

## 개선된 유전 알고리즘을 이용한 새로운 전력조류계산

채명석\*  
군장대학\*

이태형\*\*  
한국철도기술연구원\*\*

신종린, 임한석  
건국대학교

### New Power Flow Calculation Using Improved Genetic Algorithm

Myung-Suck Chae\*  
Kun-Jang College\*

Tae-Hyung Lee\*\*  
KRRI\*\*

Joong-Rin Shin  
Kon-Kuk University

**Abstract** - The power flow calculations(PFc) are the most important and powerful tools in power systems engineering. The conventional power flow problem is solved generally with numerical methods such as Newton-Raphson(NR). The conventional numerical method generally have some convergency problem, which is sensitive to initial value, and numerical stability problem concerned with jacobian matrix inversion. This paper presents a new PFc algorithm based on the improved genetic algorithm(IGA) which can overcome the disadvantages mentioned above. The parameters of GA, with dynamical hierarchy of the coding system, are improved to make GA a practical algorithm in the problem of real system. Some case studies with test bus system also present to show the performance of proposed algorithm. The results of proposed algorithm are compared with the results of PFc obtained using a conventional NR method.

### 1. 서 론

일반적으로 대규모 전력시스템의 정상상태 해석은 전력조류계산을 근간으로 하고 있으며, 전력조류계산은 전력계통의 계획과 운용면에서 중요하게 이용되고 있다. 지금까지 전력조류계산의 해법은 비선형 전력조류방정식을 해결할 수 있는 기법들로 직접법과 반복법이 개발되어 있으며 결국 비선형 시스템의 상태변수를 이용하여 미지의 값들을 결정하는 하나의 반복법의 형태로 볼 수 있다[1]. 이러한 반복법 중 전력조류계산에 일반화 된 수치해석기법은 뉴턴-랩슨법과 가우스-자이델법을 들 수 있으며, 그 중 후자는 해를 구하는 과정이 전자보다 간단하고 컴퓨터기억용량의 소요가 적다는 특징을 가지고는 있지만 대형계통에 적용할 경우 수렴시간이 길어지며 때로는 해를 구하지 못하는 경우가 발생하는 단점을 가지고 있다. 전자의 경우에는 후자에 비하여 해를 구하는 과정이 복잡하고 대규모 행렬연산에 따른 컴퓨터 기억용량의 소요가 많기는 하나 수렴시간이나 반복횟수 등의 수렴특성이 좋은 장점을 가지고 있다[2][3]. 최근 들어 컴퓨터의 급속한 발전으로 연산시간이 빨라지고 기억용량이 거대화되면서, 뉴턴-랩슨법은 대규모 전력계통의 조류계산문제를 해결하는데 일반화된 방법으로 인식되고 있다. 특히, 어드미턴스 행렬이나 자코비안행렬 및 역행렬의 연산은 스파서티(sparsity)기법을 이용하면서 기억용량의 소요나 계산의 효율성 면에서 좋은 효과를 가져왔다[4][5]. 따라서 기존의 수치해석기법은 다른 방법에 비해 상대적으로 빠른 수렴특성과 계산의 정확성으로 인해 계통에서 적절한 해법으로 평가되고 있으나, 수치해석 기법 자체의 특성으로 인한 몇 가지 문제점을

갖게된다. 그 대표적인 것으로, 알고리즘의 수렴특성이 초기치 선정에 매우 민감하다는 점과 비선형 전력방정식의 선형화 과정에서 발생하는 2차 편미분항을 생략함으로써 나타나는 해의 부정확성 및 자코비안의 역행렬을 구하는 과정 등에서 야기될 수 있는 수치해석 과정의 안정성(numerical stability) 등의 문제를 들 수 있다. 전력조류계산 문제에서 초기치 선정이나 선형화과정 및 역행렬의 계산 없이 해를 구할 수 있다면 이러한 문제점은 크게 개선될 것이다[6].

본 논문에서는 기존의 수치해석방법이 가지는 단점을 보완하기 위해 개선된 유전알고리즘(IGA : improved genetic algorithm)을 적용한 전력조류계산 알고리즘을 제안한다. 유전알고리즘은 해집단들이 생체시스템의 자연선택을 통해 진화하는 생물학적 진화원리에 기초를 둔 최적화 방법으로 무작위로 발생하는 해들의 개체집단(population)은 재생산(reproduction), 교배(crossover), 그리고 돌연변이(mutation)와 같은 유전연산자들의 작용들을 통해 최적해로 진화한다. 유전알고리즘은 기존의 수치해석적인 문제에 있어서 국부최적치에 수렴하거나 미분이 불가능한 함수의 해석에 있어서도 적용이 가능하고 발산하지 않는 강건함을 가지고 있으므로 최근 들어 전력시스템의 해석에 있어서도 전압최적화[7], 무효전력계획 및 최적배분[8][9], 경제급전[10] 등에 적용하여 문제를 해결하려는 시도가 다양하게 이루어지고 있다. 특히, 본 논문에서는 기존의 전력조류계산방법에서 나타날 수 있는 단점을 보완하기 위하여 전역탐색 방법인 유전알고리즘을 적용하여 전력조류계산의 해를 구하는 방법을 제시하고 문제의 특성에 맞게 유전연산자를 구성한다.

본 논문에서 제안한 IGA를 적용한 전력조류계산방법의 특징을 요약하면 다음과 같다 :

- 전력조류계산 방정식의 표현은 직각좌표계법과 극좌표계법의 두 가지 형태로 나눌 수 있으며 본 논문에서는 조류계산문제의 상태변수인 각 모선의 전압벡터를 직각좌표 형태로 표현하여 유전알고리즘의 염색체(chromosome)를 구성한다.

- 염색체를 표현하는 방법은 주어진 변수의 상한과 하한 및 정밀도를 고려한 같은 수의 비트를 가지는 이진 코딩법과 주어진 변수와 유전연산자의 정의를 간단하게 할 수 있고 유전알고리즘의 성능을 좋게 할수 있는 실변수 코딩으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 상태변수의 코딩에 적합한 실변수 코딩을 사용한다.

- 유전알고리즘의 목적함수는 일정한 규정이 없어 문제의 특성을 고려하면서 시행착오를 통하여 전력조류계산에 적합한 유효전력과 무효전력 및 전압의 편차를 이용한 함수를 선정하고, 적합도 함수는 적합도 조절상수를 목적함수로 나눈 값을 사용한다.

- 재생산과정은 적합도가 높은 개체일수록 다음 세대에 더 많은 자손을 가질 확률이 높게 선택되며, 이것은 주어진 환경에 잘 적응하는 개체만이 생존하는 적자생존의 자연선택원리를 적용한 elitism과 roulette wheel 법

을 적용한다.

■ 교배과정은 적합도가 높은 개체들을 빠르게 결합하여 현재 집단의 전역에서 확산시키는 역할을 담당하는 과정으로 교배확률을 통해 재생산과 함께 개체간의 정보를 교환하고 우성인자를 결합하는 효과적인 수단이다. 본 논문에서는 보다 나은 탐색과정을 수행하기 위하여 목적함수의 최소편차에 따라 전산술(whole arithmetic)교배와 경험(heuristic)교배를 동시에 사용한다.

■ 돌연변이 과정은 초기 전역탐색으로 시작하여 근접 해에 가까울수록 지역적 미세탐색을 하는 비균일(non-uniform)돌연변이 연산자를 적용한다.

본 논문에서는 전역적인 최적화 기법으로 알려져 있는 유전알고리즘의 연산자를 문제특성에 맞게 개선하여 기존의 전력조류계산방법이 가지는 수치적인 난제를 해결하고 좀 더 효율적인 계산기법을 개발하는데 착안하였으며, 사례연구를 통하여 제시한 알고리즘의 타당성을 보인다.

## 2. 기존의 전력조류계산법

전력조류계산은 발전된 유효 및 무효전력이 부하지점에 이르기까지 전력계통내를 어떠한 상태로 흐를 것이며 또한 계통내의 각 지점마다 전압이나 전류의 분포는 어떻게 될 것인지를 파악하는 전력계통의 가장 기본적인 해석문제이다.

대표적인 전력조류계산의 수치해석기법은 뉴턴-랩슨법과 가우스-자이델법을 들 수 있으며, 가우스-자이델법은 해를 구하는 과정에서 뉴턴-랩슨법보다 간단하고 컴퓨터 기억용량의 소요가 적다는 특징을 가지고는 있지만 대형계통에 적용할 경우 수렴시간이 길어지며 때로는 해를 구하지 못하는 경우가 발생하는 단점을 가지고 있다. 반면, 뉴턴-랩슨법은 가우스-자이델법에 비하여 해를 구하는 과정이 복잡하고 대규모 행렬연산에 따른 컴퓨터 기억용량의 소요가 많기는 하지만 수렴시간이나 반복횟수 등의 수렴특성이 좋은 장점을 가지고 있다. 특히, 최근 들어 컴퓨터를 이용한 데이터 처리속도의 급속한 발전으로 뉴턴-랩슨법의 단점들이 보완되면서 전력조류계산에 가장 일반적으로 사용하는 수치해석 기법으로 널리 알려져 있다[2][3].

식 (1)은 뉴턴-랩슨법을 이용한 전력조류계산 문제를 해결하기 위해 n 모선 계통의 유효 및 무효전력 방정식을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} f_P(\dot{V}) &= b_P = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \\ f_Q(\dot{V}) &= b_Q = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$\dot{V}_i = e_i + jf_i$  : 모선 i 의 전압

$f_P(\dot{V})$  : 유효전력 함수

$f_Q(\dot{V})$  : 무효전력 함수

$e_i$  : 전압 실수부

$f_i$  : 전압 허수부

$b_P$  : 유효전력 지정치

$b_Q$  : 무효전력 지정치

$G_{ij}$  : 어드미턴스 실수부

$B_{ij}$  : 어드미턴스 허수부

위의 전력 방정식은 상태변수인 전압벡터와 어드미턴스 벡터를 직각좌표형식으로 표현한 형태이고, 식(2)의

$g_P(\dot{V}), g_Q(\dot{V})$ 는 유효 및 무효전력의 계산치와 지정치의 편차를 나타내는 함수이다.

$$\begin{aligned} g_P(\dot{V}) &= f_P(\dot{V}) - b_P = 0 \\ g_Q(\dot{V}) &= f_Q(\dot{V}) - b_Q = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 전압 벡터에 관해 \* 첨자로 해의 추정치를 나타내고, ° 첨자로 초기 추정치를 나타내면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} g_P(\dot{V}^*) &= g_P(\dot{V}^{(0)} + \Delta V) = 0 \\ g_Q(\dot{V}^*) &= g_Q(\dot{V}^{(0)} + \Delta V) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 테일러 전개를 통하여 2차 편미분항 이상을 소거하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} g_P(\dot{V}^{(0)} + \Delta V) &= g_P(\dot{V}^{(0)}) + \Delta V \left. \frac{\partial g_P(\dot{V})}{\partial V} \right|^{(0)} = 0 \\ g_Q(\dot{V}^{(0)} + \Delta V) &= g_Q(\dot{V}^{(0)}) + \Delta V \left. \frac{\partial g_Q(\dot{V})}{\partial V} \right|^{(0)} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta V \left. \frac{\partial g_P(\dot{V})}{\partial V} \right|^{(0)} &= b_P - f_P(\dot{V}^{(0)}) \\ \Delta V \left. \frac{\partial g_Q(\dot{V})}{\partial V} \right|^{(0)} &= b_Q - f_Q(\dot{V}^{(0)}) \end{aligned} \quad (5)$$

윗식을 간단히 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$[J][\Delta V] = [\Delta f] \quad (6)$$

여기서, J는 함수에 대한 전압벡터의 1차 편미분항인 자코비안 행렬을 나타내고, Δf는 각 모선에서의 전력편차(power mismatch)를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \Delta f_P &= |b_P - f_P(\dot{V})| \\ \Delta f_Q &= |b_Q - f_Q(\dot{V})| \end{aligned} \quad (7)$$

기존의 조류계산은 ||Δf||를 지정된 오차한계와 비교하여 근사해를 반복적으로 수정하는 방식이며 이러한 반복과정을 통한 근사해는 식(8)을 통해 구해진다.

$$\dot{V}^{(*)} = \dot{V}^{(0)} + \Delta V \quad (8)$$

## 3. 유전알고리즘 적용을 위한 전력조류계산의 정식화

유전알고리즘을 이용한 전력조류계산을 위하여 n 모선 시스템에 대한 임의의 i 모선의 전력방정식은 식 (1)과 같이 전압벡터( $e_i, f_i$ )와 i 모선과 j 모선간의 어드미턴스 벡터( $G_{ij}, B_{ij}$ )를 직각좌표형식으로 변환한 형태를 적용한다.

전력계통의 모선형태는 크게 기준모선과 발전모선 및 부하모선으로 나눌 수 있으며, n 번째 모선을 기준모선이라 가정하면 기준모선은 발전모선 중 발전용량이 가장 큰 모선을 선택하여 전압벡터의 크기인  $|V_n|$ 과 위상각을 지정한다. 그리고 발전모선은 n 모선중 i 번째 모선으로 가정하여 유효전력  $b_P$ 와 전압의 크기  $|V_i|$ 를 지정하고 무효전력과 전압의 위상각을 구하게 된다. 또한 부하모선은 유효전력  $b_P$ 와 무효전력  $b_Q$ 를 지정하고 전압벡터를 구하게 된다.

기존의 뉴턴-랩슨 조류계산방법에서도 또한 위에서 가정한 모션지정 방법을 그대로 적용하고 있으나, 식 (1)에서 볼 수 있듯이 전력방정식은 비선형방정식 형태를 취하고 있으므로 수치해석방법을 구현하기 위해서는 식 (5)와 같이 선형화 과정이 필요하고 해를 구하기 위해서는 식 (6)과 같이 함수에 대한 전압벡터의 1차 편미분항인 자코비안 및 그 역행렬을 구하는 과정이 필수적이다. 하지만 유전알고리즘을 적용한 전력조류계산에서는 유전알고리즘의 특성상 식 (3)~식 (7)에 해당하는 1차 근사화 과정이나 자코비안 구성 및 그 역행렬 계산이 필요 없으며, 단지 식 (1)과 식 (7)이 목적함수를 구성하는데 필요할 뿐이다.

발전모션의 전압편차는 전압크기 지정치  $V_i^sp$ 와 전압크기 계산값  $V_i$ 의 차로 다음과 같이 쓸 수 있으며 이것은 목적함수의 항에 포함된다.

$$\Delta V_i = |V_i^sp - V_i| \quad (9)$$

여기서,

$$|V_i| = \sqrt{e_i^2 + f_i^2}$$

결국, 유전알고리즘을 적용한 전력조류계산을 위해서는 식 (1)과 식(7) 그리고 식 (10)에 해당하는 각 항의 편차가 최소가 되도록 하는  $e_i, f_i$ 의 값을 찾는 것이다. 본 논문에서 제안한 목적함수는 부하모션에 해당하는 유효 및 무효전력편차와 발전모션에 해당하는 유효전력 및 전압크기에 대한 각 항의 편차에 관련된 식 (10)과 같이 최적화 함수를 구성한다.

$$O = \text{Minimize} \left( \sum_{i \in PQ} [|b_{Pi} - f_{Pi}|^2 + |b_{Qi} - f_{Qi}|^2] + \sum_{i \in PV} [|b_{Pi} - f_{Pi}|^2 + |V_i^sp - V_i|^2] \right)^{1/2} \quad (10)$$

여기서,

$PQ, PV$  : 부하모션과 발전모션

그리고, 계통의 송전손실은 식 (1)의 전력방정식의 형태와 같이 직각좌표로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_{loss}(V) = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ij}(e_i(e_i - e_j) + f_i(f_i - f_j)) \quad (11)$$

#### 4. 개선된 유전알고리즘을 이용한 전력조류계산 알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithm : GA)은 자연의 유전학과 다윈의 적자생존의 원리를 근거한 최적화 탐색기법으로서 자연계에서 염색체가 복제, 교배, 돌연변이를 반복하여 진화하듯이 시스템의 최적해(Optimal solution)를 찾는 방법으로 1989년 D. E. Goldberg에 의해 체계가 정리된 이후 여러 분야에 응용되고 있다 [11]. 유전알고리즘은 일종의 최적치 계산기법으로, 전역 최적해 탐색기법 및 여러 해의 동시탐색이 가능하고 다중해를 갖는 비선형성이 강한 시스템에도 적용이 가능한 이점을 갖고 있다. GA는 최적화 문제의 목적함수로 부터 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.

전력조류계산을 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.

##### 4.1 염색체에 의한 해들의 표현

전력조류계산을 위한 유전알고리즘 염색체

(chromosome)는 상변수인 각 모션의 전압벡터를 직각좌표 형태로 표현한다. 염색체를 표현하는 방법은 이진 코딩기법과 실변수 코딩기법으로 나눌 수 있으며, 그 중 전자는 전통적으로 사용되어온 코딩기법으로 다차원 고정밀의 수치해석 문제에 적용시 정밀도와 정의영역의 한계 내에서 넓은 탐색공간을 가지며 정밀도를 확장하기 위해 더 많은 염색체 비트를 도입할 수 있으나 알고리즘의 속도가 느려지는 단점을 가진다. 또한 전자의 코딩기법은 염색체 벡터의 각 원소와 같은 수의 이진비트를 이용하여 코딩하는 반면 후자의 경우에는 각 염색체 벡터를 해벡터와 같은 길이의 부동점 수의 벡터로 코딩하여 전자보다는 표준편차나 속도 및 염색체 총 길이에 효율적인 성능향상을 나타낸다. 특히, 후자는 대규모 정의영역 한계 내에서 특별히 고안된 유전연산자에 의해 높은 정밀도를 가지며, 표현하는 기법면에서 주어진 문제의 변수에 가깝게 코딩하므로 문제와 관련된 특성을 포함하는 연산자의 설계가 용이하고 구속조건을 다루는데 편리한 장점을 가진다[12].

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

##### 4.2 목적함수와 적합도 함수

유전알고리즘은 최적화에 적합한 탐색기법으로 기존의 수치해석 기반의 최적화 알고리즘과 마찬가지로 목적함수와 제약조건이 수반되어야 한다. 유전알고리즘에 적용될 목적함수는 일정한 규정 없이 문제의 특성을 고려하면서 시행착오(trial & error)법을 통하여 결정한다. 본 논문에서 적용한 목적함수는 식 (10)과 같이 전력조류계산의 문제에 적합한 유효전력과 무효전력 및 전압의 편차를 최소화하는 함수를 선정하고, 목적함수를 평가하는 적합도 함수는 식 (12)와 같이 적합도 조절상수를 목적함수로 나눈 값을 사용한다.

$$F = \frac{M}{1+O} \quad (12)$$

여기서,  $M$ 은 적합도를 조절하기 위한 파라미터이며  $O$ 는 목적함수를 나타낸다. 결국 적합도 함수는 목적함수로 사용되는 유효 및 무효전력과 전압 편차항으로 구성된 식 (10)이 최소가 되도록 하여 적합도가 최대치로 향하도록 유전알고리즘의 연산자를 구성한다.

##### 4.3 재생산(reproduction)

재생산은 한 세대의 개체집단으로부터 다음 세대의 개체집단을 만들기 위해 각 염색체의 적합도에 따라 반복 재생시키는 방법으로 적합도가 높은 개체일수록 다음세대에 더 많은 자손을 가질 확률이 높게 선택되며, 이것은 주어진 환경에 잘 적응하는 개체만이 생존하는 적자생존의 자연선택원리를 적용한다. 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 랜덤변수를 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.

##### 4.4 교배(crossover)

자연계에서 자손은 부모세대로부터 유전자를 이어받으면서도 부모와는 전혀 다른 형질을 가지듯이 유전알고리즘에서도 이러한 과정을 모방한 것이 교배연산이다. 이 과정은 일정한 교배확률을 가지고 개체집단 중 0과 1사이의 난수를 발생하여 교배확률보다 적은 개체에 대하여 교배를 실행하는 확률적 과정임에도 불구하고 재생산과 함께 쓰여 개체간의 정보를 교환하고 개체 중 우성인자를 결합하는 효과적인 수단이 된다. 본 논문에서 적용한 교배방법은 적합도가 높은 개체들을 빠르게 결합하여 현재 집단의 전역에서 확산시키는 역할을 담당하고, 보다 나은 탐색과정을 수행하기 위하여 최소편차에 따라 전산술(whole arithmetic)교배와 경험(heuristic)교배를 동시에 사용한다.

**4.4.1 전산술교배(Whole Arithmetic Crossover)**  
전산술 교배는 다른 교배방법에 비하여 빠른 수렴특성을 가지며 임의의 동일한 세대에서 가장 우수한 해의 평균값이 높으며 표준편차는 적은 특성을 가진다. 본 논문에서 사용한 전산술 교배의 방법은 최소편차가 0.1 이상인 경우에 두 벡터의 일차결합으로 식 (13)과 같이 정의되며, 염색체  $C_v^t$  와  $C_w^t$  가 교배될 때 그 자손세대는  $C_v^{t+1}$  과  $C_w^{t+1}$  이 된다.

$$\begin{aligned} C_v^{t+1} &= aC_w^t + (1-a)C_v^t \\ C_w^{t+1} &= aC_v^t + (1-a)C_w^t \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $a$ 는  $[0, 1]$ 사이의 랜덤값이다.

**4.4.2 경험교배(Heuristic Crossover)**  
경험교배는 탐색방향의 결정에 목적함수 값이 사용되는 연산자로서 지역적 미세조정과 유망한 방향으로의 탐색이 가능하며 식 (14)와 같이 하나의 자손세대만이 생성된다. 본 논문에서는 목적함수의 최소편차가 0.1 미만인 경우에 경험교배방법을 사용한다.

$$\dot{V}_y = r \cdot (\dot{V}_w - \dot{V}_v) + \dot{V}_v \quad (14)$$

여기서,

- $\dot{V}_v$  : 현재세대중 한 염색체의 파라미터
- $\dot{V}_w$  : 현재세대중 최대적합도를 갖는 염색체의 파라미터
- $\dot{V}_y$  : 개선된 파라미터
- $r$  :  $[0, 1]$ 사이의 랜덤값

경험교배에서 개선된 파라미터  $\dot{V}_y$  가 상대변수의 정의 영역을 벗어나는 경우에는 새로운 랜덤값  $r$  을 발생시켜 자손세대를 재구성한다. 만일 미리 정해진 횟수만큼 정의영역의 조건을 만족하지 못하고 적합한 해를 구하지 못하면, 연산자의 동작을 포기하고 자손세대를 생산하지 않을 수 있다.

**4.5 돌연변이(mutation)**

돌연변이 과정은 크게 두 가지 형태로 나눌 수 있으며 그 중 균등돌연변이(UM : Uniform Mutation)는 염색체의 모든 원소가 같은 돌연변이 확률을 가지고 세대 전역에서 랜덤하게 돌연변이를 수행하는 가장 기본적인 형태의 연산자이고, 비균일 돌연변이(NUM : Non-Uniform Mutation)는 초기 전역탐색으로 시작하여 근접 해에 가까울수록 지역적 미세탐색을 하는 연산자로 전자에 비하여 계산의 정확성이나 수렴특성이 우수한 특징을 가지고 있다. 본 논문에서는 세대의 전 영역에서 랜덤하게 돌연변이를 하는 균등돌연변이의 단점을 보완하고 세대수의 진행에 따라 변화하는 동적인 돌

연변이 연산자로 후자를 선택하였으며, 염색체  $C_v^{t+1} = \langle v_1, \dots, v_m \rangle$ 의 유전인자  $v_k (k \in \{1, \dots, m\})$ 가 비균일 돌연변이의 대상으로 선택되었을 때 연산의 적용결과는  $C_v^{t+1} = \langle v_1, \dots, v_k', \dots, v_m \rangle$ 이 된다. 이때,  $v_k'$  값은 다음 식을 통해 결정된다.

$$v_k' = \begin{cases} v_k + \Delta(\text{fitness}, UB - v_k), & \text{if random value} = 0 \\ v_k - \Delta(\text{fitness}, v_k - LB), & \text{if random value} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta(\text{fitness}, y) = y(1 - r^{(1 - \frac{\text{fitness}}{M})^b})$$

여기서,

- $v_k$  : 해당 염색체의 한 파라미터
- $v_k'$  : 돌연변이된 파라미터
- $UB$  : 파라미터  $v_k$ 의 상위 정의영역 한계
- $LB$  : 파라미터  $v_k$ 의 하위 정의영역 한계
- $\text{fitness}$  : 해당 염색체의 적합도 값
- $r$  :  $[0, 1]$ 사이의 랜덤값
- $M$  : 적합도를 조절하기 위한 상수 ( $M=100$ )
- $b$  : 돌연변이 정도를 결정하는 상수

를 나타내고  $\Delta(\text{fitness}, y)$  에서  $y$ 는 랜덤변수가 0일 경우에는  $UB - v_k$ 를 계산하고, 랜덤변수가 1일 경우에는  $v_k - LB$ 를 계산하게 된다. 결국 이 함수는 탐색작업 초기에 전역적으로 균등하게 탐색하다가 해에 근접한 영역에 들어서는 지역적인 미세탐색을 하도록 한다.

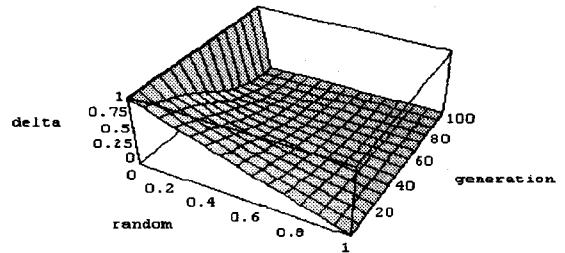


그림 1. 비균일 돌연변이 효과  
Fig 1. Effectiveness of nonuniform mutation

**4.6 종료조건**

일반적으로 GA의 종료조건은 세대수에 따라서 하나, 조류계산문제에 있어서 세대수에 따라 종료하도록 하면 원하는 해에 도달하기 전에 종료되거나 아니면 이미 원하는 해를 찾았음에도 불구하고 계속 GA과정이 진행될 수 있다. 본 논문에서는 최소편차에 따른 종료조건을 적용하여 항상 원하는 해를 얻을 수 있도록 하였다.

**4.7 발전무효전력 한계검사**

본 알고리즘에 발전무효전력 한계를 검사하는 루틴을 적용하였다. 이는 계통이 정상운전 중에는 발전무효전력이 한계를 넘어가는 경우는 없으나 고장조건에서 조류계산을 수행하게 되면 무효전력의 수급의 불균형으로 인하여 발전무효전력 한계를 넘어갈 수가 있다. 그러므로 정확한 전압을 구하기 위해서는 발전무효전력 한계검사 루틴의 적용이 필수적이다. 기존 수치적인 조류계산에서 발전무효전력 한계검사는 계산반복 중 검사하는 경우와 일

단 검사를 하지 않은 채 수렴 후 검사를 하는 경우의 두 가지가 있는데 유전알고리즘을 이용한 조류계산의 특성상 반복계산 도중 검사를 할 수 없으므로 먼저 발전무효 전력 한계검사를 하지 않은 채 조류계산을 수행 후 수렴하면 발전무효전력 한계검사 루틴을 적용한다. 개선된 유전알고리즘을 이용한 조류계산(IGAPF)의 수행 흐름도는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

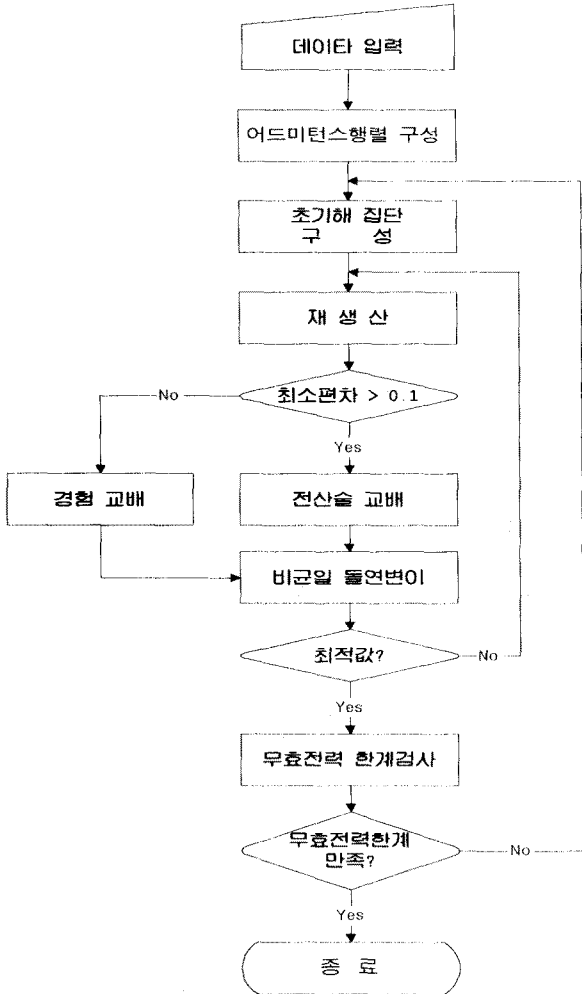


그림 2. IGA 조류계산 순서도  
Fig. 2. Flow chart of IGAPF

### 5. 사례연구

제시한 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 Ward & Hale 6모선 과 Stag & Al-Abiad 5모선계통, IEEE 14모선 계통에 적용하여 그 결과를 비교하였다. 개체집단 갯수는 100개로 하였으며 교배확률은 0.8, 돌연변이 확률은 0.1, 돌연변이 정도를 나타내는 상수  $b$ 는 1.5, 적합도 함수에서의  $M$ 은 100, 그리고 최소편차가 0.001이하이면 종료하도록 하였다. 또한, 유전알고리즘의 연산자로 재생산과정은 엘리티즘을 적용한 룯렛-휠 방법을 적용하였고 교배과정은 목적함수의 최소편차에 따른 전산술 교배와 경험교배를 적용하였으며 돌연변이 과정은 비균일 돌연변이를 적용하였다. 본 알고리즘의 실행환경은 펜티엄120, 램32Mbyte, Win95이고 컴파일러는 Visual C++ 4.0(32bit)에서 하였다.

표 1은 6모선계통에서 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 방법을 적용한 기존조류계산의 결과와 유전알고리즘을 적용한 제안된 조류계산의 전압벡터 결과를 극좌표 형식과 직각좌표 형식으로 비교한 것이다.

표 1. 6모선계통의 조류계산 전압결과  
Table 1. Power flow voltage results of 6 bus system

모선	기존조류계산	
	극좌표	직각좌표
1	1.050 ∠ 0.000	1.0500+j0.0000
2	1.100 ∠ -0.060	1.0980-j0.0665
3	0.997 ∠ -0.224	0.9722-j0.2211
4	0.926 ∠ -0.172	0.9124-j0.1583
5	0.916 ∠ -0.216	0.8943-j0.1962
6	0.914 ∠ -0.214	0.8934-j0.1942

모선	제안한 조류계산	
	극좌표	직각좌표
1	1.050 ∠ 0.000	1.0500+j0.0000
2	1.100 ∠ -0.050	1.0986-j0.0552
3	0.999 ∠ -0.218	0.9756-j0.2165
4	0.928 ∠ -0.168	0.9153-j0.1548
5	0.917 ∠ -0.208	0.8976-j0.1898
6	0.917 ∠ -0.209	0.8969-j0.1901

그림 3은 6모선에 계통에서 목적함수의 수렴특성에 영향을 미치는 균일돌연변이(UM : Uniform Mutation)와 비균일 돌연변이(NUM : Non-Uniform Mutation)의 효과를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 균일돌연변이의 경우에는 세대에 관계없이 모든 개체에 대하여 동일한 돌연변이 확률을 적용하기 때문에 수렴특성이 떨어지는데 비하여 비균일 돌연변이는 균일돌연변이와 같이 세대 초기에는 전역적으로 탐색을 시작하지만 세대 중반 이후, 근접해에 가까울수록 지역적 미세탐색으로 우수한 수렴특성을 보인다.

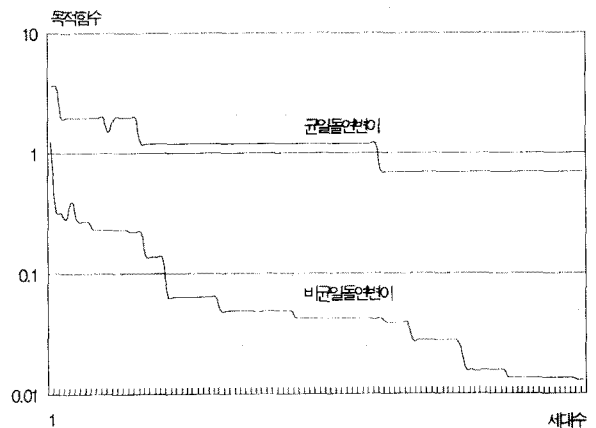


그림 3. 균일 및 비균일돌연변이 목적함수비교  
Fig. 3. Mismatch Comparison of UM and NUM

그림 4는 6모선계통의 세대에 따른 적합도 평가를 나타낸다. 그림 3과 마찬가지로 유전알고리즘의 연산자 중 비균일 돌연변이가 적합도함수 평가에 우수한 수렴특성을 보이고 있다.

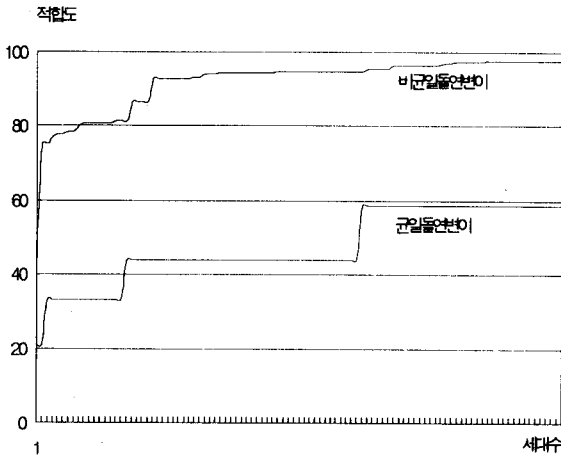


그림 4. 균일 및 비균일돌연변이의 적합도 비교  
Fig 4. Fitness Comparison of UM and NUM

제시한 유전알고리즘의 연산자를 적용한 6모선 계통의 수렴결과는 뉴턴-랩슨방법을 이용한 기존의 전력조류계산의 결과와 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

표 2. 14 모선 선로데이터  
Table 2. Line data of 14 bus system

선로번호	선로	선로임피던스(p.u)		Half line charging susceptance (p.u)	tap setting
		R	X		
1	1 - 2	0.01938	0.05917	0.02640	0.0
2	2 - 3	0.04699	0.19797	0.02190	0.0
3	2 - 4	0.05811	0.17632	0.01870	0.0
4	1 - 5	0.05403	0.22304	0.02460	0.0
5	2 - 5	0.05695	0.17388	0.01700	0.0
6	3 - 4	0.06701	0.17103	0.01730	0.0
7	4 - 5	0.01335	0.04211	0.00640	0.0
8	5 - 6	0.0	0.25202	0.0	0.932
9	4 - 7	0.0	0.20912	0.0	0.978
10	6 - 8	0.0	0.17615	0.0	0.0
11	4 - 9	0.0	0.55618	0.0	0.969
12	7 - 9	0.0	0.11001	0.0	0.0
13	9 - 10	0.03181	0.08450	0.0	0.0
14	6 - 11	0.09498	0.19890	0.0	0.0
15	6 - 12	0.12291	0.25581	0.0	0.0
16	6 - 13	0.06615	0.13027	0.0	0.0
17	9 - 14	0.12711	0.27038	0.0	0.0
18	10 - 11	0.08205	0.19207	0.0	0.0
19	12 - 13	0.22092	0.19988	0.0	0.0
20	13 - 14	0.17093	0.34802	0.0	0.0

표 2는 IEEE 14 모선계통에 대한 선로데이터를 나타낸 것이고, 표 3은 6모선 계통에서 적용했던 유전알고리즘의 연산자를 그대로 적용하여 얻은 결과와 기존조류계산에서 얻은 전압벡터의 결과를 극좌표형식과 직각좌

표형식으로 비교한 것이다.

표 3. 14모선계통의 조류계산 전압결과  
Table 3. Power flow voltage results of 14 bus system

모선번호	기존조류계산	
	극좌표	직각좌표
1	1.060 ∠ 0.000	1.0600+j0.0000
2	1.045 ∠ -0.087	1.0411-j0.0907
3	1.010 ∠ -0.222	0.9852-j0.2224
4	1.019 ∠ -0.180	1.0021-j0.1826
5	1.020 ∠ -0.153	1.0083-j0.1558
6	1.070 ∠ -0.248	1.0372-j0.2629
7	1.062 ∠ -0.233	1.0332-j0.2455
8	1.090 ∠ -0.233	1.0605-j0.2520
9	1.056 ∠ -0.261	1.0206-j0.2725
10	1.051 ∠ -0.264	1.0150-j0.2740
11	1.057 ∠ -0.258	1.0220-j0.2699
12	1.055 ∠ -0.263	1.0189-j0.2745
13	1.050 ∠ -0.265	1.0139-j0.2747
14	1.036 ∠ -0.280	0.9955-j0.2862

모선번호	제안한 조류계산	
	극좌표	직각좌표
1	1.060 ∠ 0.000	1.0600+j0.0000
2	1.045 ∠ -0.086	1.0411-j0.0900
3	1.010 ∠ -0.220	0.9856-j0.2207
4	1.019 ∠ -0.179	1.0026-j0.1812
5	1.020 ∠ -0.152	1.0087-j0.1547
6	1.070 ∠ -0.247	1.0374-j0.2622
7	1.062 ∠ -0.231	1.0340-j0.2435
8	1.090 ∠ -0.231	1.0611-j0.2493
9	1.056 ∠ -0.259	1.0216-j0.2708
10	1.051 ∠ -0.262	1.0159-j0.2725
11	1.057 ∠ -0.257	1.0226-j0.2690
12	1.055 ∠ -0.263	1.0189-j0.2741
13	1.050 ∠ -0.264	1.0141-j0.2741
14	1.035 ∠ -0.279	0.9962-j0.2850

그리고 표 4는 IEEE 14 모선 계통의 대한 기존의 조류계산결과를 나타낸 것이고 표 5는 제안한 조류계산 결과를 나타낸다.

전력조류계산 과정에서 발전기 무효전력 한계검사는 필수적이다. 본 사례연구 과정에서 6모선과 14모선 계통은 정상상태 운전 중 발전무효전력 한계를 벗어나는 경우가 발생하지 않았으므로, 발전무효전력 한계를 벗어나는 5모선 계통의 사례연구를 통하여 발전무효전력 한계 검사 알고리즘의 타당성을 검증한다. 표 6은 5모선 계통의 뉴턴-랩슨법을 적용한 기존조류계산의 결과를 나타내고 있으며, 3번 발전모선의 무효전력이 상한계(upper limit)를 초과하여 무효전력 한계검사 필요함을 알 수 있다.

표 7은 5모선계통에서 무효전력 한계검사를 포함한 기존의 조류계산의 결과를 나타내고 있으며, 3번 발전모선이 무효전력의 상한계를 초과하여 결국 발전모선으로 전환이 되지 않은 상태로 종료하게 된다.

표 8은 5모선계통에서 무효전력 한계검사를 포함한 제안한 조류계산의 결과를 나타내고 있으며, 기존의 조류계산과 마찬가지로 3번 발전모선이 무효전력의 상한계를 초과하여 발전모선으로 전환이 되지 않은 상태로 종료하게 된다.

표 4. 14모선 계통의 기존 조류계산 결과

Table 4. Conventional power flow results of 14 bus system

모선번호	모선전압		발 전		부 하	
	$ V (p.u)$	<i>Degree</i>	<i>MW</i>	<i>MVAR</i>	<i>MW</i>	<i>MVAR</i>
1	1.060	0.000	232.386	-16.889	0.0000	0.0000
2	1.045	-4.981	40.0000	42.396	21.7000	12.7000
3	1.010	-12.718	0.0000	23.394	94.2000	19.0000
4	1.019	-10.324	0.0000	0.0000	47.8000	-3.9000
5	1.020	-8.783	0.0000	0.0000	7.6000	1.6000
6	1.070	-14.223	0.0000	12.240	11.2000	7.5000
7	1.062	-13.368	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	1.090	-13.368	0.0000	17.357	0.0000	0.0000
9	1.056	-14.947	0.0000	0.0000	29.5000	16.6000
10	1.051	-15.104	0.0000	0.0000	9.0000	5.8000
11	1.057	-14.795	0.0000	0.0000	3.5000	1.8000
12	1.055	-15.077	0.0000	0.0000	6.1000	1.6000
13	1.050	-15.159	0.0000	0.0000	13.5000	5.8000
14	1.036	-16.039	0.0000	0.0000	14.9000	5.0000

표 5. 14모선 계통의 제안된 조류계산 결과

Table 5. Proposed power flow results of 14 bus system

모선번호	모선전압		발 전		부 하	
	$ V (p.u)$	<i>Degree</i>	<i>MW</i>	<i>MVAR</i>	<i>MW</i>	<i>MVAR</i>
1	1.060	0.000	230.5280	-16.6210	0.0000	0.0000
2	1.045	-4.936	40.0000	41.7460	21.7000	12.7000
3	1.010	-12.623	0.0000	23.0200	94.2000	19.0000
4	1.019	-10.249	0.0000	0.0000	47.8000	-3.9000
5	1.020	-8.722	0.0000	0.0000	7.6000	1.6000
6	1.070	-14.184	0.0000	12.0430	11.2000	7.5000
7	1.062	-13.252	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	1.090	-13.222	0.0000	17.1650	0.0000	0.0000
9	1.057	-14.846	0.0000	0.0000	29.5000	16.6000
10	1.052	-15.012	0.0000	0.0000	9.0000	5.8000
11	1.057	-14.737	0.0000	0.0000	3.5000	1.8000
12	1.055	-15.057	0.0000	0.0000	6.1000	1.6000
13	1.050	-15.126	0.0000	0.0000	13.5000	5.8000
14	1.036	-15.967	0.0000	0.0000	14.9000	5.0000

표 6. 5모선계통의 기존조류계산 결과

Table 6. Power flow results of 5 bus system

모선 번호	모선 유형	전 압		발 전		부 하		무효전력한계	
		$ V (p.u)$	<i>Degree</i>	<i>MW</i>	<i>MVAR</i>	<i>MW</i>	<i>MVAR</i>	$\overline{MVAR}$	$\overline{MVAR}$
1	slack	1.060	0.0	146.5	-20.6	0.0	0.0	0.0	0.0
2	PV	1.045	-4.4	40.0	35.1	21.7	12.7	-40.0	50.0
3	PV	1.010	-21.0	0.0	51.5	94.2	19.0	0.0	40.0
4	PQ	0.984	-26.0	0.0	0.0	47.8	-3.9	0.0	0.0
5	PQ	1.060	-0.9	0.0	0.0	7.6	1.6	0.0	0.0

표 7. 5모선 계통의 무효전력한계 적용결과(기존)

Table 7. Power flow results applying Q-limit of 5 bus system(conventional)

모선 번호	모선 유형	전 압		발 전		부 하		무효전력한계	
		$ V (p.u)$	$Degree$	$MW$	$MVAR$	$MW$	$MVAR$	$MVAR$	$MVAR$
1	slack	1.060	0.0	146.7	-20.7	0.0	0.0	0.0	0.0
2	PV	1.045	-4.4	40.0	47.8	21.7	12.7	-40.0	50.0
3	PQ	0.985	-21.1	0.0	40.0	94.2	19.0	0.0	40.0
4	PQ	0.959	-26.4	0.0	0.0	47.8	-3.9	0.0	0.0
5	PQ	1.060	-0.9	0.0	0.0	7.6	1.6	0.0	0.0

표 8. 5모선 계통의 무효전력한계 적용결과(제안)

Table 8. Power flow results applying Q-limit of 5 bus system(proposed)

모선 번호	모선 유형	전 압		발 전		부 하		무효전력한계	
		$ V (p.u)$	$Degree$	$MW$	$MVAR$	$MW$	$MVAR$	$MVAR$	$MVAR$
1	slack	1.060	0.0	144.8	-20.2	0.0	0.0	0.0	0.0
2	PV	1.045	-4.3	40.0	45.8	21.7	12.7	-40.0	50.0
3	PQ	0.988	-20.9	0.0	40.0	94.2	19.0	0.0	40.0
4	PQ	0.962	-26.0	0.0	0.0	47.8	-3.9	0.0	0.0
5	PQ	1.060	-0.9	0.0	0.0	7.6	1.6	0.0	0.0

### 5. 결 론

유전알고리즘을 적용한 전력조류계산은 기존조류계산이 가지는 여러 가지 단점을 보완하였다. 첫 번째로 기존 조류계산에서 발생하는 초기치 선정에 민감한 단점은 유전알고리즘이 가지는 전역적인 탐색기법을 통하여 완화하였고, 기존의 수치기법을 통해 계산되어야 하는 자코비안이나 그 역행렬의 계산이 유전알고리즘을 적용한 조류계산에서는 전혀 필요하지 않다는 것이다. 특히 알고리즘의 정밀도나 수렴특성을 좋게 하기 위하여 실변수로 코딩하였으며, 적절한 적합도 함수와 유전연산자로 재생산 기법은 엘리트리즘을 적용한 roulette-wheel 방법, 교배과정은 최소편차에 따라 전산술 교배와 경험교배를 동시에 적용하는 방법 그리고 돌연변이 과정은 초기 전역 탐색으로 시작하여 근접 해공간에서는 미세탐색이 가능한 비균일 돌연변이를 사용하여 효과적인 결과를 얻었다. 또한 기존의 유전알고리즘은 세대수에 따라 종료조건을 선택하였지만 본 논문에서는 문제의 특성상 목적함수의 최소편차의 크기에 따라 종료하는 방법을 사용하였고, 발전기의 무효전력 한계를 검사할 수 있는 기법을 적용하여 해를 구하도록 하였다. 사례연구를 통하여 기존조류계산과의 결과와 제안된 조류계산의 결과를 유전연산자방법과 전압벡터 및 전력조류를 비교함으로써 제안한 알고리즘의 효용성을 입증하였다. 이러한 검증들을 통하여 향후 다수 모선을 갖는 대형시스템에의 적용 가능성을 보였으며, 대규모 시스템에 적용할 경우 상태변수의 증가에 따른 수렴특성의 개선 문제를 충분히 고려하여야 할 것으로 본다.

### [참 고 문 헌]

[1] W. E. Tinney, C. E. Hart, "Power Flow Solution by Newton Method", IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-86, Nov., 1967, pp. 1449-1456

[2] J. J. Grainger, W. D. Stevenson "Power system Analysis" McGraw-Hill, 1994, pp 329-379

[3] Elgerd, Olle. I, "Electric energy systems theory", McGraw-Hill, 1982, pp 219-271

[4] Tinney, W. F and Powell, W. L, "Notes on Newton-Raphson Method for Solution of AC Power Flow Problem", Bonneville Power Administration, 1971, pp 5-16

[5] A. M. Sasson, F. J. Jaimes "Digital Methods Applied to Power Flow Studies" IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-86, July, 1967, pp. 860-866

[6] Pai, M. A, "Computer Techniques in Power System Analysis", Tata McGraw-Hill, 1979, pp 111-136

[7] T.Haida, and Y.Akimoto, "Voltage optimization by using genetic algorithm", Proc. of ESAP'91, 1991, pp.375-380

[8] K.Iba, "Reactive power planning in large power system using genetic algorithm", Trans. on IEE Japan, Vol. 113-B, 1993, pp.865-872

[9] K.Iba, "Reactive power optimization by genetic algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No.2, May 1994, pp.685-92

[10] A. Bakirtzis, V.Petridis, and S.Kazarlis, "Genetic algorithm solution to the economic dispatch problem", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No. 4, July 1994, pp.377-82

[11] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine-Learning", Addison-Wiley, 1989

[12] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Springer-Verlag, 1995

[13] A. H. El-Abiad, "Load Flow Using A Combination of Point Jacobi and Newton's Methods", IEEE Trans. on PAS July 1970, pp. 941-949

[14] Y. Wallach, R. K. Even, Y. Yavin, "Improved Methods for Load-Flow Calculations", IEEE Trans. on PAS-90, Feb. 1971

[15] Stagg, G. W. and El-Abiad, A. H, "Computer Methods in Power Systems Analysis",



McGraw-Hill, 1968, pp 257-341.

- [16] Pai, M. A, "Computer Techniques in Power System Analysis", Tata McGraw-Hill, 1979, pp 111-136
- [17] T. H. Lee, M. S. Chae, J. R. Shin " An Approach Based on Genetic Algorithm for Power Flow Calculation", ISAP '97, July, 1996, pp 560-564