

## 복합전력계통에서의 유효부하지속곡선 작성법의 개발

최재석\*      문승필\*  
\*경상대학교 전기공학과

조종만\*\*      강진중\*\*  
\*\*한국전력공사

### Development of the ELDC Construction of Composite Power System

Jaeseok Choi\*      Seungpil Moon\*  
\*Gyeongsang National University

Jongman Jo\*\*      Jinjung Kang\*\*  
\*\*Korea Electric Power Corporation

#### Abstract

This study proposes a method for evaluating composite power system effective load duration curve(CMELDC) at load points. The concept of ELDC in power system planning is very useful and important in HLI as well as HLII. Effective load duration curve of composite power system can be obtained from convolution integral processing of both probability function of unarival power and load duration curve at load points. The characteristics and effectiveness of this methodology are illustrated by case studyings of simple system.

#### I. 서론

전력계통의 계획수립을 위한 확률론적인 발전비용이나 신뢰도평가에서 유효부하지속곡선은 각 발전기의 발전량 및 발전비용 그리고 신뢰도 지수값등 종합적인 계통자료들을 제공하여 주기 때문에 중요한 역할을 담당하고 있다[1,2].

유효부하지속곡선(Effective Load Duration Curve ; ELDC)은 1967년에 Baleriaux와 Jamouille가 발전량기대치 및 신뢰도지수등을 얻기 위하여 발전기의 사고율을 부하지속곡선에 고려해 넣은 반복식을 제시하므로써 널리 알려지게 되었다[3]. 1980년 J.P. Stremel, R.T.Jenkins, R.A.Babb 그리고 W.D. Bayless등이 Cumulant법을 발표하였으며[4] MONA법이 1986년에 Gross, Garapic, Mcnutt등에 의해 개발되었다[6]. 한편, 복합전력계통(이하 복합계통으로 한다.)의 신뢰도 평가 개념은 Roy Billinton에 의하여 1969년에 제시되었음에도 불구하고[8] 계산량의 방대함과 복잡성으로 말미암아 실제 계통에 대한 그 활용정도는 매우 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 확률론적인 발전시뮬레이션이나 신뢰도 평가등에 유용하게 사용되는 발전계통의 유효부하지속곡선을 확장하여 송전계통을 고려한 복합계통에 대한 유효부하지속곡선을 작성하는 방법을 개발하였다. 그리고 두가지 모델계통에 대한 신뢰도 평가를 위한 적용예를 통하여 여기서 개발한 방법의 특성 및 유용성을 살펴보았다.

#### II. 복합계통에 대한 유효부하지속곡선

##### 2.1 유효부하 (Effective Load)

임의의 지점에서 크기가 C[MW]이고 상태 발생확률이 q인 공급지장전력이 존재한다는 것은, 크기가 C[MW]이고 상태 발생확률이 0인 공급지장전력과 q인 출현확률을 갖고 크기가 C[MW]인 가상부하가 그 부하지점에 동시에 존재한다는 것과 동일하다. 이때 확률적 계통부하와 공급지장전력에 기인한 확률적 사고부하를 합하여 복합계통의 유효부하라 정의할 수 있다. 이의 확률변수를 정식화하면 식 (1)과 같다.

$$X_e = X_L + \sum X_{oi} \quad (1)$$

단,  $X_e$  : 복합계통의 유효부하 확률변수  
 $X_L$  : 확률적 계통부하의 확률변수

$X_{oi}$  : i 번째의 공급지장전력에 의한 확률적 사고부하의 확률변수

그리므로 임의의 k 부하지점에서의 i 번째 공급지장전력까지 상승적분된 유효부하지속곡선의 확률분포함수  $k\Phi_i(X_e)$ 는 식 (2)와 같이 정의될 수 있다.

$$k\Phi_i(X_e) = k\Phi_{i-1}(X_e) \otimes k f_{oi}(X_{oi}) \\ = \int k\Phi_{i-1}(X_e - X_{oi}) k f_{oi}(X_{oi}) dx \quad (2)$$

단,  $\otimes$  : 상승적분을 의미하는 연산자

$$k\Phi_0(X_e - X_{oi}) = k\Phi(X_L)$$

$k f_{oi}(X_{oi})$  : i 번째 공급지장전력의 사고용량 확률분포함수

만일 공급지장전력 전체의 사고용량 확률분포함수를 알고 있으면 모든 공급지장전력까지 상승적분된 유효부하지속곡선의 확률분포함수  $k\Phi_i(X_e)$ 는 식 (3)처럼 구해진다.

$$k\Phi_i(X_e) = k\Phi_0(X_e) \otimes k f_{oi}(X_{oi}) \quad (3)$$

단,  $k f_{oi}(X_{oi})$  : k 부하지점에서의 공급지장전력 전체의 사고용량 확률분포함수

##### 2.2 복합계통 유효부하지속곡선에서의 신뢰도 지수

복합계통의 각 부하지점에서의 유효부하지속선인  $k\Phi_i(X_e)$ 를 이용하여 공급지장확률의 기대치(LOLP<sub>k</sub> : Loss of Load Probability) 및 공급지장전력량의 기대치(EDNS<sub>k</sub> : Expected Demand Not Served)를 각각 식 (4) 및 식 (5)처럼 구할 수 있다.

$$LOLP_k = k\Phi_i(X_e)_{k=AFK} \quad (4)$$

$$EDNS_k = \int_{AFK}^{AFK+L_k} k\Phi_i(X_e) dx \quad (5)$$

##### 2.3 상태확률

복합계통의 어떤 상태가 임의의 부하지점에 대하여 공급지장을 일으키는가를 살펴보고 일으키는 상태의 확률을 계산하기 위하여는 식 (6)와 같은 조건확률 계산법을 일반적으로 사용하고 있다.

$$P(A) = \sum P(A/B_j) P(B_j) \quad (6)$$

여기서  $B_j$ 가 상호 독립사건인 성공상태  $B_s$ 와 실패상태  $B_f$ 의 2개 상태만을 갖는다면 식 (6)는 식 (7)처럼 된다.

$$P(A) = P(A/B_s) P(B_s) + P(A/B_f) P(B_f) \quad (7)$$

식 (7)을 발전계통과 송전계통만으리된 복합계통에 적용하면 식 (8)처럼 일반화된다.

$$Q_k = \sum_j [P(B_j) (P_{sj} + P_{fj} - P_{sj}P_{fj})] \quad (8)$$

단, k : 부하지점 번호

j : 발생상태 번호

$P_{sj}$  : 발전계통만에 의한 공급지장이 발생할 상태 j의 발생확률

$P_{fj}$  : 송전계통만에 의한 공급지장이 발생할 상태 j의 발생확률

그러나 실제계통에서는 발전기와 송전선로가 100개 정도일 때 상태수는  $2^{100}$ 이 되고 이는 현재의 계산기로도 천문학적인 계산시간이 소요된다. 그러나 다행이 여러개의 발전기나 송전선로가 동시에 탈락될 확률은 0에 가까우므로 이들을 모두 고려하여

계산할 필요는 없다. 그러므로 근사값이긴 하지만 계산시간면에서 현실적인 즉, 식 (8)보다 더 높은 유연성을 지닌 식 (9)를 이용하는 것이 유리하다고 알려져있다.

$$Q_k = \sum_j [P(B_j) P_j] \quad (9)$$

### 2.4 공급지장전력상징

최소한의 공급지장전력이 발생하는 해를 구하는 것을 목표로 송전선로의 손실을 무시하고 유효전력만을 대상으로 하여 최대 공급지장전력을 일으키는 부하지점의 공급지장전력을 최소화하는 것을 목적함수로 설정할 수 있다.

Minimize  $\lambda$   
 Subjective to

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq CG_i \quad i \in B_B \quad (10)$$

$$-CT_{jmax} \leq x_j \leq CT_{jmax} \quad j \in B_T$$

$$(L_k - X_k) / L_k \leq \lambda \quad k \in B_L$$

- 단,  $B_L$  : 부하지점을 갖는 모선번호의 집합
- $B_B$  : 모든 모선번호의 집합
- $B_T$  : 송전선로 번호의 집합
- $CT_{jmax}$  : j 번째 선로의 총용량 [MW]
- $CG_i$  : i 번째 집점(모선)에 연결된 발전기의 총용량 [MW]
- $a_{ij}$  : 집점-지로 접속행렬의 i행 j번의 요소
- n : 지로의 수 (부하지점 및 송전선로의 수)
- $x_j$  : 선로의 조류 [MW]
- $X_k$  : 부하모선에서의 도착전력 [MW]
- $\lambda$  : max-min를 위한 매개변수

부하지점별로 식 (9) 및 식 (10)에 따라 각 상태에 대한 상태확률 및 공급지장전력을 구하여 공급지장전력에 따른 사고용량 확률분포함수를 작성하고 이를 부하지속곡선과 상승적분함으로써 복합계통에 대한 유효부하지속곡선을 작성할 수 있다.

### III. 흐름도

본 연구에서 개발한 전자계산기를 이용하여 복합계통에 대한 유효부하지속곡선을 작성하는 수법의 흐름도는 그림 2와 같다. 여기서 CMELDC는 복합계통의 유효부하지속곡선(Composite Power System Effective Load Duration Curve)을 의미한다.

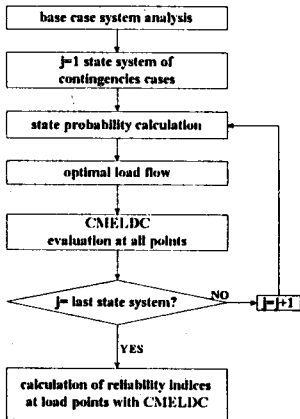


그림 1. 복합계통의 유효부하지속곡선 작성 및 신뢰도 지수 산정을 위한 흐름도

Fig. 1 Flow chart for composite power system ELDC construction and reliability evaluation.

### IV. 사례연구

#### 4.1 사례연구 1

우선 수 작업이 가능한 그림 2과 같은 간단한 모델계통에 적용하여 봄으로써 본 연구에서 개발한 방법의 과정을 명확히 살펴볼 수 있게 하였다.

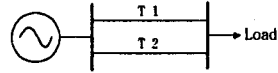


그림 2 사례연구 1의 계통도  
 Fig. 2 System for case study 1.

표 1은 발전기 자료이며 표 2는 송전선로 자료이다.

표 1 발전기 자료

Table 1 Generators data.

Generato No.	Capacity[MW]	FOR
#1	30	0.1
#2	10	0.1

표 2 송전선로 자료

Table 2 Transmission line data.

TransmissionLine No.	Capacity[MW]	FOR
T1	15	0.003
T2	15	0.003

한편, 표 3은 부하자료로서 최대부하를 20[MW]로 가정하였다.

표 3 부하자료

Table 3 Load data.

Load Level [MW]	0	10	20	Peak Level [MW]
Duration [Hours]	24	24	10	20

표 4는 사례연구 1의 각 상태별 확률 및 공급지장전력을 보인 것이며 표 5는 공급지장전력의 사고용량별 확률분포표이다.

표 4 상태확률분포 및 공급지장전력

Table 4 State probability and outage power of case study 1.

st.	T	G1	G2	State Probability	Outage Power
1	0	0	0	$0.997^2 \times 0.9^2 = 0.80514729$	0
2	0	1	0	$0.997^2 \times 0.1 \times 0.9 = 0.08946108$	-10
3	0	0	1	$0.997^2 \times 0.9 \times 0.1 = 0.08946108$	0
4	0	1	1	$0.997^2 \times 0.1^2 = 0.00994001$	-20
5	1	0	0	$0.003 \times 0.997 \times 2 \times 0.9^2 = 0.00484542$	-5
6	1	1	0	$0.003 \times 0.997 \times 2 \times 0.1 \times 0.9 = 0.00053838$	-10
7	1	0	1	$0.003 \times 0.997 \times 2 \times 0.9 \times 0.1 = 0.00053838$	-5
8	1	1	1	$0.003 \times 0.997 \times 2 \times 0.1^2 = 0.00005982$	-20
9	2	0	0	$0.003^2 \times 0.9^2 = 0.00000729$	-20
10	2	1	0	$0.003^2 \times 0.1 \times 0.9 = 0.00000081$	-20
11	2	0	1	$0.003^2 \times 0.9 \times 0.1 = 0.00000081$	-20
12	2	1	1	$0.003^2 \times 0.1^2 = 0.00000009$	-20
Total					1.000000

표 5 공급지장전력의 사고용량별 확률분포표

Table 5 Outage capacity state probability table.

Outage Power	State Probability	Cumulative Probability
0	0.894608	1.000000
5	0.005383	0.105392
10	0.09	0.100009
15	0.0	0.010009
20	0.010009	0.010009

표 6은 표 5에서 구한 공급지장전력의 사고용량별 확률분포함수와 주어진 부하지속곡선의 상승과정을 나타낸 표이다.

표 6 복합계통의 유효부하지속곡선을 위한 상승과정표

Table 6 Convolution processing table for CMELDC.

Outage [MW]	Composite System State Probability	Load Level	Load Duration Curve
20	0.010009	0	24
15	0.0	5	24
10	0.09	10	24
5	0.005383	15	10
0	0.894608	20	10

표 7은 상승적분하여 복합계통의 유효부하지속곡선을 구하는 모습을 표로 나타낸 것이다.

여기서는 편이상 부하지점의 최대공급전력(AP)을 최대부하치와

같다고 놓고 계산하였으므로 복합계통의 신뢰도 평가를 위한 공급지장전력량(EDNS)이 발생하는 영역은 최대부하치보다 큰 영역들인 25[MW] 이상이라고 할 수 있다.

표 7 상승적분과정과 복합계통의 유효부하지속곡선  
Table 7 Convolution integral processing and CMELDC.

No Power Level [MW]	1 0	2 5	3 10	4 20	5 Summation (CMELDC)
0	21.470592	0.129192	2.16	0.240216	24.0
5	21.470592	0.129192	2.16	0.240216	24.0
10	21.470592	0.129192	2.16	0.240216	24.0
15	8.94608	0.129192	2.16	0.240216	11.475488
20	8.94608	0.05383	2.16	0.240216	11.400126
25		0.05383	0.9	0.240216	1.194046
30			0.9	0.240216	1.140216
35				0.10009	0.10009
40				0.10009	0.10009

그림 3은 표 7과 같이 상승적분 결과 얻어진 복합계통의 유효부하지속곡선을 그림으로 나타낸 것이다.

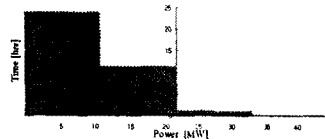


그림 3 복합계통 유효부하지속곡선  
Fig. 3 CMELDC.

또한 공급지장전력량 영역에서의 각 사고용량별 유효부하지속곡선을 누적한 모습으로 나타내면 그림 4와 같다.

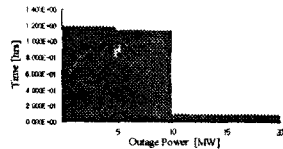


그림 4 공급지장전력량 영역에서의 복합계통 유효부하지속곡선  
Fig. 4 CMELDC within EDNS area.

한편, 본 계통에 대하여 송전계통을 고려하지 않고 유효부하지속곡선을 구해보면 그림 5와 같다.

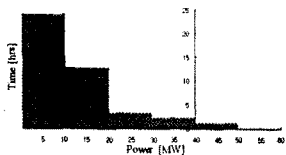


그림 5 송전계통을 고려하지 않은 유효부하지속곡선  
Fig. 5 ELDC without transmission system.

역시 송전계통을 고려하지 않고 공급지장전력량 영역에서의 유효부하지속곡선을 구해보면 그림 6과 같다.

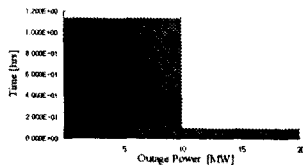


그림 6 그림 5의 공급지장전력량 영역에서의 유효부하지속곡선  
Fig. 6 ELDC within EDNS area in Fig. 5.

송전계통을 고려한 EDNS영역에서의 CMELDC인 그림 5와 발전계통만을 대상으로한 EDNS영역에서의 ELDC를 비교하면 서로

전체의 모양은 엇비슷하지만 CMELDC가 좀 더 복잡하게 계단을 이루고 있음을 알 수 있다. 이는 송전계통의 신뢰성이 포함되면서 비롯된 것이라 여겨진다.

그림 7은 이들 두 개의 ELDC차별 그림으로 나타낸 것이다.

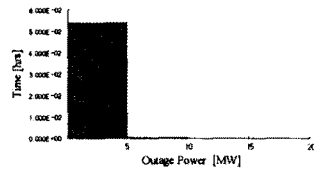


그림 7 CMELDC와 ELDC의 차  
Fig. 7 Difference between CMELDC and ELDC.

표 8은 유효부하지속곡선을 사용하여 얻어진 송전계통을 고려한 HLII에서의 신뢰도 지수 결과와 송전계통을 고려하지 않은 HLI에서의 신뢰도 지수값을 상호 비교한 것이다. 여기서 예상되는 바와 같이 HLII에서의 공급지장의 정도를 나타내는 신뢰도 지수값이 높게 나타나고 있다. 이는 송전선로의 사고율과 같은 불확실성에서 비롯된 것으로서 임의의 부하지점에서 받게되는 송전선로의 신뢰도를 의미하는 것이라고 할 수 있다.

표 8 HLI와 HLII에서의 신뢰도 지수 계산결과와 비교  
Table 8 Comparison of results on HLII with HLI.

	HLII	HLI	HLII-HLI
LOLE [hrs/day]	1.1940	1.140	0.054
EDNS [MWh/day]	12.672	12.400	0.272

#### IV. 결론

본 연구에서 개발한 복합계통의 유효부하지속곡선의 유용성을 정리하면 다음과 같다.

1. 앞으로 복합계통의 확률론적 신뢰도 평가를 더욱 상세 하고도 용이하게 할 수 있다.
2. 그리므로 각 부하지점별 신뢰도 지수 및 신뢰도 수준의 특성을 한층 상세하게 파악할 수 있게 되었다.
3. 복합계통의 신뢰도평가 및 그 응용범위가 넓어졌다. 즉, 앞으로 부하지점별 확률론적 발전시뮬레이션이나 해석적인 공급지장비용의 추정이 가능하게 되었다.

#### V. 참고문헌

- [1] X. Wang and J.R. McDonald, "Modern Power System Planning", McGraw-Hill, 1994.
- [2] Joseph Vardi and Benjamin Avi-Itzhak, "Electric Energy Generation, Economics, Reliability and Rates", MIT, 1981.
- [3] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, "Power Generation Operation and Control", John Wiley & Sons, 1984.
- [4] J.P. Stremel, R.T. Jenkins, R.A. Babb, and W.D. Bayless, "Production Costing Using the Cumulant Method of Representing the Equivalent Load Curve", IEEE, Vol.PAS-99, No.5, pp.1947-1956, 1980.
- [5] D.J. Levy and E.P. Kahn, "Accuracy of the Edgeworth Expansion of LOLP Calculations in Small Power Systems", IEEE, Vol.PAS-101, pp.986-996, April, 1982.
- [6] G. Gross, N.V. Garapic and B. McNutt, "The Mixture of Normals Approximation Technique for Equivalent Load Duration Curves", IEEE, Vol.3, pp.368-374, No.2, May, 1988.
- [7] K.Y. Song and J.S. Choi, "A New Probabilistic Generation Simulation Considering Hydro, Pumped-Storage Plants and Multi-Model" KIEE, Vol.40, No.6, pp.551-561, June 1991.
- [8] Roy. Billinton, "Composite System Reliability Evaluation" IEEE, Vol.PAS-88, No.4, pp.276-281, Feb. 1969.
- [9] Roy Billinton and Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems" Plenum Press, 1984
- [10] Roy. Billinton, etc., "A Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Data" IEEE, Vol. PS-4, No.3, pp.1238-1244, Aug. 1989.