

Monte Carlo Simulation을 이용한 각 부하지점별 확률론적 발전비산정

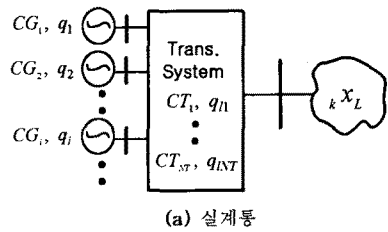
문승필*, 김홍식*, 최형림*, 최재석*, 노대석**
 국립경상대학교 전기전자공학부*, 한국기술교육대학교 정보기술공학부**

A Nodal Probabilistic Production Cost Evaluation at each Load Point using Monte Carlo Simulation Methods

Seungpil Moon*, Hongsik Kim*, Hyonglim Choi*, Jaeseok Choi*, Daeseok Rho**
 Gyeongsang National University*, Korea University of Technique and Education**

Abstract - This paper illustrates a method for evaluating nodal probabilistic production cost using the CMELDC. A new method for constructing CMELDC (the equivalent load duration curves of composite power system) was developed by authors. The CMELDC can be obtained by convolution integral processing between the probability distribution functions of the fictitious generators outage capacity and the load duration curves at each load point. Monte Carlo Methods are applied for the construction of CMELDC on this study. And IEEE-RTS 24 buses model is used as our case study with satisfactory results.

2.1 HLII에서의 유효부하 개념도
 HLII에서의 유효부하개념을 확장하여 발전계통 및 송전선로의 불확실성까지 고려한 HLII에서의 유효부하의 개념을 보이면 그림 1과 같다.

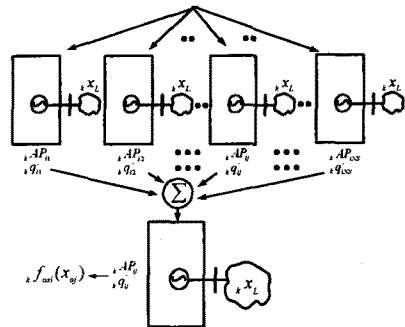


(a) 실제계통

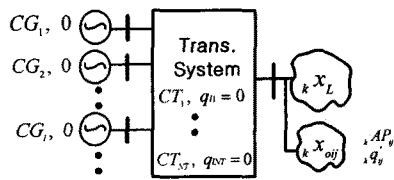
1. 서론

과거 독점체제의 전력산업구조에서는 전력사업자가 장·단기 전력수요예측, 전력수급계획 및 전력확충계획 수립, 전력계통운영, 적정 신뢰도기준 설정 등 일련의 업무를 독자적으로 수행해 왔다. 그러한 상황에서는 각 부하지점별 신뢰도기준설정, 부하지점별 특성 등을 감안한 공급지장비산정 또는 부하지점별 발전비용산정 등을 고려함에 앞서 전 계통에 대한 계획과 운영만이 전력회사의 관심이었다. 그러나 전력산업이 발전경쟁체제로 변하게 되고 앞으로 보다 효율적이고 경쟁력 있는 방향으로 강도 높은 구조개편이 요구되고 있어 도매경쟁형을 거쳐 소매경쟁형 체제로 구조개편이 가속화 될 것이고 동시에 완전한 민영화에 의한 독립발전사업자의 경쟁체제가 확립될 것으로 기대되어 지고 있다. 이러한 자유경쟁체제 하에서는 과거에 경험하지 못하였던 다양한 문제점들과 직면할 것으로 예상되어 지고 있어 과거와는 다르게 복합계통에 대한 해석의 필요성이 더해가고 있다.

본 연구에서는 당면될 문제점들 중 전력공급자, 계통운용자 그리고 전력수요자들 간에 전력가격결정방법에 있어 중요하게 고려될 것으로 기대되는 각 부하지점별 확률론적 발전비용산정의 방법을 제시한다. 개방된 전력산업구조 하에서의 전력가격결정은 각 부하지점별 부하의 특성, 발전계통 및 송전계통의 신뢰도, 각 부하지점별 전력공급 신뢰도 등과 같은 보다 다양한 요소들이 고려되어야 할 것으로 사료되어 진다. 이를 위하여 저자에 의해 개발되고 발표된 CMELDC (Composite Power System Equivalent Load Duration Curve) 를 이용하였다. 그리고, 현대사회의 전력계통은 거대하고 복잡한 성향을 띠어 가고 있으므로 복잡한 운용조건을 갖고 부수적인 사건이 비교적 많은 계통의 해석에 유리하다고 알려져 있는 Monte Carlo Simulation 기법을 이용하였다.



(b) 합성된 가상발전기



(c) 등가시스템

그림 1. HLII에서의 유효부하의 개념

2.2 최대도달전력 산정

임의의 부하지점에 도달할 수 있는 각 상태별 최대 공급전력은 그 계통의 운용조건이나 정책에 따라서 다양한 형태로 나타날 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 계통의 운용조건을 선형계획법의 제약조건에서 포용할 수 있도록 하고, 최대공급지장전력을 최소화 하는 목적함수를 설정함으로써 운용정책을 다소간 반영하도록 하였다. 이러한 운용조건과 운용정책의 반영은 AC조류계산을 감안한 OPF를 도입함으로써 임의의 발전기 고장으로 인한 부하차단이 시행되어야 하는 경우 실제의 UFR 동작 조건을 어느 정도 반영할 수 있도록 설정할 수 있을 것이다.

2. HLII에서의 유효부하

본 연구에서는 HLII에서의 유효부하지속곡선을 이용하여 확률론적 발전비용을 산정하는 것을 목적으로 하고 있으므로 이러한 구체적인 사건까지는 고려하지 아니하고 선형계획법을 이용하여 최대도달전력을 산정 하였으며 그 목적함수와 제약조건식은 식 (1)과 같다.

$$\left. \begin{aligned} & \text{Minimize} && \lambda \\ & \text{Subjective to} \\ & \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq CG_i && i \in B_B \\ & -CT_{lmax} \leq x_l \leq CT_{lmax} && l \in B_T \\ & (L_{pk} - x_k)/L_{pk} \leq \lambda && k \in B_L \end{aligned} \right\} (1)$$

단, a_{ij} : 절점-지로 접속행렬
 B_B : 모든 모선번호의 집합
 B_L : 부하 모선번호의 집합
 n : 지로의 수(부하지점 및 송전선로의 수)
 CG_i : 모선 i 에서의 발전기의 용량
 CT_{lmax} : l 번째 송전선로의 총용량 [MW]
 B_T : 송전선로 번호의 집합
 x_l : l 번째 선로의 전력조류[MW]

2.3 Monte Carlo Simulation을 이용한 복합 계통의 상태확률

소규모계통이고 신뢰성이 높은 계통에서는 계통구성요소의 사고율이 아주 낮으므로 Monte Carlo법으로 신뢰도 평가를 하고자 한다면 시뮬레이션 시간이나 시뮬레이션 반복횟수를 상당히 늘려야 하지만 해석적 방법에서는 사고율이 낮을수록 여러 발전기나 송전선로가 동시에 탈락할 확률은 '0'에 더욱 가까워지므로 오히려 계산해야 하는 고장상태 차수를 줄여도 되기 때문에 고려해야 하는 상태수가 적어지므로 소규모계통이고 신뢰성이 높은 계통에서는 해석적 방법이 유리하다. 그러나 대규모 계통이나 신뢰성이 낮은 계통의 신뢰도평가를 하는 경우 해석적 방법에서는 여러 발전기나 송전선로가 동시에 탈락할 확률이 증가하여 고려해야 할 상태수가 기하급수적으로 증가하므로 Monte Carlo법이 더욱 유리하다.

본 연구에서 이용한 Monte Carlo법을 살펴보면 다음과 같다.

복합전력계통에서 어떤 상태가 임의의 부하지점에 대하여 공급장치를 일으킬 상태의 확률을 계산하기 위하여 각 구성요소들의 상태가 성공상태와 실패상태 만을 갖는다고 가정하면 식 (2)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$\left. \begin{aligned} S_i &= 0 \text{ (운전상태)}, & x \geq FOR_i \\ S_i &= 1 \text{ (고장상태)}, & 0 \leq x < FOR_i \end{aligned} \right\} (2)$$

단, FOR_i : i 번째 요소의 사고율

이때, 계통의 상태 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_j\}$ 가 되고 S_i 는 i 번째 구성요소(발전기, 송전선로)의 상태이고 x 는 각 구성요소의 상태모의를 위하여 발생된 난수이다. 발생된 난수에 의해서 각각의 구성요소의 상태(운전상태($S_i=0$), 고장상태($S_i=1$))가 모의되고 이들로부터 계통의 상태 S 가 모의된다. 각 구성요소들이 n 회 샘플링(충분히 큰 반복) 되었다면 FOR 는 식 (3)과 같아진다.

$$FOR_i = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (3)$$

그리고 상태벡터 S 가 N 회 샘플링 되었다면 상태벡터 S 의 확률 $P(S)$ 은 식 (4)와 같다.

$$P(S) = \prod_{i=1}^M FORS_i \approx n(S)q(S) \quad (4)$$

단, $P(S)$: 계통의 상태확률 벡터

M : 구성요소의 수

$FORS_i$: $\begin{cases} FOR_i \\ 1 - FOR_i \end{cases}$

$n(S)$: 상태벡터 S 의 샘플링 수

$q(S) = \frac{1}{N}$: 상태벡터 S 의 출현확률

N : 반복횟수

2.4 HLII에서의 유효부하지속곡선

발전기 #1부터 # i 번째 발전기까지 투입된 후의 k 부하지점에서의 유효부하지속곡선의 확률분포함수 $k\Phi_i(x_e)$ 는 식 (5)와 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} k\Phi_i(x_e) &= k\Phi_o(x_e) \otimes kf_{osi}(x_{oi}) \\ &= \int k\Phi_o(x_e - x_{oi})kf_{osi}(x_{oi})dx \end{aligned} \quad (5)$$

단, \otimes : 상승적분을 의미하는 연산자

$k\Phi_o$: k 부하지점에서의 LDC

$kf_{oi}(x_{oi})$: k 부하지점에서의 가상발전기 사고용량별 확률분포

3. 각 부하지점별 신뢰도 및 확률론적 발전비용

3.1 각 부하지점별 신뢰도지수산정

발전기 #1부터 # i 까지 투입되고 난 후의 k 부하지점의 CMELDC($k\Phi_i(x_e)$)와 신뢰도 지수인 전력부족시간 기대치(LOLE)와 공급지장전력량의 기대치(EENS)를 정식화하면 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

$$LOLE_{ik} = k\Phi_i(x) |_{x=AP_k} \quad (6)$$

$$EENS_k = \int_{AP_k}^{AP_k + L_{pk}} k\Phi_i(x) dx \quad (7)$$

3.2 각 부하지점별 확률론적 발전비용산정

k 부하지점에서 # i 발전기까지 투입되고 난 이후의 각 부하지점별 확률론적 발전량 ΔE_i 는 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며, 그때의 확률론적 발전비용 ΔPC_i 는 식(9)와 같다.

$$\Delta E_{ik} = EENS_{i-1k} - EENS_{ik} \quad [\text{MWh}] \quad (8)$$

$$\Delta PC_{ik} = F_i(\Delta E_{ik}, LOLE_{i-k}) \quad [\text{\$}] \quad (9)$$

4. 사 례 연 구

본 연구에서 제안한 방법의 유용성을 살펴보기 위해 IEEE-RTS계통에 적용하여 보았다. 그리고 부하지속곡선은 하계의 주중 하루를 기준으로 하였다.

그림 2는 HLI에서 각 부하지점별 확률론적 발전비용을 발전기 투입순으로 보인 것이고, 그림 3은 HLI에서의 확률론적 발전비용을 발전기 투입순으로 보인 것이다. 그림 2와 그림 3에서 발전비용의 경향은 비슷한 것으로 나타나 있으나, 송전선로의 사고율을 증가시키거나 송전선로의 허용용량을 감소시키면 송전계통의 불확실성과 선로계약으로 인하여 230kV지역에서 여유발전량이 138kV지역으로 확률론적으로 충분하지 송전되지 못하여 230kV지역의 확률론적 발전비가 감소하게 되고 138kV지역의 확률론적 발전비가 증가하게 된다. 이는 수회의 시뮬레이션을 통하여 알게 되었으며, 주로 발전기투입순번 12~16에서 이러한 현상이 심하다.

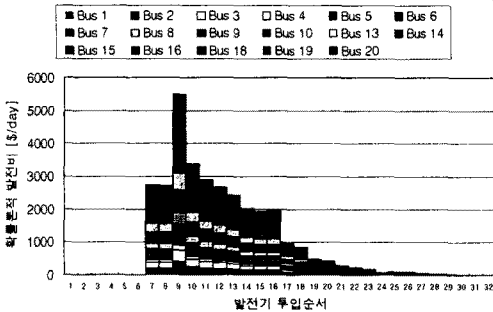


그림 2. HLI에서의 각 부하지점별 확률론적 발전비용의 발전기투입순에 의한 누적

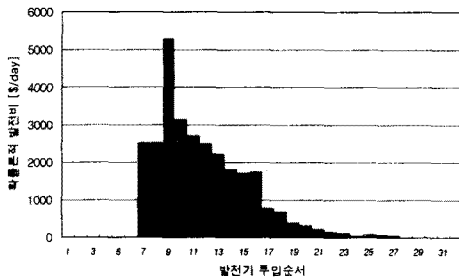


그림 3. HLI에서의 발전기투입순에 의한 발전비

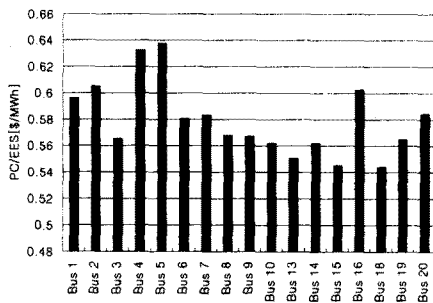


그림 4. 부하지점별 확률론적 발전단가

그림 4는 각 부하지점별 확률론적 발전단가를 나타낸 것이다. 230kV지역(Bus #13~Bus #23)은 공급여유력이 1203MW (발전용량:2721MW, 부하:1518MW)이고 138kV지역(Bus #1~Bus #10)은 648MW의 공급부족(발전용량:684MW, 부하:1332MW)상태이다. 따라서 230kV지역의 여유발전량이 송전계통을 통하여 138kV지역으로 송전되고 있으므로 138kV지역의 부하가 송전계통의 용량 제약과 불확실성의 영향을 더욱 크게 받는다. 그림 4에서 230kV지역의 부하지점별 확률론적 발전단가(0.54~0.6 \$/MWh)가 138kV지역의 부하지점별 확률론적 발

전단가(0.56~0.64 \$/MWh)보다 낮음을 볼 수 있다.

표 1은 각 부하지점별 신뢰도 지수(LOLE, EENS), Expected Energy Served 그리고 확률론적 발전비용을 나타낸 것이다. 표 1에서 복합계통에서의 신뢰도지수와 발전계통에서의 신뢰도를 비교하였으며, 발전비용 또한 비교하였다. 표 1에서 EES는 복합계통보다 발전계통에서 불과 4.22[MWh/day](0.0075%) 높은 데도 불구하고 발전비용은 복합계통에서 9.2% 높은 것을 알 수 있다. 이는 송전계통의 불확실성으로 인하여 230kV지역에서의 값싼 발전량이 138kV지역으로 확률론적으로 충분히 송전되고 있지 못함을 반영하는 것으로 사료된다.

표 1. 각 부하지점별 신뢰도 및 확률론적발전비용

No. Bus	LOLE(hr/day)	EENS(MWh/day)	EES(MWh/day)	PC(\$/day)
Bus 1	0.63104	4.26015	2144.94	1280.09
Bus 2	0.63104	3.82624	1926.47	1166.78
Bus 3	0.63104	7.10024	3574.90	2021.76
Bus 4	0.63100	2.91887	1469.68	929.84
Bus 5	0.63106	2.80079	1410.10	898.93
Bus 6	0.63110	5.36512	2701.03	1568.54
Bus 7	0.56012	3.57662	2483.92	1449.45
Bus 8	0.63112	6.74677	3396.15	1929.11
Bus 9	0.63110	6.90365	3475.60	1970.27
Bus 10	0.63110	7.69205	3872.81	2176.29
Bus 13	0.63104	10.45310	5263.05	2897.46
Bus 14	0.63104	7.65249	3852.95	2165.96
Bus 15	0.63110	12.50550	6295.79	3432.97
Bus 16	0.63110	3.94494	1986.06	1197.60
Bus 18	0.63112	13.13680	6613.56	3597.95
Bus 19	0.63110	7.14034	3594.76	2032.03
Bus 20	0.63110	5.04952	2542.15	1486.07
Total/HLI	0.62852	111.07324	56603.93	32201.09
HLI	0.62532	106.88000	56608.14	29500.60
HLI-HLI	0.00320	4.19324	-4.22	2700.49

5. 결론

본 연구에서는 이미 저자들에 의해 제안된 바 있는 발전계통 및 송전계통의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 복합전력계통에서의 유효부하지속곡선을 이용함으로써 이러한 특성들을 감안한 부하지점별 확률론적 발전비용 산정을 위한 수법을 제시하였다. 규제완화 된 자유경쟁 체제 하에서 각 부하지점별 확률론적 발전비용을 산정할 수 있는 방법을 제시함으로써 향후 제기될 수 있는 전력요금산정의 방법이 있어 중요한 해법을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

그리고, 앞으로 AC조류계산을 이용하여 계통운용조건을 보다 엄밀히 만족시키고, 이를 계통운용정책에 맞는 목적함수를 도입하여 보다 더 실제적인 연구를 할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : 2000-1-30200-006-3) 지원으로 수행된 결과의 일부임.

[참고 문헌]

- [1] W.S Read, W.K. Newman, I.J. Perez-Arriaga, H.Rudnick, M.R. Gent & A.J. Roman. "Reliability in the New Market Structure (Part2)" IEEE Power Engineering Review, January, 1999, p.10~16.
- [2] CEA, *Industry Restructuring - News & Info*: CEA connections online news, March 2000.
- [3] Jaeseok Choi, Seoungpil Moon, Hongsik Kim, Byongjun Lee and Roy Billinton; "Development of ELDC and Reliability Evaluation of Composite Power System Using Monte Carlo Method", IEEE, PES, SM2000, Seattle, USA.
- [4] 김 홍식, 문승필, 최재석, 노대석, "각 부하지점별 확률론적 발전비용 산정을 위한 수치해석적 방법" 2001년 대한전기학회 전력기술부문의 춘계학술대회 논문집, pp.112-115.