

An Application of a Binary PSO Algorithm to the Generator Maintenance Scheduling Problem

朴永秀*·金眞鎬†
(Young-Soo Park · Jin-Ho Kim)

Abstract - This paper presents a new approach for solving the problem of maintenance scheduling of generating units using a binary particle swarm optimization (BPSO). In this paper, we find the optimal solution of the maintenance scheduling of generating units within a specific time horizon using a binary particle swarm optimization algorithm, which is the discrete version of a conventional particle swarm optimization. It is shown that the BPSO method proposed in this paper is effective in obtaining feasible solutions in the maintenance scheduling of generating unit. IEEE reliability test systems(1996) including 32-generators are selected as a sample system for the application of the proposed algorithm. From the result, we can conclude that the BPSO can find the optimal solution of the maintenance scheduling of the generating unit with the desirable degree of accuracy and computation time, compared to other heuristic search algorithm such as genetic algorithms. It is also envisaged that BPSO can be easily implemented for similar optimizations and scheduling problems in power system problems to obtain better solutions and improve convergence performance.

Key Words : Binary PSO, Generating Unit Maintenance Scheduling, Reserve Margin, Genetic Algorithm, System Reliability

1. 서 론

전력산업의 목적은 수용자에게 안정적이고 경제적인 전력을 공급하는데 있다. 이러한 목적은 계통계획 및 운용 분야의 최적화를 수행하여야만 달성된다. 전력은 그 특성상 생산과 소비가 동시에 이루어지고, 수요가 급변하는 특성이 있으며, 전력계통 운용에 있어서 적정예비력의 보유는 필수적이다. 전력설비 특히 발전설비의 예방정비 및 고장 보수는 전력계통의 신뢰도와 밀접한 관계가 있다. 경제성장에 따른 급격한 전력 수요의 증가는 발전기를 포함한 전력계통의 효율적이고 안정적인 운용을 강조한다. 발전기 보수 계획이란 통상 특정 연도에 있어서 각 발전기의 예방정비시기 및 기간을 결정하는 것을 의미한다. 이러한 연간 예방정비계획의 목적은 계획 연간의 모든 기간에서 신뢰도를 유지하면서 적절한 예방정비를 통하여 각 발전기의 성능 향상과 더불어 발전기의 수명을 연장하고, 따라서 전력계통의 신뢰도 향상과 총 발전비용의 감소에 있다. 전력계통의 계획과 설계, 그리고 운용관리의 관점에서 발전기 보수 계획에 대한 이론적이고 방법론적인 접근 연구가 지속적으로 되어 왔다. 연구 측면이나 실제 계통 운용 측면에서 볼 때 전력계통의 보수 계획은 많은 물리적인 제약조건을 가진 복잡한 최적화 문제

이다. 즉, 모든 제약조건을 만족하는 대안 가운데 목적함수 값을 최소로 하는 대안이 최적 보수 계획안이 된다.

전력계통의 운영은 계획, 감시 및 제어 등을 포함하는 복합적인 분야로서 각 분야에 대한 종합적인 연구가 필요하며, 특히 발전기의 특정 기간 동안의 기동과 정지를 결정하는 보수 계획 문제는 전력시스템 전반에서 중요한 역할을 담당해왔으며 해당 관련 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 신뢰도 측면을 강조하는 발전기 보수 계획 방법을 제안한다. 이상적인 발전기 보수 계획은 발전비용과 발전계통의 신뢰도를 함께 고려할 수 있어야 한다. 보수 계획 수립 시, 발전비용과 신뢰도를 같이 고려하기 위해서는 발전계통의 신뢰도를 비용으로 나타낼 수 있어야 하나 이러한 표현 자체가 어려운 문제이기 때문에 보수 계획 문제 수립 시에는 발전비용 또는 신뢰도를 단독 목적함수로 두고 최적화 하는 것이 일반적이다[1]. 또한 전원계획이 적절히 수립되어 있어 적정 규모의 설비를 가지고 있는 경우에는 보수 계획의 목적은 전력공급의 신뢰도를 최상으로 유지하는데 있다고 할 수 있다[2]. 신뢰도 목적함수는 예비력 등의 결정적 지수와 공급지장확률(LOLP), 공급지장에너지의 기대치 등의 확률적 지수로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 연간 공급예비율 평활화를 목적함수로 사용하였다. 기본적으로 발전계통에서는 발전비용 보다는 공급신뢰도의 중요성이 크며 현재의 전력 시장에 참여하는 각 발전사업자들의 이익보다는 전력계통의 안정적인 전력 수급에 중점을 둔, 본 논문의 취지를 고려하면 목적함수로 신뢰도 지수를 고려하는 것이 타당하다.

수학적으로 볼 때 발전기 보수 계획 문제는 많은 변수를 포함하는 복잡한 조합의 최적화 문제로 볼 수 있다. 각종

† 교신저자, 正 會 員 : 경원대학교 전기공학과 조교수

E-mail : kimjh@kyungwon.ac.kr

* 學生會員 : 부산대학교 전기공학과 석사과정

接受日字 : 2007年 4月 17日

最終完了 : 2007年 6月 12日

제약조건을 만족하는 발전기 보수 계획 문제의 해를 찾기 위해 여러 가지 기법들이 적용되었는데, 수치적인 방법 [3, 4-6]에는 순차최적화기법, 정수계획법, 동적계획법, 분지한정법, 혼합정수법, benders decomposition 등이 있다. 순차최적화기법은 보수 계획 대상 발전기 이외의 발전기는 보수정지를 고정시킨 상태에서 발전용량이 큰 순서대로 그룹을 선정하여 해당 발전기의 보수시기를 찾는 방법으로 구현이 용이하나 근사적인 해를 구한다는 단점이 있다. 동적 계획법은 이론적으로 최적의 해를 구할 수 있지만 실제로 계산시간의 제약으로 인해 실제 전력계통으로의 적용이 불가능하다. 이와 같은 수치적 방법들은 실제 운용상에 발생하는 다양한 제약조건에 고려가 어렵고 전역 최적해를 구하기가 어려운 문제점이 있어, 최근에는 확률적인 최적화 방법인 유전알고리즘과 Simulated Annealing을 이용한 방법[7,8] 등이 연구되고 있다. 경험적인 해석으로 실질적인 제약 조건의 고려가 용이하여 기존의 수치적인 방법보다 더 나은 해를 구할 수 있지만 수렴속도와 같은 계산시간 상의 제약이 있다. 위에 소개된 알고리즘들은 각각 장·단점이 있으므로 최적화 문제의 성격에 맞게 선택되어 적절히 사용될 수 있다.

본 논문에서는 발전기 보수계획 문제에 Particle Swarm Optimization 알고리즘을 적용하기 위해 기존의 알고리즘을 발전기 보수계획 문제의 특성에 맞추어 수정하여 제안하였다. PSO알고리즘은 실수형 문제의 적용뿐만 아니라 이진 성격의 최적화 문제에도 사용될 수 있기 때문에[9, 10], 발전기의 기동·정지와 관련된 보수 계획 문제의 이진 특성에 적절히 사용될 수 있다. 유전알고리즘의 대체 알고리즘으로 PSO는 병렬탐색 능력과 수렴 특성이 우수하며 과거의 발전기 보수 계획에 대한 정보를 고려할 수 있어 전력시스템 스케줄링 문제에도 적합하다[11]. 제안된 방법의 유용성을 입증하기 위해 IEEE Reliability Test System 발전계통의 자료를 이용하여 사례연구를 수행하였다. 사례연구를 통하여 PSO알고리즘을 이용한 발전기 보수 계획 수립이 최적해를 구하는데 용이함을 확인할 수 있었다.

2. Particle Swarm Optimization 알고리즘

최근에 PSO(Particle Swarm Optimization)라는 새로운 진화연산 기법이 소개되었다. PSO는 자연선택의 진화 메커니즘이 아닌 새·물고기 떼와 같은 생체군집의 사회적 행동 양식을 바탕으로 하고 있다. PSO 역시 군집 기반 알고리즘으로 병렬처리 특징을 가지며, 군집과 개체는 Swarm과 Particle로 표현된다. PSO는 Kennedy and Eberhart[10]에 의해 소개되었으며, 전력계통으로의 적용도 시도되고 있다[12]. 본 논문에서는 발전기 보수 계획 문제를 이진 PSO알고리즘을 이용하여 최적화한다. 기동과 정지라는 이진 조합 특성을 지닌 보수 계획 문제에 적용하기 위해 기존 실수형 PSO 알고리즘의 변형인 이진 PSO알고리즘을 사용했다. 많은 지역·전역 극소점을 가진 비선형 함수의 문제를 해결하기 위한 확률적 최적화 방법으로 제시된 PSO는 군집기반 알고리즘이다. 개체군을 기반으로 한 병렬처리 알고리즘으로, 지역극소에 빠질 위험성이 적고 해 공간 전체를 탐색할 수 있는 능력을 가진다. 본 논문에서는 복잡한 제약조건에 조합 최적화 문제인 발전기 보수 계획을 수립하기 위해 이진 PSO 알고리즘을 사용한다.

이진 PSO 알고리즘의 발전기 보수계획문제 적용

2.1 PSO의 연산자

PSO알고리즘의 기본요소와 연산자는 다음과 같다[12,13]. Particle- x^t 는 군집(swarm)안에 속해 있는 각각의 개체(particle)들의 집합을 나타내며, t-iteration에서의 개체들의 집합을 의미한다. 군집의 모든 particle들은 하나의 해를 나타내며 m-차원(dimension) 실수 벡터로 표현된다. t-iteration에서의 j번째 particle인 x_j^t 는 $[x_{j1}^t, x_{j2}^t, \dots, x_{jm}^t]$ 로 표현되며, x_{jk}^t 는 j번째 particle의 k번째 차원의 위치를 나타낸다. Particle의 위치정보는 아래 식(1)과 같다.

$$x_{jk}^t = v_{jk}^t + x_{jk}^{t-1} \quad \dots \quad (1)$$

Swarm- S^t 는 n개 개체들의 집합으로, $S^t = [X_1^t, X_2^t, \dots, X_n^t]^T$. 다음으로 Particle best- $pbest_j^t$ 란 탐색공간을 움직이는 개체들이 현재의 위치정보에 대한 적합도를 가지고 자신의 이전 데이터를 기초로 최적의 위치정보를 찾은 개체를 의미하며, Global best- $gbest^t$ 는 군집 내에서 n개의 모든 pbest 중 가장 최적의 위치정보를 내는 개체를 의미한다. 따라서 주어진 문제의 최적해가 된다. Particle velocity- V_j^t 는 v_{jk}^t 로 이루어진 속도 벡터로, PSO내의 유일한 연산자인 v_{jk}^t 는 particle들의 이동 속도를 나타내는 m-차원 실수벡터이다. 따라서 $V_j^t = [v_{j1}^t, v_{j2}^t, \dots, v_{jm}^t]$ 는 t-iteration의 j번째 개체의 이동 속도를 의미한다. 일반적인 PSO의 개체 속도(velocity)는 아래 식(2)와 같다.

$$v_{jk}^t = w^t v_{jk}^{t-1} + c_1 r_1 (pbest_{jk}^{t-1} - x_{jk}^{t-1}) + c_2 r_2 (gbest_k^{t-1} - x_{jk}^{t-1}) \quad \dots \quad (2)$$

여기서 c 는 각 particle이 pbest와 gbest로 향하는 확률적 가속의 가중치를 표현하는 가속상수(acceleration constant)이며, 해당 값이 상대적으로 작거나 높으면 목적지가 아닌 곳을 떠돌게 하거나, 목적지를 지나치게 하는 등의 갑작스런 방향전환을 유도한다. 일반적으로 해당 값은 2.0으로 설정한다[6]. r_1, r_2 는 [0, 1]내의 랜덤상수이다. Swarm 발산 위험을 촉진하는 속도 크기의 제어현상을 방지하고, 해 공간의 지역적 탐색을 강화하기 위해 개체 속도의 최대값(v_{max})을 설정하여 개체의 이동 속도를 제한한다. 만약 v_{max} 가 매우 큰 값을 가진다면, 개체들은 최적해를 지나쳐버릴 수 있다. 반대로 매우 작은 값을 가진다면, 해 공간을 충분히 탐색하지 못하게 된다. 일반적으로 v_{max} 는 각 변수 공간의 10~20%로 설정되었다[12~13]. PSO의 효과적인 성능 개선을 위해서는 관성하중(inertia weight), w 을 추가하여 인지성(cognition)을 고려한다. 가속상수 c 가 지식의 사회적(social) 심리적응을 바탕으로 속도를 조절하는 반면, 인지성은 그 자신의 생각과 메모리를 바탕으로 속도를 조절한다. 즉, 현재의 속도에 대한 기존 속도의 영향을 조절하기 위한 제어 파라미터이다. 따라서 이 값은 개체의 전역·지역 탐색 능력 사이의 관계를 조절한다. 탐색과정 초기에는 전역탐색의 강화를 위해 관성하중 값을 크게 설정하고, 탐색 후반부에는 반대로 좀 더 나은 지역 탐색을 위해 관성하중을 감소시킨다. w 값

은 0.9에서 0.4까지 선형적으로 감소시키는 방법이 자주 이용된다[10].

$$w^t = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{G_{\max}} \times t \quad \dots\dots (3)$$

여기서, G_{\max} 는 총 세대(generation) 수이다.

2.2 이진 PSO 알고리즘

실수형태를 다루는 일반적인 PSO알고리즘으로는 발전기의 기동, 정지를 결정하는 발전기 보수 계획 문제를 해결하기 쉽지 않다. 본 논문에서는 기존 PSO알고리즘의 간단한 변형인 이진 PSO(Binary PSO)를 이용하여 발전기 보수 계획 최적화 문제에 접근한다. 일반적인 PSO알고리즘 구현은 연속공간에서의 탐색이 대부분이다. 그렇지만 Kennedy and Eberhart는 {0, 1}의 이진 조합으로 구성된 개체들의 위치를 찾을 수 있는 이진 PSO를 소개하였다[9]. 이진 PSO알고리즘에서 개체의 위치는 다음 식(4)에 의해 결정된다.

$$x_{jk}^{t+1} = \begin{cases} 0 & \text{if } r_j^t \geq S(v_{jk}^t) \\ 1 & \text{if } r_j^t < S(v_{jk}^t) \end{cases} \quad \dots\dots (4)$$

where

$$S(v_{jk}^t) = \frac{1}{1 + e^{-v_{jk}^t}}$$

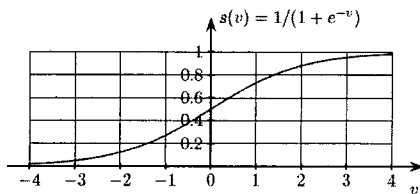


그림 1 Sigmoid 함수, $S(v_{jk}^t)$

Fig. 1 Sigmoid Function for $S(v_{jk}^t)$

x_{jk}^t 는 t-iteration에서 개체 j의 k번째 파라미터 값을, v_{jk}^t 는 개체의 이동속도, r_j^t 는 $U(0,1)$ 의 확률분포 값을 나타낸다. 세대수를 반복하는 과정에서 개체 속도는 기존 PSO알고리즘의 속도 업데이트식과 동일하다. x_{jk}^t 는 발전기의 기동과 보수를 의미하는 {0, 1}의 값으로 표현되며, v_{jk}^t 는 x_{jk}^t 의 값을 결정하는 임계치(probability threshold)역할을 한다. 즉, v_{jk}^t 의 값이 클수록 발전기는 보수, 즉 {1}의 값을 $S(v_{jk}^t)$ 의 확률로 가지며 v_{jk}^t 의 값이 작을수록 $1 - S(v_{jk}^t)$ 의 확률로 기동 {0}의 값을 가진다. 일반적으로 v_{jk}^t 의 값은 V_{\max} : [-4, 4]내로 제한한다. V_{\max} 의 임계값 개념을 이용하여 기존의 PSO를 이진 PSO로 변형, 발전기 보수 계획과 같은 {0, 1} 조합 문제의 해석을 가능하게 한다. 단, 발전기 보수계획 문제의 특성 상, 특정 발전기의 보수시작 주가 선택되면, 즉 $x_{jk}^t=1$ 이면, 해당 발전기의 x_{jk}^t 값은 보수기간까지 연속적으

로 1의 값을 가져야 하는 제약조건을 고려하여, 이진 PSO 알고리즘은 보수시작 주를 연속값으로 배정한 후 이를 이진 변수로 변환하여 PSO 연산을 수행하고, 다시 연속변수로 변환하는 반복적인 과정을 거쳐 구현되었다.

3. 발전기 보수 계획 문제의 정식화

본 논문에서는 발전기 보수 계획 문제의 목적함수로서 연간 공급예비율 평활화(Leveling)를 설정하였다. 주별 공급예비율 분산값을 최소화하는 대안, 즉 연간 공급예비율을 평활화하는 보수 계획 문제의 최적해가 된다. 본 논문은 발전기 보수 계획 문제를 이진 PSO를 이용하여 접근하는 방법에 초점을 맞추어, 보수계획의 목적함수로서 연간 공급예비율 평활화를 사용하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{t=1}^T \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[\frac{AC_t - L_t}{L_t} \right] - \left(\frac{AC_t - L_t}{L_t} \right) \right\}^2 \\ & = \text{Min} \sum_{t=1}^T \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[\frac{\left(IC - \sum_{j=1}^N u_{jt} C_j \right) - L_t}{L_t} \right] - \left(\frac{\left(IC - \sum_{j=1}^N u_{jt} C_j \right) - L_t}{L_t} \right) \right\}^2 \end{aligned} \quad \dots\dots (5)$$

s. t.

$$u_{jt} = \begin{cases} 1 & : \text{Maintenance} \\ 0 & : \text{Operation} \end{cases} \quad \dots\dots (6)$$

$$\sum_{t=1}^T u_{jt} = M_j \quad \dots\dots (7)$$

$$\prod_{t=S_j}^{M_j+S_j-1} u_{jt} = 1 \quad \dots\dots (8)$$

$$\sum_{j=1}^N u_{jt} C_j \leq CR_t \quad \dots\dots (9)$$

여기서,

u_{jt} : t번째 보수 계획 주의 발전기 j의 운전 상태

T : 총 보수 기간 (1년 : 52주, Horizon)

N : 총 발전기 대수

IC : 총 설비용량 (Installed Capacity)

$AC_t = IC - \sum_{j=1}^N u_{jt} C_j$: t주의 가용 설비 용량

L_t : t주의 최대 수요

C_j : 발전기 j의 용량

M_j : 발전기 j의 보수 기간 (period)

S_j : 발전기 j의 보수 시작 주

CR_t : 기술자제약을 고려한 t주의 최대 보수 가능 용량 [MW]

식(5)는 본 논문의 목적함수로서, 연간 공급예비율의 분산 값 최소화를 의미한다. 총 설비용량에서 각 주의 보수 물량과 최대 수요를 제외한 부분은 예비력에 해당하고 이를 최대수요로 나누면 예비율이 된다. 각 주의 예비율 분산값을 최소로 한다는 것은 연간 공급예비율을 평활화한다는 의미가 된다. 공급예비율 평활화를 이용한 보수 계획의 이동에 따라 연간 계통신뢰도는 직접적인 영향을 받으므로 이를 최

적으로 배분하여 연간 공급예비율을 평활화하는 것이 목적이 된다. 수력발전기의 경우에는 풍수기에 예방정비를 시행하지 않으며, 열병합 발전기의 경우에는 열공급을 해야 하는 겨울에는 가능한 예방정비를 시행하지 않는다[8]. 또한 신규 발전기의 가동, 노후 발전기의 폐쇄, 발전기의 장기 휴지 및 기타의 조건 등으로 인하여 발전기의 예방정비 기간을 고정하는 경우가 있다. 하지만 본 논문에서는 편의를 위해 위의 조건을 고려하지 않는다. 식(6)은 발전기의 보수·운전 상태를 나타내는 결정변수에 해당한다. PSO를 이용하여 목적함수를 구하기 위해 기본적으로 필요한 최소 단위가 개체이다. 탐색 공간에는 n 개의 개체가 있으며, 우리는 이러한 개체들의 탐색 공간에서의 움직임을 살펴보면서 최적해에 해당하는 개체를 찾을 수 있다. 한 개체는 $m \times 52$ 크기의 $\{0, 1\}$ 조합 형태로 이루어져 있으며 계통 내의 모든 발전기의 52주 동안의 보수 계획 관련 내용이 포함되어야 한다. 식(7)의 제약조건은 발전기들의 보수 기간을 나타낸다. 식(8)의 제약조건은 발전기들의 보수 연속 기간을 나타낸다. 한 번 보수 계획을 시작한 발전기에 대해서는 중도에 예방정비를 중단하지 않는다. 식(7)만으로는 발전기 보수가 여러 주기 동안 연속적으로 계획되었다는 것을 고려하지 못하므로 발전기들의 보수 계획이 연속이 아닌 해도 발생할 수 있다. 따라서 식(8)은 보수 연속 기간을 고려하기 위해서 필요하다. 본 논문에서도 총 보수 대상 기간인 52주 중, 특정 발전기는 한 번의 보수 계획만을 가질 수 있도록 한다. 발전기 j 의 보수 시작 주 S_j 는 알고리즘 초기에서만 $[1, (52 - M_j + 1)]$ 의 uniform random variable 값을 가지며, 이후에는 이진 PSO알고리즘을 이용하여 계속해서 업데이트 된다. 식(9)는 기술자 제약을 고려한 t 주의 보수 가능 용량이다. 주별 보수 물량은 발전계통을 보수·정비를 하는 인력에 의해 한정된다. 보수 계획 기간이 결정된 후에는 자재 공급, 인력 공급, 장비 공급 등의 물리적인 제약 조건을 반영하여 각 발전소의 보수 가능 기간이 결정된다. 발전기 보수 연속성, 기술자 제약, 신뢰도 제약 등을 만족하고 목적함수 값을 최소화 하는 결정변수, $m \times 52$ 크기의 $\{0, 1\}$ 조합으로 이루어진 개체를 찾는 것은 52주간의 발전기 보수 계획을 수립하는 것을 의미한다.

4. 이진 PSO를 이용한 발전기 보수 계획의 수행

본 논문에 제시된 이진 PSO를 이용한 발전기 보수 계획의 수행절차는 다음과 같으며, 이는 그림 2에 정리되어 있다.

Step1_데이터입력: 처음 발전기 보수 계획을 실시할 대상 발전계통의 자료를 입력받는다. 식(5)의 연간 공급예비율 계산을 위한 계통의 발전기 총 설비용량, 최대수요 관련 데이터가 필요하며, 각 발전기의 보수기간에 대한 자료가 요구된다. 즉, 보수 계획에 대한 발전계통의 전반적인 데이터가 입력되는 단계이다.

Step2_초기화 단계: 이진 PSO를 이용하여 발전기 보수 계획을 수립하기 때문에 탐색 공간상의 초기해 집단, 즉 탐색공간에 n 개의 개체를 생성한다. PSO알고리즘을 수행하기 위해 기본적인 파라미터를 설정한다. c_1, c_2 는 인지성(cognition)과 사회성(sociality)을 나타내는 가속상수(acceleration)이며, c_1, c_2 는 개체가 pbest, gbest로 향하는 확률적인 가속의 가

이진 PSO 알고리즘의 발전기 보수계획문제 적용

중치를 표현한다. 기존에 많은 실험들은 이들 값을 2.0으로 설정하였다[14]. w 는 현재의 속도에 대한 기존 속도의 영향을 조절하기 위한 제어파라미터인 관성하중이다. 이 값은 개체의 전역탐색 능력과 지역탐색 능력사이의 관계를 조절한다. 일반적으로 탐색초기에는 전역탐색의 강화를 위해 0.9로, 탐색후반부에는 0.4로 설정하여 선형적으로 감소하는 식(3)과 같은 방법이 주로 사용된다[12]. g 는 탐색 횟수(Generation)에 대한 상수이다. 세대수가 해당 값 이상일 때, 알고리즘은 종료된다. V_{max} 는 개체 속도의 발산 위험을 예방하기 위한 파라미터이다. 기존의 연구를 통하여 V_{max} 는 각 변수 공간의 10~20%로 설정되었다[13].

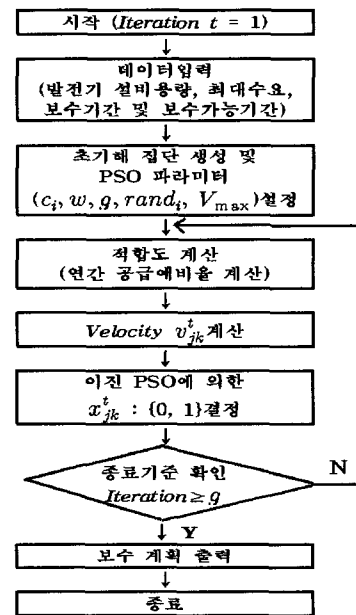


그림 2 PSO를 이용한 발전기 보수 계획 수행 절차
Fig. 2 Flowchart of a GMS using Binary PSO

Step3_적합도 계산: 해집단(population)의 개체에 대한 적합도를 계산하는 단계이다. 세대수를 반복하는 과정에서 목적함수를 계산하고 각 개체 중, 적절한 pbest와 군집내의 gbest값을 찾을 수 있는 중요한 단계이다.

Step4_속도 업데이트: 식(2)를 이용하여 속도를 업데이트 하는 단계이다. V_{max} 를 넘지 않도록 v_{jk}^t 의 값을 조정한다.

Step5_위치 업데이트: 식(1)과 같은 기본적인 PSO알고리즘의 위치 업데이트 방법과 다르다. 본 논문은 이진 PSO를 이용하기 때문에 식(4)에서처럼 이진 단계에서 구한 실수 형태의 속도 개념을 임계값으로 설정하여 $[0, 1]$ 사이의 랜덤 값과 비교한 후 $\{0, 1\}$ 과 같은 이진 형식의 값을 가질 수 있도록 한다. 그러므로 본 논문의 결정변수인 보수와 운전을 결정하는 개체의 이진 조합 표현도 가능하다.

Step6_종료조건 확인: 최초 설정한 탐색 횟수이상의 반복을 거칠 경우는 현재의 보수 계획을 종료하고 그렇지 않은 경우는 단계(3)의 과정을 반복한다.

위 알고리즘 수행결과, 연간 공급예비율 분산값 최소화를 만족하는 결정변수의 조합, 즉 특정개체를 찾을 수 있으며

개체 내에 포함된 각 발전기의 보수시작시기에 대한 정보도 확인 가능하기 때문에 최종적인 발전기 보수 계획이 수립된다. 전반적인 알고리즘은 그림2와 같다.

5. 사례연구

5.1 발전계통 자료 및 시뮬레이션 알고리즘 매개변수 확인

본 논문에서 IEEE-RTS(Reliability Test System, 1996) 발전 계통을 발전기 보수 계획을 위한 자료로 사용하였다. 참고자료는 발전기가 32대, 최대부하가 2,850MW, 시설용량이 3,405MW의 계통이다. 발전기 및 수요관련 자료는 아래 표 1, 2와 같다. 표1에서는 발전기명, 용량(MW), 발전타입, 발전보수연속기간에 대한 자료를 확인할 수 있으며 LOLP의 제약을 고려하지 않기 때문에 고장정지확률(Forced Outage Rate) 부분을 제외하였다. 표2는 주간 최대부하를 연 최대부하 2,850MW에 대한 상대적인 비율로 표현한 것이다. 표1을 통해 계통의 총 설비용량(Installed Capacity) 3,405MW에 대한 정보를, 표2를 통해 주간 최대 수요를 각각 확인할 수 있다.

표 1 발전기 자료

Table 1 Data of Generators

발전 설비	용량 (MW)	발전 타입	보수 기간 (주)	발전 설비	용량 (MW)	발전 타입	보수 기간 (주)
U12-1	12	Oil/Steam	2	U76-2	76	Coal/Steam	3
U12-2	12		2	U76-3	76		3
U12-3	12		2	U76-4	76		3
U12-4	12		2	U100-1	100	Oil/Steam	3
U12-5	12		2	U100-2	100		3
U20-1	20	Oil/CT	2	U100-3	100		3
U20-2	20		2	U155-1	155	Coal/Steam	4
U20-3	20		2	U155-2	155		4
U20-4	20		2	U155-3	155		4
U50-1	50	Hydro	2	U155-4	155		4
U50-2	50		2	U197-1	197	Oil/Steam	4
U50-3	50		2	U197-2	197		4
U50-4	50		2	U197-3	197		4
U50-5	50		2	U350	350	Coal/Steam	5
U50-6	50		2	U400-1	400	Nuclear	6
U76-1	76	Coal/Steam	3	U400-2	400		6

그림 3은 발전기 보수가 계획될 발전계통의 총 시설용량과 주별 최대 수요를 나타낸 것이다. 계통의 총 설비용량과 최대 부하의 정도를 알 수 있으며, 연간 공급예비율 분산값을 구하는 척도가 된다. 수요가 많은 시기에는 보수 물량이 적고, 수요가 적은 시기에는 보수물량이 많아져야 함을 예상할 수 있다.

사례연구에서는 본 논문에서 제시한 이진 PSO알고리즘을 실제 IEEE-RTS에 적용하여 원하는 최적해를 구할 수 있는지의 여부 및 기존 유전알고리즘(Genetic Algorithm)과의 비교·분석을 통해 보수 계획 수립에 PSO알고리즘의 적정

성 확인 및 효율성을 분석하는데 초점을 두었다. 사례연구에 사용된 PSO·유전알고리즘의 매개변수 및 보수 관련 내용은 표3과 같다.

표 2 연간 최대 수요 대비, 주간 최대 수요 비율 (%)

Table 2 Weekly Peak Load in Percent of Annual Peak (%)

주	부하	주	부하	주	부하	주	부하
1	86.2	14	75.0	27	75.5	40	72.4
2	90.0	15	72.1	28	81.6	41	74.3
3	87.8	16	80.0	29	80.1	42	74.4
4	83.4	17	75.4	30	88.0	43	80.0
5	88.0	18	83.7	31	72.2	44	88.1
6	84.1	19	87.0	32	77.6	45	88.5
7	83.2	20	88.0	33	80.0	46	90.9
8	80.6	21	85.6	34	72.9	47	94.0
9	74.0	22	81.1	35	72.6	48	89.0
10	73.7	23	90.0	36	70.5	49	94.2
11	71.5	24	88.7	37	78.0	50	97.0
12	72.7	25	89.6	38	69.5	51	100
13	70.4	26	86.1	39	72.4	52	95.2

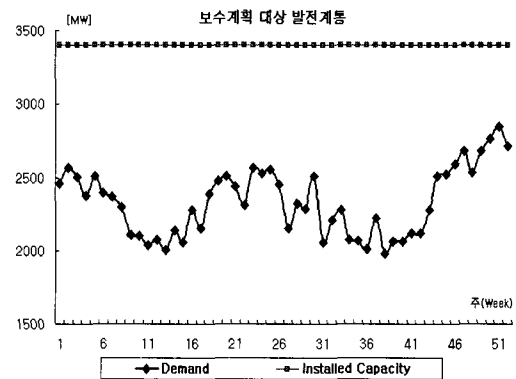


그림 3 보수 계획 대상 발전계통

Fig. 3 IEEE-RTS (1996) for Maintenance Schedules

표 3 시뮬레이션 매개변수 정의

Table 3 PSO·GA Algorithm Parameter Initialization

	GA			PSO		
세대수	400					
해집단수	150					
	Case1 (-10%)	Case2 (BASE)	Case3 (+10%)			
교차확률	0.63	0.70	0.77	·		
돌연변이확률	0.009	0.01	0.011	·		
C ₁ , C ₂	·			[2.0, 2.0]		
W	·			0.9~0.4 (식3참고)		
V _{max}	·			Case4 (-10%)	Case5 (BASE)	Case6 (+10%)
				[-3, 3]	[-4, 4]	[-5, 5]
기술사제약	750[MW]					
컴퓨터사양	CPU : Intel Core2 Duo. Conroe E6300, RAM : 1.0 GHz					

이후의 사례연구에서는 크게 표3의 교차·돌연변이 확률을 이용한 유전알고리즘을 발전기 보수 계획에 적용한 경우

(Case1~3)와 가속도·관성 관련 매개변수를 적용한 PSO알고리즘을 이용했을 경우(Case4~6)의 결과를 살펴보고, 해당 알고리즘의 비교 분석을 통해 발전기 보수 계획 문제로의 이진 PSO알고리즘 적용 가능성 및 효용성을 확인한다.

5.2 연간 공급예비율 비교 (GA, PSO)

아래 그림4는 세대수(총 400 Generation)에 해당하는 연간 공급예비율 분산값의 변화를 나타낸 것이다. 엘리트즘을 사용한 유전알고리즘과 PSO알고리즘을 비교하였으며 해당 목적함수 값은 사례연구(Case1~6)를 각각 10번 수행한 평균값이다.

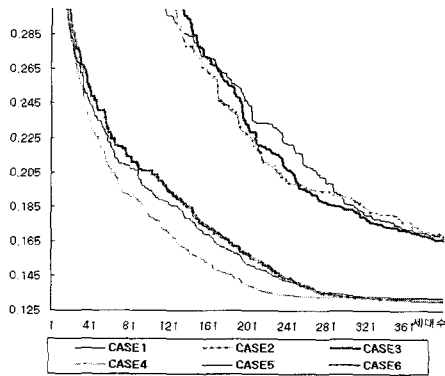


그림 4 세대수에 따른 목적함수(공급예비율 분산값) 변화곡선
Fig. 4 Objective value by the change of the number of iterations

연간 공급예비율 비교 결과, PSO알고리즘을 이용했을 때가 유전알고리즘을 이용한 경우보다 수렴속도 및 최적해와 관련하여 좋은 성향을 보인다. 위에서 살펴본 분산값은 각 보수기간의 공급예비율 평활화 곡선의 모양을 결정한다. 기대수요, 즉 각 주의 보수물량과 수요의 합으로 이루어진 그래프의 평활화 정도는 연간 공급예비율 분산 최종 수렴값에 의해 결정됨을 그림6에서 확인할 수 있다.

그림5는 해당 알고리즘들을 발전기가 64대, 최대부하 5,700MW, 시설용량 6,810MW의 계통에 적용하여 얻은 연간 공급예비율 분산 최종 수렴값을 나타낸다. 발전기 64대의 경우에서도 PSO알고리즘에 의한 결과가 유전알고리즘에 의한 것보다 수렴 성능 및 목적함수 측면에서 적절함을 확인할 수 있다.

5.3 공급예비율 평활화 곡선 (GA, PSO)

시뮬레이션을 통해 발전기 보수 계획 문제의 최적해, 즉 최적의 적합도를 가지는 해(optimal solution)를 구할 수 있으며, 해는 32대의 발전기와 52주의 보수 계획기간에 해당하는 32*52 크기의 {0, 1}조합 (1:보수, 0:운전)으로 구성된다. 이를 통해 보수 시작 주를 알 수 있으며, 아래 그림6과 같이 보수 계획 각 주의 보수 물량과 최대 수요의 합성 용량이 총 설비용량과의 차이가 어느 정도 되는지 확인할 수 있다. PSO알고리즘의 최종 분산 수치가 낮았기 때문에 그림6-(b)에서의 보수물량과 수요의 합성 곡선이 (a)의 경우보다 평활화 정도가 양호함을 알 수 있다. 마찬가지로 발전기 64대의 경우에서도 그림6-(d)이 그림6-(c)의 경우보다 양호함을 확인할 수 있다. 이것은 본 논문의 결정론적 신뢰도 목적함

이진 PSO 알고리즘의 발전기 보수계획문제 적용

수인 예비율 측면에서 안정된 보수 계획 수립이 가능함을 의미한다. 결론적으로 두 알고리즘 모두 발전기 보수 계획 문제를 해석하는 방법으로 충분하다고 판단할 수 있으며, PSO알고리즘을 이용한 경우가 수렴속도 및 최적해와 관련하여 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있다.

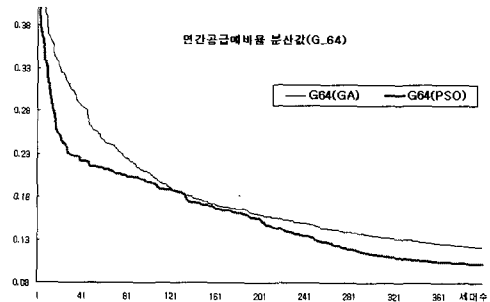
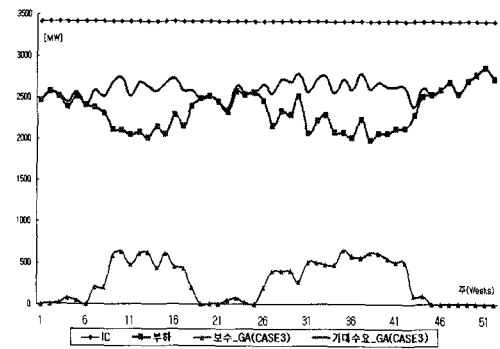
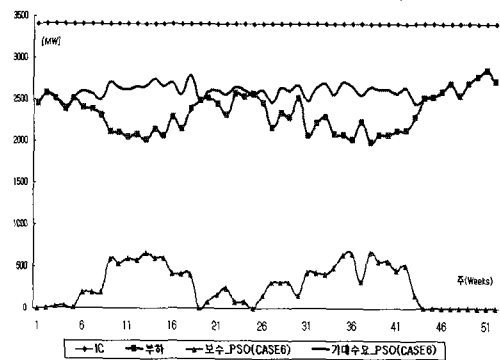


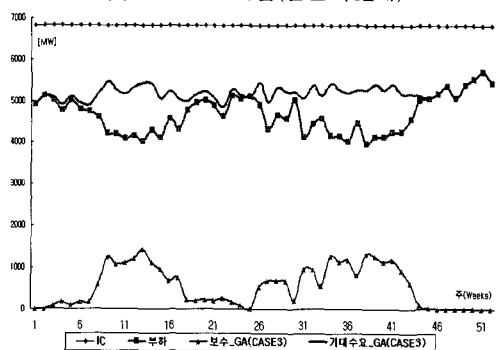
그림 5 세대수에 따른 목적함수 변화곡선(발전기 64대)
Fig. 5 Objective value by the change of the number of iterations



(a) 유전알고리즘(발전기32대)



(b) PSO알고리즘(발전기32대)



(c) 유전알고리즘(발전기64대)

영자가 바라보는 계통 신뢰도 측면에서의 보수 계획을 고려하였다. 본 논문은 전력계통의 스케줄링 관련 문제 중 하나인 발전기 보수 계획을 수립하기 위해 이진 PSO알고리즘을 제안하였고 이를 IEEE-RTS에 적용하였다. 사례연구 결과 기존 엘리트즘을 적용한 유전 알고리즘보다 향상된 최적해를 도출하였으며, PSO알고리즘의 빠른 수렴 특성을 확인할 수 있었다. 즉, PSO알고리즘의 병렬탐색, 정보 유지, 빠른 수렴, 수렴 조절 등의 특징을 확인할 수 있었으며 발전기 보수 계획 문제 해석 시, PSO알고리즘 사용의 적합성 및 효용성을 충분히 확인할 수 있었다. 본 논문은 이러한 특징을 가진 이진 PSO알고리즘을 발전기 보수 계획 관련 문제로 적용하는데 의미를 두었으며, 차후 기존 PSO알고리즘에 유전알고리즘 개념의 주요 특성이 추가된 Breeding PSO와 주어진 문제의 차원(dimension)수만큼 군집을 나누어 최적화하는 Cooperative PSO 등과 같은 Hybrid 개념이 적용된 PSO알고리즘을 이용하여 보다 정확한 발전기 보수 계획 문제를 수립하는데 초석이 될 수 있다. 또한 목적함수로서 결정론적 신뢰도 지수인 예비율을 고려하였지만 차후 연구는 발전기의 고장정지확률을 고려한 공급지장확률(Loss of Load Probability)을 다루는 방향으로 진행될 것이다. 더 나아가 송전계통을 포함하고 경제적 비용 또는 게임이론 등을 고려한 전력시스템의 예방 정비계획을 구상하는데 기반이 될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 산업자원부 전력IT 국가전략과제 (과제번호: R-2005-1-396) 지원에 의해 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] M. Shahidehpour, "Maintenance Scheduling in Restructured Power System", Kluwer Academic Publishers, 2000.
 [2] 전력연구원, "전력수급계획 및 운용해석 종합시스템 개발에 관한 연구", 1995. 12.
 [3] 한국전력공사 기술연구원, "발전계통의 연차보수계획 수립에 관한 연구", 1990. 6.
 [4] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons, 1996.
 [5] Antonio J. Conejo, Raquel García-Bertrand, Manuel Díaz-Salazar, "Generation Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 20, No. 2, MAY 2005.
 [6] E. L. da Silva, M. Th. Schilling, M. C. Rafael, "Generation Maintenance Scheduling Considering Transmission Constraints", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 2, MAY 2000.
 [7] 정정원, 김정익, "유전알고리즘을 이용한 발전계통의 보수 계획 수립", 대한전기학회논문지, 48A권 5호 1999년 5월
 [8] 한석만, 신영균, 정구형, 김강원, 김발호, "경쟁적 전력 시장에서 계통운영자의 발전기 예방정비계획에 관한

연구", Trans. KIEE, Vol 53A, No. 8, AUG 2004.

[9] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm", International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 5, 12-15, Oct 1997, pp. 4104-4108.
 [10] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", Proceedings. IEEE International Conference on Neural Networks, VOL. 4, pp. 1942~1948 1995.
 [11] 박병주, 오성권, 김용수, 안대천, "PSO의 특징과 차원성에 관한 비교연구", 제어·자동화·시스템공학 논문지 제12권 제4호, 2006. 4.
 [12] T. O. Ting, M. V. C. Rao and C. K. Loo, "A Novel Approach for Unit Commitment Problem via an Effective Hybrid Particle Swarm Optimization", IEEE Transactions on Power Systems, VOL. 21 No. 1, February 2006.
 [13] Andries P. Engelbrecht, "Computational Intelligence", John Wiley & Sons, Ltd, 2002.

저 자 소 개



박영수 (朴永秀)

1980년 10월 29일생. 2006년 부산대 전자전기통신공학부 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
 Tel : 051-510-3188
 Fax : 051-513-0212
 E-mail : reno@pusan.ac.kr



김진호 (金眞鎬)

1971년 11월 27일생. 1995년 서울대 전기공학과 졸업(공학사). 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2004년~2006년 부산대학교 전기공학과 조교수, 2007년~현재 경원대 전기공학과 조교수
 Tel : 031-750-8825
 Fax : 031-750-8571
 E-mail : kimjh@kyungwon.ac.kr