

경제급전방식에 의한 확률적 운전비 계산 모델

\*  
심 건보 이 봉용 신 중빈 김 정훈

홍익대학교 홍익대학교 한전연구원 홍익대학교

Probabilistic Production Costing Model based on Economic Load Dispatch

\*  
Shim, Keon-Bo Lee, Bong-Yong Shin, Chung-Rin Kim, Jung-Hoon

Hong-Ik Univ. Hong-Ik Univ. KECO Res.Center Hong-Ik Univ.

< Abstract >

A probabilistic production costing model based on the economic load dispatch has been developed. Objective function is composed of fuel cost which is a function of generation output and the failure cost. Coefficients of the failure cost is determined from the known equivalent generation cost.

The model is compared with other existing methodologies and the excellent results are obtained.

1. 서 론

전력 시스템의 장, 단기 운용 및 계획을 위하여 확률적 운전비의 길잡이 필수적인요건이 되고 있으며, 이 분야의 연구는 H. Baleriaux [ 1 ]가 시작한 이래, Booth et.al 에 의한 모델 [ 2 ], WASP Package [ 3 ], EPRI 모델 [ 4 ] 및 Cumulant 법에 의한 모델 [ 5 ] 과 프랑스의 MNI 모델에서 사용되고 있는 수치적 모델 [ 6 ], 그리고 최근에 발표된 해석함수에 의한 효율적 모델 [ 7 ] 과 EIGC 법 [ 8 ] 등이 개발되어 사용되고 있다.

- 이들 모델들은 모두 기본적으로 평균 연료비를 사용하고 있으며,
- 전원의 출력이 영 (Zero)에서부터 최대출력까지 연속적으로 변한다.

는 전제 조건을 가지고 있다. 그러나 실제 시스템의 연료비는 출력의 함수임이 익히 잘 알려져 있으며, 또 어떠한 전전도 영이 아닌 최소출력이상에서만 운전이 가능하다는 점 또한 충분히 인식되고 있다.

본 연구에서는 이러한 점을 충분히 반영하여  
- 전원 출력의 함수인 연료비를 도입하고,  
- 최소출력도 실제의 값을 사용하는  
- 실제의 경제 운전 상태로의 확률적 운전비 계산 모델을 개발하였으며, 그 효용성을 입증하기 위하여 사례 연구를 통한 기존의 다른 방법과 비교하였다.

2. 운전비 모델의 정식화

입의의 개별 전원인 운전 - 정지라는 두 상태도 모델화할 때의 출력은

$$P_i = \begin{cases} m_i \cdot G_i & \text{with probability of } A_i \\ 0 & \text{with probability of } 1 - A_i \end{cases} \quad (1)$$

단,  $m_i$  :  $i$  전원의 이용률  $0 \leq m_i \leq 1$   
 $G_i$  :  $i$  전원의 용량

처럼 표시된다.

전 시스템의 운전비와 제약 조건은 다음과 같이 정의된다.

$$F = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) + \beta Z_d + \gamma Z^2 \quad (2)$$

단,  $a_i, b_i, c_i$  :  $i$  전원의 운전비 계수  
 $\beta, \gamma$  : 공급 지장비 계수  
 $Z_d$  : 공급 지장 전력  
 $R$  : 수요 (확정 수요)

전원인 운전 및 정지라는 두 상태를 갖으므로 식 (2) 는 확률적으로 존재한다. 따라서 그 기대치를 취하면

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i \bar{P}_i + c_i E(P_i^2)) + \beta \bar{Z}_d + \gamma E(Z^2) \quad (3)$$

와 같이 바꾸어 표시할 수 있다. 그런데

$$\bar{P}_i = m_i A_i G_i \quad (4)$$

$$E(P_i^2) = A_i (m_i G_i)^2 + (1 - A_i) \cdot 0^2 = A_i m_i^2 G_i^2 \quad (5)$$

이고, 공급지장 전력을 결정하기 위하여 확률적 전원 가능출력이 정규분포로 근사화될 수 있다는 점 [ 6 ], [ 7 ] 으로부터

$$Z = P_R - y \quad (6)$$

단,  $y$  : 전원 가능 출력 인 값을 생각한다. 그러면

$$Z_d = Z \geq 0 \quad (7)$$

인 상태가 공급지장 상태이며,

$$\bar{Z}_d = \int_{P_R}^{\infty} z f_z(z) dz = \bar{Z} \cdot \text{LOLP} + \frac{\sigma_y}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\bar{Z}^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (8)$$

$$\text{LOLP} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} \int_{P_R}^{\infty} f_z(z) dz \quad (9)$$

$$E(Z^2) = \int_{P_R}^{\infty} z^2 f_z(z) dz = \bar{Z} \bar{Z}_d + \sigma_y^2 \cdot \text{LOLP} \quad (10)$$

을 얻는다.

식 (4) - (10)을 식 (3) 에 대입하여 정리하면

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i m_i A_i G_i + c_i A_i m_i^2 G_i^2) + \beta \bar{Z}_d + \gamma (\bar{Z} \bar{Z}_d + \sigma_y^2 \cdot \text{LOLP}) \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n m_i A_i G_i + \bar{Z}_d = P_R$$

와 같이 운전비 모델을 정식화할 수 있다.

3. 최적 운전비의 결정

식 (11) 은  $m_i$  에 대하여 비용 최소화가 달성될 수 있으므로 새로운 목적 함수를

$$L = \bar{F} - \lambda (\sum_{i=1}^m m_i A_i G_i + \bar{z}_d - P_R) \quad (12)$$

와 같이 정의하고,  $m_i$  와  $\bar{z}_d$  에 대한 최소 필요조건으로부터

$$\frac{\partial L}{\partial m_i} - \lambda A_i G_i = 0, \quad i=1, \dots, m$$

$$\frac{\partial L}{\partial \bar{z}_d} - \lambda = 0 \quad (13)$$

을 얻으며, 다시 정리해서

$$b_i + \lambda A_i G_i - \lambda = 0 \quad (13)'$$

$$\beta + \lambda \bar{z}_d - \lambda = 0$$

가 된다.

식 (13) 으로부터

$$\lambda = \beta + \lambda \bar{z}_d = \beta + \gamma (P_R - \bar{y}) \quad (14)$$

$$m_i = \frac{1}{\lambda A_i G_i} (\lambda - b_i) \quad (15)$$

가 결정되며, 결국

$$P_i = m_i A_i G_i \quad (16)$$

인 최적 출력이 결정된다.

이 때 전력 수요에 상응하는 운전점을 결정하기 위하여 각 전원의 우선 순위가 결정되어야 하는데, 이것은 최적 출력이 결정되면 운전비가 결정될 수 있고, 따라서 운전 단가가 가장 작은 전원부터 투입이 된다.

$$\text{우선 순위} = \min \left( \frac{f_1}{P_1}, \dots, \frac{f_m}{P_m} \right) \quad (17)$$

식 (14) 에서 단일 전력 수요  $P_R$  이 확률분포를 갖는다면  $\lambda$  도 역시 확률분포를 갖을 것이며, 식 (15) 에서  $m_i$  가 결정되어 식 (16) 으로부터  $i$  전원 출력  $P_i$  가 부하에 상응하는 확률분포를 갖게될 것이다. 즉,

$$\lambda = \beta + \gamma (P_R - \bar{y})$$

$$m_i = \frac{1}{\lambda A_i G_i} (\lambda - b_i) \quad (18)$$

$$P_i = m_i A_i G_i$$

와 같이 부하의 확률에 상응하는 선형 관계의 식들을 얻게 된다.

식 (14) 에서 특히 강조할 것은  $\lambda$  가 반복계산됨이 없이 공급지장비로부터 단번에 결정이 된다는 점이다.

4. 공급 지장비 계수

부하 수준과 운전비의 관계로부터 공급 지장비 계수가 결정될 수 있다. 시스템의 모든 전원을 하나의 등가 전원으로 생각할 때, 공급지장의 어떤 점에서의 운전비는

$$F = A + B(P + \bar{z}_d) + C(P + \bar{z}_d)^2$$

$$= A + BP + C P^2 + (B + 2CP)\bar{z}_d + C \bar{z}_d^2$$

$$= A + BP + C P^2 + \beta \bar{z}_d + \gamma \bar{z}_d^2 \quad (19)$$

단, A, B, C : 등가 전원에 대한 비용 계수

$$P = \sum G_i$$

처럼 표시되므로

$$\beta = B + 2CP \quad (20)$$

$$\gamma = C$$

임을 알 수 있다.

계수 A, B 및 C 는 임의의 세 운전점으로부터 결정될 수 있다.

5. 사례 연구

본 연구에서 제시한 새로운 확률적 운전비 계산 모델의 효용성을 입증하기 위하여 EPRI 시스템을 대상으로 사례 연구를 수행하였다.

EPRI 시스템의 특성상 요약한 것이 표 1로서, 전원군은 원자력, 석탄, 석유 및 가스 터빈 등의 4 개군으로 분류하였으며, 발전기의 총대수는 174 대로서 총 설비 32,000 [ MW ] 의 규모이다.

< 표 1 > EPRI 시스템의 특성

전원군	발전소 형태	대 수	용 량	최 소 출 력	안 료 비 계 수			가 동 률
					상 수 항	1 차 항	2 차 항	
1	원자력	6	1,200	1,200	0.0	7.4566038	0.00037283	0.85
		1	800	800	0.0	7.6000000	0.00038000	0.85
2	석 탄	1	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	석 유	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	0.926
4	C T	96	50	0	0.0	60.6901455	0.01539709	0.76

그리고, 이 시스템의 부하 자료를 나타낸 것이 표 2 모서 부하지속곡선을 7 구간으로 나눈 이산화형 부하를 사용하였으며, 고찰 대상 기간은 728 [ hr ] 이다.

표 3 에 본 연구의 알고리즘을 사용한 결과와 기존의 다른 방법들의 결과를 비교하였다. 계산 결과는 대략 비슷한 경향을 보이고 있으나, 본 연구에서는 실제의 연료비계수 정보로부터 운전비를 결정하기 때문에 기존의 다른 방법보다도 훨씬 경제적인 운전 이 가능함을 보이고 있다.

< 표 2 > EPRI 시스템의 부하

시 간 대	1	2	3	4	5	6	7
지속시간 [ hr ]	1	8	3	5	2	3	2
부 하 [ MW ]	23,255.1	22,036.9	20,740.6	18,923.3	15,809.9	14,778.4	14,415.3
표준 편차	0.14140	0.15706	0.15360	0.14940	0.09337	0.07937	0.07399

< 표 3 > EPRI 시스템에 대한 계산 결과 비교

고찰 기간 728 [hr ]

		제시된 방법	방 법 I *	방 법 II **	비 고
총 공급에너지 [GWh]		13,977.3	13,902.0	13,943.4	
공급지장에너지 [GWh]		75.95	21.93	45.38	
전력부족확률 [p.u.]		0.0454	0.0333	0.0218	
전 원 단 별 에 너 지 [ GWh ]	원자력	4,950.25	4,950.34	4,950.34	8,000[MW]
	석 탄	6,680.46	6,431.45	6,656.00	11,200[MW]
	석 유	2,124.33	2,240.28	2,091.36	8,000[MW]
	C T	222.27	279.88	245.70	4,800[MW]
총 운 전 비 용 [K\$]		238,580	255,868	252,633	
L D C 의 변칙 [GWh]		13,988.94			

\* : Cumulant Method , \*\* : Analytic Method

6. 결 론

본 연구에서는 경제 급전 방식에 입각한 새로운 확률적 운전비 계산 모델을 제시하였으며, 기존의 다른 방법과 비교하여 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 1) 공급 지장비를 도입하였으며, 그 계수를 등가 발전기의 연료비 정보로부터 쉽게 결정하였다.
- 2) 공급 지장비에 의하여 증분비용이 반복 계산됨이 없이 단번에 결정될 수 있다.
- 3) 증분 비용에 따라서 실제의 경제 운전율 시뮬레이션 시킨 전원 출력이 결정되며, 최소출력도 고려되었다.

4) 기존의 방법인 cumulant법 및 해석적 기법과 비교한 결과

- 공급 에너지는 거의 비슷한 결과를 얻었으며,
- 운전비용은 훨씬 경제적인 값을 얻었다.

5) 제시된 방법은 기존의 어떤 방법보다도 정밀하며, 또한 가장 정확한 운전비 특성을 나타내는 것으로 평가된다.

본 연구에서 제시된 방법은 앞으로 전력 시스템의 운용 및 계획 분야에서 계속 검토 및 활용될 것이며 후속 연구들을 선도하게 될 것이다.

## 〈참고 문헌〉

1. H. Baleriaux, E. Jamouille & Fr. Linard de Guertechin, " Simulation de l'exploitation d'un parc de machines thermiques de production d'electricite' couple a des stations de pompage . ", Review E ( edition SRBE ), Vol. 5, No. 7, pp. 3 - 24, 1967.
2. R. R. Booth, "A Computer Model for the Simulation of Power System Operations. ", Proceeding of the Third Power Systems Computation Conference, Report O. S. I., June, 1969.
3. R. T. Jenkins & D. S. Joy, "WIEN automatic system planning package ( WASP ) - an electric Utility optimal generation expansion planning codes", Oak - Ridge National Lab., pp. 11 - 65 , 1974.
4. B. Manhire , "Probabilistic Simulation of Multiple Energy Storage Devices for Production Cost Calculations.", EPRI Project Report, 1980 .
5. J. P. Stremel, R. T. Jenkins, et.al., " Production Costing Using the Cumulant Method of Representing the Equivalent Load Curve.", IEEE Trans. on PAS , Vol. PAS - 99, pp. 1947 - 1953, 1980.
6. Electricite De France, Computer Program for Model of National Investment , EDF , 1977.
7. Y. M. Park , B. H. Seo , " An Analytic Algorithm to Estimate Expected Generation and Marginal Costs ", Trans. KIEE , Vol. 31, No. 7, pp. 1 - 10, 1982.
8. K. M. Sidenblad, S. T. Y. Lee, " A Probabilistic Production Costing Methodology for Systems with Storage ", IEEE Trans. on PAS , Vol. PAS - 100 , pp. 3116 - 3124, 1981 .