

전력조류계산을 위한 새로운 유전알고리즘 적용기법

박순재, 채명석, 임한석, 신종린
 건국대학교 전기공학과

A New Application Technique of Genetic Algorithm for Power Flow

Sun-Jae Park, Myung-Suck Chae, Han-Suck Yim, Joong-Rin Shin
 Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ.
 jrshin@kkucc.konkuk.ac.kr

(Abstract)

The most of conventional power flow(PF) calculations which adopt the well-known numerical methods such as Newton-Raphson method often diverge in certain critical cases like near the voltage collapse point.

Some Approaches have been reported for the application of Genetic Algorithm(GA) to PF problem to overcome the disadvantages mentioned above.

This paper presents a new application technique of GA for PF problem, in which some improvements and modifications are made ; modification of fitness function, improvements on crossover method, mutation law and convergence criterion, introduction of reactive power check routine.

Some case studies with IEEE 5, 6, 14 bus systems are performed to show the performance of proposed algorithm.

1. 서 론

기존의 전력 조류계산 방법은 대부분 뉴턴-랩슨법 또는 가우스-자이델법을 바탕으로 한 수치해석적 기법에 의한 것이다. 이러한 수치해석적 기법은 상대적으로 빠른 수렴특성과 계산의 정확성으로 인해 계통에서 적절한 해법이라고 할 수 있으나, 알고리즘의 수렴특성이 초기치 선정에 매우 민감하고 역행렬을 구하는데 있어서 수치적인 불안정을 야기할 수 있다.

최근 전력계통운용에 있어서 중요한 관심사가 되고 있는 전압안정도 문제에 있어서 기존의 전력조류계산으로는 전압붕괴점에 가까울수록 자코비안 행렬이 특이행렬에 가깝게 되어 해를 구하지 못하게 된다. 이와같이, 기존의 수치적인 조류계산 접근으로는 전압 붕괴점 근방에서의 조류계산 해를 구하는 것이 불가능하므로 자코비안 및 그 역행렬 계산이 필요 없는 해법이 필요하다.

본 논문에서는 기존 전력조류계산 항을 목적함수로 하는 최적화 문제로 변환하여, 알고리즘 특성상 초기치 선정이 불필요하고 역행렬 계산이 포함되지 않는 유전자 알고리즘을 통하여 조류계산을 수행함으로써 앞서 기술한 기존의 수치해석적 기법의 단점을 보완하고자 하였다. 그리고 그동안 이와 관련된 몇몇 유전자 알고리즘을 이용한 조류계산에 관한 연구[1,2]가 발표되었지만 아직 여러 가지 해결점이 남아 있었다. 본 연구에서는 다양한 유전연산자와 기법들을 적용하여 앞서 발표된 알고리즘보다 조류계산 문제에 더욱 적합한 유전알고리즘을 개발함으로써 정적전압안정도 문제에 있어서 전압붕괴점을 구할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다.

2. 본 론

2.1. 기존조류계산

기존의 조류계산법 중 대표적인 것은 뉴턴-랩슨법에 의한 것이다. 전력조류계산에 적용되는 모선의 유효 및 무효전력 방정식은 식(1)과 같다.

$$f_P(\vec{V}) = e_i \sum_j (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i \sum_j (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \quad (1)$$

$$f_Q(\vec{V}) = f_i \sum_j (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i \sum_j (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)$$

$$\begin{cases} e_i & : \text{전압실수부} \\ f_i & : \text{전압허수부} \\ G_{ij} & : \text{어드미턴스 실수부} \\ B_{ij} & : \text{어드미턴스 허수부} \\ \vec{V}_i & = e_i + jf_i \end{cases}$$

이 비선형 방정식을 풀기 위하여 뉴턴-랩슨법에서는 식(1)에서 테일러 전개를 한 식의 2차 편미분항 이상을 소거하여 자코비안 행렬 J를 만든다. 이 자코비안 행렬을 이용하여 식(2)에서 전압크기와 위상각의 편차를 구한 후 반복계산을 통해서 해를 개선시켜 나간다.[3]

$$[J][\Delta \vec{V}] = [\Delta f] \quad (2)$$

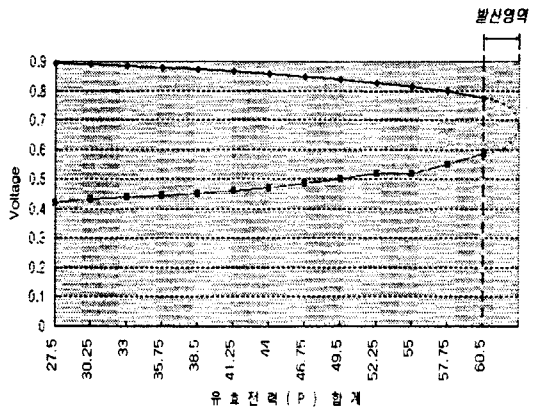
$$\begin{cases} J & : \text{자코비안 행렬} \\ \Delta f & : \text{전력편차 행렬} \end{cases}$$

2.2. 정적전압안정도와 전압붕괴점

부하의 지역적 편중 및 정전력 부하의 증가로 인하여 무효전력의 수급 불균형을 발생시키고, 이로 인하여 부하 밀집 지역에서는 전압이 저하된다. 이러한 현상이 계속 진행되어 일정 전압이하로 전압이 저하되면 결국 계통의 전압이 붕괴되어 대규모 정전상태로 이어지게 된다.

정적 전압안정도 해석에는 전압붕괴점 부근에서의 조류계산이 요구될 경우가 적지 않다. 그러나 기존 방법은 붕괴점 근처에 다가서면 역행렬 계산시 특이행렬에 가깝게 되어 계산을 더 이상 수행하지 못하는 문제점을 가지고 있다.[4] 그림1은 기존 조류계산에 의한 P-V곡선의 예를 나타낸 것으로서 전압붕괴점 근처에서 조류계산 해를 구할 수 없는 영역을 보인 것이다.

그림 1. 기존조류계산에 의한 P-V 곡선



2.3. 유전알고리즘을 이용한 조류계산

GA는 해집단들이 자연 선택을 통해 진화하는 생물학과 유사한 방법을 기반으로 하는 탐색기법이다. 실행중에 있어서, 무작위적으로 발생되는 해들의 개체집단(population)은 재생산, 교배, 그리고 돌연변이로 이루어진 유전자 연산자들의 작용들을 통해 최적해로 진화한다.

GA는 기존의 수치해적인 문제에 있어서 극부적극치에 수렴하거나, 미분이 불가능한 함수의 해석에 있어서도 적용이 가능한 장점을 가지고 있다. 반면 해를 얻기 위하여 계산량이 많고 이에 따라 많은 시간이 필요로 하며, 정확한 해보다는 근사적 수렴값을 찾는 단점을 가지고 있다. 그러므로 유전알고리즘은 주로 파라미터가 많은 시스템의 off-line설계에 사용된다.[6,7]

정적전압안정도 문제에 있어서 임계점을 구하는 것은 on-line의 문제라기 보다는 계통계획과 같은 off-line의 문제이므로 다소 시간이 걸리기는 하나 미분정보를 이용하지 않는 유전알고리즘을 이용하면 전압보조점을 구할 수 있을 것이다. 또 근래에 들어와서 정확한 해를 구할 수 있는 여러 연산자가 개발됨에 따라서 해의 보장성을 확보할 수 있다.

아래에서 전력조류계산에 적합한 GA에 적용된 유전연산자들과 알고리즘을 제시한다.

2.3.1. 알고리즘의 구성

조류계산문제를 풀기 위해 GA를 적용시키는 것은, 염색체(chromosome)에서 조류계산 해의 표현법, 염색체들의 적합도를 평가하기 위한 적합도 함수의 표현법, 그리고 교배와 돌연변이의 방법 등이 요구된다. GA문제에 있어서 종료조건 또한 중요한 문제이다. 이들을 아래와 같이 제시한다.

(a) 염색체에 의한 해들의 표현

계통에서 모선들 전압의 실수분과 허수분은 실변수(floating-point numbers)를 이용하여 코딩을 하고, 염색체들의 파라미터로서 입력한다.

(b) 목적함수와 적합도 함수

목적함수는 식(3)과 같이 전력편차와 전압편차에 관련된 함수로 이루어지고, 적합도 함수는 식(4)와 같이 목적함수를 분모의 항에 둬으로써 최대화 문제로 정식화한다.

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n |P_{sp} - P_i|^2 + \sum_{j=1}^n |Q_{sp} - Q_j|^2 + \sum_{k=1}^n |V_{sp} - V_k|^2} \quad (3)$$

$$F = \frac{M}{1+E} \quad (4)$$

- P_{sp} : 유효전력 지정값
- Q_{sp} : 무효전력 지정값
- V_{sp} : 전압크기 지정값
- P_i : 유효전력 계산값
- Q_j : 무효전력 계산값
- V_k : 전압크기 계산값
- M : 적합도를 조절하기 위한 상수($M=100$)

(c) 재생산(Reproduction)

한 세대의 개체집단으로부터 다음 세대의 개체집단을 만들기 위해 각 염색체의 적합도에 따라 반복 재생시키는 방법이다. 이 과정은 적합도가 높은 개체일수록 다음 세대에 더 많은 자손을 가질 확률이 높음을 의미하며 이는 자연선택의 원리를 담고 있다.

본 연구에서는 재생산 방법으로써 일반적으로 많이 쓰이고 있는 Roulette Wheel 법을 적용하였다.

(d) 교배(Crossover)

자연계에서 자손은 부모세대로부터 유전자를 이어받으면서도 부모와는 전혀 다른 형질을 가지듯이 유전알고리즘에서도 이 과정을 모방한 것이 교배연산이다. 이는 교배율(crossover rate)을 가지는 확률적 과정인데도 불구하고 재생산과 함께 쓰여 개체간의 정보를 교환하고 개체의 좋은 부분을 결합하는 효과적인 수단이 된다. 즉, 적합도가 높은 개체들을 빠르게 결합하여 현재 집단의 전역에 확산시키는 역할을 하며 다른 최적화 알고리즘에 없는 유전알고리즘에서 가장 중요하고 독특한 과정이다.

본 연구에서는 보다 나은 탐색과정을 수행하기 위하여 교배방식중 필요에 따라 선택하도록 하였다. 최소편차가 0.1

이상이면 전산술교배를 하고 0.1이하이면 경험교배를 적용하였다.

① 전산술교배(Whole Arithmetic Crossover)

두 벡터의 일차결합으로 정의된다.

즉, 염색체 S_v^{t+1} 와 S_w^{t+1} 가 교배될 때 그 자손세대는 식(5)와 같이 생성된다.

$$\begin{aligned} S_v^{t+1} &= aS_w^t + (1-a)S_v^t \\ S_w^{t+1} &= aS_v^t + (1-a)S_w^t \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 a는 [0, 1]사이의 랜덤값이다.

② 경험교배(Heuristic Crossover)

탐색방향의 결정에 적합도함수 값이 사용되는 연산자로서 지역적 미세조정과 유망한 방향으로의 탐색이 가능하다.

$$x_3 = r \cdot (x_2 - x_1) + x_2 \quad (6)$$

- x_1 : 현재대중 한 염색체의 파라미터
- x_2 : 현재대중 최적적합도를 갖는 염색체의 파라미터
- x_3 : 개선된 파라미터
- r : [0, 1]사이의 랜덤값

(e) 비균일 돌연변이(Non-Uniform Mutation)

시스템의 지역적 미세조정을 담당하는 연산자로서 염색체

$S_v^{t+1} = \langle v_1, \dots, v_m \rangle$ 의 유전인자 $v_k (k \in \{1, \dots, m\})$ 가 비균일 돌연변이의 대상으로 선택되었을 때, 이 연산의 적용 결과는 $S_v^{t+1} = \langle v_1, \dots, v_k', \dots, v_m \rangle$ 이 된다.

본 연구에서는 v_k' 값을 정함에 있어서 여러번의 시행착오를 거쳐 보다 나은 해를 가질 수 있도록 다음 과정을 채택하였다.

$$v_k' = \begin{cases} v_k^{best} + \Delta(\text{fitness}, UB - v_k), & \text{if } rv = 0 \\ v_k^{best} - \Delta(\text{fitness}, v_k - LB), & \text{if } rv = 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta(\text{fitness}, y) = y \cdot r \cdot \left(1 - \frac{\text{fitness}}{M}\right)^b \quad (8)$$

- v_k^{best} : 가장 좋은 염색체의 한 파라미터
- v_k' : 돌연변이된 파라미터
- UB : 파라미터 v_k 의 상위 정의영역 한계
- LB : 파라미터 v_k 의 하위 정의영역 한계
- rv : 임의로 0 또는 1을 발생시키는 랜덤값
- r : [0, 1]사이의 랜덤값
- fitness : 해당 염색체의 적합도 값
- M : 적합도를 조절하기 위한 상수($M=100$)
- b : 돌연변이 정도를 결정하는 상수

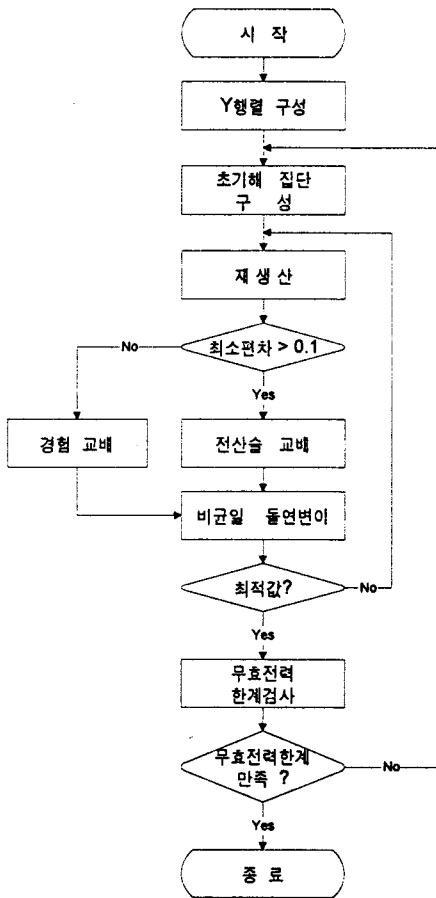
(f) 종료조건

일반적으로 종료조건을 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. 그러므로 본 논문에서는 최소편차에 따른 종료조건을 적용하여 항상 원하는 해를 얻을 수 있도록 하였다.

2.3.2. 알고리즘의 적용

그림2는 본 논문에 적용된 유전알고리즘 조류계산 순서도이다. 아래의 순서도에서 볼 수 있듯이 본 연구에서는 또한 발전무효전력 한계를 검사하는 루틴을 적용하였다. 이는 계통이 정상운전 중에는 발전무효전력이 한계를 넘어가는 경우는 없으나 P-V곡선을 통하여 전압붕괴점을 구하고자 할 때 전압붕괴점에 다가서면서 무효전력의 수급의 불균형으로 인하여 발전무효전력 한계를 넘어갈 수가 있다.[5] 그러므로 정확한 전압을 구하기 위해서는 발전무효전력 한계검사 루틴을 적용하여야 한다.

그림 2. 유전알고리즘 조류계산 순서도



2.4. 사례 연구

본 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 IEEE 5모선, 6모선, 14모선 계통에 적용하였고 기존 조류계산 결과와 비교하였다. 개체집단 갯수는 100개로 하였으며 교배확률은 0.8, 돌연변이 확률은 0.1, 돌연변이 정도를 나타내는 상수 b는 1.5, 적합도 함수에서의 M은 100, 그리고 최소편차가 0.01이하이면 종료하도록 하였다.

표 1. 기존조류계산과의 비교 (6모선)

모선	기존조류계산		제안한 조류계산	
	극좌표	직각좌표	극좌표	직각좌표
1	1.050 ∠ 0.000	1.0500+j0.0000	1.050 ∠ 0.000	1.0500+j0.0000
2	1.100 ∠ -0.060	1.0980-j0.0665	1.100 ∠ -0.050	1.0986-j0.0552
3	0.997 ∠ -0.224	0.9722-j0.2211	0.999 ∠ -0.218	0.9756-j0.2165
4	0.926 ∠ -0.172	0.9124-j0.1583	0.928 ∠ -0.168	0.9153-j0.1548
5	0.916 ∠ -0.216	0.8943-j0.1962	0.917 ∠ -0.208	0.8976-j0.1898
6	0.914 ∠ -0.214	0.8934-j0.1942	0.917 ∠ -0.209	0.8969-j0.1901

표 2. 기존조류계산과의 비교 (14모선)

모선	기존조류계산		제안한 조류계산	
	극좌표	직각좌표	극좌표	직각좌표
1	1.060 ∠ 0.000	1.0600+j0.0000	1.060 ∠ 0.000	1.0600+j0.0000
2	1.045 ∠ -0.087	1.0411-j0.0907	1.045 ∠ -0.086	1.0411-j0.0900
3	1.010 ∠ -0.222	0.9852-j0.2224	1.010 ∠ -0.220	0.9856-j0.2209
4	1.019 ∠ -0.180	1.0021-j0.1826	1.019 ∠ -0.179	1.0023-j0.1815
5	1.020 ∠ -0.153	1.0083-j0.1558	1.020 ∠ -0.152	1.0084-j0.1549
6	1.070 ∠ -0.248	1.0372-j0.2629	1.070 ∠ -0.248	1.0373-j0.2625
7	1.062 ∠ -0.233	1.0332-j0.2455	1.062 ∠ -0.232	1.0331-j0.2444
8	1.090 ∠ -0.233	1.0605-j0.2520	1.090 ∠ -0.232	1.0607-j0.2511
9	1.056 ∠ -0.261	1.0206-j0.2725	1.056 ∠ -0.260	1.0204-j0.2713
10	1.051 ∠ -0.264	1.0150-j0.2740	1.051 ∠ -0.263	1.0148-j0.2728
11	1.057 ∠ -0.258	1.0220-j0.2699	1.057 ∠ -0.257	1.0219-j0.2691
12	1.055 ∠ -0.263	1.0189-j0.2745	1.055 ∠ -0.263	1.0186-j0.2742
13	1.050 ∠ -0.265	1.0139-j0.2747	1.050 ∠ -0.264	1.0137-j0.2743
14	1.036 ∠ -0.280	0.9955-j0.2862	1.035 ∠ -0.279	0.9950-j0.2852

6모선, 14모선 계통은 정상상태 운전중의 샘플계통이므로 발전무효전력 한계를 벗어나는 경우가 발생하지 않았다. 그러므로 제안도중 발전무효전력 한계를 벗어나는 경우가 발생하는 5모선 계통을 적용하여 발전무효전력 한계검사 알고리즘의 타당성을 아래와 같이 알아보았다.

표 3. 발전무효전력한계를 검사하지 않은 경우(기존조류계산)

Bus	Type	Volt.	Ang.	Pc	Qc	PL	QL	Q	\bar{Q}
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 4. 발전무효전력한계를 검사한 경우(기존조류계산)

Bus	Type	Volt.	Ang.	Pc	Qc	PL	QL	Q	\bar{Q}
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 5. 발전무효전력한계를 검사한 경우(제한한 조류계산)

Bus	Type	Volt.	Ang.	P _G	Q _G	P _L	Q _L	Q	Q̄
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

표3은 기존조류계산으로 발전무효전력 한계를 검사했을 때의 결과이다. 여기서 3번모선에서 발전무효전력이 상한제를 넘어간 상태로 종료되어 한계검사가 필요함을 알 수 있다. 표4는 기존조류계산법으로 발전무효전력 한계를 검사한 결과이다. 3번모선이 발전무효전력 상한제를 넘어서 부하모선으로 바뀌어 결국 발전모선으로 돌아오지 못함을 볼 수 있다. 표5는 제안된 조류계산법으로 발전무효전력 한계를 검사한 결과를 보여주고 있으며 표4의 기존조류계산 결과와 거의 동일함을 알 수 있다.

아래 표6에서는 각 샘플계통의 해를 구하기까지 걸린 세대수와 시간을 나타내고 있다. 이는 샘플계통당 10번씩 수행한 결과이며 실행환경은 펜티엄120, 램32Mbyte, Win95이고 컴파일은 Visual C++4.0(32bit)에서 하였다.

표 6. 각 모선 세대수 및 수행시간

	5 모선	6 모선	14 모선
평균 세대수	1714.6세대	534.9세대	7463.8세대
평균 수행시간	1분 53.5초	23.5초	11분 15.3초
최소 세대수	91세대	126세대	1417 세대
최소 수행시간	4.0초	5.9초	2분 9.9초
최대 세대수	3420세대	1116세대	15347 세대
최대 수행시간	2분 7.6초	51.1초	23분 15.2초

표6의 결과는 각 파라미터의 해공간을 0.2로 두어서 최적해를 구한 것이다. 물론 해공간을 더욱 넓게 주어도 해를 구할 수 있으나 수행세대수가 많고 시간이 오래걸리게 된다. 전압붕괴점을 구하는 문제에 적용할 경우에 최적해가 존재할 해공간이 어느정도인지 알 수 있으므로 0.2의 해공간은 타당하다.

그림3과 그림4는 해공간이 각 파라미터당 0.2로 주어진 14 모선의 세대수에 따른 적합도와 편차를 나타낸 것이며 그림5와 그림6은 해공간을 일률적으로 0.7 ≤ e ≤ 1.2, -0.25 ≤ f ≤ 0.25로 하여 구한 세대수에 따른 적합도와 편차를 나타낸 것이다.

그림 3. 14모선 평균적합도와 최대적합도

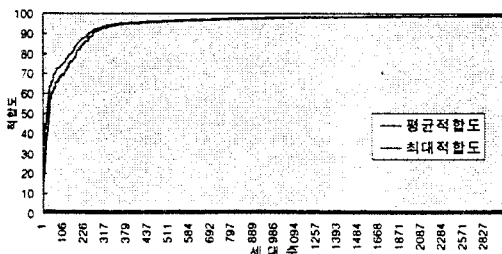


그림 4. 14모선 평균편차와 최소편차

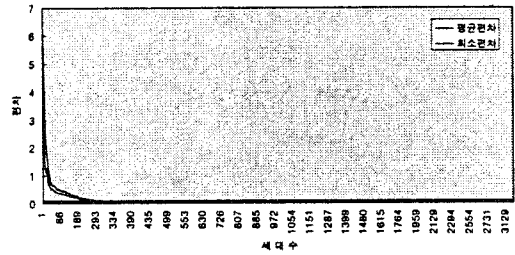


그림 5. 6모선 평균적합도와 최대적합도

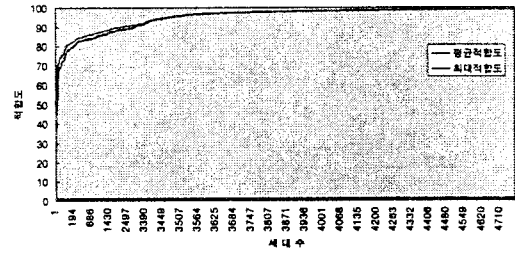
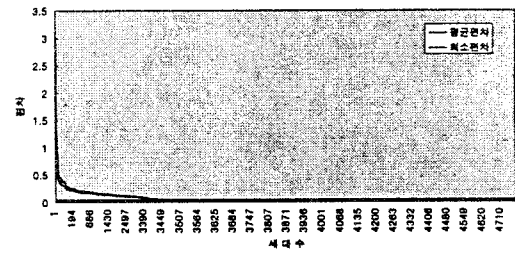


그림 6. 6모선 평균편차와 최소편차



3. 결 론

본 논문에서는 유전알고리즘을 이용하여 조류계산 문제를 해결하고자 하였다. 유전알고리즘의 특성상 초기치가 주어지지 않은 상태에서 전역해를 찾아가는 특성을 볼 수 있었으나 정적전압안정도 문제에서 전압붕괴점을 구할 수 있는 기반을 다졌는데 더 큰 의의를 가질 수 있다.

현재까지는 14모선의 비교적 작은 계통에 적용하였으나 앞으로 대형 계통에도 적용시켜 보다 현실적인 문제를 해결할 수 있도록 하고 비록 정적전압안정도가 off-line의 문제이지만은 하나 보다 빠르게 최적해를 구할 수 있는 알고리즘의 개발이 후행되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] K.P.Wong, A.Li, "Solving the Load-Flow Problem using Genetic Algorithm", ICEC '95, Vol 1., PP.103-108, 1995.12
- [2] 이태형 외, "유전알고리즘을 이용한 전력조류계산", 추계 학술대회 논문집, PP.130-132, 1996.11
- [3] M.A.Pai, "Computer Techniques in Power System Analysis", McGraw-Hill, PP.111-136, 1979
- [4] C.W.Taylor, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill, PP.229-244, 1994
- [5] C.A.Gross, "Power System Analysis", John Will & Sons, PP.273-293, 1986
- [6] D.E.Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine-Learning", Addison-Wiley, 1989
- [7] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs", Springer-Verlag, 1995