

A Modified Particle Swarm Optimization 기법을 이용한 최적조류계산 알고리즘

김영용*, 김종을*, 장세환*, 이화석**, 박준호*
 *부산대학교, *한국전기연구원, **거제대학

Application of Modified Particle Swarm Optimization algorithm into OPF

Young Yong Kim*, Jong Yul Kim*, Se Hwan Jang*, Haw Seok Lee**, June Ho Park*
 *Pusan National University, *KERI, **Koje College

Abstract - 최적조류계산(Optimal Power Flow:OPF)은 전력계통에서 여러 가지 제약 조건을 만족하면서 경제적이고 안전하게 계통을 운영하기 위한 기법이다. 종래의 계산방법에는 비선형 계획법, 선형계획법 같은 수치해석적인 방법을 사용하였다. 그러나, 이러한 방법들은 전역 최적해를 구하기 위해서는 목적함수가 convex해야 한다. 또한, 계통 규모가 클 경우, 최적해 수렴이 안 되거나 수렴이 되더라도 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 최근에는 이러한 문제를 극복하고자 여러 가지 진화연산기법들이 최적조류계산 문제에 적용되고 있다. 본 논문에서 최근에 등장한 PSO알고리즘을 수정한 MPSO알고리즘을 이용한 최적조류계산 기법을 소개하고, 제안한 방법의 유용성을 보이기 위하여 IEEE 30,118 모선 계통의 최적조류계산 문제에 적용하였다.

1. 서 론

최적조류계산(Optimal Power Flow: OPF)은 전력계통에서 여러 가지 제약조건을 만족하면서 경제적이고 안전하게 계통을 운영하기 위한 기법이다. 1960년대 초 Dommel과 Tinney [1]에 의해 소개된 이후 많은 연구자들에 의해 연구되고 있는 전력계통의 중요한 분야이며, 최근에는 컴퓨터 기술의 발달에 힘입어 더 많은 연구가 진행되고 있다. 종래의 최적조류계산 방법에는 비선형 계획법[2], 선형 계획법[3], 2차 계획법[4] 등의 수치적인 기법들이 사용되었다. 그러나 이러한 방법들이 전역 최적해를 구하기 위해서는 목적함수가 Convex해야 하나, 최적조류계산 문제는 Non-Convex한 특성을 가지므로 기존의 방법으로 전역 최적해를 구하기가 어려운 단점이 있다. 이러한 수학적 프로그래밍 기법의 단점을 극복하고자 유전알고리즘(GA)[5], 진화프로그래밍(EP)과 같은 진화연산 기법들이 최적조류계산 문제에 적용되어 좋은 성능을 보이고 있다. 최근에는 새로운 진화연산 기법의 일종인 PSO(Particle Swarm Optimization)알고리즘[6]의 적용에 대한 연구가 진행되고 있는데, PSO알고리즘은 기존 유전 알고리즘에 비해 연산과정이 간단하여 계산 부담이 상대적으로 적고, 최적해 탐색능력에 영향을 미치는 파라미터가 적어 실제 구현이 용이하다는 장점이 있다. 하지만, 때로는 PSO는 하나의 최적해가 발견되어지면 나머지 개체들이 그 방향으로 탐색하는 특성이 있다. 만약 그 해가 지역해이면 다른 영역을 탐색하기 어려운 점이 있다. 따라서, 매 세대마다 개체의 다양성 지수를 측정 식(14)하고 다양성이 떨어질 경우 유전 알고리즘의 돌연변이 연산자를 사용하여 다양성을 높이는 MPSO (Modified Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 제시 하고 제안한 방법의 유용성을 보이기 위하여 IEEE 30,118 모선 계통의 최적조류계산 문제에 적용하였다.

2. 최적조류계산

최적조류계산은 제어변수를 통하여 계통운용과 관련된 제약조건들을 만족시키면서, 전력계통 운용 시 고려해야 하는 목적함수를 최적화하는 문제로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 유효발전 비용의 최소화를 최적조류계산 문제의 목적함수로 설정하였으며, 이를 다음의 식 (1)에 나타내었다.

$$Min F(P_g) = \sum_{i=1}^{N_g} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) \quad (1)$$

여기서, $F(P_g)$: 총 발전 비용

P_{gi} : 각 발전기의 유효 전력출력

i : 발전기의 모선 번호

N_g : 계통 전체의 발전기 모선의 수

a_i, b_i, c_i : 각 발전기의 연료계수

1) 등식 제약조건

$$P_i - P_{gi} + P_{di} = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \quad (2)$$

$$Q_i - Q_{gi} + Q_{di} = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \quad (3)$$

여기서, i : 발전기의 모선 번호

P_i : i 번째 모선에 주입되는 유효전력

Q_i : i 번째 모선에 주입되는 무효전력

P_{gi}, Q_{gi} : i 번째 발전기 유효전력 및 무효전력

P_{di}, Q_{di} : i 번째 부하 유효전력 및 무효전력

N_b : 모선 총 개수

2) 부등식 제약조건

i) 운용상의 제약조건

- 선로 조류 제약 (MVA, MW, A)

$$\sqrt{P_i^2 + Q_i^2} \leq S_i^{Max} \quad (4)$$

여기서, P_i : i 번째 모선에 주입되는 유효전력

Q_i : i 번째 모선에 주입되는 무효전력

S_i^{Max} : i 번째 모선에 흐르는 복소전력의 최대허용값

- 부하 모선의 전압크기

$$V_{dmin} \leq V_{di} \leq V_{dmax} \quad (5)$$

여기서, V_{di} : 부하모선의 전압 크기

V_{dmin}, V_{dmax} : 부하모선 전압의 limit

- 발전기의 무효전력 출력용량

$$Q_{gimin} \leq Q_{gi} \leq Q_{gimax} \quad (6)$$

여기서, Q_{gi} : 발전기의 무효전력 출력

Q_{gimin}, Q_{gimax} : 발전기의 무효전력 출력 limit

- 슬래크 모선의 유효전력 출력

$$P_{g1min} \leq P_{g1} \leq P_{g1max} \quad (7)$$

여기서, P_{g1} : 슬래크 모선의 유효전력 출력
 P_{g1min}, P_{g1max} : 슬래크 모선의 유효전력 출력 limit

ii) 제어변수에 관한 제약조건
 - 발전기의 유효전력 출력용량

$$P_{gimin} \leq P_{gi} \leq P_{gimax} \quad (8)$$

여기서, P_{gi} : 발전기의 유효전력 출력
 P_{gimin}, P_{gimax} : 발전기의 유효전력 출력 limit
 - 발전기 모선의 전압크기

$$V_{gimin} \leq V_{gi} \leq V_{gimax} \quad (9)$$

여기서, V_{gi} : 발전기 모선의 전압 크기
 V_{gimin}, V_{gimax} : 발전기 모선의 전압 limit
 - 변압기의 탭 비

$$t_{imin} \leq t_i \leq t_{imax} \quad (10)$$

여기서, t_i : 변압기 탭 비
 t_{imin}, t_{imax} : 변압기 탭 비 limit
 - 전력용콘덴서 투입량

$$Sh_{imin} \leq Sh_i \leq Sh_{imax} \quad (11)$$

여기서, Sh_i : 전력용콘덴서 투입량
 Sh_{imin}, Sh_{imax} : 전력용콘덴서 투입량 limit

3. MPSO 알고리즘

3.1 PSO 알고리즘

Particle Swarm Optimization(PSO)[6]라 불리는 새로운 진화연산 기법의 일종으로 1995년에 J. Kennedy 와 R. Eberhart 에 의해 제안되었다. PSO는 물고기의 떼 (schooling)와 조류의 무리(flocking)와 같은 조직체의 행위에 관한 연구에서 동기가 유발되었다. PSO는 군생 모델(social model)과 인식 모델(cognitive model)을 조합으로 이루어졌다.

각 개체는 현재의 위치 벡터와 속도 벡터, 그리고 Pbest, Gbest를 이용해서 식(12)에 의해 이동을 하게 된다. 각 개체의 위치벡터 수정은 현재의 위치와 수정된 속도를 이용해서 식 (13)와 같다.

$$v_i^{k+1} = w v_i^k + c_1 \text{rand}_1 (Pbest_i - s_i^k) + c_2 \text{rand}_2 (Gbest - s_i^k) \quad (12)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (13)$$

여기서, v_i^k : i 번째 개체의 k 번째 속도 벡터
 s_i^k : i 번째 개체의 k 번째 위치 벡터
 v_i^{k+1} : i 번째 개체의 $k+1$ 번째도 속도벡터
 s_i^{k+1} : i 번째 개체의 $k+1$ 번째 위치 벡터
 N : 개체의 총 수
 $Pbest_i$: i 번째 개체의 Pbest _{i} 위치벡터
 $Gbest$: 전체 개체의 Gbest 위치 벡터
 $k = 1, 2, \dots, N$

3.2 MPSO 알고리즘

PSO 알고리즘은 간단하고, 구현하기도 쉬우며, 계산시간이 짧으며 대용량의 메모리가 필요 없다. 하지만, 때로는 PSO는 하나의 최적해가 발견되어지면 나머지 개체들이 그 방향으로 탐색하는 특성이 있다. 만약 그 해가

지역해 이면 다른 영역을 탐색하기 어려운 점이 있다. 따라서, 매 세대마다 개체의 다양성 지수 식(14)를 측정하고 다양성지수가 주어진 값 D_{min} 보다 작을 경우 유전 알고리즘의 돌연변이 연산자를 사용하여 다양성을 높이는 MPSO(Modified Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 제시 한다.

- MPSO 알고리즘을 이용하여 전역 최적해를 구하는 과정을 요약하면 다음과 같다.
- (단계1) 개체수 M , 돌연변이 확률 Mc , 다양성 측정지수 D_{min} 설정
 각 개체에 대해 초기 위치 벡터 s_k 와 속도벡터 v_k 를 난수에 의해서 초기화
 - (단계2) 전체 개체에 대해 초기의 위치 벡터 s_k 를 이제까지의 최적해의 위치를 $Pbest_k$ 로 한다. 이때 가장 우수한 $Pbest_k$ 를 전체 개체에 관한 최적의 위치를 $Gbest$ 로 한다.
 - (단계3) 개체의 속도 벡터 v_k 를 식(12)에 의해 갱신한다.
 - (단계4) 개체의 위치 벡터 s_k 를 식(13)에 의해 갱신한다.
 - (단계5) 개체의 k 에 관한 현재의 위치에서 목적함수 값 $F(s_k)$ 가 $F(Pbest_k)$ 보다 최적의 목적함수 값을 가지면 $Pbest_k = s_k$ 로 대체한다.
 - (단계6) 단계3에서 단계6까지 모든 개체에 관해서 실시하였다면 단계7로 가고, 그렇지 않으면 단계3으로 돌아간다.
 - (단계7) 모든 개체에 대해서가 $F(Pbest_k)$ 가 $F(Gbest)$ 보다 최적의 목적함수 값을 가지면 $Gbest = Pbest_k$ 로 대체한다.
 - (단계8) 개체의 다양성 지수를 측정하여 측정치가 D_{min} 보다 작으면 $F(Gbest)$ 를 제외한 각 개체에 확률 Mc 에 따라 돌연변이 연산을 수행[7]

$$D(t) = \frac{1}{|S|} \sum_{i=1}^{|S|} \sqrt{\sum_{d=1}^n (P_{id} - \bar{P}_d)^2} \quad \text{dispersal degree} \quad (14)$$

$|S|$: swarmsize

n : dimensionality of the problem

P_{id} : d th value of the i th particle

\bar{P}_d : d th value of the average point \bar{P}

(단계9) 최대 반복 횟수 도달 및 허용오차를 만족하면 탐색을 종료하고, 그렇지 않으면 단계3으로 돌아간다.

4. 사례 연구

4.1.1 사례연구 1 대상계통:IEEE 30모선

본 논문에서 제시한 기법의 효과를 검증하기 위해서 테스트 계통[8]에 적용하여 그 결과를 비교검토 하였다. 검토대상은 IEEE 30모선 계통으로, 6개의 발전기, 21개의 부하 모선, 41개의 분기로 구성되어 있다. 최적조류계산의 목적함수는 총 유효발전 비용을 최소화하도록 설정하였으며, 제어변수는 5대 발전기의 유효전력 출력량, 6개 발전기 모선의 전압 크기, 4개 변압기 탭 비, 9개 전력용 콘덴서 투입량으로 총 24개이다. 변압기 탭비는 $0.9pu \sim 1.1pu$ 이며, 전력용 콘덴서 투입량은 $0pu \sim 0.05pu$. 모선전압 허용 범위는 $0.95pu \sim 1.1pu$ 로 설정하였다.

최적조류계산 시뮬레이션은 CPU AMD Athlon 2.11GHz 컴퓨터에서 모의되었으며, 10회 반복 수행을 하였다.

최적조류계산시 사용한 MPSO 알고리즘의 파라미터는 (표1)에 나타내었다.

표1. 시물레이션 계수

파라미터	값	파라미터	값
세대수	50	w	0.9~0.4
해집단수	60	Mc	0.05
c1,c2	2.0	D_{min}	0.001

4.1.2 IEEE 30모선 검토결과

아래 표에서 MPSO 알고리즘을 이용한 최적조류계산의 검토결과를 나타내고 있다. MPSO 알고리즘에 의한 연산시간은 7.5(sec) 총 발전비용은 800.5\$/hr로서 참고 문헌[8]에서 제시하는 804.8\$/hr 보다 더 우수한 해를 나타내고 있다.

표2. 변압기 탭

변압기 번호	1(4-12)	2(6-9)	3(6-10)	4(28-27)
변압기 탭 비	1.096	0.908	0.984	0.982

표3. 전력용 콘덴서 투입량

Bus No.	전력용콘덴서 투입량(pu)	Bus No.	전력용콘덴서 투입량(pu)
10	0.0340	21	0.0484
12	0.0302	23	0.0370
15	0.0293	24	0.050
17	0.0207	29	0.0267
20	0.0455	-	-

표4. 발전기 모선의 전압,유효전력 출력,발전비용

Unit No	Voltage(pu)	Pg(MW)	Cost(\$/hr)
1	1.08	177.13	471.92
2	1.06	48.82	127.13
5	1.03	21.40	50.00
8	1.03	21.30	72.97
11	1.07	11.82	38.94
13	1.05	12	39.5
Total	-	292.47	800.5

4.2.1 사례연구 2 대상계통:IEEE 118모선

테스트 계통[9]에 적용하여 그 결과를 비교 하였으며 검토 대상은 IEEE 118모선 계통으로, 제어변수는 13대 발전기의 유효전력 출력량,14개의 발전기 모선의 전압 크기,9개 변압기 탭 비로 총 36개이다.

최적조류계산시 사용한 MPSO 알고리즘의 파라미터는 (표5)에 나타내었다

표5. 시물레이션 계수

파라미터	값	파라미터	값
세대수	200	w	0.9~0.4
해집단수	100	Mc	0.05
c1,c2	2.0	D_{min}	0.001

4.2.2 IEEE 118모선 검토결과

118 모선에 테스트 한 결과 MPSO 알고리즘에 발전비용은 17532.3\$/hr로서 참고문헌[9]에서 제시하는 17911.72\$/hr 보다 더 우수한 해를 나타내고 있다.

표6. 변압기 탭

변압기번호	1(8 5)	2(26 25)	3(33 17)	4(38 37)	5(63 59)	6(64 61)
변압기탭비	0.953	1	0.955	0.93	0.955	1.02
변압기번호	7(65 63)	8(68 69)	9(81 80)	-	-	-
변압기탭비	0.953	0.959	0.951	-	-	-

표 7.발전기 모선의 전압,유효전력 출력,발전비용

Unit No	Voltage(pu)	Pg(MW)	Cost(\$/hr)
1	1.1	290.00	1118.6
10	1.09	325.30	1347.62
12	1.09	181.63	873.63
25	1.09	242.19	1178.19
26	1.1	265.07	1284.77
49	1.09	245.16	1214.94
59	1.1	195.00	1008.93
61	1.09	210.00	1103.02
65	1.08	344.96	1570.17
66	1.09	315.00	1397.86
80	1.09	336.37	1547.78
89	1.1	315.00	1150.51
100	1.09	230.00	1233.8
103	1.1	265.00	1497.2
Total	-	3760.58	17527.02

5. 결론

본 논문에서는 최적조류계산 문제에 MPSO알고리즘 기법을 적용하여 그 적용가능성을 검토하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 IEEE 30,IEEE 118 모선 최적조류계산 문제에 적용하여 참고문헌[8],[9]에 비하여 발전 비용을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

향후 과제는 제안한 MPSO알고리즘을 이용한 PC 클러스터링을 적용하여 계산시간의 단축을 위한 지속적인 연구가 기대 된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제(R-2005-7-064)임.

[참 고 문 헌]

- [1] Hermann W. Dommel and William F. Tinney, "Optimal power flow solutions," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, pp1886-1876, October 1968.
- [2] O. Alsac and B. Stott, "Optimal load flow with steady state security," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, pp. 745-754, 1974.
- [3] O. Alsac, J. Bright, M. Prais, and B. Stott, "Further developments in lp-based optimal power flow," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, pp. 697-711, August 1990.
- [4] G. F. Reid and L. Hasdorff, "Economic dispatch using quadratic programming," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, pp. 2015-2023, 1973.
- [5] L. L. Lai, J. T. Ma, R. Yokoyama, and M. Zhao, "Improved genetic algorithms for optimal power flow under both normal and contingent operation states," Elec. Power Energy Syst., Vol. 19, No. 5, pp. 287-292, 1997.
- [6] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," IEEE international Conference on Neural Networks, vol.4, pp.1942-1948, 1995.
- [7] Krink t., Vesterstorem j.s. and Riget J., "Particle swarm optimization with spatial particle extension," Proceeding of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Honolulu Hawaii USA,2002,1474-1479
- [8] K. Y. Lee, Y. M. Park, and J. L. Ortiz "A United approach to optimal real and reactive power dispatch", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 5, pp. 1147-1153, 1985.
- [9] Mirko Todorovski and Dragoslav Rajicic, Senior Member , "An Initialization Procedure in Solving Optimal Power Flow by Genetic Algorithm",IEEE Trans. on Power System,V OL.21,NO.2,pp.480-483,MAY 2006