

PC 클러스터 기반 병렬 유전 알고리즘-타부 탐색을 이용한 배전계통 고장복구

論 文

54A-8-1

PC Cluster Based Parallel Genetic Algorithm-Tabu Search for Service Restoration of Distribution Systems

文景俊[†] · 李和錫^{*} · 朴俊灝^{**} · 金亨洙^{***}

(Kyeong-Jun Mun · Hwa-Seok Lee · June Ho Park · Hyung-Su Kim)

Abstract - This paper presents an application of parallel Genetic Algorithm-Tabu Search (GA-TS) algorithm to search an optimal solution of a service restoration in distribution systems. The main objective of service restoration of distribution systems is, when a fault or overload occurs, to restore as much load as possible by transferring the de-energized load in the out of service area via network reconfiguration to the appropriate adjacent feeders at minimum operational cost without violating operating constraints, which is a combinatorial optimization problem. This problem has many constraints with many local minima to solve the optimal switch position. This paper develops parallel GA-TS algorithm for service restoration of distribution systems. In parallel GA-TS, GA operators are executed for each processor. To prevent solutions of low fitness from appearing in the next generation, strings below the average fitness are saved in the tabu list. If best fitness of the GA is not changed for several generations, TS operators are executed for the upper 10% of the population to enhance the local searching capabilities. With migration operation, best string of each node is transferred to the neighboring node after predetermined iterations are executed. For parallel computing, we developed a PC cluster system consists of 8 PCs. Each PC employs the 2 GHz Pentium IV CPU and is connected with others through ethernet switch based fast ethernet. To show the validity of the proposed method, proposed algorithm has been tested with a practical distribution system in Korea. From the simulation results, we can find that the proposed algorithm is efficient for the distribution system service restoration in terms of the solution quality, speedup, efficiency and computation time.

Key Words : Parallel Genetic Algorithm-Tabu Search (GA-TS), Genetic Algorithm, Tabu Search, Distribution System Service Restoration, PC Cluster System

1. 서 론

정보화 사회로의 발전이 급속도로 진전됨에 따라 안정적인 전력공급의 책임은 더욱 증대되고 있다. 특히 배전계통은 수용가와 직결되어 있어 고장 발생시 정전을 수반하므로, 신속한 대처로 그 피해를 최소화하여야 한다. 따라서 배전계통에서는 각 계층간의 자동화 및 상호연계에 의해 정전횟수 및 정전시간의 대폭감소는 물론 선로손실, 전압강하 등이 최소가 되도록 배전계통을 효율적으로 운용하여 수용가에 대한 서비스를 향상시켜야 한다.

일반적으로 배전계통에서 고장 발생시 또는 정전 작업시에 광범위한 정전구역이 발생할 경우, 고장구간을 제외한 건전구간 부하를 인접한 연계 피더로 절체함으로써 정전구역이 최소가 되도록 운용하며, 계통의 방사상 구성 상태와 연

계 피더의 예비력, 개폐기 조작 횟수, 부하 균등화, 변압기 및 피더의 용량, 전압강하 등의 여러 사항도 고려해야 한다. 그러므로 배전계통 고장복구 알고리즘은 고장 발생시에는 해당 고장구간을 파악하여 자동으로 고장구간을 분리하고 건전 정전구간의 복구 방안을 제시하여야 하며, 작업정전인 경우에는 작업정전 구간 및 작업시간대를 지정하면 그 시간에 예상되는 최대 부하에 대해 부하절체 방안을 제공해야 한다.

배전계통의 고장복구 문제에 관한 연구로서는 수계산과 운전원의 경험적 판단으로 수행하는 경험적 방법(heuristic method)[1], 가지교환 방법(branch exchange method)[2], 전문가 시스템[3], 기계학습(machine learning)[4], AI 기법[5], 신경회로망(neural network)[6], 퍼지 시스템(fuzzy system)[7]을 이용한 방법 등이 여러 연구자들에 의해 제안되었다. 그러나 기존의 방법들은 계산 과정은 다소 간단하지만 계산 결과가 근사적이거나 국부 최소값으로 수렴할 가능성이 크다는 단점을 가진다.

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[8, 9]. 이때 병렬 알고리즘을 구현하기 위하여 주로 병렬 컴퓨터를 이용하였

[†] 교신저자, 正會員: 韓國原子力研究所 post-doctor · 工博
E-mail : kjmun@kaeri.re.kr

^{*} 正會員 : 巨濟大學 電氣科 副教授 · 工博

^{**} 正會員 : 釜山大 電子電氣情報컴퓨터工學部 教授 · 工博

^{***} 正會員 : Illinois Technology of Chicago, Electrical and
Computer Engineering, post-doctor · 工博

接受日字 : 2005年 1月 29日

最終完了 : 2005年 6月 25日

으나 이는 매우 고가여서 쉽게 이용할 수 없고 확장이 용이하지 않다는 단점이 있었다. 따라서 최근에는 병렬/분산 처리를 위하여 두 대 이상의 컴퓨터를 연결하여 하나의 고성능 시스템처럼 사용하기 위한 클러스터링 기술이 많이 개발되고 있다[10, 11]. 클러스터 시스템은 네트워크로 접속한 워크스테이션 또는 일반적인 PC를 사용하여 구축할 수 있는데, 워크스테이션을 사용한 클러스터 시스템은 성능에 비해 가격이 비싸고, 다른 시스템과 호환성이 부족하다는 단점이 있다. PC 클러스터 시스템은 개인용 컴퓨터의 급속한 발전과 네트워크 기술의 일반화에 따라 다수의 저렴한 PC들을 고속 네트워크로 연결하여 마치 하나의 컴퓨팅 시스템처럼 사용함으로써 기존의 병렬 컴퓨터 및 워크스테이션을 이용한 클러스터 시스템과는 달리 가격 대 성능비가 우수하고 추후 확장이 용이하다는 장점을 가진다[12, 13].

본 논문에서는 선로 고장시 다양한 제약조건을 고려하면서 빠른 시간에 우수한 해를 도출할 수 있는 효율적인 고장 복구 알고리즘을 개발하였다. 배전계통 고장복구 문제는 다수의 개폐기 중 조작할 개폐기를 결정해야할 조합최적화 문제이다. 따라서 본 논문에서 개발한 방법은 조합최적화 문제에 적합한 알고리즘 중, 빠른 수렴특성을 가지는 Tabu 탐색법(Tabu Search: TS)[14]과 전역 탐색능력이 우수한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm: GA)[15]을 결합한 알고리즘으로서, 이를 실시간 적용하기 위해 PC 클러스터 시스템으로 병렬처리하여 최적해 탐색 성능 및 탐색속도를 개선하였다. 따라서 종래의 최적화 방법인 GA 또는 TS를 단독으로 수행한 경우보다 빠른 시간에 최적해를 탐색할 수 있었다. 또한 배전계통 고장복구시 고려해야 할 여러 평가지수를 동시에 고려하여 우수한 고장복구 방안을 제시하도록 종합 평가 지수를 선정하는 방법을 제안하였다.

제안한 방법을 실 배전계통의 고장복구 문제에 적용한 결과, 본 방법이 다양한 후보해를 제시함으로써 운전원이 고장 복구 방안을 결정할 때 도움을 줄 수 있을 뿐만 아니라 경제성을 고려한 종합지수를 목적함수로 선정하여 최적의 고장복구 방안을 도출할 수 있었다. 또한 GA 또는 TS를 단독으로 사용한 경우보다 제안한 방법이 더 빠른 시간 내에 최적해를 탐색하였고, 병렬 연산의 수행 노드수 증가에 따라 최적해 탐색성능은 유지하면서 최적해 탐색시간을 상당히 단축시킴을 확인하였다.

2. 배전계통 고장복구 문제

배전계통에서 고장 발생시나 정전 작업시 광범위한 정전 구역이 발생할 경우 또는 과부하 운전시에 대처해야 할 방안은 고장구간을 제외한 건전구간 및 과부하 발생구간 부하를 주위의 타 피더로 절체함으로써 정전구간 및 과부하 발생구간이 최소가 되도록 운용하는 것이다. 따라서 배전계통 고장복구 문제에 있어 고려해야 할 사항으로 복구하지 못한 부하량 최소화, 개폐기 조작횟수 최소화, 부하 균등화, 변압기 및 피더의 용량 제약조건, 전압강하 제약조건 등이 있다. 본 논문에서는 이러한 항목들을 적절히 고려하여 배전계통 고장복구시 종합지수를 식 (1)과 같이 선정하였고, 종합지수의 각 항목은 다음과 같다.

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

여기서, p_1, p_2, \dots, p_4 : 가중계수

h : h 번째 후보해

a) 개폐기 조작 횟수(IC^h) : 고장복구시 개폐기 조작 횟수가 많아지면 고장복구 시간이 길어지며 개폐기 수명이 단축되므로 고장복구 시에는 가능한 한 개폐기 조작횟수를 감소시켜야 한다.

$$IC^h = N_s \quad (2)$$

여기서, N_s : 상태가 변경된 개폐기 수

b) 부하 균등화 지수(ILB^h) : 고장복구시 정전부하를 급급 인접 연계피더에 고르게 분담시킴으로써 특정 피더의 과부하 발생을 미연에 방지하여야 한다.

$$ILB^h = \begin{cases} \exp(-\text{Max}(y_{cap} - y_{\max})/\alpha_{ILB}) & \text{if } y_{\max} > 0.75y_{cap} \\ 0.1 \exp(-\text{Max}(y_{cap} - y_{\max})/\alpha_{ILB}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, y_{cap} : 연계피더의 최대 허용용량

y_{\max} : 고장복구 이후 연계피더의 부하량 중 최대값

α_{ILB} : 상수

c) 복구하지 못한 부하량(IP^h) : h 번째 후보해에서 복구하지 못한 부하는 식 (4)에서와 같이 일반 부하와 중요 부하의 가중 합으로 구성된다.

$$IP^h = p \sum_{i \in A} P_i^h + q \sum_{i \in B} P_i^h \quad (4)$$

여기서, A, B : 일반 및 중요부하의 집합

p, q : 가중계수

P_i^h : i 번째 부하단의 부하량

d) 전압강하 조건(IV^h)

$$IV^h = \text{Max} \exp\left[\alpha_v \left[\frac{V_r^n - V_{ik}^h}{V_r^n} \right]\right] - 1 \quad (5)$$

여기서, V_r^n : 피더 전압

V_{ik}^h : i 번째 피더의 k 번째 부하단의 실제전압

$i = 1, 2, \dots, n_f, k = 1, 2, \dots, n_{si}$

n_f : 피더 수, n_{si} : i 번째 피더의 부하단 수

α_v : 실수값(>0)

또한, 본 논문에서 고려한 제약조건은 다음과 같이 변압기 용량 및 피더 용량 제약조건을 고려하였다.

a) 변압기 용량 제약조건

$$S_{TSi}^h \leq S_{TSi}^n \quad (6)$$

여기서, S_{TSi}^n, S_{TSi}^h : i 번째 변압기의 정격용량과 실제 부하,
 $i = 1, 2, \dots, n_{TS}$
 n_{TS} : 변압기 대수

b) 피더 용량 제약조건

$$I_{ij}^h \leq I_{ij}^n \quad (7)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, n_f, j = 1, 2, \dots, n_s$
 I_{ij}^n, I_{ij}^h : i 번째 피더의 j 번째 구간에서의 정격전류
 및 실제전류

식 (1)의 종합지수를 살펴보면 각 가중계수를 어떻게 설정할 것인가에 따라서 구하는 해가 달라질 수 있는데, 이는 가중계수 결정이 매우 중요한 요소가 된다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 종합지수 각 항목을 최대한 비용으로 환산하여 가중계수의 상대적인 값을 결정하였다. 예를 들어, 개폐기 1회 조작시 비용은 개폐기 1대의 가격이 약 1,300,000원이고 약 1000회 조작하면 수명이 다한다면, 1회 조작시 1,300원의 비용이 소요되고 이 값이 p_1 에 해당된다. 또한 특정 피더에 과다하게 할당된 부하량을 여유용량이 큰 피더로 절체시키면 부하균등화 지수가 감소하게 된다. 따라서 부하균등화 가중계수는 부하균등화 지수가 커질 경우, 피더의 용량초과에 따른 공급지장에 의한 비용손실을 기준으로 산정하였다[16]. 그리고 복구하지 못한 부하량의 가중치 p_3 결정은 정전으로 인한 경제적 손실을 의미하는 1[kWh]당 정전비용으로 산정할 수 있다.

본 논문에서는 고장복구 이후 개폐기 조작 비용, 부하 균등화에 따른 설비건설 지연효과, 정전비용 등을 고려하여 개폐기 조작 및 부하 균등화 가중계수를 설정하였고, 전압강하에 대한 가중계수의 경우에도 전압강하가 커질수록 벌점을 많이 부과할 수 있도록 전압강하가 커짐에 따라 지수적으로 증가시키는 방법으로 고장복구 방안을 도출하였다.

3. PC 클러스터 기반 유전 알고리즘과 타부 탐색법의 병렬화

GA는 자연의 진화과정을 모의한 확률적 탐색기법으로 하나의 해가 아닌 해집단을 사용함으로써 빠른 시간 내에 비교적 우수한 해들을 찾아낼 수 있지만 전역 최적해 탐색시간이 비교적 오래 걸리는 단점이 있다. 한편 TS는 메모리를 효율적으로 사용하는 경험적인 최적화 기법으로 초기해 및 이웃해 생성방법 및 강화 전략을 적절히 적용함으로써 현재해 근방의 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 향상시킬 수 있는 탐색기법이다. 따라서 본 논문에서는 두 알고리즘의 장·단점을 상호 보완한 새로운 병렬 GA-TS 탐색법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 전역 최적해 탐색특성을

가지는 GA를 이용하여 빠른 시간 내에 비교적 우수한 해를 탐색한 후, 이를 수렴 속도가 빠른 TS의 초기해로 설정하여 GA가 탐색한 영역 근방의 최적해 탐색속도를 개선함으로써 보다 빨리 전역 최적해로 수렴할 수 있도록 하였다. 또한 제안한 알고리즘을 PC 클러스터 시스템으로 병렬처리하여 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 개선하였다.

3.1 PC 클러스터 시스템

1980년대 중반 이후 과학과 공학 분야의 발전에 따라 첨단 과학기술과 정보통신 분야 등의 연구에 고속 연산 컴퓨터의 필요성이 증대되었다. 기존의 대표적인 고속 연산 컴퓨터인 벡터형 슈퍼컴퓨터는 고가여서 사용하기 어려울 뿐만 아니라 발전에도 한계를 보이고 있다. 따라서 최근에는 고성능 네트워크 기술의 비약적인 발전과 반도체 집적기술의 향상으로 클러스터형 슈퍼컴퓨터가 고속 연산 컴퓨터로 주목받고 있다.

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 있는 장점을 가진다. PC 클러스터 시스템은 각 노드를 연결하여 SAN(system area network)을 구축하기 위한 네트워크 어댑터와 병렬 프로그래밍을 지원하기 위한 통신 라이브러리로 구성되며 이를 그림 1에 나타내었다.

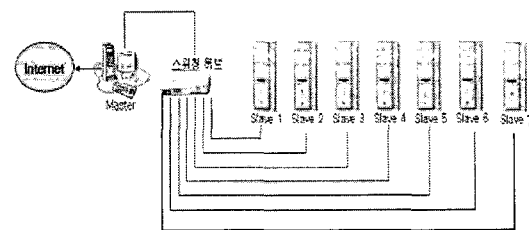


그림 1 PC 클러스터 시스템의 구조
 Fig. 1 Structure of PC cluster system

PC 클러스터 시스템의 성능은 각 노드를 연결하는 네트워크의 성능, 지원 소프트웨어와 각 노드의 성능에 의해 좌우되므로 PC 클러스터 구성시 각 구성부분을 적절히 선정하는 것이 중요하다. 본 논문에서 구현한 PC 클러스터 시스템은 ethernet switch 기반 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. 각 노드의 원격 관리를 위한 프로그램으로는 symantec PC-anywhere를 사용하였고 병렬

알고리즘은 MS Visual C++ 6.0을 이용하여 구현하였다. 표 1에는 본 논문에서 구현한 PC 클러스터 시스템의 사양을 나타내었다.

표 1 8-노드 PC 클러스터 시스템 사양
Table 1 Specification of 8-node PC cluster system

CPU	Intel 2.0 GHz
M/B	Leotec P4XFA
Chipset	VIA P4X266A
RAM	DDR-SD RAM 256 MB
HDD	Samsung 40GB 5600rpm
NIC	3Com 3CSOHO 100-TX
Network Switch	3Com 3C16465C Switch
OS	Windows 2000 server, Windows 2000 pro
MPI Library	MPICH 1.2.5
Compiler	Visual C++ 6.0

3.2 병렬 유전 알고리즘-타부 탐색법

GA는 다양한 영역을 탐색하는 알고리즘으로 전역 최적해 근처까지는 빨리 수렴하나 확실적인 특성으로 전역 최적해를 찾는 데 많은 시간이 요구되고, TS는 문제의 특성을 고려한 경험적 탐색이 용이하므로 빠른 수렴특성을 가지는 반면에 탐색과정이 초기해의 영향을 크게 받으며, 국부 수렴한 경우 새로운 영역을 탐색하기 위한 다양화 과정에서 매우 많은 계산시간이 소요된다.

따라서 본 논문에서는 GA의 전역 최적해 탐색능력과 TS의 빠른 수렴특성을 이용한 향상된 최적해 탐색기법을 제안하였고, 이를 병렬 처리 기법인 PC 클러스터 시스템으로 개발하여 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 개선하였다. 제안한 방법의 병렬 연결구조를 그림 2에 나타내었다.

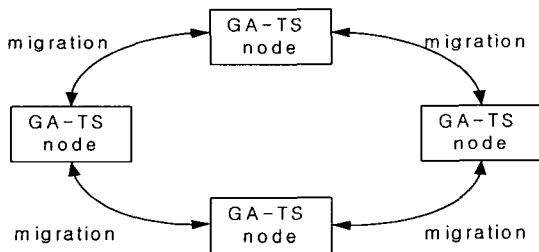


그림 2 GA와 TS의 연결 구조
Fig. 2 Connection structure of GA and TS

제안한 알고리즘은 먼저 PC 클러스터의 각 노드들이 GA 연산을 일정 세대동안 수행한 후, GA 연산에 의해 구한 해가 개선되지 않을 경우, TS 연산을 적용함으로써 최적해 탐색성능을 향상시켰다. 본 논문에서는 GA 연산을 3회 수행한 후에도 최적해가 개선되지 않으면 TS 연산을 적용하였다. 즉 이 경우에는 GA의 각 스트링을 적합도가 우수한 순서대로 정렬한 후, 상위 10%의 스트링에 대해 타부 탐색의

현재대로 설정한 후 일정 반복회수 동안 해당 스트링 주변 영역에 대한 탐색을 수행하였다. 또한 GA 연산 수행시에 이전에 탐색한 매 세대별 평균적합도 이하의 스트링이 반복되지 않도록 매 세대마다 GA의 스트링 중 평균적합도 이하의 스트링을 일정 반복회수동안 저장한 후 반복되는 스트링의 적합도를 낮춤으로써 GA의 전역최적해 탐색성능을 강화시켰다. 그리고 각 노드들간에는 링 형태로 연결한 후, 이주(migration) 연산을 통해 인접 노드와 각 노드의 우수한 해를 상호 전송함으로써 각 노드의 최적해 탐색성능을 향상시켰다.

제안한 병렬 GA-TS 탐색법은 GA 연산에 의한 전역 최적해 탐색과정, GA 연산시 스트링 반복여부 검토과정, GA 스트링 중 일부에 TS 연산을 적용한 최적해 탐색성능 향상과정, 각 노드간의 이주과정으로 구성되어 있으며, 각 과정은 다음과 같으며, 흐름도를 그림 3에 나타내었다.

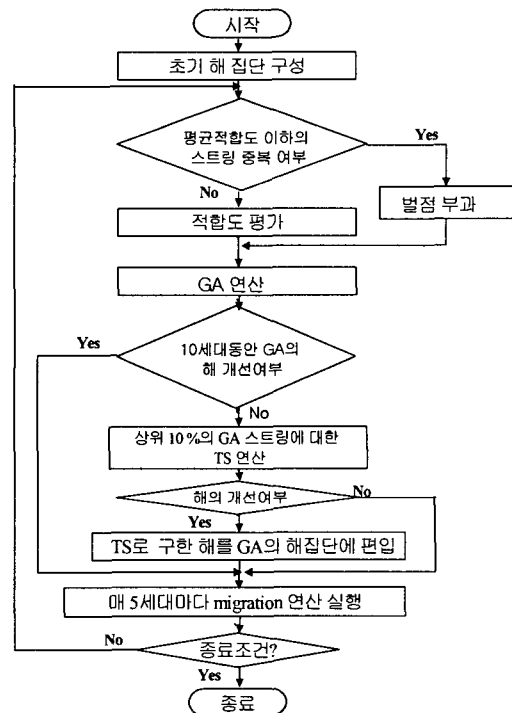


그림 3 제안한 알고리즘의 흐름도
Fig. 3 Flowchart of the proposed method

- (1) GA 수행노드의 전역 최적해 탐색과정 : 각 노드에 대해 GA의 해집단을 분할하여 할당함으로써 탐색속도 및 탐색성능을 향상시켰다.
- (2) GA 연산시 매 세대별 평균적합도 이하의 스트링 반복여부 검토과정 : GA 연산 수행시에 이전에 탐색한 평균적합도 이하의 스트링이 반복되지 않도록 매 세대마다 GA의 스트링 중 평균적합도 이하의 스트링을 일정 반복회수동안 저장한 후 반복되는 스트링에 별점을 부과하여 적합도를 낮춤으로써 GA의 전역 최적해 탐색성능을 강화시켰다. 본 논문에서는 3세대동안 평균적합도 이

하로 반복되는 스트링에 별점을 부과하였다.

(3) GA 스트링 중 일부에 TS 연산을 적용한 최적해 탐색속도 향상과정 : 과정 (1), (2)의 GA 연산에서 구한 해가 일정 세대동안 개선되지 않는 경우, 현재 세대의 해집단 중 우수한 해의 주변영역을 집중적으로 탐색하기 위해 GA의 해집단 중 상위 10%를 TS의 현재 해로 설정하여 TS를 일정 반복회수동안 진행함으로써 전체 알고리즘의 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 개선하였다. 이때 TS의 반복회수는 최대 50회로 설정하였으며, TS의 현재해가 개선되지 않으면 종료하였다.

(4) 각 노드간의 이주과정 : 각 GA-TS 노드를 링 형태로 연결한 후, 이주 연산을 통해 일정 간격으로 인접 노드에 우수한 해를 상호 전송함으로써 최적해 탐색성능을 향상시킬 수 있다.

3.3 병렬 유전 알고리즘-타부 탐색법을 이용한 배전계통 고장복구 방안

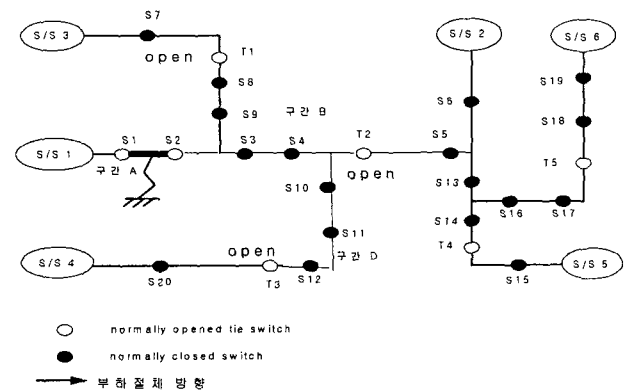
배전계통 고장복구 문제는 고장 발생시나 정전 작업시 광범위한 정전구역이 발생할 경우 또는 과부하 운전시에 고장 구간을 제외한 전전구간 부하 및 과부하 발생구간 부하를 주위의 타 피더로 절제하도록 ON/OFF할 개폐기의 위치를 결정해야 하는 최적화 문제이다. 따라서 제안한 병렬 GA-TS 탐색법이 효과적인 최적해 탐색성능을 얻기 위해서는 배전계통 고장복구 문제에 적합하도록 GA-TS를 적용해야 한다.

배전계통 고장복구 문제에 대한 TS 수행 과정은 먼저 TS의 초기해를 생성시킨 후 이를 현재해로 설정한다. 그 후 현재해에 대해 이웃해 N(s)를 생성하여 이들 중 우수한 해로 현재해를 이동시킨다. 이 때 최근에 탐색한 T개의 해를 타부 리스트 내에 저장함으로써 탐색과정에서 반복이 발생하지 않게 한다. 타부 리스트 내에 저장한 속성(attribute)은 본 논문에서의 문제에 맞게 투입 및 개방된 개폐기와 목적함수로 선정하였다. 일반적으로 현재해에서 다음의 해로 이동할 경우, 매 반복에서의 현재해를 타부 리스트 내에 저장한다.

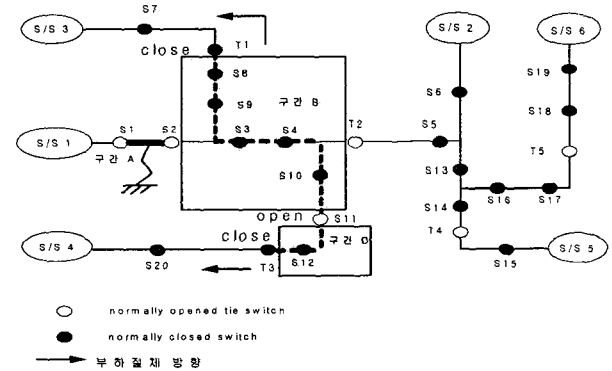
TS의 이웃해 생성 과정을 고찰하기 위해, 그림 4 (a)에서와 같이 예제 계통에 대해 개폐기 S1과 S2 사이 구간에서 고장이 발생했다고 가정하자. 이 경우 피더 S/S 1으로부터 전력을 공급받던 개폐기 S2 이하구간에 정전이 발생하고, 이 경우 해당 전전 정전구간을 복구할 수 있는 연계피더 및 연계개폐기로는 (S/S 3, T1), (S/S 2, T2), (S/S 4, T3)이다. 따라서 연계 개폐기가 여러 개 투입될 경우, 그림 4 (b)에 나타낸 바와 같이 부하를 분할하기 위해 개방할 개폐기는 투입될 연계개폐기를 연결하는 개폐기 중 하나로 선정해야 하며, 각 연계개폐기와 고장구간 분리 개폐기 S2와 연결되는 경로를 탐색하면 그림 5와 같다.

배전계통 고장복구 문제에 대한 이웃해 생성방법을 예제 배전계통으로 설명하면 다음과 같다. 그림 4의 예제계통에서 연계 개폐기 T1 및 T3가 투입되고 개폐기 S11이 개방되어 전전 정전부하를 구간 B 및 구간 D로 나누어 각각 연계 피더 S/S 3 및 S/S 4로 절제함으로써 고장구간을 복구하는 해를 초기해로 선정하였다고 가정하자. 이웃해 생성 과정에

서는 고장복구시 투입할 연계개폐기 및 개방할 개폐기를 결정해야 하며, 이를 위해 그림 5와 같이 각 연계 개폐기부터 고장발생피더의 CB까지의 경로를 탐색한 후 이 정보를 이용하였다. 이 경우 발생하는 이웃해는 1) 개폐기 S11을 투입하고 그림에서 점선으로 표시한 T1과 T3를 연결하는 경로 상에서 인접한 개폐기 S10 또는 S12를 개방하는 경우, 2) 연계개폐기 T2를 투입하는 경우, 3) 연계 개폐기 T1을 개방하고 개폐기 S11을 투입하는 경우, 4) 연계 개폐기 T3를 개방하고 개폐기 S11을 투입하는 경우로 나눌 수 있다. T2를 투입하는 경우에는 T1, T2를 연결하는 루프 상에서 식 (3)의 부하균등화 지수가 가장 작은 값을 나타내는 개폐기를 개방함으로써 이웃해를 형성한다.



(a) 고장 전 계통 상태 및 고장발생구간 표시



(b) 고장복구 예

그림 4 예제 배전계통

Fig. 4 Example distribution system

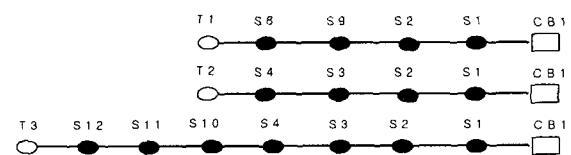


그림 5 고장구간 연계 개폐기와 고장발생 피더를 연결하는 경로

Fig. 5 Search route for the example system from tie switches to faulted feeder

배전계통 고장복구 문제에 대한 GA의 스트링 구성은 첫째, 건전 정전구간 부하를 이웃한 피더로 절체하는 방안, 둘째, 건전 정전구간 부하가 절체될 연계피더의 여유용량이 크지 않은 경우에 과부하가 발생되지 않도록 연계 피더의 건전구간 부하 중 일부를 다른 피더로 절체 시키는 방안으로 선정하였다. 그림 6은 건전 정전구간 복구 예이며, S1, S2, S10은 투입(close), T1, T2, T3은 개방(open) 상태로 운전 중에 구간 A에서 고장이 발생한 경우이다. 이때 고장구간을 분리하기 위해 S1, S2를 개방하면 그림의 회색영역처럼 건전 정전구간이 발생하게 되므로 건전 정전구간 복구를 위해 T1, T2, T3의 ON/OFF 여부를 우선적으로 결정하여야 한다. 그런데, T1과 T3가 동시에 투입이 되는 경우는 방사상 구성 원칙에 위배되므로 T1-T3 사이에서 개방할 개폐기를 결정하여야 한다. T1과 T3를 연결하는 선로상의 개폐기 중 하나인 S10을 개방하면 건전 정전구간을 복구할 수 있다.

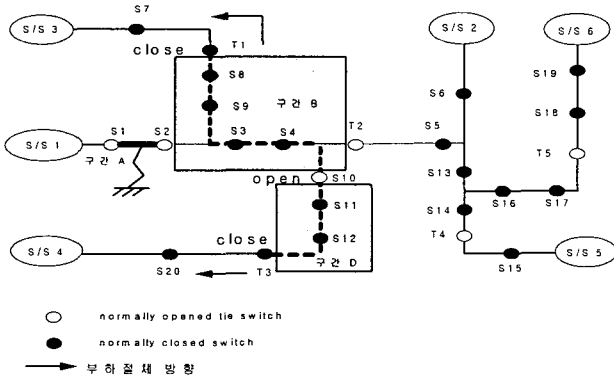


그림 6 건전 정전부하의 인접 피더로의 절체 예
Fig. 6 Example for transferring load of outage area to neighboring feeder

절체될 연계피더의 여유용량이 크지 않을 경우의 예를 들어보면, 그림 7처럼 S1, S2, S10, S14는 투입, T1, T2, T3, T4, T5는 개방 상태로 운전 중에 구간 A에서 고장이 발생한 경우에 고장구간을 분리하기 위해 S1, S2를 개방하면, 회색 구간 B 및 구간 D에서 건전 정전구간이 발생하게 된다. 이 경우, S10을 개방, T2, T3를 투입함으로써 건전 정전구간이 복구되지만, S/S 2에 과부하가 발생한 경우를 상정하였다. 이 경우에는 T5를 투입하고 T2-T5 경로 중 점선으로 표시한 것처럼 방사상 구성 원칙을 만족하면서 개방 가능한 개폐기 중 하나인 S16를 개방하여 S/S 2 부하중 일부인 구간 C를 S/S 6으로 절체하면 S/S 2의 과부하 발생을 방지할 수 있다.

따라서 이러한 두 가지 고장복구방안이 후보해가 될 수 있도록 GA의 스트링을 그림 8과 같이 건전 정전구간 절체 부분과 연계피더 부하 절체 부분으로 나누어 구성하였다. 즉 GA의 스트링은 건전 정전구간과 인접한 연계개폐기(T1, T2, T3)의 ON/OFF 상태 결정부분 및 투입된 연계개폐기 사이의 개방할 개폐기 결정부분 (T1-T2, T1-T3, T2-T3), 건전 정전구간 절체 후 연계피더의 과부하를 방지하기 위해 연계 피더내의 투입할 개폐기 결정부분 (T4, T5) 및 개방할 개폐기 결정부분 (T2-T4, T2-T5)으로 구성하였다. 디코딩

과정에서는 먼저 GA의 스트링 중 건전 정전구간 절체 부분을 디코딩한 후 연계피더에 과부하가 발생하면 연계피더 부하 절체 부분을 디코딩하여 연계피더의 과부하를 해소하였다.

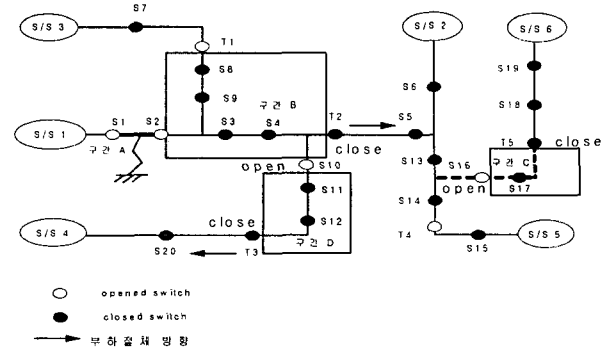


그림 7 건전 정전부하 및 연계피더의 건전부하를 인접 피더로의 절체 예

Fig. 7 Example for transferring load of outage area to neighboring feeder and transferring load of neighboring feeder to another feeder

예를 들면, GA의 스트링이 그리고 연계피더 부하를 절체하기 위해 투입할 수 있는 개폐기인 T4 및 T5의 ON/OFF 상태를 각각 1bit로 표현하였으며, 연계피더 부하절체를 위해 개방해야 할 개폐기는 각각 5bit로 할당하였다. 즉 유전 알고리즘의 스트링이 110:00010:11111:01010:01:11110:00001이라면, 처음 3bit에 의해 T1, T2는 투입, T3은 개방으로 결정된다. 이때 T1-T2, T1-T3 사이에서 개방할 개폐기는 연속되는 00010에 의해 S3가 개방된다. 만약 절체후 과부하가 발생한다면, 다음의 01에 의해 T4는 개방, T5는 투입되며 따라서 T2-T5사이에서 개방해야할 개폐기는 00001에 의해 S18로 결정된다.

	건전 정전구간 절체						연계피더 부하 절체			
string 1	T1	T2	T3	T1-T2	T1-T3	T2-T3	T4	T5	T2-T4	T2-T5
string 2	T1	T2	T3	T1-T2	T1-T3	T2-T3	T4	T5	T2-T4	T2-T5
string m	T1	T2	T3	T1-T2	T1-T3	T2-T3	T4	T5	T2-T4	T2-T5

여기서, T_i : i번째 연계 개폐기의 투입/개방여부 (투입 1, 개방 0)
 T_i-T_j : i번째 연계 개폐기와 j번째 연계 개폐기가 형성하는 루프상의 개방할 개폐기

그림 8 건전 정전부하 및 연계피더의 건전부하 절체를 위한 유전 알고리즘의 스트링 구성 방법

Fig. 8 String architecture for transferring load of outage area and neighboring feeders

GA의 평가 과정은 식 (8)의 적합도 함수를 이용하여 각

스트링을 평가한다.

$$Fitness = \frac{\alpha}{\beta + obj} \quad (8)$$

여기서, obj : 식 (1)의 종합지수

α, β : 상수

GA의 복제 과정에서는 위에서 언급한 적합도에 비례하여 복제하는 룰렛휠 방법을 사용하였고, 교배 및 돌연변이를 적용한 후 적합도가 가장 높은 개체를 다음 세대로 복제하는 엘리트즘을 적용하였다. 본 논문에서 적용한 유전 알고리즘을 이용한 건전구간 절체방법은 건전 정전구간 내의 개폐기를 적절히 개방함으로써 건전 정전구간 부하를 분할한 후, 이들 각각을 여러 인접 연계피더로 절체시킴으로써 과부하 발생가능성을 줄이고 부하 균등화 개선 등을 이룰 수 있다.

4. 사례 연구

제안한 고장복구 방안의 유용성을 검증하기 위하여 한전의 실제 배전자동화 시스템인 강동 배전계통에 적용하였다. 본 논문에서는 강동 배전 자동화 시스템 중 7개소의 변전소, 17대의 배전용 변압기, 100개의 피더 및 2558개의 부하단에 대해 적용하였다. 제안한 방법에서 사용한 시뮬레이션 계수는 표 2와 같다. 배전계통 고장복구 문제는 3.3절에서 언급한 바와 같이 고장발생시 건전 정전구간 복구 과정에서는 복구할 건전 정전구간의 수, 각 건전 정전구간에 대해 복구하기 위해 투입된 개폐기 수, 고장복구를 위해 투입한 연계 개폐기 사이 구간에서 개방할 수 있는 개폐기 수를 고려하여야 한다. 그러나 건전 정전구간 복구 이후 과부하가 발생하면 과부하 발생 피더의 건전 정전구간 부하 절체를 수행하여야 하며, 이 과정에서는 과부하 발생 연계 피더에서 투입 및 개방할 개폐기 쌍을 결정하여야 한다.

표 2 시뮬레이션 계수

Table 2 Simulation coefficients

계수	GA				TS		α	β
	세대 수	해집단 수	교배 확률	돌연변이 확률	반복 회수	타부리스트 길이		
설정값	200	80	0.8	0.01	400	30	50	0

본 논문에서의 고장복구 문제에서는 복구할 건전 정전구간 수가 3 미만, 각 고장영역의 연계개폐기 수는 2~5개, 각 고장영역에서 투입된 연계개폐기 사이 구간의 개방할 개폐기 수가 3 정도이다. 또한, 고장복구 이후 과부하 발생시 건전 정전부하 절체 과정에서는 건전부하 절체 가능한 연계피더의 수는 하나의 연계피더에 대해 3~5개 정도이며, 해당 연계 개폐기 투입 후 개방 가능한 개폐기는 2~5개 정도이다. 따라서 고장복구 문제의 전체 스트링의 길이는 13~22 정도이며 전체 해공간의 수는 개략적으로 $3 \times 3 \times 5 \times 5 \times 3 = 675$ 개 정도로 추산할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 해집단 설정

시 해집단 수를 30~100 정도까지 5개씩 증가시키면서 실험해본 결과, 해집단이 80일 때 비교적 우수한 결과를 나타내었으므로 해집단 수를 80으로 정하였다. 교배 및 돌연변이 확률도 해집단 설정과정과 동일하게 교배 확률은 0.6에서 0.95까지 0.05씩 증가시키며 검토하였고, 돌연변이 확률도 0.001에서 0.1사이에서 0.005씩 증가시키며 테스트하여 비교적 우수한 성능을 가지는 값인 0.8 및 0.01로 설정하였다.

위에서 언급한 바와 같이 배전계통은 다수의 탐색 영역을 가지는 조합 최적화 문제라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 조합 최적화 문제에 비교적 우수한 성능을 나타내는 유전 알고리즘 및 타부 탐색법을 결합하는 방법을 제안하였으며, 이를 이용하여 배전계통 고장복구 문제를 해결하는 방안을 제시하였다. 그러나 고장복구 문제에서는 일반적으로 짧은 시간내에 고장복구 방안을 결정하는 것이 중요하며 따라서 이러한 사항을 고려한 연구[17]가 진행되어 왔으며, 유전 알고리즘 및 타부 탐색법의 최적해 탐색시간 단축을 위하여 병렬화 알고리즘이 도입되고 있다. 따라서 본 논문에서는 유전 알고리즘 및 타부 탐색법의 최적해 탐색시간을 단축하기 위하여 병렬 알고리즘인 PC 클러스터링을 도입하여 최적해 탐색시간 단축 및 최적해 탐색성능 향상을 도모하였다. 그림 9는 개발한 PC 클러스터 시스템이고, 사례연구로 임의로 선정된 구간에 고장을 발생시켜 제안한 방법의 고장복구 방안을 검토하였다.



그림 9 개발한 PC 클러스터 시스템

Fig. 9 Developed PC Cluster System

사례 1) 한 구간에서 고장이 발생한 경우

그림 10에는 고장발생을 모의한 동산 D/L 및 상천 D/L의 계통도를 나타내었고, 해당 D/L은 각각 6개 및 4개의 D/L과 연계되어 있다. 그림 10에 나타낸 바와 같이 구간 A(동산 D/L)에서 고장이 발생한 경우 해당 고장구간을 분리하기 위해 개방된 개폐기는 동산 OCB(2419) 및 보훈관 43(23160)이다. 이 경우의 건전 정전구간은 점선으로 표시하였으며 건전 정전부하량은 132.96[A]이다. 제안한 병렬 GA-TS에 의해 구한 복구방안의 종합지수를 표 3에 우선순위로 나타내었으며 표 4에는 복구방안에서 조작하는 개폐기명을 나타내었다. 식 (1)의 종합지수에 대한 가중계수 d_1, d_2, d_3, d_4 는 2절에서 설명한 값에 대해 균일하게 1000으로 나누어 각각 1.3, 5.98, 13485.35, 1로 설정하였다.

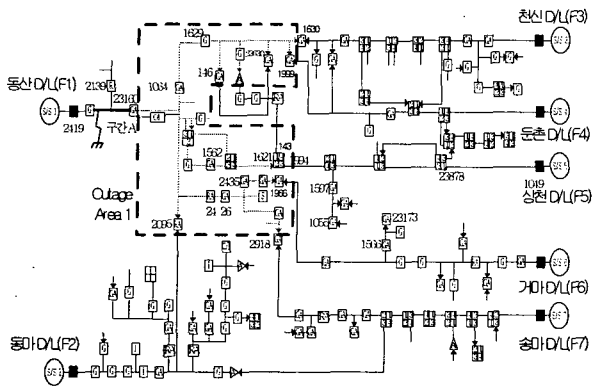


그림 10 예제 계통
Fig. 10 Example distribution system

표 3 병렬 GA-TS에 의한 우선순위별 고장복구방안의 종합지수

Table 3 Ranking list of objectives in restoration schemes using the parallel GA-TS

순위	항목	지 수				종합지수
		IC ^h	ILB ^h	IP ^h	IV ^h	
1		3	0.2	0	0.02	5.12
2		3	0.2	0	0.02	5.12
3		3	0.23	0	0.02	5.3

표 4 병렬 GA-TS에 의한 우선순위별 개폐기 조작방안
Table 4 Ranking list of switching operation in restoration schemes using the parallel GA-TS

순위	항목	투입 및 개방된 개폐기 조작순서
1		24 개방 → 1966 투입 → 1630 투입
2		24 개방 → 2918 투입 → 1630 투입
3		26 개방 → 1966 투입 → 1630 투입

표 4의 개폐기 조작순서는 정전부하 복구를 위한 개폐기를 우선 투입한 후 정전부하 분할을 위한 개폐기를 개방하는 순서로 정해진다. 첫 번째 우선순위 해는 Outage Area 1의 건전 정전부하를 동산지 2(24)를 개방하여 Outage Area 1의 건전정전 부하를 분할한 후 동산지 56(1966), 둔촌간 12L1(1630)을 투입함으로써 천신 D/L(F3), 거마 D/L(F6)에 의해 복구하는 방법이다. 이는 기존의 경험적 방법에 의해 구한 배전계통 고장복구 알고리즘[1]과 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 두 번째 우선순위를 나타내는 해는 동산지 2(24)를 개방하여 Outage Area 1의 건전정전 부하를 분할한 후 동산지 32R1(2918), 둔촌간 12L1(1630)을 투입함으로써 천신 D/L(F3), 송마 D/L(F7)에 의해 복구하는 방법이다. 세 번째 우선순위 해는 동산지 12(26)를 개방하여 점선으로 표시된 건전 정전부하를 분할한 후 동산지 56(1966),

둔촌간 12L1(1630)을 투입함으로써 천신 D/L(F3), 거마 D/L(F6)에 의해 복구하였다. 이 경우에는 우선순위 1 및 우선순위 2의 후보해에 비해, 평가지수가 큰 값을 나타내었다. 표 5에서는 각 우선순위별 고장복구 실행 후 연계피더의 부하량 변화상태를 나타내었다.

표 5 고장복구 이후 연계피더의 부하량
Table 5 Changes of loads in tie feeders after restoration

순위	항목	연계 피더명	용량 변화량
1		천신 D/L (F3)	120[A] → 212.05[A]
		거마 D/L (F6)	130[A] → 170.91[A]
2		천신 D/L (F3)	120[A] → 212.05[A]
		송마 D/L (F7)	135[A] → 175.91[A]
3		천신 D/L (F3)	120[A] → 215.46[A]
		거마 D/L (F6)	130[A] → 167.5 [A]

제한한 병렬 GA-TS 방법을 종래의 GA, GA 연산시 이전 세대의 평균적합도 이하의 스트링이 일정 세대동안 반복되지 않도록 타부 목록을 첨가한 GA, TS와 그 결과를 서로 비교·검토하였다. 그림 11에는 예제 배전계통에 대해 위에서 언급한 각 방법 및 제안한 병렬 GA-TS의 세대별 종합지수 추이를 나타내었고, 반복회수가 증가함에 따라 종합지수가 감소하여 약 5세대의 반복회수에서 종합지수 5.14인 우수한 해를 얻을 수 있었다. 또한 타부 목록을 첨가한 GA가 기존의 GA를 적용한 결과보다 최적해로의 수렴속도가 빠름을 확인할 수 있었다. 따라서, 최적해를 찾는 방법으로 GA와 TS의 특성을 적절히 조합하는 것이 더 우수함을 확인하였고, 이를 병렬로 연산함으로써 더 빠른 시간에 최적해를 구할 수 있었다.

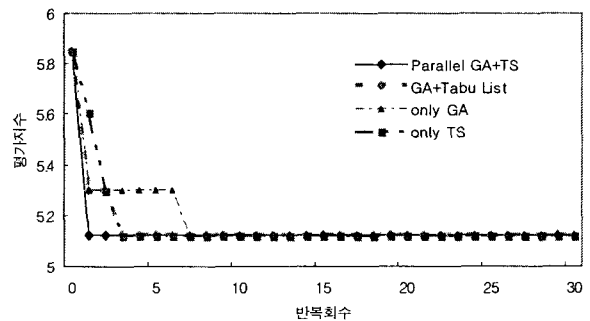


그림 11 GA, TS, GA+Tabu List 및 제한한 병렬 GA-TS의 세대별 종합지수

Fig. 11 Integral objective value vs generation curves for GA, TS, GA+Tabu List and the proposed parallel GA-TS

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

• 속도 향상률 (speedup : S_p)

$$S_p = \frac{T}{T_p} \tag{9}$$

여기서, T : 프로세서 한대를 사용한 경우의 실행시간

T_p : p 대의 프로세서를 사용한 경우의 실행시간

• 병렬계산의 효율성 (parallel computation efficiency)

$$E_p = \frac{S_p}{p} \tag{10}$$

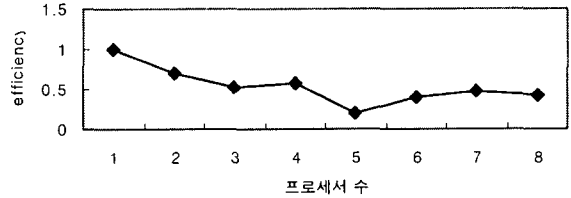
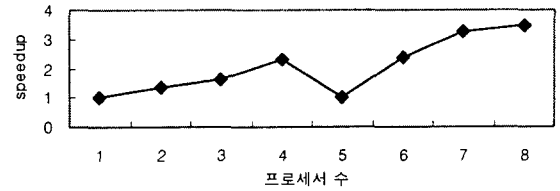
여기서, p : 사용한 프로세서의 수

그림 12에 노드 수 증가에 따른 속도 향상률, 병렬계산 효율 및 계산시간을 나타내었다. 그림 12에 보이는 것처럼 프로세서 수를 증가시키기에 따라 똑같은 최적해를 구할 때 탐색시간이 단축됨을 확인하였다. 속도 향상률은 노드 수와 거의 선형적으로 비례하여 향상되었으나 노드 수의 증가에 따라 다소 저하되는 경우가 발생하였는데, 이는 여러 노드들 간의 상호 통신시에 발생할 수 있는 병목현상(bottleneck)과 GA의 평가과정에서 소요되는 계산시간 때문으로 생각된다. 그리고 제안한 방법으로 구한 고장복구 방안 계산시간이 약 5초 정도 걸렸다. 이는 해집단을 사용하지 않는 종래의 방법에 의해 구한 계산시간이 동일 기종을 사용할 경우 약 1~5초 정도 소요되는 것과 비교해 볼 때, 제안한 방법이 병렬과정을 통해 비교적 짧은 시간 내에 최적해를 구함을 알 수 있다.

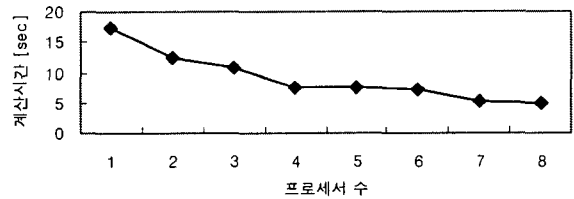
사례 2) 분기점을 포함한 구간에서 고장이 발생한 경우

그림 13에 나타낸 바와 같이 구간 B(동산 D/L)에서 고장이 발생한 경우 해당 고장구간을 분리하기 위해 개방된 개폐기는 보존간 43(23160), 둔촌간 44(1064), 보존간 60(1562), 동산지 2(24)이다. 이 경우의 건전 정전구간을 Outage Area 1, Outage Area 2, Outage Area 3의 점선으로 표시하였으며 건전 정전 부하량은 92.05[A]이다. 제안한 병렬 GA-TS에 의해 구한 복구방안의 종합지수를 표 6에 우선순위별로 나타내었으며 표 7에는 우선순위별 복구방안에 대한 조작될 개폐기명을 나타내었다. 우선순위가 가장 높은 해는 기존의 경험적 방법에 의해 구한 배전계통 고장복구 알고리즘[1]과 동일한 결과를 얻음을 확인할 수 있었다. 여기서, 평가지수 IC^h 계산 과정에서는 각 고장구간별 고장복구를 위한 개폐기 조작회수를 고려할 수 있도록 총 개폐기 조작회수를 고장영역수로 나누어 이를 IC^h 로 설정하였다.

표 8에서는 각 우선순위별 고장복구 실행 후 연계피더의 부하 변화량을 나타내었다. 사례 2의 경우에는 문제의 탐색 영역이 좁아서 비교적 빠른 시간내에 우수한 해를 구함으로써 병렬 계산효과를 고찰하지 못하였다.



(a) 노드 수에 따른 속도 향상률 및 병렬계산 효율



(b) 노드 수에 따른 최적해 탐색시간

그림 12 노드 수 증가에 따른 속도 향상률, 병렬계산효율 및 최적해 탐색시간

Fig. 12 Speedup, efficiency, and computation time according to the node number

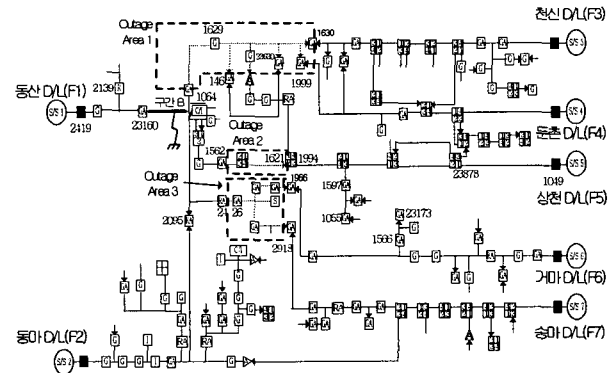


그림 13 예제 계통도

Fig. 13 Example distribution system

표 6 병렬 GA-TS에 의한 우선순위별 종합지수

Table 6 Ranking list of objectives in restoration schemes using the parallel GA-TS

항목 순위	지 수				종합지수
	IC^h	ILB^h	IP^h	IV^h	
1	1	0.004	0	0.019	1.34
2	1	0.004	0	0.002	1.34
3	1	0.004	0	0.002	1.34

표 7 병렬 GA-TS에 의한 우선순위별 개폐기 조작방안
Table 7 Ranking list of switching operation in restoration schemes using the parallel GA-TS

항목 순위	투입 및 개방된 개폐기 조작순서
1	1630 투입→1621 투입→1966 투입
2	1999 투입→1621 투입→1966 투입
3	1630 투입→1621 투입→2918 투입

표 8 고장복구 이후 연계피더의 부하량
Table 8 Changes of loads in tie feeders after restoration

항목 순위	연계 피더명	부하 변화량
1	천신 D/L (F3)	120[A] → 154.09[A]
	상천 D/L (F5)	135[A] → 152.05[A]
	거마 D/L (F6)	130[A] → 170.91[A]
2	둔촌 D/L (F4)	125[A] → 159.09[A]
	상천 D/L (F5)	135[A] → 152.05[A]
	거마 D/L (F6)	130[A] → 170.91[A]
3	천신 D/L (F3)	120[A] → 154.09[A]
	상천 D/L (F5)	135[A] → 152.05[A]
	송마 D/L (F7)	135[A] → 175.91[A]

사례 3) 여러 구간에서 동시에 고장이 발생한 경우

그림 14에 나타낸 바와 같이 구간 A(동산 D/L) 및 구간 C(상천 D/L)에서 고장이 동시에 발생한 경우 해당 고장구간을 분리하기 위해 개방된 개폐기는 동산 OCB(2419), 보훈간 43(23160) 및 상천 OCB(1049), 둔촌로 214(1)(23878)이다. 이 경우의 전진 정전구간을 Outage Area 1, Outage Area 2의 점선으로 표시하였으며 전진 정전부하량은 각각 132.95[A], 143.18[A]이다. 제한한 알고리즘에 의해 구한 복구방안의 종합지수를 우선순위로 표 9에 나타내었다. 여기서, 평가지수 IC^h 계산 과정에서는 사례 2)에서와 마찬가지로 각 고장구간별 고장복구를 위한 개폐기 조작회수를 고려할 수 있도록 총 개폐기 조작회수를 고장영역수로 나누어 이를 IC^h 로 설정하였다. 또한 연계피더의 용량확보를 위해 연계 피더 전진부하를 인접 피더로 절체 하는 경우, 이를 가급적 방지하기 위해 해당 절체과정에서의 개폐기 조작회수에 5배를 곱하여 IC^h 를 계산하였다.

표 10에는 우선순위별 복구방안에 대한 조작될 개폐기명을 나타내었으며 표 11에서는 각 우선순위별 고장복구 실행 후 연계피더의 부하변화량을 나타내었다.

사례 1)과 동일한 방법으로 모의 실험한 세대별 종합지수 추이를 그림 15에 나타내었고, 반복회수가 증가함에 따라 종합지수가 감소하여 약 3세대의 반복회수에서 종합지수 11.98인 우수한 해를 얻을 수 있었다. 또한 그림 16에 노드 수 증가에 따른 속도 향상률, 병렬계산 효율 및 계산시간을 나타내었다. 그림 16에 보이는 것처럼 프로세서 수를 증가 시킴에 따라 똑같은 최적해를 구할 때 탐색시간이 단축됨을 확인하였다.

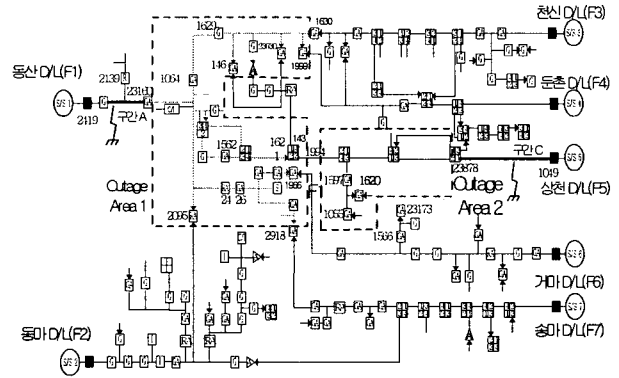


그림 14 예제 계통도
Fig. 14 Example distribution systems

표 9 병렬 GA-TS에 의한 우선순위별 종합지수
Table 9 Ranking list of objectives in restoration schemes using the parallel GA-TS

항목 순위	지 수				종합지수
	IC^h	ILB^h	IP^h	IV^h	
1	6	0.7	0	0.027	11.98
2	7	0.58	0	0.026	12.59
3	7	0.58	0	0.026	12.59

표 10 제한한 알고리즘에 의한 우선순위별 개폐기 조작방안

Table 10 Ranking list of switching operation in restoration schemes using the proposed method

항목 순위	투입 및 개방된 개폐기 조작순서
1	230 투입→1656개방(연계피더 전진부하 절체) →1630 투입→1055 투입
2	230 투입→1656개방(연계피더 전진부하 절체) →1064 개방→1630 투입→2918 투입→1055 투입
3	230 투입→1656개방(연계피더 전진부하 절체) →24 개방→2918 투입→2095 투입→1055 투입

표 11 고장복구 이후 연계피더의 부하량
Table 11 Changes of loads in tie feeders after restoration

항목 순위	연계피더명	부하 변화량
1	천신 D/L (F3)	110[A] → 242.96[A]
	성내 D/L	145[A] → 238.34[A]
	천사 D/L	150[A] → 199.84[A]
2	천신 D/L (F3)	110[A] → 144.91[A]
	송마 D/L (F7)	135[A] → 233.86[A]
	성내 D/L	145[A] → 238.34[A]
3	천신 D/L (F3)	110[A] → 208.86[A]
	동마 D/L (F6)	130[A] → 164.09[A]
	성내 D/L	145[A] → 238.34[A]
	천사 D/L	150[A] → 199.84[A]

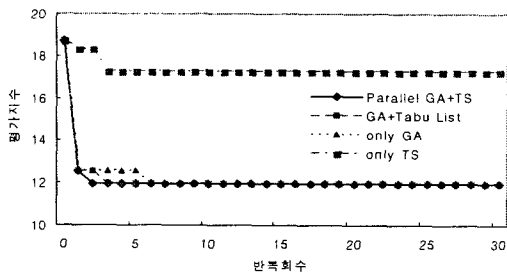
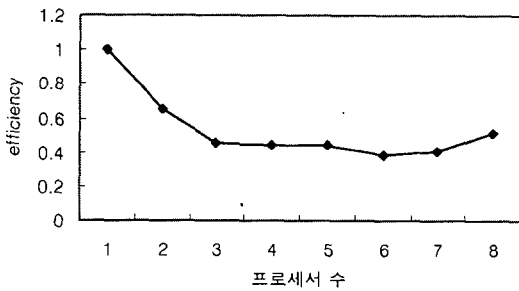
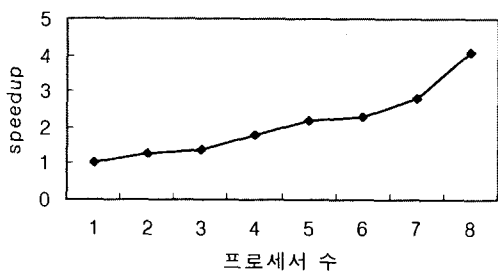
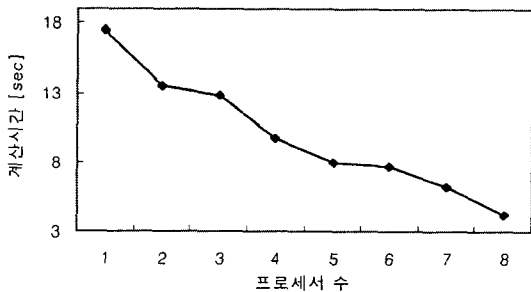


그림 15 GA, TS, GA+Tabu List 및 제안한 병렬 GA-TS의 세대별 종합지수

Fig. 15 Integral objective value vs generation curves for GA, TS, GA+Tabu List and the proposed parallel GA-TS



(a) 노드 수에 따른 속도 향상률 및 병렬계산 효율



(b) 노드 수에 따른 최적해 탐색시간

그림 16 노드 수 증가에 따른 속도 향상률, 병렬계산 효율 및 최적해 탐색시간

Fig. 16 Speedup, efficiency, and computation time according to the node number

사례 4) 고장발생 피더로 고장복구가 가능한 경우

그림 17에 나타난 바와 같이 구간 A(성내 D/L)에서 고장이 발생한 경우 해당 고장구간을 분리하기 위해 개방된 개폐기는 성일지 16(1656), 성일지 7(2161)이다. 이 경우의 건전 정전구간은 점선으로 표시하였으며 건전 정전부하량은 95.45[A]이다. 제안한 알고리즘에 의해 구한 복구방안의 종합지수를 우선순위로 표 12에 나타내었다. 우선순위가 가장 높은 해는 기존의 경험적 방법에 의해 구한 배전계통 고장복구 알고리즘[1]과 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 여기서 고장발생 피더로의 건전 정전부하를 복구하는 경우의 우선순위를 높게 설정하기 위하여, 해당 고장복구에서 조작된 개폐기 조작과정은 개폐기 조작회수 IC^h 에 포함시키지 않았다.

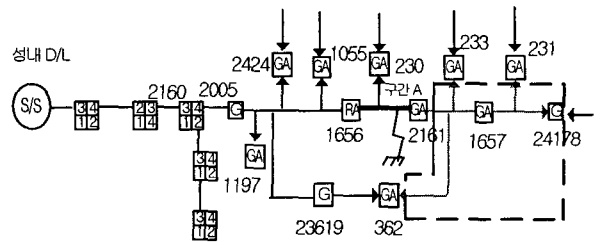


그림 17 예제 계통도

Fig. 17 Example distribution system

표 12 병렬 GA-TS에 의한 우선순위별 종합지수

Table 12 Ranking list of objectives in restoration schemes using the parallel GA-TS

순위	지 수				종합지수
	IC^h	ILB^h	IP^h	IV^h	
1	0	0.0009	0	0.0002	0.006
2	1	0.001	0	0.014	1.32
3	1	0.002	0	0.017	1.33

표 13에는 우선순위별 복구방안에 대한 조작된 개폐기명을 나타내었다. 표 14에서는 각 우선순위별 고장복구 실행 후 연계피더의 부하변화량을 나타내었다.

표 13 병렬 GA-TS에 의한 우선순위별 개폐기조작방안
Table 13 Ranking list of switching operation in restoration schemes using the parallel GA-TS

순위	투입 및 개방된 개폐기 조작순서
1	362 투입
2	233 투입
3	231 투입

표 14 고장복구 이후 연계피더의 부하량

Table 14 Changes of loads in tie feeders after restoration

항목 순위	연계 피더명	부하 변화량
1	성내 D/L	150[A] → 135.9[A]
2	송마 D/L	100[A] → 137.5[A]
3	천사 D/L	120[A] → 157.5[A]

5. 결 론

본 논문에서는 배전계통 고장복구 문제의 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 개선하기 위해서 PC 클러스터 시스템을 이용하였고, 새로운 병렬 GA-TS 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 TS의 빠른 수렴특성과 GA의 전역탐색 능력을 효과적으로 이용하여 전역 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 개선하였고, 개인용 컴퓨터를 이용한 PC 클러스터 시스템을 이용하여 알고리즘을 병렬화 함으로서 저비용으로 고성능 계산이 가능하도록 하였다. 또한 개발한 방법을 이용의 편리성과 추후 확장 및 성능 개선을 용이하게 하기 위하여 Windows와 Visual C++환경에서 구현하였다.

제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 한전의 실제 배전 자동화 시스템인 강동 배전계통에 적용해 본 결과, 발생한 고장에 대해 다양한 고장복구 방안을 제시하였으며, 각 복구방안에 대해 종합지수에 따른 우선순위로 각 항목별 평가 지수, 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 정전부하를 적절히 분할하여 각 연계 피더로 할당하는 복구방안과 연계 피더의 허용용량을 확보하기 위해 연계 피더의 부하를 미리 절체시키는 복구방안을 우선순위로 적절히 구해냄을 알 수 있었다. 또한 제안한 방법에 의한 결과를 GA, TS와 비교한 결과, 기존의 방법 및 제안한 방법 모두 최적해를 탐색하였으나 제안한 알고리즘의 최적해 탐색성능이 보다 우수함을 확인할 수 있었다. 그리고 제안한 알고리즘의 병렬계산 성능을 평가해본 결과, 병렬 연산의 수행 노드수를 증가시킴에 따라 최적해 탐색성능을 유지하면서 최적해 탐색시간을 상당히 단축시킴을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제(R-2002-B-044)임.

참 고 문 헌

[1] J. S. Wu, K. L. Tomsovic, C. S. Chen, "A Heuristic Search Approach to Feeder Switching Operations for Overload, Faults, Unbalanced Flow and Maintenance", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.

6, no. 4, pp. 1579-1585, Oct. 1991.
 [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] Shuji Higashi, Jiro Sogawa, Koji Nakata, Akira Manuyama, Akira Hibi, Chihiro Fukui, "Development of the Advanced Intelligent Restoration Guidance System for a Control Center," International Conference on ISAP, pp. 731-738, 1994.
 [5] Y. Y. Hsu, H. M. Huang, "Distribution System Service Restoration using the Artificial Neural Network Approach and Pattern Recognition Method", IEE Proceeding Generation Transmission & Distribution, vol. 142, no 3, 1995.
 [6] 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.
 [7] Seung-Jae Lee, Seong-Il 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.
 [8] S. H. Chung, K. R. Ryu, S. C. O, T. W. Park, "Parallel Processing System for High Speed Information Retrieval", Parallel Processing System Newsletters, vol. 7, no. 2, pp. 3-19, 1996.
 [9] D. Kim, I. Yoon, "Performance Analysis and Experiments of Sorts on a Parallel Computer with Parallel Computation Models", International Conference on Parallel and Distributed Systems, pp. 154-159, Dec. 1997.
 [10] David A. Lifka, "High performance computing with microsoft windows 2000," Proc. of the 2001 IEEE Conference on Cluster Computing, pp. 47-54, 2001.
 [11] P. D'Ambra, M. Danelutto, D. Dj Serafino, M. Lapegna, "Integrating MPI-based Numerical Software into an Advanced Parallel Computing Environment", Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing, pp. 283-291, Feb. 2003.
 [12] J.-Y. Choi, J.-R. Shin and M.-H. Kim, "Parallel computing environment based on windows operating system," 한국항공우주학회지, May 2002.
 [13] Jeonghee Shin, Sang-Hwa Chung, Woojong Hahn, "An SCI-based Software Via System for PC Clustering", International Conference on Cluster

Computing, pp. 227-234, Oct. 2001.

[14] F. Glover, "Tabu Search - Part 1", ORSA Journal on Computing, vol. 1, no. 3, pp. 190- 206, 1989.

[15] D. E. Goldberg, Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, 1989.

[16] 한국전기연구원, "경쟁체제하에서의 배전계통 공급신뢰도 및 경제성 평가기법", 2004.

[17] T. Nagata, H. Sasaki, "An efficient algorithm for distribution network restoration", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, pp. 54-59, July 2001.

저 자 소 개



문 경 준 (文 景 俊)

1972년 10월 25일생. 1994년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국원자력연구소 양성자기반 공학기술개발사업단 post-doc.
 Tel : 042) 868-4663
 Fax : 042) 868-8131
 E-mail : kjmun@kaeri.re.kr



박 준 호 (朴 俊 灝)

1955년 9월 17일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1978~1981년 충남대 공대 전기공학과 전임강사 및 조교수. 현재 부산대 공대 전자전기정보컴퓨터공학부 교수.
 Tel : 051) 510-2370
 Fax : 051) 513-0212
 E-mail : parkjh@pusan.ac.kr



이 화 석 (李 和 錫)

1966년 7월 10일생. 1991년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 거제대학 전기과 부교수.
 Tel : 055) 680-1604
 Fax : 055) 681-3993
 E-mail : hslee@koje.ac.kr



김 형 수 (金 亨 洙)

1972년 1월 26일생. 1994년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 Illinois Technology of Chicago, Electrical and Computer Engineering Post Doc.
 Tel : +1-312-567-3758
 Fax : 051) 513-0212
 E-mail : kimhy@iit.edu