

심 건 보 * 이 봉 용 김 정 훈
홍익 대학교 전기 공학과

A Probabilistic Costing Model
based on The Effective Load and Real Economic Load Dispatch

* Shim, Keon - Bo Lee, Bong - Yong Kim, Jung - Hoon
Hong - Ik University Dep. of Electrical Enginr.

< Abstract >

A new probabilistic production costing simulation model has been developed based on the effective load and economic load dispatch. The best model must be able to simulate the real world exactly and the computing efficiencies are also reasonable. This proposed model is a new concept for the probabilistic production costing simulation model. This model is compared with the available existing ones through two sample systems, and the excellent results are shown.

- 유효 부하의 도입
- 실제의 손전 앙상 시뮬레이션
- 실제의 최적 손전비 결정
에 대한 효과적인 기법을 제시하였고, 기존의 방법들과 결과를 비교 검토하였다.

2. 경제부하 개념의 개요

전력 시스템에서 확정적 문제로서의 경제 부하 배분 문제는 다음과 같이 요약된다.

$$\min_{P_{a1}, \dots, P_{an}} F_T = \sum_{i=1}^n [a_i + b_i P_{a_i} + c_i P_{a_i}^2] + \beta Z_d + \gamma T$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^n P_{a_i} + Z_d = P_L \quad (1)$$

$$P_{a_i}^{min} \leq P_{a_i} \leq P_{a_i}^{max}$$

1. 서 론

전력 시스템의 중단기 연료 계획, 보수 계획, 시스템 운용의 중단기 예측 및 장단기 시스템 계획을 위하여 필수적으로 요구되는 것이 시스템의 손전모형 및 손전비 계산 모델로서, 특히 확률모형이 사용되고 있다.

이 분야의 연구는 1967년에 H. Balerieux[1]가 시작한 이래, 수 많은 결과가 발표되고 있으며, 대표적인 것으로는 Booth et.al.에 의한 모델 [2], 전원 계획용 패키지인 WASP에서 사용되는 MERSIM [3], 미국 전력 연구소의 EPRI 모델 [4], Cumulant 법 [5], 프랑스의 전원 계획용 패키지인 MNI 중의 CRIT 모델 [6], 최근의 해석 함수 모델 [7], EIGC 법 [8], 그리고 본래 - 칼로 시뮬레이션법 [9] 등의 많은 모델들이 제안되어 사용되고 있다.

손전 모델들은 실제의 손전이 시뮬레이션 되었을 때 가장 좋은 모델임이 자명하나, 계산의 효율성 때문에 실제의 손전 양상이 간이화되는 것이 일반적이다. 그림 1.에서 A는 손전의 손전 모델에서 채택하고 있는 손전 - 정지의 두 상태 모델을 보인 것으로서
- 전원 출력이 영 또는 최대 출력으로 손전되며
- 정지 연료비 만가를 적용한다.
는 것을 기본적인 전제조건으로 하고 있다.

그러나 실제의 손전이 이와 같지 않음은 명백한 것이며, 이와 대한 개선술 시도한 것이 B인데, B는 손전중의 출력변화기대치를 사용한 것으로서 손전의 모델보다 진일보한 성과를 보였다 [10]. 그러나 실제의 손전은 C와 같으며, 이와 같은 손전 특성은 다른 손전의 영향을 받아서 결정되고, 전원 손전출력의 모델가장한 경우를 생각해야만 얻을 수 있는 것이다. 오직 본래 - 칼로 시뮬레이션만이 이러한 역활을 수행할 수 있을 뿐이지만, 이 방법은 계산의 효율성이 크게 문제가 된다.

본 연구에서는 실제의 손전 양상인 C의 계획에 대한 손전 시뮬레이션에 성공하였는 바,

- 단, P_{a_i} : i 전원의 출력, $i = 1, \dots, n$
- a_i, b_i, c_i : i 전원의 연료비 계수
- Z_d : 공급 지장 전력
- β, γ : 공급 지장비 계수
- $P_{a_i}^{min}, P_{a_i}^{max}$: i 전원 출력의 상하한
- P_L : 시스템 부하

식 (1) 을 만족하는 각 전원의 출력은 다음과 같다.

$$P_{a_i} = \frac{1}{2 c_i} (\lambda - b_i), \quad i=1, \dots, n \quad (2)$$

단, λ : 시스템의 중본 연료비

3. 유효 부하의 개념

본 연구에서는 손전의 유효부하 개념을 보다 더 일반화시켰다. n 대의 전원이 부하 P_L 을 만족시키는

$$\sum_{i=1}^n P_{a_i} = P_L \quad (3)$$

인 경우를 생각한다. 전원이 손전-정지의 두 상태인 확률적으로 손전되고 있으므로 i 전원이 정지된다면 i 전원을 제외한 n-1 대의 전원이 P_L 을 담당해야 한다. 그런데 전원 정지의 모든 경우는 $2^n - 1$ 보서 $n = 100$ 이라면 $1.27 \times 10^{30} - 1$ 인 방대한 경우가 발생되어, 도저히 개별 경우를 모두 다룰 수는 없다. 그러나, n 개의 확률변수가 하나의 집합으로 다루어질 때 그 확률분포는 이항 분포로 표시될 수 있으며, n의 값이 큰 경우에 이항 분포는 정규 분포로 근사화될 수 있다는 점은 익히 잘 알려져 있는 사실이다. 즉, n 대의 전원 시스템에서 정지의 크기는 정규 분포로 표시될 수 있으며, 그 크기의 기대치와 분산은 다음과 같다.

$$\bar{F}_{OUT} = \sum_{i=1}^n (1 - A_i) P_{Ai} \quad (4)$$

$$G_{OUT}^2 = \sum_{i=1}^n A_i (1 - A_i) P_{Ai}^2 \quad (5)$$

단, \bar{F}_{OUT} : 장지크기의 기대값
 G_{OUT}^2 : 장지크기의 분산
 A_i : i 전원의 가동률

모든 전원의 장지의 경우마다 경제부하 배분을 구하면 가장 정확할 것이며, 모든 대-관 표시를 해서 산출하는 것보다 그렇게 하고 있으나, 이미 언급된 바와 같이 전원의 수가 많아질수록 전원 장지의 경우를 하나하나 따져보면 그 경우마다의 경제부하 배분은 매우 비효율적이 아닐 수 없다.

본 연구에서는 식 (4) 및 (5)로 표시되는 전원 장지의 확률분포를 이산화시켜서 이산화된 경우마다 경제부하 배분을 하였다. 즉, 정규분포가 12분할의 경우라면 12번의 경제부하 배분으로서 전 전원의 실제 운전양상이 거의 정확히 시뮬레이션된 것이다. 따라서, 본 연구에서 제시된 방법의 효율성은 의심할 여지가 없다.

그러나 이산화된 경우의 경제부하 배분은 유효부하의 개념없이 불가능한 것인바, 이 점에 착안하여 단순한 유효부하 개념에 의한 유효부하의 개념을 도입하였다.

이산화된 경우에 특정 출력 Pr^k 에서 전원 장지의 크기 P_{OUT}^k 가 발생되면 나머지 전원이 출력을 P_{OUT}^k 만큼 더 내어 부하 P_L 를 공급해야 한다. 또는 모든 전원의 장지는 없다고 하고, 부하가 P_{OUT}^k 에 상응하는 만큼 증가되었다고 해도 결과적으로 동일하다. 부하의 증가를 유효부하만큼이 될 것이므로

$$P_{Lk}^k = P_L / (1 - P_{OUT}^k / P_L) \quad (6)$$

단, P_{Lk}^k : 특정 출력에 대한 유효부하

만 유효부하를 n 개의 전원이 공급한다면 P_{Lk}^k 만큼의 전원 장지를 고려한 경우와 같다. 다만 각 전원은 동일한 양을 공급해서 출력을 낼 수만 있어서 다음과 같이 일반화된다.

$$P_{Lk}^k = \begin{cases} P_L / (1 - P_{OUT}^k / P_L), & \text{if } P_{Lk}^k \leq IC \\ P_L + P_{OUT}^k, & \text{if } P_{Lk}^k > IC \end{cases} \quad (7)$$

$$Z_{Lk}^k = P_{Lk}^k - IC, \quad Z_{Lk}^k > IC \quad (8)$$

단, IC : 전 시스템의 실비 용량
 Z_{Lk}^k : P_{OUT}^k 경우의 단위 지장 전력

4. 1 전원의 출력

모든 경우의 전원 장지의 크기 P_{OUT}^k 에 대한 유효부하 P_{Lk}^k 에 대하여, n 개의 전원에 대한 경제부하 배분이 가능하다. P_{OUT}^k 에서 1전원이 출력 때문에 정지한 정도는 확률로서 결정될 수 있으며, 이 때 출력의 기대값, 2차 모멘트 및 운전비의 기대값은 각각 다음과 같이 정리된다.

$$\bar{F}_{Ai}^k = A_i \sum_{k=1}^K Pr^k P_{Ai}^k \quad (9)$$

$$E(P_{Ai}^k) = A_i \sum_{k=1}^K Pr^k (P_{Ai}^k)^2 \quad (10)$$

$$\bar{F}_i = A_i [a_i + b_i \sum_{k=1}^K Pr^k P_{Ai}^k + c_i \sum_{k=1}^K Pr^k (P_{Ai}^k)^2] \quad (11)$$

단, $E(x)$: x의 기대값
 K : 이산화 분할수

5. 확률적 최적 운전비

i 전원의 출력이 임의의 상태에 대하여 결정될 수 있으므로, 특정부하 P_L 를 공급하는 n 대로 구성된 확률적 시스템의 확률적 운전비 최적화 문제는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$E(\min_{P_{Ai}} L) = E(\min_{P_{Ai}} [F_T - (\sum_{i=1}^n P_{Ai} + Z_d - P_L)]) \\ = E(\sum_{i=1}^n [a_i + b_i P_{Ai}^* + c_i (P_{Ai}^*)^2] + \beta Z_d^* + \gamma (Z_d^*) - \lambda [\sum_{i=1}^n P_{Ai}^* + Z_d^* - P_L]) \\ = \sum_{i=1}^n A_i [a_i + b_i \sum_{k=1}^K Pr^k P_{Ai}^k + c_i \sum_{k=1}^K Pr^k (P_{Ai}^k)^2 - \beta \sum_{k=1}^K Pr^k Z_d^k - \gamma \sum_{k=1}^K Pr^k (Z_d^k)^2] \quad (12)$$

단, X : X 값의 최적값

식 (12)에서 P를 구하기 위하여 유효부하의 개념이 사용되었으며, 정규분포의 이산화 분할수 K와 전원의 경제부하 배분이 수행되며 정규분포의 이산화에 의한 오차가 존재할 뿐으로 정밀한 모델임을 알 수 있다.

6. 사례 연구

본 연구에서 제안된 확률적 최적 운전비 모델의 효용성을 입증하기 위하여 두 시스템, 즉 EPRI 시스템 [11] 과 KEPCO 시스템 [11]을 표준시스템으로 하였다. EPRI 시스템의 특성을 보인 것이 표 1.로서, 전원은 큰 원자력, 석탄, 석유 및 가스 터빈 중의 4군이며, 174 대의 전원으로 총설비 32,000 [MW]의 규모이다. 또한 KEPCO 시스템은 표 2.에 보인는데, 6군의 전원 65 대, 15,497 [MW]의 규모이다.

각 시스템의 부하자료가 표 3. 및 표 4.에 제시되었으며, 이산형 부하지속 곡선이 사용되었다. 대상 기간은 EPRI 시스템의 경우에 728 [hr], KEPCO 시스템은 2,208 [hr]이다.

표 5. 및 표 6.은 기존의 모델과 본 연구에서 제안된 모델의 계산 결과를 비교한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 제안된 모델의 경제부하 배분 효과가 반영되어서 공급여지라는 비슷하였으며, 총 운전비용도 경제성을 달성하고 있으나 상위전원의 출력이 증가되는 경향을 보이고 있다.

7. 결 론

실제 시스템 운전양상을 시뮬레이션할 수 있는 확률적 운전비 계산모델을 제시하였으며, 기존의 어떤 모델보다도 높은 정밀도가 입증되었으며, 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) 실제의 시스템 운전양상을 시뮬레이션할 수 있는 - 전원 장지 확률의 정규분포 근사화.
 - 유효부하의 개념 정립
- 이라는 방법론을 제시하였다.

2) 제시된 모델은 기존의 어떤 모델보다도 실제의 경제 운전이 장려되어 있으며, 그러면서도 계산의 효율성을 유지하고 있다.

3) 기존의 모델결과 비교한 결과

- 공급 에너지는 거의 비슷하고,
- 총 운전비용도 경제적이었으나,
- 상위권전원의 출력이 증가되는 경향을 보이고 있다.

그러나, 제시된 모델은 실제의 경제운전 양상으로의 한 것이므로 그 결과가 보다 정밀한 것으로 평가된다.

본 연구에서 제시된 계산모델의 활용에 의하여 연안부 수전비 계산모델의 결과와 기존 모델결과와의 차이를 보일 것이며 보다 실제의 운전 양상에 근접한 결과를 얻을 것으로 전망된다.

< 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. Electrcite 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.
9. C. Dechamps, R. Nuytten, S. T. Lee, "Optimal Operation of Storage Devices in a Power System.", Presented at the 1980 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Paper No. A80 085 - 1.
10. 이 봉용, 심건보 외, "경제급전 방식에 의한 폭률적 운전비 계산 모델", 1987년도 전기 전자 공학 학술대회 논문집(I), pp. 640 - 643, 1987. 7.
11. B. Y. Lee, "Long-term Generation Planning including Pumped - Storage Operation.", Ph. D. Thesis, Seoul National University, 1984.

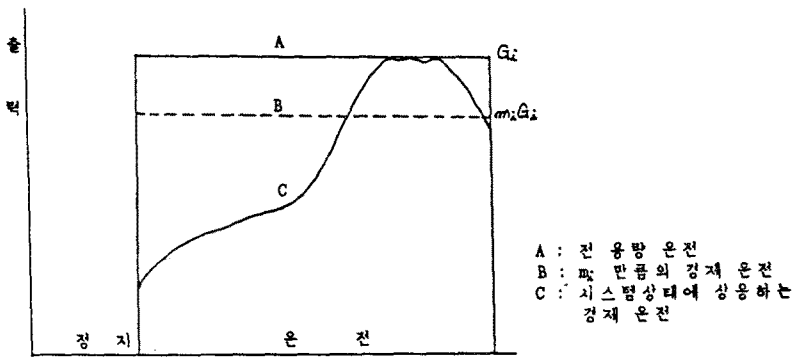


그림 1. 운전 - 정지의 두 상태 모델

< 표 1 > EPRI 시스템의 특성

전원단	발전소 형태	대 수	용 량	최 소 출 력	연 료 비 계 수			가 동 률
					상 수 량	1 차 량	2 차 량	
1	원자력 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	석탄 석탄 석탄 석탄	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	석유 석유 석유 석유	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	터어빈	96	50	0	0.0	60.6901455	0.01539709	0.76

유효부하 및 실 급전방식을 이용한 확률적 운전비 계산

< 표 2 > KEPCO 시스템의 특성

전원근	발전소 명	대 수	용 량	최 소 출 력	연 로 비 계 수			가 동 률
					상 수 평	1 차 평	2 차 평	
1	원자력	1	587	587	0.0	7.085054	0.0003543	0.670164
	원자력	1	650	650	0.0	7.063438	0.0003532	0.670164
	원자력	1	679	679	0.0	7.053533	0.0003527	0.670164
	원자력	2	950	950	0.0	6.962291	0.0003481	0.670164
	원자력	1	900	900	0.0	6.978947	0.0034894	0.670164
2	유연탄	4	500	180	0.0	21.860564	0.0078589	0.753973
	유연탄	2	560	200	0.0	21.334785	0.0079557	0.753973
3	무연탄	1	50	20	0.0	39.966564	0.0708687	0.798356
	무연탄	1	75	30	0.0	32.874083	0.1418122	0.798356
	무연탄	1	125	40	0.0	39.510096	0.0319992	0.798356
	무연탄	3	200	50	0.0	38.101159	0.0270442	0.798356
4	석유	3	10	3	0.0	53.903541	0.3126459	0.754227
	석유	2	250	60	0.0	52.193848	0.0193446	0.754227
	석유	2	162	40	0.0	39.911869	0.0056675	0.754227
	석유	2	250	80	0.0	52.193849	0.0193446	0.754227
	석유	2	325	100	0.0	54.988219	0.0062824	0.754227
	석유	1	250	80	0.0	52.993849	0.0193446	0.754227
	석유	1	200	50	0.0	49.940453	0.0354477	0.754227
	석유	3	200	50	0.0	49.940453	0.0354477	0.754227
	석유	1	137	40	0.0	51.334342	0.0415741	0.754227
	석유	4	350	90	0.0	54.597229	0.0069508	0.754227
	석유	3	400	100	0.0	52.686134	0.0108597	0.754227
	5	C / C	1	320	50	0.0	78.742109	0.0100247
C / C		2	300	50	0.0	79.234246	0.0090525	0.828493
6	터어빈	20	5	0	0.0	108.362631	0.0274938	0.907397

< 표 3 > 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
표준편차 [p.u]	0.14140	0.15706	0.15360	0.14940	0.09337	0.07937	0.07399

< 표 4 > KEPCO 시스템의 부하

시 간 대	1	2	3	4	5	6	7
지속시간 [hr]	1	3	5	7	5	2	1
부 하 [MW]	7,637.8	7,325.9	6,802.7	6,658.6	5,727.3	5,354.2	5,283.5
표준편차 [p.u]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

< 표 5 > EPRI 시스템에 대한 계산 결과 비교

고찰 기간 728 [hr]

		방법 I *	방법 II **	제시된 방법	비 고
총 공급에너지 [GWh]		13,943.4	13,908.6	13,950.1	
공급시장에너지 [GWh]		45.38	75.95	37.89	
전력부족확률 [p.u.]		0.0218	0.0454	0.0307	
전 원 공 급 에 너지 [GWh]	원자력	4,950.34	4,950.25	4,950.35	8,000[MW]
	석탄	6,656.00	6,656.03	6,092.95	11,200[MW]
	석유	2,091.36	2,082.51	2,644.07	8,000[MW]
	터어빈	245.70	219.79	262.79	4,800[MW]
총 운 전 비 용 [K\$]		252,633	236,466	243,046	
L D C 의 편적 [GWh]		13,988.94			

* : Analytic Method , ** : Approximate Method

< 표 6 > KEPCO 시스템에 대한 계산 결과 비교

고찰 기간 2208 [hr]

		방법 I *	방법 II **	제시된 방법	비 고
총 공급에너지 [GWh]		14,247.8	14,246.4	14,209.9	
공급시장에너지 [GWh]		0.0008	1.1437	37.872	
전력부족확률 [p.u.]		1.82×10^{-6}	2.34×10^{-6}	0.0388	
전 원 공 급 에 너지 [GWh]	원자력	6,978.30	6,978.23	6,976.75	4,716[MW]
	유연탄	4,939.43	5,108.23	4,376.16	3,120[MW]
	무연탄	1,054.97	996.35	777.97	850[MW]
	석유	1,275.07	1,163.55	2,011.01	5,791[MW]
	C / C	0.035	0.0	61.75	920[MW]
	터어빈	0.0004	0.0	6.26	100[MW]
총 운 전 비 용 [K\$]		296,902	288,735	291,755	
L D C 의 편적 [GWh]		14,247.80			

* : Analytic Method , ** : Approximate Method