

복합전력계통의 유효부하지속곡선을 이용한 신뢰도 평가 및 공급지장비 추정

문승필\* 김홍식\* 장순용\* 최재석\* 강진중\*\* 조종만\*\*  
 \*경상대학교 전기공학과 \*\*한국전력공사

The Reliability Evaluation and Outage Cost Assessment of Composite Power System

Seungpil Moon\* Hongsik Kim\* Soonryong Jang\* Jaeseok Choi\* Jongman Cho\*\* Jinjung Kang\*\*  
 \*Gyeongsang National University \*\*Korea Electric Power Corporation

**Abstract** - This paper presents a new analytical method for assessing outage cost of composite power system with considering transmission system uncertainty. Composite power system ELDC(CMELDC) was developed and proposed from reliability evaluation of composite power system in order to analysis the outage cost on HLII. In this study, considering the characteristic of each load point, the CMELDC was used for outage cost assessment and reliability evaluation at each load point. The characteristics and effectiveness of this methodology are illustrated by the case study(IEEE-RTS 24Buses).

**Key word:** Outage cost assessment, Reliability, Composite power system

1. 서 론

전력계통의 주 기능은 수요자에게 양질의 전력을 경제적이고 신뢰성있게 공급하는 것이다. 그러나 전력계통의 경제성과 신뢰성은 상호 배타적인 성격을 지니고 있어서 항상 타협점을 찾아야한다[1].

적절한 신뢰도를 갖는 전력계통을 구축하기 위해서는 보다 정량적인 계통 운용 및 확충에 관련한 비용의 평가가 선행되어야한다. 그 해결책으로서 과거에는 공급신뢰도 수준이 전문가들의 경험이나 판단에 의해 결정되었으나 최근에는 연료비 상승과 정부 및 환경단체등의 영향으로 인해 보다 상세하고 합리적인 결정 방법이 요구되고 있다[1,2].

전력계통확충계획에는 계통의 적정수준을 유지하는 범위 내에서 발전비용을 최소로 하는 방법과 발전비용과 공급지장비용의 합으로 나타나는 총 비용을 최소로 하는 두가지 방법이 쓰이는데 이중 후자는 전력계통의 경제성과 신뢰성이 가지는 배타적 성질로 인해 최적 신뢰도 수준의 결정은 두 측면을 고려한 총비용이 최소가 되는 점에서 이루어 진다. 이를 위해서는 공급지장비의 추정이 이루어져야 하는데 특히 이를 해석적으로 산정한다든가 또는 객관적 방법으로 평가한다는 것은 매우 어렵다. 그러나 현재시점에서 완벽하지는 않다 하더라도 해석적인 산정방법을 개발한다는 것은 중요하다. 나아가 최근 각 부하지점에 있어서의 공급지장비용의 추정이 요구되고 있고 이를 위해서는 복합전력계통의 신뢰도 평가가 필수적이다.

앞서 Monte Carlo법과 직류조류계산을 제약으로 한 선형계획법을 이용하고 각 부하지점별 가중치를 둬으로써 보다 현실적인 복합전력계통의 유효부하지속곡선(CMELDC: Composite System Equivalent Load Duration Curve, 이하 CMELDC라고 한다.)작성법을 개발한 바 있다[4].

본 연구에서는 앞서 얻어진 각 부하지점별 유효부하

지속곡선으로부터 각 부하지점의 특성을 고려한 각 부하지점의 신뢰도 평가 및 공급지장비용을 추정하였다. 그리고 IEEE-RTS에 적용함으로써 본 연구에서 개발한 방법의 유용성을 살펴보았다.

2. 복합전력계통의 신뢰도 평가

2.1 CMELDC

각 부하지점에서의 유효부하는 식 (1)과 같이 정식화 되고 공급지장전력량영역에서의 유효부하지속곡선은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.[1]

$$x_e = x_L + \sum x_{oi} \tag{1}$$

단,  $x_e$ : 복합전력계통의 유효부하 확률변수  
 $x_L$ : 확률적 계통부하의 확률변수  
 $x_{oi}$ :  $i$ 번째의 공급지장전력에 의한 확률적 사고부하의 확률변수

$${}_k\Phi_i(x_e) = {}_k\Phi_{i-1}(x_e) * f_{oi}(x_{oi}) = \int {}_k\Phi_{i-1}(x_e - x_{oi}) f_{oi}(x_{oi}) dx \tag{2}$$

단,  $*$ : 상승적분을 의미하는 연산자  
 ${}_k\Phi_o(x_e - x_{oi}) = {}_k\Phi(x_L)$   
 $f_{oi}(x_{oi})$ :  $i$ 번째 공급지장전력의 사고용량 확률분포함수

만일 공급지장전력 전체의 사고용량 확률분포함수를 알고 있다면 모든 공급지장전력까지 상승적분된 유효부하지속곡선의 확률분포함수  ${}_k\Phi_i(x_e)$ 는 식 (3)처럼 구해진다[1].

$${}_k\Phi_i(x_e) = {}_k\Phi_o(x_e) * f_{oi}(x_{oi}) \tag{3}$$

단,  $f_{oi}(x_{oi})$ :  $k$ 부하지점에서 공급지장전력 전체의 사고용량 확률분포함수

2.2 공급지장전력 산정

확률론적 복합전력계통의 신뢰도는 수요·공급조건이나 발전기 및 송전선로들의 사고발생확률을 고려하여 전력공급의 적정성이 확보될 수 없는 상태를 확률론적으로 평가하는 것으로 앞절의 Monte Carlo법에서 얻어진 계통의 각 상태에 따라서 부하지점별 공급지장전력을 산정한 다. 본 연구에서는 직류법조류계산을 제약으로 한 선형계획법을 이용하여 공급지장전력을 최소화하는 것과 중요부하를 되도록 차단하지 않게끔 목적함수를 설정하였고 제약조건은 직류법조류계산식을 만족하도록 다음과 같이 설정하였다.

Object

$$\text{Min} \sum_{i \in NC} \{ W_i \sum_{k=1}^{MS} \beta_k (P_{Lik peak} - P_{Lik}) \}$$

$$f_{mi}(L_d) = a_i + b_i L_d + c_i L_d^2 \quad (6)$$

Subject to

$$K\delta - P_G + P_L = 0$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (j \neq i)$$

$$P_{Lik} = a_{ik} P_{Li} \quad (k=1 \sim MS)$$

$$0 \leq P_{Gi} \leq P_{Gi} \max$$

$$-P_{ij} \max \leq P_{ij} \leq P_{ij} \max$$

$$0 \leq P_{Li} \leq P_{Li} \max$$

- 단,  $W_i$ : 부하모선의 가중치  
 $\beta_k$ : 부하종류  $k$ 의 가중치  
 $NC$ : 부하모선  
 $K$ : 어드미턴스 행렬( $n, n$ )  
 $P_G$ : 발전량( $n, 1$ )  
 $P_L$ : 부하량( $n, 1$ )  
 $P_{ij} = \frac{\delta_i' - \delta_j'}{x_{ij}}$   
 $P_i = P_{Gi} - P_{Li}$   
 $MS$ : 부하종류의 수(일반적으로 2~3)  
 $a_{ik}$ : 모선  $k$ 부하의 비율  
 $P_{Gi} \max$ : 모선  $i$ 에서의 최대발전용량  
 $P_{ij} \max$ : 모선  $i$ - $j$ 간 선로의 최대용량[MW]  
 $P_{Li} \max$ : 모선  $i$ 의 최대부하[MW]

### 2.3 Monte Carlo 법에 의한 복합전력계통의 상태모의

복합전력계통에서 어떤 상태가 임의의 부하지점에 대하여 공급지장을 일으킬 상태의 확률을 계산하기 위하여 각 구성요소들의 상태가 성공상태와 실패상태만을 갖는다고 가정하면

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

단,  $FOR_i$ :  $i$ 번째 요소의 사고율

이때, 계통의 상태  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n\}$ 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.

### 2.4 복합전력계통의 신뢰도 지수

구해진 각 부하지점별 유효부하지속곡선을  $k\Phi_i(x)$ 라 하면 전력부족확률(LOLP $_k$ ) 및 공급지장전력량의 기대치(EDNS $_k$ ) 식(4) 및 식(5)으로써 구할 수 있다.

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

$$EDNS_k = \int_{AP_k}^{AP_k + Lp_k} k\Phi_i(x) dx \quad (5)$$

## 3. 부하지점에서의 공급지장비 추정

### 3.1 공급지장비 한계곡선

각 부하지점에서의 공급지장비 함수는 식(6)과 같은 2차식으로 표현될 수 있다[3].

- 단,  $f_{mi}$ : 부하지점  $i$ 에서의 한계공급지장비함수[\$/MWh]  
 $a, b, c$ :  $f_{mi}$ 의 계수  
 $L_d$ : 공급지장전력[MW]  
 $L_{ij}$ : 최대부하[MW]

### 3.2. 계수결정

(a)  $a_i$  계수

계수  $a_i$ 는 최대부하일때의 발전기 또는 발전모선의 한계발전비이다. 이것은 부하의 수준에 따른 변수이지만 상수로 가정하는 것이 편리하다.

(b)  $b_i$ 와  $c_i$  계수

식(6)과 같은 부하지점  $i$ 에서의 계수  $b_i$ 와  $c_i$ 를 결정하기 위하여 서로 다른 두 지점을 정하고 다음과 같이 가정한다.

전압과 주파수의 저하로 인한 순간 정전이 발생하였을 때 부족전력은 영( $L_d=0$ )이고 계통은 다른 안정된 지점에서 운용될 것이다. 이때의 가정된 지점을 기본점이라고 할때 부족전력으로 인한 정전이 발생하였을 경우의 또다른 점을 가정하면  $q$ 는 다른 부하지점이 된다. 여기서 공급지장비 함수는 각각 식(7)와 식(8)과 같이 된다.

$$\gamma_i = a_i + pb_i + p^2c_i \quad (7)$$

$$k_i\gamma_i = a_i + qb_i + q^2c_i \quad (8)$$

단,  $\gamma_i$ : 부하지점  $i$ 에서의 GDP와 전력량과의 관계계수  
 $k_i$ : 본연구에서 제시된 부하지점  $i$ 에서의 배율상수  
 여기서 계수  $b_i, c_i$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$b_i = ((\gamma_i - a_i)q^2 - (k_i\gamma_i - a_i)p^2) / (pq^2 - qp^2)$$

$$c_i = ((k_i\gamma_i - a_i)p - (\gamma_i - a_i)q) / (pq^2 - qp^2)$$

(c)  $\beta_i$  상수

만일 전력이 공급되지 않으면 수요자의 생산활동이 정지될 것이고 여기서 손실이 발생한다.  $\gamma_i$ 는 GDP와 부하지점  $i$ 에서의 에너지 수요의 관계이다.

(d)  $k_i$  상수

상수  $k$ 는 식(9)과 같이 구할 수 있다.

$$k_i = \frac{EDNS_{iq}}{EDNS_{ip}} \quad (9)$$

### 3.3 총 공급지장비

부하지점  $i$ 에서의 총 공급지장비 TOTC $_i$ (Total Outage Cost)는 식(10)에서 보인것과 같이 한계공급지장비와 EDNS $_i$ 로 구할 수 있다.

$$TOTC_i = \int_0^{Lp_i} f_{mi}(L_d)\Phi_i(L_d)dL_d \quad (10)$$

### 3.4 평균공급지장비

식(5)과 식(10)로부터 부하지점  $i$ 의 평균공급지장비를 뜻하는 IEAR $_i$ (Interrupted Energy Assessment Rate)를 식(11)처럼 구할 수 있다.

$$IEAR_i = \frac{\int_0^{Lp_i} f_{mi}(L_d)\Phi_i(L_d)dL_d}{\int_0^{Lp_i} \Phi_i(L_d)dL_d} \quad (11)$$

그림 2은 본 연구에서 제안하는 복합계통의 공급지장비를 산정하는 방법을 도식화하여 보인 것이다. 여기서 CMELDC $_i$ 는 부하지점  $i$ 에서의 모든 상태의 공급지장

전력별 확률함수를 그 지점의 부하지속곡선과 상승적분한 함수이다.

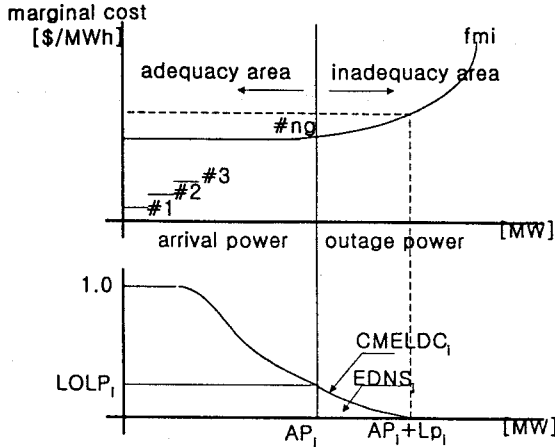


Fig. 1 Schematic diagram of the concepts for outage cost calculation at load point.

#### 4. 사례 연구

IEEE-RTS 24Buses에 적용하여 본 연구의 유용성을 살펴보았다. 본 연구에서는 공급지장비 함수를 1차로 가정하고 각각의 계수 a, b와 부하자료는 표 1에서 보인 바와 같다. 그리고, 그림 2~5는 각 부하모선별 CMEI,DC를 보인 것이다.

Table 1. Load data.

모선	최대부하(MW)	a 계수	b 계수
1	108	3	0.6
2	97	3	0.6
3	180	3	0.6
4	74	3	0.6
5	71	3	0.6
6	136	3	0.6
7	125	3	0.6
8	171	3	0.6
9	175	3	0.6
10	195	3	0.6
13	265	3	0.8
14	194	3	0.8
15	317	3	0.8
16	100	3	0.8
18	333	3	0.8
19	181	3	0.8
20	128	3	0.8

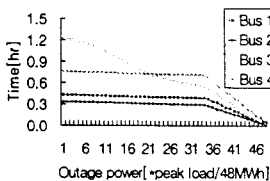


Fig. 2 CMEI,DC at load point #1 ~ #4

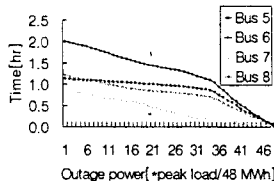


Fig. 3 CMEI,DC at load point #5 ~ #8

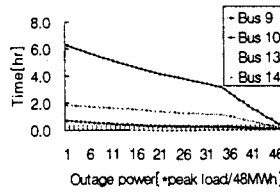


Fig. 4 CMEI,DC at load point #9 ~ #14

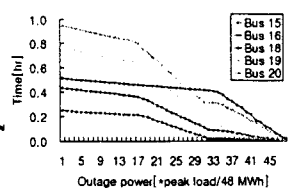


Fig. 5 CMEI,DC at load point #15 ~ #20

표 2는 각 부하지점별 신뢰도지수인 LOLE, EDNS와 총 공급지장비(TOTC)와 평균공급지장비(IEAR)를 계산한 결과이다.

Table 2. CMEI,DC and Outage Cost data.

모선	LOLE [hr/day]	EDNS [MWh/day]	TOTC[\$/day]	IEAR[\$/MWh]
1	.433E+00	.118E+00	3906.1	176.52
2	.337E+00	.817E-01	3747.9	174.67
3	.123E+01	.384E+00	8606.4	153.90
4	.761E+00	.147E+00	1933.9	189.59
5	.114E+01	.191E+00	5760.5	157.90
6	.201E+01	.525E+00	31538.6	174.51
7	.877E+00	.159E+00	2130.1	160.78
8	.121E+01	.401E+00	6674.3	177.13
9	.698E+00	.179E+00	297.7	139.85
10	.627E+01	.221E+01	857.8	121.15
13	.268E+00	.718E-01	30.1	213.91
14	.185E+01	.728E+00	2728.0	225.52
15	.251E+00	.117E+00	284.6	147.30
16	.512E+00	.116E+00	322.6	245.71
18	.433E+00	.229E+00	468.4	175.82
19	.776E+00	.216E+00	333.3	170.84
20	.947E+00	.210E+00	657.8	203.03

#### 5. 결론

본 연구에서는 송전계통을 고려한 복합전력계통의 공급지장비 산출을 위한 새로운 해석적인 방법을 제시하였다. 이 방법은 GNP나 GDP만을 이용한 방법보다 더 신빙성이 있다 할 것이다.

그리고 송전계통의 불확실성까지 고려한 복합전력계통의 각 부하지점에서의 유효부하지속곡선 작성법을 이용하여 공급지장비 및 신뢰도 산정에 적용하고 유용성을 살펴보았다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 각 부하지점별 공급지장비를 산출하는 해석적 방법을 개발하였다.
2. 각 부하지점별 공급지장비 산출을 위한 복합전력계통에서의 유효부하지속곡선 작성의 유용성이 증명되었다.
3. 부하지점에서의 평균공급지장비 예측이 가능하게 되었다.
4. 이 방법으로 공급지장비를 보다 상세하게 해석할 수 있게 되었다.

#### [참고 문헌]

1. Roy Billinton & Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1984.
2. Harry G. Stoll, "Least-Cost Electric Utility Planning", John Willy & Sons, 1989.
3. 박영문 외, "전원계획에서의 공급지장비와 한계비용의 해석적 추정에 관한 연구", KIEE, Vol.32, No.2, pp.32-42, 1983.
4. 최재석 외, "Monte Carlo 법을 이용한 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성법에 관한 연구", 1998년도 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, pp.227 - 229, May. 1998.