

송전손실 재분배를 고려한 유전 알고리즘 기반의 무효전력 최적배분

채명석\*  
군장대학\*

이명환, 김병섭, 신종린  
건국대학교

GA-Based ORPD considering Transmission Losses Re-Distribution

Myung-Suck Chae\* Myung-Hwan Lee, Byung-Seop Kim, Joong-Rin Shin  
Kun-Jang College\* Kon-Kuk University

**Abstract** - This paper presents an algorithm for optimal reactive power dispatch problem based on genetic algorithm. Optimal reactive power dispatch is particularized to the minimization of transmission line losses by suitable selection of generator reactive power outputs and transformer tap settings. To attain for the objective, in this paper, loss re-distribution algorithm(LRDA) is applied to ORPD. The proposed method has been evaluated on the IEEE 30 bus system. Results of the application of the method are compared with a simple genetic algorithm.

1. 서 론

대규모 전력계통의 합리적인 운영이라는 측면에서 경제운전의 중요성에 대한 관심은 더욱 높아지고 있다. 유효전력 최적배분과 무효전력 최적배분문제(Optimal Reactive Power Dispatch : ORPD)는 전력계통 경제운용에 있어 중요한 최적화 문제로, 전자는 발전기의 발전량을 조절하여 연료비를 최소화하는 문제이며, 후자는 전압 및 무효전력 제약조건을 고려하여 계통손실을 최소화하는 문제로 취급한다.

기존의 ORPD 문제는 경사도(gradient)법과 선형 및 비선형 프로그램 기법(Linear & Non-Linear Programming) 등을 이용하여 주어진 제약조건에 만족하도록 문제를 해결하였으나[1], 이러한 수치기법 기반의 알고리즘은 그 특성상 비선형 목적함수를 선형화 하는 과정에서 나타나는 간략화 및 수치적인 가정이 국소 최적해를 구할 수 있다[2].

본 논문에서는 기존의 ORPD가 가지는 단점을 해결하기 위하여 자연 진화원리에 근거한 탐색기법인 유전알고리즘(Genetic Algorithm : GA)을 적용하였고, 시스템의 제약조건을 평가하기 위하여 손실 재분배(Loss Re-Distribution Algorithm : LRDA) 조류계산 알고리즘을 도입함으로써 좀 더 정밀한 해를 얻도록 하였다. 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 IEEE 30 모선 계통에 적용하여 그 결과를 비교하였다.

2. 문제의 정식화

본 논문에서 적용한 ORPD 문제의 목적함수는 송전손실을 최소화하는 것이고 부등호 제약조건으로는 발전모선의 전압크기, 변압기 탭, 각 모선의 무효전력 보상량을 제어변수로 택하였으며 부하모선의 전압크기, 발전모선의 무효전력 크기를 상변수로 취급하였다. 또한, 등호제약조건으로 사용하는 조류계산 알고리즘은 실제통에 근접한 해석을 하기 위하여 LRDA를 적용하였다.

2.1 목적함수

본 논문의 목적함수는 식(1)과 같이 전체 계통의 송전 손실을 최소화하도록 하였다.

$$Min P_{loss} = \sum_{i,j \in N_E} G_{ij}(V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

여기서,  $N_E$  는 계통내 선로의 집합이다.

2.2 제약조건

2.2.1 등호제약조건 (Equality constraint)

본 논문에서의 등호제약조건은 식 (2)와 같이 LRDA가 적용된 전력수급조건을 사용하였다. 송전손실 재분배 알고리즘은 기존 전력조류계산에서 슬랙모선이 담당하던 계통 손실을 각 발전기가 전기적 특성을 고려하여 분담하게 하는 방법으로 슬랙모선의 손실 부담을 완화시킴으로서 실제통에 근접한 해석과 보다 정밀한 해를 얻을 수 있다[3].

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_{gi} - P_{di} \\ &- V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + P_i^{loss} = 0, \quad i \in N_{B-1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i &= Q_{gi} - Q_{di} \\ &- V_i \sum_j V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0, \quad i \in N_{PQ} \end{aligned}$$

- 여기서,  $P_{gi}$ ,  $Q_{gi}$  : 모선 i 의 유효 및 무효전력 발전
- $P_{di}$ ,  $Q_{di}$  : 모선 i 의 유효 및 무효전력 부하
- $G_{ij}$ ,  $B_{ij}$  : 모선 i, j 간 컨덕턴스 및 서셉턴스
- $V_i$  : 모선 i 의 전압크기
- $N_{B-1}$  : 슬랙모선을 제외한 모선집합
- $N_{PQ}$  : 부하모선 집합
- $P_i^{loss}$  : 각 발전기의 송전손실 분담량

식(2)에서 전력평형방정식에 포함된 송전손실은 계통의 특성에 맞게 각 발전기에 공동으로 분담하는 항으로 식 (3)과 같이 각 선로에 흐르는 전류의 제곱에 비례하도록 한다.

$$P_i^{loss} = \frac{|I_i|^2}{\sum_{i \in N_g} |I_i|^2} \times P_{loss} \quad (3)$$

- 여기서,  $N_g$  : 발전모선 집합
- $P_{loss}$  : 시스템 전체 송전손실
- $I_i$  : i 모선의 순주입 전류

### 2.2.2 부등호 제한 조건(Equality constraint)

최적화 문제를 위한 제어변수  $C_V$  및 상태변수  $S_V$ 는 각각에 대하여 다음과 같은 한계영역을 갖게된다.

$$(C_V, S_V)^{\min} \leq Q_{gi}, V_{gi}, V_{di}, T_k, C_i \leq (C_V, X_V)^{\max} \quad (4)$$

- 여기서,  $Q_{gi}$  : 발전모선  $i$ 의 무효전력  
 $V_{di}$  : 발전모선  $i$ 의 전압크기  
 $V_{gi}$  : 부하모선  $i$ 의 전압크기  
 $T_k$  : 변압기의 탭설정값  
 $C_i$  : 병렬 콘덴서의 크기

## 3. 유전알고리즘 응용

### 3.1 목적함수의 확장

정식화된 ORPD 문제는 식 (2)와 같이 등호제약조건이 비선형이고, 식 (4)와 같이 부등호 제약조건 집합의 표본공간이 다양하기 때문에 기존의 LP 또는 NLP 범으로 해를 얻기에는 수치해의 안정성(numerical stability) 및 국부해의 가능성이 있다. 본 논문에서는 이러한 기존의 수치기법이 가지는 단점을 보완하고 정확한 해를 얻기 위하여 자연진화원리인 GA를 적용하였다. 본 연구에서 사용된 GA의 목적함수는 식(5)와 같이 손실을 최소화하는 함수에 부하모선의 전압 제약조건과 발전모선의 무효전력 제약조건을 변수로 하는 페널티 함수를 부과하여 GA 적용에 알맞도록 확장하였다.

$$O_f = \text{Min} \left\{ (P_{loss} + \sum_{i=N_{lm}} \lambda_V (V_i - V_i^{\text{lim}})^2 + \sum_{i=N_{lm}} \lambda_Q (Q_i - Q_i^{\text{lim}})^2) \right\} \quad (5)$$

$$\text{여기서, } V_i^{\text{lim}} = \begin{cases} V_i^{\text{min}} & \text{if } V_i < V_i^{\text{min}} \\ V_i^{\text{max}} & \text{if } V_i > V_i^{\text{max}} \end{cases}$$

$$Q_i^{\text{lim}} = \begin{cases} Q_i^{\text{min}} & \text{if } Q_i < Q_i^{\text{min}} \\ Q_i^{\text{max}} & \text{if } Q_i > Q_i^{\text{max}} \end{cases}$$

페널티 계수  $\lambda_V$ ,  $\lambda_Q$ 는 유전알고리즘의 탐색과정에서 세대에 의한 효과를 부여할 수 있도록 본 논문에서는 다음과 같이 설정하였다.

$$\lambda_V = G_i(t/T) S_V, \quad \lambda_Q = G_i(t/T) S_Q \quad (6)$$

- 여기서,  $G_i(\cdot)$  :  $i$  모선에 대하여 벌점계수가 세대수의 영향을 받도록 정의된 함수  
 $t$  : 현 세대수  
 $T$  : 종료 세대수  
 $S_V, S_Q$  : 감도상수

### 3.2 유전알고리즘에 의한 최적화

본 논문에서는 실변수 코딩(floating-point numbers)과 룰렛 휠(Roulette wheel)방법을 사용하였으며, 엘리티즘(Elitism) 함수를 사용하였다.

#### 3.2.1 적합도 함수

식 (5)의 목적함수를 최소화하는 문제를 다음과 같이 적합도 최대화문제로 변형시킬 수 있다.

$$F = \frac{M}{1+E} \quad (7)$$

- $E$  : 목적함수  
 $M$  : 적합도를 조절하기 위한 상수( $M=100$ )

#### 3.2.2 재생산(Reproduction)

재생산은 적합도 함수에 비례하여 개체를 생존시키는 연산자로 다른 개체에 비하여 적합도가 큰 개체는 다음 세대에 더 많은 자손을 발생시킬 가능성이 크도록 적합도에 의해 슬롯의 크기가 정해지는 룰렛 휠 방법을 사용하였다.

#### 3.2.3 교배(Crossover)

교배 방법은 재생산된 개체들 중에서 교배확률에 따라 교배할 개체를 선정하는 연산자로 본 논문에서는 전산술 교배(Whole Arithmetic Crossover : WAC)를 사용하였다. WAC 연산자는 식 (8)과 같이 전역적으로 균일하게 해를 탐색해 나가는 역할을 수행한다. 여기서,  $a$ 는 0과 1사이의 난수이고,  $x_i^t$ 와  $x_i^{t+1}$ 는 현세대,  $x_i^{t+1}$ 과  $x_i^{t+1}$ 은 다음세대를 나타낸다.

$$x_i^t = \langle v_{i1}, \dots, v_{im} \rangle$$

$$x_i^{t+1} = \langle v_{i1}, \dots, v_{im} \rangle$$

$$x_i^{t+1} = a \cdot x_i^t + (1-a) \cdot x_i^t$$

$$x_i^{t+1} = a \cdot x_i^t + (1-a) \cdot x_i^t \quad (8)$$

#### 3.2.4 돌연변이(Mutation)

돌연변이 연산자는 국부적인 최적해로 수렴하는 것을 방지하는 역할을 하지만, 염색체내의 원소가 랜덤하게 선택되므로 돌연변이 확률이 너무 크면 수렴특성이 저하하는 경향을 나타낸다. 본 논문에서는 균등 돌연변이(Uniform mutation:UM)를 기본 연산자로 적용하여 동일한 돌연변이율로 세대 전반에 균일하게 작용하도록 하였다.

$$\{ x_i^t = \langle v_{i1}, \dots, v_{im} \rangle \}$$

$$\{ x_i^{t'} = \langle v_{i1}, \dots, v_{ik'}, \dots, v_{im} \rangle, (LB \leq v_{ik'} \leq UB) \} \quad (9)$$

#### 3.2.5 종료조건

본 연구에서는 과도한 계산시간을 감안하여 어느 정도의 경험값을 근간으로 일정 세대수에 종료를 하도록 하였다. 제안된 알고리즘의 흐름도는 그림 1과 같다.

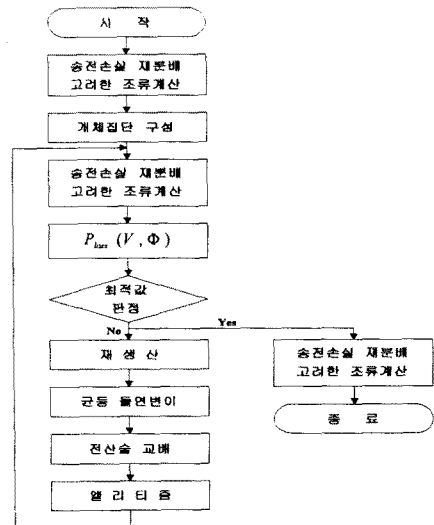


그림 1. 흐름도  
 Fig 1. Flow chart

#### 4. 사례연구

제한된 LRDA를 적용한 GA 기반의 ORPD 문제의 타당성을 검증하기 위하여 IEEE 30모선계통에 적용하였으며, 그 결과를 비교하기 위하여 기존조류계산의 결과를 Case 1, 단순 GA를 적용한 ORPD 결과를 Case 2 그리고 제안한 방법을 Case 3라 하였다. 본 논문에서 사용된 GA 연산자 파라미터는 개체집단수: 50, 세대수: 50, 돌연변이 확률: 0.15, 교배 확률: 0.7로 정하였다. 또한 페널티함수에 사용된 감도상수의 크기  $S_V$ 는 1.0,  $S_Q$ 는 0.1로 설정하였다. 각 표의 전력량과 손실은 [MW] 이고 전압과 보상기의 크기는 [p.u] 값이다. 표 1은 발전모선의 전압크기, 부하모선의 전압크기, 변압기의 탭설정 값, 병렬 콘덴서의 크기 등 각 변수의 한계를 나타낸다.

표 1. 변수의 상·하 한계

Table 1. Upper/lower limits of the variable

$V_{gi}$		$V_{di}$		$T_{ki}$		$C_i$	
min	max	min	max	min	max	min	max
0.9	1.1	0.95	1.05	0.95	1.05	0.0	0.5

그림 2는 각 사례별 송전손실을 나타낸다.

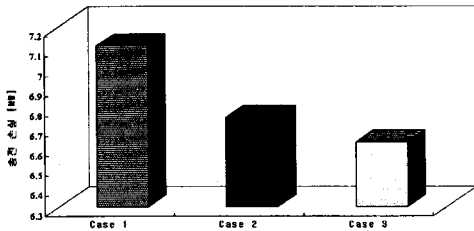


그림 2. 송전손실 비교

Fig. 2 Comparison of transmission losses

그림 3은 시스템의 전압크기 분포를 나타내고 있으며 대부분 모선이 제약조건을 만족하고 있다. 단지 3번 부하모선의 전압크기가 상한계인 1.051로 한계영역을 벗어나긴 하지만 그 편차가 큰 것은 아니다. 이것은 벌점함수가 유연한 한계를 가지도록 하여 수렴성 확보 면에서 기여를 하도록 페널티 계수를 선택한 것이기 때문이다.

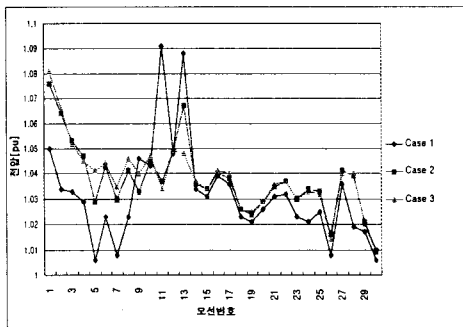


그림 3. 모선 전압 분포

Fig. 3. Distribution of bus voltages

표 2는 각 사례별 발전모선의 전압크기, 변압기 탭 설정 값, 무효전력 보상장치의 크기 및 송전손실을 나타낸다.

표 2. ORPD 결과

Table 2. Results of ORPD

	Case 1	Case 2	Case 3
$V_1$	1.0500	1.0764	1.0807
$V_2$	1.0338	1.0638	1.0664
$V_5$	1.0058	1.0287	1.0405
$V_8$	1.0230	1.0410	1.0457
$V_{11}$	1.0913	1.0374	1.0340
$V_{13}$	1.0883	1.0670	1.0483
$T_1$	1.0155	1.0354	1.0065
$T_2$	0.9629	0.9991	0.9940
$T_3$	1.0129	0.9948	0.9604
$T_4$	0.9581	0.9792	0.9804
$C_1$	0.19	0.3138	0.2697
$C_2$	0.04	0.1184	0.1011
$\sum P_d$	283.40	283.40	283.40
$\sum Q_d$	126.20	126.20	126.20
$\sum P_g$	290.511	290.153	290.030
$\sum Q_g$	99.212	71.576	77.398
$P_{loss}$	7.111	6.753	6.630
$Q_{loss}$	-26.987	-54.623	-48.802

#### 5. 결론

본 논문에서는 GA를 기반으로 하여 LRDA를 고려한 ORPD를 하였다. 본 논문의 특징으로 첫 번째는 적자 생존과 진화에 근거한 전역 탐색기법인 GA를 적용하였으며, 두 번째는 각 발전모선에 전력계통의 전체 송전손실을 배분함으로써 실제 계통에 가깝게 계산할 수 있는 LRDA를 적용하였고 마지막으로 두 가지 방법을 이용하여 송전손실을 최소화 할 수 있는 무효전력 최적배분을 수행하였다. 사례연구에서 볼 수 있는 것처럼 제안한 방법은 기존방법보다 우수한 특성으로 손실을 최소화하였으며 시험 계통에 적용하여 그 효용성을 검증하였다.

#### (참고 문헌)

- [1] K. R. C. Mamandur, R. D. Chenoweth, "Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and For Real Power Loss Minimization" IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No. 7, pp. 3185-3194, July 1981.
- [2] Q. H. Wu, J. T. Ma, "Power System Optimal Reactive Power Dispatch using Evolutionary Programming", IEEE Trans. on Power System, Vol. 10, No. 3, pp. 1243-1249, August 1995.
- [3] Joong-Rin Shin, Keun-Sung Kim, Myung-Suk Chae, "Determination of Precise Voltage Profile with Loss Re-Distribution and Static Voltage Dependent Load Models", ICEE, Vol. 2, pp. 445-448, July 1998.
- [4] Byung-Seop Kim, Myung-Suk Chae, Joong-Rin Shin, "Optimal Reactive Power Dispatch based on Genetic Algorithm with Voltage Dependent Load Models", ICEE, Vol. 1, pp. 167-170, July 1998.