

PC Clustering을 이용한 배전계통 선로재구성 및 커패시터 설치 방안

송명기*, 문경준*, 김형수*, 박준호*, 이화석**
 * 부산대학교 전기공학과, ** 거제대학 전기과

Reconfiguration and Capacitor Control in Distribution System
 Using PC Cluster System

Myoung-Kee Song*, Kyeong-Jun Mun*, Kyeong-Jun Mun*, J. H. Park*, Hwa-Seok Lee**
 Electrical Engineering, Pusan National Univ., ** Electrical Engineering, Koje College

Abstract - 본 논문에서는 확률적인 전역 최적해 탐색 방식인 유전알고리즘과 경험적인 최적화 알고리즘인 Tabu 탐색법을 이용하여 실시간으로 적용 가능한 배전계통 선로 재구성 및 커패시터 용량결정 방안을 제안하고자 한다. 제안한 알고리즘은 PC Cluster System으로 병렬처리하여 배전계통의 손실 최소화를 위한 선로 재구성 및 커패시터 용량 결정문제의 최적해 탐색에 소요되는 계산시간을 단축하고, 실시간 지원시스템의 성능개선을 도모하고자 한다. PC Cluster System은 이용자의 편의를 위해서 MS Windows 환경에서 구축하였고, Visual C++ 환경에서 개발하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 참고 문헌의 예제 계통에 적용한 후 종래의 방법과 비교함으로써 제안한 방법이 해의 탐색속도 및 해의 성능면에서 우수함을 입증하였다.

증인 타부 탐색법(tabu search:TS)를 병렬화하는 방법[6]등이 적용되었고, 커패시터 설치에 관한 연구로는 커패시터의 설치 위치와 크기를 비선형이고 연속적인 함수로 정식화하여 gradient를 이용하여 결정하는 방법[7], 주 문제와 부 문제로 나누어 커패시터의 설치 위치와 종류 및 용량을 결정하는 방법[8], 탐색공간을 줄이기 위해 감도 분석법으로 후보 위치를 결정한 후 타부 탐색법으로 용량을 결정하는 방법[9] 등이 적용되었다.

기존의 병렬 알고리즘 구현시에는 주로 병렬 컴퓨터를 이용하였으나 병렬 컴퓨터는 매우 고가이므로 쉽게 이용할 수 없고 확장이 용이하지 않다는 단점을 가진다. 이에 비해 PC Cluster는 개인용 컴퓨터의 급속한 발전과 네트워크 기술의 일반화에 따라 다수의 저렴한 PC들을 고속 네트워크로 연결하여 마치 하나의 컴퓨팅 시스템처럼 사용하는 것이다. 따라서 PC Cluster System은 기존의 병렬 컴퓨터와는 달리 저가이고 누구나 쉽게 만들 수 있고 추후 확장이 용이하다는 장점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 PC Cluster를 이용하여 국부 탐색능력이 우수한 Tabu 탐색법과 전역 탐색능력이 우수한 GA를 병렬처리하여 최적해 탐색에 소요되는 계산시간을 단축함으로써 실시간으로 적용 가능한 방법을 제시하였다. 제안한 방법을 69모선 예제 계통 모델[8]에 적용하여 해의 탐색성능 및 탐색시간이 향상됨을 입증함으로써 제안한 방법을 실 배전 계통 적용할 가능성을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

배전계통은 송전계통과는 달리 방대하고 복잡하며 여러 종류의 부하들이 혼재하고 있어서 부하들의 변화 속도 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. 배전계통의 선로 손실을 줄이는 방법은 크게 개폐기의 조작을 통하여 선로를 재구성하는 방법과 무효전력을 보상할 수 있는 커패시터의 설치위치 및 크기를 합리적으로 결정하는 방법으로 나눌 수 있다. 도심 지역에서의 배전계통은 개폐기에 의해 방사상 형태의 구조로 이루어져 있으며 이 경우 개폐기의 투입/개방을 통한 배전 계통의 선로 손실 및 말단 전압강하를 감소시킬 수 있다. 또한 배전계통에 커패시터를 설치 및 운용함으로써 전압강하 제약조건을 만족시키는데 도움을 주면서 선로 손실까지 줄일 수 있다. 그러나 배전계통에는 다수의 조작 가능한 개폐기가 존재하며 고려해야 할 제약 조건이 많고 커패시터 운용을 고려할 경우 최적해를 구하는데 필요한 조합의 수가 증가하므로 적정 시간 내에 전역 최적해를 찾기가 쉽지 않다.

일반적인 커패시터 설치문제는 배전계통에서 커패시터의 설치위치, 수, 유형(fixed or switched) 및 용량을 결정하는 문제이지만 본 논문에서는 선로손실과 전압변동률의 향상을 위하여 커패시터의 설치위치, 수, 유형은 미리 설정해 두고 커패시터의 용량만을 결정하였다.

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 유전 알고리즘(genetic algorithm:GA)[5], 경험적인 최적화 알고리

2. 본 론

2.1 문제의 정식화

배전계통 손실 최소화를 위한 선로 재구성 및 커패시터 용량 결정문제는 선로의 용량, 커패시터의 용량, 전압강하, 방사상 구성 등의 제약조건을 만족하면서 선로 손실이 최소가 되도록 개방할 개폐기의 위치 및 커패시터의 용량을 결정하는 것이다. 일반적인 커패시터 설치 문제는 커패시터 설치비용 및 선로손실을 최소화 하는 문제이지만 본 논문에서는 비용은 목적함수로 고려하지 않고 손실만을 고려하였다.

- 목적함수

$$\min \sum_{k=1}^n r_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{|V_k|^2} \quad (1)$$

여기서, P_k, Q_k : k 번째 버스의 유, 무효 전력

V_k : k 번째 버스의 전압

r_k : k 번째 버스와 $k+1$ 번째 버스 사이의 선로 저항

- 제약조건

① 선로용량 제약조건

$$I_k \leq I_{lim} \quad (2)$$

여기서, I_k : k 번째 버스에서 선로에 공급하는 전류

I_{lim} : 허용 전류용량

- ② 전압강하 제약조건
 $V_{min} \leq V_k \leq V_{max}$ (3)
 여기서, V_k : k번째 버스의 전압
 V_{min} : 허용전압 하한치
 V_{max} : 허용전압 상한치
- ③ 커패시터 용량 제약조건(switced type)
 $0 \leq Q_{ck} \leq Q_{lim}$ (4)
 Q_{ck} : k번째 버스에 투입된 커패시터 용량
 Q_{lim} : 최대 커패시터 용량
- ④ 방사상 구성 제약조건

2.2 배전계통 손실 최소화를 위한 선로 재구성 및 커패시터 설치 방법

2.2.1 PC Cluster System 구성

본 논문에서는 PC Clustering으로 타부 탐색법 및 유전알고리즘을 병렬처리하여 최적해 탐색성능 향상 및 최적해 탐색에 소요되는 계산시간을 단축하였다. PC Cluster System은 컴퓨터 네트워크의 일반화에 따라 다수의 저렴한 PC들을 고속 네트워크에 연결하여 마치 하나의 컴퓨팅 시스템처럼 사용하는 것으로 이를 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서 나타낸 바와 같이 각 컴퓨터는 스위칭 허브를 통해 상호 연결하여 소규모 네트워크를 구성한 후 이것을 인터넷으로 연결함으로써 원격 접속이 가능하게 하였다. 운영체제로는 일반적으로 사용하기 쉬운 윈도우 환경을[9] 사용하였으며, 미들웨어로는 널리 사용되고 있는 MPI(Message passing Interface)를 사용하였고 Visual C++ 6.0에서 병렬 실행환경을 구현하였다. 이러한 클러스터 시스템의 경우 성능 개선을 위한 컴퓨터의 증설 및 Upgrade는 스위칭 허브에 노드를 추가 또는 교체하는 방식으로 간단히 이루어질 수 있다. 따라서 기존의 병렬 컴퓨터에 비해 차후의 성능개선이 용이하다는 장점을 가진다.

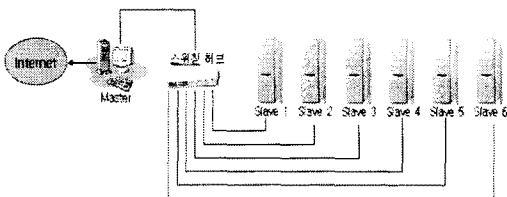


그림 1. PC Cluster System

2.2.2 PC Clustering을 이용한 타부 탐색법과 유전알고리즘의 병렬화

유전 알고리즘은 자연의 진화과정을 모의한 확률적 탐색기법으로 하나의 해가 아닌 해집단을 사용함으로써 비교적 빠른 시간에 우수한 해를 빠르게 찾아 낼 수 있지만 세대가 어느 정도 지나면 더 좋은 해가 출몰되지 못하여 조기수렴하는 단점이 있다. 한편 타부 탐색법은 메모리를 효율적으로 사용하는 경험적인 최적화 기법으로 국부 탐색능력은 뛰어나지만 경험적으로 이루어지기 때문에 초기해에 따라서 전역 최적해에 도달하지 못하거나 계산시간이 오래 걸리는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 두 알고리즘의 장·단점을 상호 보완하여 새로운 Parallel Genetic-Tabu 탐색 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 가장 큰 특징은 유전 알고리즘을 이용하여 전역해 근방을 탐색한 후 해를 찾고 이를 타부 탐색법에 적용함으로써 보다 빨리 전역 최적해로 수렴할 수 있도록 하였다. 제안한 알고리즘의 순서는 그림 2와 같다.

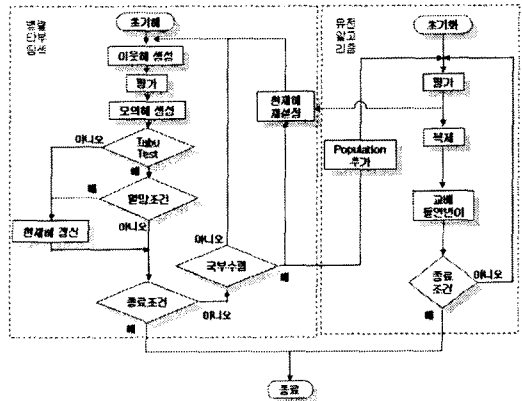


그림 2. 병렬 Genetic-Tabu 탐색법 흐름도

그림 2에 나타낸 바와 같이 제안한 알고리즘은 여러 노드를 유전 알고리즘, 수행 노드와 나머지를 타부 탐색법 수행 노드로 나누어 할당하였다. 유전알고리즘은 전역해 탐색과 타부 탐색의 다양화 역할을 수행하고, 타부 탐색은 유전 알고리즘 수행 노드에 의해 구한 해집단의 일부를 각 노드별로 할당해 타부 탐색시 현재해로 재설정함으로써 전역해 근방의 국부탐색 성능을 강화하는 역할을 수행하도록 하였다. 알고리즘 수행절차는 유전알고리즘의 해집단중 우수한 해를 현재해로 재설정 과정에서 타부 탐색의 현재해로 설정하여 집중적으로 탐색할 수 있도록 하였고, 국부 최적해에 수렴하는 것을 방지하기 위하여 유전알고리즘의 해집단 중 성능이 우수하지 않은 해도 확률적으로 선택하여 타부탐색의 현재해로 재설정하여 다른 영역으로의 탐색을 유도하였다. 그리고, 각 노드에서 타부탐색시 찾은 최적해와 현재해를 유전알고리즘의 해집단에 추가함으로써 유전알고리즘이 조기수렴하는 것을 방지하였다.

2.4 사례연구

제안한 방법의 효율성을 입증하기 위하여 제안한 방법을 그림 3과 같은 69버스 예계통에 적용하였고, 재구성한 수행한 경우와 재구성 방안 및 커패시터 투입 용량을 동시에 결정한 경우를 각각 타부탐색, 유전알고리즘 및 제안한 방법을 적용한 후 그 성능을 비교 검토하였다. 본 논문의 예계통은 5개의 연계 개폐기로 구성되어 있고 기준 전압은 12.66[KV], 전체 부하는 3802.12[KW], 2694.60 [KVAR]이며 이를 그림 3에 나타내었다.

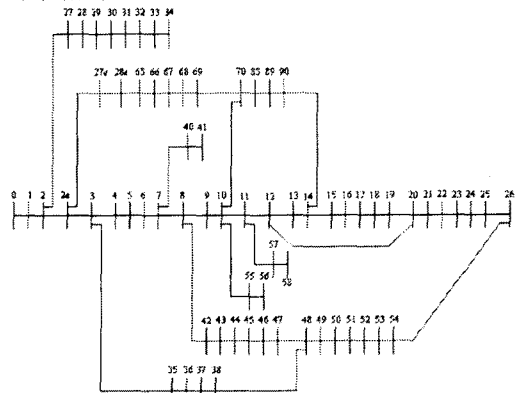


그림 3 69 버스 배전계통

커패시터의 설치 수는 5대이고 설정된 위치에 각각 3 Bank씩 설치하였다. 커패시터의 설치위치, 용량, 유형은 다음과 같다.

- 설치 위치 : 11, 18, 47, 52, 69
- 설치 용량 : 300[kVAR/Bank]
- 유형 : switched type

그림 4에서는 재구성시 유전알고리즘, 타부탐색법과 제안한 방법을 비교하였고, 그림 5에서는 커패시터를 추가하여 비교하였다. 그림 4 및 그림 5에 나타난 바와 같이 제안한 방법이 유전 알고리즘 또는 타부 탐색법만 단독으로 적용한 경우보다 해의 탐색속도 및 해의 탐색 특성 면에서 우수함을 확인할 수 있었다. 즉, 유전알고리즘에서 탐색한 우수해를 타부탐색시 현재해로 재설정함으로써 우수한 해를 빠르게 찾아내고, 우수하지 않은 해에 대해서도 타부 탐색시 각 노드에서 확률적으로 선택하여 현재해로 재설정함으로써 전역탐색의 성능도 높일 수 있었다.

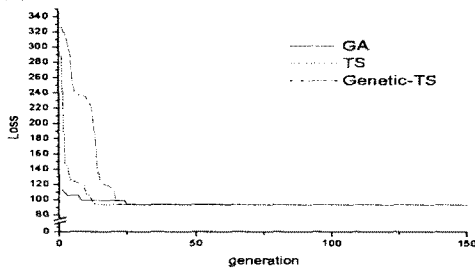


그림 4 재구성시 세대별 손실추이

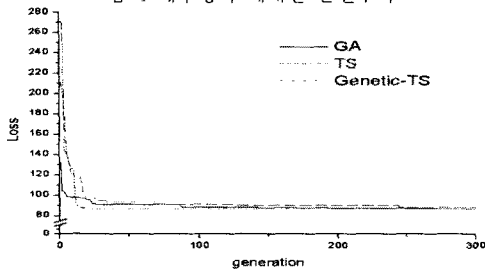


그림 5 재구성 및 커패시터 운용시 세대별 손실추이

예제 계통의 초기 구성 및 제안한 알고리즘 수행 이후의 예제 계통의 최적 구성을 표 1에 나타내었다. 또한 재구성 및 커패시터 운용시의 최적 운용방안을 표 2에 나타내었다.

표 1. 초기구성 및 제안한 방법에 의한 최적 재구성

초기 구성	개폐기위치	10-70	14-90	38-48	26-54	12-20
	손실[kW]	204.8				
재구성 이후 최적구성	개폐기위치	10-70	13-14	47-48	50-51	14-20
	손실[kW]	93.79				

표 2. 커패시터 운용용량 및 최적 재구성 방안

커패시터 설치위치	11	18	47	52	69
용량[kVar]	300	300	0	0	600
개폐기위치	10-70	13-14	47-48	50-51	14-20
손실[kW]	87.46				

재구성만 수행한 경우에는 해공간이 비교적 작아서 세 방법 모두 좋은 결과를 나타내었고, 재구성 및 커패시터 운용 방안 결정 문제에는 제안한 방법이 가장 좋은 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 배전계통 선로 재구성 및 커패시터 용량 결정 문제에 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 개선하기 위해서 PC Cluster System을 이용하여 새로운 Parallel Genetic-Tabu 탐색 알고리즘을 제안하였다. 개발한 알고리즘은 이용의 편리성과 추후 확장이나 성능 개선의 용이를 도모하기 위하여 Windows와 Visual C++환경에서 구현하였다. 제안한 방법은 타부 탐색법의 국부탐색 능력과 유전 알고리즘의 전역탐색 능력을 병렬화를 통해 결합시킴으로써 전역 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 개선하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 참고문헌의 예제계통에 적용해 본 결과 기존의 방법에 비해 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있었다. 특히 제안한 방법은 일반 개인용 PC를 사용함으로써 성능개선시 비용이 저렴하므로 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 Trans. 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 Trans. 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 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]K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, and T. Tshihara, "Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum reconfiguration", IEEE Trans. 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]J.Grainger, S.H.Lee, "Optimal Size and Location of shunt Capacitors for Reduction of Losses on Distribution Feeders", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems ,Vol.PAS-100, pp.1105-1116, March, 1981
- [8]M. Baran, F. Wu, "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp.725-734, Jan., 1989
- [9]Y. C. Huang, H. T. Yang, "Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System using Tabu Search Approach", IEEE Trans. on Power System, Vol. 11, No. 4, pp.1868-1873, November, 1996