

PSO알고리즘에 기초한 발전기 보수정지

박영수 · 김진호 · 박준호
부산대학교

Generating unit Maintenance Scheduling based on PSO Algorithm

Young-Soo Park · Jin-Ho Kim · June-Ho Park
Pusan National University

Abstract - This paper addresses a particle swarm optimization-based approach for solving a generating unit maintenance scheduling problem(GMS) with some constraints. We focus on the power system reliability such as reserve ratio better than cost function as the objective function of GMS problem. It is shown that particle swarm optimization-based method is effective in obtaining feasible schedules such as GMS problem related to power system planning and operation. In this paper, we find the optimal solution of the GMS problem within a specific time horizon using particle swarm optimization algorithm. Simple case study with 16-generators system is applicable to the GMS problem. From the result, we can conclude that PSO is enough to look for the optimal solution properly in the generating unit maintenance scheduling problem.

1. 서 론

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. 본 논문에서는 신뢰도 측면에서의 발전기 보수 계획의 방법을 제안한다. 이상적인 발전기 보수 계획은 발전비용과 발전계통의 신뢰도를 함께 고려할 수 있는 것이다. 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. 또한 전원계획이 적절히 수립되어 있어 적정 규모의 설비를 가지고 있는 경우에는 보수 계획의 목적은 전력공급의 신뢰도를 최상으로 유지하는데 있다고 할 수 있다.[1] 본 논문에서는 연간 공급예비율 평활화를 목적함수로 사용하였다. 기본적으로 발전계통에서는 발전비용 보다는 공급신뢰도의 중요성이 크며 현재의 전력시장에 참여하는 각 발전사업자들의 이익보다는 전력계통의 안정적인 전력 수급에 중점을 둔, 본 논문의 취지를 고려하면 목적함수로 신뢰도 지수를 고려하는 것이 타당하다.

각종 제약조건을 만족하는 발전기 보수 계획 문제의 해를 찾기 위해 여러 가지 기법들이 적용되었는데, 수치적인 방법으로는 순차최적화기법, 정수계획법, 동적계획법, 분지한정법, 혼합정수법, benders decomposition 등이 있다. 최근에는 확률적인 최적화 방법인 유전알고리즘[2]과 Simulated Annealing을 이용한 방법 등이 연구되고 있다.

본 논문에서는 발전기 보수 계획 문제를 해결하기 위한 방안으로 Particle Swarm Optimization 알고리즘을 제안하였다. 유전알고리즘의 대체 기법으로 PSO는 병렬 탐색 능력과 수렴 특성이 우수하며 과거의 발전기 보수 계획에 대한 정보를 고려할 수 있어 전력시스템 스케줄링 문제에도 적합하다. 제안된 방법의 유용성을 입증하기 위해 IEEE reliability test system 발전계통의 자료를 이용하여 사례연구를 수행하였다. 사례연구를 통하여 PSO를 이용한 발전기 보수 계획 수립이 최적해를 구하는데 용이함을 확인할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 PSO 알고리즘

본 논문에서는 발전기 보수 계획 문제를 실수형 PSO를 이용하여 최적화한다. 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.

t -iteration에서의 j 번째 particle x_j^t 는 $[x_{j1}^t, x_{j2}^t, \dots, x_{jm}^t]$ 로 표현되며, x_{jk}^t 는 j 번째 particle의 k 번째 차원의 위치를 나타낸다. Particle의 위치정보는 식 (1)과 같다.

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

$Swarm-S^t$: Swarm은 n 개의 particle의 집합이다. 즉, $S^t = [X_1^t, X_2^t, \dots, X_n^t]^T$.

$Particle\ best-pbest_j^t$: 탐색공간을 움직이는 particle들은 현재의 위치정보에 대한 적합도를 구하고 자신의 이전 데이터를 기초로 최적의 위치정보를 찾는다.

$Global\ best-gbest^t$: Swarm내에서 n 개의 모든 $pbest$ 중 가장 최적의 위치정보를 내는 particle이다. 따라서 주어진 문제의 최적해가 된다.

$Particle\ velocity-V_j^t$: v_{jk}^t 는 PSO내의 유일한 연산자이며 particle들의 이동속도를 나타내는 m -차원 실수벡터이다. $V_j^t = [v_{j1}^t, \dots, v_{jm}^t]$ 는 t -iteration의 j 번째 particle의 이동 속도이다.

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

여기서 c 는 각 particle이 $pbest$ 와 $gbest$ 로 향하는 확률적 가속의 가중치를 표현하는 가속상수이며, r_1, r_2 는 $[0, 1]$ 내의 랜덤상수이다. Swarm 발산 위험을 촉진하는 속도 크기의 제어현상을 방지하고, 해 공간의 지역적 탐

색을 강화하기 위해 v_{max} 값을 제한하여 particle의 이동 속도를 조절한다. 일반적으로 v_{max} 는 각 변수 공간의 10~20%로 설정되었다.[3] PSO의 효과적인 성능 개선을 위해서는 관성하중, w 을 추가한다. 탐색과정 초기에는 전역탐색의 강화를 위해 관성하중 값을 크게 설정하고, 탐색 후반부에는 반대로 좀 더 나은 지역 탐색을 위해 관성하중을 감소시킨다. w 값은 0.9에서 0.4까지 선형적으로 감소시키는 방법이 자주 이용된다.

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

여기서 G_{max} 는 총 세대(generation) 수이다.

2.2 보수계획의 정식화

본 논문에서는 주별 공급예비율 분산값을 최소화하는 대신, 즉 연간 공급예비율을 평활화하는 보수 계획 문제의 최적해가 된다. 공급예비율 평활화 알고리즘은 이해하기 쉬우며 운전비 및 LOLP계산을 위한 확률적 시뮬레이션 과정을 거치지 않으므로 주 단위 보수 계획의 수립이 가능하다. 그러나 발전기의 고장정지율 등 전력계통의 확률적 상황을 고려하기가 힘들다는 단점이 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{t=1}^T \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[\frac{AC_t - L_t}{L_t} - \left(\frac{AC_t - L_t}{L_t} \right)^2 \right] \right\} \\ & = \text{Min} \sum_{t=1}^T \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[\frac{IC - \sum_{j=1}^N u_{jt} C_j - L_t}{L_t} - \left(\frac{IC - \sum_{j=1}^N u_{jt} C_j - L_t}{L_t} \right)^2 \right] \right\} \\ & \dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$u_{jt} = \begin{cases} 1 & : \text{Maintenance} \\ 0 & : \text{Operation} \end{cases} \quad \dots\dots (5)$$

$$\sum_{t=1}^T u_{jt} = M_j \quad \dots\dots (6)$$

$$\prod_{t=S_j}^{M_j+S_j-1} u_{jt} = 1 \quad \dots\dots (7)$$

- u_{jt} : t 번째 보수 계획 주의 발전기 j 의 운전 상태
- T : 총 보수 기간
- N : 총 발전기 대수
- IC : 총 설비용량 (Installed Capacity)
- $AC_t = IC - \sum_{j=1}^N u_{jt} C_j$: t 주의 가용 설비 용량
- L_t : t 주의 최대 수요
- C_j : 발전기 j 의 용량
- M_j : 발전기 j 의 보수 기간 (period)
- S_j : 발전기 j 의 보수 시작 주

식[4]는 본 논문의 목적함수로서, 연간 공급예비율의 분산값 최소화에 해당한다. 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 평활화(reserve leveling)한다는 의미가 된다. 공급예비율 평활화를 이용한 보수 계획의 이동에 따라 연간 계통신뢰도는 직접적인 영향을 받으므로 이를 최적으로 배분하여 연간 공급예비율을 평활화하는 것이 목적이 된다.

식[5]은 발전기의 기동, 운전 상태를 나타내는 변수를 말하며 해당 논문의 결정변수는 각 발전기들의 보수 시작점의 집합 $S' = \{S_1, S_2, \dots, S_{22}\}$ 이다. 식[6]의 제약조건은 발전기들의 보수 기간을 나타낸다. 식[7]의 제약조건은 발전기들의 보수 연속 기간을 나타낸다. 한 번 보수 계획을 시작한 발전기에 대해서는 중도에 예방정비를 중단

하지 않는다. 발전기 보수 연속성, 신뢰도 제약 등을 만족하고 목적함수 값을 최소화하는 각 발전기의 보수시작주, 즉 결정변수의 집합 S' 를 포함하는 개체를 찾는 것은 52주간의 발전기 보수 계획을 수립하는 것을 의미한다.

2.3 보수계획의 수행

발전기 보수계획을 수행하는 절차는 아래 그림1과 같다. 최초 연간 공급예비율 계산을 위한 주 단위 발전기 설비용량, 최대수요 그리고 발전기 보수기간에 대한 자료 등과 같은 발전계통의 전반적인 데이터가 입력되며, PSO알고리즘을 수행하기 위한 기본적인 파라미터 값들($c_1, w, g, V_{max}, rand_i$)을 설정한다. 이후 연간 공급예비율과 관련하여 각 개체의 적합도를 계산하고 식(1)과 (2)에 의해 개체의 속도 및 위치를 업데이트 한다. 각 세대에서 모든 개체들은 각 세대에서의 $pbest, gbest$ 추종하려는 경향을 보인다. 최초 설정한 종료조건을 확인하고 해당 과정을 반복한다. 위 알고리즘 수행결과, 연간 공급예비율 분산값의 최소화를 만족하는 결정변수의 조합, 즉 특정개체를 찾을 수 있으며 개체 내에 포함된 각 발전기의 보수 시작시기에 대한 정보도 확인 가능하기 때문에 최종적인 발전계통의 보수 계획이 수립된다.

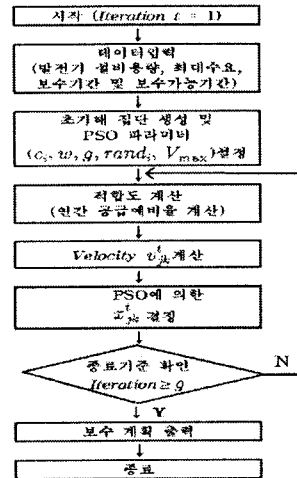


그림1 PSO를 이용한 발전기 보수 계획 수행 절차

3. 사례 연구

본 논문에서는 IEEE-RTS(Reliability Test System, 1996)의 발전기 및 수요 관련 자료를 이용한다. 계통은 발전기 16대, 보수계획기간 26주, 최대부하 580MW, 시설용량 786MW이다. 발전기 및 수요관련 자료는 아래 표 1, 2와 같으며, 보수 계획에 사용된 PSO 알고리즘의 매개변수 및 보수 관련 내용은 다음과 같다.

- 개체(particle)수, n : 100 개
- 세대(generation)수, g : 150 회
- c_1, c_2 : 0.2
- w : 0.9 ~ 0.4 (식(3) 참고)
- V_{max} : 변수공간의 10%(보수시작주의 변화 크기가 보수가능시기의 10%, 약 $\pm 2\sim 4$ 일로 설정)

표 1 발전기 자료

발전기	용량(MW)	발전타입	보수기간
U12-1	12	Oil/Steam	2
U12-2	12		2
U12-3	12		2
U12-4	12		2
U20-1	20	Oil/CT	2
U20-2	20		2
U20-3	20		2
U50-1	50	Hydro	2
U50-2	50		2
U50-2	50		2
U76	76	Coal/Steam	3
U100	100	Oil/Steam	3
U155	155	Coal/Steam	4
U197	197	Oil/Steam	4

표 2 연간 최대 수요 대비, 주간 최대 수요 비율

주	부하	주	부하	주	부하
1	86.2	10	87	19	78
2	87.8	11	85.6	20	72.4
3	88	12	90	21	74.3
4	83.2	13	89.6	22	80
5	74	14	75.5	23	88.5
6	71.5	15	80.1	24	94
7	70.4	16	72.2	25	94.2
8	72.1	17	80	26	100
9	75.4	18	72.6		

연간 공급예비를 분산값을 최소로 하는 보수 계획기간(26주) 중 모든 발전기의 기동·정지 상태를 표현하는 특정 개체, 즉 해를 찾는 것이며 아래 그림2와 같다.

```

000000001100000000000000
000000000011000000000000
000000000011000000000000
001100000000000000000000
000000000110000000000000
001100000000000000000000
001100000000000000000000
110000000000000000000000
000000001100000000000000
00000000000000000001100000
00000000000000000001110000
011100000000000000000000
000000001111000000000000
00000000000000000001111000
000011111000000000000000
000000000000111110000000
    
```

그림 2 발전기 16대의 보수(1)·운전(0) 상태(26주)

그림4는 그림3에서의 보수 계획 결과가 연간 공급 예비율을 어느 정도 평활화 시키는지 그래프로 확인한 것이다. 그림의 곡선은 각각 총 설비용량 786[MW], 주별 최대 수요, 주별 보수 용량, 이것들의 합을 나타낸다. 사례연구 결과 특정세대 이후부터는 연간 공급 예비율 분산값이 수렴함을 알 수 있다. 보수 계획 기간(26주)동안 공급예비율이 어느 정도 평활화 되었음을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 수요가 많은 시기에는 많은 수요를 충족시키기 위해 보수 물량이 작아야하고, 수요가 적은 시기에는 발전기를 보수할 수 있기 때문이다. 세대수에 따른 목적함수 값의 변화를 나타내는 그림4를 보면 연간 공급예비율 분산값을 최소화 하는 개체가 계속해서 업데이트되며, 목적함수 값이 더 이상 최적화 되지 않고 특정 수준에서 수렴함을 알 수 있다.

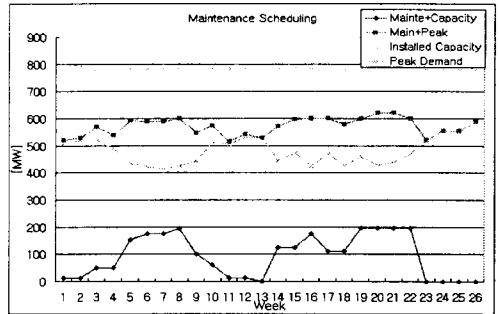


그림 3 공급예비율 평활화 곡선

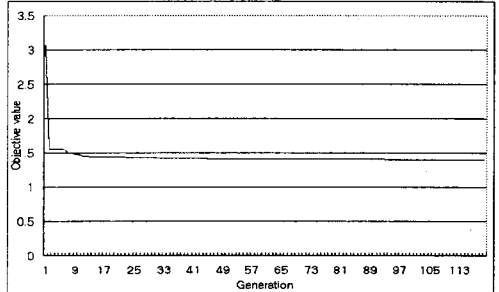


그림 4 세대수에 따른 목적함수 값 변화

4. 결론

PSO는 GA와 마찬가지로 군집(population) 기반 알고리즘으로 병렬처리 특징을 가지고 있어 해당 문제의 차원(dimension)이 증가해도 적절한 해를 찾을 수 있어 전력계통으로의 적용이 많이 시도되고 있다. 본 논문은 전력계통의 스케줄링 관련 문제인 발전기 보수 계획을 수립하는데 있어 PSO알고리즘을 이용한 접근을 시도하였다. PSO는 간단한 개념과 적은 수의 연산자로, 연산자 선택의 필요성 제거와 함께 시간의 이득을 가지며, 관성 하중과 같은 제어파라미터를 가지고 있어 수렴을 조절하는 능력이 있다. 또한 좋은 해의 지식 정보는 모든 개체에서 유지하려는 특징이 있어 개체간의 정보를 공유함으로써 상호 발전적인 협력관계를 가진다. 본 논문은 이러한 특징을 가진 PSO를 발전기 보수정지 관련 문제로 적용하는데 의미를 두었으며, 현재 진행 중인 발전기 32대, 52주 보수기간의 발전계통 스케줄링 문제에 기초가 되고 있으며 GA를 이용한 경우와의 비교·분석을 가능하게 한다. Binary PSO, Breeding PSO와 같은 Hybrid 개념의 PSO 적용에도 많은 도움이 되리라 생각한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동 연구소(R-2005-7-064) 주관으로 수행된 과제임.

[참고 문헌]

- [1] 전력연구원, "전력수급계획 및 운용해석 종합시스템 개발에 관한 연구", 1995. 12
- [2] 정정원, 김정익, "유전알고리즘을 이용한 발전계통의 보수 계획 수립", 대한전기학회논문지, 48A권 5호, 1995. 5
- [3] 박병주, 오성권, 김용수, 안태천, "PSO의 특징과 차원성에 관한 비교연구", 제어·자동화·시스템공학 논문지 제12권 제4호, 2006. 4
- [4] M.Shahidehpour, "Maintenance scheduling in restricted power systems", Kluwer academic publishers, 2000