

송전손실 재분배와 전압의존형 부하모형을 적용한 GA기반의 무효전력 최적배분

채명석*, 이명환**, 김병섭**, 신중린**
 군장대학*, 건국대학교**

GA-based Optimal Reactive Power Dispatch Taking Account of Transmission Loss Re-distribution and Voltage Dependent Load Models

Myung-Suk 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(ORPD) 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 reduce system loss and improve voltage profile, two methods, Loss Re-Distribution Algorithm (LRDA) and Voltage Dependent Load Model (VDLM), are applied to ORPD. The proposed methods have been evaluated on the IEEE 30 bus system. Each of results have been compared with result of load flow.

1. 서 론

전력계통 해석에서 경제운전(economic operation) 문제는 크게 발전유효전력을 적절히 분배하여 운전 및 연료비용을 최소화하는 유효전력 최적배분(OED : Optimal Economic Dispatch)과 발전기의 무효전력, 변압기 탭 설정 그리고 무효전력원을 재 배분하여 송전 손실을 최소화하는 무효전력 최적배분(ORPD : Optimal Reactive Power Dispatch)문제로 나눌 수 있다. 또한 최적조류계산(OPF : Optimal Power Flow) 문제는 위에 언급된 두 가지 문제를 동시에 해결 할 수 있는 최적화 기법으로 알려져 있다. 그 중, 본 논문에서는 제약조건과 목적함수의 상관관계가 복잡한 무효전력 및 전압 최적화문제를 전역 탐색 기법인 유전알고리즘(GA : Genetic Algorithm)을 기반으로 무효전력 및 전압최적제어를 목적으로 하고 있으며 특히, 무효전력 최적 배분의 등호제약조건으로 송전손실 재분배(LRDA : Loss Re-Distribution Algorithm)를 적용하였고 이를 위한 유전알고리즘 연산자의 적절한 수정을 통하여 정의영역에서 목적함수의 최적값을 탐색할 수 있는 기반을 조성하였다. 또한 전압 안전성 문제에서 대두되는 무효전력관계를 분석하기 위하여 부하측의 유효전력 소비 패턴에 따른 전압의 안전성을 관찰할 수 있는 전압의존형 부하모형(VDLM : Voltage Dependent Load Model)을 고려하였다.

본 논문에서 개발한 알고리즘을 IEEE 30모선 계통에 적용하고 사례연구를 통하여 단순유전알고리즘 기반 방법과 개선된 유전알고리즘을 기반으로 송전손실재분배와 정적 전압의존 부하모형을 적용한 방법의 계통전압 변화를 기존의 초기상태와 비교해서 보여줌으로써 제안한 알고리즘의 타당성을 검증한다.

2. 문제의 정식화

본 논문에서 적용한 ORPD 문제의 목적함수는 송전 손실을 최소화하는 것으로 최적해를 구하기 위해서 발전 모선의 전압크기, 변압기 탭, 각 모선의 무효전력 보상

량을 제어변수로 택하였으며, 부하모선의 전압크기, 발전 모선의 무효전력 크기를 상태변수로 취급하였다. 또한, 등호 제약조건으로 사용하는 조류계산 알고리즘은 실계통에 근접한 해석을 하기 위하여 LRDA를 적용하였고, 제어변수와 상태변수에 대해서 부등호 제약조건을 설정하였다.

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 constraints)

본 논문에서의 등호제약조건은 식 (2)와 같이 LRDA 와 VDLM이 고려된 전력수급조건을 사용하였다. 송전 손실 재분배 알고리즘(LRDA)은 기존 전력조류계산에서 슬랙모선이 담당하던 계통 손실을 전기적 특성을 고려하여 각 발전기가 분담하게 하는 방법으로 슬랙모선의 손실 부담을 완화시킴으로서 실계통에 근접한 해석이 가능하고 보다 정밀한 해를 얻을 수 있다[3]. 또한 계통의 전압변화에 따른 부하단의 영향을 고려하기 위하여 전압의존형 부하모형을 사용함으로써 부하단의 특성 변화를 고찰하도록 하였다.

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

식 (2)에 포함되어 있는 부하 형태는 기존의 정전력 부하에 전압의존형 부하모형이 적용된 형태이고 정확한 표현식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} P_{di} &= P_{d0} \left[\alpha_P + \beta_P \left(\frac{V_i}{V_0} \right) + \gamma_P \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^2 \right] \\ Q_{di} &= Q_{d0} \left[\alpha_Q + \beta_Q \left(\frac{V_i}{V_0} \right) + \gamma_Q \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

- 여기서, P_{gr}, Q_{gr} : 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
- P_{d0}, Q_{d0} : 기준상태의 부하전력

V_{θ} : 기준상태의 전압
 α_P, α_Q : 정전력부하 성분계수
 β_P, β_Q : 정전류부하 성분계수
 γ_P, γ_Q : 정임피던스부하 성분계수

식(2)에서 전력평형방정식에 포함된 송전손실은 계통의 전기적 특성에 맞게 각 발전기가 분담하는 손실로 식 (4)과 같이 각 선로에 흐르는 전류의 제곱에 비례하도록 한다.

$$P_i^{loss} = \frac{|I_i|^2}{\sum_{i \in N_s} |I_i|^2} \times P_{loss} \quad (4)$$

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

2.2.2 부등호제약조건(inequality constraints)

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

$$(C_V, S_V)^{min} \leq Q_{gi}, V_{gi}, V_{di}, T_k, C_i \leq (C_V, S_V)^{max} \quad (5)$$

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. 유전알고리즘의 응용

유전알고리즘은 일종의 최적해 계산기법으로, 전역 최적해 탐색기법 및 여러 해의 동시탐색이 가능하고 다중해를 갖는 비선형성이 강한 시스템에도 적용이 가능한 이점을 갖고 있다. GA는 최적화 문제의 목적함수로부터 적합도를 구하여 적합도 값에 따라 다음 세대에 생존과 소멸을 결정하는 것으로 최적화문제의 변수들의 집합을 유한길이의 이진 스트링으로 코딩하거나 변수영역 내에서 염색체 구성을 문제와 유사하게 표현할 수 있는 실변수 코딩을 사용한다.

무효전력 최적배분 위한 개선된 유전알고리즘의 구성은 염색체(chromosome)에 대한 해의 표현법, 염색체들의 적합도를 평가하기 위한 적합도 함수, 그리고 유전연산자인 교배와 돌연변이의 방법 및 종료조건 등이 포함되어야 한다.

3.1 목적함수의 확장

정식화된 ORPD 문제는 식 (2)의 등호제약조건이 비선형이고, 식 (5)의 부등호 제약조건을 만족하는 해집합의 표본공간이 다양하기 때문에 기존의 LP 또는 NLP 법으로 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 사용한 GA 기반 ORPD 문제의 목적함수는 기존 ORPD 문제의 목적함수인 식 (1)에 부하모선의 전압 제약조건과 발전모선의 무효전력 제약조건을 변수로 갖는 벌점 함수를 부과하여 GA 적용에 타당하도록 확장하였다.

$$O_f = \text{Min} \left(P_{loss} + \sum_{i \in N_m} \lambda_i (V_i - V_i^{lim})^2 + \sum_{i \in N_m} \lambda_Q (Q_i - Q_i^{lim})^2 \right) \quad (6)$$

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

벌점 계수 λ_V, λ_Q 는 유전알고리즘의 탐색과정에서 세대수에 의한 효과를 부여할 수 있도록 본 논문에서는 다음과 같이 설정하였다.

$$\lambda_V = G_i (t/T) S_V, \quad \lambda_Q = G_i (t/T) S_Q \quad (7)$$

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 염색체 표현법으로 실변수 코딩(floating-point numbers)을 사용하였고 재생산 기법으로 룰렛 휠(roulette wheel)방법과 엘리트즘(elitism) 함수를 사용하였다. 그리고 해의 다양성을 위한 교배연산자로 전산술교배, 경험교배, 변형 전산술교배를 사용하였고, 국부해로 조기수렴하는 것을 방지하기 위한 돌연변이 연산자로 변형 비균일 돌연변이를 사용하였다.

3.2.1 염색체에 의한 해들의 표현

본 논문에서는 전체 개체집단의 코딩기법에 따라 비전역 최적값으로 조기수렴하고 미세한 국소조정을 하지 못하거나 구속조건이 존재할 때 동작하지 않는 단점을 보완하기 위한 한 개의 유전자 대 한 개의 변수가 일치하고 돌연변이 연산의 비트 오류나 인공적인 작업이 불필요한 실변수 코딩기법을 사용한다.

3.2.2 적합도 함수

식 (6)의 목적함수를 최소화하는 문제를 다음과 같이 적합도 최대화문제로 변형시켜 사용하였다.

$$F = \frac{M}{1+E} \quad (8)$$

여기서, $\{E$: 목적함수
 M : 적합도를 조절하기 위한 상수($M=100$)

3.2.3 재생산(Reproduction)

재생산의 방법은 여러 가지가 있으나 그 중 가장 대표적인 것이 roulette-wheel 방법이다. 이 방법은 총적합도에 대한 개별 염색체의 적합도가 높은 순으로 원반의 크기를 결정하여 다음 세대로 재생산되도록 하지만 랜덤 변수를 이용하여 재생산 과정을 수행하기 때문에 적합도가 높은 염색체가 선택되지 않아 세대가 진행함에 따라 적합도 값이 적어지는 단점을 가진다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 적합도 값이 높은 엘리트 염색체에 대하여는 다음 세대에 그대로 재생산하는 elitism을 적용하고, 그 나머지 염색체에 대해서는 roulette-wheel 방법을 사용한다.

3.2.4 교배(Crossover)

본 논문에서 적용한 교배방법은 적합도가 높은 개체들을 빠르게 결합하여 현재 집단의 전역에서 확산시키는 역할을 담당하고, 보다 나은 탐색과정을 수행하기 위하여 세대수 진행에 따라 전산술(whole arithmetic)교배, 경험(heuristic)교배, 변형 전산술(modified whole arithmetic)교배를 순차적으로 사용한다.

■ 전산술교배(whole arithmetic crossover)

본 논문에서 사용한 전산술 교배의 방법은 세대 초반에 적용하여 전역적으로 해를 탐색하는 역할을 하고 식 (9)와 같이 두 벡터의 일차 결합으로 정의할 수 있다. 염색체 C_v^i 와 C_u^i 가 교배될 때 그 자손세대는 C_v^{i+1} 과 C_u^{i+1} 이 된다.

$$\begin{aligned} C_v^{i+1} &= \alpha C_v^i + (1-\alpha) C_u^i \\ C_u^{i+1} &= \alpha C_u^i + (1-\alpha) C_v^i \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 α 는 [0, 1]사이의 랜덤값이다.

■ 경험교배 (heuristic crossover)

경험교배는 탐색방향의 결정에 목적함수 값이 사용되는 연산자로서 지역적 미세조정과 유망한 방향으로의 탐색이 가능하며 식 (10)과 같이 하나의 자손세대만이 생성된다. 본 논문에서는 세대 중반에 경험교배방법을 사용한다.

$$\hat{V}_y = r \cdot (\hat{V}_x - \hat{V}_v) + \hat{V}_u \quad (10)$$

여기서,

- \hat{V}_x : 현재대중 한 염색체의 파라미터
- \hat{V}_y : 현재대까지 최대적합도를 갖는 염색체의 파라미터
- \hat{V}_v : 개선된 파라미터
- r : [0, 1]사이의 랜덤값

■ 변형 전산술교배(modified whole arithmetic crossover)

이 연산자는 세대 중반부에 적용되어 현재대까지 최대 적합도를 가지는 염색체 (C_{BEST}^i)와 직접 교배를 통하여 단 하나의 자손 세대만을 만들어 내며 미소지역 탐색을 통해서 개선된 목적함수 값을 얻을 수 있도록 작용한다. 표현식은 식 (11)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} C_v^{i+1} &= \alpha C_{BEST}^i + (1-\alpha) C_v^i & \text{if } \gamma=0 \\ C_v^{i+1} &= \alpha C_v^i + (1-\alpha) C_{BEST}^i & \text{if } \gamma=1 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 α 는 [0, 1]사이의 랜덤값이다.

3.2.5 돌연변이 (Mutation)

본 논문에서는 균일 돌연변이(uniform mutation)와 비균일 돌연변이(non-uniform mutation)를 기본 연산자로 적용하였으며, 조기 수렴문제를 극복하기 위해서 변형 비균일 돌연변이를 사용하였다.

■ 균일 돌연변이(uniform mutation)

세대 전반에 걸쳐 동일한 돌연변이 확률이 적용되며 표현식은 식 (12)와 같다.

$$\begin{cases} x_i' = \langle v_{i1}, \dots, v_{im} \rangle \\ x_i' = \langle v_{i1}, \dots, v_{ik}', \dots, v_{im} \rangle, (LB \leq v_{ik}' \leq UB) \end{cases} \quad (12)$$

여기서, LB : 유전인자 v_k 의 하한 영역 한계

UB : 유전인자 v_k 의 상한 영역 한계

■ 비균일 돌연변이(non-uniform mutation)

지역적 미세조정을 담당하는 연산자로서 알고리즘 수행결과에 따라서 목적함수의 계산결과가 변화하는 경우에 사용되도록 하였으며 균일 돌연변이의 단점을 보완하기 위하여 새로운 돌연변이 인자를 임의적으로 선택하지 않고 이전 값과 가깝게 변화하도록 식 (13)과 같이 사용하였다.

$$v_k = \begin{cases} v_k + \Delta(t, UB - v_k), & \text{if } \gamma=0 \\ v_k - \Delta(t, v_k - LB), & \text{if } \gamma=1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta(t, y) = \gamma \alpha \left(1 - \frac{t}{T}\right)^b$$

여기서, v_k : 돌연변이 인자로 선택된 유전인자

b : 돌연변이정도를 지정하는 비균일 지수

$\Delta(\cdot)$: 비균일한 성질을 갖도록 정의된 함수

■ 변형 비균일 돌연변이(modified non-uniform mutation)

이 연산자는 국지적 최적해로 수렴된 후 전역적 최적해를 탐색하지 못하는 문제를 극복하기 위하여 준 최적 유전인자 (v_{BEST})를 돌연변이된 값으로 대체하여 개선된 적합도를 얻도록 하였다. 그리고 세대 중반으로 갈수록 작은 돌연변이 확률이 되도록 돌연변이 확률을 변화시켰다. 표현식은 다음 식 (14)와 같다.

$$v_k = \begin{cases} v_{BEST} + \Delta(t, UB - v_{BEST}), & \text{if } \gamma=0 \\ v_{BEST} - \Delta(t, v_{BEST} - LB), & \text{if } \gamma=1 \end{cases} \quad (14)$$

$$\Delta(t, y) = \gamma \alpha \left(1 - \frac{t}{T}\right)^b, \quad P_m = \frac{T-t}{T}$$

3.2.6 종료조건

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

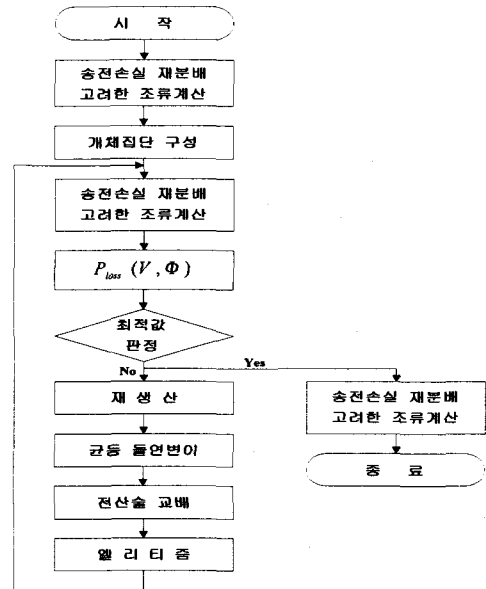


그림 1 흐름도
Fig. 1 Flow chart

4. 사례 연구

본 논문에서 제안된 LRDA와 VDLM을 적용한 GA 기반의 ORPD 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 IEEE 30모선계통에 적용하였으며, 그 결과를 비교하기 위하여 기존조류계산의 결과를 Case 1, 단순 GA를 적용한 ORPD 결과를 Case 2, 손실재분배 알고리즘을 적용한 방법을 Case 3, 전압의존형 부하모델을 적용한 방법을 Case 4, 5라고 정의하였다. 본 논문에서 사용된 GA 연산자 파라미터는 개체집단수: 50, 세대수: 50, 돌연변이 확률: 0.15, 교배 확률: 0.7로 정하였다. 또한 별점 함수에 사용된 감도상수의 크기 S_V 는 1.0, S_Q 는 0.1로 설정하였다. 각 표의 전력량과 손

실은 [MW] 이고 전압과 보상기의 크기는 [p.u.]값이다.

표 1은 발전모선의 전압크기, 부하모선의 전압크기, 변압기의 탭설정 값, 병렬 콘덴서의 크기 등 각 변수의 한계를 나타내고, 표 2는 전압의존형 부하모델의 부하성분 계수를 나타낸다. $\alpha_P, \beta_P, \gamma_P$ 는 각각 유효전력의 정전력, 정전류, 정임피던스 성분을 나타내고, $\alpha_Q, \beta_Q, \gamma_Q$ 는 각각 무효전력의 정전력, 정전류, 정임피던스 성분을 나타낸다.

표 1. 변수의 상·하 한계

Table 1. Upper/lower limits of the variable

V_{G1}		V_{G2}		T_{11}		C_1	
min	max	min	max	min	max	min	max
0.9	1.1	0.95	1.05	0.95	1.05	0.0	0.5

표 2. 전압의존형 부하모델의 사례별 부하성분 계수

Table 2. Coef. of load component by study case considering voltage dependent load model

	α_P	β_P	γ_P	α_Q	β_Q	γ_Q
Case 4	0.74	0.04	0.22	0.65	0.08	0.27
Case 5	0.3	0.3	0.4	0.4	0.1	0.5

위에서 정의한 사례별로 시뮬레이션 한 결과를 비교함으로써 본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 표 3에서 확인할 수 있었다.

표 3. ORPD 결과

Table 3. Results of ORPD

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
V_1	1.0500	1.0764	1.0807	1.0871	1.0708
V_2	1.0338	1.0638	1.0664	1.0726	1.0562
V_5	1.0058	1.0287	1.0405	1.0454	1.0252
V_8	1.0230	1.0410	1.0457	1.0517	1.0386
V_{11}	1.0913	1.0374	1.0340	1.0421	0.9835
V_{13}	1.0883	1.0670	1.0483	1.0420	0.9837
T_1	1.0155	1.0354	1.0065	1.0423	1.0496
T_2	0.9629	0.9991	0.9940	1.0451	1.0372
T_3	1.0129	0.9948	0.9604	1.0407	1.0421
T_4	0.9581	0.9792	0.9804	1.0171	1.0236
C_1	0.19	0.3138	0.2697	0.1192	0.1488
C_2	0.04	0.1184	0.1011	0.1241	0.1225
$\sum P_d$	283.40	283.40	283.40	282.45	276.78
$\sum Q_d$	126.20	126.20	126.20	125.58	122.99
$\sum P_g$	290.511	290.153	290.030	288.943	283.109
$\sum Q_g$	99.212	71.576	77.398	91.887	88.229
P_{loss}	7.111	6.753	6.630	6.489	6.330
Q_{loss}	-26.987	-54.623	-48.802	-33.689	-34.759

그림 2는 표 3의 ORPD 결과 중에 목적함수에 해당하는 전체 계통손실을 쉽게 비교하기 위해서 그림으로 나타낸 것이다.

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

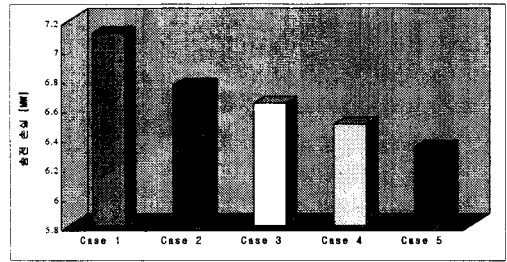


그림 2 송전손실 비교

Fig. 2 Comparison of transmission losses

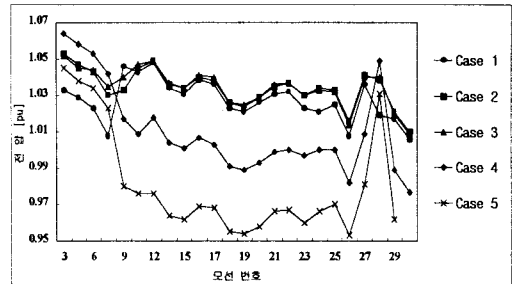


그림 3 부하모선 전압 분포

Fig. 3 Distribution of bus voltages

5. 결론

본 논문에서는 GA를 기반으로 하여 LRDA와 VDLM을 고려한 ORPD 문제를 해석하였다. 기존의 수치해석 기법들이 가지는 단점을 보완하기 위하여 유전알고리즘을 이용하고 유전알고리즘 연산자의 적절한 수정을 통하여 무효전력 최적배분을 수행하였고 사례별 연구를 통해서 본 논문에서 사용한 알고리즘들의 효용성을 보였다. LRDA를 적용함으로써 슬랙 모선이 전담하던 계통손실을 전기적 특성에 따라 각 발전기가 분담하여 전체 계통손실이 감소하는 효과를 볼 수 있었고 계통전압의 특성도 개선되었다. 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.
- [5] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine-Learning", Addison-Wiley, 1989.
- [6] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Springer-Verlag, 1995.