

배전계통에서 손실 최소화를 위한 유전자 알고리즘의 적용

전영재\*, 김훈\*, 이승윤\*\*, 손학식\*\*\*, 박성옥\*, 김재철\*  
 \* 숭실대 전기공학과 \*\* 한국전력 \*\*\* 에너지관리공단

Application of Genetic Algorithm for Loss Minimization in Distribution Systems

Young-Jae Jeon\*, Hoon Kim\*, Seung-Youn Lee\*\*, Hag-Sig Son\*\*\*, Soung-Ok Park\*, Jae-Chul Kim\*  
 \* Dept. of Electrical Engineering in Soongsil Uni. \*\* KEPCO \*\*\* KEMCO

**Abstract** - This paper presents a efficient algorithm for loss reduction of distribution system by automatic sectionalizing switch operation in distribution systems of radial type. To apply genetic algorithm to reconfiguration of distribution system, in this paper we propose the string type and efficient reconfiguration procedure. We also discuss the more elaborate search techniques of solution space as well as the simple genetic algorithm. The experimental results show that the proposed genetic algorithm have the ability to search a good solution.

1. 서 론

배전 계통이 방사상 형태로 운전이 되기 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[2,3]. 조합적인 최적화 문제에 좋은 해를 제공해주는 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)이 배전 계통 재구성 문제에 적용되었고[4-6], 전역적인 최적화 기법인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)이 배전 계통 재구성 문제에 적용되었[7,8].

배전 계통 재구성 문제에 분지한계법, 분기교환법, 유전자 알고리즘, 시뮬레이티드 어닐링, 타부 탐색 등의 최적화 기법을 이용하여 많은 연구가 진행되어 왔지만 각 기법들의 한계 때문에 적용에 어려움이 있다. 분지한계법과 분기교환법은 작은 크기의 배전 계통에서는 빠른 시간 내에 해를 구할 수 있지만 크기가 커질 경우 대부분 전역 최소해를 찾지 못한다. 유전자 알고리즘은 대체적으로 좋은 해를 찾아주지만 국소탐색 능력이 떨어지고, 시뮬레이티드 어닐링은 전역 최소해를 찾을 수 있는 가장 좋은 알고리즘이지만 상대적으로 많은 계산 시간이 필요하다. 타부 탐색은 기본적으로 기울기가 감소하는 방향으로 탐색을 하기 때문에 적은 계산 시간으로 좋은 해를 얻을 수 있지만 전역 최소해를 보장하는 근거가 부족하다.

유전자 알고리즘은 많은 전역탐색 능력이 뛰어난 최적화 알고리즘으로 알려져 있고 배전계통 재구성 문제에도 적용이 되었다[7,8]. 참고문헌 [7,8]에서 적용한 유전자 알고리즘은 아크와 개폐기를 스트링으로 표현하여 유전자 연산을 하기 때문에 교배나 돌연변이 연산에서 제약조건을 위반하는 경우가 많다. 따라서 본 논문에서는

제약조건 위반을 상당히 줄일 수 있는 루프 기반 스트링 구조를 제안했으며, 제약조건을 위반한 해를 가능해로 복구하는 복구 알고리즘을 사용하여 보다 효율적인 탐색이 가능하도록 하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 32모선 예제 시스템에서 테스트하여 효율성을 입증하였다.

2. 목적함수와 조류계산

배전 계통 재구성 문제는 운전상의 제약조건을 만족 하면서 전력 손실이 최소인 구성을 찾는 문제이다. 그림 1과 같은 배전 계통에서 전력 손실을 빠르게 구하기 위해서는 근사적인 조류 계산이 필요한데 본 논문에서는 Baran과 Wu가 제안한 방법을 사용했다[3]. 본 논문에서는 이들이 제안한 두 가지 조류계산법 중에서 *simplified Distflow equation*을 사용하였고 수식은 다음과 같다.

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

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

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

여기서,  $P_i, Q_i$ 는  $i$  모선의 유효전력과 무효전력,  $P_{L-1}, Q_{L-1}$ 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.

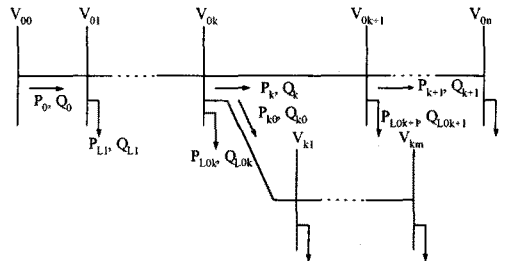


그림 1. 분기선이 있는 배전 계통

그림 1에서처럼 분기선이 있을 경우 다음의 경계 조건이 만족되어야 한다.

1. 변전소에서, 전압크기  $|V_0|$ 은 주어진다.

2. 메인 간선의 종단에서

$$P_{0n} = 0 \quad (4)$$

$$Q_{0n} = 0 \quad (5)$$

3. 분기선  $k$ 의 끝에서;

$$P_{km} = 0 \quad (6)$$

$$Q_{km} = 0 \quad (7)$$

여기서  $n$ 과  $m$ 은 각각 메인 간선과 지선  $k$ 의 모선수이다.

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.

$$P_{loss}^{total} = \min \sum_{i=1}^n r_i (P_i^2 + Q_i^2) \quad (8)$$

여기서  $l$ 은 전체 라인 숫자이다.

조류 계산 이전에 위반 여부를 알 수 있는 제약 조건과 조류 계산 이후에 알 수 있는 제약 조건이 있기 때문에 "Before" 제약조건과 "After" 제약조건으로 나누었으며 "Before" 제약조건은 해 생성과정에서 만족하게 하였으며 "After" 제약조건은 목적함수에 포함시켰다. 본 논문에서 "Before"와 "After" 제약조건은 다음과 같이 나누었다.

- "Before" 제약조건 ( $C_0$ ): 방사상 구조, 전력 공급
- "After" 제약조건 ( $C_1$ ): 라인 용량, 전압 강하

탐색 과정에서 가능해의 집합은 다음과 같다.

$$X = \{x | C_0 \text{의 모든 제약조건을 만족하는 } x\} \quad (9)$$

이 때 식 (8)을 확장하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{maximize } \frac{1}{(P_{loss}^{total} + \alpha A(x) + \beta B(x))}, \quad x \in X \quad (10)$$

여기서,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 페널티 상수이고  $A(x)$ ,  $B(x)$ 는  $C_1$ 에서 제약조건을 위반하는 집합이다.

### 3. 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 생물진화의 원리로부터 착안된 알고리즘으로서 확률적 탐색이나 학습 및 최적화를 위한 기법이다.

고전적인 최적화 기법이나 시뮬레이티드 어닐링, 타부 탐색이 이웃해 탐색기법으로 하나의 해를 운용하는데 반해 유전자 알고리즘은 복수 개의 잠재해들로 이루어진 해의 집단을 운용한다. 이러한 해집단에 자연선택과 유전 법칙의 메카니즘을 적용하여 세대를 진행시키면서 해 공간을 탐색해 간다. 유전자 알고리즘은 좋은 해의 이용 능력과 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.

유전자 알고리즘은 그 개념과 이론이 단순하고, 해의 탐색 성능이 우수하여 여러 분야의 최적화 문제에 적용 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.

### 4. 유전자 알고리즘의 적용

배전계통 재구성 문제는 앞서 언급한 것처럼 그래프 이론에서 최소걸침나무 (minimum spanning tree)를 구하는 것과 같다. 다른 분야에서도 걸침나무 형태의 문제가 많고 유전자 알고리즘도 많이 적용되어 왔다. 통신

과 산업공학 등에서 적용되는 많은 문제들은 각 노드들의 연결도가 높아 유전자 알고리즘의 교배와 돌연변이 연산에 문제가 없지만 본 논문에서 적용할려는 배전계통 재구성 문제는 초기 구성에서 연계 개폐기만 연결할 수 있기 때문에 연결도가 매우 낮은 걸침나무 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 위해 문제의 특성을 고려한 스트링 구조가 필요하다. 배전계통의 특성과 기존 논문에서 사용된 스트링 구조를 설명하기 위해 그림 2의 32모선[3] 예제 시스템을 사용할 것이다.

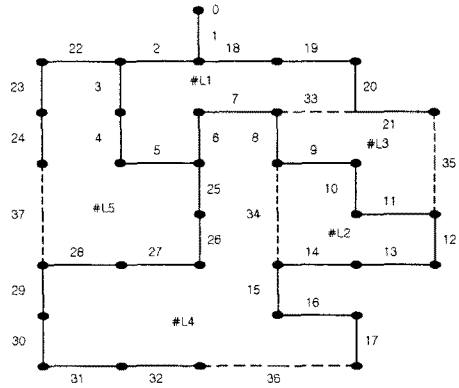


그림 2. 32모선의 초기구성

그림 2에서 실선 위에 구분 개폐기가 있고 점선 위에 연계 개폐기가 있다고 가정한다. 기존 논문에서는 "아크"의 개념을 사용한다. "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 아크와 개폐기가 각각 4비트를 사용하는데 00000011은 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.

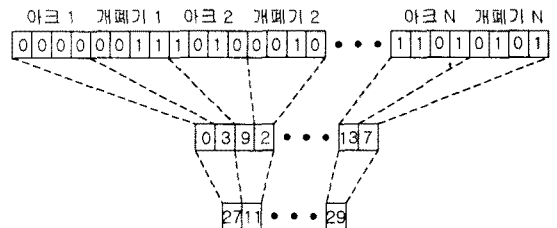


그림 3. 스트링 구조

그림 3과 같은 스트링 구조는 연계 개폐기 위치를 이진으로 표현해 전통적인 유전자 알고리즘의 스트링 구조를 따르지만 배전계통의 특성과는 맞지 않다. 초기해를 생성하기도 쉽지 않고 교배와 돌연변이 연산시 너무 많은 제약조건 위반이 일어난다. 특히 전력공급 제약조건을 위반하는 경우가 많아 개체집단에서 제약조건을 위반하지 않는 가능해를 생성하기가 어렵다. 가능해를 생성이 어려워짐에 따라 해 공간에서 탐색할 수 있는 영역이

적어져 유전자 알고리즘의 장점인 전역적인 탐색이 이루어지지 못하게 된다. 따라서 본 논문에서는 배전 계통의 특성을 살려 제약조건 위반이 적은 루프를 기반으로 스트링 구조를 제안했으며, 비가능해를 가능해로 변환해주는 복구 알고리즘을 사용했다.

본 논문에서 제안한 스트링 구조를 루프를 기반으로 이루어지고 이진수를 이용하지 않고 십진수를 이용한다. 그림 2에서 보는 것처럼 5개의 연계 개폐기가 있어 5개의 루프를 생각할 수 있다. 배전 계통은 방사상으로 운전이 되기 때문에 루프에서 하나의 연계 개폐기를 연다면 기본적으로 방사상이 되기 때문에 상당히 많은 초기해가 가능해로 된다. 개폐기 3, 4, 5 같이 다른 루프와 중복이 되어 있는 경우 각 루프에서 하나씩 선택할 때 개폐기 3, 4, 5 중에서 두 개를 선택한다면 고립이 생겨 전력공급 제약조건을 위반한다. 또한 개폐기 5, 6, 25가 선택되거나 5, 25, 9, 33이 선택된다면 한 개 이상의 모선이 고립이 되지만 이러한 경우는 양방향 연결 리스트로 시스템 구성을 인지하고 있으므로 쉽게 제약조건 위반을 찾아낼 수 있다.

제약조건 위반을 루프 기반의 스트링 구조로 상당히 줄였지만 여전히 비가능해가 발생한다. 대다수의 유전자 알고리즘에서 비가능해를 버리거나 무거운 페널티를 부과해 해의 선택에서 배제하지만 본 논문에서는 복구 알고리즘을 사용하여 비가능해를 가능해로 바꾼다. 십진수를 사용하고 스트링의 수가 루프의 수와 같기 때문에 비가능해도 약간의 수정에 의해 가능해로 바꿀 수 있다.

기존의 스트링 구조는 이진수이기 때문에 배전 계통의 특성에 맞지 않으며 십진수로 바꾸는 시간이 별도로 들어간다. 또한 비가능해를 가능해로 만드는 것도 불가능하다. 반면에 본 논문에서 제안한 스트링 구조는 앞서 설명한 단점을 모두 보완하여 유전자 알고리즘의 전역 탐색 능력을 살리면서 보다 빠른 탐색을 하게 한다.

## 5. 사례연구

참고문헌 [3]에 있는 32모선 예제 모델은 5개의 연계 개폐기, 32개의 모선을 가지고 있으며 기준전압은 12.66[kV]이고 초기 구성에서의 전체 부하는 3715[kW], 2300[kVAR]이다. 제안한 알고리즘을 수행해서 얻은 최적 구성은 다음과 같다.

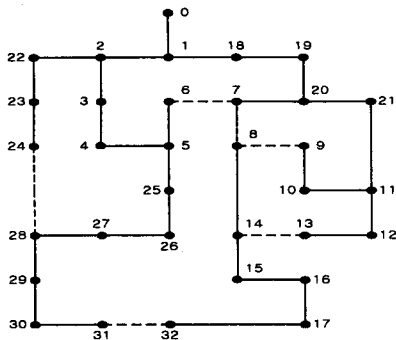


그림 4. 32모선의 최적 구성

초기 구성에서 (7, 20), (8, 14), (11, 21), (17, 32), (24, 28) 사이의 개폐기를 열어 계통을 구성했으며, 이때의 손실은 186.037[kW]이고 모선의 최소 전압은 0.915934[pu]이다. 제안한 알고리즘을 통해 그림 4과 같은 최적 구성을 얻었다. 이때의 손실은 131.852[kW]이고 모선의 최소 전압은 0.9392[pu]이다. 알고리즘 수행 후 손실은 54.185[kW] 감소하여 29.1[%]의 손실 감소가 있었고, 최소 전압은

0.0232[pu]가 증가해 2.48[%]의 전압 상승이 있었다.

유전자 알고리즘 수행에서 개체수와 세대수는 50개와 20개로 하였고 교배율과 돌연변이율은 각각 0.8과 0.2로 하였다. 페널티 상수 A와 B는 모두 50.0으로 하여 시뮬레이션 했고 참고문헌 [7]의 방법과 본 논문에서 제안한 방법 모두 같은 해를 얻었다. 계산 시간은 본 논문이 Intel Pentium II 350Mhz에서 0.492초 걸렸고 참고문헌 [7]의 방법이 0.61초 걸려서 제안한 유전자 알고리즘이 배전 계통 재구성 문제에 상당히 효율적이라는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 배전 계통에서 여러 가지 제약조건을 만족하면서 최소 손실 구성을 찾는 문제에 유전자 알고리즘을 적용하였다. 아크와 개폐기를 스트링으로 표현하여 연산하는 유전자 알고리즘이 교배와 돌연변이 연산 과정에서 제약조건을 위반하는 경우가 많아 배전 계통 재구성 문제에 적합하지 못하다. 본 논문에서는 제약조건 위반을 줄일 수 있는 루프 기반 스트링을 사용하였고, 비가능해를 가능해로 변환시키는 복구 알고리즘을 제안했다. 따라서 제안한 알고리즘은 계산시간과 수렴성을 높일 수 있었고, 32 모선 예제 시스템에 적용해서 좋은 결과를 얻어 실제 크기의 배전 계통에 충분히 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 기초전력공학공동 연구소의 "AI 기법을 이용한 배전 계통의 최적 라우팅 기법 개발"에 따른 연구비로 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] 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.
- [5] 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.
- [6] 전영재, 최승규, 김재철, "배전 계통의 손실 최소 재구성을 위한 시뮬레이티드 어닐링의 구현", 대한 전기학회논문지, 제 48권, 4A호, pp.371-378, 1999. 4.
- [7] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, and T. Tshihara, "Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum re-configuration," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 7, no. 3, pp. 1044-1051, August 1992.
- [8] 안진오, 김세호, "유전 알고리즘과 Kruskal 알고리즘을 이용한 배전계통 재구성에 관한 연구", 대한 전기학회논문지, 제 49권 3A호, pp. 118-123, 2000. 3.