

# PC 클러스터 기반의 Multi-HPSO를 이용한 안전도 제약의 경제급전

논 문
58-9-2

## The Security Constrained Economic Dispatch with Line Flow Constraints using the Multi PSO Algorithm Based on the PC Cluster System

장 세 환\* · 김 진 호<sup>†</sup> · 박 종 배\*\* · 박 준 호\*\*\*  
(Se-Hwan Jang · Jin-Ho Kim · Jong-Bae Park · June Ho Park)

**Abstract** - This paper proposes an approach of Multi\_HPSO based on the PC cluster system to reduce or remove the stagnation on an early convergence effect of PSO, reduce an execution time and improve a search ability on an optimal solution. Hybrid PSO(HPSO) is combines the PSO(Particle Swarm Optimization) with the mutation of conventional GA(Genetic Algorithm). The conventional PSO has operated a search process in a single swarm. However, Multi\_PSO operates a search process through multiple swarms, which increments diversity of expected solutions and reduces the execution time. Multiple Swarms are composed of unsynchronized PC clusters. We apply to SCED(security constrained economic dispatch) problem, a nonlinear optimization problem, which considers line flow constraints and N-1 line contingency constraints. To consider N-1 line contingency in power system, we have chosen critical line contingency through a process of Screening and Selection based on PI(performance Index). We have applied to IEEE 118 bus system for verifying a usefulness of the proposed approaches.

**Key Words** : PSO(Particle Swarm Optimization), PC cluster system, SCED(Security-constrained economic dispatch)

### 1. 서 론

경제급전(Economic Dispatch)은 전력계통의 다양한 시스템 제약을 만족시키면서, 경제적으로 비용이 최소화되는 최적의 발전량을 결정하는 문제이다. 종래의 수학적 최적화 기법은 경제급전문제를 해석하는데 있어, 시작점에 대한 지나친 민감도, 수렴성에 대한 미보장성 등의 여러 가지 문제점들을 보여주었다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 시도로서 유전알고리즘(Genetic Algorithm)[1], 타부탐색법(Tabu Search)[2], SA(Simulated Anneling)[3]와 같은 경험적인 방법(Heuristic Method)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 최근에는 J. Kennedy 와 R. Eberhart[4-5] 에 의해 유행 중인 알고리즘이라 불리는 군집생명체의 행태에 기반한 새로운 진화연산 기법이 제안되었다. 행 중이알고리즘이 소개된 이후, 전력계통에서도 행 중이알고리즘의 분석과 적용에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. [6]에서는 발전기제약을 고려한 경제급전문제에 행 중이알고리즘을 적용하여 GA와 비교하고 있다. 그리고 M행 중이알고리즘을 제안하여 valve-point effect를 고려한 경제급전문제를 해석하고 있다 [7]. 또한, 발전기 제약을 고려한 비선형 경제급전문제를 풀

기 위해 새로운 PSO 알고리즘[8]을 제안하였고, 안전도를 고려한 최적조류문제를 풀기 위해 PSO 알고리즘[9]을 적용하고 있다. 또한 PSO 알고리즘 구조에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다[10-12]. 특히, PSO 알고리즘과 유전알고리즘(GA)에 대한 비교·분석을 통해서, PSO 알고리즘에서 최적해와 근사한 해를 지닌 값에 대해서 발생하는 조기수렴현상을 지적하였다[13-14].

GA 또는 PSO와 같은 경험적인 방법(heuristic method)에서 최적해를 찾기 위한 가장 손쉬운 방법은 긴 세대와 다양하고 많은 일반해를 고려하면 된다. 하지만, 이와 같은 방법은 일반적으로 긴 연산시간을 필요로 한다. 최근 급격한 전자산업의 발전에 기초하여 저가의 연산장치를 이용하여 고속연산을 수행할 수 있는 분산처리시스템의 개발과 적용에 관한 연구가 이루어지고 있다. [15]은 네트워크화 된 컴퓨터 시스템을 이용한 DC-OPF문제의 분할 연산을 제안하고 있고, [16]에서는 신뢰도지수평가에서의 병렬처리법을 제안하고 있다. [17]은 전원계획문제에 병렬처리기를 적용하고 있으며, [18]은 온라인 안전도와 신뢰도 해석을 위해 웹기반의 병렬구조를 제안하였다. [19]는 대규모전력시스템의 정상상태해석에 병렬처리시스템을 적용하고 있다. 상정사고 중에서 계통에 치명적인 영향을 끼치는 상정사고를 스크리닝하여 선택적으로 고려하는 방법에 대한 연구[20-21]도 이루어지고 있다. 이와 같이 다양한 전력산업분야에서 병렬처리 시스템을 이용한 연구가 진행 되고 있다.

본 논문에서는 PSO 알고리즘의 조기수렴현상에 따른 정체(stagnation)를 경감 또는 제거시키고, 최적해 탐색능력의 향상과 연산시간을 줄이기 위해, PC 클러스터 시스템 기반의 Multi\_HPSO 알고리즘을 제안한다. Hybrid PSO(HPSO)

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 진국대학 전기공학과 박사과정  
E-mail : shjang@konkuk.ac.kr  
\* 정 회 원 : 경원대학 전기정보공학 조교수 · 공박  
\*\* 정 회 원 : 진국대학 전기공학과 부교수 · 공박  
\*\*\* 펠로우회원 : 부산대학 전기공학과 교수 · 공박  
접수일자 : 2009년 3월 18일  
최종완료 : 2009년 7월 23일

알고리즘은 종래에 폭 넓게 연구되었던 PSO 알고리즘에 유전 알고리즘(GA)의 돌연변이(Mutation) 특성을 고려한 알고리즘이다. 종래의 단일군집(Single\_Swarm)에서 이행되던 탐색과정을 PC 클러스터 시스템 기반의 비동기적인 여러 군집(Multi\_Swarm)을 이용한 탐색과정을 통해 일반해의 다양성 증대와 고속연산을 동시에 만족시키고자 한다. 또한 일반적으로 수급균형제약(등식제약)과 발전기 출력제약(부등식제약)을 고려하는 경제급전문제(ED)에, 선로용량제약과 N-1 선로상정사고(N-1 line contingency)를 고려하는 안전도를 고려한 경제급전(Security-constrained ED)문제를 해석하였다. 전력계통의 선로상정사고를 고려하기 위해서, N-1 선로상정사고에 대한 PI(Performance Index)를 사용하여, 스크리닝과 선택(Screening & Selection)과정을 통해 대상계통에 큰 영향을 주는 선로상정사고를 선택한다. 따라서 본 논문에서는 PC 클러스터 시스템 기반의 Multi\_HPSO 알고리즘을 제안하고, 안전도를 고려한 경제급전(SCED)문제에 적용하였다. 제안된 알고리즘의 유용성과 우수성을 입증하기 위하여, IEEE 118모선 계통에 적용하였다. 그리고 Conventional PSO, 또 다른 경험적인 방법(heuristic method)인 유전알고리즘(Conventional GA), 제안된 HPSO, Multi\_PSO, Multi\_HPSO의 결과와 비교하여 제안된 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

## 2. 안전도를 고려한 경제급전

### 2.1 안전도를 고려한 경제급전문제의 정의

일반적인 경제급전문제는 수급균형에 관한 등식 제약조건과 발전기 출력제약에 관한 부등식제약조건만을 고려하고 있다. 하지만 본 논문에서는 경제급전문제에 부가적으로 안전도를 고려하기 위해서 수급균형 뿐만 아니라 송전선로의 열용량제약과 계통에 큰 영향을 미치는 상정사고를 함께 고려한다. 목적함수로는 일반적인 경제급전의 목적함수인 유효발전비용의 최소화이고, 비상시 경제급전 등을 고려하며, 제약조건으로 유효전력조류방정식, 발전기 최대 및 최소 출력, 선로의 용량, 치명적인 상정사고를 고려한다.

### 2.2 DC 조류해석기반의 선로용량 제약을 고려한 경제급전문제의 정식화

본 논문에서는 유효발전 비용의 최소화를 경제급전문제의 목적함수로 설정하였으며, 이를 다음의 식 (1)에 나타내었다.

$$\text{Min } F(P_g) = \sum_{i=1}^{N_g} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) \quad (1)$$

여기서,  $F(P_g)$  : 총 발전 비용  
 $P_{gi}$  : 각 발전기의 유효 전력출력  
 $i$  : 발전기의 모선 번호  
 $N_g$  : 계통전체의 발전기모선의 수  
 $a_i, b_i, c_i$  : 각 발전기의 연료계수

경제급전문제에서의 제약조건은 크게 등식 제약조건과 부등식 제약조건으로 나눌 수 있다.

#### 1) 등식 제약조건

본 논문에서 고려한 등식 제약조건은 전력수급균형조건과 각 모선에서의 유효전력조류방정식으로 다음과 같다.

$$P_i - P_{gi} + P_{di} = 0 \quad i=1, \dots, N_b \quad (2)$$

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \psi_{ij}) \quad i=1, \dots, N_b \quad (3)$$

여기서,  $i$  : 발전기의 모선 번호  
 $P_i$  :  $i$ 번째 모선에 주입되는 유효전력,  
 $P_{gi}, P_{di}$  :  $i$ 번째 모선의 발전기 유효전력, 유효수요전력  
 $\theta_i, \theta_j$  :  $i$ 와  $j$ 번째 모선 전압의 위상각  
 $N_b$  : 모선의 총 개수  
 $\psi_{ij}, Y_{ij}$  : 모선  $i$ 와  $j$ 의 상호 어드미턴스의 위상각, 크기

#### 2) 부등식 제약조건

부등식 제약조건은 선로용량제약과 발전기 유효전력 출력제약을 고려하였다. 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

- 선로 조류 제약 (MVA, MW, A)

$$S_i = P_i \leq S_i^{\max} \quad (r \cong 0) \quad (4)$$

$$S_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2} = P_i \sqrt{1 + \frac{Q_i^2}{P_i^2}} = P_i \sqrt{1 + r^2} \cong P_i$$

여기서,  $P_i, Q_i$  :  $i$ 번째 모선에 주입되는 유효전력, 무효전력

$S_i^{\max}$  :  $i$ 번째 모선에 흐르는 복소 전력의 최대 허용 값

- 발전기의 유효전력 출력용량

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max} \quad (5)$$

여기서,  $P_{gi}$  : 발전기의 유효전력 출력량

$P_{gi \min}, P_{gi \max}$  : 발전기의 유효전력 최소, 최대 출력량

### 2.3 상정사고를 고려한 경제급전문제

일반적으로 전력시스템은 송전선로사고, 발전기고장 및 수요의 급변 등의 갑작스러운 상정사고에 대해서 안전하게 계통이 운영되어지도록 설계되어진다. 그러나 현실적인 문제에 의해 모든 사고에 대한 계통의 안전성을 보장하는 계통의 구성은 어렵다. 그로인해 일반적으로 동일한 발생 확률을 지닌 N-1 선로상정사고들 중 상정사고 발생 시 계통에 치명적인 영향을 미치는 선로사고가 존재한다. 이러한

선로사고를 미연에 경제급전문제에 고려함으로써 계통의 안전도 향상에 크게 기여할 수 있다.

계통에 큰 영향을 미치는 상정사고를 결정하기 위해 일반적으로 상정사고순위를 결정하게 된다. 상정사고 순위(contingency ranking)는 상정사고들의 상대적인 가혹성을 평가하기 위한 방법이다. 일반적으로 상정사고에 대한 순위의 결정은 다음과 같은 전력수행지표(power performance index)를 통해 결정된다.

$$\Pi = \sum_{k=1}^{allbranch} \frac{w_l}{2} \left( \frac{|Flow_k|}{Flow_k} \right)^{2n} \quad (6)$$

여기서,  $w_l$  : 양의 실수 가중치 계수  
 $n$  : 큰 양의 정수  
 $Flow_k$  :  $k$  선로의 전력조류량

본 논문에서는 각 선로에 대해 동일한 가중치를 지닌다고 가정한다. PI는 모든 선로가 각 선로의 용량보다 작을 때는 작은 수의 값을 가진다. 반대로 선로용량한계를 초과할 때에는 큰 값을 지닌다. AC 조류계산은 유효전력수행지표(PI)를 모든 상정사고에 대해 계산하기 위해 사용되어진다. 가장 높은 PI값을 지닌 선로사고가 가장 발생가능성이 높은 상정사고로 분석할 수 있다.

### 3. PC cluster 기반의 Multi-HPSO 알고리즘

#### 3.1 PSO 알고리즘의 개요

1995년에 J. Kennedy 와 R. Eberhart[4-5]에 의해 Particle Swarm Optimization(PSO)라 불리는 새로운 진화연산 기법이 제안되었다. PSO 알고리즘의 특징은 구조가 간단하여 구현하기도 쉬우며, 군집개체를 기반으로 하기 때문에 탐색공간상의 지역 극부해에 수렴될 가능성이 적고 탐색공간 전체를 탐색할 수 있다는 것이다. PSO 알고리즘은 유전알고리즘(Genetic Algorithm)등과 같이 복수의 탐색점을 가지며 각 탐색점의 개체해(Pbest : personal best)와 집단의 전역해(Gbest : group of global best)를 이용하여 각 탐색점의 위치와 속도를 변화시켜가는 것에 의해 전역적인 최적해를 탐색하는 최적화 방법이다. 즉, PSO 알고리즘에서는 탐색과정동안 각 개체는 이동경로를 따른 현재까지의 최적의 값을 개체해(Pbest)로 기억하고 hm)등또한 모든 개체는 개체해(Pbest) 중의 최적의 값인 전역해(Gbest)에 대한 정보를 공유한다. PSO알고리즘에서 개체  $i$ 의 위치벡터는  $S_i=(s_{i1}, \dots, s_{in})$ 로, 속도 벡터는  $V_i=(v_{i1}, \dots, v_{in})$ 로 나타낸다. 그리고 Pbest와 Gbest는 각각  $Pbest_i=(x_{i1}^{Pbest}, \dots, x_{in}^{Pbest})$ ,  $Gbest_i=(x_{i1}^{Gbest}, \dots, x_{in}^{Gbest})$ 로 나타낸다. 도 식 (7)에 의해 개체  $i$ 의 속도벡터가 업데이트해(다. 속도벡터의 업데이트를 통해 각 개체의 방향이 변화된다. 다음 세대의 각 개체의 위치벡터는 현 세대의 위치벡터와 업데이트된 속도벡터에 의해 식 (8)와 같이 결정된다. 시행횟수에 대하여 식(9)와 같이 가중치가 조정된다. 기본적인 PSO 알고리즘에서 가속 상수  $c_1, c_2$  값은 2.0으로, 최대·초기 관성가중치  $w_{max}$ ,  $w_{min}$  값은 각각 0.8, 0.4 이다.

$$V_i^{k+1} = w \cdot V_i^k + c_1 \cdot rand_1(Pbest_i^k - S_i^k) + c_2 \cdot rand_2(Gbest_i^k - S_i^k) \quad (7)$$

$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \quad (8)$$

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} * er \quad (9)$$

여기서,  $S_i^k, V_i^k$  :  $i$  번째 개체의  $k$  번째 세대의 위치, 속도 벡터  
 $S_i^{k+1}, V_i^{k+1}$  :  $i$  번째 개체의  $k+1$  번째 세대의 위치, 속도 벡터  
 $N, w$  : 개체의 총 수, 관성 가중치(inertia weight)  
 $w_{max}, w_{min}$  : 초기, 최종 관성 가중치  
 $k, iter_{max}$  : 시행 횟수 (1,2,...,n), 총 세대 (generation) 수  
 $c_1, c_2$  : 가속 상수(acceleration constant)  
 $Pbest_i^k$  :  $k$ 번째 세대까지  $i$ 번째 개체가 발견한 최적위치벡터  
 $Gbest_i^k$  :  $k$ 번째 세대까지 전체 개체가 발견한 최적위치벡터

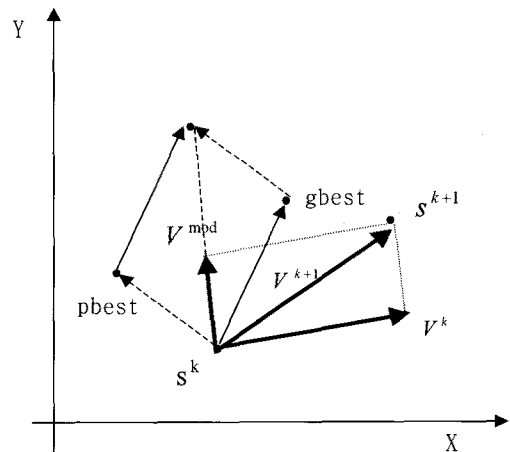


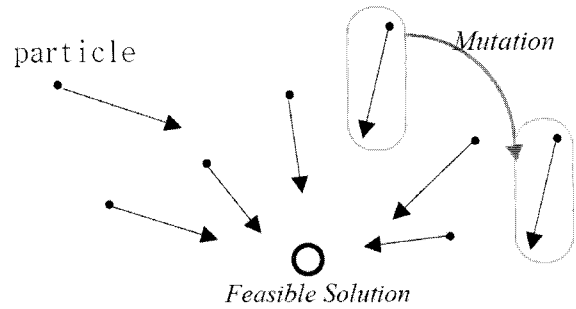
그림 1 PSO알고리즘의 탐색구조  
 Fig. 1 The search mechanism of the PSO

그림 1은 PSO 알고리즘의 탐색구조를 나타내었다. 개체의 위치벡터와 속도벡터가 주어지고, Pbest, Gbest 위치를 기억하고 있을 때 위의 관계식에 의해 위치벡터가 업데이트 된다.

#### 3.2 Multi-HPSO 알고리즘

PSO 알고리즘은 최적해와 근사해를 지닌 값에 대해서 발생하는 조기수렴현상을 가지고 있다. 이는 기본적으로 PSO

알고리즘의 모델화된 식에 기인한다. 만약 개체의 현재 위치가 Gbest 값에 근접하고, 이 전의 속도가 0에 가깝다면, 다음 단계에서 해당 개체는 이전 단계의 Gbest 값에서 이동하지 않게 된다. 다른 모든 개체들은 또한 최적해가 아닐 수도 있는 해당 개체로 모이게 되며, 이는 PSO 알고리즘에서 조기 수렴 문제를 발생시킨다. 이로 인해 PSO 알고리즘의 빠른 수렴성을 가지고 있지만, 국부해에 빠질 수 있어 전역해에 대한 수렴성을 보장할 수 없다. 그리고 일반적으로 개체(Particle)수와 세대(Generation)수가 많을수록 더 좋은 해를 찾을 수 있지만, 그에 따라 최적해 수렴에 대한 많은 연산시간을 필요로 한다. 본 논문에서는 최적해의 탐색, 해의 다양성 그리고 수렴속도의 향상을 위해 돌연변이 특성을 지닌 여러 개의 군집을 모델화한 Multi-HPSO 알고리즘을 제안하고 있다. 제안된 방법은 전 개체가 소속된 하나의 군집(Swarm)에서 비동기화된 여러 개의 군집(Swarm)으로 나눠 군집(Swarm)단위의 정보교환을 수행함으로써, 개체의 다양성을 높이고 군집(Swarm)단위의 병렬연산을 통해 최적해 탐색에 대한 연산속도 향상시킨다. 다음 그림 2는 제안한 Multi-HPSO 알고리즘의 전체 흐름도를 나타내고 있다.



1. For each  $i = 1, \dots, I$ :
  - (a) compute a random value  $\xi \sim U(0,1)$ .
  - (b) If  $\xi \leq p_m$  then  $C_{n,i} = f(C_{n,i})$ , where  $f(C_{n,i})$  is random function for  $C_{n,i}$ .

그림 3 Random Mutation의 개념도와 기본알고리즘  
Fig. 3 Basic Concept & Algorithm of the Random Mutation

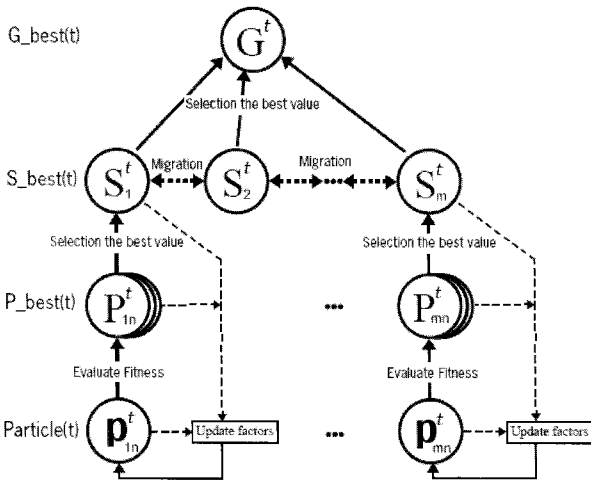


그림 2 Multi-HPSO의 알고리즘  
Fig. 2 Algorithm of the Multi-HPSO

먼저, 개별 군집(Swarm)들은 HPSO 알고리즘에 따라 군집(Swarm) 최적해인  $S\_best(t)$ 를 정한다. HPSO 알고리즘은 모든 개체들의 위치업데이트 과정 이후, 진화 알고리즘의 돌연변이 과정을 수행한다. 돌연변이과정을 통해 개체의 위치를 변화시켜 탐색 영역과 개체의 다양성을 증대시킴으로써, 조기수렴 현상을 줄이고, 최적해의 탐색능력을 향상시킬 수 있었다. 돌연변이 확률은 고정적인 값을 정할 수도 있고, 세대에 대하여 가변적(증가 또는 감소)으로 부여할 수도 있다. 지나치게 큰 돌연변이 확률은 PSO의 특성을 줄이는 효과를 야기하기 때문에, 각 개체에 대해서 5%의 돌연변이 확률을 주었다. 각 개체에 대해 5%의 확률로 돌연변이가 발생하기 때문에 매 세대별 전체 돌연변이 확률은 가변적으로 발생된다. 다음 그림 3은 HPSO 알고리즘에 사용된 돌연변이 알고리즘을 나타낸다.

HPSO 알고리즘에 의해 결정된 군집최적해( $S\_best$ )는 인접 군집간의 정보교환을 통해 더 좋은 군집최적해로 업데이트하고, 전최적해( $G\_best$ )는 군집최적해( $S\_best$ ) 중 최적값으로 결정된다. 그리고 각 군집은 군집최적해( $S\_best$ )와 개체최적해( $P\_best$ )를 통한 업데이트를 통해 다음 세대에서의 개체 위치가 결정한다.

### 3.3 Muti\_HPSO 알고리즘을 이용한 안전도를 고려한 경제급전

이 절에서는 안전도를 고려한 경제급전문제(SCED)를 해결하기 위해서 HPSO 알고리즘을 제안하고 있다. 특히, 안전도를 고려한 경제급전문제에서 등식과 부등식 제약조건에 대한 제어변수 값을 고려하여 HPSO 알고리즘에서 초기 개체의 탐색공간을 조정하는 방법으로 수렴속도를 향상시키고 있다.

이 절에서는 안전도를 고려한 경제급전문제(SCED)를 해결하기 위해서, Multi\_HPSO 알고리즘을 제안하고 있다. 특히, 안전도를 고려한 경제급전문제에서 등식과 부등식 제약조건에 대한 제어변수 값을 고려하여 Multi\_HPSO 알고리즘에서 초기 개체의 탐색공간을 조정하는 방법으로 수렴속도를 향상시키고 있다.

안전도를 고려한 경제 급전문제에서 Multi\_HPSO 알고리즘을 이용하여 전역최적해를 구하는 과정은 다음과 같다.

#### 단계 1. 데이터입력 과정)

대상 전력계통에 대한 정보를 입력받는다. N-1 상정사고에 대한 스크리닝 & 선택과정을 통한 결과를 입력받는다.

#### 단계 2. 초기화 과정)

각 개체에 대해 초기 위치 벡터  $s_k$  와 속도벡터  $v_k$ 를 발전기 출력유효효용량조건을 만족시키는 범위에서 난수를 발생시켜 초기화 시킨다.

**단계 3. 조류계산 과정)**

생성된 개체에 대한 DC 전력 조류해석을 수행한다.

**단계 4. 평가, 선택 과정)**

조류해석 결과를 바탕으로 P\_best, S\_best를 선택하고, 각 군집(Swarm)의 S\_best 중에서 G\_best를 선택한다.

**단계 5. 정보 교환 및 업데이트 과정)**

인접한 군집(Swarm)간의 정보교환을 통해 더 좋은 S\_best를 선택한다. 그리고 P\_best, S\_best 값에 의해 각 개체들의 위치, 속도벡터를 업데이트 한다.

**단계 6. 돌연변이 과정)**

돌연변이 과정을 통해 일부 개체의 위치를 수정한다.

**단계 7. 최종해 결정 과정)**

최대 시행횟수를 만족할 때까지 단계 3부터의 과정을 반복한다. 최종 시행 후의 Gbest 값이 안전도를 고려한 경제급전문제의 최종해가 된다.

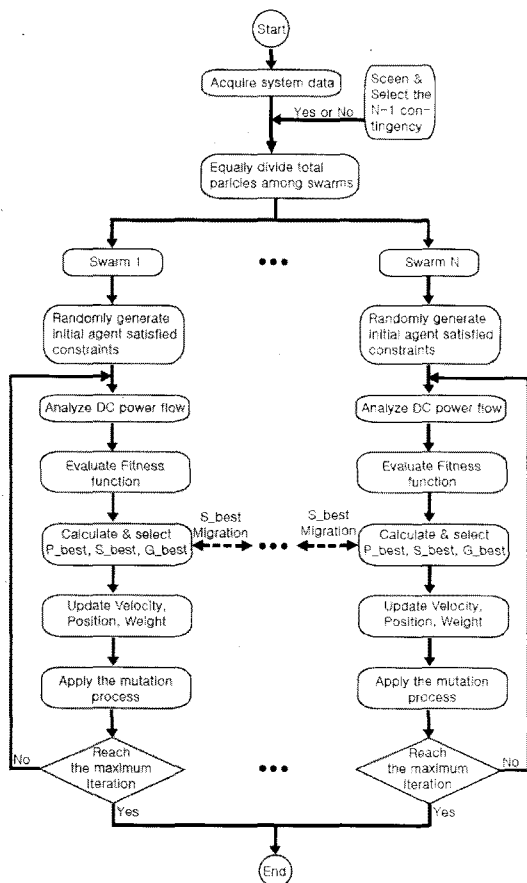


그림 4 CCED를 위한 Multi\_HPSO 알고리즘

Fig. 4 Multi\_HPSO Algorithm for CCED

위 그림 4는 Multi\_HPSO 알고리즘을 나타내고 있다. 안전도를 고려한 경제급전문제에 대한 Multi\_HPSO 알고리즘 수행 결과로부터, 수급계약, 발전기 출력계약, 선로용량계약,

안전도 제약조건을 최소비용으로 만족하는 발전기 출력량을 찾을 수 있다.

**3.3 PC 클러스터 시스템**

1980년대 중반이후 과학과 공학 분야의 발전을 통하여 첨단과학기술과 정보 통신 분야 등의 연구에 있어서 고계산성 컴퓨터의 요구가 증가되고 있다. 기존의 벡터형 슈퍼컴퓨터는 고가이므로 접하기 어려울 뿐만 아니라 발전도 한계를 보이고 있다. 그러나 최근 고성능 네트워크 기술의 비약적인 발전과 반도체 집적기술의 향상으로 클러스터형 슈퍼컴퓨터로 바뀌고 있는 추세이다. PC 클러스터 시스템이란 다수의 PC 또는 workstation을 고속 네트워크로 연결하여 하나의 컴퓨팅 시스템으로 사용하는 것으로 고성능 또는 고가용성을 얻을 수 있도록 하는 기술을 말한다. 이러한 클러스터 시스템은 일반 PC를 이용함으로써 저렴한 가격에 쉽게 구입하여 이용할 수 있으며, 기존의 병렬형 슈퍼컴퓨터보다 수배에서 수십 배 작은 비용으로 동일한 성능의 시스템 구성이 가능하여 가격 대 성능비가 우수하다. 그리고 사용자가 직접 상용부품을 사용하여 업그레이드나 node의 확장이 가능하여 시스템 유지비용이 감소하고 사용이 편리한 PC의 개발환경을 그대로 사용할 수 있다는 장점이 있다. PC 클러스터 시스템은 각 node를 연결하여 SAN(system area network)을 구축하기 위한 네트워크 어댑터와 병렬 프로그래밍을 지원하기 위한 통신 라이브러리로 구성된다. 그림 5는 일반적인 클러스터 시스템의 구조이다. PC 클러스터 시스템의 성능은 각 node를 연결하는 네트워크의 성능, 지원 소프트웨어와 각 node의 성능에 의해서 좌우되므로 PC 클러스터 시스템 구성 시 각 구성 부분을 적절히 선정하는 것이 중요하다.

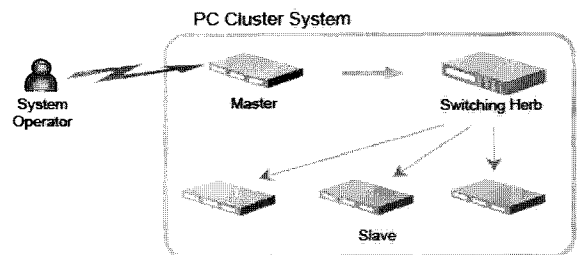


그림 5 PC 클러스터 시스템 구성

Fig. 5 Configuration of PC cluster system

본 연구에서 구축한 PC 클러스터 시스템은 Ethernet switch구조 Fast ethernet방식의 8-node PC 클러스터 시스템이다. 운영 체제는 Windows 2000 server와 Windows2000 pro를 사용하였으며, NIC으로는 Fast ethernet card를 사용하여 스위칭 허브로 연결하였고, 데이터 전송은 TCP/IP를 이용한 message-passing방식으로 MPI library를 이용하였다. 원격 관리프로그램으로 symantec PC-anywhere, 병렬프로그래밍을 위해 MS Visual C++ 6.0을 사용하였다.[22-24] 표 3에 시스템의 구체적인 내역을 제시하였다.

표 1 8-node PC 클러스터 시스템의 사양

Table 1 Specification of 8-node PC cluster system

CPU	Intel Core 2 Duo CPU E-6550 2.33GHz
RAM	DDR2 RAM 1GB
HDD	Samsung 40GB 5600rpm
NIC	3Com 3CSOHO 100-TX
Network Switch	3Com 3C16465C Switch
OS	Windows2000server, Windows2000pro
MPI Lib.	MPICH 1.2.5
Compiler	Visual C++6.0

4. 사례연구

본 논문은 IEEE 118모선 시스템[25]을 이용하여 제안한 Multi\_HPSO 알고리즘의 유용성을 입증하였다. 다음 그림 6에 나타내어진 IEEE 118모선 시스템은 14개의 발전기, 93개의 부하와 179개의 선로, 118개의 모선으로 구성되어있다. 표 2는 118 모선계통의 발전기 정보를 나타내고 있다.

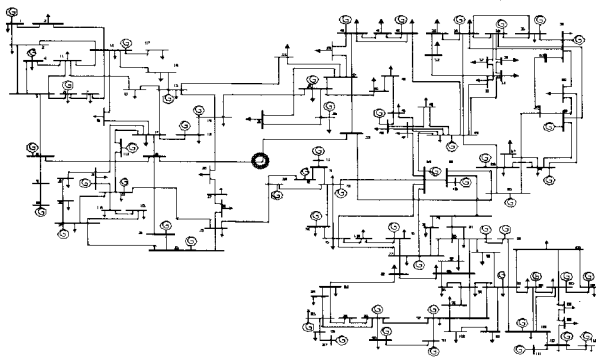


그림 6 IEEE 118 모선 계통  
Fig. 6 IEEE 118-bus system

표 2 118 모선 시스템 발전기 데이터

Table 2 The Generator data of 118 bus system

Gen.	Type	Pmin	Pmax	a	b	c
1	PV	195	290	0.005	1.89	150
10	Slack	235	355	0.0055	2	115
12	PV	140	210	0.006	3.5	40
25	PV	210	315	0.005	3.15	122
26	PV	210	315	0.005	3.05	125
49	PV	200	300	0.007	2.75	120
59	PV	195	290	0.007	3.45	70
61	PV	210	315	0.007	3.45	70
65	PV	230	345	0.005	2.45	130
66	PV	210	315	0.005	2.45	130
80	PV	265	395	0.0055	2.35	135
89	PV	210	315	0.0045	1.6	200
100	PV	230	345	0.007	3.45	70
103	PV	265	395	0.006	3.89	45

본 논문에서는 선로제약을 고려한 경제급전문제와 상정사고를 고려한 경제급전문제에 대해서 제안된 PC클러스터 기

반의 Multi\_HPSO 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해서,  $\lambda$ -반복법에 의한 경제급전문제와 Conventional GA, PSO, HPSO, Multi\_PSO, Multi\_HPSO 기법을 이용한 안전도를 고려한 경제급전문제에 대해서 분석을 수행하였다. 안전도를 고려한 경제급전문제를 해석하기 위해 다음 표 3과 같이 Heuristic Method들에 대한 파라미터 값을 사용하였다.

표 3 GA, PSO, HPSO, Multi\_PSO, Multi\_HPSO의 설정값  
Table 3 The parameter values of GA, PSO and HPSO

Solver	GA	PSO	HPSO	Multi_PSO	Multi_HPSO
Particle	30	30 & 50	30 & 50	50	50
Generation	100	100	100	100	100
Crossover rate	0.75(75%)	-	-	-	-
Mutation rate	0.05(5%)	-	0.05(5%)	-	0.05(5%)

A. 선로제약을 고려한 경제급전문제

먼저, 선로제약을 고려하지 않은 경제급전문제에 대한  $\lambda$ -반복법의 결과와 선로제약을 고려한 경제급전문제에 대한 개체 30개를 사용한 GA, PSO, HPSO의 결과를 아래 표 4에 나타내었다.

표 4 ED/ED with line constraints 문제에 대한 결과 I

Table 4 The result I of ED & ED with line constraints problem

Problem	ED	ED with line flow constraints		
		GA	PSO	HPSO
Mean Cost	16982.3	17282.14	17183.53	<b>17176.017</b>
Min. Cost	-	17216.3	<b>17160.1</b>	17163.1
Max. Cost	-	17369.6	17246.7	<b>17198.4</b>
Sta.dev.	-	37.96857	24.90858	<b>7.7693</b>
Time[s]	-	32.734	<b>24.206</b>	24.343
Early Effect	-	<b>0%</b>	15%	<b>0%</b>

선로제약을 고려한 경제급전문제의 결과 값이 선로제약을 고려하지 않은 경제급전문제의 결과 값에 대해 높은 값을 나타냈다. 이는 선로용량제약에 의해서 각 발전기의 출력이 조정되어 전체비용이 증가되었기 때문이다. 선로제약을 고려하지 않은 경제급전의 발전출력으로 선로조류를 해석해보면 선로용량을 초과하는 선로가 나타남을 쉽게 확인할 수 있다. 경험적 방법(Heuristic Method)인 GA, PSO, HPSO 기법은 50번의 시행을 통해 얻은 결과를 정리하였다. 전통적인 유전알고리즘(GA)에 비해 PSO, HPSO가 더욱 우수한 결과를 나타냄을 확인할 수 있다. 그리고 연산시간에서도 PSO, HPSO가 우수한 결과를 나타내었다. PSO와 제안된 HPSO의 결과에서, 최소값은 PSO 알고리즘에서 얻을 수 있었지만, PSO 알고리즘의 결과는 평균값, 표준편차가 제안한 HPSO 알고리즘에 비해 높은 결과를 나타내었다. 또한 PSO

알고리즘의 파라미터 값에 대해서 전체 50번 시행에서 15% 정도의 확률로 예상최적해에 도달하지 못하는 결과를 나타내었다. 선로제약을 고려한 경제급전문제에서 최적해의 탐색능력, 연산시간과 시뮬레이션의 안정성의 고려할 때, 본문에서 제안된 HPSO 알고리즘이 GA, PSO 알고리즘에 비해 상대적으로 우수한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

다음으로 선로제약을 고려한 경제급전문제에 대한 개체 50개를 사용한 PSO, HPSO, Multi\_PSO, Multi\_HPSO의 결과를 아래 표 5에 나타내었다. Multi Swarm에 대한 개체 분할에 따른 나머지 개체들은 마지막 군집(Swarm)에 포함시켰다.

표 5 ED with line constraints 문제에 대한 결과 II  
Table 5 The result II of ED with line constraints problem  
(a) PSO & Multi PSO.

Problem	PSO	Muti_PSO			
	1	2	3	4	5
Swarm	1	2	3	4	5
Particle	50	25*2	16*3+2	12*4+2	10
Mean	17174.39	<b>17170.5</b>	17170.64	17170.64	17171.34
Min.	17160.1	<b>17160</b>	17162.1	17159.2	17160.3
Max.	17202.4	17195.1	<b>17186.3</b>	17194.9	17197.5
Sta.dev.	12.96	8.42	<b>7.02</b>	11.05	11.34
Time	41.12	20.76	13.37	10.09	<b>8.48</b>
E.C.E	<b>2%</b>	15%	6%	6%	6%

(b) HPSO & Multi HPSO.

Problem	HPSO	Muti_HPSO			
	1	2	3	4	5
Swarm	1	2	3	4	5
Particle	50	25*2	16*3+2	12*4+2	10
Mean	17170.52	17170.24	17169.48	17169.5	<b>17168.23</b>
Min.	17163.4	17164	17164.6	<b>17163</b>	17163.9
Max.	17179	17182.1	17184.8	17184.1	<b>17174.2</b>
Sta.dev.	5.06	4.62	5.16	4.92	<b>2.74</b>
Time	41.16	20.8	13.52	10.23	<b>8.63</b>
E.C.E	0%	0%	0%	0%	<b>0%</b>

\* E.C.E : Early Convergence Effect

PSO와 HPSO 알고리즘의 개체를 30에서 50으로 증가함에 따라, 해의 탐색능력이 증대되어 조기수렴현상이 줄고 비용이 감소되었지만 상대적으로 연산시간이 증가하였다. Muti\_PSO와 Multi\_HPSO 알고리즘에서 전체 동일한 개체 수에서 군집(Swarm)을 증가시켰을 때, 해의 다양성의 증가로 인해 비용과 연산시간의 감소하였다. 그러나 Multi\_PSO는 두 군집(Swarm)일 때는 개체 30개를 사용한 수준으로 조기수렴현상이 증가하였지만, 3개 이상의 군집으로 나뉘질 때는 각 군집의 개체 수는 감소되었지만, 군집 수의 증가에 따른 해의 다양성의 증가로 다시 조기수렴현상이 줄어들었다. Multi\_HPSO는 조기수렴현상이 발생하지 않았다. 제안된 Multi\_HPSO 알고리즘이 비용(탐색능력), 연산시간, 조기수렴현상등의 모든 면에서 우수한 성능을 보여준다. 6 군집 이상의 그룹화는 적은 개체로 인한 군집의 의미가 없어지게 되고, 또한 시스템의 한계로 인해 군집간의 정보교환에 혼잡이 발생하여 연산시간이 증가하는 현상이 발생하였다.

B. 상정사고를 고려한 경제급전문제

앞서, 선로제약을 고려한 경제급전문제를 해석하기 위해서 제안된 Multi\_HPSO를 사용하였고, 우수성을 입증하였다. 추가적으로 안전도에 대한 제약조건으로 선로제약과 함께 N-1 선로상정사고를 고려하고자한다. 계통에 발생가능한 모든 N-1 상정사고를 고려하는 것은 연산시간의 문제뿐만 아니라 현실적으로 큰 의미가 없으므로, 계통에 영향력이 큰 선로상정사고를 선정하여 고려하였다. N-1 선로상정사고에 대한 스크리닝과 선택(Screening & Selection)을 위해 일반적으로 잘 알려진 PI(Performance Index)가 사용되어졌다. IEEE 118 모선계통에 대한 PI를 이용한 스크리닝을 통해 계통에 영향이 큰 30-38선로에 대한 상정사고가 선택되어졌다. 그림 6의 IEEE 118모선 계통도에 30-38모선의 위치를 선로에 동그라미로 표시하였다. PSO와 HPSO 알고리즘의 파라미터는 이전의 시뮬레이션과 동일한 값을 사용하였고, 30의 개체와 50회의 시뮬레이션을 시행하였다.

표 6 ED/CCED문제에 대한 결과 1

Table 6 The result I of ED/CCED problem on the PSO & HPSO

Problem	ED with line flow constraints		CCED (line contingency : 30-38)	
	PSO	HPSO	PSO	HPSO
Mean Cost	17183.53	<b>17176.017</b>	17655.64	<b>17646.14</b>
Min. Cost	<b>17160.1</b>	17163.1	<b>17559.3</b>	17580.6
Max. Cost	17246.7	<b>17198.4</b>	17840.5	<b>17791.3</b>
Sta.dev.	24.90858	<b>7.7693</b>	64.87662	<b>46.75528</b>
Time[s]	<b>24.206</b>	24.343	<b>24.23</b>	24.265
E.C.E	15%	<b>0%</b>	30%	<b>0%</b>

상정사고를 고려한 경제급전 문제는 기존의 경제급전문제에 비해 고려되어진 선로상정사고에 의해 가능해 지역은 더욱 좁아지게 되어 최적해를 찾는 데 한층 어려운 문제가 되었다. 그로 인해 지정된 파라미터 값에 대한 유전알고리즘(GA)은 예상최적해에 도달하는 해를 찾을 수가 없었다. 즉 유전알고리즘에서는 수렴성을 보장할 수가 없었다. 그리고 PSO 알고리즘에서도 전체 시행에 대해 약 30%의 확률로 예상최적해에 도달하지 못하는 결과를 보여주었다. 제안된 HPSO 알고리즘은 전 시행에 대해 안정적으로 예상 최적해에 근사한 결과를 보여주었다. 표 6은 상정사고 전과 상정사고(30-38 선로상정사고) 후의 PSO와 HPSO 알고리즘에 대한 각각의 결과를 나타내고 있다. 30-38 선로상정사고에 의해 발전기의 출력이 조정되어 상정사고 후의 결과가 상정사고 전의 결과에 비해 높은 값을 보임을 알 수 있다. PSO와 HPSO 알고리즘에 대한 상정사고 후의 전체적인 결과는 상정사고 이전과 동일한 양상을 보여주고 있다. PSO 알고리즘의 결과에서 최소값을 나타내었지만, 평균값, 표준편차가 제안한 HPSO 알고리즘에 비해 높은 값을 나타내었다. 최적해로의 수렴성과 결과의 안정성을 고려할 때, 제안한 HPSO 알고리즘의 우수성을 입증할 수 있다. 다음 표 7은 30-38선로상정사고를 고려한 경제급전문제에 PSO, HPSO의 결과와 제안한 Multi\_PSO, Multi\_HPSO의 결과를 비교하였다.

표 7 CCED문제에 대한 결과 2

Table 7 The result II of ED/CCED problem

(a) PSO & Multi PSO

Method	PSO	Muti_PSO			
Swarm	1	2	3	4	5
Particle	50	25*2	16*3+2	12*4+2	10
Mean	17642.67	17632.82	<b>17609.95</b>	17627.19	17625.13
Min.	17528.6	17573.2	<b>17548.9</b>	17545.7	17531
Max.	17733.3	17698.2	<b>17688.3</b>	17725.9	17723.2
Sta.dev.	53.09	<b>36.30</b>	37.28	53.07	45.84
Time	41.09	20.62	13.18	10.06	<b>8.45</b>
E.C.E	<b>7.4%</b>	5.6%	15.2%	10.7%	9%

(b) HPSO & Multi HPSO

Method	HPSO	Muti_HPSO			
Swarm	1	2	3	4	5
Particle	50	25*2	16*3+2	12*4+2	10
Mean	17614.15	17613.29	17614.54	<b>17598.63</b>	17605.21
Min.	17540.6	17535.1	17543.6	17554.3	<b>17534.5</b>
Max.	17729.3	17667.1	17685.7	<b>17648.8</b>	17686
Sta.dev.	41.43	36.87	36.54	<b>27.06</b>	40.71
Time	41.09	20.62	13.37	10.09	<b>8.48</b>
E.C.E	0%	0%	0%	0%	<b>0%</b>

\* E.C.E : Early Convergence Effect

이전과 마찬가지로, PSO와 HPSO의 개체를 30에서 50으로 증가함에 따라, 해의 탐색능력이 증대되어 조기수렴현상이 줄고 비용이 감소되었지만 상대적으로 연산시간이 증가하였다. 선로제약만을 고려한 경제급전문제와 같이, Muti\_PSO와 Multi\_HPSO 알고리즘에서 전체 동일한 개체수에서 군집(Swarm)을 증가시켰을 때, 해의 다양성의 증가로 인한 탐색능력의 향상으로 전체 비용이 감소하였고, 병렬연산으로 인해 연산시간도 줄어들었다. 그러나 예상최적해의 가능해 범위(feasible region)가 줄어들어 따라, 전 시행에 대해서 조기수렴현상은 여전히 발생하였다. 군집으로 나눠질 때는 각 군집의 개체 수는 감소와 군집 수의 증가에 따른 해의 다양성의 증가의 상관관계에 의해 전역탐색능력과 국부탐색능력의 차이가 발생하여 국부탐색능력이 뛰어난수록 조기수렴현상이 더 쉽게 발생함을 확인하였다. 반면에 HPSO기반의 Multi\_HPSO는 조기수렴현상이 발생하지 않았다. 제안된 Multi\_HPSO 알고리즘이 비용(탐색능력), 연산시간, 조기수렴현상등의 모든 면에서 우수한 성능을 보여준다. 6 군집 이상의 그룹화는 적은 개체로 인한 군집의 의미가 없어지게 되고, 또한 시스템의 한계로 인해 군집간의 정보교환에 혼잡이 발생하여 연산시간이 증가하는 현상이 발생하였다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 비선형(Nonlinear) 최적화문제인 안전도를 고려한 경제급전문제를 해석하기 위해, PSO 알고리즘에 유전알고리즘(GA)의 돌연변이(Mutation) 특성을 고려한 HPSO와 PC 클러스터 시스템 기반의 Multi\_HPSO 알고리

즘을 제안하였다. 병렬처리시스템 중 하나인 PC 클러스터 시스템을 통해 비동기화된 군집(Swarm)을 생성시켜, 해의 다양성 증대와 고속연산을 수행하였다. 제안된 알고리즘의 파라미터 값들은 기존의 연구결과와 적절한 실험을 통해 결정되었다. 선로상정사고를 고려하기 위해서, N-1 선로상정사고에 대한 PI(Performance Index)를 사용하여, 스크리닝과 선택(Screening & Selection)과정을 통해 대상계통에 큰 영향을 주는 선로상정사고를 선택하였다. 안전도를 고려한 경제급전문제에 대해서, IEEE 118모선 시스템에 적용하여 GA, PSO, HPSO, Multi\_PSO, Multi\_HPSO의 비교·분석을 통해 제안된 방법의 우수성을 입증하였다. 결과적으로, Multi\_HPSO 알고리즘에서 GA, PSO, HPSO, Multi\_PSO에 비해 탐색능력, 연산시간, 조기수렴현상 등의 모든 면에서 우수한 성능을 보여주었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 기초전력연구원 선형기술 연구과제(과제번호: R-2005-7-064) 지원에 의해 수행되었으며, 관계부처에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. C.Walters and G. B. Sheble, "Genetic algorithm solution of economic dispatch with the valve point loading," IEEE Trans. Power Systems, vol. 8, pp. 1325 - -1332, Aug. 1993.
- [2] W. M. Lin, F. S. Cheng, and M. T. Tsay, "An improved Tabu search for economic dispatch with multiple minima," IEEE Trans. Power Syst., vol.17, pp. 108 - -112, Feb. 2002.
- [3] K. P. Wong and Y. W. Wong, "Genetic and genetic/simulated -- Annealing approaches to economic dispatch," Proc. Inst. Elect. Eng., pt. C, vol. 141, no. 5, pp. 507 - -513, Sept. 1994.
- [4] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," IEEE international Conferece swon Nsural Networks, vol.4, pp.1942-1948, 1995.
- [5] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Swarm intelligence", book, an Imprint of Elsevier, 2001
- [6] Zwe-Lee Gaing, "Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints", IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, No. 3, August 2003
- [7] Jong-Bae Park and Ki-Song Lee, "A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch With Nonsmooth Cost Functions", IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, No. 1, February 2005
- [8] A. Immanuel Selvakumar, "A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems", IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, No. 1, February 2007



[9] Pablo E. Oñate Yumbla, "Optimal Power Flow Subject to Security Constraints Solved With a Particle Swarm Optimizer", IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, No. 1, February 2008

[10] Y. Shi and R. Eberhart, "Parameter selection in particle swarm optimization" in Proc. 7th Annu. Conf. Evol. Program., 1998, pp. 591 - 600.

[11] J. Kennedy, "Small worlds and mega-minds: Effects of neighborhood topology on particle swarm performance," in Proc. Congr. Evol. Comput., vol. 3, 1999, pp. 1931 - 1938.

[12] P. N. Suganthan, "Particle swarm optimizer with neighborhood operator," in Proc. Congr. Evol. Comput., vol. 3, 1999, pp. 1958 - 1962.

[13] P. Angeline, "'Evolutionary optimization versus particle swarm optimization philosophy and performance differences,'" in Proc. 7th Annu. Conf. Evol. Program., 1998, pp. 601 - 610.

[14] R. C. Eberhart and Y. Shi, "Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization," in Evolutionary Programming VII. New York: Springer-Verlag, 1998, vol. 1447, Lecture Notes in Computer Science, pp. 611 - 616.

[15] Pandelis N. Biskas, "A Decentralized Implementation of DC Optimal Power Flow on a Network of Computers", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 20, No. 1, Feb. 2005

[16] Fangxing Li, "Distributed Processing of Reliability Index Assessment and Reliability-Based Network Reconfiguration in Power Distribution Systems", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.20, No.1, Feb. 2005

[17] Michele Di Santo, "A Distributed Architecture for Online Power Systems Security Analysis", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.51, No.6, Dec.2004

[18] Jorge Ariel Hollman, "Real Time Network Simulation with PC-cluster", IEEE Trans. on Power Systems, vol.18, No.2, May 2003

[19] Norberto Garcia, "Periodic steady-state analysis of large-scale electric systems using poincare map and parallel processing", IEEE Trans. on Power Systems, vol.19, No.4, Nov. 2004

[20] Florin Capitanescu, "Contingency Filtering Techniques for Preventive Security-Constrained Optimal Power Flow", IEEE Trans. on power system, Vol. 22, No. 4, Nov. 2007

[21] G. C. Ejebe and B. F. Wollenberg, "Automatic contingency selection", IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-98, pp 97-109, Jan/Feb. 1979

[22] <http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/mpich>.

[23] David H. M., Building linux clusters, O'reilly & Associates, 2000.

[24] David A. Lifka, "High performance computing with microsoft windows2000," Proc. of the 2001 IEEE Conference on Cluster Computing, pp. 47-54, 2001.

[25] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

## 저 자 소 개



### 장 세 환 (張世煥)

1980년 10월 27일생. 2006년 부산대 공대 전자전기통신공학과 졸업. 2008년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-458-4778, Fax : 02-444-1418  
E-mail : shjang@kunkuk.ac.kr



### 김 진 호 (金眞鎬)

1971년 11월 27일생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동대학 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2001년 동대학 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 2004년 부산대 전기공학과 조교수. 현재 경원대 전기공학부 조교수

Tel : 031-750-8825, Fax : 031-750-8571  
E-mail : kimjh@kyungwon.ac.kr



### 박 종 배 (朴宗培)

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 부교수.

Tel : 02-450-3483, Fax : 02-444-1418  
E-mail : jbaepark@konkuk.ac.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(공학박사). 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