

PC 클러스터 기반 병렬 적응진화 알고리즘을 이용한 배전계통 최적 재구성

문경준*, 이화석**, 박준호***

* 한국원자력연구소, ** 거제대학 전기과, *** 부산대학교 전기공학과

PC Cluster based Parallel Evolutionary Algorithm for the Reconfiguration of Distribution System

Kyeong-Jun Mun*, Hwa-Seok Lee**, June Ho Park***

* Korea Atomic Energy Research Institute, ** Koje College, *** Pusan National University

Abstract - 본 논문에서는 해집단을 다음세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하고, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 적응진화 알고리즘을 제안하였다. 또한 제안한 알고리즘을 실시간 적용하기 위해 PC 클러스터 시스템으로 병렬처리하여 최적해 탐색 성능 및 탐색속도를 개선하였다.

제안한 알고리즘을 참고문헌의 배전계통 재구성 문제에 적용해본 결과, 유전 알고리즘 또는 진화전략을 단독으로 사용한 경우보다 제안한 방법이 더 빠른 시간내에 우수한 최적해를 탐색하였고, 병렬 연산의 수행 노드수 증가에 따라 최적해 탐색성능은 유지하면서 최적해 탐색 시간을 상당히 단축시킴을 확인하였다.

1. 서 론

배전계통은 개폐기에 의해 방사상 형태의 구조로 이루어져 있으며, 이 경우 개폐기의 투입/개방 동작을 통하여 선로를 재구성함으로써 배전계통의 선로 손실 및 말단 전압강하가 감소한다. 그러나 재구성 과정에서 결정해야 하는 조작 가능한 개폐기 및 고려할 제약 조건이 많아서 선로를 재구성하는 조합수가 많으므로 적정 시간내에 최적의 선로 재구성 방안을 찾기가 쉽지 않다.

배전계통 선로 재구성에 관한 기존의 연구로는 분기 한계법(branch and bound)[1], 분기 교환법(branch exchange operation)[2], 경험적 방법(heuristic method)[3], 전문가 시스템[4] 등이 제안되었으나 알고리즘의 특성상 전역 최적해를 구한다는 보장이 없다는 단점을 가진다. 또한 최근에는 전역 최적해 탐색능력을 가지는 SA 기법[5], GA[6] 등이 적용되었으나 전역 최적해 근처까지는 빨리 수렴하나 확률적인 특성으로 전역 최적해를 찾는 데 많은 시간이 요구된다. 한편, TS[7]는 문제의 특성을 고려한 경험적 탐색이 용이하므로 빠른 수렴성을 가지는 반면에, 탐색과정이 초기해의 영향을 크게 받으며 국부수렴한 경우 새로운 영역을 탐색하기 위한 다양화 과정에서 매우 많은 계산시간이 소요된다.

병렬처리 기법은 여러 개의 프로그램을 또는 프로그램의 분할된 부분들을 다수의 프로세서가 분담하여 동시에 처리하는 기술을 말하며, 단일 컴퓨터에 의해 순차적으로 수행하는 것보다 속도를 크게 향상시킬 수 있다[8].

본 논문에서는 해집단을 다음세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하고, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략(Evolution Strategy : ES)이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 적응진화 알고리즘(adaptive evolutionary algorithm : AEA)을 제안하였다. 또한 제안한 알고리즘을 실시간 적용하기 위해 PC 클러스터 시스템으로 병렬처리하여 최적해 탐색 성능 및 탐색속도를 개선하였다.

배전계통 재구성 문제에 제안한 알고리즘의 적용가능성을 검토하기 위해 참고문헌 [5]의 32모선 및 69모선

배전계통을 선정하여 해의 탐색성능 및 실 배전계통 적용 가능성을 검토한 결과, GA 또는 ES를 단독으로 사용한 경우보다 제안한 방법이 더 빠른 시간내에 우수한 최적해를 탐색하였고, 병렬 연산의 수행 노드수 증가에 따라 최적해 탐색성능은 유지하면서 최적해 탐색 시간을 상당히 단축시킴을 확인하였다.

2. 배전계통 선로 재구성 문제

배전계통의 재구성 문제의 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

- 1) 목적함수 : 선로손실을 최소화하도록 식 (1)과 같이 설정하였다.

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

여기서, P_i , Q_i : i 번째 노드에서 선로에 주입되는 유효/무효 전력

V_i , r_i : i 번째 노드전압 및 i 번째 구간저항

- 2) 제약조건

- a) 선로용량 제약조건

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

여기서, I_k : k 번째 노드에서 선로에 주입되는 전류

I_{lim} : 허용 전류 용량

- b) 전압강하 제약조건

$$V_{\text{min}} \leq V_k \leq V_{\text{max}} \quad (3)$$

여기서, V_k : k 번째 노드의 전압

V_{min} : 허용전압 하한치

V_{max} : 허용전압 상한치

- c) 방사상 구성 제약조건 : 부하에 전력을 공급할 때 하나의 피더에서 한 방향으로 전력을 공급받는다.

3. 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 있는 장점을 가지며 이를 그림 1에 나타내었다.

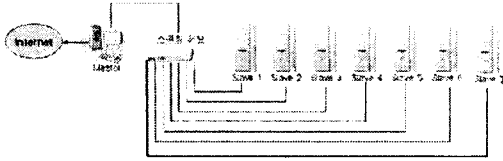


그림 1 PC 클러스터 시스템의 구조
Fig. 1 Structure of PC cluster system

3. 병렬 적응진화 알고리즘

3.1 적응진화 알고리즘

본 논문에서는 한 세대에서 다음 세대로 진화시킬 때 유전 알고리즘과 진화전략을 동시에 적용하고, 세대의 진행과정에서 유리한 진화연산기법이 다음 세대의 해집단을 형성하는데 우위에 있도록 하는 적응진화 알고리즘(Adaptive Evolutionary Algorithm : AEA)을 제안하였으며 적응진화 알고리즘의 주요 과정은 다음과 같다.

- 1) 개체의 구분 (초기화) : 초기해집단 구성시 각 스트링에 대해서 태그변수 0 또는 1을 임의로 대응시킨다. 태그변수 0은 유전알고리즘을 적용할 개체이고 태그변수 1은 진화전략을 적용할 개체이다.
- 2) 평가 및 복제 : 각 스트링을 평가하기 위해서 목적함수가 최소가 되면 적합도가 최대가 되도록 적합도함수를 선정하였으며 복제방법은 룰렛휠을 사용하였다. 복제 후 태그변수가 0인 개체들은 유전알고리즘을 적용한 후 그 자손에는 태그변수 0을 대응시킨다. 그리고 태그변수가 1인 개체들은 진화전략을 적용한 후 그 자손에는 태그변수 1을 대응시킨다.
- 3) 최소해집단 수의 보장 : 유전알고리즘과 진화전략의 해집단에 대해 전체 해집단의 일정비율 이상의 개체를 대응시킬 수 있도록 룰렛휠에 의해서 복제된 유전알고리즘 또는 진화전략의 해집단이 전체 해집단의 일정비율 이하가 되면 상대 해집단으로부터 임의로 선택된 개체를 유전알고리즘 또는 진화전략의 해집단에 편입한다.
- 4) 유전 알고리즘과 진화전략 연산 : 본 논문에서는 실변수형 유전알고리즘을 이용하였으며, 복제방법으로 룰렛휠, 교배 및 돌연변이 방법으로 단순교배와 균일 돌연변이를 사용하였다. 변경된 단순교배 방법은 식 (4) 및 (5)에 나타내었다.

< 교배 전 > < 교배 후 >

$$S_k^t = [v_1, \dots, v_k, \dots, v_N] \quad S_k^{t+1} = [v_1, \dots, v_k, v_{k+1}, \dots, v_N] \quad (4)$$

$$S_w^t = [w_1, \dots, w_k, \dots, w_N] \quad S_w^{t+1} = [w_1, \dots, w_k, w_{k+1}, \dots, w_N] \quad (5)$$

▲
교배위치

여기서, $v_j = \alpha_1 \times v_j + \alpha_2 \times w_j$, $w_j = \alpha_1 \times w_j + \alpha_2 \times v_j$

$\alpha_1, \alpha_2 : 0$ 과 1 사이의 임의의 수

$v_j, w_j :$ 각 변수의 상한치와 하한치사이의 값

$N :$ 각 스트링을 구성하는 변수의 개수

균일 돌연변이 방법은 t 세대의 해집단 중에서 하나의 스트링 $S_k^t = [v_1, \dots, v_k, \dots, v_N]$ 의 k 번째 변수가 돌연변이를 수행한다면, $t+1$ 세대의 자손은 식 (6)과 같다.

< 돌연변이 전 > < 돌연변이 후 >

$$S_k^t = [v_1, \dots, v_k, \dots, v_N] \quad S_k^{t+1} = [v_1, \dots, v_k, v_{k+1}, \dots, v_N] \quad (6)$$

▲
돌연변이 위치

여기서, $v_k :$ 상한치와 하한치사이의 임의의 수

본 논문에서는 사용한 진화전략은 부모 해집단으로부터 자손 해집단을 생성한 후 부모는 모두 제거하고 자손 해집단을 다음 세대의 부모 해집단으로 선택하는 방법을 사용하였고, 돌연변이 방법은 가우시안 정규난수를 이용하여 자손 해집단을 생성하는 방법을 사용하였다.

- (5) 엘리티즘 : 본 논문에서는 전체 해집단에서 적합도가 가장 높은 개체를 유전알고리즘의 해집단과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하였다.

3.2 병렬 적응진화 알고리즘

본 논문에서 제안한 적응진화 알고리즘은 병렬 처리 기법인 PC 클러스터 시스템으로 병렬처리함으로써 최적해 탐색성능 및 탐색속도를 개선하였다. 제안한 방법의 적응진화 알고리즘 수행노드 간의 연결구조를 그림 2에 나타내었다.

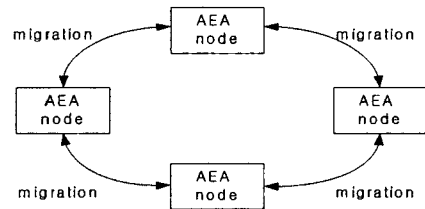


그림 2 AEA 노드간의 연결 구조
Fig. 2 Connection structure of each AEA node

제안한 알고리즘은 먼저 PC 클러스터의 각 노드들에 AEA의 해집단을 나누어 할당한 후 일정 세대동안 최적해 탐색과정을 수행한다. 이 경우 각 노드들간에는 링 형태로 연결한 후, 이주(migration) 연산을 통해 인접 노드와 각 노드의 우수한 해를 상호 전송함으로써 각 노드의 최적해 탐색성능을 향상시켰다.

4. 병렬 적응진화 알고리즘을 이용한 배전계통 재구성

적응진화 알고리즘은 개방할 개폐기의 위치를 부호화하여 초기 해집단을 생성한다. 배전계통 재구성 문제에 적응진화 알고리즘을 적용하기 위한 해집단의 부호화 과정을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에 나타난 부호화 과정에서는 배전계통을 방사상으로 운용하기 위해 각 루프 상에서 개방할 개폐기를 스트링으로 부호화하였다.

평가 과정은 식 (7)의 적합도 함수를 이용하여 각 스트링을 평가한다.

string 1	SW ₁₁	SW ₁₂	...	SW _{1N}	*
string 2	SW ₂₁	SW ₂₂	...	SW _{2N}	*
⋮					
string p	SW _{p1}	SW _{p2}	...	SW _{pN}	*

여기서 SW_{ij} : i번째 스트링의 j번째 루프상의 개방할 개폐기

* : 태그변수, p : 해집단 수

N : 대상 배전계통의 루프 개수

그림 3 적응진화 알고리즘의 부호화 과정
Fig. 3 Coding method of AEA

$$Fitness = \frac{\alpha}{\beta + Loss + \sum penalty_i} \quad (7)$$

여기서 Loss : 선로손실 [kW]

penalty_i : i번째 벌점 항, i=1, 2, 3

$$penalty_1 = \begin{cases} 0 & \text{if } I_a < I_{max} \\ \gamma_1 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad a = 1, 2, \dots, T$$

$$penalty_2 = \begin{cases} 0 & \text{if } V_a < V_{max} \\ \gamma_2 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad a = 1, 2, \dots, T$$

$$penalty_3 = \begin{cases} 0 & \text{방사상 구성인 경우} \\ \gamma_3 & \text{방사상 구성이 아닌 경우} \end{cases}$$

I_a : 구간 a 에서의 선로전류
 V_a : 구간 a 에서의 전압
 V_{max} : 허용가능한 최소 전압
 I_{max} : 선로 용량, T : 구간 수
 $\alpha, \beta, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$: 상수

5. 사례연구

참고문헌 [5]의 32모선 배전계통 재구성 문제를 선정하여 제한한 방법과 GA, ES의 성능을 비교·검토하였으며, 32모선 배전계통을 그림 4에 나타내었다. 표 2에는 본 논문에서 사용한 시뮬레이션 계수를 나타내었다. 또한 그림 5에서는 시뮬레이션을 위해 개발한 PC 클러스터 시스템을 나타내었다.

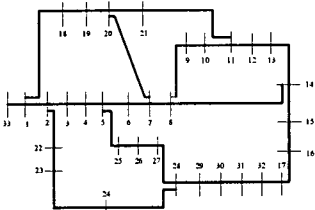


그림 4 32 모선 배전계통 시스템
Fig. 4 Example distribution system with 32 buses

표 2 병렬 적응진화 알고리즘의 시뮬레이션 계수
Table 2 Simulation coefficients in the parallel Evolutionary Algorithm

방법	세대 수	해집단 수	교배 확률	돌연변이 확률	C_d	C_i	α	β
AEA	200	40	0.8	0.01	0.995	1.005	500	0
GA	200	40	0.8	0.01	0.995	1.005		
ES	200	40	-	-				



그림 5 제한한 방법에 사용된 PC 클러스터 시스템
Fig. 5 PC cluster system for the proposed method

본 논문에서 제한한 병렬 적응진화 알고리즘을 종래의 유전 알고리즘 및 진화전략과 그 결과를 서로 비교·검토하였다. 그림 6에 32모선 배전계통에 대한 각 방법의 세대별 손실추이를 나타내었고, 약 20회의 반복회수에서 최적해인 (6-7), (8-9), (13-14), (24-28), (31-32)에 수렴하였으며, 손실은 131.85[kW]로써 초기구성시의

186.04[kW]에 비해 29.1% 감소하였고, 모선의 최소전압은 11.69[kV]에서 11.89[kV]로 2% 상승하였다. 또한 병렬 적응진화 알고리즘이 기존의 유전 알고리즘 및 진화전략만을 단독으로 수행한 경우보다 최적해로의 수렴속도가 빠름을 확인할 수 있었다. 따라서, 최적해를 찾는 방법으로서 유전 알고리즘의 전역탐색 성능과 진화전략의 국부탐색 특성을 적절히 조합하는 것이 더 우수한 최적해 탐색성능을 가짐을 확인하였고, 이를 병렬로 연산함으로써 더 빠른 시간에 최적해를 구할 수 있었다. 표 3에 32모선 배전계통의 초기 구성시의 개폐기 위치 및 손실 그리고 병렬 적응진화 알고리즘에 의해 구한 최적 구성의 개폐기 위치 및 손실을 나타내었고, 그림 7에 초기 계통구성도 및 병렬 적응진화 알고리즘에 의해 구한 최적 재구성 방안을 도시하였다.

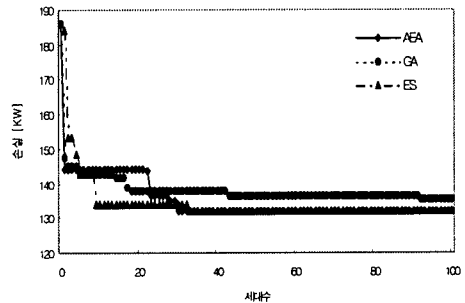


그림 6 각 방법별 세대별 손실추이
Fig. 6 Loss vs generation curves for each method

표 3 초기 및 최적 개폐기 위치 및 손실
Table 3 Opened switch positions and losses for initial and optimal solution

초기 구성	개폐기위치	24-28	7-20	17-32	11-21	8-14
	손실[kW]	186.04				
최적 재구성 후	개폐기위치	24-28	6-7	31-32	8-9	13-14
	손실[kW]	131.85				

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

• 속도 향상률 (speedup) S_p

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

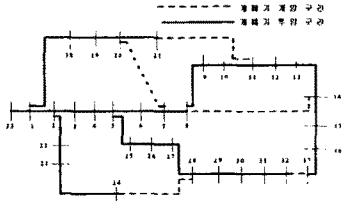
여기서, T : 프로세서 한대를 사용한 경우의 실행시간
 T_p : p대의 프로세서를 사용한 경우의 실행시간

• 병렬계산의 효율성 (parallel computation efficiency)

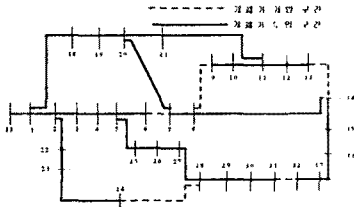
$$E_p = \frac{S_p}{p} \quad (9)$$

여기서, p : 사용한 프로세서의 수

그림 8에 노드 수 증가에 따른 속도 향상률, 병렬계산 효율 및 계산시간을 나타내었다. 그림 8에 보이는 것처럼 프로세서 수를 증가시키에 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 적응진화 알고리즘의 평가과정에서 소요되는 계산시간 때문으로 생각된다.



(a) 초기 계통 구성도

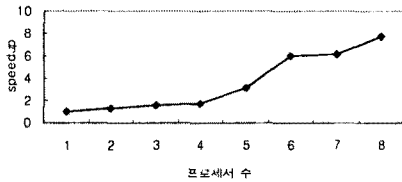


(b) 제안한 방법에 의해 구한 최적 계통 구성도

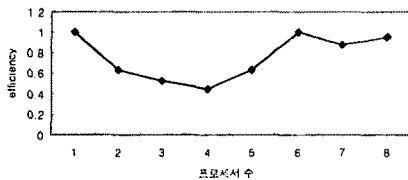
그림 7 초기 계통 구성도 및 최적 계통 구성도
Fig. 7 Initial and optimal configuration

6. 결 론

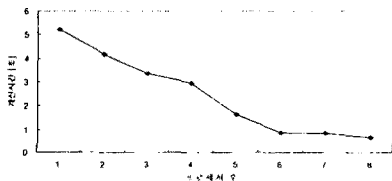
본 논문에서는 해집단을 다음세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하고, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 적응진화 알고리즘(adaptive evolutionary algorithm : AEA)을 제안하였으며 또한 제안한 알고리즘은, 개인용 컴퓨터를 이용한 PC 클러스터 시스템으로 병렬처리하여 저비용으로 고성능 계산이 가능하도록 하였다.



(a) 노드 수에 따른 속도 향상률 추이



(b) 노드 수에 따른 병렬계산 효율 추이



(c) 노드 수에 따른 최적해 탐색시간

그림 8 속도 향상률, 병렬계산 효율 및 최적해 탐색시간
Fig. 8 Speedup, efficiency, and computation time

제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 참고문헌 [5]의 32모선 배전계통 재구성 문제에 적용하여 병렬 적응진화 알고리즘을 종래의 유전 알고리즘 및 진화전략의 결과와 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 기존의 방법 및 제안한 방법 모두 최적해를 탐색하였으나, 제안한 알고리즘의 최적해 탐색성능이 보다 우수함을 확인할 수 있었으며, 병렬 연산의 수행 노드수를 증가시킴에 따라 최적해 탐색성능을 유지하면서 최적해 탐색시간을 단축시킬 수 있었다.

감사의 글

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

[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] 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.
- [7] K. Nara, Y. Mishima, A. Gojyo, T. Ito and H. Kaneda, "Loss minimum reconfiguration of distribution system by tabu search," Proc. of IEEE PES T&D Conference and Exhibition 2002 Asia Pacific, vol. 1, pp. 232-236, Oct. 2002.
- [8] J.-Y. Choi, J.-R. Shin and M.-H. Kim, "Parallel computing environment based on windows operating system," 한국항공우주학회지, May 2002.