

확률적 운전모델에서의 최적전원보수계획

최 익 권 심 건 보 이 봉 용

홍익 대학교 전기공학과

Optimal Maintenance Scheduling with the Probabilistic Costing Model

Choi Ik-Keoun Shim Keon-Bo Lee Bong-Yong

Hong Ik University Dept. of Electrical Eng.

< Abstract >

Two methods for probabilistic maintenance scheduling are developed and compared; one with operation and supplied-shortage cost and other with risk level of LOLP.

Based on the real economic power dispatch, quadratic optimal maintenance conditions are obtained and simple matrix equations are suggested for solutions.

Both methods are compared in a sample system of 26,000 [MW] peak and 32,000 [MW] generation capacity.

1. 서 론

전력 시스템의 규모가 대형화하고 복잡화되어 값에 따라 수용가에 게 저렴한 비용으로 고 신뢰도의 전력을 공급하기 위한 시스템의 여러 가지 운용계획이 수립되고 있다. 이러한 계획중에서 전원의 최적 보수계획 또한, 전력시스템의 운용계획 및 전원개발계획 중에서도 중요한 분야중의 하나이다.

각 전원은 매년 일정기간동안 보수를 해야만 하며, 이 보수기간 동안은 발전기 운전을 못하게 되어 전원출력이 감소하게 된다. 따라서, 전원의 보수기간을 어떻게 효율적으로 배분하느냐에 따라 연간운전비용과 신뢰도의 많은 차이를 나타내게 되어 전원의 적정보수율의 결정이 중요한 문제가 된다.

전원의 보수계획문제는 제약조건을 포함하는 최적화의 문제로서, 이 문제의 해결을 위해서는 수리계획법(Mathematical programming)이 가장 적합하다. 따라서 정수 계획법(Integer programming)[1] ~ [3], 동적 계획법(Dynamic programming)[4] ~ [6] 등에 의한 모델들이 발표되고 있으며, 일반적으로 전원 보수계획 문제에서 전원 설비의 총 운전비용 최소화하는 모델[1], [3], [7] 과 시스템의 신뢰도를 최대화하는 모델[8] ~ [10] 이 있으나, 신뢰도에 대한 목적함수는 어떤 수준보다 높은 신뢰도를 유지하는 제약조건으로 사용되는 경우가 있다. 신뢰도에 대한 방법으로는 결정론적 방법 [1] ~ [3], [8], [9] 과 확률론적 방법 [6], [7], [9], [10] 이 있을 수 있으나, 전원 보수계획문제는 부하의 불확실성과 전원의 고장정지를 포함하는 관계로 확률론적 방법이 적합하다.

본 연구에서는 전원 보수계획문제에 대하여 정밀한 확률적 운전비모델을 이용해서 공급지장비를 도입하여 총운전비용을 최소화하는 모델과 위험부담지수를 도입하여 총운전비용을 최소화하는 모델을 정식화하였으며, 최적 보수량 결정에 있어서 간단한 2 차식의 계산식을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 알고리즘을 표준 시스템에 적용한 결과 단 1 회의 계산으로 최적보수량을 결정할 수 있었다.

2. 경제부하배분의 개요

전력시스템에서 확률적 문제로서의 경제 부하배분 문제는 다음과 같이 요약된다.

$$\min_{P_i, \dots, P_N} F_T = \sum_{i=1}^N [a_i + b_i P_i + c_i P_i^2] + \beta Z_d + \gamma Z_s$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^N P_i + Z_d = P_D \quad (1)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$$

- 단, P_i : i 전원의 출력
- N : 시스템의 전원수
- a_i, b_i, c_i : i 전원의 연료비계수
- Z_d : 공급지장전력
- β, γ : 공급지장비계수
- P_i^{\min}, P_i^{\max} : i 전원 출력의 상하한
- P : 시스템 부하

식 (1) 을 만족하는 각 전원의 출력은 다음과 같다.

$$P_i = \frac{1}{2 c_i} (\lambda - b_i), \quad i=1, \dots, N \quad (2)$$

단, λ : 시스템의 증분연료비

3. 보수율을 고려한 확률적 운전출력의 개요

임의의 개별전원이 운전-정지라는 두 상태로 모델화 될 때, 실제의 시스템 상태에 부응하는 경제 운전의 경우를 그림 1 과 같이 나타낼 수 있다[11].

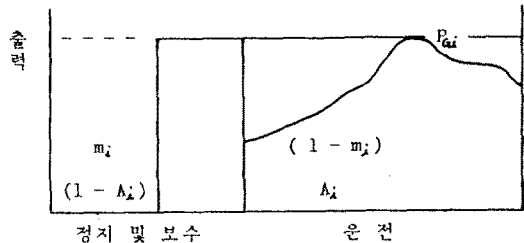


그림 1. 보수율을 고려한 운전중의 출력변화

각 전원은 보수를 하는 일정기간 동안은 운전을 할 수 없으므로 전원정지의 상태가 되고, 운전상태에서도 가용도(Availability) 만큼만 확률적으로 운전된다.

그러한 운전상태는 그림 1. 에서처럼 전원보수 공간과 가용도 공간의 결합으로 표현이 가능하다. 따라서, 각 전원은 다음과 같은 확률모델로 운전하게 된다.

$$P_{qi} = \begin{cases} A_i (1 - m_i) P_{qi}^{\max} \\ [1 - A_i (1 - m_i)] P_{qi}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

단, P_{qi} : i 전원의 출력
 A_i : i 전원의 가용도
 m_i : i 전원의 보수율

N 대의 전원이 P_D 이라는 부하를 만족시키는

$$\sum_{i=1}^N P_{qi} = P_D \quad (4)$$

인 경우를 생각하자. N 대의 전원시스템에서 정지의 크기는 정규분포로 표시될 수 있다는 점으로부터, 그 크기의 기대값과 분산은 다음과 같다.

$$\bar{P}_{out} = \sum_{i=1}^N [1 - A_i (1 - m_i)] P_{qi} \quad (5)$$

$$\sigma_{out}^2 = \sum_{i=1}^N A_i (1 - m_i) [1 - A_i (1 - m_i)] P_{qi}^2 \quad (6)$$

단, \bar{P}_{out} : 정지크기의 기대값
 σ_{out}^2 : 정지크기의 분산

4. 공급지장비 도입에 의한 최적보수율 결정

최적전원보수율 결정은 총 운전비를 최소로 하는 관점에서 고려되어야 한다. 총운전비는 연료비와 공급지장비의 두 요소를 갖고 있으며, 각 전원별 연간 보수율을 만족해야 하는 최적화의 문제이다. 전원이 운전-정지라는 두 상태를 가지므로 식 (3) 과 같이 확률적으로 출력 배분에 참여한다. 확률분포를 정규분포의 이산화 분포로 처리를 한다면 다음의 식으로 최적보수율 문제가 정식화된다.

$$\min \bar{F}_T = \sum_{s,t,i,k}^{S,T,K} A_i (1 - m_i) Pr^A f_i^{S,t,k} + \sum_{s,t,i,k}^{S,T,K} Pr^A Z_d^{S,t,k} + \sum_{s,t,i,k}^{S,T,K} Pr^A Z_d^{S,t,k} \quad (7)$$

$$\text{subject to } \sum_{s,t}^{S,T} P_D^{s,t} + \sum_{s,t,k}^{S,T,K} Pr^A Z_d^{S,t,k} = \sum_{s,t,i,k}^{S,T,K} P_{qi}^{s,t,k} \quad (8)$$

$$\sum_s m_i^s = M_i \quad (9)$$

$$m_i^{\min} \leq m_i^s \leq m_i^{\max} \quad (10)$$

$$\text{단, } f_i^{S,t,k} = \sum_{l=1}^L \{a_l + b_l P_{qi}^l + c_l B[P_{qi}^l]\} Pr^A \quad (11)$$

$$P_{qi}^{S,t,k} = A_i (1 - m_i) \sum_{l=1}^L Pr^A (P_{qi}^l) \quad (12)$$

$$Z_d^{S,t,k} = \sum_{l=1}^L Pr^A Z_d^{S,t,k,l} \quad (13)$$

S : 분기의 수

T : 시간대의 수

m_i^{\max}, m_i^{\min} : i 전원보수율의 상하한

식 (7) 을 최적화하기 위해 라그랑지 (Lagrange) 비정계수를 도입하여 부등호 제약조건식은 별도로 처리한다고 보면 새로운 목적함수를 다음과 같이 확장된다.

$$\min_{m_i^s} L = \bar{F}_T + \lambda \left\{ \sum_{s,t}^{S,T} P_D^{s,t} + \sum_{s,t,k}^{S,T,K} Pr^A Z_d^{S,t,k} - \sum_{s,t,i,k}^{S,T,K} P_{qi}^{s,t,k} \right\} - \sum_s \mu_i^s (m_i^s - M_i) \quad (14)$$

따라서, 새로운 목적함수 L 이 최소화되기 위한 필요조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial m_i^s} = \frac{\partial \bar{F}_T}{\partial m_i^s} - \mu_i^s = 0 \quad (15)$$

즉,

$$\frac{\partial L}{\partial m_i^s} = \frac{\partial L}{\partial m_i^s} = \dots = \frac{\partial L}{\partial m_i^s}$$

위와 같이 매 분기의 증분보수비용이 같을 때, 최적의 보수율이 되며 총운전비도 최소화가 된다. 식 (15) 의 최적화조건으로부터

$$\frac{\partial L}{\partial m_i^s} = H (m_i^s)^0 = C_0 + C_1 (m_i^s) + C_2 (m_i^s)^2 \quad (16)$$

인 보수율 m_i 에 대한 2차 연립방정식을 얻을 수 있다.

5. 위험부담지수에 의한 최적보수율 결정

공급지장비를 도입하는 목적함수와 마찬가지로 연간 총운전비를 최소화하는 것으로서, 총운전비는 연료비와 위험부담지수 (LOLP) 에 대한 비용의 두 요소를 갖고 있다. 각 전원별 연간 보수율조건을 만족하면서 총운전비를 최소화하는 최적화의 문제이다. 따라서 확률적으로 존재하는 위험부담지수에 의한 최적보수율 결정모델을 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\min F_T = \sum_{s,t,i,k}^{S,T,K} A_i (1 - m_i^s) Pr^A f_i^{S,t,k} + \frac{1}{2} \sum_s \mu_s [LOLP(m_i^s) - LOLP^{Risk}]^2 \quad (17)$$

$$\text{subject to } \sum_{s,t}^{S,T} P_D^{s,t} + \sum_{s,t,k}^{S,T,K} Pr^A Z_d^{S,t,k} = \sum_{s,t,i,k}^{S,T,K} P_{qi}^{s,t,k} \quad (18)$$

$$\sum_s m_i^s = M_i \quad (19)$$

$$m_i^{\min} \leq m_i^s \leq m_i^{\max} \quad (20)$$

단, LOLP^{fix}: 기준의 위험부담지수

$$LOLP(m_1^s) = 0.5 + \int_{-\infty}^M \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (21)$$

$$M = \frac{\bar{P}_{DS} - \bar{G}_s}{\sigma_{ES}} \quad (22)$$

$$\sigma_{ES}^2 = \sigma_{PS}^2 + \sigma_{GS}^2 \quad (23)$$

G_s: s 분기의 전원설비 용량

식 (15)의 최적화조건으로부터 다음의 보수를 갖에 대한 2 차 연립 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial m_1^s} &= H^*(m_1^s) \\ &= C_0 + C_1(m_1^s) + C_2(m_1^s)^2 \end{aligned} \quad (24)$$

6. 사례 연구

본 연구에서 제시된 전원 최적 보수율 결정방법의 효용성을 입증하기 위하여 BPRI 시스템을 표본시스템으로 선택하였다. BPRI 시스템의 특성을 요약한 것이 표 1로서 전원공은 원자력, 석탄, 석유 및 터빈의는 4 군으로 구성되어 있으며, 발전기 174대로 총설비는 32000 [MW] 규모이다. 또한 표본시스템의 보수입력자료와 부하자료를 표 2 와 3 에 각각 나타냈다.

< 표 1 > 표본 시스템의 전원특성

전원공	대 수	용량	최소 출력	연 료 비 계 수			가동율
				상수	1 차 항	2 차 항	
1	6	1200	1200	0.0	7.4566038	0.00037283	0.85
	1	800	800	0.0	7.6000000	0.00038000	0.85
2	2	800	320	0.0	13.0471595	0.00410855	0.76
	3	600	150	0.0	13.5028683	0.00503522	0.79
	5	400	100	0.0	14.5017023	0.00625574	0.87
	33	200	50	0.0	13.0012402	0.02305380	0.92
3	1	800	320	0.0	19.3267877	0.01565277	0.76
	3	600	150	0.0	22.7045754	0.01611571	0.79
	2	400	100	0.0	28.7953738	0.01067156	0.87
	23	200	50	0.0	33.4571262	0.00382415	0.92
4	96	50	0.0	0.0	60.6901455	0.01537090	0.76

< 표 2 > 표본시스템의 전원보수입력자료

전원	년간 보수일	분기별 최대 보수율 [p.u.]	분기별 최소 보수율 [p.u.]
1	65	0.17808	0.0
	65	0.17808	0.0
2	50	0.13698	0.0
	45	0.12328	0.0
	45	0.12328	0.0
	45	0.12328	0.0
3	40	0.10958	0.0
	35	0.09589	0.0
	35	0.09589	0.0
	35	0.09589	0.0
4	20	0.05479	0.0

< 표 3 > 표본 시스템의 부하자료

시간대		1	2	3	4	5	6	7
부하의기대값	1	23255.1	22036.9	20740.6	18923.3	15809.9	14778.4	14415.3
	2	23952.8	22698.0	21362.8	19491.0	16284.2	15221.8	14847.8
	3	24671.3	23378.9	22003.7	20075.7	16772.7	15678.4	15293.2
	4	25411.5	24080.3	22663.8	20678.0	17275.9	16148.8	15752.0
표준편차 [p.u.]		0.14140	0.15706	0.15360	0.14940	0.09337	0.07937	0.07399
지속 시간		1	8	3	5	2	3	2

표본시스템에 대하여 공급지장비를 도입한 경우의 최적 보수율과 위험부담지수에 의한 최적 보수율의 결과를 비교한 것이 표 4로서 부하의 수준이 낮은 1 분기에서 전체적으로 높은 보수율이 나타났으며, 부하의 수준이 높은 4 분기에서는 전전원의 보수율이

모두 0 으로 나타나는 특성을 보이고 있다. 이 두 모델의 총운전비를 비교해 본 결과, 공급지장비모델이 3,224,640 [K\$] 로, 위험부담지수모델이 3,225,590 [K\$]의 운전비를 보이고 있어서 두 모델 모두 충분히 최적화를 달성할 수 있는 모델임이 입증되었다.

< 표 4 > 보수율과 총운전비의 결과

방법 분기	공급지장비 도입 모델				위험부담지수 모델			
	1	2	3	4	1	2	3	4
원자력 원자력	0.079618	0.062796	0.035668	0.0	0.074740	0.063346	0.039996	0.0
	0.079582	0.062798	0.035702	0.0	0.083302	0.062762	0.032018	0.0
석탄 석탄 석탄 석탄	0.063781	0.047610	0.025596	0.0	0.067631	0.046958	0.022397	0.0
	0.057801	0.042705	0.022781	0.0	0.061018	0.042236	0.020033	0.0
	0.059264	0.042228	0.021796	0.0	0.061672	0.042073	0.019542	0.0
	0.059997	0.041892	0.021398	0.0	0.061698	0.042130	0.019459	0.0
석유 석유 석유 석유	0.050133	0.038380	0.021076	0.0	0.054047	0.037602	0.017939	0.0
	0.044603	0.033938	0.017349	0.0	0.048665	0.033192	0.014034	0.0
	0.046112	0.034865	0.014913	0.0	0.051065	0.034036	0.010790	0.0
	0.047203	0.031559	0.017128	0.0	0.053832	0.029433	0.012625	0.0
터어번	0.026087	0.017825	0.010883	0.0	0.026087	0.017825	0.010883	0.0
총운전비	3,224,640 [K\$]				3,225,590 [K\$]			

7. 결 론

본 연구에서는 확률적 전원보수계획의 최적화문제에 대하여 공급지장비를 도입하는 모델과 위험부담지수를 사용하는 모델을 개발하였으며, 사례연구를 통하여 본 알고리즘의 효용성을 검토하였다. 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실 경제부하배분에 의한 확률적 운전시물레이션에 대한 최적 전원보수계획의 두 모델, 공급지장비를 도입하는 경우와 LOLP 위험부담지수를 사용한 모델을 개발하였다.
2. 최적 보수계획을 위한 최적조건으로부터 보수량에 대한 2 차 연립방정식을 얻었으며, 효율적인 해를 위한 행렬방정식을 제시하였다.
3. 검토된 표준시스템에서 두 방법 모두 해의 유효함이 입증되었으며, 거의 동일한 결과를 얻었다.
4. 전원개발계획을 위한 보수계획의 결정에서 개발된 모델의 활용이 기대된다.

< 참고 문헌 >

1. J. F. Dopazo, H. M. Merrill, "Optimal Generator Maintenance Scheduling Using IP", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-94, pp. 1537~1545, 1975.
2. P. L. Kingston, S. L. Lipton, et. al., "Mixed Integer Programming Models for Generator Maintenance Scheduling", presented at ORSA / TIMS Joint National Meeting, Oklahoma City, Oklahoma, 1976.
3. H. M. Merrill, "Power Plant Maintenance Scheduling with Integer Programming", IEEE Tutorial Text, 76 CH 1107-2-PWR, pp. 44~51, 1975.
4. R. E. Larson, "Application of Dynamic Programming to Planning and Scheduling Energy Systems", Proceedings of Conference on Decision and Control, 1976.
5. H. M. Wagner, et. al., "Preventative Maintenance Scheduling by Mathematical Programming", Management Science, Vol. 10, no. 2, pp. 316~334, 1964.
6. U. H. Zurn, V. H. Quintana, "Generator Maintenance Scheduling via Successive Approximation Dynamic Programming", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-94, pp. 665~671, 1975.
7. K. Hara, M. Kimura, N. Honda, "A Method for Planning Economic Unit Commitment and Maintenance of Thermal Power Systems", ibid., Vol. PAS-85, no. 5, pp. 427~436, 1966.
8. W. R. Christiaanse, A. H. Palmer, "A Technique for the Automated Scheduling of the Maintenance of Generating Facilities", ibid., Vol. PAS-91, no. 1, pp. 137~144, 1972.
9. L. L. Garver, "Adjusting Maintenance Schedules to Levelize Risk", ibid., Vol. PAS-91, no. 5, pp. 2057~2063, 1972.
10. J. P. Stremel, R. T. Jenkins, "Maintenance Scheduling Under Uncertainty", Paper 80 SM 528-0, IEEE-PES Summer Meeting, Minneapolis, Minnesota, July 21-23, 1980.
11. 이 봉용, 심 건보, "경제급전 방식에 의한 확률적 화력운전비 시물레이션 모델", 흥대논총 제 19 집, pp. 237~251, 1987.