

배전계통 고장복구 문제에 PC 클러스터 시스템을 이용한 병렬 유전 알고리즘-타부탐색법 구현

문 경준*, 김 형수*, 박 준호*, 이 화석**, 강 현태***
 * 부산대학교 전기공학과, ** 거제대학 전기과, *** (주)한국수력원자력

Parallel Hybrid Genetic Algorithm-Tabu Search for Distribution System Service Restoration Using PC Cluster System

K. J. Mun*, H. S. Kim*, J. H. Park*, H. S. Lee**, H. T. Kang***
 * Dept. of Electrical Engineering, Pusan National Univ., ** Kojje College, *** Korea Hydro and Nuclear Power

Abstract - This paper presents an application of parallel hybrid Genetic Algorithm-Tabu Search (GA-TS) algorithm to search an optimal solution of a service restoration in distribution system.

In parallel hybrid GA-TS, after GA operations, strings which are not emerged in the past population are selected in the reproduction procedure. After reproduction operation, if there are many strings which are in the past population, we add new random strings into the population. If there's no improvement for the predetermined iteration, local search procedure is executed by TS for the strings with high fitness function value.

To show the usefulness of the proposed method, developed algorithm has been tested and compared on a practical distribution system in Korea.

1. 서 론

배전계통 고장복구 문제는 운전 중인 배전계통의 고장 발생시에는 해당 고장구간을 파악하여 자동으로 고장구간을 분리하고 전선 정전구간의 복구 방안을 제시해야 하며, 이 경우 계통의 방사상 구성 상태와 연계 피더의 예비력, 개폐기 조작 횟수 최소화, 부하 균등화, 변압기 및 피더의 용량 제약조건, 전압강하 제약조건 등의 여러 제약조건이 수반되는 조합 최적화 문제이다.

배전계통의 고장복구에 관한 연구로서는 경험적 방법 [1], 가지교환 방법[2], 전문가 시스템[3], 신경회로망[4], 퍼지 시스템[5]을 이용한 방법 등이 여러 연구자들에 의해 제안되었으나, 계산 결과가 근사적이거나 국부 최소값일 가능성이 크다. 이에 비해, 최근에는 경험적 탐색방법인 타부 탐색법(TS)과 전역 최적해 탐색능력을 가진 유전 알고리즘(GA)이 배전계통 고장복구 문제에 응용될 가능성이 제시되고 있다[6,7]. 따라서 최근에는 이를 해결하기 위한 한 방법으로서 GA, SA, TS 등을 병렬화하여 각 알고리즘의 장점을 적절히 활용함으로써 계산시간 및 최적해 탐색성능을 개선하려는 연구가 시도되고 있다[8].

병렬처리 기법은 여러 개의 프로그램들 또는 프로그램의 분할된 부분들을 다수의 프로세서가 분담하여 동시에 처리하는 기술을 말하며, 단일 컴퓨터에 의해 순차적으로 수행하는 것보다 속도를 크게 향상시킬 수 있다. 병렬 알고리즘을 구현하기 위하여 주로 병렬 컴퓨터를 이용하였으나 이는 매우 고가여서 쉽게 이용할 수 없고 확장이 용이하지 않다는 단점이 있었다. 따라서 최근에는 병렬/분산 처리를 이용하여 두 대 이상의 컴퓨터를 연결하여 하나의 고성능 시스템처럼 사용하기 위한 클러스터링 기술이 많이 개발되고 있다[9].

본 논문에서는 배전계통 고장복구 문제에 빠른 수렴 특성을 가지는 TS와 전역 탐색능력이 우수한 GA를 결합한 알고리즘을 개발하였고, 이를 PC 클러스터 시스템으로 병렬 처리하여 최적해 탐색 성능 및 탐색속도를 개선함으로써 종래의 최적화 방법인 유전 알고리즘 또는

타부 탐색법을 단독으로 수행한 경우보다 빠른 시간내에 최적해를 탐색할 수 있었다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 실 배전계통의 고장복구 문제에 적용하여 종래의 방법에 의해 구한 결과와 비교, 검토하였다. 그 결과 제안한 방법이 종래의 방법과 동일한 해를 구하면서 유전 알고리즘 또는 타부 탐색법만을 수행한 경우보다 빠른 시간 내에 최적해를 탐색할 수 있었으며, 수행 노드수를 증가시킴에 따라 최적해 탐색성능을 유지하면서 최적해 탐색시간을 상당히 단축시킴으로써 고장 복구 방안의 실시간 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

2. 배전계통 고장복구 문제

배전계통에서의 고장 발생시나 정전 작업시 광범위한 정전구역이 발생할 경우, 고장구간을 제외한 전선구간 부하를 주위의 타 피더로 절체함으로써 정전구간이 최소가 되도록 운용하는 것이다. 따라서 배전계통 고장복구 문제에서 고려하는 평가지수로는 복구하지 못한 부하량 최소화, 개폐기 조작횟수 최소화, 부하 균등화, 변압기 및 피더의 용량 제약조건, 전압강하 제약조건 등이 있다. 본 논문에서 고려한 각 종합지수 항목은 다음과 같다.

$$\text{종합지수} = p_1 \cdot IC^h + p_2 \cdot ILB^h + p_3 \cdot IP^h + p_4 \cdot IS^h + p_5 \cdot I^h + p_6 \cdot IV^h \quad (1)$$

여기서, p_1, p_2, \dots, p_6 : 가중계수, h : h 번째 후보해

- 개폐기 조작 비용 (IC^h)
 $IC^h = N_i$ (2)
 여기서, N_i : 상태가 변경된 개폐기 수

- 부하 균등화 지수 (ILB^h)
 $ILB^h = \frac{1}{n_f} \left[\sum_{i=1}^{n_f} (\bar{y} - y_i)^2 \right]^{1/2}$ (3)

여기서, y_i : i 번째 피더의 실제부하 / i 번째 피더의 허용용량
 $\bar{y} = \frac{1}{n_f} \sum_{i=1}^{n_f} y_i$

- 복구하지 못한 부하량 (IP^h)
 $IP^h = p \sum_{i=1}^{n_b} P_i^h + q \sum_{i=1}^{n_{b2}} P_i^h$ (4)

여기서, a_b^h, a_{b2}^h : 일반 및 중요부하의 집합
 p, q : 가중계수, P_i^h : i 번째 부하단의 부하량

- 변압기의 용량제약 지수 (IS^h)
 $IS^h = \begin{cases} \text{Max} \exp[a_1 \frac{S_{TS}^h - S_{TS}^*}{S_{TS}^*}] - 1 & \text{if } S_{TS}^h > S_{TS}^* \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ (5)

여기서, n_{TS} : 변압기 대수
 $S_{TS_i}^*, S_{TS_i}^h$: i 번째 변압기의 정격용량과 실제 용량
 $i = 1, 2, \dots, n_{TS}, a_1$: 실수값(>0)

- 피더의 용량제한 지수 (I_j^h)

$$I_j^h = \begin{cases} \text{Max}_{i,j} \exp \left[a_2 \frac{I_{ij}^h - I_{ij}^h}{I_{ij}^h} \right] - 1 & \text{if } I_{ij}^h > I_{ij}^h \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, n_{fj}$, $j = 1, 2, \dots, n_{si}$
 I_{ij}^h, I_{ij}^h : i 번째 피더의 j 번째 구간에서의 정적 전류 및 실제전류
 n_{fj} : 고장복구시 사용된 피더의 수
 n_{si} : i 번째 피더가 전력을 공급받는 구간수
 a_2 : 실수값(>0)

- 전압강하 제약조건 (IV^h)

$$IV^h = \text{Max} \exp \left[a_3 \frac{V_{ik}^h - V_{ik}^h}{V_{ik}^h} \right] - 1 \quad (7)$$

여기서, V_{ik}^h : 피더 전압
 V_{ik}^h : i 번째 피더의 k 번째 부하단의 실제전압
 $i = 1, 2, \dots, n_f, k = 1, 2, \dots, n_{si}$ a_3 : 실수값(>0)

3. PC 클러스터 시스템을 이용한 유전 알고리즘과 타부 탐색법의 병렬화

본 논문에서는 전역 최적해 탐색특성을 가지는 GA를 이용하여 빠른 시간 내에 비교적 우수한 해를 탐색한 후 이를 수렴 속도가 빠른 TS의 초기해로 설정함으로써 유전 알고리즘이 탐색한 영역 근방의 최적해 탐색속도를 개선함으로써 보다 빨리 전역 최적해로 수렴할 수 있도록 하였다. 또한 제안한 알고리즘을 병렬/분산 처리 기법인 PC 클러스터 시스템으로 병렬화하여 최적해 탐색 성능 및 탐색속도를 개선하였다.

3.1 PC 클러스터 시스템

클러스터 시스템이란 다수의 PC 또는 워크스테이션을 고속 네트워크로 연결하여 하나의 컴퓨팅 시스템으로 사용함으로써 고성능 또는 고가용성을 얻을 수 있는 기술을 말한다. 이러한 클러스터 시스템은 일반 개인용 PC를 이용함으로써 기존의 병렬형 슈퍼컴퓨터보다 수배에서 수십 배 작은 비용으로 동일한 성능의 시스템 구성이 가능하므로 가격 대 성능비가 우수하다. 또한 사용자가 직접 상용부품을 사용하여 업그레이드나 노드의 확장이 가능하여 시스템 유지비용이 감소하고 사용이 편리한 PC의 개발환경을 그대로 사용할 수 있다는 장점을 가진다. PC 클러스터 시스템은 각 노드를 연결하기 위한 네트워크 어댑터와 병렬 프로그래밍을 지원하기 위한 통신 라이브러리로 구성되며 이를 그림 1에 나타내었다.

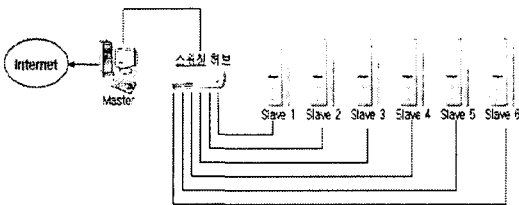


그림 1 PC 클러스터 시스템의 구조

본 논문에서 구현한 PC 클러스터 시스템은 ethernet switch기반 fast ethernet 방식의 8-노드로 구성하였다. 운영 체제는 master 노드에는 Windows 2000 server, 나머지 노드들에는 Windows 2000 pro를 사용하였으며, PC간에 상호 연결하기 위해 fast ethernet card와 스위칭 허브를 사용하였고, 데이터 전송과정에서는 TCP/IP를 이용한 메시지 전달(message-passing) 방식을 이용하는 MPI 라이브러리를 이용하였다. 병렬 알고리즘은 MS Visual C++ 6.0을 이용하여 구현하였다.

3.2 병렬 유전 알고리즘-타부 탐색법을 이용한 배전계통 제구성 방안

본 논문에서는 GA의 전역 최적해 탐색능력과 TS의 빠른 수렴특성을 이용한 향상된 최적해 탐색기법을 제안하였고, 이를 병렬/분산 처리 기법인 PC 클러스터 시스템으로 병렬화하여 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 개선하였다. PC 클러스터의 각 GA-TS 노드들에서는 우선 GA 연산을 수행한다. 그 후 GA의 해집단 내의 스트링에 대해 타부 리스트를 부여함으로써 이전에 탐색한 유전 알고리즘의 스트링이 재탐색되지 않도록 하였다. 또한 유전 알고리즘의 탐색영역을 변경시키기 위해 다수의 유전 알고리즘의 스트링이 재탐색될 경우에는 유전 알고리즘의 해집단 중 일부를 랜덤하게 생성시켰다. 유전 알고리즘의 실행과정에서 정해진 세대수 실행 이후에도 최적해가 개선되지 않으면 유전 알고리즘의 스트링 중 우수한 해에 대해 타부 탐색을 실행함으로써 전체 알고리즘의 최적해 탐색성능을 향상시킬 수 있었다. 제안한 알고리즘의 순서도를 그림 2에 나타내었다.

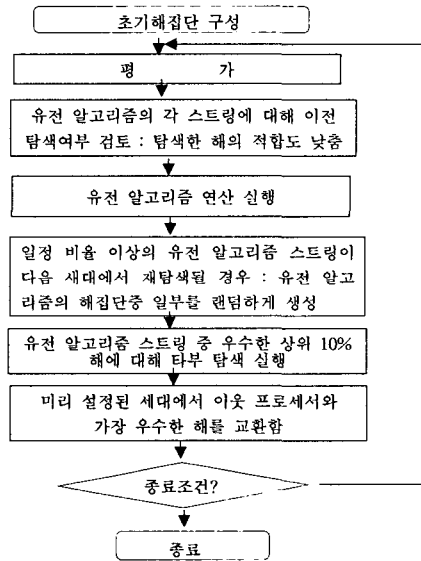


그림 2 제안한 알고리즘의 흐름도

4. 사례연구

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해서 한전의 실제 배전자동화 시스템인 강동 배전계통에 적용하였다. 본 논문에서는 강동 배전 자동화 시스템 중 7개의 변전소, 17대의 배전용 변압기, 100대의 피더 및 2558개의 부하단에 대해 검토하였다. 본 논문에서는 동산 D/L의 고장발생을 모의하였고, 해당 D/L은 6대의 D/L과 연계되어 있다. 사례연구로서 임의로 선정한 구간에 고장을 발생시켜 제안한 방법의 적용가능성을 검토하였다. 표 1에는 제안한 방법에서 사용한 시물레이션 계수를 나타내었다.

표 1 제안한 알고리즘의 시물레이션 계수

| 계수 | GA | | | | TS | | a_1 | a_2 | a_3 |
|-----|------|-------|-------|---------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| | 세대 수 | 해집단 수 | 교배 확률 | 돌연변이 확률 | 반복 회수 | 타부 리스트 길이 | | | |
| 설정값 | 200 | 40 | 0.8 | 0.01 | 400 | 30 | 10 | 10 | 1 |

표 2에 제안한 방법에 의해 구한 우선순위에별 고장복구 방안 평가지수를 나타내었다.

표 2 제안한 알고리즘에 의한 우선순위에별 평가지수

| 항목 순위 | 지 수 | | | | | | 종합지수 |
|----------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| | IC ^b | ILB ^b | IS ^b | IJ ^b | IV ^b | IP ^b | |
| 1 | 3 | 3.16 | 0 | 0 | 0.004 | 0 | 4.66 |
| 2 | 3 | 3.16 | 0 | 0 | 0.004 | 0 | 4.66 |
| 3 | 3 | 3.30 | 0 | 0 | 0.004 | 0 | 4.8 |

본 논문에서는 PC 클러스터를 이용한 병렬 계산의 효과를 보이기 위하여 일반적으로 잘 알려진 아래의 두 성능지수를 사용하여 평가하였다.

- 속도 향상률 (speedup) S_p

$$S_p = \frac{T}{T_p} \quad (8)$$

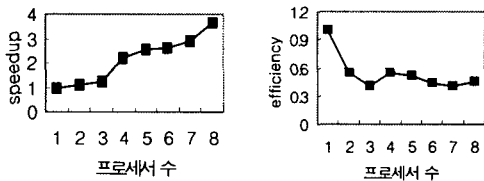
여기서, T : 프로세서 한대를 사용한 경우의 실행시간
 T_p : p대의 프로세서를 사용한 경우의 실행시간

- 병렬계산의 효율성 (parallel computation efficiency)

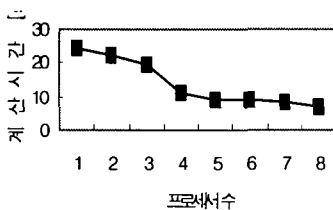
$$E_p = \frac{S_p}{p} \quad (9)$$

여기서, p : 사용한 프로세서의 수

그림 3에 노드 수 증가에 따른 속도 향상률, 병렬계산 효율 및 계산시간을 나타내었다. 그림 3에 보이는 것처럼 프로세서 수를 증가시키에 따라 최적해 탐색성능은 유지하면서 탐색시간이 단축됨을 확인하였다. 속도 향상률은 노드 수와 거의 선형적으로 비례하여 향상되었으나 노드 수의 증가에 따른 선형 특성에 비해 다소 저하되는 경우가 발생하는데, 이는 여러 노드들 간의 상호 통신시에 발생할 수 있는 병목현상(overhead)과 GA의 평가과정에서 소요되는 계산시간 때문이다.



(a) 노드 수에 따른 속도 향상률 및 병렬계산 효율



(b) 노드 수에 따른 최적해 탐색시간

그림 3 노드 수 증가에 따른 속도 향상률, 병렬계산효율 및 최적해 탐색시간

5. 결 론

본 논문에서는 배전계통 고장복구 문제의 최적해 탐색 성능 및 탐색속도를 개선하기 위해서 PC 클러스터 시스템을 이용하였고, 새로운 병렬 유전 알고리즘-타부 탐색법(GA-TS)을 제안하였다. 개발한 알고리즘은 이용의 편리성과 추후 확장 및 성능 개선을 용이하게 하기 위하여 Windows와 Visual C++환경에서 구현하였다. 제안한 방법은 타부 탐색법의 빠른 수렴특성과 유전 알고리즘의 전역탐색 능력을 효과적으로 이용하여 전역 최적해 탐색 성능 및 탐색속도를 개선하였고, 개인용 컴퓨터를 이용한 PC 클러스터 시스템을 이용하여 알고리즘을 병렬화함으로써 저비용으로 고성능 계산이 가능하도록 하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 실 배전계통 고장복구에 적용하였다. 시뮬레이션 결과 제안한 알고리즘의 최적해 탐색성능을 확인하였으며, 수행 노드수를 증가시키에 따라 최적해 탐색성능을 유지하면서 최적해 탐색시간을 상당히 단축시킴을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] D. Shirmohammadi and 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 and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, April 1989.
- [3] Tim Taylor and David Lubkeman, "Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, No. 1, pp. 239-246, Jan. 1990.
- [4] Günther Brauner and Manfred Zabel, "Knowledge based planning of Distribution networks," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, No. 2, pp. 942-948, May 1994.
- [5] Young-Jae Jeon, Jae-Chul Kim, Jin-O Kim, Joong-Rin Shin, Kwang Y. Lee, "An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Network Reconfiguration in Large-Scale Distribution Systems," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 17, No. 4, pp. 1070-1078, Oct. 2002.
- [6] Yoshikazu Fukuyama, Hiroshi Endo, Yosuke Nakanishi, "A Hybrid System for Service Restoration Using Expert System and Genetic Algorithm", *International Conference on ISAP*, pp. 394-398, 1996
- [7] Ying-Tung Hsiao, Ching-Yang Chien, "Enhancement of Restoration Service in Distribution Systems Using a Combination Fuzzy-GA Method", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 15, No. 4, pp. 1394-1400, Nov., 2000
- [8] H. Mori and K. Takeda, "Parallel simulated annealing for power system decomposition," IEEE Proc. of PICA 93, Scottsdale, Arizona, pp. 366-372, May 1993.
- [9] Chung. S. H., Ryu K. R., O S. C. and Park S. H., "Parallel processing system for high speed information retrieval," *Parallel Processing System Newsletters*, vol. 7, No. 2, pp. 3-19, 1996.