1.574	1.574	0.6
21921	1.052	1.052	0.45
21926	1	1	0.4
30153	4.03694	5.8	2.8
30154	4.03694	5.8	2.8
23365	0.63241	1.5	0.4
24451	2.42259	3.5	2.2
23364	0.54206	1.5	0.4
23376	0.5	1.55	0.5
23352	0.4	1.5	0.4
23454	2.2	3.25	2.2
24622	0.5	0.794	0.5
23383	0.3	0.8	0.3
23382	0.3	0.8	0.3
24525	0.5	0.794	0.5
24625	1	1.608	1
24528	0.5	0.79	0.5
24529	0.5	0.79	0.5
29322	0.9	2	0.9
29323	0.9	2	0.9
23386	0.3	0.8	0.3
23388	0.3	0.8	0.3
23482	0.45	1.052	0.45
27152	9.8	9.9	9.8

[그림 6]은 OPF 수행결과이고 [그림 7]은 OPF 수렴 특성을 나타낸 것이다. OPF의 경우도 무손실 ELD의 경우와 마찬가지로 거의 모든 발전기가 상하한치의 발전을 수행하고 30153번, 30154번, 23352번, 23454번, 29821번, 23374번, 23384번 발전기들이 발전상하한치에 걸리지 않고 운전되고 있다.

무손실 ELD와 OPF의 총발전비용을 비교해 보면 무손실 ELD는 1030.54이 되는 반면에 OPF는 1053.64이 되어 OPF를 수행하는 경우의 발전비용이 약 23정도가 많은 것으로 나타난다. 이것은 선로 손실을 감당하기 위하여 증가한 것으로 이 손실을 감당하기 위하여 무손실 ELD에서 발전상하한치에 걸리지 않고 운전되던 23365번, 24451번, 23364번가 OPF에서는 발전상하한치에서 운전되고 무손실 ELD의 발전하한치에서 운전되던 23352번, 23454번, 29821번, 23374번, 23384번 발전기들이 최소출력 이상의 출력을 발생하게 되었다.

[그림 6]에서 보면 대부분의 부하모선의 전압이 높게 나타나고 있다. 1720번(구리), 8825번(봉덕), 6240번(충장), 7265번(배안) 모선의 전압이 전압의 상한치에 걸려 있다. 이러한 것들은 57모선에서 해석한 것과 마찬가지로 변압기, 병렬콘덴서들의 전압조정장치로 인해 발생한다. 그리고 이러한 전압조정장치들로 인해 발전단의 전압들이 대체로 낮은 전압으로 나타나고 있다.

3. 결 론

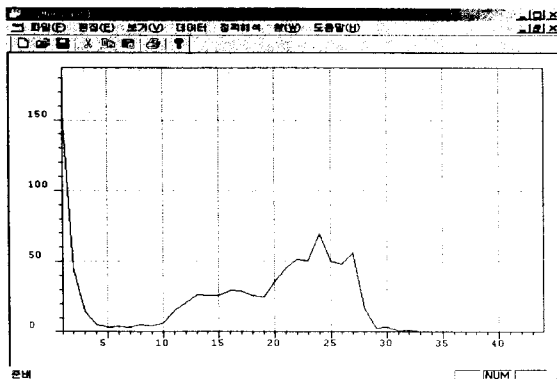
본 논문에서는 등호제약조건과 부등호제약조건을 가지는 최적화 문제인 최적조류계산을 등호제약조건만 가지는 최적화 문제로 변환하여 최적조류계산을 해석하는 기법을 실계통에 적용시켰다. 본 알고리즘의 실계통 적용 결과는 무손실 ELD에 의한 직관적인 결과와 큰 차이 없으면서 계통의 여러 제약조건이 고려되어 본 알고리즘이 타당함을 입증하였으며, 본 알고리즘을 이용한 OPF 해석의 실용화 가능성을 제시하였다.

앞으로의 과제는 OPF 수렴과정에서의 진동 현상을 억제하여 수렴특성을 개선하고 선로조류에 대한 제약조건을 고려하는 것이라 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Mokhtar. S. Bazaraa, "Nonlinear Programming", John Wiley & Sonss, Inc., 1979
- [2] 최장흠, 김건중, 전동훈, 임종호, 이병일, 한현규, "부등호 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] 최장흠, 김건중, 이병일, 한현규, 최익순, 전동훈, "라그랑지안 승수의 변화를 통한 OPF 해석 알고리즘의 개선", 대한전기학회 전력계통연구회 제35회 춘계학술발표회 논문집, pp. 28-30, 2000

[그림 6] 실계통의 OPF 수행결과



[그림 7] 실계통의 OPF 수렴특성