

### 시물레이티드 어닐링을 이용한 배전계통 선로 재구성에 관한 연구

전영재\*, 최승규\*, 이승윤\*\*, 김재철\*  
\* 숭실대학교 전기공학과 \*\* 한국전력공사

### A Study on Distribution System Reconfiguration using Simulated Annealing

Youngjae Jeon\*, Seungkyoo Choi\*, Seungyoun Lee\*\*, Jaechul Kim\*  
\* Dept. of Electrical Engineering in Soongsil University \*\* KEPCO

**Abstract** - A distribution systems loss minimum reconfiguration method by simulated annealing is proposed. The problem is a complex mixed integer programming problem and is very difficult to solve by a mathematical programming approach. Simulated annealing generates feasible solutions randomly and moves among these solutions using a strategy leading to a global minimum with high probabilities. The solution algorithm has been implemented in developed software package and tested on 32-bus system.

본 논문에서는 방사상 배전계통에서 최소 손실 구성을 찾기 위해 국소탐색이 뛰어나고 제약조건에 따라 시스템 형태가 영향을 받지 않는 시물레이티드 어닐링 기법을 이용하였으며, 32-모선, 37-라인을 가진 시스템을 통하여 알고리즘의 효율성을 입증하였다.

### 2. 시물레이티드 어닐링

#### 2.1 시물레이티드 어닐링의 개념

시물레이티드 어닐링은 담금질 과정시 온도의 변화 추이에 따라 금속의 강도가 변해가는 과정과 탐색시 최소값을 찾는 과정상의 유사점을 이용한 탐색 기법이다. 시물레이티드 어닐링은 현재해에서 임의로 후보해를 생성해 이를 평가하여 현재까지의 가장 우수한 해보다 좋을 경우에는 이를 현재해로 설정하고 계속적으로 탐색을 해나간다. 그러나 후보해가 현재해보다 좋지 못할 경우에는 보통의 Hill-Climbing 탐색기법처럼 탐색을 임의적인 시작점에서 재시작하는 것이 아니라 이 후보해를 현재해로 설정해야될지 말아야 할지를 metropolis 기준으로 결정을 한다. 이 확률값은  $1/(1+(-\Delta E)/T)$ 으로 나타낼 수 있으며  $\Delta E$ 는 이전 해와 현재 해 사이의 오차이고 T는 현재상태의 온도이다. 이런 방법을 택함으로써 시물레이티드 어닐링은 Hill-Climbing 탐색기법에서 발생하는 국소 최적해를 피할 수가 있으며 간단한 예를 그림 1로써 나타내었다.

### 1. 서론

배전계통 재구성 문제는 배전 자동화에 있어 아주 중요한 문제이다. 선로 재구성은 구분 개폐기와 연계 개폐기의 열고 닫음에 의해 구성되고, 개폐의 여부를 결정해야 할 개폐기의 수가 많기 때문에 조합적인 이산 최적화 문제이다. 배전계통 재구성은 손실 감소와 부하 평형 등의 목적을 위해 이루어지며, 전압강하나 변압기 용량 등의 제약조건을 고려하면서 최적해를 찾아야 하기 때문에 수식적인 방법으로 이 문제를 풀기가 어렵다.

이러한 문제를 풀기 위해 손실이 최소가 되는 구성을 찾는 논문이 발표되어왔다. 'Branch and bound' 기법은 배전 계통에서 최소 손실 구성을 결정하기 위해 Merlinand Back[1]에 의해 사용되었다. 이 방법은 기본적으로 열거법의 일종으로서 최적해가 있을만한 부분을 두 개 이상으로 나누어 가능한 해 중에서 가장 좋은 해를 찾아나가는 방법이다. 모든 개폐기를 닫은 상태에서 시작하여 하나씩 열어가며 해를 찾기 때문에 대규모의 배전 계통에서는 적용하기 어렵다. 'Branch exchange' 기법은 방사상 배전계통이 걸침나무(spanning tree)에 해당한다는 것을 인식하고 루프를 만들고 해제할 수 있는 연계 개폐기와 구분 개폐기의 쌍을 계속 선택해가며 해를 찾는 방법이다. 이 기법을 위해 Civanlar, Grainger, Tin, Lee[2]와 Baran, Wu[3]이 효과적인 계산수식을 제안하였다. 근래들어 다양한 최적화 기법들이 이 문제에 적용이 되었는데 대표적인 방법이 시물레이티드 어닐링과 유전자 알고리즘이다. 시물레이티드 어닐링은 신경망의 일종으로서 제약조건이 있는 조합적인 최적화 문제에서 좋은 해를 제공해주며 Chuang, Rene[4][5]에 의해 사용되었다. 유전자 알고리즘은 적자 생존 및 유전 현상을 바탕으로 한 알고리즘으로서 전역적인 탐색으로 최적해를 찾으며 Nara, Asushi, Minoru[6]에 의해 사용되었다.

'Branch and bound' 기법은 대규모 계통에 적용하기 어렵고 'Branch exchange'는 주어진 시스템에서 시작을 하기 때문에 초기 시스템의 영향을 받아 지역해에 빠질 가능성이 많다. 유전자 알고리즘은 전역적인 탐색으로 최적해 근처까지는 쉽게 도달하지만 국소탐색 능력이 없기 때문에 최적해를 보장하기 어렵다.

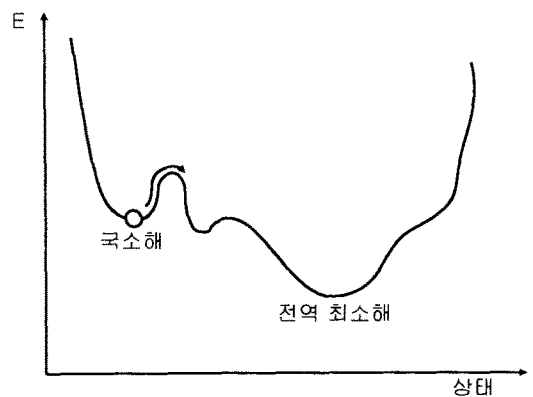


그림 1. 탐색공간에서의 해의 이동

시물레이티드 어닐링에 있어서 확률과 후보해의 생성은 온도라는 매개변수에 의해 결정되어 이를 효과적으로 변화시켜 주기 위한 어닐링 스케줄이 필요하다. Geman 형제는 볼츠만 분포(Boltzmann distribution)를 따를 경우  $T = k/(1 + \log(1 + t))$ 로 스케줄링 할 경우 반드시 전역 최적해에 수렴한다고 증명하였으나 현실적으로 무한대에 가까워 다른 적절한 스케줄링 기법들이 사용되고 있다.

## 2.1 시뮬레이티드 어닐링의 수행과정

시뮬레이티드 어닐링 기법은 Hill-Climbing 기법과는 달리 평형상태 도달 여부와 천이확률의 허용 여부를 결정하는 단계를 거쳐야 하며 전체적인 수행단계는 다음과 같다.

- 단계 1 - 초기치 설정  $x_0, T_0, x_{opt} = x_0$
- 단계 2 - 목적 함수  $f(x_i)$  계산.  
 $f(x_i) < f(x_{opt})$ 이면  $x_{opt} = x_i$
- 단계 3 -  $\Delta x_i$  결정
- 단계 4 -  $f(x_i + \Delta x_i)$  계산.  
 $\Delta f = f(x_i + \Delta x_i) - f(x_i)$  계산
- 단계 5 -  $\Delta f < 0$ 이면 단계 7로 간다.
- 단계 6 -  $1/(1 + \exp(-\Delta f/T)) < R$ 이면 단계 7로, 아니면 단계 3으로 간다.
- 단계 7 - 평형 상태에 도달하면 단계 8로, 아니면 단계 3으로 간다.
- 단계 8 - 온도를 내리고 카운트 증가
- 단계 9 - stop 조건을 만족하면 stop, 아니면 단계 2로 간다.

시뮬레이티드 수행에 있어 초기온도, 어닐링 속도, 온도 스케줄, 평형 상태 등을 적절하게 결정하는 것이 중요하다. 초기온도와 어닐링 속도에 따라 수행속도와 해가 달라지기 때문에 적절하게 결정해야 하며 온도 스케줄링은 보통 초기온도에 0.85-0.99 사이의 값을 곱해서 온도를 내려나간다. 평형 상태는 개념적으로 어떤 상태에서 더 이상 좋은 해를 얻을 수 없는 상태를 말하는데 일반적으로 충분한 반복으로 평형 상태에 도달할 수 있다.

## 3. 시뮬레이티드 어닐링을 적용한 손실 최소 구성

### 3.1 목적함수와 제약조건

손실 최소를 위한 배전계통 재구성 문제는 여러 가지 제약 조건들을 만족하면서 손실이 최소가 되도록 오픈되어야 할 개폐기의 위치를 결정하는 문제이다. 이때 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\min \sum_i r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (1)$$

$$\text{변압기용량 제약조건} : \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij} x_{ij} \leq b_s \quad (2)$$

$$\text{라인용량 제약조건} : I_{ij} \leq I_{ij}^{\max} \quad (3)$$

$$\text{전압강하 제약조건} : V_j \geq V_j^{\min} \quad (4)$$

$$\text{전력공급 제약조건} : x_{ij} \geq x_{i(j+1)} \quad (5)$$

여기서,  $x_{ij}$ 는 모선  $i$ 와  $j$ 사이의 연결 상태를 0, 1로 나타내고  $l_{ij}$ ,  $b_s$ 는 각각 부하량과 변압기 용량이다.

### 3.2 시뮬레이티드 어닐링의 적용

배전계통 재구성 문제에 시뮬레이티드 어닐링을 적용하는데 있어서 전체적인 수행과정은 비슷하나 초기해와 현재해 설정 부분에서 문제의 특성을 고려해야 한다. 다음은 배전계통 재구성 문제에 시뮬레이티드 어닐링을 적용한 수행과정이다.

- 단계 1 - 데이터 입력, 초기치 설정
- 단계 2 - 새로운 구성을 생성(연계개폐기 5개중 랜덤하게 선택해서 변경), 목적함수 계산  
 $f(x_i) < f(x_{opt})$ 이면  $x_{opt} = x_i$
- 단계 3 -  $\Delta x_i$  결정(연계 개폐기 하나를 랜덤하게 선택해서 상태를 변화시키고 구분 개폐기중 하나를 선택해서 변화)  
새로운  $\Delta x_i$ 가 제약조건을 위반하면 버리고 단계 7로 간다.
- 단계 4 -  $f(x_i + \Delta x_i)$  계산.  
 $\Delta f = f(x_i + \Delta x_i) - f(x_i)$  계산
- 단계 5 -  $\Delta f < 0$ 이면 단계 7로 간다.
- 단계 6 -  $1/(1 + \exp(-\Delta f/T)) < R$ 이면 단계 7로, 아니면 단계 3으로 간다.
- 단계 7 - 평형 상태에 도달하면 step 8로, 아니면 단계 3으로 간다.
- 단계 8 - 온도를 내리고 카운트 증가
- 단계 9 - stop 조건을 만족하면 stop, 아니면 단계 2로 간다.

단계 1에서 데이터를 입력받고 초기온도와 평형상태에 도달하기 위한 초기반복횟수, 비례상수를 결정한다. 초기온도는 99도이고 초기반복횟수와 비례상수는 각각 100000, 1.05이다. 단계 2에서 새로운 구성을 하나 생성하고 목적함수를 계산해야 하는데 상시 개방되어 있는 연계 개폐기중 랜덤하게 몇 개를 선택하여 열어주고 열어준 연계 개폐기의 수만큼 구분 개폐기를 열어 새로운 구성을 만들고 다음과 같은 목적함수를 계산한다.

$$f = P_{\text{loss}} + \alpha L + \beta V \quad (6)$$

여기서,  $\alpha, \beta$ 는 페널티 상수이고  $L$ 과  $V$ 는 각각 라인 용량 제약조건과 전압강하 제약조건을 나타낸다. 제약조건을 위반하지 않으면 0이고 위반하면 1이 되어 페널티 상수와 곱해진다. 손실은 Baran, Wu[3]가 제안한 전력조류계산으로 구했다.

단계 3에서는 해를 조금씩 이동시켜가면서 국소탐색을 하는 과정인데 배전계통 재구성에서는 연계 개폐기 하나를 닫아 일단 루프로 만든 다음에 구분 개폐기를 열어 새로운 구성을 만든다.

단계 4에서는 단계 2에서 구한 목적함수와 단계 3에서 구한 목적함수의 차이를 구하고, 목적함수가 줄어들면 단계 7로 가서 평형상태에 도달한지를 검토하고 목적함수가 줄어들지 않을 경우 단계 6에서 metropolis 기준에 의해서 허용할 것인가 아닌가를 결정한다.

단계 7에서 평형상태의 도달 여부를 결정하는데 앞서 기술한 초기반복횟수를 반복하고 온도를 낮출 때마다 비례상수를 곱해 반복횟수를 갱신한다. 본 논문에서는 평형상태에 도달하는지 여부를 반복횟수 외에 목적함수의 변화율과 나쁜 상태로 가는 천이확률의 거부 횟수를 고려하여 결정하였다. 새로 갱신한 목적함수의 변화율이 10번 이상 연속해서 계속되거나 상태가 나빠짐에도 다른쪽으로 이동할 수 있는 천이확률이 10번 이상 연속해서 계속될 경우에 평형상태에 도달했다고 판단하여 온도 스케줄링에 의해 온도를 낮추고 카운트를 증가시켰다. 평형상태에 도달하면 온도 스케줄링에 의해서 온도를 낮추게 되는데 다음과 같은 수식을 이용하였다.

$$T = \frac{T_0}{1 + 0.1t} \quad (7)$$

여기서,  $T_0$ 는 초기온도이고  $t$ 는 갱신상태에서의 반복 횟수이다. step 9에서 stop 조건을 만족하면 수행을 끝내게 되는데 정해진 반복횟수를 반복하거나 정해진 온도

이하로 떨어지면 수행을 멈춘다.

본 논문에서는 시뮬레이티드 어닐링에서 중요하게 고려해야 하는 평형상태, 속도문제를 다음과 같이 고려하였다. 평형상태를 도달하는가 여부를 판단함에 있어 온도가 낮을수록 충분히 반복을 할 수 있도록 비례상수를 곱하여 수행하였으며, 목적함수의 변화율과 reject되는 천이확률을 고려하여 평형상태 도달을 위해 불필요하게 반복되어 수행시간이 오래걸리는 것을 막았다. 또한 단계 3에서 현재해 주변을 탐색하기 위해 연계 개폐기 하나를 열고 구분 개폐기 하나를 닫아야 하는데 많은 경우에 구분 개폐기를 열었음에도 루프가 형성되어 방사상 제약 조건을 위반하고, 모선이 고립되어 전력공급 제약조건을 위반한다. 본 논문에서는 프로그램 상에서 루프구성 여부와 모선 고립 여부를 검사하여 불필요한 계산을 줄여 전체적인 속도의 향상을 이루었다.

#### 4. 사례연구

본 논문에서는 그림 2와같이 구분 개폐기 32, 연계 개폐기 5, 모선 32개인 시스템에 시뮬레이티드 어닐링 기법을 적용하였다(3).

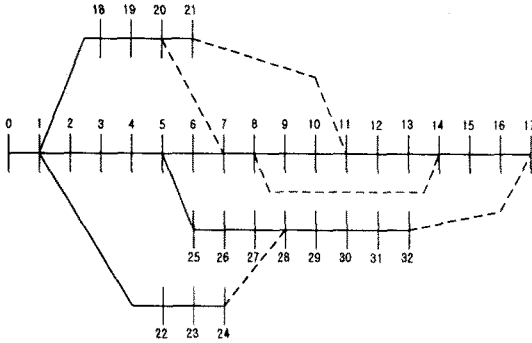


그림 2. 예제 모델 계통

그림 2에 있는 예제 계통에 'Branch exchange'를 이용한 구성과 시뮬레이티드 어닐링 기법을 적용하여 시뮬레이션한 결과는 각각 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

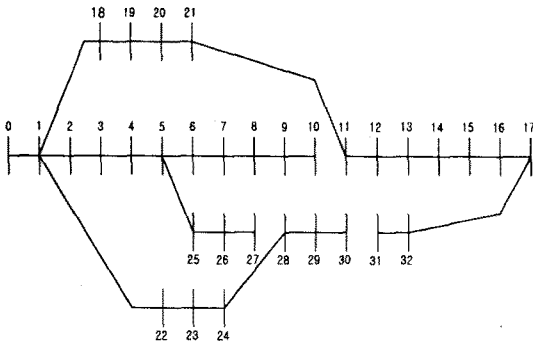


그림 3. Branch exchange에 의한 구성

그림 4의 구성을 얻기위해 5000회 반복을 했고 수행시간은 Intel Pentium MMX200 CPU를 사용한 컴퓨터에서 38분 걸렸다. 그림 2의 기본 예제계통은 전체 손실과 최저전압은 각각 173[kw], 0.88[pu]이고 'Branch exchange' 기법을 사용한 구성은 전체 손실과 최저전압은 각각 114[kw], 0.925[pu]이다. 시뮬레이티드 어닐링을 이용해서 얻은 최종구성은 전체 손실과

최저전압이 각각 104[kw], 0.943[pu]로서 제안한 알고리즘의 효용성을 입증하였다.

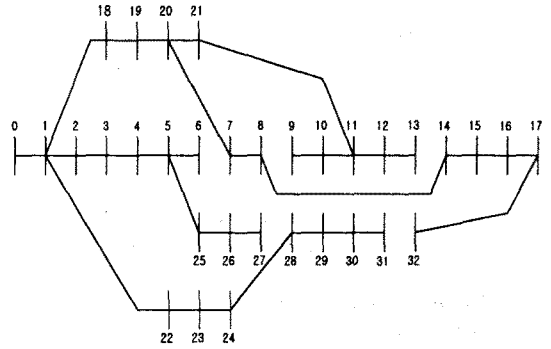


그림 4. 최소 손실 계통 구성

#### 5. 결론

본 논문에서는 배전계통 선로 재구성 문제에 국소해를 피해 전역 최적해를 찾는 능력이 뛰어나고 제약조건에 신경망 시스템이 영향을 받지 않는 시뮬레이티드 어닐링을 적용하였다. 제약조건 위반 여부와 평형상태에 도달 여부를 결정하는 조건들을 삽입하여 불필요한 수행시간을 줄였다. 예제 계통에서 수행한 결과 최소 손실을 갖는 개폐기의 위치를 결정할 수 있었다.

향후 연구과제로 시뮬레이티드 어닐링의 단점인 속도 문제를 개선하고 다른 최적화 기법과 연계한다면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

본 연구는 기초전력공학공동 연구소의 "AI 기법을 이용한 배전 계통의 최적 라우팅 기법 개발"에 따른 연구비로 수행되었음.

#### (참고 문헌)

- [1] A Merlin and H. Back, "Search for a Minimum Loss Operating Spanning Tree Configuration for and Urban Power Distribution System", *Proceedings of Fifth Power System Computation Conference(PSCC)*, Cambridge, 1975
- [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, July 1988, pp. 1217-1223
- [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, April 1989, pp. 1401-1407.
- [4] H. D. Chiang and R. M. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfiguration in Distribution System: Part 1: A New Formulation and A Solution Methodology", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.5, No. 4, November 1990
- [5] H. D. Chiang and R. M. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfiguration in Distribution System: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, July 1990
- [6] K. Nara, et. al, "Implementation of Genetic Algorithm Distribution System Loss Minimum Re-configuration", *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 7, No. 3, August 1992.