

PC 클러스터링을 이용한 실 배전계통의 지능형 고장복구 알고리즘 개발

문 경준\*, 김 형수\*, 송 명기\*, 박 준호\*, 이 획석\*\*  
 \* 부산대학교 전기공학과, \*\* 거제대학 전기과

Development of Intelligent Distribution System Service Restoration Algorithm Using PC Cluster System

Kyeong-Jun Mun\*, Hyung-Su Kim\*, Myoung-Kee Song\*, June Ho Park\*, Hwa-Seok Lee\*\*  
 \* Electrical Engineering Pusan National Univ., \*\* Electrical Engineering, Koje College

**Abstract** - 본 논문에서는 확률적인 전역 최적화 알고리즘인 유전 알고리즘과 경험적인 최적화 알고리즘인 타부 탐색법을 병렬화함으로써 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 개선하는 방안을 개발하였다. 배전계통의 주변압기에서 고장이 발생한 경우에는 여러 정전구역에 대한 복구문제가 되어 매우 복잡하고 많은 연산량을 수반한다. 따라서 제안한 고장복구 알고리즘은 PC 클러스터링을 이용하여 각 프로세서별로 유전 알고리즘 또는 타부 탐색법을 사용하여 최적해를 탐색한 후 일정 기간 이후에 해를 교환함으로써 배전계통에서의 주변압기 고장발생시 최적해 탐색에 소요되는 시간을 단축하였으며 고장복구 지원시스템의 성능개선을 도모하였다. 제안한 알고리즘의 유용성을 입증하기 위하여 한전의 실 배전계통 주변압기 고장복구 문제에 적용함으로써 제안한 알고리즘이 해의 탐색속도 및 해의 성능면에서 우수함을 입증하였다.

다수의 저렴한 PC들을 고속 네트워크에 연결하여 하나의 컴퓨팅 시스템으로 사용하는 것이다. 배전계통 고장복구 문제와 같이 빠른 계산이 필요한 문제에서는 PC 클러스터링을 이용한 병렬 처리에 의해 최적해 탐색성능 향상 및 최적해 탐색에 소요되는 계산시간 단축이 가능하다는 장점을 가진다. 본 논문에서는 배전계통 주변압기 고장복구 문제에 최적해를 구할 수 있는 유전 알고리즘 및 타부 탐색법[6, 7]을 제시하고, 계산시간 단축 및 최적해 탐색성능 향상을 위해 PC 클러스터링에 의한 병렬처리 기법을 개발함으로써 고장복구 지원시스템의 성능개선을 도모하였다. 제안한 알고리즘을 실 배전계통의 고장복구 문제에 적용한 결과 제안한 방법이 짧은 시간 이내에 빠른 수렴 속도로 적절한 주변압기 고장복구 방안을 도출함을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

정보화 사회로의 발전이 급속도로 진전됨에 따라 안정적 인 전력공급의 책임은 더욱 중대되고 있다. 특히 배전계통은 고객과 직결되어 전력을 공급하는 시스템으로서 고장 발생시 정전을 수반하므로, 신속한 고장 대처로 그 피해를 최소화하여야 한다. 따라서 배전계통의 시설 및 운용면에서는 배전계통 각 계층간의 자동화 및 상호연계에 의해 정전횟수 및 정전시간의 대폭감소는 물론 선로 손실, 전압강하를 최소화하도록 배전계통을 효율적으로 운용하여 고객에 대한 서비스를 향상시켜야 할 것이다.

일반적으로 배전계통에서는 계통 고장 발생시 또는 정전 작업시 광범위한 정전구역이 발생할 경우, 고장구간을 제외한 건전구간 부하를 인접한 연계 피더로 절체함으로써 정전구역이 최소가 되도록 운용하고 있으며, 이러한 문제는 계통의 방사상 구성 상태와 연계 피더의 예비력, 개폐기 조작 횟수 최소화, 부하 균등화, 변압기 및 피더의 용량 제약조건, 전압강하 제약조건 등의 여러 제약조건이 수반된다. 특히 배전계통의 주변압기에서 고장이 발생한 경우에는 해당 주변압기에서 전력공급을 받는 다수의 배전선로를 복구할 수 있는 부하절체 방안을 제시하여야 한다. 따라서 이 경우에는 정전구역이 매우 넓기 때문에 계산시간이 길어지거나 경우에 따라서는 부하절체 이후에도 전력을 공급받지 못하는 구간이 발생할 수 있으므로 매우 복잡하고 많은 계산이 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 Tabu 탐색법과 전역최적해 탐색능력을 가진 유전 알고리즘이 전력계통의 여러 분야에 응용될 가능성이 제시되고 있다.

PC 클러스터링은 컴퓨터 네트워크의 일반화에 따라

2. 본 론

2.1 배전계통 주변압기 고장복구 문제

배전계통의 주변압기에서 고장이 발생한 경우에는 해당 주변압기에서 전력공급을 받는 다수의 배전선로를 복구할 수 있는 부하절체 방안을 제시하여야 한다. 따라서 이 경우에는 정전구역이 매우 넓기 때문에 계산시간이 길어지거나 경우에 따라서는 부하절체 이후에도 전력을 공급받지 못하는 구간이 발생할 수 있으므로 매우 복잡하고 많은 계산이 수반되는 조합 최적화 문제이다. 이 경우의 목적함수로는 정전구간 및 과부하 발생구간이 최소가 되도록 운용하는 것이며, 고려해야 할 제약조건으로는 복구하지 못한 부하량 최소화, 개폐기 조작횟수 최소화, 부하 균등화, 변압기 및 피더의 용량 제약조건, 전압강하 제약조건 등이 있다. 본 연구에서는 이러한 제약조건들을 적절히 고려하여 연계 선로의 조합에 의한 배전계통 고장 복구시 종합지수를 식 (1)과 같이 선정하였고, 종합지수의 각 항목을 고찰하면 다음과 같다..

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

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 ( $ILB^h$ )  
 $ILB^h = \frac{1}{n_j} \left[ \sum_{j=1}^{n_j} (\bar{y}_j - y_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$  (3)

여기서,  $y_i$ :  $i$  번째 피더의 실제부하 /  $i$  번째 피더의 허용용량

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} y_i$$

- 복구하지 못한 부하량 ( $IP^k$ )

$$IP^k = p \sum_{i=1}^{n_{TS}} P_i^k + q \sum_{i=1}^{n_{TS}} P_i^k \quad (4)$$

여기서,  $a_i^k$ ,  $a_q^k$ : 일반 및 중요부하의 집합  
 $p$ ,  $q$ : 가중계수,  $P_i^k$ :  $i$  번째 부하단의 부하량

- 변압기의 용량제약 지수 ( $IS^k$ )

$$IS^k = \begin{cases} \text{Max} \left[ \frac{S_{TSi}^k - S_{TSi}^n}{S_{TSi}^n} \right] & \text{if } S_{TSi}^k > S_{TSi}^n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $n_{TS}$ : 변압기 대수  
 $S_{TSi}^k$ ,  $S_{TSi}^n$ :  $i$  번째 변압기의 정격용량과 실제 용량  
 $i = 1, 2, \dots, n_{TS}$ ,  $a$ : 실수값(>0)

- 피더의 용량제약 지수 ( $IF^k$ )

$$IF^k = \begin{cases} \text{Max} \left[ \frac{I_{ij}^k - I_{ij}^n}{I_{ij}^n} \right] - 1 & \text{if } I_{ij}^k > I_{ij}^n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

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

- 전압강하 제약조건 ( $IV^k$ )

$$IV^k = \text{Max} \left[ \left[ \frac{V_r^k - V_{ik}^n}{V_{ik}^n} \right] - 1 \right] \quad (7)$$

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

## 2.2 PC 클러스tring을 이용한 병렬처리

본 논문에서는 PC 클러스tring으로 알고리즘을 병렬처리하여 최적해 탐색에 소요되는 계산시간 및 최적해 탐색성능을 향상시킴으로써 이를 실시간으로 적용할 수 있도록 하였다. PC 클러스tring은 컴퓨터 네트워크의 일반화에 따라 다수의 저렴한 PC들을 고속 네트워크에 연결하여 하나의 컴퓨팅 시스템으로 사용하는 것으로, 이를 그림 1에 나타내었다.

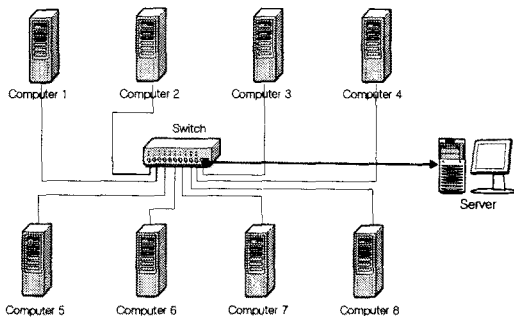


그림 1 PC 클러스tring의 구조

그림 1에서와 같이 각 컴퓨터는 스위칭 허브를 통해 상호 연결하여 소규모 네트워크를 구성할 수 있으며, 이것을 인터넷으로 연결함으로써 원격 접속이 가능하다. 운영체제로는 사용하기 쉬운 윈도우 환경을 사용하였으며, 미들웨어 소프트웨어로서는 널리 사용되고 있는

MPI (Message-Passing Interface)를 사용하여 Visual C++ 6.0으로 병렬 실행환경을 구현하였다. 이러한 클러스터 시스템의 성능 개선을 위한 컴퓨터의 증설 및 교체는 스위칭 허브에 노드를 추가하는 방식으로 간단히 이루어질 수 있어 기존의 병렬 컴퓨터에 비해 차후의 성능 개선이 용이하다는 장점을 가진다.

## 2.2.3 PC 클러스tring을 이용한 유전 알고리즘 및 타부 탐색법의 병렬화

자연의 진화과정을 모의한 확률적 최적화 알고리즘인 유전 알고리즘과 경험적 또는 지능적인 방법을 이용하는 타부 탐색법은 병렬화가 용이하다. 본 논문에서는 여러 프로세서를 하나의 유전 알고리즘 수행 프로세서와 나머지를 타부 탐색법 수행 프로세서로 나누어 할당하였다. 그 후 유전 알고리즘 수행 프로세서에 의해 구한 해집단의 일부를 선택하여 타부 탐색법 수행 프로세서로 전송하여 이를 타부 탐색시 초기해로 사용하였다. 이를 통해 유전 알고리즘에 의해 구한 전역해 근방의 해에 대해 일정 반복회수동안 타부 탐색법을 수행함으로써 전역해 근방의 국부탐색 성능을 강화시킴으로써 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 향상시켰다. 제안한 알고리즘의 흐름도를 그림 2에 나타내었다.

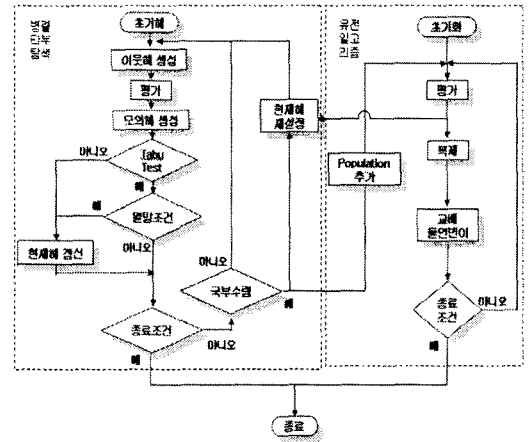


그림 2. 제안한 알고리즘의 흐름도

## 3. 사례 연구

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해서 한전의 실제 배전자동화 시스템인 강동 배전계통에 적용하였다. 본 논문에서는 강동 배전 자동화 시스템 중 7개소의 변전소, 17대의 배전용 변압기, 100대의 피더 및 2558개의 부하단에 대해 검토하였다. 표 1에서는 고장발생을 모의한 주변압기 탱크의 소속 D/L 정보를 나타내었다. 제안한 방법의 적용가능성을 검토하기 위해 적용한 유전 알고리즘 및 타부 탐색법의 파라메타는 다음과 같다.

- 유전 알고리즘의 해집단 수: 100
- 유전 알고리즘의 세대수: 3000회
- 타부 탐색법의 최대 반복회수: 3000회
- Tabu List의 크기: 20

강동변전소 주변압기의 1 모선에서 고장이 발생한 경우, 건전 정전부하량은 1050[A]이다. 표 1에 제안한 알고리즘에 의해 구한 복구방안의 종합지수 및 각 평가지수를 우선순위로 나타내었으며 표 2에는 우선순위 1의 복구방안에 대한 연계선로의 변경상태를 나타내었다.

표 1 제안한 알고리즘에 의한 우선순위별 평가지수

순위	지 수						종합지수
	IC <sup>A</sup>	ILB <sup>A</sup>	IS <sup>A</sup>	IJ <sup>A</sup>	IV <sup>A</sup>	IP <sup>A</sup>	
1	2.86	3.25	0.25	0	0.004	0	4.94
2	2.86	3.26	0.25	0	0.004	0	4.94
3	2.86	3.26	0.27	0	0.005	0	5.78

표 2 고장복구 이후 연계피더의 부하량

순위	연계피더명	용량 변화량
1	가락 D/L	175[A] → 181.38[A]
2	고분 D/L	180[A] → 205.53[A]
3	송경 D/L	130[A] → 248.09[A]
4	명일 D/L	150[A] → 249.11[A]
5	강봉 D/L	140[A] → 247.14[A]
6	동마 D/L	170[A] → 246.03[A]
7	신수 D/L	160[A] → 233.97[A]
8	천호 D/L	130[A] → 223.75[A]
9	풍남 D/L	140[A] → 228.23[A]
10	풍길 D/L	145[A] → 206.75[A]
11	상일 D/L	160[A] → 246.25[A]
12	강덕 D/L	135[A] → 198.75[A]

그림 3에서는 매 반복회수별 유전알고리즘, 타부 탐색법 및 제안한 방법에 의해 구한 매 반복회수별 최적해의 추이를 나타내었다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 제안한 방법이 최적해 탐색성능 및 최적해 탐색속도 측면에서 우수함을 확인할 수 있다.

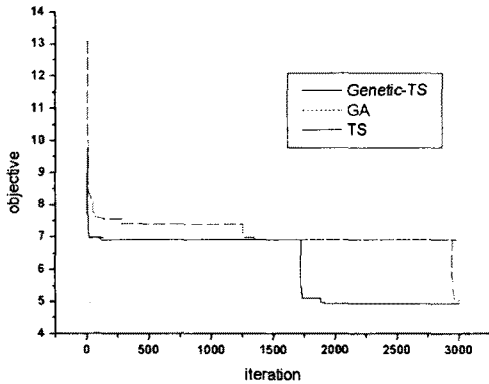


그림 3 각 방법에 의한 매 반복회수별 최적해 추이

#### 4. 결 론

본 논문에서는 배전계통 주변압기 고장복구 문제에 타부 탐색법을 적용하기 위해 배전계통 고장복구 문제에 적합한 목적함수, 제약조건을 제시하였다. 또한 유전 알고리즘 및 타부 탐색법의 탐색성능 및 탐색속도를 개선하기 위해 PC 클러스터링을 도입함으로써 최적해 탐색성능 및 최적해 탐색시간을 개선하였다.

제안한 방법의 효용성을 입증하기 위해 한전의 실제 배전자동화 시스템인 강동 배전계통에 적용해 본 결과, 발생한 주변압기 고장에 대해 다양한 고장복구 방안을 제시하였으며, 각 복구방안에 대해 종합지수에 따른 우

선 순위별로 각 항목별 평가지수, 해당 복구방안의 개폐기 조작절차 및 연계선로 변경상태를 제시함으로써 각 복구방안의 성능을 운전원이 판단한 후 최종 복구방안을 선정할 수 있게 하였다.

제시한 복구방안은 정전되는 부하량이 적으면서 정전 부하를 적절히 분할하여 각 연계 피더로 할당하는 복구방안과 연계 피더의 허용용량을 확보하기 위해 연계 피더의 부하를 미리 절체시키는 복구방안을 우선 순위별로 적절히 구해냄을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제임.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Yuan-Yih Hsu, H. M. Huang, H. C. Kuo, S. K. Peng, C. W. Chang, K. J. Chang, H. S. Yu, C. E. Chow, R. T. Kuo, "Distribution System Service Restoration using A Heuristic Search Approach", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, pp. 734-740, April, 1992
- [2] Whei-Min Lin, Hong-Chan Chin, "A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, No. 3, pp. 870-875, July, 1998
- [3] Chen-Ching Liu, Seung Jae Lee, S. S. Venkata, "An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 619-626, May, 1988
- [4] Yuan-Yih Hsu, Han-Ching Kuo, "A Heuristic Based Fuzzy Reasoning Approach for Distribution System Service Restoration," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 9, No. 2, pp. 948-953, April, 1994
- [5] Seung-Jae Lee, Seong-II Lim, Bok-Shin Ahn, "Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-Criteria", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 1156-1163, Aug., 1998
- [6] Fred Glover, Manuel Laguna, *Tabu Search*, Kluwer Academic Publisher, 1997
- [7] Maurizio Denna, Giancarlo Mauri, and Anna Maria Zanaboni, "Learning Fuzzy Rules with Tabu Search-An Application to Control", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 2, pp.295-pp.318, April, 1999
- [8] J. S. Wu, K. L. Tomsovic, C. S. Chen, "A Heuristic Search Approach to Feeder Switching Operations for Overload, Faults, Unvalanced flow and Maintenance", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 6, No. 4, pp. 1579-pp.1585, Oct., 1991