

민감도 분석에 기초한 대규모 전력계통의 예방정비계획 방법론 개발

정만호*

한국전력공사 남서울전력관리처

박중배**

안양대학교 전기공학과

Large-scale Generator Maintenance Scheduling via Sensitivity Analysis Method

Man-ho Jung*

Korea Electric Power Corporation(KEPCO)

Jong-Bae Park**

Electrical Engineering Dept., Anyang University

Abstract - This paper presents a new approach to large-scale optimal generator maintenance scheduling. To do this, we developed a kind of discrete sensitivity index of each generator by using difference of objective function when it is on and off status. Based on the sensitivity value, we applied the conventional priority approach as an optimization method in the order of each generator's sensitivity measure. By applying the developed method, we can efficiently search the state space and dramatically reduce the computation time in a large scale power system.

1. 서 론

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

발전기의 예방정비계획이란 주어진 계획 기간 동안에 각 발전기의 예방정비 시기 및 기간을 결정하는 동태적 조합 최적화 문제이다^(2,3). 발전기의 예방정비계획 문제의 목적함수로는 일반적으로 공급예비율, 공급지장확률 등을 사용하는 신뢰도 함수⁽⁴⁾, 운전비용, 보수비용 등을 이용하는 비용함수⁽⁵⁾ 혹은 이들을 동시에 고려하는 다목적 접근법⁽⁶⁾ 등이 전통적으로 채택되어 왔다. 그러나 기존의 연구에 따르면, 예방정비계획안이 같은 수준의 신뢰도 범위내에서 변동함에 따라 비용은 그다지 많이 변화하지 않는다고 알려져 있다⁽⁷⁾. 전통적으로 신뢰도를 이용한 예방정비계획 문제의 목적 함수로 공급예비율 평활화⁽⁸⁾, 공급예비율 평활화⁽⁹⁾, 공급지장확률(LOLP : Loss-of-Load-Probability) 평활화⁽¹⁰⁾, 공급지장확률 최소화^{(11),(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⁽¹²⁾, 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.

이 연구에서는 대규모 전력계통 예방정비계획 문제를 해결하기 위하여, 계산 시간 제약을 거의 받지 않고, 실제 전력회사에서 많이 사용하고 있는 '공급예비율 평활화'를 목적함수로 선정하였고, 이는 이러한 접근법의 해가 확률적 신뢰도 지수를 사용하는 공급지장확률 평활화 및 최소화와의 해와 거의 차이를 보이지 않는 것에 기반을 두고 있다^(4,5,6). 또한 본 논문에서는 계산 시간 및 기억 용량의 한계 제약을 극복하기 위하여, 예방정비계획에 대한 목적함수의 민감도를 발전기별로 정의하였고, 이에 따라 일종의 변수환화법을 적용하여 상태공간의 효과적인 탐색을 시도하였다. 정의된 발전기별 민감도는 비교적 간단한 해석적 식으로 표현되는데 이것은 탐색시간의 상당한 감소를 가능하게 한다.

2. 문제의 정식화

2.1 목적함수의 선정

신뢰도를 목적함수로 이용하는 발전기 예방정비계획 문제의 근본 목적은 대상 전력계통의 신뢰도를 최대로 하는 것이다. 신뢰도 평활화 문제 또한 신뢰도 최대화의 한 지표로 사용되어 왔는데, 이는 어떤 기간의 신뢰도를 과다하게 낮춰서 다른 기간의 신뢰도를 과다하게 높이지 않게 함으로써 계통 전체의 신뢰도를 최대화할 수 있다는 개념에 기반을 두고 있다. 본 연구에서는 대규모 전력계통 예방정비계획 문제의 해결을 위하여 계산 시간 제약이 거의 없는 공급 예비율을 대상으로 계획 기간 동안의 공급 예비율의 평활화를 목적함수로 선정하였다.

기존의 연구에 의하면 신뢰도를 평활화하는 방법 중 가장 효과적인 방법으로 계획기간 내에 신뢰도의 이차 모멘트, 즉 분산을 최소화하는 방법이 있다는 것이 알려져 있다^(6,11). 따라서, 본 연구에서도 최소화할 목적함수를 아래와 같이 계획기간 내의 공급 예비율의 분산으로 선정하였다.

$$J = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left(\frac{\sum_{j=1}^N C_{ij} - L_i}{L_i} - \frac{1}{I} \sum_{k=1}^I \frac{\sum_{j=1}^N C_{kj} - L_k}{L_k} \right)^2 \quad (1)$$

I : 총 계획기간의 수

C_{ij} : j번째 발전기의 i주의 가용용량 (예방정비시 : 0, 예방정비를 하지 않을 때 : C^j)

L_i : i주의 최대수요

2.2 민감도의 정의

본 논문에서는 각 발전기의 예방정비계획의 목적함수에 대한 영향을 정량적으로 파악하고 그를 이용하여 탐색할 상태공간을 효과적으로 제한하여 일종의 우선 순위법을 적용하기 위하여 예방정비계획의 목적함수에 대한 민감도를 발전기별로 정의한다. 목적함수에 대한 민감도를 구하고자 할 때, 전 계획기간의 분산 값으로 선정되었던 전체 목적함수보다는 구하려는 민감도에 대한 발전기의 예방정비 가능기간의 분산 값으로 선정된 목적함수를 고려하여야 더욱 의미있는 결과를 얻을 수 있다. 이는 그 발전기의 예방정비계획의 변화에 따라 영향을 받는 신뢰도의 구간이 예방정비 가능기간의 구간으로 제한된다는 사실에 기반한다. 따라서 발전기의 민감도가 정의되기 위한 목적함수는 각 발전기별로 다르게 선정되어지며 식 (2)과 같이, 민감도를 구하려는 발전기의 예방정비 가능기간동안의 공급 예비율의 분산 값으로 정의된다.

$$J^j = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^{I_j} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N C_i^j - L_i}{L_i} - \frac{1}{P} \sum_{k=1}^{I_j} \frac{\sum_{i=1}^N C_i^k - L_k}{L_k} \right\}^2 \quad (2)$$

I^j : j 번째 발전기의 예방정비가능기간의 수

I_i^j : j 번째 발전기의 예방정비가능 첫째 주

I_i^j : j 번째 발전기의 예방정비가능 마지막 주

본 논문에서는 어떤 발전기의 특정한 예방정비 후보해의 민감도를 식 (3)과 같이, 그 예방정비가 고려되지 않았을 때의 목적함수 값과 그 예방정비를 하였을 때의 목적함수 값의 차로 정의한다.

$$\Delta J^j(p_k^j) = \bar{J}^j - J^j(p_k^j) \quad (3)$$

p_k^j : j 번째 발전기의 k 번째 후보 예방정비계획안

\bar{J}^j : j 번째 발전기의 예방정비를 고려하지 않았을 때의 목적함수

$J^j(p_k^j)$: j 번째 발전기의 k 번째 후보 예방정비계획안의 목적함수

(3)의 식은 약간의 수식정리를 통하여 아래 식(4)와 같은 비교적 간단한 해석적 식으로 표현된다.

$$\Delta J^j(p_k) = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^{I_j} \{ 2 \bar{D}_i^j M_i^j - (M_i^j)^2 \} \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \bar{D}_i^j &= \frac{\sum_{n=1}^{i-1} C_n^j + C^j + \sum_{n=j+1}^N C_n^j - L_i}{L_i} \\ &- \frac{1}{P} \sum_{k=1}^{I_j} \frac{\sum_{n=1}^{i-1} C_n^k + C^j + \sum_{n=j+1}^N C_n^k - L_k}{L_k} \\ M_i^j &= \frac{C_i^j}{L_i} - \frac{1}{P} \frac{C_i^j}{L_i} \end{aligned}$$

식(4)에서 정의된 \bar{D}_i^j 는 j 번째 발전기의 예방정비를 고려하지 않았을 때의 i 일의 공급 예비율의 편차를,

M_i^j 는 \bar{D}_i^j 와 예방정비를 고려하였을 때의 공급 예비율의 편차와의 차를 의미한다. \bar{D}_i^j 는 j 번째 발전기의 예방정비계획의 변화에 따라서 변화하지 않는 값이므로 실제 민감도의 계산에 있어서 계산량의 상당한 감소가 가능하다.

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

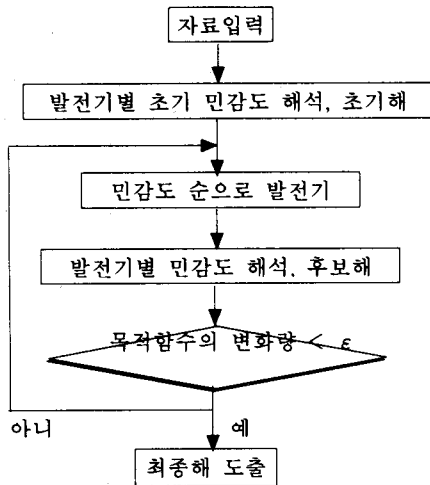
$$\Delta J^j = \max_{p_k^j} \Delta J^j(p_k^j) \quad (5)$$

3. Solution Procedure

본 논문에서는 순차 최적화 기법을 적용하여 문제의 해결을 시도하였다. 순차 최적화 기법이란 최적해를 도출함에 있어 예방정비계획을 결정할 발전기 외의 발전기들의 예방정비시기를 고정시키고 해당 발전기만을 대상으로 예방정비계획을 결정하는 방법을 말하는데, 발전기를 바꾸어가면서 이 과정을 되풀이하는 것을 말한다. 이것은 소위 완화법(relaxation method)의 일종이라고 할 수 있다. 이렇게 순차 최적화 기법을 적용하는 경우는 어떤 발전기의 예방정비계획을 먼저 결정하는가가 중요하다.

기존의 순차 최적화 기법에서는 거의 대부분 발전기의 설비용량이 큰 순서대로 예방정비계획을 실행하는 방법론을 채택하고 있는 반면, 본 논문에서는 발전기들의 민감도 해석을 바탕으로 민감도가 큰 순서대로 예방정비계획을 결정하였다. 이러한 민감도 해석은 순차최적화기법의 반복 과정마다 행하여지는데, 이 때 각 발전기별 민감도를 구하는 과정에서 발전기의 민감도를 결정하는 예방정비계획을 그 후보해로 선정하게 된다. 또한 매 반복 과정마다 새롭게 바뀐 민감도의 크기 순서에 따라 다시 발전기 고려순서를 정렬하게 되며 이러한 반복과정의 마지막 단계로 이전의 후보해와 새로 선정된 후보해와의 목적함수 값의 차를 구하고 그 값이 미리 정한 기준값보다 작으면 종료하게 된다.

본 논문에서 제시된 예방정비계획안 도출과정의 개괄적 흐름도는 다음과 같다.



(그림 1) 제안된 예방정비계획법의 흐름도

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 그 이후의 민감도 해석에 있어서는 발전기별 민감도 해석을 통한 후보해의 선정이 곧바로 기준해에 반영되게 되어 목적함수 값이 단조 감소하게 된다. 이는 식(6)과 같이 민감도 해석을 통한 후보해의 선정 과정에서 목적함수 값을 크게 만드는 해는 선정되지 않기 때문이다.

$$J(\dots, p^{j-1}_{new}, p^j_{old}, p^{j+1}_{old}, \dots) \geq J(\dots, p^{j-1}_{new}, p^j_{new}, p^{j+1}_{new}, \dots) \geq J(\dots, p^{j-1}_{new}, p^j_{new}, p^{j+1}_{new}, \dots)$$

(6)

4. 사례 연구

본 연구에서는 임의로 구성된 10대의 발전기와 50대의 발전기로 구성된 두 가지의 샘플 계통에 대하여 52주를 전체 계획기간으로 예방정비계획 문제를 해석하여 보았다. 아래의 그림 2는 주간 최대 수요(MW)의 크기를 나타낸 것이다.

102	125	131	110	127	115	82	121	104	112
137	122	155	103	91	132	112	127	115	124
118	87	95	118	104	137	142	153	144	161
139	131	115	117	103	98	88	110	121	117
121	102	138	128	141	117	115	142	126	124
128	119								

(그림 2) 주간 최대 수요

아래의 표 1에서는 발전기 10대로 구성된 계통에 대하여 예방정비계획 관련 자료를 나타낸 것이다.

(표 1) 발전기 10대 계통의 보수 관련 자료

발전기 이름	설비 용량	보수가능 시작 주	보수가능 마지막 주	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

발전기 10대로 구성된 첫번째 계통에 대하여서는 목적함수에 대한 기존의 조합 최적화 기법을 적용하여 얻어진 최적해와, 제안된 방법의 결과로 얻어진 예방정비계획을 모두 구하여 서로 비교하였다. 또한, 발전기 50대로 구성된 계통에 대하여서는 기존의 조합 최적화 기법은 거의 무한대의 시간이 소요되므로 제안된 방법을 적용한 예방정비계획안을 제시하였다.

표 2은 각 사례별로 도출된 예방정비계획의 목적함수 값을 보여준다. 첫번째의 경우 수학적 최적해와 제안된 방법의 해의 목적함수 값의 차가 매우 적음을 알 수 있다.

(표 2) 사례별 목적함수 값

목적함수 값		첫번째 사례	두번째 사례
	제안된 방법	0.082865	0.242035
최적해	0.082842		-

표 3은 각 사례별 계산 시간을 비교하였다. 제안된 방법에서 괄호 안의 값은 반복횟수를 나타낸다.

(표 3) 사례별 계산 시간

계산시간(초)		첫번째 사례	두번째 사례
	제안된 방법	0.022671(3)	0.092388(6)
최적해	600.741681		-

사례연구에서 알 수 있듯이 제안된 방법은 매우 짧은 계산 시간으로, 최적해에 가까운 해를 도출해 낸다. 이는 제안된 방법이 대규모 전력계통의 예방정비계획문제를 효과적으로 해결할 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

이 연구에서는 대규모 전력계통 예방정비계획문제를 해결하기 위하여, 계산 시간 제약을 거의 받지 않고, 실제 전력회사에서 많이 사용하고 있는 공급예비율 평활화를 목적함수로 선정하고, 계산 시간 및 기억 용량의 한계 제약을 극복하기 위하여, 예방정비계획에 대한 목적함수의 민감도를 발전기별로 정의하여 이에 따라 상태공간의 효과적인 탐색을 가능하게 하는 방법을 제시하였다. 해의 탐색기법으로는 대규모 최적화 문제 해결의 한 방법으로 이용되고 있는 순차최적화기법을 적용하여 대

규모 최적화 문제인 예방정비계획문제를 일련의 소규모 문제로 다룰 수 있게 하였다.

사례연구 결과, 제안된 방법은 대규모 전력계통의 복잡한 예방정비계획문제를 빠른 시간내에 해결할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이 방법은 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. 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, pp. 2002-2007, Nov., 1995.
- (6) B.Kralj, N.Rajakovic, "Multiobjective programming in power system optimization : new approach to generator maintenance scheduling", EPES, Vol. 16, No. 4, pp. 211-220, 1994
- (7) W.R.Christiaanse, A.H.Palmer, "A technique for the automatic scheduling of the maintenance of generating facilities." IEEE Trans. PAS, Vol. 91, No. 1, pp. 137-144, 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, pp. 367-372, 平成 6年.
- (10) L.L. Garver, Adjusting maintenance schedules to levelize risk. IEEE Trans. PAS, Vol. 91, No. 5, pp. 2057-2063, Sept.-Oct. 1972.
- (11) G.C.Contaxis, S.D.Kavatza, C.D.Vournas, "An interactive package for risk evaluation and maintenance scheduling", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 389-395, May 1989.
- (12) J.P.Stremel, "Maintenance scheduling for generation system planning", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 3, pp. 1410-1419, March 1981.
- (13) 정정원, "분지한정법을 이용한 발전계통의 보수계획수립에 관한 연구", 전기학회 논문지, 44권 7호, pp. 829-835, 1995년 7월