

배전 계통에서 손실 감소를 위한 시뮬레이티드 어닐링의 적용

전영재\*, 최승규\*, 김훈\*, 이승운\*\*, 김재철\*  
 \* 송실대학교 전기공학과 \*\* 한국전력공사

Application of Simulated Annealing for Loss Reduction in Distribution System

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

**Abstract** - This paper presents a efficient algorithm for loss reduction of distribution system by automatic sectionalizing switch operation in distribution systems of radial type. Simulated Annealing can avoid escape from local minima by accepting improvements in cost, but the use of this algorithm is also responsible for an excessive computation time requirement. To overcome this major limitation of Simulated Annealing Algorithm, we may use advanced Simulated Annealing Algorithm. Numerical examples demonstrate the validity and effectiveness of the proposed methodology.

1. 서 론

손실 감소와 부하 평형에 관한 배전 계통 재구성 문제는 최소 걸침 나무(minimum spanning tree)를 찾는 문제인데 제약조건을 만족하면서 목적 함수가 최소가 되는 방사상 구성을 찾는 문제이다.

손실 감소를 위한 배전 계통 재구성의 초기 연구는 Merlyn과 Back에 의해 처음 발표되었다[1]. 이들의 연구는 모든 개폐기를 닫은 상태의 망 배전 계통으로 시작해서 연속적으로 개폐기를 열어가며 방사상 구성이 될 때까지 시스템의 손실을 계산한다. 분지한계법(Branch and Bound)에 기반을 둔 이 해법은 나중에 Shirmohamadi와 Hong에 의해 향상되었다[2]. Ross와 Carson 등은 분기 교환법(Branch Exchange)을 기반으로 하여 배전 계통 재구성 문제를 연구하였고, Civanlan 등이 분기교환법에 기인하는 손실 최소를 계산하기 위해 몇 가지 가정들을 근거로 한 간단하고 매력적인 공식을 유도하였다[3,4]. Baran과 Wu는 정수 프로그램 문제로서 부하 평형과 손실 감소를 위한 문제를 공식화 하였다. 정확도가 다른 두 가지 조류계산식을 제안하였고 [3]에서 제안된 방법을 제안한 해법에 통합시켰다[5]. Chizang와 Reme는 조합적인 최적화 문제에 좋은 해를 제공해주는 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)을 이용해서 배전 계통 재구성 문제에 적용하였다[6,7]. Nara 등은 전역적인 최적화 기법인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용해 배전계통 재구성 문제를 다루었다[8].

시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing) 알고리즘은 다른 최적화 기법과 비교하여 좋은 해를 제공해 주지만 계산 시간이 너무 많다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이론적으로 전역 최소가 보장된 시뮬레이티드 어닐링을 확장하여 배전 계통 재구성 문제에 적용하였다. 시뮬레이티드 어닐링은 이론적으로 전역 최소가 보장될 때 무한대의 시간이 걸리기 때문에 현실적으로 적용할 때 해 공간을 탐색하는 규칙과 온도를 적절히 내리는 냉각 스케줄(cooling schedule)이 중요하다. 본 논문에서는 알고리즘 상에서 제약조건 위반 여부를 점검할 수 있는 제약조건과 페널티 상수(penalty factor)를 통해 목적함수에 반영하는 제약조건으로 나누어 모든 후보해를 가능해

가 되게 하였고 기존에 사용되던 Kirkpatrick의 냉각 스케줄 대신에 후보해의 통계적 처리에 의해 온도를 내리는 다항-시간 냉각 스케줄(polynomial-time cooling schedule)을 사용하여 수행시간을 단축하고 수렴성을 높였다. 제안한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위해 32, 69 모선 예제 계통으로 테스트하였다.

2. 시뮬레이티드 어닐링

2.1 시뮬레이티드 어닐링의 물리적 개념

시뮬레이티드 어닐링은 1982년에 Kirkpatrick, Gela, Vecchi에 의해서, 1983에 Cerny에 의해서 독립적으로 소개되었다. 일반적으로 어떤 고체를 용융점 이상으로 가열하면 그 고체를 형성하고 있는 원자들이 아주 격렬하게 움직이는 현상이 나타난다. 모든 물체에서와 마찬가지로 원자들은 최소 에너지 상태로 가려는 경향을 가지고 있다. 그러나 아주 높은 온도에서는 이러한 원자들의 격렬한 움직임이 이를 방해한다. 이 고체의 온도를 서서히 낮추어 주면 원자들의 움직임이 둔해짐으로 인해 각 온도에서의 온도 평형 상태를 이루면서 점점 낮은 에너지 상태로 천이하게 되고 최종적으로는 모든 가능한 에너지 상태들 중에서 가장 낮은 기저 에너지(ground energy) 상태에 도달하게 된다. 이러한 어닐링 과정에서, 고체가 가질 수 있는 모든 가능한 에너지 상태들의 분포는 볼츠만 분포(Boltzman distribution)이라 불리는 다음의 식에 의하여 결정된다.

$$P_r = \frac{e^{-\frac{E_r}{K_b C_p}}}{\sum_r e^{-\frac{E_r}{K_b C_p}}} \quad (1)$$

여기서,  $K_b$ 와  $C_p$ 는 볼츠만 상수와 온도이다. Metropolis 등은 고정된 온도에서 온도 평형에 도달하는 과정을 모의하기 위해 Monte Carlo 기법을 제안했다. 이 방법에서 새로운 구성을 얻기 위해 고체의 현재 구성에 교란(perturbation)을 한다.  $E_c$ 와  $E_r$ 는 각각 현재 구성과 새로운 구성의 에너지이다. 만약  $E_c > E_r$ 라면, 그때 가장 낮은 에너지 레벨에 도달한 것이고 새로운 구성은 받아들여져 현재 구성이 된다. 반면에,  $E_c \leq E_r$ 이면, 그때 새로운 구성은 확률  $\exp[-(E_c - E_r)/C_p]$ 를 가진 현재 구성에 따라 받아들여진다. 이렇게 함으로써 지역 최소를 벗어나 전역 최소에 도달할 수 있다.

2.2 제약조건을 고려한 계통 구성 생성

효과적인 방법으로 모든 배전 계통 제약조건을 만족하면서 많은 해를 만드는 것은 쉽지 않다. 이런 어려움을 극복하는 방법은 "difficult" 제약조건과 "easy"으로 나누는 것이다. "easy" 제약조건은 알고리즘 상에서 제약조건 위반을 알 수 있고 "difficult" 제약조건은 페널티 상수를 통해 처리한다. 본 논문에서는 다음과 같이 나누었다.

- "easy" 제약조건(Q<sub>0</sub>): 방사상 구조, 전력 공급
- "difficult" 제약조건(Q<sub>1</sub>): 변압기 용량, 라인 용량, 전압 강하

이렇게 제약조건을 나누어 처리함으로써 시뮬레이터드 어닐링을 수행하는 동안 모든 해가 가능해가 되어 불필요하게 새로운 해를 발생시키고 조류 계산을 하지 않게 되었다. 시뮬레이터드 어닐링을 수행할 때 가능해의 집합은 다음과 같다.

$$X = \{x | Q_0 \text{의 모든 제약조건을 만족하는 } x\} \quad (2)$$

이 때 손실함수를  $f(x)$ 로 놓는다면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{minimize } f(x) + \sum_{V_j(x) \in V(x)} \pi_j v_j(x), \quad x \in X \quad (3)$$

여기서,  $\pi_j$ 는 페널티 상수이고  $V(x)$ 는  $Q_1$ 에서 제약조건을 위반하는 집합이다.

새로운 시스템 구성이 "easy" 제약조건을 만족하면서 교란(perturbation)을 통해 현재 시스템 구성으로부터 생성되는데 본 논문에서는 다음의 두 가지 형태로 구분하였다.

#### A. 단일 교란 :

- 1) 랜덤 숫자 발생기를 이용하여 임의로 선택된 연계 개폐기를 닫는다. 이것은 정상적인 방사상 배전 계통에서 루프를 형성한다.
- 2) 랜덤 숫자 발생기를 이용하여 1)의 동작을 통해 만들어진 루프 중에서 임의로 구분 개폐기를 열어 방사상 구조로 네트워크를 복구한다.

#### B. 다중 교란 :

- 1) 랜덤 숫자 발생기를 이용하여 초기 상태의 연계 개폐기 중 몇 개를 오픈할 것인지 결정한다.
- 2) 결정된 연계 개폐기를 차례로 닫아서 루프를 만든 다음 구분 개폐기를 열어 새로운 구성을 만든다.

이들 두 형태의 교란은 새로운 시스템 구성을 생성하는 교란 기법으로 사용된다. 단일 교란은 온도 평형을 이루기 위해 새로운 해를 만들 때 사용이 되고 다중 교란은 온도를 내린 후 새로운 구성에서 탐색을 시작할 때 사용된다. 다중 교란을 사용함으로써 각 온도마다 다른 초기 구성에서 시작하기 때문에 분기교환법처럼 최종 구성이 초기 구성에 영향을 받지 않는다.

### 2.3 냉각 스케줄(Cooling Schedule)

냉각 스케줄은 i) 초기 온도  $C_{p0}$ , ii) 온도를 내리는 함수, iii) 중단 조건 iv) 마코프 체인(Markov chain)의 길이를 결정하는 것이다. 본 논문에서는 P.J.M. van Laarhoven, E.H.L. Aarts와 Emile Aarts, Jan Korst에 의해 제안된 다항시간 냉각 스케줄(Polynomial-Time Cooling Schedule)을 사용하였다.

#### 가. 초기 온도

어떤 해를 생성했을 때 이것을 새로운 해로 허용하는 비율을 허용 비율(accept ratio)라고 한다. 초기 온도는 대부분의 해가 허용되도록 높게 설정해야 한다. 본 논문에서는 통계적 기법을 이용하여 초기 온도를 설정하였다. 어떤 온도  $C_p$ 에서 연속된  $m$ 개의 해를 생성하고  $m_1$ 을 이전 해보다 작은 값을 갖는다고 가정한다. 그러면  $m_2 = m - m_1$ 이 된다. 허용 비율은 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$X \approx \frac{m_1 + m_2 \cdot e^{-\frac{\Delta f}{C_p}}}{m_1 + m_2} \quad (4)$$

여기서,  $\overline{\Delta f}$ 는  $m_2$ 의 평균 오차이다. 수식 (10)으로 구한 허용 비율  $X$ 가 처음 설정한 비율에 도달할 때까지 상수를 곱해  $X$ 와  $\overline{\Delta f}$ 를 결정한다. 이로부터 다음의 수식을 통해 초기 온도를 얻는다.

$$C_p = \frac{\overline{\Delta f}}{\ln\left(\frac{m_2}{m_2 \cdot X - m_1(1-X)}\right)} \quad (5)$$

#### 나. 온도 감소

일반적으로는 Kirkpatrick 등이 제안한 방법대로 이전 온도에 0.85-0.99 사이의 값을 곱해서 온도를 감소시키지만 본 논문에서는 마코프 체인(Markov Chain) 내에서 생성되는 해들의 표준편차를 이용하여 해의 편차가 크면 불안정하다고 생각하여 온도 감소를 천천히 하였고 표준편차가 작으면 안정된 상태라고 판단해 온도를 빠르게 낮추었다. 이에 관한 수식은 다음과 같다.

$$C_{k+1} = \frac{C_k}{1 + \frac{C_k \cdot \ln(1 + \delta)}{3\sigma_{C_k}}}, \quad k=0,1,\dots \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_{C_k}$ 는 온도  $C_k$ 에서의 표준편차이고  $\delta$ 는 거리 지수이다.  $\delta$ 가 작으면 온도가 느리게 감소하고  $\delta$ 가 크면 온도가 빠르게 감소한다. 본 연구에서는 0.9의 값을 사용했다.

#### 다. 마코프 체인(Markov chain)의 길이

마코프 체인의 길이는 시뮬레이터드 어닐링의 내부 루프 횟수로서 주어진 온도에서 평형 상태가 될 때까지의 반복 횟수를 뜻한다. 마코프 체인의 길이가 길면 보다 좋은 해를 얻을 수 있지만 똑같은 시간이라면 마코프 체인의 길이를 늘리는 것보다 온도를 내리는 폭을 낮추는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 마코프 체인의 길이를 150개로 잡았다.

#### 라. 중단 조건

중단 조건은 알고리즘이 끝나는 조건으로서 이론적으로는 온도가 0에 수렴하는 곳에서 끝나야 하지만 낮은 온도에서 보내는 시간이 너무 많기 때문에 일반적으로는 마코프 체인이 끝나는 곳에서 목적함수 값을 비교하여 특정한 횟수 만큼 변화가 없으면 끝나는 중단 조건을 많이 사용한다. 본 연구에서는 다항시간 냉각 스케줄(Polynomial Time Cooling Schedule)에서의 중단 조건을 이용했고, 수식은 다음과 같다.

$$\frac{C_p^*}{\langle f \rangle_\infty} \cdot \left. \frac{\partial \langle f \rangle C_p}{\partial C_p} \right|_{C=C_p} < \epsilon \quad (7)$$

여기서,  $\langle f \rangle_\infty \approx \langle f \rangle_{C_p}$ 은 초기 온도  $C_p$ 에서의 평균 목적함수 값이다.  $\langle f \rangle_{C_p}$ 는  $k$ 번째 마코프 체인(Markov chain)에서의 평균 목적함수 값이다.  $\left. \frac{\partial \langle f \rangle C_p}{\partial C_p} \right|_{C=C_p}$ 는 온도  $C_p$ 에서 평균 목적함수 값의 변화 비율이다.  $\epsilon$ 는 작은 양수 숫자인데 본 논문에서 32모선일 때  $\epsilon=0.3$ 로 사용하였고 69모선일 때  $\epsilon=0.15$ 로 사용하였다.

### 3. 사례 연구

참고문헌 [5]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.

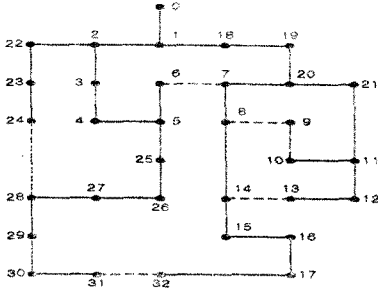


그림 1. 32모선의 최적 구성

초기 구성에서 (7, 20), (8, 14), (11, 21), (17, 32), (24, 28) 사이의 개폐기를 열어 계통을 구성했으며, 이때의 손실은 202.676[kW]이고 모선의 최소 전압은 0.91309[pu]이다. 시뮬레이터드 어닐링 알고리즘을 통해 그림 1과 같은 최적 구성을 얻었다. 이때의 손실은 139.548[kW]이고 모선의 최소 전압은 0.93782[pu]이다. 시뮬레이터드 어닐링 알고리즘 수행 후 손실은 63.028[kW] 감소하여 31.15[%]의 손실 감소가 있었고, 최소 전압은 0.0247[pu]가 증가해 2.64[%]의 전압 상승이 있었다.

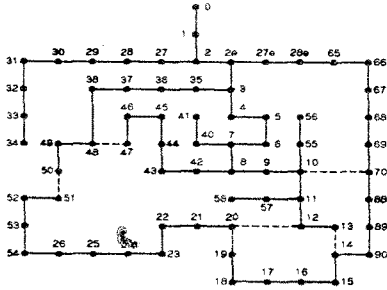


그림 2. 69모선의 최적 구성

참고문헌 [9]에 있는 69모선 예제 모델은 5개의 연계 개폐기, 32개의 모선을 가지고 있으며 기준전압은 12.66[kV]이고 초기 구성에서의 전체 부하는 3802[kW], 2694[kVAR]이다.

본 논문에서 제안한 방법으로 수행하면 그림 2와 같이 (10-70), (12-20), (13-14), (47-48), (50-51) 사이의 개폐기를 오픈해서 새로운 구성을 만든다. 초기 구성에서 손실이 224.976[kW]이고 최소 전압은 0.9198[pu]였는데 프로그램 수행 후 손실은 99.375[kW]이고 최소 전압은 0.9428[pu]가 되었다. 손실은 125.601[kW]가 줄어 55.82[%]가 줄었으며 최소 전압은 0.023[pu]가 증가해 2.44[%]의 전압 상승이 있었다.

본 논문에서는 기존의 시뮬레이터드 어닐링 알고리즘에 후보해 생성 기법과 냉각 스케줄을 개선하여 전체적인 알고리즘 계산 속도와 수렴성을 높였다. 개선된 계산 시간을 알아보기 위해 Pentium MMX 200MHz 컴퓨터에서 기존의 방법과 본 논문에서 제안한 방법을 각각 수

행하였다. 정확한 비교를 위해 각각 10회 수행하여 평균을 구하였으며 이에 대한 내용을 다음 표에 나타내었다.

표 1. 기존의 SA와 제안한 SA와의 비교

	기존의 SA	제안한 SA	단축시간(%)
32모선	139초	101초	38초(27.34%)
69모선	942초	475초	467초(49.58%)

표 1에서 보이는 것처럼 기존의 방법으로 수행했을 경우 32, 69모선에서의 계산 시간은 각각 139초, 942초이다. 제안한 방법으로 수행했을 경우 32, 69모선에서의 계산 시간은 각각 101초, 475초이다. 제안한 방법으로 32, 69모선에서 38초, 467초 단축할 수 있었으며, 특히 32모선에서 단축한 시간 비율보다 69모선에서 단축한 시간 비율이 훨씬 커서 본 논문에서 제안한 방법이 실제 크기의 배전 계통에서 적용가능하다는 것을 보였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 배전 계통에서 여러 가지 제약조건을 만족하면서 최소 손실 구성을 찾는 문제에 시뮬레이터드 어닐링 알고리즘을 적용하였다. 알고리즘 상으로 제약조건 위반을 점검할 수 있는 제약조건과 페널티 상수를 이용해 목적함수에 반영하는 제약조건을 구분함으로써 불필요하게 조류계산을 하는 것을 막을 수 있었으며, 기존의 냉각 스케줄 대신에 통계적인 과정이 포함된 다항식 냉각 스케줄을 이용하여 제안한 알고리즘의 계산시간과 수렴성을 높였다. 32, 69 모선 예제 모델에 적용해서 좋은 결과를 보임으로써 실제 크기의 배전 계통에 충분히 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

### [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] D. Shirmohammadi, H. Wayne Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive losses reduction," *IEEE Transactions on Power Delivery*, April 1989, pp. 1402-1498.
- [3] D. W. Ross, M. Carson, A. Cohen et al, "Development of Advanced Methods for Planning Electric Energy Distribution Systems", DEO final report no SCI5263, Feb 1980.
- [4] S. Civanlar, J. J. Grainger, and S. H. Lee, "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, July 1988, PP. 1217-1223
- [5] 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.
- [6] H. D. Chiang and R. M. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfiguration Distribution System: Part 1: A New Formulation and A Solution Methodology", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [7] 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, July 1990.
- [8] K. Nara, et. al, "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Re-configuration", *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 7, No. 3, August 1992.
- [9] M. E. Baran and F. F. W u, "Optimal capacitor placement on radial distribution system", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, January 1989.