

A Study on Construction of the CMELDC at Load Points

金 弘 植\* · 文 勝 必\* · 崔 在 錫\*\*

(Hong-Sik Kim · Seung-Pil Moon · Jae-Seok Choi)

**Abstract** - This paper illustrates a new method for constructing composite power system effective load duration curve(CMELDC) at load points. The main concept of proposed method is that the CMELDC can be obtain from convolution integral processing of the outage probabilistic distribution function of not supplied power and the load duration curve given at each load point. The effective load duration curve (ELDC) at HLI plays an important part in probabilistic production simulation, reliability evaluation, outage cost assessment and power supply margins assesment for power system planning and operation. And also, the CMELDC at HLI will extend the application areas of outage cost assessment and reliability evaluation at each load point. The CMELDC at load points using the Monte Carlo method and a DC load flow constrained LP have already been developed by authors. The effective load concept at HLI, however, has not been introduced sufficiently in last paper although the concept is important. In this paper, the main concept of the effective load at HLI which is proposed in this study is defined in details as the summation of the original load and the probabilistic loads caused by the forced outage of generators and transmission lines at this load point. The outage capacity probabilistic distribution function at HLI can be obtained by combining the not supplied powers and the probabilities of the not supplied powers at this load point. It is also expected that the proposed CMELDC can be applied usefully to research areas such as reliability evaluation, probabilistic production cost simulation and analytical outage cost assessment, etc. at HLI in future. The characteristics and effectiveness of this methodology are illustrated by case study of IEEE-RTS.

**Key Words** : Effective load, effective load duration curve, CMELDC, composite power system, reliability evaluation

1. 서 론

근래 지방화시대 및 전력산업 구조개편을 맞이하면서 각 지역별 공급여유력 평가나 공급지장비 추정 및 신뢰도 평가가 주목받고 있다. 이를 위해서는 송전계통까지 감안한 복합전력계통(HLII: Hierarchical level II)에 대한 신뢰도 평가 및 그 응용수법의 다양한 연구가 필수적이다. 이를 위해 본 저자들은 몬테카를로법 및 DC조류법을 이용하여 각 부하지점별 상태확률분포함수를 작성하고 이를 주어진 각 부하지점별 부하와 상승적분하므로써 복합전력계통의 유효부하지속곡선(가칭 CMELDC: Composite power system effective load duration curve)을 작성할 수 있는 수법을 개발하여 이미 이를 제안한 바 있다[1-4].

본 연구에서는 아직 충분히 제안하지 못한 복합전력계통의 유효부하지속곡선의 핵심이 되는 복합전력계통의 각 부

하지점별 유효부하에 대한 개념을 더욱 명확히 밝힌다. 본 연구에서 제안하는 HLI에서의 유효부하개념은 기존의 발전계통만을 의미하는 HLI(HLI: Hierarchical level I)에서의 유효부하개념의 확장이라 할 수 있다. 그러나 HLI과는 달리 HLI에서의 유효부하는 각 부하지점별로 주어진 부하와 그 부하지점에서의 최대공급전력의 사고용량확률분포함수를 계산해야 구할 수 있다. 그러나 각 부하지점별 최대공급전력의 사고용량분포함수의 계산은 쉽지 않다. 본 연구에서는 복합전력계통의 신뢰도 평가시 이용되고 있는 각 부하지점별 공급능력을 각 상정사고별로 계산함으로써 이를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 개발한 각 부하지점별 유효부하작성개념은 용이하면서도 명확하며 나아가 공급지장영역에서의 유효부하지속곡선을 얻을 수 있으므로 신뢰도 응용분야에 매우 유용하게 사용될 수 있는 중요한 개념이라 할 수 있다. 그러므로 앞으로 복합전력계통에 대한 건강도 해석과 같은 신뢰도 응용분야 및 각 부하지점별 공급지장비용 추정 등에 본 연구에서 개발한 유효부하개념을 활용할 수 있을 것으로 기대된다. IEEE RTS 계통에 대한 사례연구를 통하여 본 연구에서 개발한 방법을 이용하여 각 부하지점별 유효부하지속곡선을 작성하고 그 특성 및 유용성을 살펴보았다.

\* 正 會 員 : 慶尙大 大學院 電氣 · 電子工學部 博士課程

\*\* 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣 · 電子工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 12月 20日

最終完了 : 2000年 3月 21日

2. 복합전력계통의 유효부하지속곡선

2.1. HLI에서의 유효부하(Effective load)

HLI에서의 유효부하개념을 HLI까지 확장할 수 있는데 먼저, 그림 1의 (a)와 같은 일반적인 복합전력계통을 생각한다. 먼저, 이를 그림 1의 (b)그림처럼 각 발전기의 존재를 완전히 무시하는 대신 임의의 부하지점에 최대공급전력이 AP[MW]이며 사고상태 발생확률이  $q'$  인 가상발전기가 존재하는 것으로 등가화 할 수 있다. 그러므로 이제 HLI에서의 유효부하개념을 도입하여 그림 1의 (b)를 (c)그림처럼 크기가 AP[MW]이고 사고상태 발생확률이 0인 가상발전기와  $q$  인 출현확률을 갖고 크기가 AP[MW]인 가상부하가 그 부하지점에 동시에 존재하는 것으로 등가화 할 수 있다.

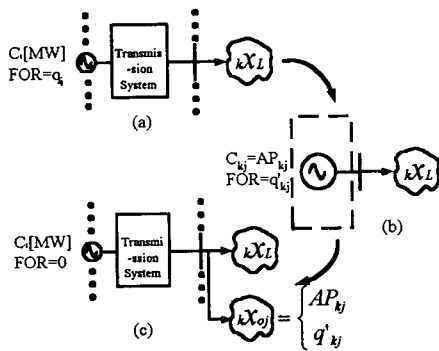


그림 1 HLI에서의 각 부하지점별 가상발전기와 계통부하 모델(유효부하)

Fig. 1 Fictitious generating units and system load model of HLI

여기서  $AP_{kj}$ 는  $k$ 부하지점에서의  $j$ 사고 상태일 때의 최대도달전력(Maximum arrival power)을 의미하며 이하 최대공급전력 또는 간단히 공급전력이라 부르기로 한다. 이때 확률적 계통부하와 사고상태를 갖는 최대공급전력에 기인한 확률적 사고부하를 합하여 복합전력계통의 유효부하라고 정의할 수 있다. 이의 확률변수를 정식화하면 식 (1)과 같다.

$$kx_e = kx_L + \sum kx_{oj} \quad (1)$$

- 단,  $kx_e$  : 복합전력계통의 유효부하 확률변수
- $kx_L$  : 확률적 계통부하의 확률변수
- $kx_{oj}$  :  $j$ 번째 사고상태에서의 최대공급전력에 의한 확률적 사고부하의 확률변수

그러므로 임의의  $k$  부하지점에서의  $j$  번째 최대공급전력까지 상승적분된 유효부하지속곡선의 확률분포함수는 식 (2)와 같이 정의될 수 있다.

$$k\Phi_j(x_e) = k\Phi_{j-1}(x_e) * kf_{oj}(x_{oj}) = \int k\Phi_{j-1}(x_e - x_{oj})kf_{oj}(x_{oj})dx \quad (2)$$

- 단,  $*$  : 상승적분을 의미하는 연산자
- $k\Phi_o(x_e - x_{oj}) = k\Phi(x_L)$
- $kf_{oj}(x_{oj})$  :  $j$ 번째 사고상태에서의 최대공급전력의 사고용량 확률분포함수

만일 최대공급전력 전체의 사고용량 확률분포함수를 알고 있으면 모든 최대공급전력까지 상승적분된 유효부하지속곡선의 확률분포함수  $k\Phi_i(x_e)$ 는 식 (3)처럼 구해진다.

$$k\Phi_i(x_e) = k\Phi_o(x_e) * kf_{oi}(x_{oi}) \quad (3)$$

- 단,  $kf_{oi}(x_{oi})$  :  $k$ 부하지점에서의 공급전력 전체의 사고용량 확률분포함수

2.2 복합전력계통의 유효부하지속곡선에서의 신뢰도 지수산정

본 연구에서 개발한 복합전력계통의 각 부하지점에서의  $k\Phi_i(x)$ 를 이용하여 전력부족확률 (LOLP $_k$ )을 식 (4)처럼 구할 수 있다.

$$LOLP_k = k\Phi_i(x)|_{x=AP_k} \text{ [pu]} \quad (4)$$

- 단,  $AP_k$  :  $k$ 부하지점의 최대도달가능공급전력 [MW]

식 (5) 같이 얻어지는 전력부족시간 기대치(Loss of load expected : LOLE)는 관측기간동안의 평균전력부족시간으로 정해지는 신뢰도지수이다. 즉, 연구기간 중 전력부족이 예상되는 시간의 기대치를 뜻한다.

$$LOLE_k = k\Phi_i(x)|_{x=AP_k} \text{ [hours/year]} \quad (5)$$

또한, 공급지장전력량의 기대치(Expected energy not supplied : EENS)는 단위 시간에 걸쳐 공급되지 못한 총 전력량의 기대치로 신뢰도기준을 정한다. 이러한 공급지장전력량 기대치는 고장 등으로 인한 전원설비의 부족과 전력공급부족에 의해 발생한다. 복합전력계통에서 각 부하지점의 공급지장전력량의 기대치는 각 부하지점에서의 유효부하지속곡선인  $k\Phi_i(x)$ 를 이용하여 식 (6)처럼 구할 수 있다.

$$EENS_k = \int_{AP_k}^{AP_k + L_{pk}} k\Phi_i(x) dx \text{ [MWh]} \quad (6)$$

2.3 상태확률

실계통에서는 발전기와 송전선로가 100개 정도일 때 상태수는  $2^{100}$ 이 된다. 이는 현재의 계산기로도 천문학적인 계산시간이 소요된다. 그러나 다행이 여러 개의 발전기나 송전선로가 동시에 탈락될 확률은 0에 가까우므로 이들을 모두 고려하여 계산할 필요는 없다. 그러므로 본 연구에서는  $k$ 부하지점에서의 상태발생확률  $Q_k$ 를 근사값이긴 하지만 계산시간면에서 실용적인 식 (7)과 같이 구하도록 하였다. 여기서  $j$ ,  $P(B_j)$  및  $P_{B_j}$ 는 각각 사고발생상태번호, 사고용량  $B_j$ 의 발생확률 및 공급지장발생의 시간확률을 의미한다.

$$Q_k = \sum_j [P(B_j)P_{B_j}] \quad (7)$$

2.4 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 한

다. 여기서는 다음과 같이 부하와 송전선로에 흐르는 전력을 미지변수로 하여 목적함수 및 제약조건을 설정하였다.

2.4.1 목적함수

본 연구에서는 그 목적이 복합전력계통에 대한 유효부하지속곡선의 작성법 개발이므로 여러개의 가능해들 중에서 최소한의 공급지장전력이 발생하는 해를 구하는 것을 목표로 삼았다. 그러므로 송전선로의 손실을 무시하고 유효전력만을 대상으로 하여 최대공급지장전력을 일으키는 부하 지점의 공급지장전력을 최소화하는 것을 목적함수로 설정할 수 있다. 이를 정식화 하면 식 (8)과 같다. 여기서  $L_{pk}$  와  $x_k$ 는 각각 k부하지점의 최대부하[MW] 및 최대공급전력 [MW]를 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

2.4.2 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 i행 j열의 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)

(나) 선로용량 제약조건

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

$$-CT_{jmax} \leq x_j \leq CT_{jmax} \quad j \in B_T \quad (10)$$

단,  $CT_{jmax}$  : j 번째 선로의 총용량 [MW]  
 $B_T$  : 송전선로 번호의 집합  
 $x_j$  : j번째 선로의 전력조류[MW]

위의 제약조건들 및 목적함수를 매개변수 $\lambda$ 를 도입하여 선형계획법으로 정식화하면 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && \lambda \\ & \text{Subjective to} && \\ & \left. \begin{aligned} & \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq CG_i \quad i \in B_B \\ & -CT_{jmax} \leq x_j \leq CT_{jmax} \quad j \in B_T \\ & (L_{pk} - x_k) / L_{pk} \leq \lambda \quad k \in B_L \end{aligned} \right\} && (17) \end{aligned}$$

그러므로 부하지점별로 식 (13) 및 식 (17)에 따라 각 상태에 대한 상태확률 및 최대공급전력을 구하여 이에 따른 사고용량 확률분포함수를 작성하고 이를 부하지속곡선과 상승적분 함으로써 복합전력계통에 대한 유효부하지속곡선을 작성할 수 있다.

3. 흐름도

본 연구에서 개발한 복합전력계통에 대한 유효부하지속곡선을 작성하는 수법의 흐름도는 그림 2와 같다. 여기서 CMELDC는 복합전력계통의 유효부하지속곡선(Composite power system effective load duration curve)을 의미한다.

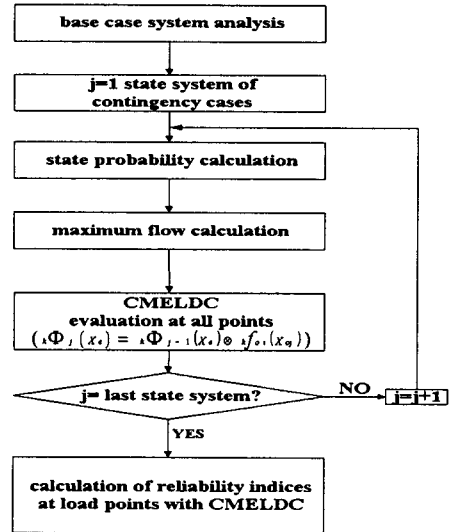


그림 2 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성 및 신뢰도 지수 산정을 위한 흐름도

Fig. 2 Flow chart for the ELDC construction and reliability evaluation of composite power system

4. 사례 연구

본 연구에서 개발한 방법의 유용성을 IEEE RTS 24Buses에 적용하여 살펴보았다. 본 연구에서는 계산의 편의상 각 부하지점의 부하지속곡선은 최대부하의 100%에서 50%까지 직선으로 가정하고 계산하였다.

각 발전모선별 발전기의 용량과 사고율 그리고 송전선로의 용량과 사고 발생빈도 사고 지속시간등에 관한 자료는 참고문헌 4에 보인 것을 인용하였다. 그림 3부터 6까지는 각 부하지점별로 얻어진 공급지장전력량 영역에서의 CMELDC를 나타낸 것이다. 이들 각 부하지점별 공급지장영역에서의 CMELDC를 이용하여 각 부하지점별 신뢰도 지수를 구하면 표 1과 같았다.

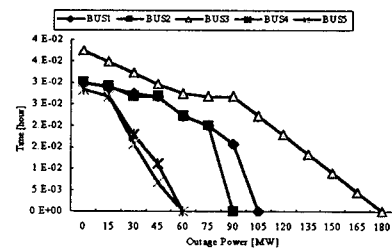


그림 3 부하지점 1,2,3,4,5 의 CMELDC  
 Fig. 3 CMELDCs at load points 1,2,3,4,5

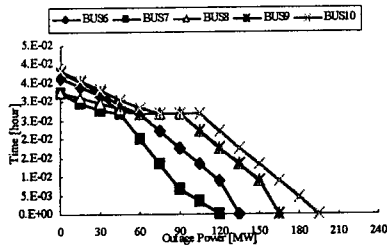


그림 4 부하지점 6,7,8,9,10의 CMELDC  
Fig. 4 CMELDCs at load points 6,7,8,9,10

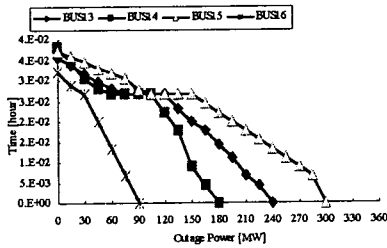


그림 5 부하지점 13,14,15,16,17의 CMELDC  
Fig. 5 CMELDCs at load points 13,14,15,16,17

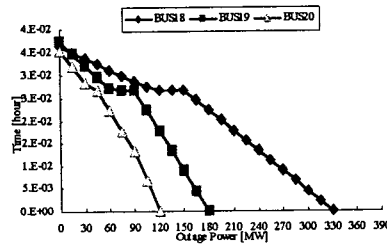


그림 6 부하지점 18,19,20의 CMELDC  
Fig. 6 CMELDCs at load points 18,19,20

표 1 각 부하지점별 신뢰도지수

Table 1 Reliability indices at the load points

| NO. Bus | LOLE[hours/day] | EENS[MWh/day] |
|---------|-----------------|---------------|
| 1       | 0.0296877       | 2.5545415     |
| 2       | 0.0299645       | 2.3204896     |
| 3       | 0.0373217       | 4.2184345     |
| 4       | 0.0282847       | 1.2585456     |
| 5       | 0.0283510       | 1.1597321     |
| 6       | 0.0362889       | 3.2711072     |
| 7       | 0.0322954       | 2.3921893     |
| 8       | 0.0324442       | 3.9518089     |
| 9       | 0.0378057       | 4.1509640     |
| 10      | 0.0382128       | 4.6842781     |
| 13      | 0.0357658       | 5.4573152     |
| 14      | 0.0380768       | 4.3760788     |
| 15      | 0.0371897       | 7.1718760     |
| 16      | 0.0320680       | 1.9136356     |
| 18      | 0.0362734       | 7.2187848     |
| 19      | 0.0372156       | 4.2105554     |
| 20      | 0.0353804       | 2.7389586     |
| Total   |                 | 63.0492952    |

### 5. 결론

본 연구에서는 기존의 HLI에서의 유효부하지속곡선의 작성법을 확장하여 송전계통까지 감안한 HLII에서의 유효부하지속곡선의 작성법을 개발하였다. 이를 위하여 본 연구의 핵심이 되는 새로운 개념인 HLII에서의 유효부하 개념을 개발하고 제안하였다. 통상, HLI에서 발전기의 사고용량확률 분포함수와 부하지속곡선을 상승적분시켜 유효부하지속곡선을 구하는 방법을 응용하여 HLII에서 부하지점별로 최대공급전력의 사고상태확률분포함수를 구하고 이를 주어진 부하지속곡선과 상승적분시켜 복합전력계통의 유효부하지속곡선을 구하도록 하였다. 본 연구에서 개발한 복합전력계통의 유효부하지속곡선의 유용성을 정리하면 다음과 같다.

1. 앞으로 복합전력계통의 확률론적 신뢰도를 더욱 상세하고도 용이하게 평가할 수 있다.
2. 그러므로 각 부하지점별 신뢰도 지수 및 신뢰도 수준의 특성을 한층 상세하게 파악할 수 있게 되었다.
3. 복합전력계통의 신뢰도평가 및 그 응용범위가 넓어졌다. 즉, 앞으로 부하지점별 확률론적 발전시물레이션이나 해석적인 방법에 의한 공급지장비용의 추정이 가능하게 되었다.
4. 복합전력계통의 신뢰도 평가결과와 송전선로를 무시한 발전계통만을 고려한 신뢰도평가결과를 상호 비교 검토함으로써 송전계통만의 확률론적 신뢰도 평가를 할 수 있게 되었다.

### 감사의 글

본 연구는 1999년도 한국전력공사지원 기초전력공학 공동연구소 지원과제 (#99-004) 중간연구결과 일부입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] X. Wang and J.R. McDonald, "Modern Power System Planning", McGraw-Hill, 1994.
- [2] 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.
- [3] 최재석 외, "복합전력계통에서의 유효부하지속곡선 작성법의 개발", 1997년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.171-173, Nov., 1997.
- [4] 최재석 외, "Monte Carlo법에 의한 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성법 개발 및 신뢰도해석", 대한전기학회 논문집, pp.509-515, Vol. 48A, No.5, May, 1999.
- [5] Roy Billinton and Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1984.
- [6] Roy Billinton and Wenyuan Li, "Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods", Plenum Press, 1994.
- [7] Jaeseok Choi, Daeho DO, Seungpil Moon & Roy Billinton, "Development of a Method for ELDC Construction in a Composite Power System", LESCOPE'99, pp.189-194, June 20-22, Halifax, Canada.