

손실최소화를 위한 배전계통 재구성의 Tabu Search 기법 적용

장경일*, 최상열*, 신명철*, 남기영**, 박남옥**
 *성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과, **한국전기연구소

Tabu Search Method Applied to Distribution Systems
 Reconfiguration for Loss Minimization

Kyung-il Jang*, Sang-youll Choi*, Myung-chul Shin*, Ki-young Nam**, Nam-ok Park**
 *Dept. of Electrical and Computer Eng. Sungkyunkwan Univ., **KERI

Abstract - Distribution systems is consist of network in physical aspect, and radial in electrical aspect. Therefore, radial operation is realized by changing the status of sectionalizing switches, and is usually done for loss reduction in the system. In this paper, we propose a optimal method for distribution systems reconfiguration. Specifically, we use K-optimal algorithm and tabu search method to solve distribuion systems reconfiguration for loss minimization problem.

1. 서 론

도심지역에서의 배전계통은 사고지점을 쉽게 감지할 수 있도록 연계개폐기에 의해 방사상형태의 하위구조로 나뉘어진다. 그러므로 각각의 부하 지점은 단지 하나의 변압기에 의해 전력이 공급되어지고, 루프를 형성하지 않는 형태를 이루게 된다. 이처럼 전력계통에서의 배전계통은 물리적으로 네트워크구조로 구성되어 있고, 전기적으로는 방사상으로 운전하는 형태를 지니고 있으므로 구분개폐기와 연계개폐기를 적절히 조절하여 조류를 바꾸면서 방사상 형태의 운전을 유지할 수가 있다.

특히, 정상상태시에 전압강하가 크게 발생하는 지점의 부하를 절체함으로써 전력손실을 줄일 수 있고 부하분담이 균등화 되어서 전력공급의 신뢰도 향상 및 기기의 수명 연장을 가져올 수 있다. 게다가 개폐기를 원방에서 신속히 조작하도록 하는 배전자동화 시스템의 기반을 제공할 수 있다.

지금까지 배전계통의 운용시 발생하는 선로손실을 최소화하는 목적으로 여러 가지 기법을 이용하여 선로를 재구성하는 방법이 제안되었는데, [1]에서 Mesut E. Baran은 개폐기 조작을 통한 branch exchange method을 이용하였는데, 정수프로그램 문제로서 부하평형과 손실감소를 위한 문제를 공식화하였고, [3]에서 Hsiao-Dong Chiang등은 SA기법을 이용하여 선로를 재구성하였다. [4]에서 Brauner등은 전문가시스템을 이용하여 손실을 최소화하는 배전계통을 재구성하였고, [6]에서 Nara등은 유전자 알고리즘을 이용하여 손실을 최소화하도록 개방할 스위치의 위치를 결정하였다. 이외에도 최근에 ANN이나 fuzzy, 최급강화법등의 기법을 이용하여 부하의 특성에 따른 손실최소화를 고려하여 배전계통을 재구성 하였다.

하지만, 대부분의 연구방향이 정상상태에서 선로용량, 변압기 용량, 전압조건, 방사상의 운전조건등의 제약조건을 도입하여 최소손실을 얻는 방법에 국한되고 있고, 사고가 났을 경우나 선로 보수 공사중인 경우는 고려하지 않고 있는 실정이다.

이에 본 논문에서는 정상상태뿐만 아니라 비상상태와 수리상태까지 고려한 최소손실을 갖는 알고리즘을 구성하여 배전계통의 재구성을 최적화하도록 하였다.

특히, 이러한 제약조건과 목적함수를 동시에 만족하기

위해서 조합적인 최적화문제에 우수한 성능을 발휘하고 있는 Tabu search 기법을 K-optimal 알고리즘에 적용하여 최소손실을 갖는 배전계통을 구성하였다.

2. 본 론

2.1 손실최소화를 위한 배전계통 재구성의 방법

배전계통을 재구성 하기 위해서는 부하절체점을 결정해야 하는데 이러한 부하 절체점은 목적함수에 맞게 전체 시스템의 전력손실이 커지는 것과 같은 결과를 가져오므로 절체를 해야하고 부하모선의 미지량을 구해내는 것이 중요하다. 또한 여기서 얻어진 결과를 이용하여 제약조건을 만족하는 배전계통을 재구성하면 루프를 형성하지 않는 MST(Minimum Spanning Tree)의 문제로 귀착시킬 수 있다. 이러한 조합 최적화 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서 제안한 배전계통 재구성의 최적화 기법에 대한 절차를 살펴보겠다.

2.1.1 배전계통 재구성의 절차

본 논문에서 실행한 배전계통 재구성의 절차를 살펴보면 다음 그림1 과 같다.

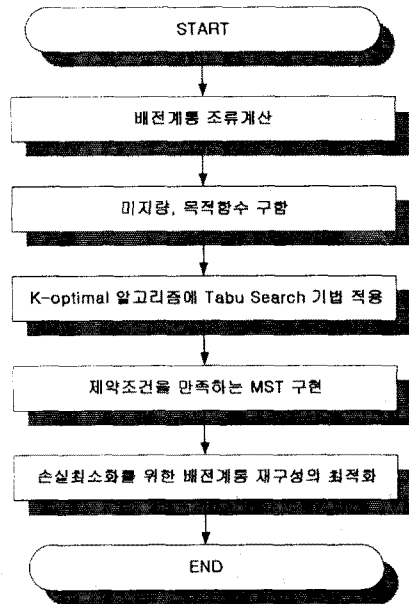


그림 1 배전계통 재구성의 절차

2.1.2 배전계통 조류계산 알고리즘

배전계통 조류계산 알고리즘은 많은 양의 계산시간이 필요하므로 계산시간이 비교적 단축되고 계산적으로 효율적인 DistFlow 수식[1]을 이용하였다.

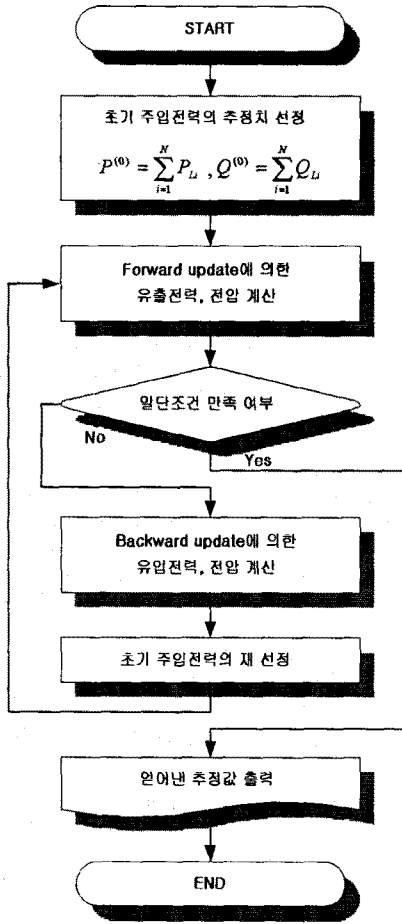


그림 2 배전계통 조류계산 알고리즘

2.1.3 손실감소를 위한 목적함수와 제약조건

DistFlow 수식으로부터 구한 값을 이용하여 전체 시스템의 손실최소화를 위한 배전계통을 재구성하게 되는데, 이러한 목적함수를 가지고 계통을 재구성하게 되면 전압강하가 큰 지점의 부하가 다른 쪽으로 절체되고 부하분담이 균등화되어진다. 즉, 선로손실인 i^2r 의 총 손실합계를 최소로 하는 목적함수를 가지고 여러가지 제약조건을 만족하도록 하는 배전계통을 재구성하는 것이다.

- 목적함수

$$\min \sum_{i=1}^N r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2}$$

- 제약조건

1. 규정된 전압을 유지해야 한다.
2. 절체된 부하량이 변압기의 최대용량, 선로의 최대용량을 초과해서는 안된다.
3. 절체로 인하여 증가된 부하량이 개폐기의 차단용량, 최소 trip 전류를 초과해서는 안된다.
4. 조류의 흐름이 루프를 형성해서는 안되고 방사상으로 흘러야 한다.
5. 선로보수 공사중이거나 절체한 후에 그 선로에 조류의 흐름이 존재해서는 안된다.

2.2 배전계통 재구성을 위한 알고리즘

DistFlow 수식으로부터 구한 값을 이용하여 전체 시스템의 손실최소화를 목적함수로 하는 배전계통을 재구

성하게 되는데, 이러한 조합최적화 문제를 해결하기 위하여 K-optimal 알고리즘에 Tabu Search 기법을 적용하여 배전계통 재구성의 최적화를 기하였다.

2.2.1 K-optimal 알고리즘

K-optimal 알고리즘은 반드시 초기해가 주어진 상황에서만 해를 구할 수 있는 특성이 있다. 즉, 초기에 정한 임의의 K군데 아크를 절단하고, 절단한 아크를 다시 재결합하여 기존의 구성을 개선시킨다. 그리고, 재연결했을때 가장 작은 최소비용을 만족하는 구성을 사용하게 된다. 그러므로 일정한 반복을 거쳐야 조건식을 더 만족시키는 해가 나오게 된다. 여기서 절단하는 K개의 수가 많으면 많을수록 더 좋은 결과를 얻을 수 있지만, 계산량과의 관계를 고려했을 때 3-Optimal이 많이 사용된다.

2.2.2 Tabu Search 기법

tabu search 기법은 최적화 과정에서 항상 좋은 해를 가져다 주는 요소를 선택하기 보다는 tabu를 걸어서 조건에 따라서는 선택을 금지하게 만드는 프로그램이다. 특히 조합 최적화 문제에 좋은 해를 제공하는 기법으로 다른 기법에 비해 지역 최적점에 잘 빠지지 않는다. 즉, 현재해보다 목적함수를 더 나쁘게 하는 결과라도 더 좋은 해를 도출할 것이라는 기대를 가지게 될 경우 이동하는 것을 허락하게 된다.

tabu search는 다음과 같은 기본적인 요소들과 알고리즘을 수행하기 전에 몇 가지의 parameter가 정의되어야 한다.

- 해(configuration) : 변수의 해 또는 부여된 값
- 이동(move) : 조합 최적화 문제에서 현재 해와 관련하여 실현가능한 해를 만들어내는 과정
- 이동가능한 후보 해의 집합(set of candidate moves) : 현재 configuration에서 이동할 가능성이 있는 집합으로 만약 이러한 집합이 너무 크면 부분집합을 가지고 동작할 수 있다.
- 금지조건(tabu restrictions) : 이동시에 부과되는 금지하는 조건이고, 금지된 이동의 기록을 함으로써 list를 형성하는데 이것을 tabu list라고 한다.
- 희망기준(Aspiration criteria) : tabu가 걸려 있더라도 이동결과 기존 목적함수의 값이 지금까지의 값보다 더 좋다면 이 조건이 만족되고 이동되는 것이 허락될 수 있다.
- MTLS : tabu list의 크기
- NTS : 선택할 후보 해의 수
- ITMAX : 최대 반복횟수
- TLL : tabu list에 기록하는 수의 크기

위의 기본적인 요소들로부터 tabu search에 대한 기법을 살펴보면 다음과 같다.

우선 어떤 configuration을 갖고 시작하고, 이 configuration에 대한 목적함수를 평가하여 이동가능한 후보의 집합을 따른다. 이때 만약 이동의 최적해가 tabu list에 없거나 tabu가 걸려 있더라도 Aspiration criterion을 만족한다면, 이동을 선택하게 되고 새로운 configuration을 생각하게 된다. 하지만, 만약 tabu가 걸려있고, Aspiration criterion을 만족하지 않는다면 후보해 중에서 tabu가 걸려있지 않은 이동의 최적해를 선택하고 새로운 configuration을 생각하게 된다.

즉, 이러한 이동을 반복하여 tabu list에 기록하게 되고 다음에 다시 그 이동을 반복하게 되었을때 TLL의 크기는 MTLS의 크기에 1만큼 접근하고, 그 다음의 우선순위를 갖는 후보 해를 선택하는 것이다.

tabu list가 MTLS의 정해진 크기를 갖고 있고 어떤 이동이 계속 반복되어 TLL의 크기가 MTLS에 도달했을때 만약 새로운 이동이 다시 이 list에 입력되었다면

tabu list의 우선순위가 가장 높은 첫번째 이동은 tabu가 되지 않고 계속 진행하게 된다. 즉, tabu list는 circular인 셈이다.

이러한 과정을 정해진 반복횟수 ITMAX만큼 반복하게 되면 종료시에 최적의 해를 얻게되는 것이다.

2.3 손실최소화를 위한 배전계통 재구성 기법

본 논문에서는 손실최소화를 위한 배전계통을 재구성하기 위하여 3-Optimal 알고리즘을 사용하였는데, K-optimal 알고리즘인 경우는 초기에 정한 값에서 지나치게 좋은 해를 찾아서 가려고 하는 성격때문에 전역최소점에 이르지 못하고 지역최소점에 이르는 경향이 있다. 그래서 3-Optimal 알고리즘에 Tabu Search 기법을 적용하여 현재 보다 목적함수를 나쁘게 하는 경우라도 선택하게 함으로써 초기값(configuration)이 좋지 못하더라도 점차 더 좋은 해에 접근하도록 하였다.

2.3.1 K-optimal 알고리즘에서 Tabu Search 기법의 적용

배전계통을 재구성하는 실제 구현에서 MTLs의 크기는 메모리의 크기와 밀접한 관계가 있으므로 적절히 선정되어야 할 것이다. 본 논문에서는 MTLs를 3으로 하였고, ITMAX는 400으로 NTS는 10으로 정하였다.

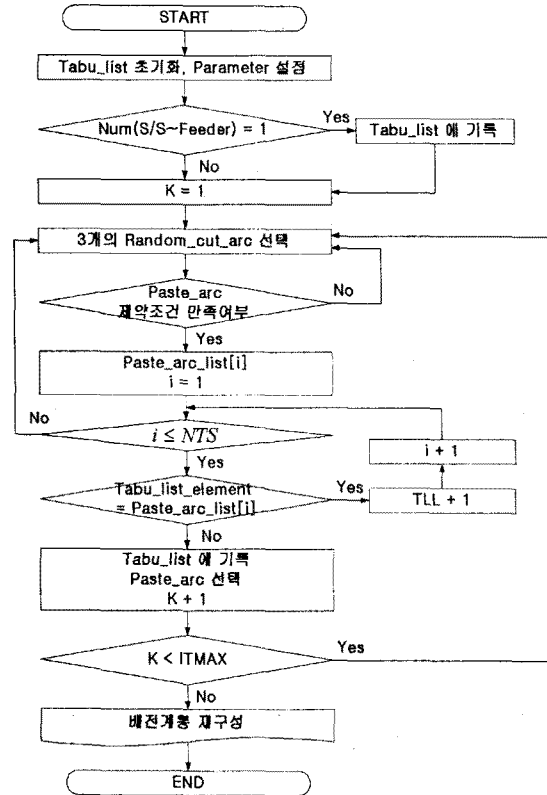


그림 3 배전계통 재구성을 위한 Tabu Search 기법

즉, 임의의 3군데 아크를 절단하여 제약조건을 만족하는 범위내에서 아크를 각각 연결한 후에 그 중에 목적함수를 최소로 하는 arc_list를 10개 선정한다. 그리고 tabu list에 있는 원소와 비교하면서 같은 것이 존재하면 tabu 횟수를 늘려서 MTLs의 크기에 근접하게 하고, 그 다음의 우선순위를 갖는 arc_list를 선택하는 방식으로 결국 선택해야 할 3개의 아크(paste_arc)가 모두 tabu list에 올라와 있지 않은 경우가 될 때까지 아

크(cut_arc) 선택을 반복한다. 그래서 paste_arc를 선택하고 이러한 루프를 종료조건에 도달할 때까지 반복하게 함으로써 Baran의 32모선 예제 모델에 적용했을때 다음과 같은 결과를 도출하였다.

표 1 Baran의 32모선 예제 계통 적용시 총 손실 비교

방법	오픈된 개폐기	선로손실 [KW]
가지교환 방법	7-20, 8-14, 11-21, 17-32, 24-28	118
제안한 방법	7-8, 7-20, 12-13, 15-16, 22-23	116.47

즉, 제안한 방법이 가지교환 방법보다 선로손실 관점에서 더 나은 결과를 얻었다. 여기서, 두 방법으로 구한 해가 차이를 나타내었는데, 이는 제약조건 및 프로그램 효율성등의 차이로 인하여 나타난 것이라고 여겨진다. Tabu Search 적용시 선정된 Parameter들을 변경하여 시험해 봄으로써 좀 더 우수한 결과를 얻어낼 수 있을것으로 기대한다.

3. 결 론

Tabu Search 처럼 로컬미니엄에서 글로벌 미니엄으로 옮겨가는 기법인 경우의 가장 큰 문제점으로 지적되고 있는 CPU time의 경우 배전계통의 대부분이 구분개폐기로 되어있고, 연계개폐기의 수는 극히 적기 때문에 3-optimal 알고리즘을 적용하여 아크를 선택할 경우 선택의 폭이 좀 더 단순해지므로 Tabu list에 저장하고 루프를 종료하는 시간도 그리 오래 걸리지 않았다. 또한, 노드가 많다면 상대적으로 Tabu가 걸릴 가능성도 희박해지므로 충분히 가능한 결론을 얻을 수 있었다. 특히, 32모선의 예제에 적용한 결과에서 보는 것과 같이 선로 손실의 감소를 가져올 수 있었다.

제안한 기법에서 tabu search의 학문적인 부분을 보강하여 개선성을 줄이고, 자를 아크의 수를 변경해 가면서 적절한 Cut and Paste 기법에 대해 좀 더 연구하고, tabu search 기법을 다른 알고리즘에도 적용하여 발전시키면 후에 실제계통에도 충분히 적용할 수 있을것으로 기대한다.

(참 고 문 헌)

- [1] Mesut E. Baran, Felix F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, 1989
- [2] Khaled S. Al-Sultan, "A Tabu Search Approach to the Clustering Problem", Pattern Recognition, Vol. 28, No. 9, pp. 1443-1452, 1995
- [3] H. D. Chiang, R. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems : Part 2 : Solution Algorithms and Numerical Results", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, pp. 1568-1574, July, 1990
- [4] Gunther Brauner, Manfred Zabel, "Knowledge based Planning of Distribution Networks", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 942-948, May., 1994
- [5] "프로그래머세계", 신영미디어, 1995. 8-11, 1998.10-12, 1999. 1.
- [6] K. Nara, T. Satch, M. Kitagawa, "Distribution System Loss Minimum Reconfiguration by Genetic Algorithms", Third Symposium on expert systems application for power systems, pp. 724-730, April, 1991