

Particle Swarm Optimization 기법을 이용한 최적조류계산 알고리즘

김중을, 김형수, 문경준, 이화석, 박준호
 한국전기연구원, 부산대학교, 한국원자력연구소, 거제대학, 부산대학교

Optimal Power Flow by PSO

Jong Yul Kim, Hyoung Su Kim, Kyoung Jun Moon, Haw Seok Lee, June Ho Park
 KERI, Pusan National University, KAERI, Koje College, Pusan National University

Abstract - 최적조류계산은 전력계통에서 여러가지 제약 조건을 만족하면서 경제적으로 계통을 운영하기 위한 기법이다. 종래의 최적조류계산 방법은 주로 선형계획법, 비선형계획법 같은 수치해석적인 방법을 사용하였다. 그러나, 이러한 방법들은 전역 최적해를 구하기 위해서는 목적함수가 convex해야 한다. 또한 계통 규모가 클 경우, 최적해 수렴이 안되거나 수렴이 되더라도 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 최근에는 이러한 문제를 극복하고자 여러 가지 진화연산기법들이 최적조류계산 문제에 적용되고 있다. 본 논문에서는 최근에 등장한 PSO알고리즘을 이용한 최적조류계산 기법을 소개하고 테스트 계통을 대상으로 그 적용가능성을 검증하였다.

성을 보이기 위하여 테스트 함수 및 IEEE 30 모선 계통의 최적조류계산 문제에 적용하여 기존의 GA 알고리즘과 성능을 비교, 검토하였다.

2. 최적조류계산

2.1 최적조류계산의 정의

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

1. 서 론

최적조류계산(Optimal Power Flow : OPF)은 전력계통에서 여러 가지 제약조건을 만족하면서 경제적이고 안전하게 계통을 운용하기 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. 현재 우리나라의 전력산업 환경은 구조개편으로 인해 경제적, 사회적, 그리고 기술적으로 많은 변화를 겪고 있다. 이러한 변화 속에서 안전하고 높은 신뢰도를 유지하면서 최적으로 계통을 운영하는 것은 점차로 어려운 일이 되고 있다. 따라서 전력계통의 운용과 계획에 가장 기본이 되고 필수적인 최적조류계산에 대한 연구가 요구되고 있다.

종래의 최적조류계산 방법으로 비선형 계획법[2], 선형 계획법[3], 2차계획법[4] 등의 수학적인 프로그래밍 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. 또한 계통의 규모가 큰 경우, 다수의 운용 제약조건, 계통의 비선형성으로 인해 최적의 해를 구하는데 많은 시간이 걸릴 뿐만 아니라 심지어 전역 최적해로 수렴함을 보장할 수가 없다. 최근에는 수학적 프로그래밍 기법의 단점을 극복하고자 GA, EP, ES와 같은 진화연산 기법의 적용에 대한 연구가 진행되고 있다. 최근에는 새로운 진화연산 기법의 일종인 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘[5]의 적용에 대한 연구가 진행되고 있는데, PSO 알고리즘은 기존 유전알고리즘에 비해 연산과정이 간단하여 계산부담이 상대적으로 작고, 최적해 탐색능력에 영향을 미치는 파라미터가 적어 실제 구현이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 최적조류계산을 위한 PSO 알고리즘의 적용을 제안하였다. 또한, 제안한 방법의 유용

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & f(x,u) \quad (1) \\ \text{s.t. } & g(x,u) = 0 \quad (2) \\ & h(x,u) \leq 0 \quad (3) \end{aligned}$$

여기서, x : 상태변수

- 전압의 위상각
- 부하 모선에서의 전압 크기
- 발전기의 무효전력 출력

u : 제어변수

- 발전기의 유효전력 출력
- 발전기 모선 전압
- 변압기의 변압비

$f(\cdot)$: 목적함수

$g(\cdot)$: 등식제약조건

$h(\cdot)$: 부등식제약조건

목적함수로는 일반적으로 발전비용의 최소화, 손실의 최소화, 그리고 비상시 경제급전 등을 고려하며, 제약조건으로 전력조류방정식, 발전기 최대 및 최소 출력, 모선의 최대 및 최소 전압, 선로의 용량 등을 고려한다.

2.2 최적조류계산 문제의 정식화

본 논문에서는 유효발전 비용의 최소화를 최적조류계산 문제의 목적함수로 설정하였으며, 이를 다음의 식 (4)에 나타내었다.

$$\text{Min } F(P_g) = \sum_{i=1}^{N_g} (a_i + b_i P_{g_i} + c_i P_{g_i}^2) \quad (4)$$

여기서, $F(P_g)$: 총 발전 비용

P_{g_i} : 각 발전기의 유효 전력출력

i : 발전기의 모선 번호

N_g : 계통 전체의 발전기 모선의 수

a_i, b_i, c_i : 각 발전기의 연료계수

최적조류계산에서의 제약조건은 크게 식 2)의 등식 제약조건과 식 3)의 부등식 제약조건으로 나눌 수 있다.

1) 등식 제약조건

$$P_i - P_{gi} + P_{di} = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \quad (5)$$

$$Q_i - Q_{gi} + Q_{di} = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \quad (6)$$

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 발전기의 유효전력 및 무효전력

P_{di}, Q_{di} : i 번째 부하의 유효전력 및 무효전력

N_b : 모선의 총 개수

2) 부등식 제약조건

i) 운용상의 제약조건

- 선로 조류 제약 (MVA, MW, A)

$$\sqrt{P_i^2 + Q_i^2} \leq S_i^{Max} \quad (7)$$

여기서, P_i : i 번째 선로에 흐르는 유효전력

Q_i : i 번째 선로에 흐르는 무효전력

S_i^{Max} : i 번째 선로의 복소전력 최대허용치

- 부하 모선의 전압크기

$$V_{dmin} \leq V_{di} \leq V_{dmax} \quad (8)$$

여기서, V_{di} : 부하모선의 전압 크기

V_{dmin}, V_{dmax} : 부하모선 전압의 limit

- 발전기의 무효전력 출력용량

$$Q_{gi min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi max} \quad (9)$$

여기서, Q_{gi} : 발전기의 무효전력 출력

$Q_{gi min}, Q_{gi max}$: 발전기 무효전력 출력 limit

- 슬랙 모선의 유효전력 출력량

$$P_{g1 min} \leq P_{g1} \leq P_{g1 max} \quad (10)$$

여기서, P_{g1} : 슬랙 모선의 유효전력 출력

$P_{g1 min}, P_{g1 max}$: 슬랙모선 유효전력 출력 limit

ii) 제어변수에 관한 제약조건

- 발전기의 유효전력 출력용량

$$P_{gi min} \leq P_{gi} \leq P_{gi max} \quad (11)$$

여기서, P_{gi} : 발전기의 유효전력 출력

$P_{gi min}, P_{gi max}$: 발전기 유효전력 출력 limit

- 발전기 모선의 전압크기

$$V_{gi min} \leq V_{gi} \leq V_{gi max} \quad (12)$$

여기서, V_{gi} : 발전기 모선의 전압 크기

$V_{gi min}, V_{gi max}$: 발전기 모선의 전압 limit

- 변압기의 탭 비

$$t_{i, min} \leq t_i \leq t_{i, max} \quad (13)$$

여기서, t_i : 변압기가 설치된 모선의 탭 비

$t_{i, min}, t_{i, max}$: 변압기 탭 비 limit

3. PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘

Particle Swarm Optimization(PSO)라 불리는 새로운 진화연산 기법의 일종으로 1995년에 J. Kennedy 와 R. Eberhart 에 의해 제안되었다[5]. PSO는 물고기의 떼 (schooling)와 조류의 무리(flocking)와 같은 조직체의 행위에 관한 연구에서 통기가 유발되었다. PSO는 군생 모델(social model)과 인식 모델(cognitive model)을 조합으로 이루어졌다. 군생 요소는 개인이 자신의 경험을 무시하고 주위 개인들의 신조에 따라 그들의 행동을 조절한다는 것을 암시하고, 인식 요소는 개인들의 고립된 개체로서 취급한다는 것이다. 즉, 이러한 무리가 먹이를 찾아가는 과정에서 무리 전체의 정보를 서로 공유한다는 가설과 무리내부의 각 개체(agent)가 자기 자신의 경험과 무리 전체에 공유되어있는 정보를 사용하여 각 개체의 의견을 결정한다는 개념을 최적화 과정에 도입한 방법이라 할 수 있다. PSO의 특징은 알고리즘이 간단하고, 구현하기도 쉬우며, 계산시간이 짧으며 대용량의 메모리가 필요 없고, 다른 휴리스틱 알고리즘과는 달리, PSO 탐색공간에서 전역해와 국부해 사이를 균형 있게 탐색함으로써 조기수렴하는 것을 극복 할 수 있다. 이러한 PSO 알고리즘의 특징은 다음과 같다.

- PSO는 GA등과 같이 복수의 탐색점을 가지며 각 탐색점의 Pbest (personal best)와 집단의 Gbest (group of global best)를 이용하여 각 탐색점을 확률적으로 변경시켜가는 것에 의해 전역적인 최적해를 탐색하는 최적화 방법이다.
- PSO은 전역 및 국부 탐색의 결합으로 기존 방법들보다 전역해를 찾는 데 더 유연하고 강인하게 만들 수 있다.
- PSO는 기존의 다른 휴리스틱 방법과는 다르게, 초기해집단에 의해서 좌우되지는 않는다. 그래서 탐색공간 어디에서 출발하여도 각 개체들간의 공유된 정보에 의해서 조기 수렴을 극복할 수 있고 전역 최적해에 수렴할 수 있다.
- PSO의 개념은 원래 2차원 공간에서 고안되었으나 n차원 공간으로도 확장가능하다.

각 개체는 현재의 위치 벡터와 속도 벡터, 그리고 Pbest, Gbest를 이용해서 식 (14)에 의해 이동을 하게 된다. 각 개체의 위치벡터 수정은 현재의 위치와 수정된 속도를 이용해서 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$V_{i,j} = K \times (V_{i,j} + c_1 r_1 (P_{i,j} - X_{i,j}) + c_2 r_2 (P_{g,j} - X_{i,j})) \quad (14)$$

$$X_{i,j} = X_{i,j} + V_{i,j} \quad (15)$$

여기서, $V_{i,j}$: i 번째 개체의 j 번째 속도 벡터

$X_{i,j}$: i 번째 개체의 j 번째 위치 벡터

$P_{i,j}$: i 번째 개체의 Pbest 위치 벡터

$P_{g,j}$: 전체 개체의 Gbest 위치 벡터

c_1, c_2 : 가중치 계수

K : Constriction Factor

PSO 알고리즘을 이용하여 전역 최적해를 구하는 과정을 요약하면 다음과 같다.

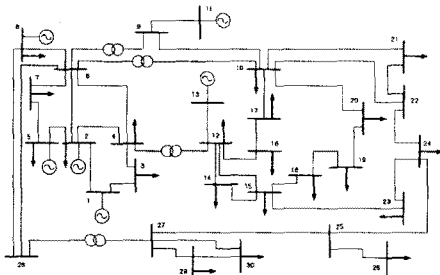
(단계1) 각 개체에 대해 초기 위치 벡터 $X_{i,j}$ 와 속도벡터

- $V_{i,j}$ 를 난수에 의해서 초기화 시킨다.
- (단계2) 전체 개체에 대해 초기의 위치 벡터 $x_{i,j}$ 를 이제까지의 최적해의 위치를 $P_{best}(P_{i,j})$ 로 한다. 이때 가장 우수한 $P_{i,j}$ 를 전체 개체에 관한 최적의 위치를 $G_{best}(P_{g,j})$ 로 한다.
- (단계3) 개체의 속도 벡터 $V_{i,j}$ 를 식 (14)에 의해 갱신한다.
- (단계4) 개체의 위치 벡터 $x_{i,j}$ 를 식 (15)에 의해 갱신한다.
- (단계5) 현재의 위치에서 목적함수 값 $F(x_{i,j})$ 가 $F(P_{i,j})$ 보다 최적의 목적함수 값을 가지면 $P_{i,j} = x_{i,j}$ 로 대체한다.
- (단계6) 단계3에서 단계5까지 모든 개체에 관해서 실시하였다면 단계7로 가고, 그렇지 않으면 단계3으로 돌아간다.
- (단계7) 모든 개체에 대해서가 $F(P_{i,j})$ 가 $F(P_{g,j})$ 보다 최적의 목적함수 값을 가지면 $P_{g,j} = P_{i,j}$ 로 대체한다.
- (단계8) 최대 반복 횟수 도달 및 허용오차를 만족하면 탐색을 종료하고, 그렇지 않으면 단계3으로 돌아간다.

4. 사례연구

4.1 대상계통 : IEEE 30모선

본 논문에서 제안한 방법을 IEEE 30 모선 계통에 적용하여, 제안한 방법의 유용성을 입증하였다. 모의 계통은 6개의 발전기, 21개의 부하 모선, 41개의 분기로 구성되어 있다. 최적조류계산의 목적함수는 총 유효발전 비용을 최소화하도록 설정하였으며, 제어변수로 5대 발전기의 유효전력 출력량, 6개 발전 모선의 전압 크기, 4개 변압기 탭비를 사용하였다.



〈그림 1〉 IEEE 30 모선 계통

최적조류계산 시뮬레이션은 Intel Pentium IV 2.0 Ghz 컴퓨터에서 모의되었으며, 각각 10회씩 반복하여 수행하였다. 최적조류계산시 사용한 유전 알고리즘 및 PSO 알고리즘의 파라미터는 표 1에 나타내었다.

표 1 시뮬레이션 계수

항 목	GA	PSO
세대수	200	200
해집단수	50	50
교배확률	0.9	-
돌연변이확률	0.1	-
c1	-	2.05
c2	-	2.05
K	-	2.974

4.2 검토결과

아래 표에서는 유전알고리즘과 본 논문에서 제안한 PSO 알고리즘의 검토결과를 나타내고 있다. 표에서 나타낸 바와 같이 본 논문에서 제안한 알고리즘이 유전알고리즘 방법보다 총 발전 비용이 감소됨을 알 수 있었다.

표 2 시뮬레이션 결과

Unit No	Bus No	GA	PSO
1	1	176.13	179.35
2	2	48.21	49.01
3	5	20.68	19.95
4	8	22.84	20.04
5	11	11.94	12.88
6	13	13.13	11.55
Total PG(MW)		292.95	292.79
Total Cost(\$/hr)		802.12	801.26

연산시간 측면에서 200세대 계산에 소요되는 시간이 GA의 경우 약 455초인 반면 PSO는 약 319초 정도가 소요되었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 PSO가 GA보다 알고리즘 측면에서 보다 간단하여 계산량을 줄일 수 있기 때문이다.

5. 결 론

본 논문에서는 최적조류계산 문제에 PSO알고리즘 기법을 적용하여 그 적용가능성을 검토하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 IEEE 30 모선 최적조류계산 문제에 적용하여 GA알고리즘과 비교하였다.

그 결과, 제안한 방법이 기존의 GA에 비해 발전비용 및 연산시간을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력공학공동 연구소 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, pp. 1886-1876, 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. Hasdorf, "Economic dispatch using quadratic programming," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, pp. 2015-2023, 1973.
- [5] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," IEEE international Conference on Neural Networks, vol.4, pp.1942-1948, 1995.