

타부탐색을 이용한 배전계통 재구성

전영재*, 최승규*, 김훈*, 박경중**, 김재철*
* 숭실대학교 전기공학과 ** 신원 엔지니어링

Reconfiguration of Distribution System Using Tabu Search

Youngjae Jeon*, Seungkyoo Choi*, Hoon Kim*, Koungjong Park**, Jaechul Kim*
* Dept. of Electrical Engineering in Soongsil University ** Shinwon Engineering

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 tabu search to reconfiguration of distribution system, in this paper we propose the several move methods and efficient reconfiguration procedure. We also discuss the tabu search techniques of diversifying the search of solution space as well as the simple tabu search. The experimental results show that the proposed tabu search techniques have the ability to search a good solution.

1. 서 론

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

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 방식상 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].

타부 탐색(Tabu Search)은 해를 탐색한 과정을 기억하고 되돌아가는 것을 금지(tabu)하여, 해의 순환(cycling)을 방지하고 부분 최적해에서 벗어날 수 있는 기법이다. 타부 탐색은 일반적인 그리디(greedy) 탐색 방법에 비해 국소 최적해에 빠질 위험이 적고 다른 전역적 탐색 기법에 비해 대상문제에 관한 지식을 충분히 활용하는데 유리한 기법이다. 본 논문에서는 후보해 생성에 직접적으로 관여할 수 있는 타부 탐색의 장점을 활용하여 효과적인 탐색방법을 제시하고, 이를 통해 탐색시간을 단축하였다. 또한 탐색공간을 다양하게 고려하기 위하여 탐색 중 국소 최적해에 도달했을 때 현재까지의 탐색 과정을 분석하여 새로운 탐색 공간으로 이동하도록

탐색의 다각화 방법을 제안하였고, 제안한 알고리즘의 효율성을 입증하기 위해 69모선 예제 계통으로 테스트하였다.

2. 타부탐색

2.1 타부 탐색의 개요

타부 탐색은 1980년대 후반에 Glover를 비롯한 여러 학자들에 의하여 개발되었는데, 지금까지 여러 어려운 조합적인 최적화 문제를 푸는데 매우 효과적임을 보여주고 있다[9]. 타부 탐색은 유연한 성질이 있는 컴퓨터 기구조를 사용한다. 이는 고정된 기구조 방법(branch and bound)이나, 기억을 사용하지 않는 방법(simulated annealing, 임의로 찾는 방법)보다 더 자세하게 역사적 탐색 정보와 기준 개선을 이용하여 탐색한다.

타부 탐색은 메모리 구조를 사용하여 타부 리스트를 통한 통제조건과 타부 리스트를 무시할 수 있는 열망기준(aspiration criterion) 사이에서 자유롭게 탐색한다. 타부 탐색의 궁극적인 목적은 좋은 해를 얻기 위함인데 타부제약 조건이 도리어 좋은 해가 있을 수 있는 것으로 움직이는 것을 방해할 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 어떤 때에서 타부 조건을 무시할 수 있는 새로운 조건이 필요할 때가 있다. 이러한 조건을 열망 기준이라 한다. 타부 탐색은 휴리스틱이기 때문에 특별한 경우를 제외하고 최적해를 보장하지 못한다. 이 한계는 중기와 장기 메모리 함수에 의한 많은 강화와 다양성 사용으로 줄어들 수 있다.

2.2 강화(Indetification)

타부 탐색은 전에 방문한 해로, 또는 전에 방문한 해의 분류 중 하나로 돌아가는 것을 피하기 위하여 최근에 수행된 단계들의 대부분을 기억한다.

이를 기억하기 위해 메모리는 타부 탐색 안에서 학습 과정(여러 해들을 방문하는 것)의 도구로 사용된다. 어떤 공통적인 성질들이 좋은 해들을 방문했는지를 관찰하는 것은 의미있다. 이와 같은 방법이 타부탐색에서 강화 전략을 만든다. 이 전략은 어떤 단계에서 이득을 만드는 데 전에 방문했던 좋은 해에 있는 성질을 이용하고, 또는 더 일반적인 분류기준에 의해서 분류된 좋은 해의 부분 집합들만 탐색하게 제약한다. 강화에 사용되는 메모리는 중기 메모리라고 부르는데 중기 메모리는 탐색의 일정한 기간 동안에 생성된 가장 좋은 임의 해 중에서 선택한 몇 개의 해 형태를 분석 비교하고 기록함으로써 만들어진다. 이들 해들의 공통적인 특성(특수한 변수들에 의해 얻은 값과 같은 것들)을 잡아 좋은 해들의 지역적 속성을 찾아내는 것이다.

2.3 다양성(Diversification)

강화 그 자체만으로는 일반적인 최적화 문제에서 가장 좋은 결과를 얻는데 불충분하다. 다양성 전략은 강화와 상보적인 작용으로 탐색 영역 위에서 가장 효과적인 탐색을 위해 함께 사용되어야 한다. 다양성 전략은 해를

전략적으로 탐색하는데 있어 타부 탐색의 강화에서 발생 하는 약점을 보완하여 균형을 잡아준다. 다양성에서는 장기 메모리가 사용되는데 이것은 전체적인 관점에서 중 기 메모리에 반대 원리를 적용한다. 장기 메모리 함수는 먼저 발견된 좋은 해를 포함한 지역에 집중적으로 탐색 하는 대신에, 더 멀리 검토되지 않는 지역으로 진행을 유도한다.

2.4 타부 탐색의 기본 절차

강화와 다양성은 기본적인 타부 탐색 절차에 포함되어 있으며 기본적인 타부 탐색 절차는 다음과 같다.

단계 1. (초기화)

- 1) 타부 속성, 타부 목록크기, 열망기준과 종료조건을 결정한다.
- 2) 초기 가능해를 구하여 현재해와 최선해로 둔다.
- 3) 타부 리스트를 비어둔다.

단계 2. (이웃해 생성)

현재해로부터 타부 이동이 아니거나 타부 이동이지만 열망기준을 만족하는 이동에 대해 이웃해를 생성한다.

단계 3. (현재해와 최선해 수정)

- 1) 생성된 이웃해 중에서 가장 좋은 해를 현재해로 한다.
- 2) 현재해가 최선해보다 좋으면 현재해를 최선해로 둔다.

단계 4. (타부 리스트 수정)

새로운 현재해의 이동속성을 타부 리스트에 기록한다. 만약 타부 리스트에 저장된 타부 속성의 수가 타부 목록 크기보다 크면 가장 먼저 기록된 타부 속성을 삭제 한다.

단계 5. (종료기준 검사)

만약 종료기준을 만족하면 끝내고, 그렇지 않으면 단계 2로 간다.

3. 타부탐색의 적용

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 목적 함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\min \sum_{i=1}^n r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (1)$$

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

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

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

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

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

3.2 목적함수와 제약조건

효과적인 방법으로 모든 배전 계통 제약조건을 만족하 면서 많은 해를 만드는 것은 쉽지 않다. 이런 어려움을 극복하는 방법은 “difficult” 제약조건과 “easy”으로 나누 는 것이다. “easy” 제약조건은 알고리즘 상에서 제약조 건 위반을 알 수 있고 “difficult” 제약조건은 페널티 상 수를 통해 처리한다. 본 논문에서는 다음과 같이 나누었 다.

- “easy” 제약조건 (Q_0) : 방사상 구조, 전력 공급
- “difficult” 제약조건 (Q_1) : 변압기 용량, 라인 용량, 전압 강하

이렇게 제약조건을 나누어 처리함으로써 타부 탐색을 수행하는 동안 모든 해가 가능해가 되어 불필요하게 새 로운 해를 발생시키고 조류 계산을 하지 않게 되었다. 타부 탐색을 수행할 때 가능해의 집합은 다음과 같다.

$$X = \{x | Q_0 \text{의 모든 제약조건을 만족하는 } x\} \quad (6)$$

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

$$\text{minimize } f(x) + \sum_{V(x) \in V(x)} \pi_j v_j(x), \quad x \in X \quad (7)$$

여기서, π_j 는 페널티 상수이고 $V(x)$ 는 Q_1 에서 제약조건 을 위반하는 집합이다.

3.3 타부 탐색의 기본 전략

3.3.1 타부 리스트

지역 최소해로 다시 방문하는 것을 피하기 위하여, 최적해를 찾는데 나쁜 영향을 주는 역방향 이동이 금지 되어야 한다. 이것은 유한 first-in-first-out 구조 처럼 타부 리스트라 불리는 데이터 구조에서의 이동을 정렬하여 수행된다. 타부 움직임에 기인하여, 우리는 지역 최소해로부터 빠져나오고 낮은 목적함수로의 탐색 을 유지할 수 있다. 새로운 해가 생성되고 타부 리스트 에 해당되는지 아닌지를 점검한다. 그렇게 된다면 해당 하는 탐색 영역이 크게 감소한다. 타부 리스트 크기의 선택은 아주 중요하다. 크기가 너무 크면 매력적인 이 동이 금지되고 좋은 해를 탐색할 수 없다. 반면에 이 값이 매우 작으면, 탐색과정에서 순환이 일어나 방문했 던 해를 다시 방문한다. 일반적으로 타부 리스트 크기 는 문제의 크기에 따라 커진다. 본 논문에서는 연계 개 폐기의 숫자와 같게 타부 리스트의 크기를 5로 정하여 수행하였다.

3.3.2 열망 기준

타부 리스트는 여태까지 발견한 해보다 좋은 해를 이 끌어 낼 경우 무시될 수 있다. 열망 기준은 가치있거나 흥미로운 경우 이 움직임을 허용하는데 사용된다. 다르 게 말해서, 열망 기준에 도달한다면 타부 이동을 허용 한다. 본 논문에서, 열망 기준은 다음 형태로 사용된다 : 현재 해 s_k 로부터의 타부 이동이 반복 k 까지 얻은 s_k 보다 좋은 해 ($s_k + \text{타부 이동}$)에 도달했다면, 그때 이 타 부 이동이 허용된다. 즉 $f(s_k + \text{타부 이동}) < f(s_k)$ 이면 그때 타부 제약은 무시될 것이다.

3.3.3 강화와 다양성

최적 해를 얻기 위해, 타부 탐색은 강화와 다양화 기 법을 사용한다. 전자는 준최적 해의 이웃에서 탐색의 강화를 의미하는 것이고, 후자는 탐색하지 않았던 해 영역을 다양하게 탐색한다는 의미이다. 강화가 잘못되 면 탐색은 반복적인 랜덤 샘플링이 되고, 다양화가 잘 못되면 지역 최적해에 빠진다.

해 s 보다 더 나쁜 해 s' 가 받아들여졌을 때, 순환이 일어날 수 있으며, 같은 해로 반복적으로 돌아올 수 있 다. 시뮬레이터드 어닐링 기법에서는 온도와 새로운 목 적함수에 의존하여 임의의 확률로 더 나빠진 해 s' (현재 해 하나를 샘플로 뽑았다면)를 받아들여게 유도한다. 반대로 타부 탐색 접근은 최근에 방문한 해로 돌아가는 움직

임을 방지하거나 벌금을 주는 메모리 구조를 이용함으로써 함정에 빠지지 않게 한다.

본 논문에서는 초기해 생성, 벌금, 빈도수에 기반을 두어 강화와 다양화 기법을 사용했다. 타부 탐색의 수행은 50회 반복을 하고 새로운 해를 생성하여 계속 50회 반복하는 방법을 사용했다. 시뮬레이터드 어닐링에서는 임의의 해를 새로 선택하지만 타부 탐색에서는 일정 횟수 반복 후에 지역 최소해를 기억하고, 그 중에서 선택하여 최적해가 있을만한 지점에서 탐색을 시작하였다. 지역 최적해는 국소 최적해 근처에 있을 가능성이 많기 때문에 임의의 초기해 보다는 수렴속도가 빠르다.

배전 계통 재구성 문제에서 해가 3번 혹은 그 이상 방문된다면 아주 무거운 벌금을 매겨 매력을 잃게 만든다. 그러므로 탐색은 다양한 탐색 과정으로 탐색하지 않았던 영역을 탐색한다. 또한 빈도수가 세 번 이하인 지역 최소 영역의 이웃들에서 강화된 탐색이 가능하다.

타부 탐색 과정에서 오픈되는 연계 개폐기의 빈도수를 계속 기록하여 많이 선택된 연계 개폐기를 확률에 의해 낮게 선택되게 함으로써 적게 탐색한 지역을 탐색하게 한다.

타부 탐색은 메모리를 최적화 문제의 특성에 맞게 타부 리스트, 열망 기준, 강화, 다양성에 적용함으로써 효과적인 탐색을 할 수 있었다.

4. 사례연구

참고문헌 [10]에 있는 69모선 예제 모델은 그림 1과 같이 5개의 연계 개폐기, 32개의 모선을 가지고 있으며 기준전압은 12.66[kV]이고 초기 구성에서의 전체 부하는 3802[kW], 2694[kVAR]이다.

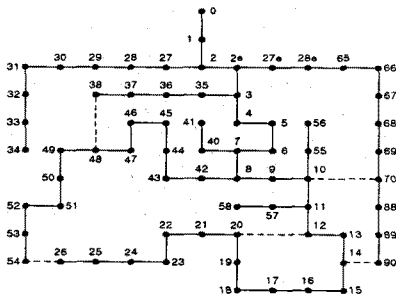


그림 1. 69모선의 초기구성

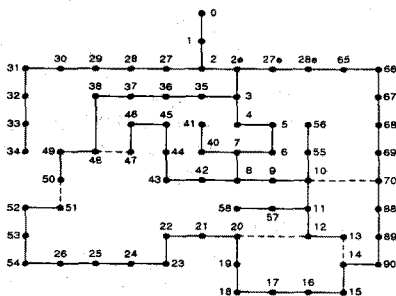


그림 2. 69모선의 최적 구성

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 타부 탐색 알고리즘에 강화와 다양성 기법을 개선하여 전체적인 알고리즘 계산 속도와 수렴성을 높였다. 타부 탐색의 계산시간을 알아보기 위해 Pentium II 350MHz 컴퓨터에서 참고문헌 [11]과 본 논문에서 제안한 방법을 각각 수행하였다. 정확한 비교를 위해 각각 10회 수행하여 평균을 구하였으며, 참고문헌 [11]보다 14% 정도 빠른 52초에 수렴하였다.

3. 결론

본 논문에서는 배전 계통에서 여러 가지 제약조건을 만족하면서 최소 손실 구성을 찾는 문제에 타부 탐색을 적용하였다. 알고리즘 상으로 제약조건 위반을 점검할 수 있는 제약조건과 페널티 상수를 이용해 목적함수에 반영하는 제약조건을 구분함으로써 불필요하게 조류계산을 하는 것을 막을 수 있었으며, 기존의 타부 탐색에 강화와 다양성 기법을 개선함으로써 제안한 알고리즘의 계산시간과 수렴성을 높였다. 69 모선 예제 모델에 적용해서 좋은 결과를 보임으로써 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.

(참고 문헌)

- [1] A Merlin and H. Back, "Search for a Minimum Operating Spanning Tree Configuration for and Power Distribution System", *Proceedings of Fifth P System Computation Conference (PSCC)*, Cambridge, 1
- [2] D. Shirmohammadi, H. Wayne Hong, "Reconfig of electric distribution networks for resistive reduction," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, pp. 1402-1498.
- [3] D. W. Ross, M. Carson, A. Cohen et al, "Devel of Advanced Methods for Planning Electric E Distribution Systems", DEO final report no SCI526 1980.
- [4] S. Civanlar, J. J. Grainger, and S. H. Lee, "Dis Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", *IEEE on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, July 1988, PP. 121
- [5] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network Reconfigura Distribution Systems for Loss Reduction and Balancing", *IEEE Transactions on Power Delivery*, V No. 2, April 1989, pp. 1401-1407.
- [6] H. D. Chiang and R. M. Jean-Jumeau, "Optimal Reconfiguration Distribution System: Part 1: A Formulation and A Solution Methodology", *IEEE Tra Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [7] H. D. Chiang and R. M. Jean-Jumeau, "Optimal Reconfigurations in Distribution System: Part 2: A S Algorithm and Numerical Results", *IEEE Transactio Power Delivery*, Vol 5, No. 3, July 1990.
- [8] K. Nara, et. al, "Implementation of Genetic Algor Distribution System Loss Minimum Re-configuration", *Trans. on Power System*, Vol. 7, No. 3, August 1992.
- [9] F. Glover, "Tabu Search-Part 1," *ORSA journ computing*, Vol. 1, No. 3, 1989
- [10] M. E. Baran and F. F. W u, "Optimal ca placement on radial distribution system", *IEEE Trans on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, January 1989.
- [11] 전영재 외, "배전 계통의 손실 최소 재구성을 위한 시뮬레이터드 어닐링의 구현", 대한전기학회, 제48권, 4A호 pp. 371-378, 1999년 4월