

각 부하지점별 확률론적 발전비용 산정을 위한 수치해석적 방법

김홍식** 문승필* 최재석* 노대석**
 경상대학교 전기전자공학부* 한국기술교육대학교 정보기술공학부**

Numerical Analysis Method for Nodal Probabilistic Production Cost Simulation

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

Abstract - This paper illustrates a new nodal effective load model for nodal probabilistic production cost simulation of the load point in a composite power system. The new effective load model includes capacities and uncertainties of generators as well as transmission lines. The CMELDC based on the new effective load model at HLI has been developed also. The CMELDC can be obtain from convolution integral processing of the outage capacity probabilistic distribution function of the fictitious generator and the original load duration curve given at the load point. It is expected that the new model for the CMELDC proposed in this study will provide some solutions to many problems based on nodal and decentralized operation and control of an electric power systems under competition environment in future. The CMELDC based on the new model at HLI will extend the application areas of nodal probabilistic production cost simulation, outage cost assessment and reliability evaluation etc. at load points. The characteristics and effectiveness of this new model are illustrated by a case study of a test system.

1. 서 론

유효부하지속곡선(Effective Load Duration Curve : ELDC)은 1967년에 Baleriaux와 Jamouille가 제시하여, 발전계통의 확률론적인 발전시물레이션이나 신뢰도 평가에 매우 유용하게 사용되어 왔다. 그 후 여러 연구자들에 의하여, 전원개발계획이나 발전계통만을 대상으로 한 연구등에 적용되면서 관심을 거듭하였으나, 발전계통 및 송전선로의 사고율과 같은 송전계통의 불확실성까지 포함한 복합전력계통의 신뢰도 평가개념은 Roy Billinton등 몇몇 연구자들에 의해 제시되었을 뿐 실제계에 대한 그 활용정도는 다소 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 이미 제안한 바 있는 발전계통 및 송전계통의 불확실성까지 고려한 복합전력계통에 대한 각 부하지점별 유효부하지속곡선(가칭CMELDC)을 이용하여 발전기 및 송전계통의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 복합전력계통에서의 각 부하지점별 확률론적 발전비용 산정을 위한 새로운 유효부하 모델을 제시한다. 본 연구에서 제안하는 새로운 발전비용산정방법을 이용하여 규제완화된 자유경쟁체제 하에서 각 부하지점별 확률론적 발전비용을 산정할 수 있을 뿐만 아니라, 나아가 ITO 및 ISO와 같은 송전망 사업자에게도 송전망 사용료의 결정 방법론을 제시할 수 있는 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 끝으로, MRBTS에 적용하여 본 연구에서 새로이 개발한 모델 및 방법의 유용성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 HLI에서의 유효부하

HLI에서의 유효부하개념을 확장하여 발전계통 및 전선로의 사고율등과 같은 불확실성까지 고려한 그림에서의 (a)와 같은 일반적인 복합전력계통(HLI)을 살펴보기로 하자. 그림(a)에서 CG와 CT는 발전기 및 전선로의 용량을 나타내며 q 와 q' 은 각각 발전기와 송전선로의 사고율을 나타낸다. 따라서, 그림(a)는 그림(b)같이 각 발전기의 존재를 완전히 무시하는 대신 임의 부하지점에 용량이 AP_{ij} [MW]이며 사고상태 발생확률 q' 인 가상발전기가 존재하는 것으로 등가화 할 수 있다. 그림(b)의 k 부하지점에서의 #1 발전기부터 i 운전된 경우의 종합적인 가상발전기(Synthesis fictitious generator)의 사고용량확률분포함수를 나타낸 그림 3의 (b)를 (c)그림처럼 크기가 CG[MW] 이고 사고이 0인 발전기가 발전모선에 존재하고 q' 인 출현확률 갖고 크기가 AP_{ij} [MW]인 가상부하와 그 부하지점에서 확률적 계통부하가 동시에 존재하는 것으로 등가화 수 있다. 이때 확률적 계통부하와 사고상태를 갖는 최공급전력에 기인한 확률적 사고부하를 합하여 복합전계통의 유효부하라고 정의할 수 있다. 이의 확률변수 정식화하면 식 (1)과 같다.

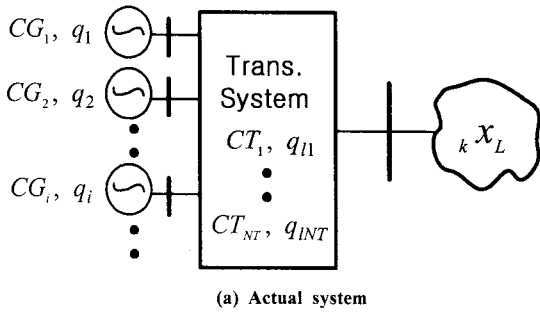
$$kx_e = kx_L + \sum_{j=1}^{NS} kx_{oj}$$

- 단, kx_e : k 부하지점에서 복합전력계통의 유효부하 확률변수
- kx_L : k 부하지점에서 확률적 계통부하의 확률변수
- kx_{oj} : k 부하지점에서 j 번째 사고상태에서의 최대공급전력에 의한 확률적 사고부하의 확률변수
- NS : 계통상태의 총수

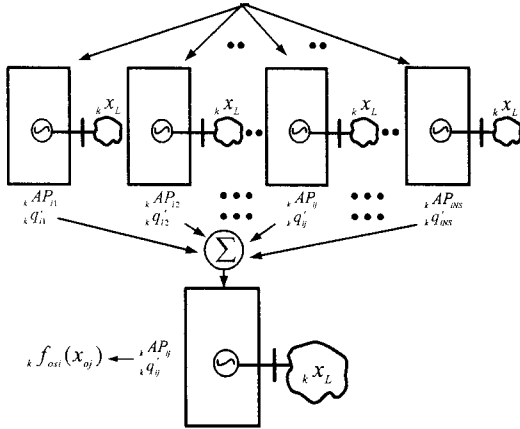
그러므로 발전기 #1부터 # i 번째 발전기까지 투입된 k 부하지점에서의 유효부하지속곡선의 확률분포함 $k\phi_j(x_e)$ 는 식 (2)와 같이 정의될 수 있다.

$$k\phi_j(x_e) = k\phi_{j-1}(x_e) \otimes f_{oj}(x_{oj}) \\ = \int k\phi_{j-1}(x_e - x_{oj}) f_{oj}(x_{oj}) dx$$

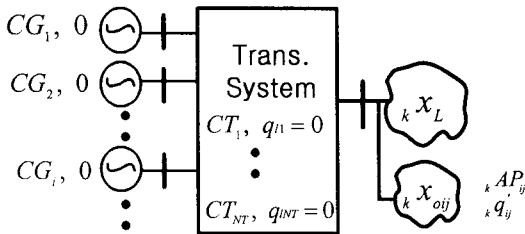
- 단, \otimes : 상승적분을 의미하는 연산자
- $k\phi_o$: k 부하지점에서의 LDC



(a) Actual system



(b) Synthesized fictitious generator



(c) Equivalent system

Fig. 1. Actual and equivalent systems and effective load nodal of HLII proposed in this study.

2.1.2 부하지점별 확률론적 발전비용 산정

그림 2는 발전기 #1부터 # i 까지 투입되고 난 후의 k 부하지점의 CMELDC($k\Phi$)와 신뢰도 지수인 전력부족시간 기대치(LOLE)와 공급지장전력량의 기대치(EENS)를 나타내고 있으며 식(3)과 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2에서 L_{pk} 와 AP_{ik} 는 각각 발전기 #1부터 # i 까지 투입되고 난 후의 k 부하지점의 최대부하와 최고도달전력을 나타내고 있다.

$$LOLE_{ik} = {}_k\Phi_i(x) \Big|_{x=AP_{ik}} \quad (3)$$

$$EENS_k = \int_{AP_{ik}}^{AP_{ik} + L_{pk}} {}_k\Phi_i(x) dx \quad (4)$$

k 부하지점에서 # i 발전기까지 투입되고 난 이후의 각 부하지점별 확률론적 발전비용 ΔE_{ik} 는 식(5)와 같이 나타낼

수 있으며, 그때의 확률론적 발전비용 ΔPC_{ik} 는 식(6)과 같다.

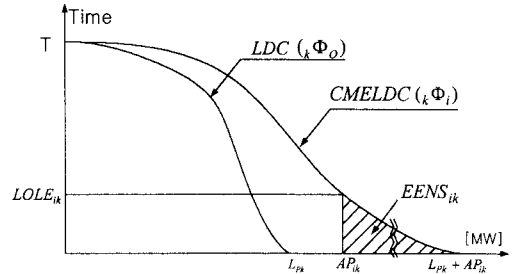


Fig. 2. Reliability indices and ELDC at load point #k

$$\Delta E_{ik} = EENS_{i-1k} - EENS_{ik} \quad [\text{MWh}] \quad (5)$$

$$\Delta PC_{ik} = F_i(\Delta E_{ik}, LOLE_{i-k}) \quad [\$] \quad (6)$$

2.1.3 부하지점별 확률론적 발전비용 산정

(1) 상태확률
실계통에서는 발전기와 송전선로가 100개 정도일 때 상태수는 2^{100} 이 된다. 이는 현재의 계산기로도 천문학적인 계산시간이 소요된다. 그러나 다행히 여러개의 발전기나 송전선로가 동시에 탈락될 확률값은 0에 가까우므로 이들을 모두 고려하여 계산할 필요는 없다. 그러므로 근사값이긴 하지만 계산시간 면에서 현실적인 식 (7)을 이용하는 것이 유리하다.

$$q_{ij} = P(e_j)Q(\bar{e}_j) \quad \exists \forall n(\bar{e}_j) \leq 4 \text{ or } 5 \quad (7)$$

- 단, \bar{e}_j : 상태 # j 에서의 사고요소의 집합
- $n(\bar{e}_j)$: \bar{e}_j 집합의 사고요소의 수
- $P(e_j)$: 사고용량 e_j 의 확률
- $P(\bar{e}_j)$: 상태 \bar{e}_j 에서의 공급지장확률

(2) 최대공급전력 산정

어떤 임의의 부하지점에서 각 상태별 최대공급전력을 계산할 경우 가능해가 여러 개 있게된다. 그러므로 복합전력계통의 신뢰도 평가시에는 각 상태별로 어떤 목적하는 바에 따라 목적함수를 설정하여 조류계산을 실시하고 이의 결과에 준하여 각 부하지점별로 최대공급전력을 산정하여야 한다. 여기서는 다음과 같이 부하와 송전선로에 흐르는 전력을 미지변수로 하여 목적함수 및 제약조건을 설정한다.

1) 목적함수

여기서는 문제의 편의상 여러 개의 가능해들 중에서 최소한의 공급지장전력이 발생하는 해를 구하는 것을 목표로 삼았다. 그러므로 송전선로의 손실을 무시하고 유전력만을 대상으로 하여 최대공급지장전력율을 일으키는 부하지점의 공급지장전력율을 최소화하는 것을 목적함수로 설정할 수 있다. 이를 정식화 하면 식 (8)과 같다. 여기서 L_{pk} 와 x_k 는 각각 k 부하지점의 최대부하[MW] 및 최대공급전력[MW]을 의미한다.

$$\text{Minimize } \{ \text{Max}(L_{pk} - x_k) / L_{pk} \} \quad k \in B_L \quad (8)$$

- 단, B_L : 부하지점을 갖는 모선번호의 집합
- Max: Maximum의 약어임

2) 제약조건

(가) 접속회로 제약조건

각 모선에서의 전력의 유출입의 합은 그 모선에 연결된 발전기의 용량내에 있어야한다. 이를 정식화하면 식 (9)와 같다. 여기서 a_{ij} 는 각 부하지점도 지로로 취급하여 요소에 포함한 절점-지로 접속행렬의 i 행 j 열의 요소이며 CG_i 는 i 번째 절점(모선)에 연결된 발전기의 총 용량이다.

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq CG_i \quad i \in B_B \quad (9)$$

단, B_B : 모든 모선번호의 집합
 n : 지로의 수(부하지점 및 송전선로의 수)
 CG_i : i 발전기의 용량

(나) 선로용량 제약조건

각 송전선로에 흐르는 전력은 주어진 송전선로의 용량 범위내에 있어야한다. 이를 정식화하면 식 (10)과 같다.

$$-CT_{lmax} \leq x_l \leq CT_{lmax} \quad l \in B_T \quad (10)$$

단, CT_{lmax} : l 번째 선로의 총용량 [MW]
 B_T : 송전선로 번호의 집합
 x_l : l 번째 선로의 전력조류[MW]

위의 제약조건들 및 목적함수를 매개변수 λ 를 도입하여 선형계획법으로 정식화하면 식 (11)과 같다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Minimize} \quad \lambda \\ \text{Subjective to} \\ \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq CG_i \quad i \in B_B \\ -CT_{lmax} \leq x_l \leq CT_{lmax} \quad l \in B_T \\ (L_{pk} - x_k)/L_{pk} \leq \lambda \quad k \in B_L \end{array} \right\} \quad (11)$$

3. 흐름도

본 연구에서 제안한 각 부하지점별 발전비용 산정을 위한 해석적 방법의 흐름도는 그림 3과 같다.

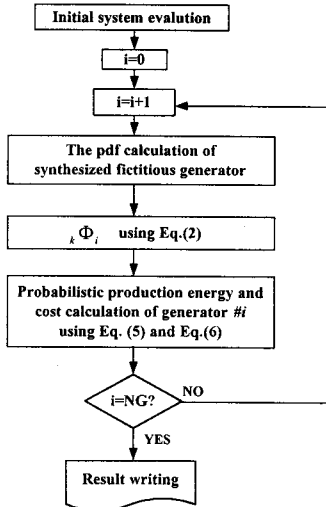


Fig. 3. The flow chart for nodal probabilistic production cost simulation.

4. 사례연구

본 연구에서 제안한 방법의 유용성을 살펴보기 위 그림 4와 같은 MRBTS계통에 적용하여 보았다. 발전과 송전선로의 용량 및 사고율의 입력자료는 그림 4에 나타난 것과 같다.

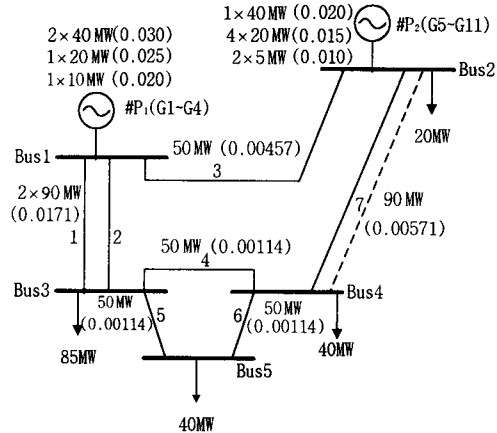


Fig. 4. MRBTS for case study.

표 1은 연료비 함수 및 발전기투입순서를 나타내는 력자료로서 모든 발전기는 화력발전기로 가정하였다. 표 2와 표 3은 이번엔 제안한 방법으로 얻어진 부하지점 발전량 및 발전비용을 나타내고 있으며, 또한, 표 4 각 부하지점 측면에서 바라본 각 발전기들의 발전단가 나타내고 있다. 나아가, 그림 5, 6, 7은 표 2, 3, 4를 그 프로그 나타낸 것이다. 표 2와 3 같이 제시된 확률론적 전량 및 발전비용의 결과로부터 각 부하지점 측면에 발전기 및 송전선로의 사고율과 같은 불확실성까지 또한 발전량 및 발전비용을 산정 할 수 있음을 알 수 다.

Table 1. Operating Cost Function[\$/h]

Loading order	Operating cost functions[\$/h]
G5	11.41 + 0.5P
G 6~ G 9	5.71 + 0.5P
G 10~ G 11	1.43 + 0.5P
G 1~ G 2	90.18 + 12.0P
G3	77.63 + 12.25P
G4	68.49 + 12.5P

Table 2. Nodal Probabilistic Production Energy [MWh/day]

order	Bus2	Bus3	Bus4	Bus5	Total
G5	101.705	432.249	203.411	203.411	940.775
G6	39.633	217.227	102.224	102.224	461.308
G7	34.538	217.507	102.357	102.357	456.760
G8	34.250	217.636	102.420	102.420	456.725
G9	34.138	217.617	102.412	102.412	456.579
G10	9.125	58.437	27.559	27.559	122.680
G11	9.004	57.673	27.201	27.201	121.080
G1	36.753	307.229	137.792	137.792	619.565
G2	10.554	23.543	23.895	23.895	81.888
G3	0.270	0.789	0.658	0.658	2.375
G4	0.001	0.028	0.003	0.003	0.035
Total	309.972	1749.933	829.932	829.932	3719.769

Table 3. Nodal Probabilistic Production Cost[\$/day]

order	Bus2	Bus3	Bus4	Bus5	Total
G5	324.693	489.964	375.545	375.545	1565.748
G6	118.141	245.653	188.152	188.152	740.098
G7	109.245	245.794	188.219	188.219	731.476
G8	108.602	245.828	188.220	188.220	730.871
G9	99.706	245.760	188.158	188.158	721.783
G10	19.440	63.495	46.060	46.060	175.054
G11	17.750	62.797	43.326	43.326	167.197
G1	1175.028	5807.871	3369.187	3369.187	13721.273
G2	319.419	587.067	687.642	687.642	2281.770
G3	7.897	18.971	17.922	17.922	62.712
G4	0.371	1.040	0.813	0.813	3.037
Total	2300.291	8014.241	5293.243	5293.243	20901.018

Table 4. Nodal Probabilistic Production Cost Per Unit Energy [\$ /MWh]

order	Bus2	Bus3	Bus4	Bus5	Total
G5	3.192	1.134	1.846	1.846	2.005
G6	2.981	1.131	1.841	1.841	1.948
G7	3.163	1.130	1.839	1.839	1.993
G8	3.171	1.130	1.838	1.838	1.994
G9	2.921	1.129	1.837	1.837	1.913
G10	2.130	1.0866	1.671	1.671	1.640
G11	1.971	1.0888	1.593	1.593	1.561
G1	31.971	18.904	24.451	24.451	24.944
G2	30.265	24.936	28.777	28.777	28.189
G3	29.183	24.042	27.249	27.249	26.931
G4	742.400	37.681	254.031	254.031	322.036
Total	77.577	10.308	31.543	31.543	37.743

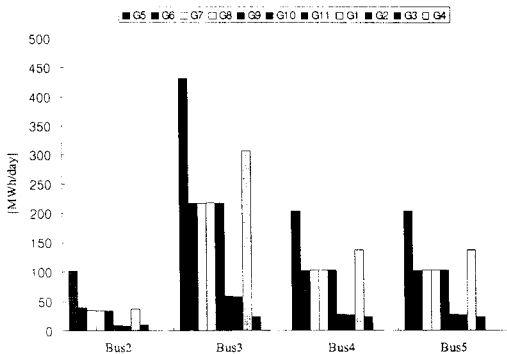


Fig. 7. Nodal probabilistic production energy at load points.

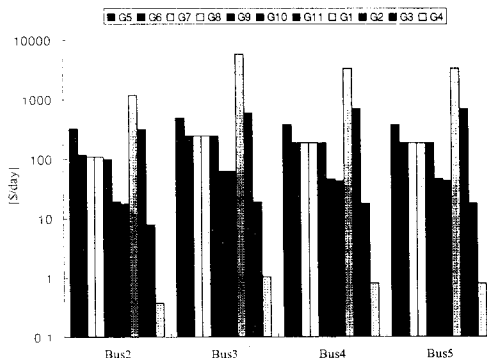


Fig. 8. Nodal probabilistic production cost at load points

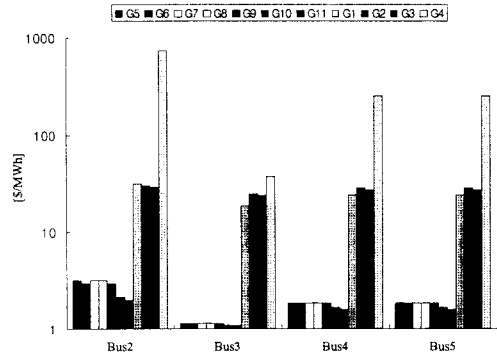


Fig. 9. Nodal probabilistic production cost per unit power.

5. 결론

본 연구에서는 발전기 및 송전계통의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 복합전력계통에서의 각 부하지점별 확률론적 발전비용 산정을 위한 새로운 유효부하 모델을 제시하였다. 본 연구에서 제안하는 새로운 발전비용산정 방법을 이용하여 규제완화 된 자유경쟁 체제 하에서 각 부하지점별 확률론적 발전비용을 산정 할 수 있을 뿐만 아니라, 나아가 ITO 및 ISO와 같은 송전망 사업자에게도 송전망 사용료 결정 방법론을 제시할 수 있는 중요한 개념을 제공할 수 있을 것으로 기대되며 복합전력계통의 신뢰도와 발전계통의 신뢰도 차이가 송전계통의 신뢰도 임에 착안하여 송전계통의 신뢰도가치까지 산정 할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [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 (Part1)" IEEE Power Engineering Review, December, 1999, p.4~14.
- [2] 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.
- [3] CEA, *Industry Restructuring - News & Info*: CEA connections online news, March 2000.
- [4] IMO, "Participating in Ontario's New Competitive Electricity Market" Overview Report by IMO, November 1999.
- [5] Jaeseok Choi, Seougpil Moon, Hongsik Kim, Byongjun Lee and Roy Billinton; "Development of ELD and Reliability Evaluation of Composite Power System Using Monte Carlo Method", IEEE, PES, SM2000, Seattle, USA.
- [6] 김 홍식, 임 채현, 최 재석, 이 순영, 차 준민, "규제완화된 전력시장 하에서의 전력계통 신뢰도 할당 방법에 관한 연구" 2000년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.394-396.
- [7] 차 준민, 김 홍식, 최 재석, 오 광해, "규제완화된 전력시장 하에서의 송전계통 신뢰도 평가방법의 개발" 2000년 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, pp.397-399.