

유전알고리즘을 이용한 최적조류계산

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

Optimal Power Flow by Genetic Algorithm

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 제약조건을 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 유전알고리즘과 같은 기법들이 최적조류계산 문제에 적용되고 있다. 본 논문에서는 유전알고리즘을 이용한 최적조류계산 기법을 소개하고 테스트 계통을 대상으로 그 적용가능성을 검증하였다.

리고 비상사 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.

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

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

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 복소전력의 최대허용 값

- 부하 모선의 전압크기

$$V_{di min} \leq V_{di} \leq V_{di max} \quad (8)$$

여기서, V_{di} : 부하모선의 전압 크기
 $V_{di min}, V_{di max}$: 부하모선 전압의 최소값, 최대값

- 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 최소, 최대 출력

- 슬래 모선의 유효전력 출력량

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

여기서, P_{g1} : 슬래 모선의 유효전력 출력량
 $P_{g1 min}, P_{g1 max}$: 슬래 모선의 유효전력 최소, 최대 출력

ii) 제어변수에 관한 제약조건

1. 서 론

최적조류계산(Optimal Power Flow : OPF)은 전력계통에서 여러가지 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 구조 개편으로 인해 경제적, 사회적, 그리고 기술적으로 많은 변화를 겪고 있다. 이러한 변화 속에서 안전하고 높은 신뢰도를 유지하면서 최적으로 계통을 운용하는 것은 점차로 어려운 일이 되고 있다. 따라서 전력계통의 운용과 계획에 가장 기본이 되고 필수적인 최적조류계산에 대한 연구가 요구되고 있다. 종래의 최적조류계산 방법으로 비선형 계획법(Nonlinear Programming) [2], 선형계획법(Linear Programming) [3], 2차계획법(Quadratic Programming) [4] 등의 수학적인 프로그래밍 기법 등이 사용되었다. 그러나 이러한 방법들이 전역 최적해를 구하기 위해서는 목적함수가 볼록(convex)해야 하나, 최적조류계산 문제는 비볼록(non-convex)한 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 유전 알고리즘(Genetic Algorithm) [5], 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing) [6] 등이 최적조류계산 문제에 적용되고 있다. 본 논문에서는 유전알고리즘을 이용한 최적조류계산 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 유용성을 보이기 위하여 제안한 방법을 IEEE 30 모선 계통의 최적조류계산 문제에 적용하여 종래의 방법과 비교·검토하였다.

2. 최적조류계산

2.1 최적조류계산의 정의

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

$$\text{Minimize } f(x,u) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } g(x,u) = 0 \quad (2)$$

$$h(x,u) \leq 0 \quad (3)$$

여기서, x : 상태변수

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

u : 제어변수

- 발전기의 유효전력 출력(Slack Bus 제외)
- 발전기 모선 전압
- 변압기의 변압비

$f(\cdot)$: 목적함수

$g(\cdot)$: 등식제약조건

$h(\cdot)$: 부등식제약조건

목적함수로는 일반적으로 발전비용의 최소화, 손실의 최소화, 그

- 발전기의 유효전력 출력용량

$$P_{gimin} \leq P_{gi} \leq P_{gimax} \quad (11)$$

여기서, P_{gi} : 발전기의 유효전력 출력량
 P_{gimin}, P_{gimax} : 발전기의 유효전력 최소, 최대 출력

- 발전기 모선의 전압크기

$$V_{gimin} \leq V_{gi} \leq V_{gimax} \quad (12)$$

여기서, V_{gi} : 발전기 모선의 전압 크기
 V_{gimin}, V_{gimax} : 발전기 모선의 전압 최소값, 최대값

- 변압기의 탭 비

$$t_{imin} \leq t_i \leq t_{imax} \quad (13)$$

여기서, t_i : 변압기가 설치된 모선의 탭 비
 t_{imin}, t_{imax} : 변압기 탭 비의 최소값과 최대값

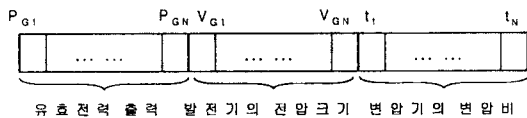
3. 유전알고리즘

3.1 유전알고리즘 개요

유전알고리즘은 자연의 진화과정을 모의한 최적화 알고리즘으로 확률적인 방법과 개체간의 체계적인 정보교환을 통해 탐색공간을 조사해 나감으로써 가장 적절한 해를 구한다. 유전알고리즘으로 최적해를 탐색하는데 있어서 해집단의 크기, 스트링길이, 적합도, 교배와 돌연변이 확률 설정 등이 중요한 문제가 된다. 이 중 교배와 돌연변이는 탐색공간을 다양하게 이동하는 것을 가능하게 함으로 유전알고리즘의 핵심적 역할을 한다. 본 논문에서는 최적해 탐색능력을 향상시키기 위해서 교배 및 돌연변이 확률이 세대수가 진행됨에 따라 변화하도록 하였다. 즉, 교배확률은 초기 값보다 감소하도록, 돌연변이 확률은 초기 값보다 증가하도록 하였다.

3.2 유전알고리즘을 이용한 최적조류계산

최적조류계산 문제에 유전알고리즘을 적용하는 방법은 다음과 같다. 첫째, 유전 알고리즘에서는 제어변수인 발전기의 유효전력 출력, 발전기의 전압 크기, 변압기의 변압비를 각각의 제어변수에 요구되는 정확도에 따라 다른 크기의 염색체를 사용하여 스트링을 구성하였고, 이를 그림 1에 나타내었다. 또한 제어변수의 최대 및 최소한계 제약조건은 스트링의 디코딩 과정에서 자동적으로 만족시켰다.



<그림 1> 유전알고리즘의 흐름도

또한 본 논문에서 사용한 적합도 함수는 식 (14)와 같으며 각 발전기의 연료비용 합이 작을수록 적합도 값이 커지도록 선정하였다. 그리고 최적조류계산에서 운용상의 제약조건들은 적합도 함수에 페널티 항을 두어 제약조건에 위배 정도에 따라 벌점을 부과하였다.

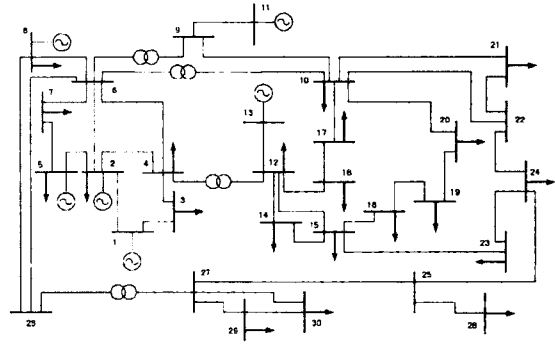
$$FF = \frac{A}{\sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) + \sum_{j=1}^{N_C} w_j \cdot Pen_j} \quad (14)$$

여기서, FF : 적합도 함수
 A : 상수
 w_j : j번째 계통 운용과 관련된 제약조건에 가중치
 $F_i(P_{Gi})$: i번째 발전기의 연료비용 함수
 Pen_j : j번째 계통운용 제약조건에 페널티 함수
 N_G : 발전기의 대수
 N_C : 계통 운용과 관련된 제약조건에 개수

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 목적 함수는 총 유효발전 비용을 최소화하도록 설정하였으며, 제어변수로 5대 발전기의 유효전력 출력량, 6개 발전 모선의 전압 크기, 4개 변압기 탭 비를 사용하였다.



<그림 2> IEEE 30 모선 계통

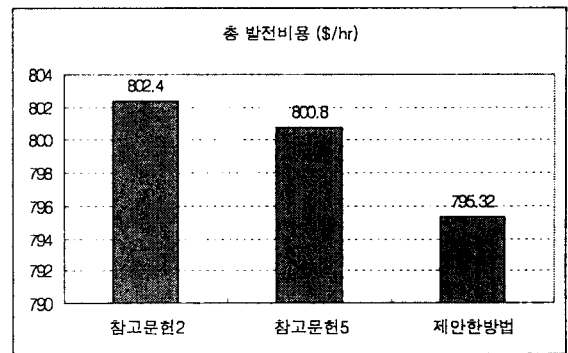
최적조류계산시 유전알고리즘에서 사용한 시뮬레이션 계수는 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 계수

항 목	세대수	해집단수	초기 교배확률	초기 돌연변이확률
설정 값	200	50	0.9	0.05

4.2 검토결과

그림 3에서는 본 논문에서 구한 총 발전비용을 참고문헌[2,5]와 비교하였다. 그림에서 나타낸 바와 같이 본 논문에서 제안한 알고리즘이 기존의 방법보다 총 발전 비용이 감소됨을 알 수 있었다.



<그림 3> 총 발전비용

4. 결 론

본 논문에서는 최적조류계산 문제에 유전알고리즘 기법을 적용하여 그 적용가능성을 검토하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 IEEE 30 모선 최적조류계산 문제에 적용하여 참고문헌 [2, 5]와 비교하였다. 그 결과, 제안한 방법이 종래의 방법에 비해 발전비용을 감소시킴을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- C. A. Roa-Sepulveda and B. J. Pavez-Lazo, "A Solution to the optimal power flow using simulated annealing," PPT 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, Sep. 2001