

발전기 이산 민감도를 이용한 효율적인 우선순위법의 대규모 예방정비계획 문제에의 적용 연구

論 文
48A-3-9

An Effective Priority Method Using Generator's Discrete Sensitivity Value for Large-scale Preventive Maintenance Scheduling

朴宗培* · 丁萬鎬**
(Jong-Bae Park · Man-Ho Jung)

Abstract - This paper presents a new approach for large-scale generator maintenance scheduling optimizations. The generator preventive maintenance scheduling problems are typical discrete dynamic n -dimensional vector optimization ones with several inequality constraints. The considered objective function to be minimized in a subset of R^n space is the variance (*i.g.*, second-order momentum) of operating reserve margin to levelize risk or reliability during a year. By its nature of the objective function, the optimal solution can only be obtained by enumerating all combinatorial states of each variable, a task which leads to computational explosion in real-world maintenance scheduling problems. This paper proposes a new priority search mechanism based on each generator's discrete sensitivity value which was analytically developed in this study. Unlike the conventional capacity-based priority search, it can prevent the local optimal trap to some extents since it changes dynamically the search tree in each iteration. The proposed method have been applied to two test systems (*i.g.*, one is a sample system with 10 generators and the other is a real-world large scale power system with 280 generators), and the results are compared with those of the conventional capacity-based search method and combinatorial optimization method to show the efficiency and effectiveness of the algorithm

Key Words : Preventive Maintenance Scheduling, Generator's Discrete Sensitivity Value, Priority Search Method

1. 서 론

전력설비, 특히 발전설비의 예방정비는 전력계통의 경제적 운용과 신뢰도 확보의 측면에서 매우 중요한 문제이다. 특히, 근년에는 전력수요가 지속적으로 증가하여 왔고, 이에 따라 우리나라의 총 발전기의 대수 및 전체 설비용량 또한 꾸준히 증가하여 전력계통이 대규모화되고 있다. 1997년말 기준으로 우리나라의 총 발전기의 댓수는 수력발전기를 제외하더라도 190대가 넘고 있다[1]. 따라서, 하계 첨두부하 시간대 및 비첨두부하 시간대에 적정 공급예비력을 확보하기 위한 예방정비계획의 수립은 현실적으로 매우 어려운 실정이다.

발전기의 예방정비계획이란 주어진 계획 기간 동안에 각 발전기의 예방정비 시기를 결정하는 동태적 조합 최적화 문제이다[2, 3, 8]. 발전기의 예방정비계획 문제의 목적함수로 는 일반적으로 공급예비율, 공급지장확률 등을 사용하는 신뢰도 함수[4], 운전비용, 보수비용 등을 이용하는 비용함수 [5] 혹은 이들을 동시에 고려하는 다목적 접근법[6] 등이 전

통적으로 채택되어 왔다. 그러나 기존의 연구에 따르면, 예방정비계획안이 일정 신뢰도 범위 내에서 변동함에 따라 비용은 그다지 많이 변화하지 않는다고 알려져 있다[7]. 전통적으로 신뢰도를 이용한 예방정비계획 문제의 목적 함수로 공급예비력 평활화[8], 공급예비율 평활화[9, 10], 공급지장확률(LOLP : Loss of Load Probability) 평활화[11], 공급지장확률 최소화[12, 13] 등이 사용되어 왔다.

동태적 이산 조합 최적화(dynamic discrete combinatorial optimization) 형태를 가진 예방정비계획 문제의 최적해를 구하기 위해서는 전체 상태공간을 탐색하여야만 한다. 전체 최적해를 구할 수 있는 기존의 최적화 방법으로는 동적계획법[14], 분지한정법[7, 13] 등이 있으나, 전자는 소위 차원의 문제에 의하여 대규모 시스템에서는 무한대의 기억 용량을 필요로 하고, 후자는 기억 용량의 문제는 해결할 수 있지만 거의 무한대에 가까운 탐색시간을 필요로 하는 단점이 있다. 따라서, 대규모 예방정비계획 문제의 준 최적해를 실시간에 구하기 위하여 소위 우선순위법에 제안되어 사용되어 왔다[2, 10, 13, 16]. 우선순위법은 일종의 직접 탐색법의 변수완화법에 기초하고 있으며[16], 이는 다변수 최적화문제를 일변수 최적화 문제로 변화하여 통상 용량이 큰 순서대로 탐색을 실시하는 것이다. 이 방법론은 빠른 시간에 해를 도출할 수 있으나, 도출된 해의 최적성은 보장하지 못하는 단점을 내포하고 있다. 따라서, 빠른 시간내에 최적해에 가까

* 正 會 員 : 안양대 電氣電子工學科 專任講師

** 正 會 員 : 韓國電力公社 南서울電力管理處

接受日字 : 1998年 11月 16日

最終完了 : 1999年 1月 19日

은 해를 도출하는 방법론의 개발은 과제로 남아있다.

이 연구에서는 대규모 전력계통 예방정비계획 문제를 해결하기 위하여, 계산 시간 제약을 거의 받지 않고, 실제 전력회사에서 많이 사용하고 있는 공급예비율 평활화를 목적함수로 선정하였고, 이는 이러한 접근법의 해가 확률적 신뢰도 지수를 사용하는 공급지장확률 평활화 및 최소화의 해와 거의 차이를 보이지 않는 것에 기반을 두고 있다[4-6]. 또한 본 논문에서는 계산 시간 및 기억 용량의 한계 제약을 극복하기 위하여, 예방정비계획에 대한 목적함수의 민감도를 발전기별로 정의하였고, 이에 따라 일종의 변수완화법을 적용하여 상태공간의 효과적인 탐색을 시도하였다. 정의된 발전기별 민감도는 비교적 간단한 해석적 식으로 표현되는데 이것은 탐색시간의 상당한 감소를 가능하게 한다.

2. 문제의 정식화

2.1 목적함수 및 제약 조건

신뢰도를 목적함수로 이용하는 발전기 예방정비계획 문제는 대상 전력계통의 신뢰도를 계획기간 동안에 최대로 하는 것을 목적으로 삼고 있다. 이에, 주어진 기간 동안의 예비력, 예비율 및 LOLP 등 신뢰도 지수의 평활화, 총 계획기간 동안의 LOLP 최소화 등의 신뢰도 최대화가 주로 적용되어 왔다. 본 연구에서는 대규모 전력계통 예방정비계획 문제의 해결을 위하여 계산시간이 상대적으로 작게 소요되는 주별 공급예비율 평활화를 목적함수로 선정하였다.

신뢰도(특히, 공급예비율)를 평활화하는 방법은 통상 최저예비율을 최대화하는 방법론[2, 8, 17]과 계획기간 내에 공급예비율의 이차 모멘트, 즉 분산을 최소화하는 방법이 주로 사용되고 있다[6, 9, 10]. 본 연구에서는 목적함수를 아래와 같이 계획기간 내의 공급예비율 분산 값의 최소화로 선정하였다.

$$\text{Min}_{x_i^j, \forall i, \forall j} \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega} x_i^j - L_i}{L_i} - \frac{1}{I} \sum_{k=1}^I \frac{\sum_{j \in \Omega} x_k^j - L_k}{L_k} \right\}^2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in \Omega} x_i^j - L_i > 0, \quad \forall i \\ & i_{\min}^j \leq \xi(x_i^j) \leq i_{\max}^j, \quad \forall j \\ & \sum_{i=i_i}^{i_i+i_j-1} \xi(x_i^j) = t^j, \quad \forall j \end{aligned}$$

여기서, I : 총 계획기간의 수 (52週)

L_i : i 週의 최대수요

C^j : j 발전기의 설비 용량

Ω : 전체 발전기를 나타내는 집합

x_i^j : j 발전기의 i 週의 상태를 나타내는 변수

$\xi(x_i^j)$: j 발전기의 예방정비가 가능한 각 週(i)를 나타내는 변수

i_{\min}^j : j 발전기의 예방정비 가능 시작 週

i_{\max}^j : j 발전기의 예방정비 가능 마지막 週

i_s^j : j 발전기의 예방정비 시작 週

i_f^j : j 발전기의 예방정비 마지막 週

t^j : j 발전기의 예방정비 소요 週數

x_i^j 는 보수가능기간 동안에 발전기가 운전중이면 설비용량에 해당하는 C^j 의 값을 가지고, 정비가능 기간을 벗어나거나 정비가능 기간이라도 발전기가 정비중일 때에는 0의 값을 갖는 이산 상태 변수이다. 즉,

$$x_i^j = \begin{cases} C^j & ; \text{if } i_{\min}^j \leq i \leq i_{\max}^j \text{ and on-state} \\ 0 & ; \text{if } i \geq i_{\max}^j \text{ or } i \leq i_{\min}^j \text{ or off-state} \end{cases} \quad (2)$$

본 연구에서는 위의 식에서 주어진 바와 같이 세가지의 제약 조건을 고려하였다. 첫 번째 제약조건은 모든 週에서 공급예비력이 양수가 나타나도록 하는 것이며, 두 번째는 임의의 발전기의 예방정비 가능 기간을 일정기간으로 한정된 것인데 이는 발전기의 예방정비 기간이 이전 예방정비기간에 의하여 종속되는 동시에 기타 인력 및 연료 제약조건을 고려하기 위한 것이다. 세 번째 제약조건은 어떤 발전기의 보수 연속성을 보장해 주기 위한 것이다.

2.2 발전기 이산 민감도 정의

본 논문에서는 어떤 발전기의 예방정비가 목적함수에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 각 발전기별 이산 민감도를 계산하는 알고리즘을 개발하였다.

어떤 발전기의 목적함수에 대한 민감도를 구하고자 할 때, 전 계획기간의 분산 값으로 선정하였던 전체 목적함수보다는 그 발전기의 예방정비 가능 기간 동안의 분산 값을 기준으로 민감도를 계산하였다. 이는 대상 발전기의 예방정비 계획의 변화에 따라 영향을 받는 신뢰도 구간이 예방정비 가능 기간에만 제한된다는 사실에 기반한다. 따라서 각 발전기의 민감도를 정의하기 위한 목적함수는 각 발전기별로 다르게 선정되며 아래 식 (3)과 같이, 민감도를 구하려는 발전기의 예방정비 가능 기간 동안의 공급예비율 분산 값으로 정의하였다.

$$J^m = \frac{1}{I^m} \sum_{i \in \Omega_m} \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega} x_i^j - L_i}{L_i} - \frac{1}{I^m} \sum_{k \in \Omega_m} \frac{\sum_{j \in \Omega} x_k^j - L_k}{L_k} \right\}^2 \quad (3)$$

여기서, I^m : m 발전기의 예방정비가능 기간의 수

Ω_m : m 발전기의 예방정비가능 기간에서 각 週를 나타내는 집합.

본 논문에서는 어떤 발전기의 특정 예방정비 후보 계획안의 민감도를 식 (4)와 같이, 다른 발전기의 예방정비 기간은 결정된 상태에서 대상 발전기의 예방정비가 고려되지 않았을 때의 목적함수 값과, 그 발전기의 예방정비 계획안을 임의로 결정하였을 때의 목적함수 값의 차로 정의하였다.

$$\begin{aligned} \Delta J_n^m(p_n^m | p^{j \text{ fixed}} \forall j \neq m) \\ = J^m(p^{j \text{ fixed}} \forall j \neq m) - J^m(p_n^m | p^{j \text{ fixed}} \forall j \neq m) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, p_n^m : m 발전기의 n 번째 후보 예방정비계획안.

(4)의 식은 약간의 수식정리를 통하여 아래 식(5)와 같은 비교적 간단한 해석적 식으로 표현된다. 이 유도 과정은 첨부 A에 상세하게 주어져 있다.

$$\Delta J_n^m(p^{m_n} | p^{j_{fixed}} \forall j \neq m) = \frac{1}{I^m} \sum_{i \in \Omega_m} \{2 D_i^m M_i^m - (M_i^m)^2\} \quad (5)$$

여기서,

$$D_i^m = \frac{\sum_{j \in \Omega, j \neq m} x_i^j + C^m - L_i}{L_i} - \frac{1}{I^m} \frac{\sum_{k \in \Omega_m} \sum_{j \in \Omega, j \neq m} x_k^j + C^m - L_k}{L_k}$$

$$M_i^m = \begin{cases} -\frac{C^m}{I^m} \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{1}{L_k} & \text{when } x_i^m = C^m \\ \frac{C^m}{L_i} - \frac{C^m}{I^m} \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{1}{L_k} & \text{when } x_i^m = 0 \end{cases}$$

$\Omega_{m,n}$: m 발전기의 n 번째 후보 예방정비계획안의 기간 동안 각 週를 나타내는 집합.

식(5)에서 정의된 D_i^m 는 m 발전기의 예방정비를 고려하지 않았을 때의 i 주의 공급예비율 편차율, M_i^m 는 D_i^m 와 예방정비를 고려하였을 때의 공급예비율 편차와의 차를 의미한다. 본 연구에서는 각 발전기의 민감도 계산시간 단축을 도모하기 위하여 식 (5)의 D_i^m 을 유도하였다. 즉, D_i^m 은 m 발전기의 예방정비계획 기간이 변화하여도 변하지 않는 값이므로 실제 민감도의 계산에 있어서는 M_i^m 만을 변화시키며 계산하기 때문에 계산량 및 시간의 상당한 감소가 가능하다.

위와 같이 정의되는 민감도는 각 발전기의 예방정비 가능기간 내에 존재하는 모든 후보해에 대하여 정의되며 어떤 발전기의 민감도는 그 발전기의 모든 후보해들의 민감도 중 가장 큰 것으로 정의한다.

$$\Delta J^m = \max_{n^*} \Delta J^m(p^{m_{n^*}}) \quad (6)$$

3. 최적화 과정

이 연구에서는 공급예비율의 분산 값의 최소화를 목적함수로 선정하였으므로 최적해를 구하기 위해서는 모든 상태공간을 탐색하여야만 한다. 이는 분산 값을 계산하기 위해서는 평균 값을 사전에 알고 있어야하며, 이 평균 값은 모든 발전기에 대한 예방정비계획이 도출된 상태에서만 계산이 가능하기 때문이다. 따라서, 이러한 문제의 최적화에서는 기존의 동적계획법이나 분지한정법은 적용할 수 없다. 따라서, 실패통 규모의 대규모 최적화 문제를 해결하기 위하여 진화알고리즘[9]을 사용하거나 우선 순위에 기초한 변수완화법[2, 10, 16]이 주로 적용되어 왔다.

본 논문에서는 순차 최적화 기법을 적용하여 문제의 해결을 시도하였다[2, 8-10, 13, 16]. 순차 최적화 기법을 적용할 경우, 예방정비계획을 결정할 대상 발전기 이외의 발전기들의 예방정비 시기는 이전 상태에 고정시키고 해당 발전기만

을 대상으로 예방정비계획을 결정하는 방법을 말한다. 이는 벡터 최적화 기법 가운데 직접법의 일종인 변수완화법[15]에 해당한다. 이렇게 순차 최적화 기법을 적용하는 경우는 어떤 발전기의 예방정비계획을 먼저 결정하는가가 중요하다.

기존의 순차 최적화 기법에서는 거의 대부분 발전기의 설비용량에 기초하여 우선 순위를 결정하였다[2, 8-10, 13, 16]. 그러나 설비용량에 기초한 우선 순위법에서는 설비용량이 큰 발전기들의 탐색공간이 한 방향으로 고정될 경우, 이후의 탐색공간이 매우 제한적인 된다는 단점을 가지고 있고, 결과적으로 국부해 수렴의 결과를 도출한다.

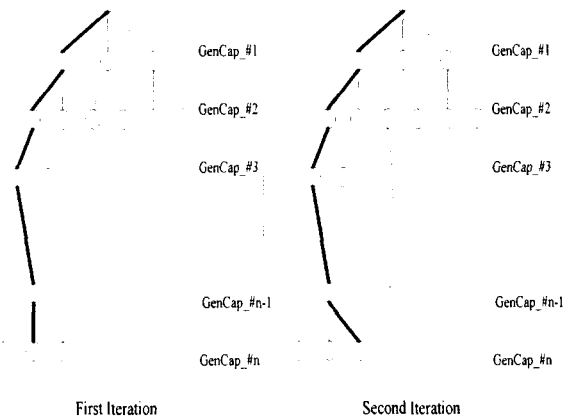


그림 1 용량 기준 우선순위법에서의 탐색 공간
Fig. 1 Search space in the conventional priority list method

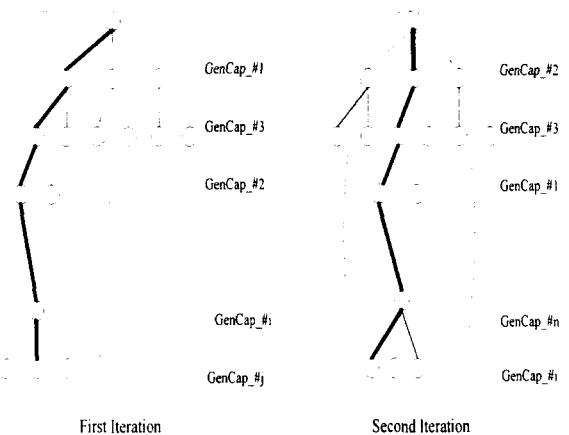


그림 2 민감도 기준 우선순위법에서의 탐색 공간
Fig. 2 Search space in the suggested priority list method

따라서, 須藤剛志 등[9]은 진화알고리즘을 적용하여 탐색 순위를 확률적으로 변화시키면서 이러한 문제점을 극복하려고 시도하였다. 본 논문에서는 발전기들의 민감도 해석을 바탕으로 민감도가 큰 순서대로 예방정비계획을 결정하는 전략을 채택하였다. 이러한 민감도 해석은 순차 최적화기법의 반복 과정마다 행하여지므로 반복 과정마다 새로운 우선

순위가 결정된다. 따라서, 매 과정별 탐색 공간의 나무 구조가 동적으로 변화하므로 기존의 연구에서의 국부해 수렴을 어느 정도 극복할 수 있다.

본 논문에서 제시한 예방정비계획안 도출 과정, 즉 최적화 과정은 아래의 알고리즘에 설명되어 있다.

```

Optimization_Procedure( )
  Read Input Data of Generators and Annual Load Profile;
  Set Initial Maintenance Scheduling of All Generators;
  Calculate Objective_Function_Value_Old( );
  Calculate Discrete Sensitivity of Generators;
  Do
    Sorting Generators According to Their Sensitivity;
  Do
    Determine i-th Generator's Maintenance Scheduling
    Minimizing Objective Function by Searching All
    Possible States;
  While for All Generators
    Calculate Objective_Function_Value_New( );
    Calculate the Difference (  $J^{old} - J^{new}$  )
    between Objective_Function_Value_Old( ) and
    Objective_Function_Value_New( );
    Replace Objective_Function_Value_New( ) as
    Objective_Function_Value_Old( );
    If  $J^{old} - J^{new} < \epsilon$  then
      Stop the Program;
    Endif
  While Repeat do Loop for the Specified Iterations
    
```

그림 3 제안된 최적화 기법 알고리즘
 Fig. 3 Proposed optimization algorithm

본 논문에서 제시한 방법에서는 초기해의 도출을 위하여 초기 민감도 해석 과정을 거치게 된다. 이 때 민감도를 구하기 위한 기준 목적함수는 모든 발전기의 예방정비가 고려되지 않은 경우의 목적함수가 된다. 이것은 어떤 발전기의 초기 민감도 해석이 먼저 고려된 다른 발전기의 민감도 해석에 대하여 영향을 받지 않게 하기 위한 것이다. 한편 이후의 민감도 해석에 있어서는 발전기별 민감도 해석을 통한 후보 해의 선정이 곧바로 기존 해에 반영되게 되므로 목적함수 값은 반복과정을 거칠수록 계속 단조 감소하게 된다. 이는 민감도 해석을 통한 임의의 발전기에 대한 예방정비기간의 결정 과정에서 이전의 목적함수 값보다 큰 예방정비계획 기간은 후보해로서 선정되지 않기 때문이다.

$$\begin{aligned}
 & J(\dots, p^{j-1}_{new}, p^j_{old}, p^{j+1}_{old}, \dots) \\
 & \geq J(\dots, p^{j-1}_{new}, p^j_{new}, p^{j+1}_{old}, \dots) \quad (7) \\
 & \geq J(\dots, p^{j-1}_{new}, p^j_{new}, p^{j+1}_{new}, \dots)
 \end{aligned}$$

4. 사례 연구

본 연구에서는 10대의 발전기로 구성된 샘플 발전계통과

1997년말 기준 우리나라의 실제통을 대상으로 예방정비계획을 수립하였다. 이때 예방정비계획 기간은 週 단위를 기준으로 52週를 선정하였다. 아래의 표 1은 발전기 10대로 구성된 샘플 계통의 예방정비계획 관련 자료를 나타낸 것이다. 또한, 아래의 그림 4에서는 샘플 계통의 週별 최대수요, 예방정비 결과 및 週별 예비력이 주어져 있다.

표 1 샘플 계통의 예방정비 관련 입력 자료
 Table 1 Sample system data related with maintenance scheduling

발전기 이름	설비 용량	보수가능 시작 週	보수가능 마지막 週	보수 기간
#1	15	43	48	2
#2	12	27	33	3
#3	25	12	17	2
#4	30	45	51	3
#5	28	9	15	3
#6	17	23	27	1
#7	36	15	20	2
#8	49	19	25	3
#9	12	43	47	1
#10	11	28	33	2

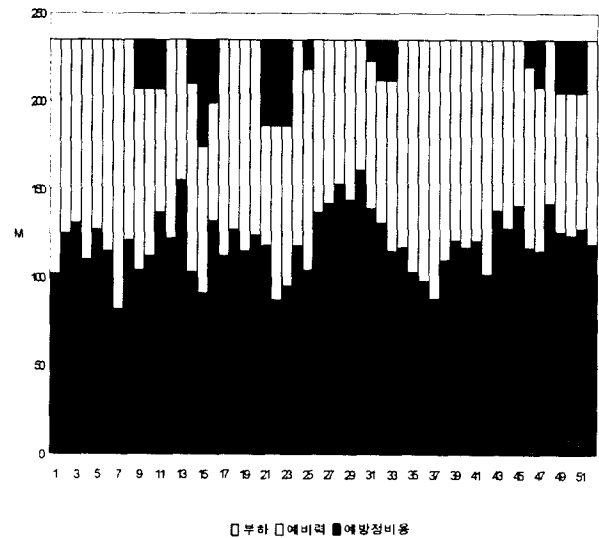


그림 4 주간 최대 수요, 예비력 및 예방정비 결과
 Fig. 4 Weekly maximum loads, reserve capacities and the result of maintenance scheduling

발전기 10대로 구성된 샘플 계통에 대하여, 모든 상태 공간을 탐색하는 기존의 조합 최적화 기법, 이산 민감도 지수를 이용하는 제안된 방법론, 기존의 대부분 연구에서 채택하고 있는 용량 기준 우선 순위법을 각기 적용하여 목적함수 값 및 계산 시간을 비교하여 보았다. 이 결과, 아래의 표 2에 주어진 것과 같이, 제안된 방법론은 조합 최적화 방법론에 비하여 매우 짧은 계산 시간안에 동일한 최적해를 도출

하였다. 그러나, 용량 기준 우선 순위법에서는 계산 시간의 측면에서는 제안된 방법론과 비슷하지만, 최적해를 도출하지 못하고 국부해에 수렴하였다. 적용한 최적화 기법별 도출 예방정비계획 결과가 아래의 표 3에 주어져 있다.

표 2 최적화 기법별 목적함수 및 계산 시간 비교

Table 2 Comparison of objective function values and computational time with optimization techniques

최적화 기법	항 목 목적함수 값 (공급예비율 분산값)	계산 시간 (초)
조합 최적화 방법론	0.081498	600.741681
제안된 방법론	0.081498	0.07649
용량 기준 우선순위법	0.082865	0.06095

표 3 최적화 기법별 예방정비계획 결과

Table 3 Maintenance scheduling results of optimization techniques

발전기 이름	보수가능 시작 週	보수가능 마지막 週	조합최적화 기법	제안된 방법론	용량 기준 우선순위법
#1	43	48	46 - 47	46 - 47	43 - 44
#2	27	33	31 - 33	31 - 33	31 - 33
#3	12	17	14 - 15	14 - 15	14 - 15
#4	45	51	49 - 51	49 - 51	45 - 47
#5	9	15	9 - 11	9 - 11	9 - 11
#6	23	27	25 - 25	25 - 25	25 - 25
#7	15	20	15 - 16	15 - 16	15 - 16
#8	19	25	21 - 23	21 - 23	21 - 23
#9	43	47	47 - 47	47 - 47	47 - 47
#10	28	33	32 - 33	32 - 33	32 - 33

샘플 계통의 사례연구에서와 마찬가지로, 제안된 방법론을 우리나라의 1997년말 기준 실계통에 대하여 1998년 예방정비계획을 수립하여 보았다. 대상 실계통의 규모는 설비용량이 47,412MW이며, 총 발전기 댓수는 280대로 설정하였다. 아래의 그림 5에서는 실 발전계통에 제안된 방법론을 적용하였을 때의 주별 최대 수요 및 주별 예비력이 주어져 있다.

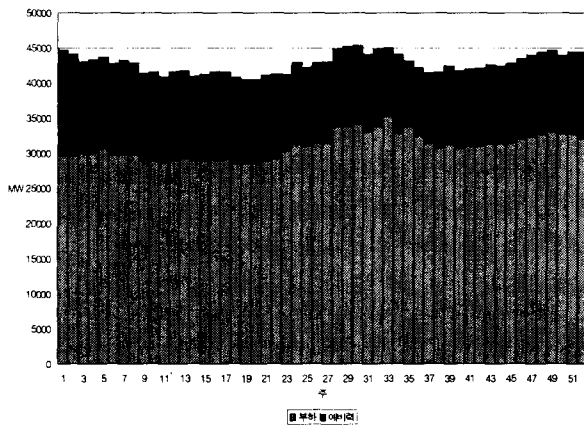


그림 5 실계통의 주간 최대 수요 및 예비력

Fig. 5 Weekly maximum loads and reserve capacities in real power system

실계통을 대상으로 기존의 조합 최적화 기법을 적용하면, 탐색 공간의 상태 개수가 거의 무한대이므로 이론적인 최적해를 구하기는 불가능하다. 따라서, 이 연구에서는 제안된 방법론과 용량 기준 우선 순위법의 결과를 비교하였다. 두 방법론을 적용한 결과가 아래의 그림 6 및 표 4에 주어졌고, 제안된 방법론이 기존의 용량 기준 우선순위법보다 우수한 해를 도출하였다.

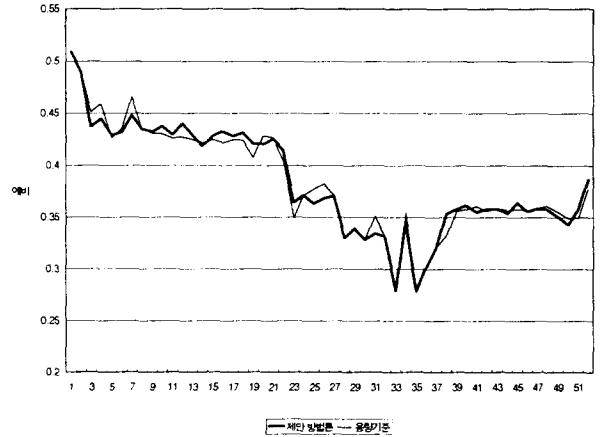


그림 6 실계통의 주간 공급예비율 비교

Fig. 6 Comparison between the two results of weekly reserve rates in real power system

표 4 실계통 기준 최적화 기법별 목적함수 및 계산 시간 비교

Table 4 Comparison of objective function values and computational time for real power system between optimization techniques

최적화 기법	항 목 목적함수 값 (공급예비율 분산값)	계산 시간 (초)
조합 최적화 방법론	unknown	∞
제안된 방법론	0.002539	0.384143
용량 기준 우선순위법	0.002554	0.359735

아래의 그림은 제안된 이산 민감도를 적용하는 방법론과 기존의 발전기 용량 기준 우선순위법의 목적함수 수렴 특성을 보여주고 있다. 기존의 방법론이 어떤 상태 공간으로 국부 수렴하는 특성을 보여주는 반면, 제안된 방법론은 이러한 국부 수렴 문제점을 어느 정도 극복할 수 있다는 것을 알 수 있다. 비록 제안된 알고리즘이 최적해를 제공할 수 있다는 보장은 없지만, 대규모 발전계통에 효과적으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

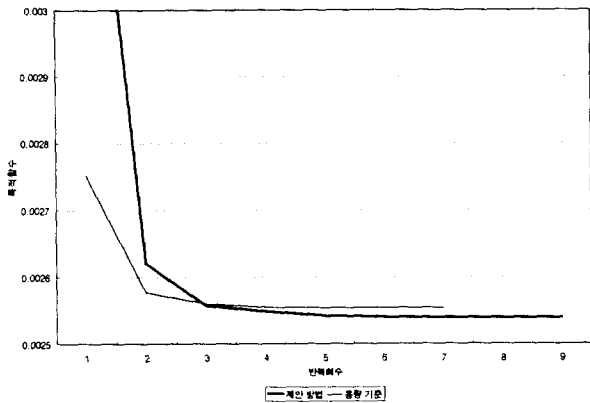


그림 7 제안 방법론과 용량 기준 방법론의 수렴 특성 비교

Fig. 7 Comparison of conversion property between the proposed method and the conventional method

5. 결 론

이 연구에서는 대규모 전력계통 예방정비계획 문제를 해결하기 위하여 개선된 우선순위법을 적용하였다. 제안하는 우선순위법은 기존의 설비용량에 근거한 방법론과는 달리 각 발전기의 예방정비가 목적함수에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 이에 근거한 우선 순위를 결정하였다. 또한, 각 발전기의 예방정비가 목적함수에 미치는 영향인 민감도를 이산 공간에서 해석적인 식으로 유도하여 계산의 편의 및 일관적인 해석이 가능하게 하였다. 제안하는 최적화 기법은 매 반복 과정마다 탐색 나무 구조를 동적으로 변화시키므로 기존의 우선순위법이 가지는 국부해 수렴 문제를 어느 정도 해결할 수 있다.

사례연구 결과, 제안하는 방법론은 10대의 발전기를 가지는 소규모 전력계통 문제에서 기존의 조합최적화 방법론의 최적해와 동일한 해를 빠른 시간내에 도출할 수 있었다. 또한, 280대의 발전기를 가지는 대규모 전력계통에 적용한 결과, 빠른 시간안에 기존의 용량 기준 우선순위법에 의하여 도출되는 해보다 우수한 해를 도출할 수 있었다. 제안하는 방법론은 비록 수학적 최적해를 보장하지는 않지만, 대규모 시스템의 예방정비계획에 효율적으로 적용 가능할 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

[1] 한국전력공사, 한국전력통계, 1997. 4.
 [2] X. Wang and J. R. McDonald, Modern Power System Planning, McGraw-Hill Book Company, 1994.
 [3] R. L. Sullivan, Power System Planning, McGraw-Hill International Book Company, 1977.
 [4] J. P. Stremel, R. T. Jenkins, "Maintenance scheduling under uncertainty", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 2, Feb. 1981.
 [5] D. Chattopadhyay, K. Bhattacharya, and J. Parikh, "A systems approach to least-cost maintenance

scheduling for an interconnected power system", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 4, Nov. 1995.
 [6] B. Kralj and N. Rajakovic, "Multiobjective programming in power system optimization: new approach to generator maintenance scheduling", International Journal of Electric Power and Energy Systems, Vol. 16, No. 4, 1994
 [7] W. R. Christiaanse and A. H. Palmer, "A technique for the automatic scheduling of the maintenance of generating facilities", IEEE Trans. on PAS, Vol. 91, No. 1, Jan./Feb. 1972.
 [8] Harry G. Stoll, Least-Cost Electric Utility Planning, John Wiley & Sons, 1989.
 [9] 須藤剛志, 鈴木浩, Simulation Evolution法を用いた大規模 補修計画 手法の 開発, 電學論 B, 114卷 4號, 平成 6年.
 [10] Y. M. Park, J. B. Park, J. R. Won, M. H. Jhong, J. H. Kim, J. B. Choo, and D. H. Jeon, "A windows based decision-making support software for yearly preventive maintenance scheduling", International Conference on Electrical Engineering, Beijing China, August 1996.
 [11] L. L. Garver, "Adjusting maintenance schedules to levelize risk", IEEE Trans. on PAS, Vol. 91, No. 5, Sept./Oct. 1972.
 [12] G. C. Contaxis, S. D. Kavatza and C. D. Vournas, "An interactive package for risk evaluation and maintenance scheduling", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 2, May 1989.
 [13] 정정원, "분지한정법을 이용한 발전계통의 보수계획수립에 관한 연구", 전기학회논문지, 44권 7호, 1995. 7.
 [14] J. P. Stremel, "Maintenance scheduling for generation system planning", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 3, March 1981.
 [15] Masanao Aoki, Introduction to Optimization Techniques: Fundamentals and Applications of Nonlinear Programming, The Macmillan Company, New York, 1971.
 [16] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
 [17] W. R. Christiaanse and A. H. Palmer, "A technique for the automated scheduling of the maintenance of generating facilities", IEEE Trans. on PAS, Vol. 91, No. 1, Jan./Feb. 1972.

첨 부 A: 각 발전기별 이산 민감도 지수 유도

각 발전기별 이산 민감도 값은 본문 식 (3)에 주어진 것과 같이 정의되고, 이는 아래와 같은 유도 과정을 통하여 본문 식 (4)에 주어진 형태로 된다. 즉,

$$\begin{aligned} & \Delta J^m(p_n^m | p^{j \text{ fixed}} \forall j \neq m) \\ &= J^m(p^{j \text{ fixed}} \forall j \neq m) - J^m(p_n^m | p^{j \text{ fixed}} \forall j \neq m) \\ &= \frac{1}{I^m} \sum_{i \in \Omega_m} \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega, j \neq m} x_i^j - L_i + C^m}{L_i} \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{I^m} \sum_{k \in \Omega_m} \frac{\sum_{l \in \Omega, l \neq m} x_k^l - L_k + C^m}{L_k} \right\}^2 \\ & \quad - \frac{1}{I^m} \sum_{i \in \Omega_m} \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega} x_i^j - L_i}{L_i} - \frac{1}{I^m} \sum_{k \in \Omega_m} \frac{\sum_{l \in \Omega} x_k^l - L_k}{L_k} \right\}^2 \end{aligned} \tag{A.1}$$

위 식의 두 번째 항은 아래와 같이 변환된다. 즉,

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{I^m} \sum_{i \in \Omega_m} \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega} x_i^j - L_i}{L_i} - \frac{1}{I^m} \sum_{k \in \Omega_m} \frac{\sum_{l \in \Omega} x_k^l - L_k}{L_k} \right\}^2 \\ &= - \frac{1}{I^m} \sum_{i \in \Omega_m} \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega, j \neq m} x_i^j - L_i + x_i^m}{L_i} \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{I^m} \sum_{k \in \Omega_m} \frac{\sum_{l \in \Omega, l \neq m} x_k^l - L_k + x_k^m}{L_k} \right\}^2 \end{aligned} \tag{A.2}$$

위 식에서 x_i^m 은 다음과 같이 예방정비 중일 때와 아닐 때의 두 가지 상태를 가진다. 즉,

$$x_i^m = \begin{cases} C^m & \text{when } i \notin \Omega_{m,n} \\ 0 & \text{when } i \in \Omega_{m,n} \end{cases}$$

따라서, 식 (A.2)는 아래와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{I^m} \left[\sum_{i \in \Omega_{m,n}} \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega, j \neq m} x_i^j - L_i}{L_i} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{1}{I^m} \left(\sum_{k \in \Omega_m} \frac{\sum_{l \in \Omega, l \neq m} x_k^l - L_k}{L_k} + \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{C^m}{L_k} \right) \right\}^2 \right. \\ & \quad \left. + \sum_{i \notin \Omega_{m,n}} \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega, j \neq m} x_i^j - L_i + C^m}{L_i} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{1}{I^m} \left(\sum_{k \in \Omega_m} \frac{\sum_{l \in \Omega, l \neq m} x_k^l - L_k}{L_k} + \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{C^m}{L_k} \right) \right\}^2 \right] \\ &= - \frac{1}{I^m} \left[\sum_{i \in \Omega_{m,n}} \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega, j \neq m} x_i^j - L_i + C^m}{L_i} - \frac{C^m}{L_i} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{1}{I^m} \left(\sum_{k \in \Omega_m} \frac{\sum_{l \in \Omega, l \neq m} x_k^l - L_k + C^m}{L_k} - \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{C^m}{L_k} \right) \right\}^2 \right. \\ & \quad \left. + \sum_{i \notin \Omega_{m,n}} \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega, j \neq m} x_i^j - L_i + C^m}{L_i} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{1}{I^m} \left(\sum_{k \in \Omega_m} \frac{\sum_{l \in \Omega, l \neq m} x_k^l - L_k + C^m}{L_k} - \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{C^m}{L_k} \right) \right\}^2 \right] \\ &= - \frac{1}{I^m} \left[\sum_{i \in \Omega_{m,n}} \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega, j \neq m} x_i^j - L_i + C^m}{L_i} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{1}{I^m} \left(\sum_{k \in \Omega_m} \frac{\sum_{l \in \Omega, l \neq m} x_k^l - L_k + C^m}{L_k} \right) \right\}^2 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{C^m}{L_i} - \frac{1}{I^m} \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{C^m}{L_k} \Big)^2 \\ & + \sum_{i \notin \Omega_{m,n}} \left\{ \frac{\sum_{j \in \Omega, j \neq m} x_i^j - L_i + C^m}{L_i} \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{I^m} \left(\sum_{k \in \Omega_m} \frac{\sum_{l \in \Omega, l \neq m} x_k^l - L_k + C^m}{L_k} \right) \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{I^m} \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{C^m}{L_k} \right\}^2 \\ &= - \frac{1}{I^m} \left[\sum_{i \in \Omega_{m,n}} \left\{ D_i^m - \frac{C^m}{L_i} - \frac{1}{I^m} \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{C^m}{L_k} \right\}^2 \right. \\ & \quad \left. + \sum_{i \notin \Omega_{m,n}} \left\{ D_i^m - \frac{1}{I^m} \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{C^m}{L_k} \right\}^2 \right] \\ &= - \frac{1}{I^m} \sum_{i \in \Omega_m} \left[\{D_i^m - M_i^m\}^2 \right] \end{aligned} \tag{A.3}$$

위 식에서 M_i^m 은 아래와 같이 두가지 상태를 가지는 식으로 표현할 수 있다.

$$M_i^m = \begin{cases} -\frac{C^m}{I^m} \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{1}{L_k} & \text{when } x_i^m = C^m \\ \frac{C^m}{L_i} - \frac{C^m}{I^m} \sum_{k \in \Omega_{m,n}} \frac{1}{L_k} & \text{when } x_i^m = 0 \end{cases}$$

따라서, 식(A.1)과 식(A.3)를 결합하면 아래와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} & \Delta J^m(p_n^m | p^{j \text{ fixed}} \forall j \neq m) \\ &= \frac{1}{I^m} \sum_{i \in \Omega_m} \left[\{D_i^m\}^2 - \{D_i^m - M_i^m\}^2 \right] \\ &= \frac{1}{I^m} \sum_{i \in \Omega_m} \left[2D_i^m M_i^m - M_i^m{}^2 \right] \end{aligned} \tag{A.4}$$

저 자 소 개



박종배 (朴宗培)

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1989년 동 대학원 전기공학과. 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1987. 2 - 1998. 2. 한국전력공사 근무. 현재 안양대학교 전기전자공학과 전임강사.



정만호 (丁萬鎬)

1972년 12월 13일생. 1995년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1997년 동 대학원 전기공학과. 졸업(석사). 현재 한국전력공사 남서울전력관리처 근무.