

배전 계통의 손실 최소화를 위한 루프 기반의 유전자 알고리즘의 적용

(Application of a Loop-Based Genetic Algorithm
for Loss Minimization in Distribution Systems)

전영재* · 김재철** · 최준호*

(Young-Jae Jeon · Jae-Chul Kim · Joon-Ho Choi)

요 약

본 논문에서는 배전 계통에서 여러 가지 제약조건을 만족하면서 최소 손실 구성을 찾는 문제에 루프 기반의 유전자 알고리즘을 적용하였다. 전역적인 탐색 능력이 뛰어난 유전자 알고리즘이 아크를 기반으로 하여 배전 계통 재구성 문제에 적용되었지만 비가능해가 많이 발생하여 탐색의 효율성이 떨어졌다. 본 논문에서는 루프를 기반으로 스트링을 구성하여 가능해가 될 확률을 높였고 비가능해를 가능해로 쉽게 전환할 수 있는 복구함수를 적용해 기존의 유전자 알고리즘에서 갖고 있던 단점을 극복하였다. 본 논문에서 제안한 루프 기반의 유전자 알고리즘은 32, 69 모선 시스템에서 기존의 아크 기반의 유전자 알고리즘과 비교하여 좋은 결과를 보임으로써 실제 크기의 배전 계통에 충분히 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

Abstract

This paper presents a loop-based genetic algorithm for loss minimization of distribution systems by automatic sectionalizing switch operation in distribution systems. Genetic algorithm can be successfully applied to problem of loss minimization in distribution systems because it is suitable to solve combinatorial optimization problems. New loop-based string structure is proposed for generating the more feasible solutions, and the proposed restoration function converts infeasible solutions into feasible solutions. The loop-based genetic algorithm with some adaptations have been applied to improve the computation time and convergence property. Numerical examples demonstrate the validity and effectiveness of the proposed methodology using a 32-bus and 69-bus system.

1. 서 론

고소비형 전력부하가 대도시 지역에 편중되어 증

가하고 있는 반면 여러 요인에 의해 전력 설비 증설은 어려워져 전력 공급 여건이 점차적으로 나빠지고 있다. 이러한 현실 때문에 배전 계통의 운영에 있어 변압기나 선로의 과부하를 해소하거나 유효 전력 손실을 줄이기 위한 효율적인 전략이 요구된다. 이를 위해 개폐기를 on/off 시켜 재구성을 수행하지만 배전 계통에는 많은 수의 개폐기가 있으며 고려해야

* 정회원 : 숭실대학교 전기공학과 박사과정

** 정회원 : 숭실대학교 전기공학과 교수

접수일자 : 2001년 1월 20일

할 제약조건이 많기 때문에 적절한 시간 내에 전역 최소해를 찾기가 쉽지 않다.

배전 계통이 방사상 형태로 운전되기 때문에 배전 계통 재구성 문제는 개념적으로 최소 걸침 나무(minimum spanning tree)를 찾는 문제로 볼 수 있으며, 이를 기반으로 많은 연구자들이 연구를 진행해 왔다. 모든 개폐기를 닫은 상태의 망 배전 계통으로 시작해서 연속적으로 개폐기를 열어가며 방사상 구성이 될 때까지 시스템의 손실을 계산하는 분지한계법(Branch and Bound)이 적용되었다[1]. 쌓이 되는 구분 개폐기와 연계 개폐기를 바꾸는 분기교환법(Branch Exchange)에 의해 이루어지는 손실 감소를 계산하기 위해 몇 가지 가정들을 근거로 한 간단하고 효율적인 공식들이 유도되고 적용되었다[2-4]. 조합적인 최적화 문제에 좋은 해를 제공해주는 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)이 배전 계통 재구성 문제에 적용되었고[5-7], 전역적인 최적화 기법인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)이 배전계통 재구성 문제에 적용되었다[8,9].

배전 계통 재구성 문제에 적용되었던 많은 알고리즘 중에서 유전자 알고리즘은 전역 탐색 능력이 우수하여 많은 전력 계통 분야에 적용이 되었지만 배전 계통 재구성 문제에는 적용 사례가 많지 않다[10]. 배전 계통 재구성 문제에 유전자 알고리즘을 적용하기 어려운 이유는 방사상으로 운전되는 배전 계통을 스트링으로 표현하는 것이 어렵고, 배전 계통이 일반적으로 노드 사이의 연결도가 낮은 희귀 걸침 나무(sparse spanning tree)여서 교배나 돌연변이 연산 과정에서 방사상 제약조건과 전력공급 제약조건을 위반하는 경우가 많아 제약조건을 위반하지 않는 가능해를 생성하는 것이 어렵기 때문이다. 교배나 돌연변이 연산 과정에서 방사상 제약조건을 만족시키기 위한 방안이 제안되었지만 교배나 돌연변이 연산 과정에서 주로 어떤 모선이 고립이 되는 전력공급 제약조건 위반이 많이 일어나기 때문에 배전계통 재구성 문제에 유전자 알고리즘을 적용하는데 있어 문제점을 모두 극복했다고 보기 어렵다[9].

본 논문에서는 교배나 돌연변이 연산 과정에서 발생하는 방사상 제약조건과 전력공급 제약조건을 위반을 막기 위해 루프를 기반으로 한 유전자 알고리즘을 제안하였다. 배전 계통 재구성 문제에 적용되었던 기존의 방법은 분기점 사이의 아크를 기반으로

스트링을 이진으로 구성하였기 때문에 교배나 돌연변이 연산 과정에서 방사상 제약조건과 전력공급 제약조건을 위반을 막기 힘들었고, 이 비가능해를 제약조건을 위반하지 않은 가능해로 전환시키는 것도 어려웠다. 본 논문에서 제안된 루프 기반의 스트링은 연계 개폐기의 수만큼 존재하는 루프마다 하나의 개폐기가 선택되게 하여 근본적으로 방사상 제약조건과 전력공급 제약조건을 위반할 가능성을 줄였으며, 제약조건을 위반했을 경우 손쉽게 가능해로 전환할 수 있는 복구 방안을 제시하였다. 루프를 기반으로 한 스트링 구성과 배전 계통 재구성 문제의 특성을 고려한 돌연변이 연산과 복구 방법이 탐색의 효율을 높였으며 제안한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위해 32, 69 모선 예제 계통에서 테스트하였다.

2. 조류계산과 목적함수

이 장에서는 그림 1에서 보이는 형태로 구성된 배전 네트워크를 재구성하기 위해 Baran과 Wu가 제안한 근사 조류계산 공식들을 설명할 것이다[3].

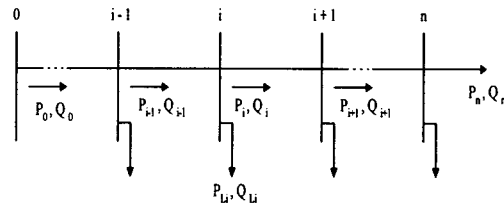


그림 1. 방사상 계통의 단선도

Fig. 1. One line diagram of a radial network

배전 계통 재구성 문제에서는 정확한 계산보다는 상대적인 손실 차이를 빠르게 구하는 것이 바람직하다. 이를 위해 근사적인 조류 계산이 필요한데 본 논문에서는 Baran과 Wu가 제안한 방법을 사용했고, 이들이 제안한 두 가지 조류계산법 중에서 다음의 단순화 배전조류 방정식(simplified Distflow equation)을 사용하였다.

$$P_{i+1} = P_i - P_{Li+1} \quad (1)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{Li+1} \quad (2)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \quad (3)$$

여기서, P_i , Q_i 는 i 모선의 유효전력과 무효전력, $P_{L,i+1}$, $Q_{L,i+1}$ 는 $i+1$ 모선의 부하, r_i , x_i 는 두 모선을 연결하는 선로의 저항과 리액턴스 성분이다. 첫 번째 모선에서의 P_0 , Q_0 , V_0 를 알 수 있다면, 그때 다른 모선의 P , Q , V 는 식 (1), (2), (3)을 통해서 계산할 수 있다. 식 (1), (2), (3)은 분기선이 없는 선로에서의 조류 계산식이다. 분기선이 존재하는 경우 메인 간선과 각 분기선의 종단에서 P , Q 가 0이 되는 경계 조건이 만족되어야 한다.

배전 계통 모델이 주어졌을 때 변압기 용량, 라인 용량, 전압 강하, 전력공급, 방사상 제약조건 등을 만족하면서 전체 손실을 최소화하는 것이 목적이고 전체 전력 손실은 다음과 같다.

$$P_{loss} = \min \sum_{i=1}^n r_i (P_i^2 + Q_i^2) \quad (4)$$

여기서 1은 전체 라인 숫자이다.

여러 제약조건 중에서 방사상 구성, 전력공급 제약조건이 다음 장에 설명될 해 생성 과정과 기본 연산자에 의해 만족되고, 라인 용량과 전압 강하 제약조건은 조류계산 이후 페널티 상수를 통해 식 (5)의 적합도에 포함되었다.

$$f(x) = \frac{1}{(P_{loss} + \alpha A(x) + \beta B(x))}, x \in X \quad (5)$$

여기서, X 는 전력공급과 방사상 제약조건을 만족하는 해의 집합이고, α 와 β 는 페널티 상수이다. $A(x)$, $B(x)$ 는 각각 라인 용량과 전압 강하 제약조건을 위반하는 집합이다. 전압 강하 제약조건은 피더의 말단에서 전압을 조사하고, 라인 용량은 각 말단에서 변압기까지 가장 라인 용량이 적은 라인에서 조사하여 위반할 경우 페널티 상수를 이용하여 목적함수에 포함시킨다.

3. 유전자 알고리즘

3.1 유전자 알고리즘의 개요

유전자 알고리즘은 생물진화의 원리로부터 착안된 알고리즘으로서 확률적 탐색이나 학습 및 최적화를

위한 기법이다. 고전적인 최적화 기법이나 시뮬레이션 어닐링, 타부 탐색이 이웃해 탐색기법으로 하나의 해를 운용하는데 반해 유전자 알고리즘은 복수개의 잠재해들로 이루어진 해의 집단을 운용한다. 이러한 해집단에 자연선택과 유전 법칙의 메카니즘을 적용하여 세대를 진행시키면서 해 공간을 탐색해 간다. 유전자 알고리즘은 좋은 해의 이용능력과 해 공간의 탐색 능력이 적절히 조화되어야 한다. 좋은 해의 이용만을 강조하면 조기수렴하여 부분 최적에 빠질 수 있고 해 공간의 탐색만을 강조하면 임의 탐색에 가까워 좋은 해를 찾아가지 못하게 된다. 유전자 알고리즘은 매 세대마다 모집단을 운용함으로써 내재된 병렬성을 갖는 기법이다[11,12].

유전자 알고리즘은 그 개념과 이론이 단순하고, 해의 탐색 성능이 우수하여 여러 분야의 최적화 문제에 적용이 가능하다. 특히 유전자 알고리즘은 복잡한 해 공간의 탐색 성능이 우수하여 변수와 제약이 많은 문제를 푸는데 적합한 기법이고, 또한 모델에 대한 유연성이 높아 제약 첨가나 목적함수 변경에 용이하다는 장점을 갖는다.

유전자 알고리즘이 많이 적용되었기 때문에 자세한 설명을 피하고 다음 절부터 트리의 특성과 트리 문제에 유전자 알고리즘을 적용할 때 고려해야 할 사항을 서술한다.

3.2 스트링 구성시 고려사항

대부분의 최적화 문제와 마찬가지로 유전자 알고리즘을 배전 계통 재구성 문제에 적용시킬 때 문제의 특성을 잘 고려해야 좋은 해를 얻을 수 있다. 배전 계통 재구성 문제는 배전 계통 운전조건을 만족시키면서 손실이 최소인 구성을 찾는 문제이다. 그래프 이론에서는 이러한 구성을 최소 걸침 나무(minimum spanning tree)라고 하는데 배전 계통 재구성 문제에서 다루는 트리는 일반적으로 노드 사이를 연결할 수 있는 연결도가 연계 개폐기의 숫자로 제한되면서 아주 낮은 연결도를 가지고 있기 때문에 교배나 돌연변이 과정에서 비가능해가 많이 발생한다. 따라서 유전자 알고리즘을 배전 계통 재구성 문제에 적용할 때는 교배나 돌연변이 과정에서 비가능해가 적게 생길 수 있는 스트링 구조를 이용해야 하고 다음의 사항을 만족해야 한다.

배전 계통의 손실 최소화를 위한 루프 기반의 유전자 알고리즘의 적용

- a. 스트링은 가능한 모든 트리를 표현할 수 있어야 한다.
- b. 스트링은 트리를 표현할 때 똑같은 형태로 표현되어야 한다.

스트링의 길이를 조절하는 경우도 있지만 똑같은 형태와 길이로 트리를 표현해야만 생성, 선택, 교배, 돌연변이 과정에서 모든 해 공간에 공평하게 도달할 수 있게 된다.

- c. 오직 트리만 표현해야 한다.

초기에 랜덤하게 해를 생성할 때 트리가 아닌 것이 많으면 초기 개체집단을 생성하는 것도 어렵고 교배와 돌연변이 과정에서 트리가 아닌 해를 만들 가능성이 많다. 또한 해 영역이 커져 탐색 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 해가 희박하게 존재하기 때문에 트리가 되는 해를 좀처럼 찾기가 어렵다. 그리고 가끔씩 찾아지는 해도 좋은 해가 아닌 상황에서 교배나 돌연변이를 통해 어느 정도 우수한 해가 생성되면 이 자손은 초우량 개체가 되어 급속히 개체집단 전체를 차지해 조기 수렴을 일으킨다. 따라서 오직 트리만을 표현하거나 대다수가 트리가 될 수 있도록 스트링을 구성하는 것이 필요하다.

- d. 스트링과 트리의 변환이 편리해야 한다.

스트링을 이진으로 구성하여 트리를 표현하기가 쉽지 않고 가능하더라도 변환 시간이 많이 걸리기 때문에 문제의 특성을 반영할 수 있는 스트링이 되어야 한다.

- e. 스트링에서의 변화가 트리에 작은 영향을 미쳐야 한다.

스트링에서 작은 변화가 일어났을 때 트리가 크게 변하지 않아야 한다. 교배와 돌연변이 과정에서 트리에 큰 변화가 일어난다면 부모의 좋은 특성이 자손에게 전달되지 않게 되어 탐색 과정에서 유전자 알고리즘의 장점을 살릴 수 없게 된다.

- f. 비가능해를 쉽게 가능해로 만들 수 있어야 한다.

비가능해를 가능해로 만드는 복구 알고리즘은 대부분 많은 계산시간을 필요로 하고, 때로는 가능해로 복구하는 것이 원래의 문제를 푸는 것만큼 어려울 경우도 있다. 따라서 간단하게 복구 알고리즘을 적용시킬 수 있는 스트링 구조가 필요하다.

트리 문제에 유전자 알고리즘을 적용할 경우 위의

사항을 모두 고려해서 스트링을 구성해야 좋은 결과를 얻을 수 있기 때문에 본 논문에서는 루프 기반의 스트링 구조와 복구 함수를 이용하여 배전 계통 재구성 문제에 유전자 알고리즘을 적용하였다.

4. 유전자 알고리즘의 적용

4.1 아크 기반의 유전자 알고리즘

배전계통 재구성 문제는 앞서 언급한 것처럼 그래프 이론에서 최소 결침나무(minimum spanning tree)를 구하는 것과 같다. 다른 분야에서도 결침나무 형태의 문제가 많고 유전자 알고리즘도 많이 적용되어 왔다. 통신과 산업공학 등에서 적용되는 많은 문제들은 각 노드들의 연결도가 높아 유전자 알고리즘의 교배와 돌연변이 연산에 문제가 없지만 본 논문에서 적용하려는 배전계통 재구성 문제는 그림 3처럼 초기 구성에서 연계 개폐기만 연결할 수 있기 때문에 연결도가 매우 낮은 결침나무 형태이다. 따라서 일반적인 스트링 구조로는 유전자 알고리즘의 교배와 돌연변이 연산시 많은 제약조건 위반을 발생시킨다.

유전자 알고리즘의 교배와 돌연변이 연산은 문제의 특성과 밀접한 관련이 있어 좋은 수행을 위해서는 문제의 특성을 고려한 스트링 구조가 필요하다. 배전계통의 특성과 기존 논문에서 사용된 스트링 구조를 설명하기 위해 그림 2의 32모선 예제 시스템[3]을 사용할 것이다.

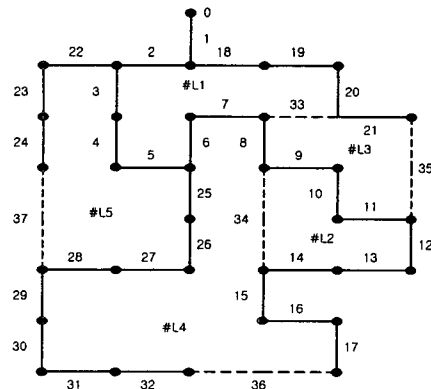


그림 2. 32모선 시스템의 초기구성
Fig. 2. Initial configuration of 32 bus system

그림 2에서 실선 위에 구분 개폐기가 있고 점선 위에 연계 개폐기가 있다고 가정한다. 기존 논문에서는 “아크”의 개념을 사용한다[7,8]. “아크”는 분기점과 분기점과의 사이를 말하며, {22,23,24,37},{2},{3,4,5} 등이 “아크”에 해당된다. 스트링은 아크와 오픈되는 개폐기의 순서를 0과 1로 구성하며, 아크와 개폐기의 순서에 따라 연계 개폐기의 위치가 결정된다. 예를 들어 32모선에서는 아크의 수와 각 아크당 개폐기수가 16개 이하이기 때문에 각각 4비트를 사용하는데 0000011은 0000이 “아크 0”을 의미하고 0011은 “4번째 개폐기”를 의미한다. 따라서 “아크 0”= {22, 23,24,37}이라고 가정하면 오픈되는 연계 개폐기는 37번 개폐기가 된다. 아크와 개폐기수는 루프의 수만큼 있게되고 전체 스트링은 다음과 같은 형태를 가진다.

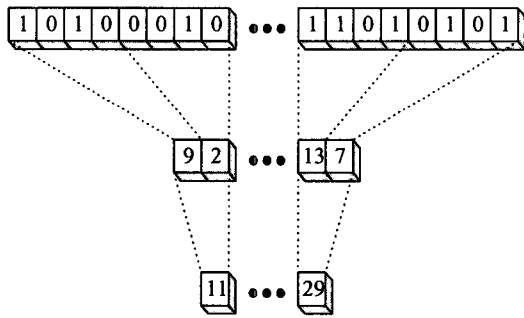


그림 3. 아크 기반의 스트링 구조
Fig. 3. Arc-based string structure

아크 기반의 스트링 구조가 각 아크에서 하나의 개폐기를 선택할 가능성을 높이고, 교배나 돌연변이가 아크 단위로 이루어지기 때문에 배전 계통의 특성을 어느 정도 고려했다고 볼 수 있다. 그러나 이러한 스트링 구조는 각 아크가 포함하는 개폐기 수가 비슷해야 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그림 2의 32모선이 아주 작은 시스템이지만 각 아크마다 포함하고 있는 개폐기 숫자는 많은 차이를 가지고 있다. 적게는 1부터 8까지의 크기를 가지고 있지만 최대 8의 크기를 표현하기 위해 아크 기반의 스트링 구조에서는 4비트를 사용한다. 이런 스트링 구조에서는 그림 4에 보이는 것처럼 16개의 스트링 중에서 겨우 몇 개만을 사용하기 때문에 대다수의 해가 아무런 의미를 갖지 못하게 되어 가능해로 사용할 수 없게 된다.

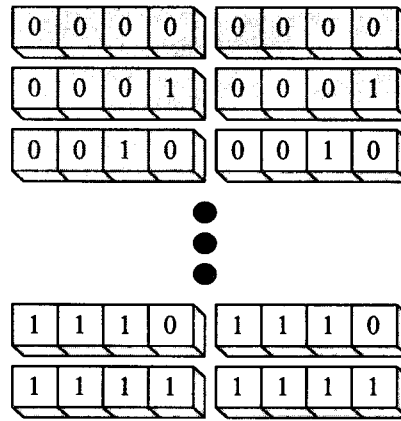


그림 4. 많은 비가능해
Fig. 4. Many infeasible solutions

표 1. 32모선 시스템의 루프와 개폐기
Table 1. Loops and switches of 32 bus system

루프	개폐기
루프 1	2, 3, 4, 5, 6, 7, 18, 19, 20, 33
루프 2	9, 10, 11, 12, 13, 14, 34
루프 3	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 18, 19, 20, 21, 35
루프 4	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 36
루프 5	3, 4, 5, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 37

이러한 문제는 해 생성 과정뿐만 아니라 수렴 특성이나 기본 연산 과정에서 많은 악영향을 미친다. 교배와 돌연변이 과정에서 비가능해가 많이 생성되기 때문에 해를 다시 생성하거나 정교한 페널티 상수를 사용해야 한다. 또한 대다수의 나쁜 해 속에서 적은 수의 가능해가 나타났을 경우 다른 해들과 비교하여 월등한 선택 확률을 갖게 되기 때문에 몇 세대 후에 전체 개체집단을 지배하게 된다. 이러한 현상이 조기수렴의 결과로 나타나 유전자 알고리즘의 장점인 전역 탐색 능력을 거의 살리지 못하고 지역 최소해에 빠지게 된다. 아크 기반의 스트링 구조는 배전 계통의 크기가 커짐에 따라 제약조건 위반 문제를 처리하기가 더욱 어려워지기 때문에 배전 계통의 특성을 고려하여 이러한 문제점을 해결할 수 있

배전 계통의 손실 최소화를 위한 루프 기반의 유전자 알고리즘의 적용

는 스트링 구조와 복구 함수가 필요하다.

4.2 루프 기반의 유전자 알고리즘

본 논문에서 제안한 스트링 구조는 루프를 기반으로 이루어지며 이진수를 이용하지 않고 십진수를 이용한다. 그림 2의 32모선 시스템에서 보이는 것처럼 5개의 연계 개폐기가 있어 5개의 루프를 생각할 수 있다. 프로그램 상에서 시스템의 구성을 알 수 있기 때문에 각 연계 개폐기를 달아서 생기는 루프의 크기와 포함되는 개폐기를 알 수 있으며, 이를 정리하면 표 1과 같다.

루프 기반의 스트링 구조에서는 표 1에 있는 각 루프의 개폐기들 중에서 하나를 선택해 초기해를 만든다. 표 1에서 밑줄이 쳐진 개폐기 3, 4, 5와 같이 다른 루프와 중복이 되어 있는 경우 개폐기 3, 4, 5 중에서 두 개를 선택하면 고립이 생겨 전력공급 제약조건을 위반하기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위해 루프에서 개폐기를 선택할 때 중복된 개폐기들이 이미 선택되었으면 중복되지 않는 개폐기들 중에서만 선택한다. 예를 들어 루프 1에서 개폐기 3, 4, 5 중에 하나를 선택했다면 루프 5에서는 개폐기 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 37 중에 하나를 선택해야 하지만 루프 1에서 개폐기 2, 6, 7, 18, 19, 20, 33 중에서 하나를 선택하였다면 루프 1과 루프 5에 중복되는 개폐기도 선택할 수 있기 때문에 루프 5에서 개폐기 3, 4, 5 중에서도 하나를 선택할 수 있다. 이러한 기본적인 규칙을 가지고 해를 생성하면 그림 5와 같이 각 루프마다 하나의 개폐기를 선택한 형태가 된다.

7	14	9	32	37
#L1	#L2	#L3	#L4	#L5

그림 5. 루프 기반의 스트링 구조
Fig. 5. Loop-based string structure

배전 계통이 방사상으로 운전되기 때문에 루프 기반의 스트링 구조에 따라 각 루프에서 하나의 연계 개폐기를 연다면 기본적으로 방사상 구조가 되어 해 생성 과정에서 전력 공급 제약조건만 만족하면 된다. 따라서 루프 기반의 유전자 알고리즘은 아크 기반의

유전자 알고리즘에 비해 상당히 많은 초기해가 가능해로 된다.

루프 기반의 스트링 구조를 통해 생성된 개체 집단은 룰렛 휠 방식으로 선택된다. 조류계산을 통해 각 개체의 전체 손실값이 계산되고 각 개체의 적합도에 따라 결정되는 선택 확률에 의해 개체들이 선택된다.

일반적으로 가장 우수한 적합도를 가지는 개체를 다음 세대로 넘기는 엘리트 보존 방식이 룰렛 휠 방식과 함께 사용된다. 배전 계통은 앞서 설명한 것처럼 연결도가 낮은 트리 형식을 가지기 때문에 해가 될 수 있는 후보가 몇몇의 개폐기에 집중되는 현상이 나타난다. 이러한 상황에서 엘리트 보존 방식을 사용할 경우 엘리트 개체가 유전자 집단 안에서 급속히 확산되어 국소 최적해에 빠지기 때문에 본 논문에서는 엘리트 보존 방식을 사용하지 않았다.

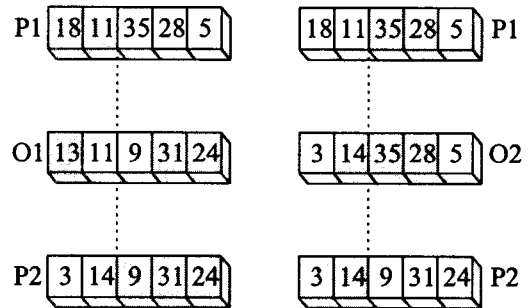


그림 6. 일점 교배
Fig. 6. One point crossover

본 논문에서는 그림 6에서 보이는 것처럼 일점 교배를 통해 자손을 생성한다. P1과 P2는 각각 부모 1과 부모 2로 나타내고 O1과 O2는 자손 1과 2를 나타낸다. 교배 포인트를 랜덤하게 결정하고 두 스트링의 일부분을 교환해서 교배 연산을 하며, 앞서 설명한 것처럼 교배 과정에서 많은 비가능해가 발생한다. 그림 6에서 부모 1과 부모 2는 가능하지만 첫 번째 교배에서 생성된 자손 1에서 개폐기 11과 9가 동시에 선택되고 두 번째 교배에서 생성된 자손 2에서 개폐기 3과 5가 동시에 선택되어 전력공급 제약조건을 위반한다. 루프 기반의 스트링 구조에서 교배 연산을 할 경우 그림 6에서 알 수 있듯이 비가능해가 되더라도 하나만 고치면 가능해로 복구할 수 있는

스트링이 많다. 따라서 본 논문에서는 비가능해를 가능해로 전환하는 복구 함수를 사용했다. 본 논문에서 사용된 복구함수는 루프를 기반으로 하기 때문에 루프의 크기와 루프에 포함된 개폐기를 알 수 있어 그림 7처럼 수행된다.

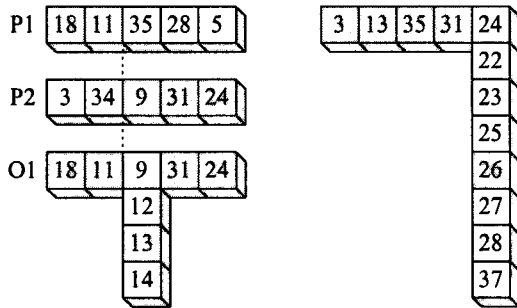


그림 7. 복구 함수와 돌연변이
Fig. 7. Restoration function and mutation

그림 7에서 교배 연산이 이루어진 후 루프 3의 개폐기 9가 루프 2의 개폐기 11과 동시에 선택되어 비가능해가 되었다. 이때 루프 2에서 이미 11을 선택했기 때문에 루프 3에서는 루프 2와 중복되는 개폐기 9, 10, 11을 제외하고 개폐기 12, 13, 14중 하나를 선택하면 비가능해를 가능해로 전환할 수 있다.

유전자 알고리즘 적용시 비가능해가 많이 발생하면서 복구 함수를 통해 쉽게 가능해로 전환할 수 있는 경우에 복구 함수를 사용한다. 복구 함수로 인해 유전자 알고리즘 고유의 수렴 특성에 영향을 줄 수 있지만 비가능해를 가능해로 전환시켜 탐색할 수 있는 해 영역을 축소시키기 때문에 전체적인 탐색 측면에서 보면 복구 함수 사용이 보다 효율적이다. 본 논문에서 제안한 복구 함수는 비가능해를 가능해로 쉽게 전환할 수 있으며 같은 루프에 있는 개폐기를 대신 선택하기 때문에 부모가 가지고 있는 특성을 크게 파괴하지 않으면서 비가능해를 가능해로 전환한다. 따라서 복구 함수의 사용으로 유전자 알고리즘의 수렴 특성을 크게 파괴하지 않으면서 탐색 영역을 가능해 지역으로 축소하여 탐색 효율을 높게 된다.

루프 기반의 스트링 구조에서 돌연변이 연산은 복구 함수와 개념이 같기 때문에 그림 7의 오른쪽에 있는 스트링처럼 같은 루프에 있는 개폐기중 하나를

랜덤하게 선택하여 돌연변이 연산을 수행한다. 이러한 해 생성과 기본 연산을 바탕으로 본 논문에서 제안된 루프 기반의 유전자 알고리즘은 다음과 같이 수행된다.

단계 1 : 데이터 입력 및 파라메타 초기화

부하와 선로 데이터를 입력받고 유전자 알고리즘의 수행에 필요한 파라메타를 설정한다. 초기 구성에서 각 루프의 크기와 루프에 속해있는 개폐기를 확인한다.

단계 2 : 개체 집단을 생성

각 루프에서 개폐기 하나씩을 선택하여 개체집단을 생성한다. 생성된 개체집단의 적합도를 구한다.

단계 3 : 룰렛 휠에 의한 선택

개체집단의 적합도를 모두 더한 후 각 개체의 적합도에 나누어 선택 확률을 결정한다. 랜덤함수를 통해 0과 1 사이의 값을 발생시켜 해당하는 개체를 개체집단의 수만큼 선택한다.

단계 4 : 교배

랜덤하게 두 개의 개체를 선택하고 교배 포인트를 결정한다. 교배 포인트를 기준으로 교환하여 새로운 자손을 만든다. 전력공급 제약조건이 위반되었을 경우 복구함수를 통해 비가능해를 가능해로 전환한다. 복구함수는 교배 후 위반된 개폐기를 해당하는 루프에서 제약조건을 위반하지 않는 개폐기로 대체한다.

단계 5 : 돌연변이

랜덤하게 돌연변이를 할 개체를 선택하고 돌연변이 포인트를 결정한다. 해당하는 루프에서 전력공급 제약조건을 위반하지 않는 개폐기들 중에서 하나를 랜덤하게 선택하여 원래 개폐기와 대체한다. 새롭게 생성된 개체의 적합도를 구한다.

단계 6 : 종료

단계 1에서 정했던 세대수에 도달했다면 종료하고 그렇지 않으면 단계 3으로 가서 기본 연산 과정을 반복한다.

본 논문에서 제안한 루프 기반의 유전자 알고리즘은 최소 걸침나무 문제에 유전자 알고리즘을 적용할 때 고려해야할 대부분의 문제를 모두 만족시키고 유전자 알고리즘의 기본 특성을 살리면서 수행된다. 루프를 기반으로 하기 때문에 해 생성시 비가능해가 현저하게 줄어들어 유전자 알고리즘의 특성인 전역

배전 계통의 손실 최소화를 위한 루프 기반의 유전자 알고리즘의 적용

탐색 능력을 충분히 살릴 수 있고, 적절한 복구 함수의 사용으로 조기수렴 문제를 방지할 수 있다. 전체적으로 비가능해가 줄어 탐색 영역이 가능해만으로 축소되고 불필요한 해 발생이 줄어들기 때문에 수렴 특성이 좋아지고 계산 속도가 감소한다. 본 논문에서 제안한 루프 기반의 유전자 알고리즘은 32모선 시스템과 69모선 시스템에서 테스트하여 좋은 결과를 얻었다.

5. 사례 연구

제안한 알고리즘은 C언어로 프로그램 했으며 배전 계통의 방사상 구조를 표현하기 위해 자료구조에서 사용되는 양방향 연결 리스트(double linked list)와 인접 행렬(adjacent matrix) 기법을 사용했다. 이 장에서는 제안한 알고리즘의 효율성을 입증하기 위해 기존의 아크 기반 유전자 알고리즘[8,9]과 제안한 루프 기반의 유전자 알고리즘을 32, 69 모선 시스템을 통해 모의한다.

참고문헌 [3]에 있는 32모선 예제 시스템은 5개의 연계 개폐기, 32개의 모선을 가지고 있으며 기준전압은 12.66[kV]이고 초기 구성에서의 전체 부하는 3715[kW], 2300[kVAR]이다. 초기 구성은 그림 3이고 초기 구성은 모선 (7, 20), (8, 14), (11, 21), (17, 32), (24, 28) 사이의 개폐기를 열어 계통을 구성했으며, 이때의 손실은 176.4[kW]이고 모선의 최소 전압은 0.919[pu]이다.

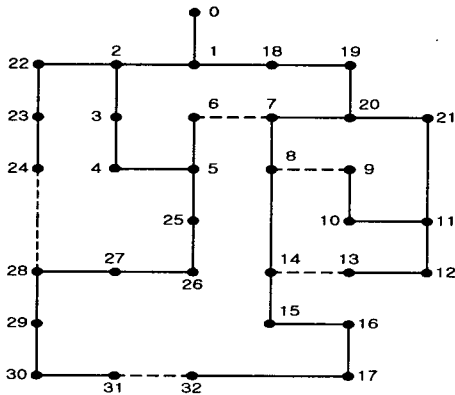


그림 8. 32모선의 최적 구성
Fig. 8. Optimal configuration of 32 bus system

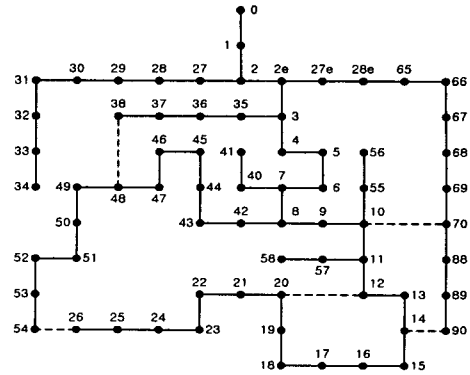


그림 9. 69모선 시스템의 초기 구성
Fig. 9. Initial configuration of 69 bus system

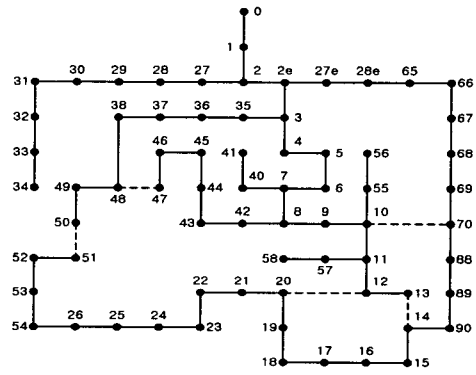


그림 10. 69모선 시스템의 최적 구성
Fig. 10. Optimal configuration of 69 bus system

각 알고리즘을 통해 그림 8과 같은 최적 구성을 얻었다. 이 계통 구성은 (6, 7), (8, 9), (13, 14), (24, 28), (31, 32) 사이의 개폐기를 열어 구성했으며, 이때의 손실은 127.4 [kW]이고 모선의 최소 전압은 0.939[pu]이다.

알고리즘 수행후 손실은 49[kW]가 줄어 28[%]가 줄었으며 최소 전압은 2.5[%]의 전압 상승이 있었다.

참고문헌 [13]에 있는 69모선 예제 시스템의 초기 구성은 그림 9와 같이 5개의 연계 개폐기, 69개의 모선을 가지고 있다. 기준전압은 12.66 [kV]이고 전체 부하는 3802[kW], 2695[kVAR]이다.

최적 구성은 그림 10과 같이 (10-70), (12-20), (13-14), (47-48), (50-51) 사이의 개폐기가 오픈된

새로운 구성이 생성된다. 초기 구성에서 손실이 191.2[kW]이고 최소 전압은 0.913[p.u.]였는데 프로그램 수행 후 손실은 90.7[kW]이고 최소 전압은 0.944[p.u.]가 되었다. 손실은 101[kW]가 줄어 53%가 줄었으며 최소 전압은 3.3%의 전압 상승이 있었다.

제안한 알고리즘의 효율성을 보이기 위해 32모선과 69모선 시스템에서 기존의 아크 기반 유전자 알고리즘과 비교하였고, Intel Pentium II 350[MHz]에서 10번을 수행하여 얻은 평균 계산시간과 파라메타들이 표 2에 나와있다.

표 2. 파라메타와 계산 속도
Table 2. Parameters and computation time

탐색 방법	예제 계통	개체 집단	세대	교배율	돌연변이율	시간 [sec]
기존의 GA	32	50	60	0.6	0.05	0.67
제안한 GA	69	80	120	0.6	0.08	9.40
기존의 GA	32	50	50	0.65	0.02	0.64
제안한 GA	69	80	100	0.65	0.03	8.36

두 알고리즘은 32모선과 69모선에서 최적해를 찾을 수 있었으며, 계산시간에서 32모선 시스템에서는 비슷한 반면 69 모선 시스템에서는 루프 기반의 유전자 알고리즘이 보다 좋은 결과를 얻는다. 이것은 아크 기반의 유전자 알고리즘이 계통의 크기가 커짐에 따라 비가능해를 더욱 많이 생성하기 때문에 탐색의 효율성이 떨어지는 반면에 본 논문에서 제안한 루프 기반의 유전자 알고리즘은 비교적 적은 비가능해와 이를 복구하는 복구함수를 통해 계통의 크기가 커지더라도 탐색 효율 면에서 상대적으로 영향을 작게 받는다.

제안한 루프 기반의 유전자 알고리즘은 효율성 입증을 위해 아크 기반의 유전자 알고리즘 뿐만 아니라 분기교환법, 시뮬레이티드 어닐링, 유전자 알고리즘, 휴리스틱 기법과의 비교를 표 3과 표 4에 나타내었다.

표 3과 4에서 알 수 있듯이 분기교환법은 최적해를 찾지 못한 반면 휴리스틱 기법, 시뮬레이티드 어닐링, 아크 기반의 유전자 알고리즘은 동일한 최적해를 찾았다. 본 논문에서 제안한 루프 기반의 유전자 알고리즘도 동일한 최적해를 찾았으며, 사례 연구를 통해 시스템의 크기가 커짐에 따라 수렴 특성과 계산

속도가 향상되었기 때문에 실제 배전 계통에서도 충분히 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

표 3. 32 모선 시스템에서의 비교
Table 3. The comparison in 32 bus system

탐색 방법	(시작모선, 끝모선)	손실 [kw]
분기교환법 (방법 1) [3]	(7-20),(8-14),(10-11), (27-28), (30-31)	133.1
분기교환법 (2,3) [3]	(5-6),(8-14),(10-11), (24-28), (30-31)	138.2
휴리스틱 기법 [4]	(6-7),(8-9),(13-14), (24-28),(31-32)	127.4
SA [7]	동상	127.4
GA [9]	동상	127.4
제안한 방법	동상	127.4

표 4. 69 모선 시스템에서의 비교
Table 4. The comparison in 69 bus system

탐색 방법	(시작모선, 끝모선)	손실 [kW]
휴리스틱 기법 [4]	(10-17),(12-20),(13-14), (47-48),(50-51)	90.7
SA [7]	동상	90.7
GA [9]	동상	90.7
제안한 방법	동상	90.7

6. 결 론

본 논문에서는 배전 계통에서 여러 가지 제약조건을 만족하면서 최소 손실 구성을 찾는 문제에 루프 기반의 유전자 알고리즘을 적용하였다. 전역적인 탐색 능력이 뛰어난 유전자 알고리즘이 아크를 기반으로 하여 배전 계통 재구성 문제에 적용되었지만 비가능해가 많이 발생하여 탐색의 효율성이 떨어졌다. 본 논문에서는 루프를 기반으로 스트링을 구성하여 가능해가 될 확률을 높였고 비가능해를 가능해로 쉽게 전환할 수 있는 복구함수를 적용해 기존의 유전자 알고리즘에서 갖고 있던 단점을 극복하였다. 본 논문에서 제안한 루프 기반의 유전자 알고리즘은 32, 69 모선 시스템에서 기존의 아크 기반의 유전자 알

배전 계통의 손실 최소화를 위한 루프 기반의 유전자 알고리즘의 적용

고리즘과 비교하여 좋은 결과를 보임으로써 실제 크기의 배전 계통에 충분히 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 "AI 기법을 이용한 배전 계통의 최적 라우팅 기법 개발"에 따른 연구비(97-중-05)로 수행되었음.

참 고 문 헌

(1) D. Shirmohammadi, H. W. Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive losses reduction," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1402-1498, April 1989.

(2) S. Civanlar, J. J. Grainger, and S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 3, pp. 1217-1223, July 1988.

(3) M. E. Baran, F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, April 1989.

(4) 최남진, 김병섭, 신중린, "휴리스틱 탐색전략을 이용한 배전계통 계획의 급전선 최적 경로 선정", 대한 전기학회논문지, 제 49권, 11A호, pp. 566-574, 2000. 11.

(5) H. D. Chiang and R. M. Jean-Jumeau, "Optimal network reconfiguration distribution system: Part 1: A new formulation and a solution methodology," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 4, pp. 1902-1909, November 1990.

(6) H. D. Chiang and R. M. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfigurations in Distribution System: Part 2: A Solution Algorithm and Numerical Results", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 3, pp. 1568-1574, July 1990.

(7) 전영재, 최승규, 김재철, "배전 계통의 손실 최소 재구성을 위한 시뮬레이티드 어닐링의 구현", 대한 전기학회논문지, 제 48권, 4A호, pp.371-378, 1999. 4.

(8) K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, and T. Tshihara, "Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum reconfiguration", IEEE Transactions on Power System, vol. 7, no. 3, pp. 1044-1051, August 1992.

(9) 안진오, 김세호, "유전 알고리즘과 Kruskal 알고리즘을 이용한 배전계통 재구성에 관한 연구", 대한 전기학회 논문지, 제 49권 3A호, pp. 118-123, 2000. 3.

(10) Koichi Nara, "State of the Arts of the Modern Heuristics Application to Power Systems," IEEE PES Winter Meeting, Singapore, January 2000.

(11) David E. Goldberg, Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC., 1989.

(12) Zbigniew Michalewicz, Genetic Algorithms+Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, 1995.

(13) M. E. Baran and F. F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution system", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 735-743, January 1989.

◇ 저자소개 ◇

전 영 재 (田永在)

1972년 6월 30일생. 1995년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1997년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 박사과정 수료.

김 재 철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대 전기공학과 교수.

최 준 호 (崔峻豪)

1970년 7월 30일생. 1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1998년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 박사과정 수료.