

The Security Constrained Economic Dispatch with Line Flow Constraints using the Hybrid PSO Algorithm

張世煥* · 金眞鎬[†] · 朴宗培** · 朴俊灝***

(Se-Hwan Jang · Jin-Ho Kim · Jong-Bae Park · June Ho Park)

Abstract - This paper introduces an approach of Hybrid Particle Swarm Optimization(HPSO) for a security-constrained economic dispatch(SCED) with line flow constraints. To reduce a early convergence effect of PSO algorithm, we proposed HPSO algorithm considering a mutation characteristic of Genetic Algorithm(GA). In power system, for considering N-1 line contingency, we have chosen critical line contingency through a process of Screening and Selection based on PI(performance Index). To prove the ability of the proposed HPSO in solving nonlinear optimization problems, SCED problems with nonconvex solution spaces are considered and solved with three different approach(Conventional GA, PSO, HPSO). We have applied to IEEE 118 bus system for verifying a usefulness of the proposed algorithm.

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

1. 서 론

경제급전(Economic Dispatch)은 전력계통에서 중요한 최적화 문제 중의 하나이다. 전력계통의 다양한 시스템 제약을 만족시키면서, 경제적으로 비용이 최소화되는 최적의 발전량을 결정하는 문제이다. 최근에는 수급균형 제약을 비롯하여 더욱 다양한 제약들을 고려함으로써, 경제급전문제는 더욱 복잡하고 난해한 비선형(Nonlinear)문제로 변화하고 있다. 종래에 많이 사용되어졌던 λ -반복법, gradient법, LP(Linear programming), NLP(Nonlinear programming)등과 같은 수학적 최적화기법은 경제급전문제를 해석하는데 있어, 시작점에 대한 지나친 민감도, 복잡한 알고리즘 구조, 수렴성에 대한 미보장성 등의 여러 가지 문제점들을 보여주었다. 최근 이러한 문제점을 극복하기 위한 시도로서 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)[1], 타부탐색법(Tabu Search)[2], SA(Simulated Anneling)[3]와 같은 경험적인 방법(Heuristic Method)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 또한 근래에 군집생명체에 사회적 행동양식을 기초한 PSO(Particle Swarm Optimization)알고리즘이 소개되었다.

J. Kennedy 와 R. Eberhart[4-5] 에 의해 PSO 알고리즘이라 불리는 새로운 진화연산 기법이 제안되었다. PSO 알고리즘은 자연계의 군집생명체들이 군집(swarm)내에서 각 개체(particle)들의 경험에 대한 정보교환을 바탕으로 최적의

해를 탐색해 나아가는 과정에 기초한 최적화기법이다. PSO 알고리즘이 소개된 이후, 전력계통에서도 PSO 알고리즘의 분석과 적용에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 전력계통에서 전압안정도를 평가하기 위해 무효전력과 전압을 제어하기 위한 MPSO 알고리즘을 제안하였고[6], 발전기제약을 고려한 경제급전문제에 PSO 알고리즘을 적용하여 GA와 비교하고 있다[7]. 그리고 MPSO 알고리즘을 제안하여 valve-point effect를 고려한 경제급전문제를 해석하고 있다[8]. 또한, 발전기 제약을 고려한 비선형 경제급전문제를 풀기 위해 새로운 PSO 알고리즘[9]을 제안하였고, 안전도를 고려한 최적조류문제를 풀기 위해 PSO 알고리즘[10]을 적용하고 있다. 또한 PSO 알고리즘 구조에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다[11-13]. 특히, PSO 알고리즘과 유전알고리즘(GA)에 대한 비교·분석을 통해서, PSO 알고리즘에서 최적해와 근사한 해를 지닌 값에 대해서 발생하는 조기수렴현상을 지적하였다[14]. 이 문제는 기본적으로 발표된 PSO 알고리즘 식에 기인된다. 이러한 조기수렴현상을 정체(stagnation)라고 부른다[15].

본 논문에서는 PSO 알고리즘의 조기수렴에 따른 정체현상을 줄이기 위해 유전 알고리즘(GA)의 돌연변이(Mutation) 특성을 고려한 Hybrid PSO(HPSO) 알고리즘을 제안한다. 또한 일반적으로 수급균형제약(등식제약)과 발전기 출력제약(부등식제약)을 고려하는 경제급전문제(ED)에, 선로용량제약과 선로상정사고(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 HPSO 알고리즘을 이용한 안전도를 고려한 경제급전(SCED)문제 해석법을 제안하고 있다. 제안된 알고리즘의

[†] 교신저자, 正會員 : 慶園大學 電氣情報工學 助教授 · 工博
E-mail : kimjh@kyungwon.ac.kr

* 正會員 : 建國大學 電氣工學科 博士課程

** 正會員 : 建國大學 電氣工學科 教授 · 工博

*** 正會員 : 釜山大學 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 4月 26日

最終完了 : 2008年 7月 9日

유용성과 우수성을 입증하기 위하여, IEEE 118모선 계통에 적용하였다. 그리고 종래의 PSO, 또 다른 경험적인 방법 (heuristic method)인 유전알고리즘(Conventional GA)과 결과를 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. 안전도를 고려한 경제급전문제는 제어변수를 통해 계통운용과 관련된 제약조건들과 상정사고를 만족시키면서, 전력계통 운용 시 고려되어지는 목적함수를 최적화하는 문제로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(x) \\ & \text{s.t } g(x) = 0 \\ & h(x) \leq 0 \\ & \text{critical contingency constraints} \end{aligned}$$

여기서, x : 제어변수
 $f(x)$: 목적함수
 $g(x), h(x)$: 등식, 부등식제약조건

목적함수로는 일반적인 경제급전의 목적함수인 유효발전 비용의 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 부

등식 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

θ_i, θ_j : i 와 j 번째 모선 전압의 위상각

N_b : 모선의 총 개수

ψ_{ij}, Y_{ij} : 모선 i 와 j 의 상호 어드미턴스의 위상각, 크기

2) 부등식 제약조건

부등식 제약조건은 선로용량제약과 발전기 유효전력 출력 제약을 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. SCED문제에 대한 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 알고리즘은 물고기의 떼(schooling)와 조류의 무리(flocking)와 같은 자연계의 군집생명체들의 사회적 행동양식에 바탕을 두고 있다. 군집(swarm)내에서 개체(particle)들의 경험에 대한 정보교환을 통해 최적의 해를 탐색해 나아가는 과정을 최적화기법으로 모델링한 것이다. PSO 알고리즘의 특징은 구조가 간단하여 구현하기도 쉬우며, 군집개체를 기반으로 하기 때문에 탐색공간상의 지역 국부해에 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 있다. 또한 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 $Pbest_i=(x_{i1}^{Pbest}, \dots, x_{in}^{Pbest})$, $Gbest=(x_{i1}^{Gbest}, \dots, x_{in}^{Gbest})$ 로 나타낸다. 다음 식 (7)에 의해 개체 i 의 속도벡터가 업데이트 된다. 속도벡터의 업데이트를 통해 각 개체의 방향이 변화된다. 다음 세대의 각 개체의 위치벡터는 현재 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.

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

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

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

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

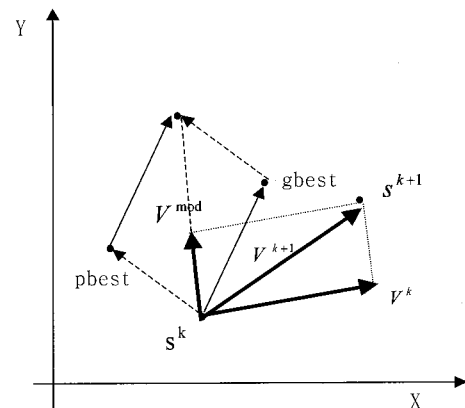


그림 1 PSO알고리즘의 탐색구조

Fig. 1 The search mechanism of the PSO

그림 1은 PSO 알고리즘의 탐색구조를 나타내었다. 개체의 위치벡터와 속도벡터가 주어지고, Pbest, Gbest 위치를 기억하고 있을 때 다음과 같이 위치벡터가 업데이트 된다. 현재 향하고 있는 방향으로부터 이제까지 탐색한 해 중에 제일 우수한 해 Pbest와 전 개체가 발견한 해 중에서 제일 우수한 해인 Gbest가 있는 방향으로 자신의 방향을 변경하고자 한다. 이 변경하고자 하는 행동은 V^{mod} 벡터(식 (7)에서 제2항과 제3항의 합)로 표현된다. 즉, 이 개체의 속도의 변경은 현재의 속도 V^k 와 V^{mod} 를 더하는 것으로 이루어지면, 속도를 변경한 후의 개체는 V^{k+1} 로 표현된다. 따라서 식 (2)에 의해서 현재 위치 s^k 는 V^{k+1} 에 의해서 새로운 위치 s^{k+1} 로 자신의 위치를 변경한다.

3.2 HPSO 알고리즘

PSO 알고리즘이 발표된 이후, 현재까지 PSO에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[11-13]. 특히, [14]에서는 PSO 알고리즘과 유전알고리즘(GA)에 대한 비교·분석을 수행하였고, PSO 알고리즘에서 최적해와 근사한 해를 지닌 값에 대해서 발생하는 조기수렴현상을 지적하였다. 이 문제는 발표된 기본적인 PSO 알고리즘 식에 기인된다. 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. 이러한 현상을 [15]에서는 정체(stagnation)라고 한다. 이 문제를 극복하기 위해 본 논문에서는 PSO 알고리즘에 유전 알고리즘의 돌연변이 특성을 고려한 HPSO 알고리즘을 제안하였다. 모든 개체들의 위치업데이트 과정 이후, 유전 알고리즘의 돌연변이 과정을 통한 개체의 위치를 변화에 따른 탐색 영역의 확장으로 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. 조기 수렴현상의 감소, 최적탐색능력 그리고 탐색속도 향상을 위해 돌연변이 확률을 조정해 본 결과, 고정적인 돌연변이 확률이 가변적으로 돌연변이 확률을 주었을 때 보다 모든 목적에 부합되는 결과를 보여주었다. 다음 그림 2는 돌연변이의 기본알고리즘을 나타낸다.

3.3 HPSO 알고리즘을 이용한 안전도를 고려한 경제급전문제

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.

안전도를 고려한 경제 급전문제에서 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 출력유효용량조건을 만족시키는 범위에서 난수를 발생시켜 초기화 시킨다.

단계 3. 조류계산 과정)

생성된 개체에 대한 DC 전력 조류해석을 수행한다.

단계 4. 평가 및 업데이트 과정)

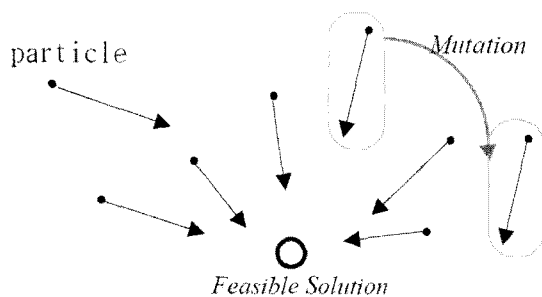
조류해석 결과를 바탕으로 Pbest, Gbest를 계산하고, 업데이트 한다. 또한 위치, 속도벡터 또한 업데이트 한다.

단계 5. 돌연변이 과정)

돌연변이 과정을 통해 일부 개체의 위치를 수정한다.

단계 6. 최종해 결정 과정)

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



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 2 Random Mutation의 개념도와 기본알고리즘
Fig. 2 Basic Concept & Algorithm of the Random Mutation

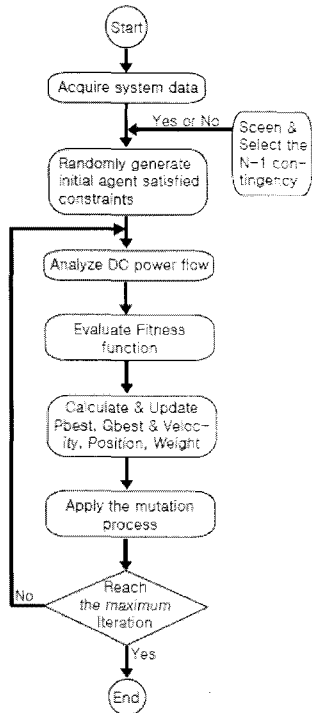


그림 3 SCED를 위한 HPSO 알고리즘
Fig. 3 HPSO Algorithm for SCED

위 그림 3는 HPSO 알고리즘을 나타내고 있다. 안전도를 고려한 경제급전문제에 대한 HPSO 알고리즘 수행 결과로부터, 수급제약, 발전기 출력제약, 선로용량제약, 안전도 제약조건을 최소비용으로 만족하는 발전기 출력량을 찾을 수 있다.

4. 사례 연구

본 논문은 IEEE 118모선 시스템[16]을 이용하여 제안한 HPSO 알고리즘의 유용성을 입증하였다. 다음 그림 4에 나타내어진 IEEE 118모선 시스템은 14개의 발전기, 93개의 부하와 179개의 선로, 118개의 모선으로 구성되어 있다. 표 1은 118 모선시스템의 발전기 정보를 나타내고 있다. 먼저 선로제약을 고려하지 않은 경제급전문제에서의 λ -반복법을 이용한 결과와 제안된 HPSO 알고리즘을 이용한 선로제약을 고려한 경제급전문제에 대한 결과에 대해서 선로제약의 유무에 대한 결과를 분석하였다. 또한 제안된 HPSO의 우수성을 입증하기 위해 선로제약을 고려한 경제급전문제에 대해서 또 다른 경험적인 기법(Heuristic Method)인 유전알고리즘(Conventional GA)과 PSO(Particle Swarm Optimization)를 이용하여 얻은 결과와 비교하였다. 유전알고리즘은 일반적으로 알려진 전통적인 형태의 유전알고리즘을 사용하였다. 다음으로, 안전도를 고려한 경제급전문제를 통해 제안한 HPSO의 우수성을 입증하였다. 경제급전문제에서 안전도에 대한 제약조건으로 N-1선로상정사고와 선로제약을 고려하였다. N-1 선로상정사고에 대한 스크리닝과 선택(Screening & Selection)을 위해 일반적인 PI(Performance Index)가 사용되어졌다. 그리고 안전도를 고려한 경제급전문제에 대한

GA와 PSO기법을 이용한 결과의 비교를 통해 제안한 HPSO의 우수성을 다시 한번 입증하였다.

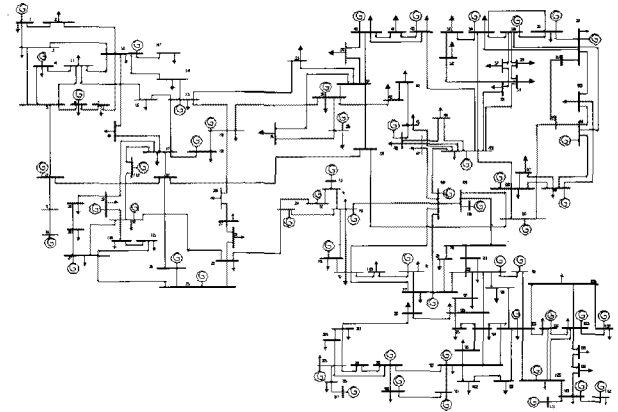


그림 4 IEEE 118 모선 계통
Fig. 4 IEEE 118-bus system

표 1 118 모선 시스템 발전기 데이터

Table 1 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

4.1 선로제약을 고려한 경제급전문제

본 논문에서는 선로제약을 고려하지 경제급전문제와 선로제약을 고려한 경제급전문제에 대한 결과를 분석하고, 선로제약을 고려한 경제급전문제에 대한 GA, PSO, HPSO 기법을 사용한 결과를 비교하여 제안한 HPSO의 우수성을 입증한다. 선로제약을 고려한 경제급전문제를 해석하기 위해 다음 표 2와 같이 파라미터 값을 지정하였다. GA와 PSO에 대해서 각각 해집단 수를 30, 세대수를 100으로 동일하게 설정하였다. 이 값들은 연산시간과 결과에 대한 다양한 파라미터 튜닝을 통해 얻은 설정값이다. 또한 유전알고리즘(GA)에서는 교배 확률과 돌연변이 확률을 각각 75%, 5%로 설정하였다. 제안한 HPSO 알고리즘을 위해 돌연변이 확률을 유전알고리즘과 동일한 5%로 설정하였다.

표 2 GA, PSO와 HPSO의 parameter 설정치

Table 2 The parameter values of GA, PSO and HPSO

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

먼저, 선로제약을 고려하지 않은 경제급전문제에 대해서 λ -반복법을 이용하여 해석하였다. 그리고 그 결과를 GA, PSO, HPSO를 이용하여 해석한 선로제약을 고려한 경제급전문제와 비교·분석하였다. 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.

다음 표 3는 선로제약을 고려하지 않은 경제급전문제와 선로제약을 고려한 경제급전문제의 결과를 나타내었다. 경험적 방법(Heuristic Method)인 GA, PSO, HPSO 기법은 50번의 시행을 통해 얻은 결과를 정리하였다. 개발된 프로그램의 시행을 위해 Intel Dual core2 Duo CPU 6750 2.66GHz, 2GB Ram 의 PC가 사용되어졌다. 표 5에서 나타난 결과를 통해 유전알고리즘(GA)에 비해 PSO, HPSO가 더욱 우수한 결과를 나타냄을 확인할 수 있다. 그리고 연산 시간에서도 PSO, HPSO가 우수한 결과를 나타내었다. PSO와 제안된 HPSO의 결과에서, 최소값은 PSO 알고리즘에서 얻을 수 있었지만, PSO 알고리즘의 결과는 평균값, 표준편차가 제안된 HPSO 알고리즘에 비해 높은 결과를 나타내었다. 또한 지정된 유전알고리즘(GA)과 PSO 알고리즘의 파라미터 값에 대해서 전체 50번 시행에서 15% 정도의 확률로 예상최적해에 도달하지 못하는 결과를 나타내었다. 연산시간과 시뮬레이션의 안정성 평가를 바탕으로 선로제약을 고려한 경제급전문제에서 본 논문에서 제안된 HPSO 알고리즘이 GA, PSO 알고리즘에 비해 상대적으로 우수한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 그림 5는 유전알고리즘(GA)와 HPSO 알고리즘의 최적해에 대한 상태추이 그래프를 나타내고 있다.

표 3 ED/ED with line constraints 문제에 대한 결과 1

Table 3 The result 1 of ED/ED with line constraints problem using λ -I, GA, PSO and HPSO.

Problem	ELD	ELD with line flow constraints		
		GA	PSO	HPSO
solver	λ -Iteration			
Average value	16982.3	17282.14	17183.53	17176.017
Min value	-	17216.3	17160.1	17163.1
Max value	-	17369.6	17246.7	17198.4
Standard deviation	-	37.96857	24.90858	7.7693
Time		21.734	13.206	13.343

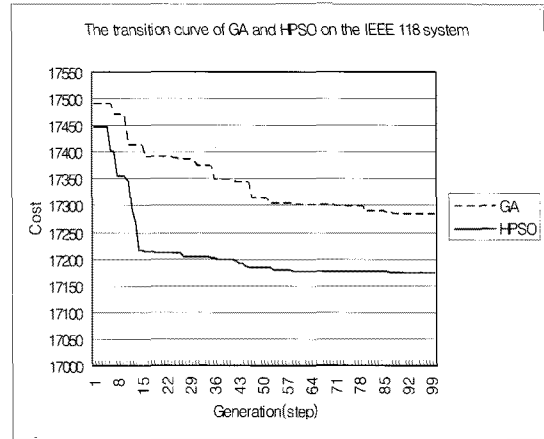


그림 5 GA와 HPSO의 적합도 추이 그래프

Fig. 5 The transition curve of GA and PSO on the IEEE 118 system

4.2 안전도를 고려한 경제급전문제에 대한 PSO와 HPSO의 비교

안전도를 고려한 경제급전문제를 해석하기 위해서 제안한 HPSO를 사용하였고, 그를 통해 우수성을 입증하였다. 안전도에 대한 제약조건으로 N-1선로상정사고와 선로제약을 고려하였다. 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 일반적인 PI(Performance Index)가 사용되어졌다. IEEE 118 모선계통에 대한 PI를 이용한 스크리닝을 통해 계통에 영향이 큰 30-38선로에 대한 상정사고가 선택되어졌다. 그림 4의 IEEE 118모선 계통도에 30-38모선의 위치를 선로에 동그라미로 표시하였다. 30-38선로상정사고에 대한 경제급전의 결과가 다음 표 4에 선로 사고 이전의 결과와 함께 나타내었다. PSO와 HPSO 알고리즘의 파라미터는 이전의 시뮬레이션과 동일한 값을 사용하였고 시뮬레이션 또한 50회 시행하였다.

표 4 ED/SCED문제에 대한 결과 1

Table 4 The result 1 of ED/SCED problem using λ -I, GA, PSO and HPSO.

Problem	ELD with line flow constraints		SCED (line contingency : 30-38)	
	PSO	HPSO	PSO	HPSO
solver				
Average value	17183.53	17176.017	17655.64	17646.14
Min value	17160.1	17163.1	17559.3	17580.6
Max value	17246.7	17198.4	17840.5	17791.3
Standard deviation	24.90858	7.7693	64.87662	46.75528
Time	13.206	13.343	13.23	13.265

안전도를 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. 다음 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.

5. 결 론

본 논문은 비선형(Nonlinear) 최적화 문제인 안전도를 고려한 경제급전(Security-constrained ED)문제를 해석하기 위해서 PSO 알고리즘과 유전알고리즘(GA)의 돌연변이(Mutation) 특성을 결합한 HPSO를 제안하였다. 또한 HPSO의 파라미터 값은 기존의 연구결과와 적절한 실험을 통해 결정되었다. HPSO를 이용한 안전도를 고려한 경제급전(SCED)문제 해석법은 IEEE 118모선 계통에 적용하여, 제안된 방법의 유용성과 우수성을 입증하기 위해 GA · PSO 그리고 HPSO 알고리즘에 대한 비교·분석을 수행하였다. 그 결과, 최적해의 값에 있어서 HPSO 알고리즘은 GA에 비해 우수한 탐색성능을 보여주었고, 수렴성에 있어서 PSO 알고리즘에 비해 조기수렴현상이 줄어드는 결과를 보였다. 또한 선로상정사고를 고려하기 위해서, N-1 선로상정사고에 대한 PI(Performance Index)를 사용하여, 스크리닝과 선택(Screening & Selection)과정을 통해 대상계통에 큰 영향을 주는 선로상정사고를 선택하였다. 상정사고를 고려함에 따라 시스템이 상대적으로 더욱 불안정해져 계통의 전체 발전 비용이 증가되는 결과를 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 기초전력연구원 선행기술 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 Conference on Neural Networks, vol.4, pp.1942 - 1948, 1995.
- [5] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Swarm intelligence", book, an Imprint of Elsevier, 2001
- [6] H. Yoshida, K. Kawata and Y. Nakanishi, "A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment," IEEE Trans. Power Syst., vol.15, pp. 1232 - 1239, Nov. 2000.
- [7] Zhe-Lee Gaing, "Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints", IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, No. 3, August 2003
- [8] 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
- [9] A. Immanuel Selvakumar, "A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems", IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, No. 1, February 2007
- [10] Pablo E. Oñate Yumbra, "Optimal Power Flow Subject to Security Constraints Solved With a Particle Swarm Optimizer", IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, No. 1, February 2008
- [11] Y. Shi and R. Eberhart, "Parameter selection in particle swarm optimization", in Proc. 7th Annu. Conf. Evol. Program., pp. 591 - 600, 1998.
- [12] J. Kennedy, "Small worlds and mega-minds: Effects of neighborhood topology on particle swarm performance," in Proc. Congr. Evol. Comput., vol. 3, pp. 1931 - 1938, 1999.
- [13] P. N. Suganthan, "Particle swarm optimizer with neighborhood operator," in Proc. Congr. Evol. Comput., vol. 3, pp. 1958 - 1962, 1999.
- [14] P. Angeline, "Evolutionary optimization versus particle swarm optimization philosophy and performance differences," in Proc. 7th Annu. Conf.

Evol. Program., pp. 601 - 610, 1998.

[15] 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.

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

저 자 소 개



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(공학). 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



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 조교수.

Tel : 02-450-3483

Fax : 02-444-1418

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr