

PC Clustering을 이용한 배전계통 선로 재구성 최적화 방법 개발

송명기, 문경준, 김형수, 박준호
부산대학교 전기공학과

A Development Of Optimal Reconfiguration Method
For Distribution Systems Using PC Clustering

Myoung-Kee Song, Kyeong-Jun Mun, Hyung-Su Kim, J. H. Park
Dept. of Electrical Engineering, Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea

Abstract - 본 논문에서는 경험적 최적화 알고리즘인 타부 탐색법을 이용한 배전계통 선로 재구성 시스템을 개발하였다. 제안한 알고리즘은 PC Clustering으로 병렬 처리하여 배전계통 선로 재구성 문제의 최적해 탐색에 소요되는 계산시간을 단축하고, 배전자동화 시스템의 성능개선을 도모하고자 한다. 개발한 PC Cluster System은 이용자의 편의를 위해서 MS Windows환경에서 구축하였고, Visual C++환경에서 개발하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 참고 문헌의 예제 계통에 적용한 후 종래의 방법에 의해 구한 재구성 방안과 비교함으로써 제안한 방법의 유용성을 입증하였다.

1. 서 론

배전계통은 송전계통과는 달리 방대하고 복잡하며 여러 종류의 부하들이 존재하고 있어서 부하들의 변화 속성 때문에 계통변경이 자주 일어난다. 또한 산업의 발달과 생활수준의 향상에 따른 가정용 전력수요의 증가 등으로 인하여 배전계통은 점점 확장되고 복잡해지고 있다. 이에 따라 점차 증가되는 배전선로의 손실을 감소시키기 위해 보다 효율적인 전략이 요구된다. 도심 지역에서의 배전계통은 고장 지점을 쉽게 감지할 수 있도록 연계개폐기에 의해 방사상 형태의 하위구조로 나누어진다. 이 경우 개폐기의 on/off 동작을 통해 배전 계통의 손실을 최소화 하기위한 재구성이 수행된다. 그러나 배전계통에는 수많은 개폐기가 존재하며 고려해야 할 제약 조건이 많기 때문에 적정 시간 내에 전역 최적해를 찾기가 쉽지 않다.

배전계통 선로 재구성에 관한 연구로는 모든 개폐기를 투입한 상태의 망 배전계통으로 시작해서 연속적으로 개폐기를 투입해가며 방사상 구성이 될 때까지 시스템의 손실을 계산하는 분기한계법(Branch and Bound) [1], 개폐기 조작을 통한 분기교환 방식(Branch Exchange) [2], 조합적인 최적화 문제에 좋은 해를 제공하는 SA(Simulated Annealing) 기법 [3], 전문가 시스템 [4], 전역적인 최적화 기법인 GA (Genetic Algorithm) [5], 경험적인 최적화 알고리즘인 TS(Tabu Search)에 병렬기법 [6] 등이 선로재구성 문제에 적용되었으나, 많은 계산 시간이 소요되거나, 국부 최적해에 수렴하는 문제점 등 각 기법들의 한계 때문에 적용에 어려움이 있다. 최근에는 GA, SA, TS을 결합하여 배전계통 선로 재구성 문제에 적용하고 있는 추세이다.

최근에는 병렬 컴퓨터를 이용하여 계산시간을 단축할 수 있는 방법들이 제시되고 있지만 병렬 컴퓨터는 매우 고가이므로 쉽게 이용할 수 없고 확장이 용이하지 않다는 단점을 가진다. 이에 비해 PC Clustering은 개인용 컴퓨터의 급속한 발전과 네트워크 기술의 일반화에 따라 다수의 저렴한 PC들을 고속 네트워크로 연결하여 마치 하나의 컴퓨팅 시스템처럼 사용하는 것이다. 따라서 PC Clustering은 기존의 병렬 컴퓨터와는 달리 저가이고

누구나 쉽게 만들 수 있고 추후 확장이 용이하다.

따라서 본 논문에서는 PC Clustering을 이용하여 Tabu 탐색법을 병렬처리하여 최적해 탐색에 소요되는 계산시간을 단축함으로써 실시간으로 적용 가능한 방법을 제시하였다. 제안한 방법을 69모선 예제 계통 모델 [7]에 적용하여 해의 탐색성능 및 탐색시간이 향상됨을 확인함으로써 제안한 방법을 실 배전 계통에 충분히 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 본 론

2.1 문제의 정식화

배전계통 선로 재구성 문제는 선로의 용량, 전압강하, 방사상 구성 등의 제약조건을 만족하면서 선로손실이 최소가 되도록 개방할 개폐기의 위치를 결정하는 것이다.

따라서 본 논문에서는 배전계통에서의 선로손실을 목적함수로 설정하였으며 이를 식 (1)에 나타내었다.

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

P_i, Q_i : i 번째 모선의 유, 무효 전력

V_i : i 번째 모선의 전압

r_i : i 번째 모선과 $i+1$ 번째 모선 사이의 선로 저항

제약조건으로는 선로의 용량, 전압강하, 방사상 구성여부를 고려하였으며 다음과 같이 나타내었다.

- 선로용량 제약조건 $I_k \leq I_{lim}$ (2)

I_k : k 번째 모선의 유입 전류

I_{lim} : 허용 전류 용량

- 전압강하 제약조건 $V_k \geq V_{lim}$ (3)

V_k : k 번째 모선의 전압

V_{lim} : 허용 전압 하한치

- 방사상 구성

2.2 선로 재구성 방법

2.2.1 타부 탐색법

1980년대 중반에 Glover에 의해서 연구되기 시작한 타부 탐색법은 경험적인 최적화 알고리즘으로 대상 문제에 관한 지식을 활용하기 용이한 최적화 알고리즘으로 조합 최적화 문제에 우수한 성능을 나타낸다. 유전알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링 등과 같은 최적화 알고리즘

은 대상 문제의 복잡도가 높고 탐색공간이 클 경우 지역 최적해에 수렴하는데 계산시간이 많이 소요된다. 이에 비해 타부 탐색법은 다른 최적화 알고리즘에 비해 최적해 탐색속도가 비교적 빠르고 알고리즘이 단순하여 쉽게 프로그램화 할 수 있고 대상 문제에 관한 지식을 이용하여 이웃해를 생성함으로써 복잡한 문제에 대해 효율적인 탐색을 할 수 있다. 또한 새로운 이웃해를 탐색하는 동안에는 이전에 탐색한 영역을 다시 탐색하는 것을 방지할 수 있도록 타부 리스트를 사용함으로써 국부 최적해에 수렴하는 것을 방지할 수 있다. 타부 리스트에 속한 해 일지라도 평가 결과가 정해진 조건을 만족할 경우에는 이를 새로운 이웃해로 선정할 수 있으며, 이를 열망 조건이라 한다. 일반적으로 현재까지 탐색한 최적해보다 타부 리스트에 속한 해의 평가 결과가 더 우수한 경우에 열망 조건이 만족된다.

2.2.2 PC Cluster System 구성

본 논문에서는 PC Clustering으로 타부 탐색법을 병렬 처리하여 최적해 탐색에 소요되는 계산시간을 단축하고 이를 실시간으로 적용할 수 있도록 하였다. PC Cluster System은 컴퓨터 네트워크의 일반화에 따라 다수의 저렴한 PC들을 고속 네트워크에 연결하여 마치 하나의 컴퓨팅 시스템처럼 사용하는 것으로 이를 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서와 같이 각 컴퓨터를 스위칭 허브를 통해 연결하여 소규모 네트워크를 구성할 수 있으며, 이것을 인터넷으로 연결함으로써 원격 접속이 가능하다. 운영체제로는 사용하기 쉬운 윈도우 환경을[9] 사용하였으며, 미들웨어로는 널리 사용되고 있는 MPI(Message passing Interface)[10-11]를 사용하였고 Visual C++ 6.0에서 병렬 실행환경을 구현하였다. 이러한 클러스터 시스템의 경우 성능 개선을 위한 컴퓨터의 증설 및 Upgrade는 스위칭 허브의 노드에 추가 또는 교체하는 방식으로 간단히 이루어질 수 있다. 따라서 기존의 병렬 컴퓨터에 비해 차후의 성능개선이 용이하다는 장점을 가진다.

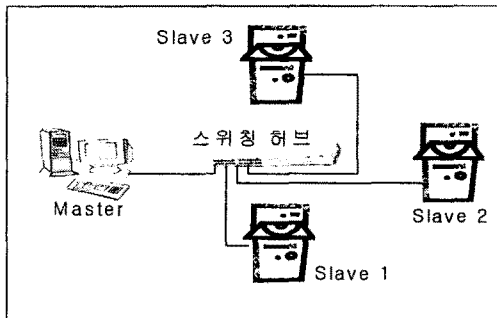


그림 1. 4 node PC Cluster System

2.2.3 PC Clustering을 이용한 타부 탐색법의 병렬화

타부 탐색법의 병렬화 방법으로는 동일한 초기해로부터 각 프로세서마다 이웃해 생성 방법을 달리함으로써 서로 다른 영역을 탐색하는 방법, 전체 탐색 영역을 분할하여 각 프로세서마다 다른 영역을 탐색하는 방법, 각 프로세서가 서로 다른 초기해로부터 독립적으로 탐색하는 방법 등이 제시되었다[8]. 본 논문에서는 타부 탐색법의 병렬화 방법으로 이웃해를 각 프로세서별로 나누어 평가하는 방법을 사용하였다. 타부 탐색법에서 매 반복시에 그림 2에서와 같이 전체 이웃해를 각 노드에 나누어 할당하여 병렬로 평가함으로써 최적해 탐색시간을 향상시켰다. 그리고 국부 최적해에 수렴하는 경우를 방지하기 위해 일정한 반복 기간동안 현재해의 속성인 개

된 개폐기를 저장하여 발생빈도가 낮은 속성을 가지는 해로 이동하도록 다양화 전략을 적용하였다.

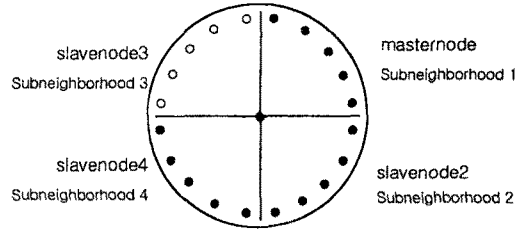


그림 2. 이웃해 분할 방법

그림 3은 병렬 타부 탐색 알고리즘의 순서도를 나타내고 있으며, 수행절차는 다음과 같다.

- 단계1) master에서 초기해 생성 및 평가
- 단계2) node수만큼 초기해 복제
- 단계3) 각 node에 해 전송
- 단계4) 각 node별로 이웃해 생성 및 평가 후 best 선정
- 단계5) 각 node의 best를 master에서 평가 후 최종 best 선정
- 단계6) 일정 반복 횟수 동안 최적해가 갱신되지 않으면 다양화 전략 실행
- 단계7) 종료조건이 만족할 때까지 단계2)에서 단계6)까지 반복

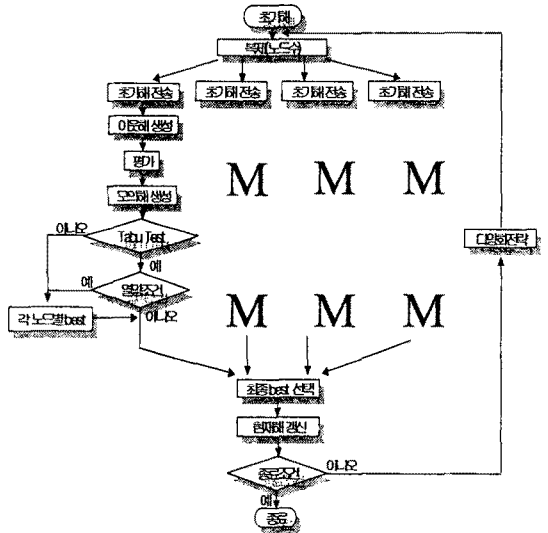


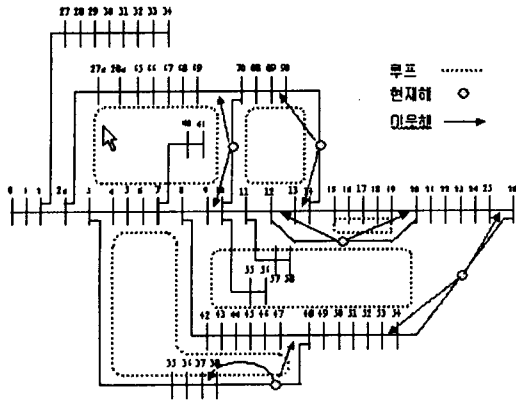
그림 3. 제안한 병렬 타부 탐색법 흐름도

2.3 사례연구

본 논문에서는 배전계통 선로 재구성 방법으로 PC Clustering을 이용하여 타부 탐색법을 병렬화하였다. 제안한 방법의 효용성을 입증하기 위하여 그림 4와 같은 69모선 예제계통에 적용하였다. 69모선 예제 시스템은 5개의 연계 개폐기를 가지고 있으며 기준 전압은 12.66[KV], 전체 부하는 3802.12[KW], 2694.60 [KVAR]이다. 타부 탐색법을 적용하기 위한 파라메타는 다음과 같다.

- 최대 반복 회수 : 150회
- Tabu list 크기 : 10

그림 4 69 모선 배전계통



3. 결 론

본 논문에서는 배전계통 선로 재구성 문제에 타부 탐색법을 적용하였고 탐색성능 및 계산시간의 개선을 위해서 PC Clustering을 적용하였다. 이용의 편리성과 추후 확장이나 성능 개선의 용이를 도모하기 위하여 Windows와 Visual C++환경에서 PC Clustering의 병렬화를 시도하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 참고문헌의 예제계통에 적용해 본 결과, 해의 탐색성능 및 해의 탐색시간에서 우수한 성능을 가짐을 확인할 수 있었다. 특히 제안한 방법은 일반 개인용 PC를 사용함으로써 추가 비용 없이 성능개선이 가능하므로 많은 계산이 요구되는 실 배전계통에 적용할 경우 여러 가지 장점이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [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. 1492-1498, April 1989.
- [2] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 4, No. 2, pp.1401-1407, April 1989.
- [3] H. D. Chiang, R. Jean-Jumeau, "Optimal network reconfiguration in distribution systems : Part 2 : Solution Algorithms and numerical results", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, No. 3, pp. 1568-1574, July 1990.
- [4] Gunther Brauner, Manfred Zabel, "Knowledge based planning of Distribution networks", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, No. 2, pp.942-948, May 1994.
- [5] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, and T. Tshihara, "mplementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum reconfiguration", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, No. 3, pp.1044-1051, August 1992.
- [6] Hiroyuki Mori, Yoshihiro Ogita, "A parallel tabu search based method for reconfigurations of distribution systems", IEEE Power engineering society summer meeting, vol 1, pp 63-78, 2000.
- [7] M. E. Baran, F. F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, No. 1, pp. 735-743, January 1989.
- [8] Hyung-Su Kim, Kyeong-Jun, "Large scale unit commitment using parallel tabu search", Trans. on KIEE, vol. 50A, no. 11, NOV. 2001.
- [9] J.-Y. Choi, J.-R. Shin, M.-H. Kim, "Parallel computing environment based on windows operating system", 한국항공우주학회지, May 2002.
- [10] <http://www-unix.mcs.acl.gov/mpi/mpich>
- [11] Snir, Marc, "MPI : The complete reference", Cambridge, Mass : MIT press 2nd ed, 1998.

타부 탐색시 초기해는 (10-70), (14-90), (38-48), (26-54), (12-20) 사이의 개폐기가 개방된 상태로 설정하였고, 이유험 구성은 그림 4에서와 같이 각 루프상에서 현재 개방된 개폐기의 인접 개폐기를 개방하도록 함으로써 총 10개의 이웃해가 발생한다. 이웃해를 각 프로세서 별로 3, 3, 2, 2개씩 분할하여 평균한 후 master에서 다음 반복시의 현재해를 선택하도록 하였다.

제안한 방법으로 계산한 결과 (10-70), (11-12), (47-48), (50-51), (12-20) 사이의 개폐기가 개방된 상태 일 때 최적의 결과를 얻을 수 있었다. 초기 구성의 조류 계산 결과 손실은 204.8[KW]였는데 프로그램 수행 후 최적 구성시의 손실은 49.8852[KW]로 75.66%의 손실 감소가 있었다. 그림 5와 표 1에 PC Clustering에서 병렬화를 위해 사용한 프로세서의 수를 1~4대로 변경하면서 수행한 경우 각각의 계산시간과 개선비율을 나타내었다.

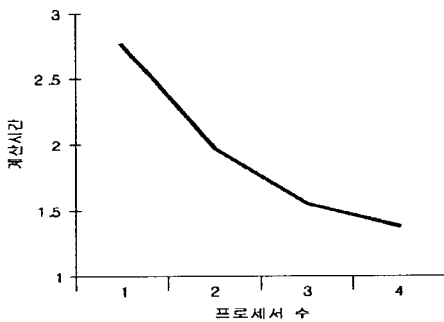


표 1. 프로세서 수에 따른 개선비율

프로세서 수	1	2	3	4
개선비율	1	1.29	1.44	1.5

제안한 방법으로 선로 재구성 최적화 수행시 프로세서수가 증가함에 따라 계산시간이 단축됨을 확인할 수 있었다.