

개미 군집 알고리즘을 이용한 배전계통 재구성

전영재\*, 김재철, 김낙경, 최병수  
 숭실대학교

Reconfiguration of Distribution System using ant colony algorithm

Young-Jae Jeon, Jae-Chul Kim, Nak-Kyoung Kim, Byoung-Su Choi  
 Soongsil University

**Abstract** - This paper presents an efficient algorithm for the loss minimization in distribution systems. Ant colony algorithm is suitable for combinatorial optimization problem as network reconfiguration because it use the long term memory, called pheromone, and heuristic information with the property of the problem. The proposed methodology with some adoptions have been applied to improve the computation time and convergence property. Numerical examples demonstrate the validity and effectiveness of the proposed methodology using 32-bus system.

1. 서 론

배전 계통은 방사상 형태로 운전이 되기 때문에 배전 계통 재구성 문제는 개념적으로 최소 걸침 나무 (minimum spanning tree)를 찾는 문제로 볼 수 있으며, 이를 기반으로 다양한 알고리즘이 적용되었다 [1-6]. 배전 계통 재구성 문제에 분기교환법, 분지교환법, 유전자 알고리즘, 시뮬레이티드 어닐링, 타부 탐색 등의 최적화 기법을 이용하여 많은 연구가 진행되어 왔지만 각 기법들이 뚜렷한 장단점을 가지고 있어 적용에 한계가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 전역적인 탐색능력이 우수한 개미 군집 알고리즘을 적용하였다. 또한 연계 개폐기와 구분 개폐기의 on/off 동작으로 구성이 바뀌는 배전 계통 재구성 문제에 적합한 해 생성 기법과 페로몬 갱신 기법을 제안하였으며, 분기교환법을 통해 얻은 손실 변화량을 휴리스틱 정보로 사용하여 분기교환법의 국소 탐색 능력과 개미 군집 알고리즘의 전역 탐색 능력의 균형있는 결합으로 탐색의 효율을 증대시켰다. 본 논문에서 제안한 개미 군집 알고리즘을 32 모선 예제 계통에 적용하여 알고리즘의 효용성을 입증하였다.

2. 개미 군집 알고리즘

개미 군집 알고리즘은 유전자 알고리즘이나 시뮬레이티드 어닐링처럼 자연 현상에서 영감을 얻어 발전시킨 최적화 알고리즘이다. 실제 개미들이 시작적인 정보 없이 서로 정보를 교환하여 둥지(nest)로부터 음식(food)이 있는 곳까지 가장 짧은 길을 찾아내는 현상이 곤충학자들로부터 관찰되었으며, 이러한 현상은 실험실에서의 실험으로 입증되었다. 개미가 둥지에서부터 음식까지의 가장 짧은 길을 찾을 수 있는 것은 페로몬(pheromone) 정보를 이용하기 때문인데 앞선 개미가 페로몬을 땅에 떨어뜨리면 나중에 오는 다른 개미가 이전에 흘린 페로몬에 따라 확률적으로 선택을 하게 된다. 개미가 페로몬을 이용하여 확률적으로 두 지점 사이의 가장 짧은 길을 찾는 방법이 그림 1에 나와있다.

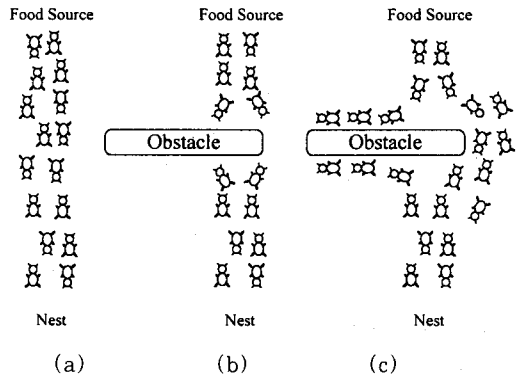


그림 1. 실제 개미의 예

그림 1(a)처럼 개미는 처음에 둥지와 음식이 사이를 오가며 음식을 운반한다. 중간에 장애물이 그림 1(b)처럼 생겼을 때 개미들은 좋은 선택에 대한 단서가 없기 때문에 랜덤하게 선택한다. 평균적으로 개미의 반은 왼쪽으로 반은 오른쪽으로 갈 것이다. 그림 1(c)는 개미가 똑같은 속도로 걷는다는 가정 하에 왼쪽 길보다 오른쪽 길이 짧기 때문에 개미들이 땅에 흘리는 페로몬의 양이 시간이 흐를수록 상대적으로 많이 축적되며, 이후에 개미들은 오른쪽 길에 페로몬이 많기 때문에 확률적으로 오른쪽 길을 선호할 것이다. 따라서 반복할수록 짧은 오른쪽 길을 선택하는 개미들이 증가할 것이고, 상당한 시간이 흐른 후 모든 개미들은 오른쪽 길을 이용할 것이다.

이렇게 탐색 과정에서 얻은 정보를 페로몬을 통하여 변화시킬 뿐만 아니라 적용하는 문제와 관련된 휴리스틱 정보와 결합하여 확률적인 탐색을 수행한다[7,8]. 개미 군집 알고리즘은 비교적 최근에 제안된 알고리즘이지만 전력계통 분야를 비롯하여 많은 최적화 문제에 성공적으로 적용되어 적용의 범위를 넓히면서 다양한 기법이 새롭게 제안되고 있다[8,9].

3. 개미 군집 알고리즘의 적용

개미 군집 알고리즘은 크게 페로몬을 조절하는 부분과 페로몬과 휴리스틱 정보를 이용하여 선택 확률을 결정하는 부분으로 나눌 수 있다. 이 논문에서 m개의 개미들은 초기 구성에서 시작하여 확률적인 선택 규칙을 반복적으로 적용하여 새로운 해를 만들고, 국소 갱신 규칙(local updating rule)과 전역 갱신 규칙(global updating rule)을 이용하여 페로몬 양을 조절한다. 이와 관련한 해 생성 기법, 국소 갱신 규칙, 전역 갱신 규칙이 효율적인 탐색을 위해 다음처럼 사용된다.

3.1 개미 군집 알고리즘에서의 해 생성 기법

본 논문에서는 국소 탐색과 전역 탐색의 균형을 위해 분기교환법을 통해 얻은 손실 변화량을 개미 군집 알고리즘의 휴리스틱 정보로 사용하였으며, 개폐기 선택시 전역 최적해 방향으로 탐색할 수 있도록 휴리스틱 정보와 탐색 과정에서 얻은 정보를 결합하여 개폐기를 선택할 수 있도록 하였다.

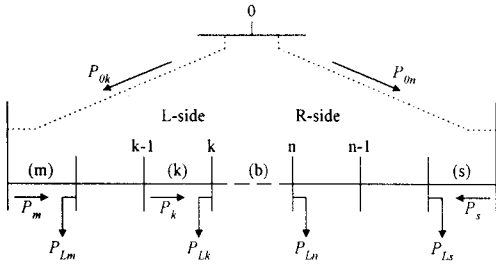


그림 2. 연계 선로 b를 갖는 루프 계통

그림 2에서 연계 선로 b에 연결된 모선 k와 모선 n 중에서 모선 k의 전압이 낮다고 가정하고, 전압이 낮은 쪽을 L로 전압이 높은 쪽을 R로 표시한다. 연계 개폐기 b와 L쪽에 있는 구분 개폐기 m과의 교환과 R쪽에 있는 구분 개폐기 s와의 교환으로 변하는 손실량은 다음 식 (1)과 (2)로 얻을 수 있다[2].

$$\Delta LP_{bm} = 2P_m \left( \sum_{i \in L} r_i P_i - \sum_{i \in R} r_i P_i \right) + 2Q_m \left( \sum_{i \in L} r_i Q_i - \sum_{i \in R} r_i Q_i \right) - (P_m^2 + Q_m^2) \sum_{i \in R \cup L} r_i \quad (1)$$

$$\Delta LP_{bs} = 2P_s \left( \sum_{i \in R} r_i P_i - \sum_{i \in L} r_i P_i \right) + 2Q_s \left( \sum_{i \in R} r_i Q_i - \sum_{i \in L} r_i Q_i \right) - (P_s^2 + Q_s^2) \sum_{i \in R \cup L} r_i \quad (2)$$

L쪽이 전압이 낮다는 것은 R쪽보다 손실이 많다는 것을 의미하며 L쪽의 부하를 R쪽으로 절체할 경우 얼마간의 손실 감소가 이루어질 것으로 예상할 수 있다. 반대로 전압이 높은 R쪽의 부하를 L쪽으로 절체하면 손실 증가를 예상할 수 있다. 따라서 분기교환법에서는 연계 선로로 연결된 두 모선의 전압을 이용하여 전압이 높은 R쪽의 개폐기들은 후보에서 제외시키고 부하 절체는 L쪽에서만 이루어진다. 그러나, 때때로 R쪽 개폐기와의 교환에서 손실 감소가 이루어지기 때문에 보다 좋은 해를 위해서는 R쪽 개폐기와의 교환을 고려할 필요가 있다. 본 논문에서는 L쪽의 개폐기만 고려한 참고문헌 [2]에서의 식 (1)을 R쪽 개폐기와의 교환을 통한 손실 변화량을 계산할 수 있도록 식 (2)로 수정하여 사용하였다.

루프 내의 모든 개폐기를 고려하면서 개미 군집 알고리즘의 기본 개념에 부합되는 해 선택을 하기 위해 본 논문에서는 개폐기 교환을 통한 손실 변화량을 개미 군집 알고리즘의 휴리스틱 정보로 사용하여 루프에서 손실 변화량과 페로몬에 따라 확률적으로 선택할 수 있도록 하였다. 식 (1)과 (2)에서 얻은 휴리스틱 정보는 페로몬과 결합하여 오픈할 개폐기 t의 선택 확률을 다음과 같이 결정한다.

$$p_{k(t)} = \begin{cases} \frac{[\eta(t)]^\beta / [\tau(t)]}{\sum_{s \in J_k(t)} [\eta(s)]^\beta / [\tau(s)]} & \text{if } s \in J_k(t) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서,  $\tau$ 는 페로몬이고  $\eta$ 는 1/손실변화량(음이 되는 손실 변화량을 가질 경우 모든 변화량이 양수가 되도록 정규화)이다. k는 개미 번호를 나타내고  $J_k(t)$ 은 루프 l에서 연계 개폐기를 제외하고 루프를 구성하는 구분

개폐기의 집합이다.  $\beta$ 는 손실 변화량과 페로몬의 상대적 영향을 결정하는 파라미터이다.

기본적으로 식 (3)를 통해 얻은 확률을 기반으로 유전자 알고리즘에서 사용하는 톨렛 휠 방식을 이용해 개폐기를 선택한다. 대체로 손실 감소가 크거나 좋은 해가 될 가능성이 큰 개폐기가 선택되기도 하지만 그렇지 않은 개폐기들도 확률에 따라 선택이 된다. 이러한 선택은 탐색 초기에 다양한 방향으로 탐색할 수 있게 하여 지역 최소해에 빠지는 것을 막아주지만 손실 감소가 크면서 좋은 해를 얻을 가능성이 큰 개폐기를 포기하는 것도 바람직하지 않다. 또한 개미 군집 알고리즘은 유전자 알고리즘처럼 여러 개체가 탐색을 하기 때문에 모든 개미가 확률적으로 탐색할 필요는 없다. 따라서, 본 논문에서는 식 (6)을 통해 두 가지 방법으로 구분 개폐기를 선택한다.

$$\text{개폐기 선택} = \begin{cases} \max \{ [\eta(t)]^\beta / [\tau(t)] \} & \text{if } \gamma \leq \gamma_0 \\ \text{식 (3)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $\gamma$ 는 0과 1 사이의 랜덤 값이고  $\gamma_0$ 은 가장 좋은 개폐기를 선택할 것인지 확률에 의해 선택할 것인지를 결정하는 파라미터이다.

식 (4)에 의해 생성되는 해는 연계 개폐기를 닫은 후 생긴 루프에서 구분 개폐기를 열기 때문에 기본적으로 방사상과 전력공급 제약조건을 만족한다. 전압강하 제약 조건은 말단에서 조사하고 선로 용량은 말단에서부터 역압까지 가장 선로용량이 작은 구간에서 조사하여 제약 조건을 위반했을 경우 이 해를 버리고 식 (4)를 다시 수행하여 새로운 해를 생성한다.

### 3.2 페로몬의 갱신

#### 1) 페로몬의 전역 갱신

개미 군집 알고리즘에서 페로몬을 부여하고 갱신할 수 있다는 것은 그것이 해의 일부분이라는 것을 의미한다. 배전 계통 재구성 문제에서는 개폐기만이 해의 일부가 될 수 있기 때문에 개폐기에 페로몬을 부여하고 갱신한다. 해를 구성하는 개폐기들의 페로몬을 갱신할 때 연계 개폐기 집합과 구분 개폐기 집합 중에서 하나를 선택해야 한다. 본 논문에서는 구분 개폐기에 페로몬을 부여하고 갱신하는 쪽을 선택했다.

페로몬 갱신은 모든 개미가 앞서 설명한 선택 규칙에 의해 해를 생성한 후 전체적으로 가장 좋은 개미(즉, 가장 손실이 작은 구성을 찾은)만이 페로몬을 갱신할 수 있게 하였으며, 이것을 본 논문에서는 전역 갱신이라고 하고 식 (5)에 의해 수행한다.

$$\tau(s) = (1 - \alpha) \cdot \tau(s) + \alpha \cdot \Delta \tau(s) \quad (5)$$

여기서,  $\Delta \tau(s) = \begin{cases} 1/f_k(x) & \text{if } s \in S \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ ,  $0 < \alpha < 1$ 이 페로몬 감소 파라미터,  $f_k(x)$ 는 k번째 개미의 전체 손실, S는 손실이 가장 작은 해를 구성하는 구분 개폐기의 집합이다.

전역 갱신을 통해 매 반복마다 가장 우수한 해를 구성하는 구분 개폐기들은 페로몬이 증가되어 다음 선택에서 다시 해에 포함될 가능성이 높아진다. 전역 갱신의 반복을 통해 페로몬은 좋은 해의 일부를 계속 기억하고 누적함으로써 해의 우수한 특성을 이용하여 다수의 개미가 전역 최적해를 향해 탐색을 진행한다.

#### 2) 페로몬의 국소 갱신

효율적인 탐색으로 전역 최적해를 찾기 위해서는 전역

최적해 부근을 집중적으로 탐색하는 강화와 이전에 탐색하지 않았던 부분을 탐색하는 다양성이 필요하다. 식 (5)을 통한 강화와 탐색의 균형을 맞추기 위하여 다음의 국소 갱신을 적용한다.

$$\tau(s) = (1 - \rho) \cdot \tau(s) + \rho \cdot \tau_0(s) \quad (6)$$

여기서,  $0 < \rho < 1$ 이고,  $\tau_0(s)$ 은 초기구성의 전체 손실에 0.1을 곱하여 얻은 값이다.

다양성을 위해 수행되는 국소 갱신은 첫 번째 개미가 해를 생성하면 그 해를 구성하는 구분 개폐기의 페로몬을 감소시켜 다음 개미는 확률적으로 다른 개폐기를 선택하게 만드는 것이다. 모든 개미가 해를 생성할 때까지 국소 갱신이 계속되고, 나중에 해를 선택하는 개미는 앞서 해를 생성한 개미들과는 다른 해를 생성함으로써 탐색하지 않았던 지역을 탐색한다. 탐색 과정에서 전역 최적해의 일부분에 속할 개폐기들은 당연히 많이 선택되어 페로몬이 감소할 것이지만 전역 갱신에 의해 다시 페로몬이 증가해 계속적으로 선택이 될 것이고, 그렇지 못한 개폐기들은 어떠한 이유에서 많이 선택되었다도 결국 국소 갱신에 의해 페로몬이 감소되어 다음 반복에서는 이전보다 적게 선택될 것이다.

#### 4. 사례연구

제한한 알고리즘은 C언어로 프로그램 했으며 배전 계통의 방사상 구조를 표현하기 위해 자료구조에서 사용되는 양방향 연결 리스트(double linked list) 기법을 사용했다. 시뮬레이션은 Intel Pentium III 750MHz 프로세서를 사용한 컴퓨터 상에서 수행되었다. 이 장에서는 제한한 알고리즘의 효율성을 입증하기 위해 32모선 예제 계통에서 시뮬레이션을 하였다.

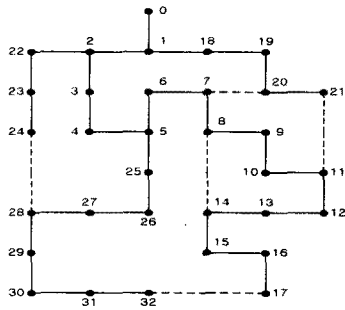


그림 3. 32모선 시스템의 초기 구성

그림 3의 32모선 예제 시스템은 5개의 연계 개폐기, 32개의 모선을 가지고 있으며 기준전압은 12.66(kV)이고 초기 구성에서의 전체 부하는 3715(kW), 2300(kVAR)이다. 33(7, 20), 34(8, 14), 35(11, 21), 36(17, 32), 37(24, 28) 선로에 있는 개폐기를 열어 계통을 구성했으며, 이때의 손실은 176.6(kW)이고 모선의 최소 전압은 0.92(pu)이다.

제한한 알고리즘은 개미  $m=3$ , 반복횟수  $n=30$ ,  $\alpha=0.1$ ,  $\rho=0.5$ ,  $\epsilon_0=0.7$ ,  $\beta=3.0$ 의 파라메타 값을 사용하여 최적 구성을 얻었으며, 이 계통 구성은 (6, 7), (8, 9), (13, 14), (24, 28), (31, 32) 선로에 있는 개폐기를 열어 구성했다. 이때의 손실은 127.4(kW)이고 모선의 최소 전압은 0.939(pu)이다. 알고리즘 수행 후 손실은 49(kW) 감소하여 28(%)의 손실 감소가 있었고, 최소 전압은 2.49(%)의 전압 상승이 있었다.

본 논문에서 제한한 알고리즘은 참고문헌 [4]와 계산

시간을 비교하였으며, 공정한 비교를 위해 10번 수행한 후 평균을 내었다. 알고리즘 수행 후 참고문헌 [4]의 시뮬레이터드 어닐링과 제한한 알고리즘은 각각 0.0213(sec), 0.0163(sec)로써 제안한 알고리즘이 빠른 시간 내에 동일한 최적해를 찾아내는 것을 알 수 있다.

계산 시간뿐만 아니라 알고리즘 수행이 끝난 후 연계 개폐기에 해당하는 개폐기의 페로몬 양이 다른 개폐기에 비해 상당히 적어 탐색과정에서 페로몬 갱신이 적절하게 이루어졌음을 알 수 있었고, 다른 참고문헌의 알고리즘과 같은 최적해를 얻어 배전계통 재구성 문제에 적합하다고 생각된다. 또한 개미군집 알고리즘이 병렬 탐색을 하기 때문에 배전계통의 크기가 커질수록 더 좋은 결과를 얻을 것이라고 기대된다.

#### 3. 결론

본 논문에서는 배전 계통에서 여러 가지 제약조건을 만족하면서 최소 손실 구성을 찾는 문제에 개미 군집 알고리즘을 적용하였다. 개미 군집 알고리즘은 실제 개미가 등지로부터 먹이까지의 가장 짧은 길을 서로 정보로 교환하여 찾는 현상에서 착안한 최적화 알고리즘으로서 다수의 개미가 탐색 과정에서 얻은 정보를 페로몬을 통해 갱신하여 좋은 해의 특성을 이용하면서 탐색을 한다. 기본적인 개미 군집 알고리즘을 기반으로 하여 배전계통의 특성에 적합한 휴리스틱 정보를 사용하고 적절한 페로몬 갱신 규칙을 적용하여 알고리즘의 수렴 특성과 수행 시간을 개선하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 32모선 시스템에서 시뮬레이션 하여 좋은 결과를 얻었으며, 병렬 탐색 능력을 지녀 실제 계통의 최적 재구성 문제에 충분히 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

#### (참고 문헌)

- [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] 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.
- [3] 최남진, 김병섭, 신종민, "휴리스틱 탐색전략을 이용한 배전계통 계획의 급전선 최적 경로 선정", 대한 전기학회논문지, 제 49권, 11A호, pp.566-574, 2000, 11.
- [4] 전영재, 최승규, 김재철, "배전 계통의 손실 최소 재구성을 위한 시뮬레이터드 어닐링의 구현", 대한 전기학회논문지, 제 48권, 4A호, pp.371-378, 1999, 4.
- [5] 안진오, 김세호, "유전 알고리즘과 Kruskal 알고리즘을 이용한 배전계통 재구성에 관한 연구", 대한 전기학회논문지, 제 49권 3A호, pp. 118-123, 2000, 3.
- [6] Y. Huang, H. Yang, and C. Huang, "Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using tabu search approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 1868-1873, November 1996.
- [7] A. Colorni, M. Dorigo, and V. Maniezzo, "Distributed optimization by ant colonies," *Proceedings of ECAL91 - European Conference on Artificial Life*, Paris, France, 1991, F. Varela and P. Bourguine(Eds.), Elsevier Publishing, pp. 134-142.
- [8] D. Corne, M. Dorigo, and F. Glover, *New Ideas in Optimization*, THE MCGRAW-HILL COMPANIES, London, 1999
- [9] Y. Song, *Modern Optimization Techniques in Power Systems*, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, London, 1999