

송길영
최제석*

고려대학교
고려대학교

1. 서론

최근 산업시설의 발달로 발전기 대수가 증가하고 원자력 발전기의 연료고체기간에 따른 대응량 할락으로 계통안정화 및 신뢰도 유지를 위한 발전기 보수유지계획 알고리즘 개발 또는 발전비용 최소화를 위한 보수유지계획 수립등이 요구되고 있다.

이를 위하여 전자계산기의 발달에 힘입어 모델을 결정론적인 것에서 확률론적인 것으로 또한 평가함수를 공급예비율 평활화에서 신뢰도(LOLP) 평활화 또는 확률적 발전비용 최소화로 발달해 오고 있다.

이를 해석하기 위하여 분기한정법 또는 동적계획법등이 적용될 수 있으나 분기한정법은 제약조건이 많을수록 분기수를 감소시킬 수 있음에도 불구하고 발전기대수와 시간대가 많을 경우 분기수가 해석할 수 없을 정도로 많아지고 있으며(4) 역시 DP도 발전기 수가 많고 각발전기의 보수기간이 길어지면 상태수가 늘어나게 된다.(10) 그러므로 각 발전기 한대씩을 (또는 그룹을) DP로 풀고 전체를 축차근사법으로 해석하여 최적해를 구하는 DPSA가 유력한 알고리즘으로 알려져 있다. (6)(8)(10)

본 연구는 확률적 발전비용을 목적함수로 삼고 발전기 한대씩을 시간축으로 이동시켜 나가면서 가능한 모든 경우중 최소비용인 최적해를 축차근사법으로 구하는 알고리즘을 개발하였으며 이것을 발전기 39대, 시간대 36개로 한 실험계통 규모에 적용하여 본 결과 공급예비율 평활화일 때 보다 발전비용이 감소된 보수유지계획을 얻을 수 있었다.

2. 문제의 설정

2-1- 부하모델

모든 시구간에 있어서 부하는 다음과 같이 정규분포 한다고 가정한다.

$$L_j = N(m_j, \sigma_j^2) \dots \dots \dots (2.1)$$

단, m_j : j 시간대에 있어서 부하의 기대치
 σ_j : j 시간대에 있어서 부하의 표준편차

그러므로, 모든 시간대에 대한 확률적 부하분포 곡선을 그리면 그림.1과 같다.

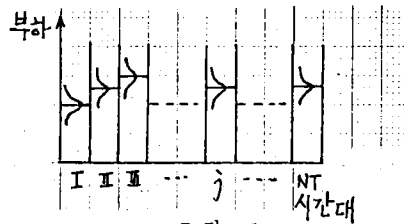


그림. 1

2-2 발전기 용량모델

각 발전기는 다음 그림.2와 같은 2개의 확률적 상태만을 갖는 것으로 하였다. 여기서 시간에 따라 변하지 않는 사고율(F.O.R)을 가정하면 UP 과 Down 에 있을 확률 p, q는

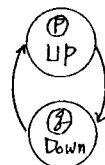


그림. 2

$$p = 1 - F.O.R \dots \dots \dots (2.2)$$

$$q = F.O.R$$

과 같이 된다. (3)

2-3 확률적 발전비용 해석 및 공급지장비 해석

(1) 확률적 발전비용 해석 (Probabilistic Production cost Analysis)

먼저 부하 확률분포를 구하고 여기에 발전기를 우선 순위법으로 투입하여 비용을 구하는 Booth-Baleriaux법을 사용하였다. (2)

즉, 현재 k시간대의 누적공급부족확률분포인 $P_n^k(X)$ 가 있을때 용량 C인 i번째 발전기가 우선 순위법으로 투입될 경우 새로운 누적공급부족확률분포 $P_n^{k'}(X)$ 는

$$P_n^{k'}(X) = q_i P_n^k(X) + p_i P_n^k(X+C) \dots \dots \dots (2.3)$$

가 된다. 이를 누적공급부족시간분포로 변환하면, k시간대의 총시간수를 T_k 라 할 때-

$$T_k P_n^{k'}(X) = [q_i P_n^k(X) + p_i P_n^k(X+C)] \times T_k \dots \dots (2.4)$$

가 되고, 결국 추가되는 용량 C인 i발전기가 담당하는 발전비용은

$$f_1(k) = T_k \times P_n^k(0) \times (1 - q_i) \times \beta_i + (E_k - E_k') \times \alpha_i \dots \dots \dots (2.5)$$

가 된다. (2)

단, β_i : 부하 연료비 (No Load Fuel Cost Rate, MR/h, R는 가상화폐단위이다.)

α_i : 증분 연료비 (Incremental fuel Cost Rate, MR/Mwh)

$$E_k = \sum [P_n^k(X) - P_n^k(X+4X)] \times 4X \times T \text{ (Mwh)}$$

$$E_k' = \sum [P_n^{k'}(X) - P_n^{k'}(X+4X)] \times 4X \times T \text{ (Mwh)}$$

4X: 부하 변량의 Step Size.

여기서는 증분연료비 α 가 적은 발전기부터 차례대로 투입하도록 하였으며 (3) k시간대의 보수발전기의 집합 M_k 를 뺀 나머지 발전기 에 의한 k시간대 발전비용은 다음과 같이 된다.

$$C_1(K, M_k) = \sum_{i=1}^{NG} f_1(k) [MR] \dots \dots \dots (2.6)$$

$i \in M_k$

(1) 공급지장비 해석

위의 발전비용을 확률적으로 해석할 때 모든 발전기가 사고율을 갖는다고 가정하였으므로 어떠한 공급부족 전력량은 발생한다. 이것은 tie-line 또는 사고율 0인 비상전원으로 공급되어져

야 한다고 가정하면 이를 위한 변환 함수를 T 라 할 때 공급지장비는 다음과 같이 된다.

$$C_2(K, M_k) = T'(E_k'(M_k)) [MR] \dots \dots \dots (2.7)$$

2-4 목적함수

K시간대의 총발전비용은 식(2.6)과 식(2.7)의 합이므로

$$F(K, M_k) = C_1(K, M_k) + C_2(K, M_k) \dots \dots \dots (2.8)$$

가 되고 결국 보수계획의 목적함수는

$$\text{Min}_{M_k} F = \sum_{k=1}^{NT} F(K, M_k) = \sum_{k=1}^{NT} \left[\sum_{i=1}^{NG} f_1(k) + T' \right] i \in M_k \dots \dots (2.9)$$

가 된다. 결국 보수유지계획이란 k시간대에 보수 가능한 발전기의 가능한 조합중 F^* 를 결정하는 M_k^* 을 구하는 것이된다.

2-5 제약조건

- (1) 동일발전소내 보수대수의 제약 (보수기술자인원의 제약)
- (2) 보수 가능기간의 제약
- (3) 모든 발전기가 1년에 한번은 꼭 보수해야 한다는 제약
- (4) 발전기 보수계획이 다음해로 이어져 넘어가는 경우가 없어야 한다는 제약
- (5) 각 시간대의 공급예비율이 어떤 일정수준 이상은 유지 되어야 한다는 제약
- (6) 최소시간내에 보수를 완료 해야 한다는 제약

3. 문제의 해법

발전기 보수계획이란 위의 여러가지 제약조건 아래 모든 가능한 조합중에서 최소비용을 갖는 보수계획의 경우를 찾는 것이다.

이문제용 DP사로 해석할때 일단 보수를 시작하면 최소시간내에 보수를 완료해야한다는 제약조건 때문에 특수한 형태의 경로 모양이 나타남을 이용하여 본 연구에서는 시간축 이동법으로 해석하는 알고리즘을 개발하였다.

3-1 DP로의 정식화

상태변수 벡터 $\bar{X}(k)$ 및 제어 변수 벡터 $\bar{U}(k)$ 를 다음과 같이 정의한다. (6)

$$\bar{X}(k) \triangleq [X_1(k), X_2(k), \dots, X_{NG}(k)]^T$$

$$\bar{U}(k) \triangleq [U_1(k), U_2(k), \dots, U_{NG}(k)]^T$$

단, $X_i(k)$: K단계까지 i발전기의 보수 완료의 정도

$$U_i(k) = \begin{cases} 0; & K\text{단계에서 } i\text{발전기가 보수하지 않을 때} \\ 1; & K\text{단계에서 } i\text{발전기가 보수 할 때} \end{cases}$$

그러므로 상태방정식을 세우면

$$\bar{X}(K+1) = \bar{X}(K) + \bar{U}(K) \dots\dots\dots(2, 10)$$

가 되고 시간 및 종단점의 경계조건은 다음과 같다.

$$\bar{X}(1) = \bar{0}$$

$$\bar{X}(NT+1) = [X_1^{MAX}, X_2^{MAX}, \dots\dots X_{NG}^{MAX}]^T$$

단, $X_i = D_i + 1$

$D_i = i$ 발전기의 보수 기간

식 (2,9)를 위의 상태변수 벡터 및 제어변수 벡터로 나타내면 목적함수는

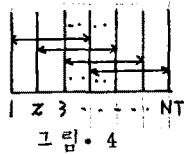
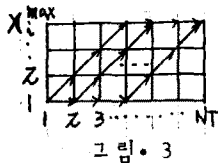
$$F^*[\bar{X}(K), K] = \text{Min}_{\bar{U}(1), \bar{U}(K)} \sum_{j=1}^{K-1} F[\bar{X}(j), \bar{U}(j), j] \dots\dots(2, 11)$$

가 되고 Bellman의 최적성의 원리에 기초하여 FDP (Foward Dynamic Programming) 의 반복식

$$F^*[\bar{X}(K), K] = \text{Min}_{\bar{U}(K-1)} \{ F[\bar{X}(K-1), \bar{U}(K-1), K-1] + F^*[\bar{X}(K-1), K-1] \} \dots(2, 12)$$

가 된다. 결국 DP에 의한 최적보수유지계획 해석법은 식 (2,12)에 따라 위의 여러가지 제약 조건을 만족하는 $\bar{U}^*(1), \bar{U}^*(2), \bar{U}^*(3), \dots, \bar{U}^*(K-1)$ 를 구하는 것이다. 그런데 여기서 발전기 i 가 K 단계에서 일단 보수를 시작하면 $K+D_i$ 단계까지는 계속 보수해야하는 제약조건 때문에 i 발전기 하나에 대하여 Grid 내에서 경로는 다음 그림.

- (3)와 같은 모양을 이룬다. 그러므로 이는 그림.
- (4)와 같이 시간축으로 이동하면서 해석하는 방법으로 변환할 수 있고 이는 상해수가 필요없다.



본 연구에서는 DP와 같은 효과를 얻으면서도 상해수가 필요없는 이와같은 시간축이동법을 사용하였다.

예를 들어, 그림. 5와 같은 보수 가능기간을 갖고 표. 1과 같은 초기상태로 출발하는 발전기 #1, #2만의 보수계획을 구하는 문제를 생각해보면 (각각 다른 발전소에 있는 발전기이며 보수기간은 모두 2시간대로 가정한다.)

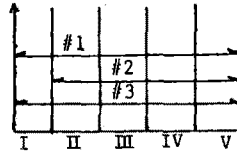


표. 1

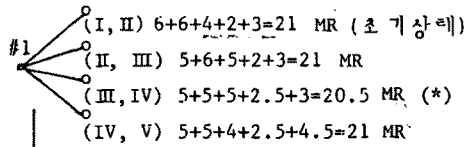
| | |
|----|---------|
| | 초기보수기간 |
| #1 | I, II |
| #2 | II, III |

그림. 5

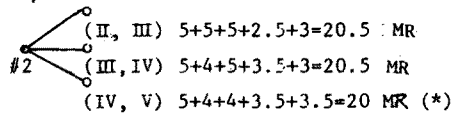
표. 2 각 경우에 따른 F_k (가점치) (단위: MR)

| | | | | | | |
|-----------------|-----|----|-----|----|---|--------------|
| 경우 | 시간대 | | | | | |
| | I | II | III | IV | V | ΣF_k |
| 모든 발전기를 운전할 때 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 17 |
| 표. 1과 같은 초기보수기간 | 6 | 6 | 4 | 2 | 3 | 21 |

첫번째 반복횟수에 대하여



#1 발전기는 (III, IV)에 보수하는 것으로 한다.



로 되어 각각 (III, IV), (IV, V)로 보수 계획을 변화 시킴으로써 21-20=1MR의 발전비용을 절감시킬 수 있다.

4. 흐름도

이번에 개발한 프로그램의 흐름도는 그림. 6과 같다.

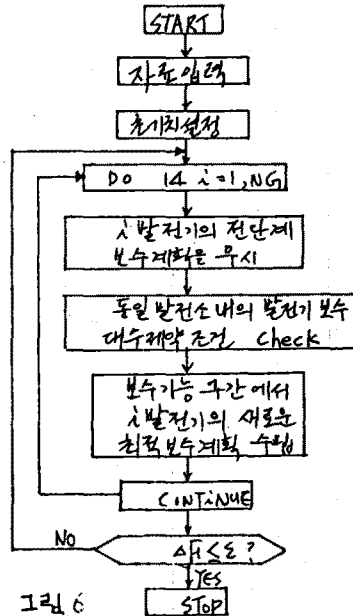


그림. 6

5. 적용례

그림.7, 표.3과 같은 부하 36시간대, 발전기 39대의 실제용구모에 적용하여 보았다. 표.3의 NOPT2는 이의 결과이며 표.4는 공급예비율 평활화 일때와 비용의 비교이다.

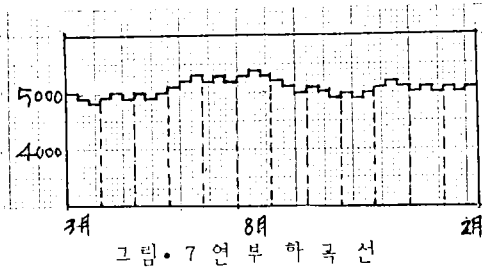


그림. 7 연부하곡선

표. 3 발전기 입력자료 및 결과

| MG | ID | CAP | IIN | IDM1 | IDM2 | NOPT1 | α | β | F.O.R | IDD | NOPT2 |
|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|----------|---------|-------|-----|-------|
| 1 | A | 565 | 1 | 6 | 6 | 1 | 1.0 | 3.0 | 0.02 | 1 | 1 |
| 2 | B | 380 | 1 | 9 | 5 | 5 | 2.5 | 3.0 | 0.02 | 1 | 5 |
| 3 | B | 380 | 19 | 9 | 5 | 23 | 2.5 | 3.0 | 0.02 | 3 | 23 |
| 4 | B | 380 | 28 | 9 | 5 | 32 | 2.5 | 3.0 | 0.02 | 3 | 32 |
| 5 | C | 330 | 19 | 9 | 6 | 19 | 3.0 | 3.0 | 0.02 | 1 | 19 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 39 | W | 24 | 19 | 9 | 3 | 25 | 12.0 | 17.0 | 0.01 | 1 | 19 |

단, NOPT1 : 초기보수 시작 시간 대번호
 IDM1 : 보수 가능 시간대수
 IDM2 : 보수 시간대수
 ID : 발전소명
 IDD : 동일 발전소내 발전기 번호

표. 4 비용 비교 (단위: MR)

| | |
|--------------|--------------|
| 공급예비율 평활화 경우 | 2,625,794.00 |
| 확률적 발전비용일 경우 | 2,625,713.50 |

여기서 $T = aE' + b$ 로 하고
 $a = 20 \text{ MR/Mwh}$
 $b = 0$

로 하였다. 이 때 절감액은 약 80 (MR)이다.

6. 결론

- (1) 공급예비율 평활화를 목적함수로 하였을 때 보다 총 발전비용을 절감시킬 수 있었다.
- (2) 부하모델 및 발전기 용량모델을 확률적으로 해석하므로써 좀더 현실화 하였다.
- (3) 발전기 보수유지 계획의 목적함수로 확률적 발전비용을 택하므로써 우리나라와 같은 설비용

량이 큰 경우 예비율은 다소 떨어지는 시간대가 있 라도 비용을 절감할 수 있는 보수유지계획 수립에 이용할 수 있음을 밝혔다.

- (4) 공급예비율 평활화를 목적함수로 하였을 때 소요시간이 10 Sec 정도이므로 (PDP-11M 사용) 먼 지 이로써 초기치를 구하도록 하므로써 반복횟수를 1-2회로 할 수 있었다.
- (5) 최적화 해석법으로 이안법을 사용하므로써 기억용량을 대폭줄일 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 송길영 저; "전력계통의 해석 및 운용" 동일 출판사 1984, p. 11-43
- (2) A.J. Wood, B.F. Wollenberg; "Power Generation Operation & Control" John Wiley, & Sons 1984, p. 239-289
- (3) R. Billinton; "Power System Reliability Evaluation" Gordon & Breach, Science Pub, 1970, p. 39-91
- (4) W.R. Christiaanse, A.K. Ralmer; "A Technique for the automated Scheduling of the maintenance of generating facilities" IEEE, PAS-91, Jan/Feb, 1972, pp. 137-144
- (5) L.L. Garver; "Adjusting Maintenance Scheduling to levelize risk" IEEE, PAS-91, Sep/Oct, 1972, pp. 2057-2062
- (6) H.K. Zurn, V.H. Quintana; "Generator Maintenance Scheduling via Successive Approximation Dynamic Programming" IEEE, PAS-94, Mar/Apr, 1975, pp. 665-671
- (7) J.F. Dopazo, H.M. Merrill; "Optimal generator maintenance Scheduling using integer programming" IEEE, PAS-94, Sep/Oct, 1975, pp. 1537-1545
- (8) H.H. Zurn, V.H. Quintana; "Several Objective Criteria For optimal generator preventive maintenance Scheduling" IEEE, PAS-96, May/Jun, 1977, pp. 984-992
- (9) H. Khatib; "Maintenance scheduling of generating facilities" IEEE, PAS-98, Sep/Oct, 1979, pp. 1604-1607
- (10) Zia, Yamayee, K. Sidenblad, Miki Yoshimura; "A computationally efficient optimal maintenance scheduling method" IEEE, PAS-102, Feb, 1983, p. 330-338