

KEPCO SYSTEM의 송전계통 신뢰도평가(경인,영동지역)

문승필*, 김홍식*, 왕재명**, 이철휴**, 최재석*
*경상대, **한국전력공사

Reliability Evaluation of Transmission Network of the KEPCO System(Kyongin and Yougdong Area)

Seungpil Moon*, Hongsik Kim*, Jaemyung Wang**, Chulhyu Lee**, Jaeseok Choi*
*Gyeongsang Univ., **KEPCO

Abstract - This paper evaluate reliability indices of a part of transmission network of KEPCO system. Quantitative evaluation of transmission system reliability is very important because successful operation of an electric power system in the deregulated electricity market depends on transmission system reliability management. Monte Carlo methods are often preferable, when complex operating conditions are involved and/or the number of sever events is relatively large. Monte Carlo simulation methods and CMELDC(ComPOSITE power system Effective Load Duration Curve) were used in this paper.

1. 서 론

전력산업의 흐름은 규제완화체제로 변화 중에 있으며 우리나라의 전력산업도 도매경쟁과 소매경쟁의 체제로 변화하고 있는 실정이다. 전력산업 구조개편이라는 도전 속에서 전력시장의 기존 틀은 필연적으로 변화될 것이다. 이러한 규제완화 된 전력시장 하에서의 발전계통 신뢰도 평가와 더불어 송전계통의 신뢰도평가는 더욱 중요한 부분을 차지하게 될 것이다. 계통 망사업자(ISO 또는 ITO)는 과거의 계통전체의 신뢰도기준의 설정과 더불어 이제 계통 망의 확충계획 및 운용을 위하여 송전계통만의 신뢰도기준을 일마로 할 것인가에 초점을 모아 야 할 것으로 판단된다. 그러나, 송전계통만의 신뢰도평가는 전력계통의 확률론적 신뢰도 평가 지수 및 해석수법이 이미 1960년대 말에 개발되었음에도 불구하고 대부분이 발전계통을 대상으로 한 연구이고 송전선로 사고율과 같은 송전선로의 불확실성을 고려한 연구 및 그 응용범위는 많지 않은 실정이었다. 그 이유는 복합전력계통의 신뢰도는 각 설비의 구성요소 및 각 지점의 부하크기 등과 복잡하게 관련되어 있어 그 해석이 쉽지 않기 때문이며 복합전력계통에 대한 다각적인 각도에서의 확률론적 신뢰도 평가방법의 기존연구가 부족한데서 비롯된다(1).

발전계통의 신뢰도해석을 위한 유효부하지속곡선 작성의 개념을 확장하여 발전계통뿐만 아니라 송전계통의 불확실성까지 고려한 복합전력계통의 유효부하지속곡선을 이용하면 각 부하지점별 신뢰도지수들을 산정할 수 있다 [2]. 복합전력계통의 신뢰도지수들은 당연히 발전계통의 신뢰도 지수들 보다 큰 값(신뢰도 수준이 낮음)을 가지게 되는데 이것은 송전계통의 불확실성과 용량제약에 기인된 것이므로 이들의 차를 송전계통의 신뢰도라 할 수 있다(3). 본 연구에서는 KEPCO SYSTEM의 경인 지역과 영동지역(191모선)의 각 부하지점별 신뢰도 및 송전계통의 신뢰도해석을 수행하였다. 본 연구에서 이용된 복합전력계통의 신뢰도해석에서는 Monte Carlo법이 적용되었다.

2. HLII에서의 유효부하

2.1 HLII에서의 유효부하개념

HLI에서의 유효부하개념을 확장하여 발전계통 및 송전선로의 불확실성까지 고려한 HLII에서의 유효부하의 개념은 그림 1과 같다(3).

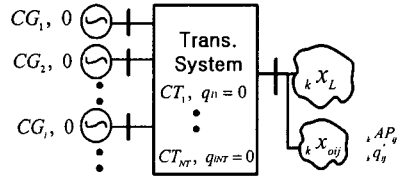


그림 1. HLII에서의 유효부하의 개념

2.2 HLII에서의 유효부하지속곡선

발전기 #1부터 #i번째 발전기까지 투입된 후의 k 부하지점에서의 유효부하지속곡선의 확률분포함수 $k\Phi_i(x_e)$ 는 식 (1)과 같이 정의될 수 있다(2).

$$\left. \begin{aligned} k\Phi_i(x_e) &= k\Phi_o(x_e) \otimes kf_{osi}(x_{oi}) \\ &= \int k\Phi_o(x_e - x_{oi})kf_{osi}(x_{oi})dx \end{aligned} \right\} (1)$$

단, \otimes : 상승적분을 의미하는 연산자

$k\Phi_o$: k부하지점에서의 LDC

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

2.3 최대도달전력 산정

임의의 부하지점에 도달할 수 있는 각 상태별 최대공급전력은 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 반영하도록 하였다. 그 목적함수와 제약조건은 식 (2)와 같다(4).

$$\left. \begin{aligned} & \text{Minimize} && \lambda \\ & \text{Subjective to} && \\ & \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq CG_i && i \in B_B \\ & -CT_{lmax} \leq x_l \leq CT_{lmax} && l \in B_T \\ & (L_{pk} - x_k)/L_{pk} \leq \lambda && k \in B_L \end{aligned} \right\} (2)$$

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 i에서의 발전기의 용량

CT_{lmax} : l 번째 송전선로의 총용량 [MW]

B_T : 송전선로 번호의 집합

x_i : i 번째 선로의 전력조류[MW]

2.4 Monte Carlo법을 이용한 복합계통의 상태확률

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 연구에서는 Monte Carlo법을 이용하였다.

복합전력계통에서 어떤 상태가 임의의 부하지점에 대하여 공급지장을 일으킬 상태의 확률을 계산하기 위하여 각 구성요소들의 상태가 성공상태와 실패상태 만을 갖는다고 가정하면 식 (3)과 같이 나타낼 수가 있다[5].

$$\left. \begin{aligned} S_i &= 0 \text{ (운전상태)}, & x &\geq \text{FOR}_i \\ S_i &= 1 \text{ (고장상태)}, & 0 \leq x < \text{FOR}_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

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. 각 구성요소들이 n 회 샘플링(충분히 큰 반복) 되었다면 FOR_i 는 식 (4)와 같이진다.

$$\text{FOR}_i = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (4)$$

그리고 상태벡터 S 가 N 회 샘플링 되었다면 상태벡터 S 의 확률 $P(S)$ 은 식 (5)와 같다.

$$P(S) = \prod_{i=1}^M \text{FOR}_i \approx n(S)q(S) \quad (5)$$

단, $P(S)$: 계통의 상태확률 벡터

M : 구성요소들의 수

$\text{FOR}_i = \begin{cases} \text{FOR} & i \\ 1 - \text{FOR} & \end{cases}$

$n(S)$: 상태벡터 S 의 샘플링 수

$q(S) = \frac{1}{N}$: 상태벡터 S 의 출현확률

N : 반복횟수

3. 각 부하지점별 신뢰도 및 송전계통의 신뢰도

3.1 각 부하지점별 신뢰도 지수

복합전력계통의 각 부하지점별 신뢰도 지수인 전력부족확률(LOLP_k) 및 공급지장전력량의 기대치(EENS_k) 등은 식 (8)에서 보인 유효부하지속곡선 ${}_k\Phi(x)$ 를 이용하여 식 (6) 및 식 (7)처럼 구할 수 있다[2].

$$\text{LOLP}_k = {}_k\Phi(x)|_{x=AP_k} \quad [\text{pu}] \quad (6)$$

$$\text{EENS}_k = \int_{AP_k}^{AP_k + L_{pk}} {}_k\Phi_i(x) dx \quad [\text{MWh}] \quad (7)$$

단, AP_k = k 부하지점의 최대도달가능 공급전력[MW]

$$\left. \begin{aligned} {}_k\Phi_i(x_e) &= {}_k\Phi_{i-1}(x_e) \otimes {}_kf_{oi}(x_{oi}) \\ &= \int {}_k\Phi_{i-1}(x_e - x_{oi}) {}_kf_{oi}(x_{oi}) dx \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

\otimes : 상승적분을 의미하는 연산자

${}_k\Phi_o(x_e - x_{oi}) = {}_k\Phi(x_L)$

${}_kf_{oi}(x_{oi})$: i 번째 공급지장전력의 사고용량 확률분포함수

L_{pk} : k 부하지점의 최대부하[MW]

3.2 Bulk 계통의 신뢰도 지수

HLII까지의 Bulk 계통의 신뢰도 지수 중 공급지장 전력량의 기대치(EENS_{HLII})는 식 (9)처럼 앞서의 각 부하지점별 신뢰도 지수중 각 부하지점별 공급지장전력량의 기대치(EENS_k)를 합하면 구할 수 있다. 그러나 Bulk 계통의 전력부족확률(LOLP_{HLII})은 그렇게 구할 수 없으므로 식 (10)과 같이 구하도록 한다[3].

$$\text{EENS}_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} \text{EENS}_k \quad [\text{MWh}] \quad (9)$$

$$\text{LOLP}_{HLII} = \sum_{k \in R} P(B_k) P_{lk} \quad [\text{pu}] \quad (10)$$

단, NL : 부하지점의 수

R : 공급지장이 발생하는 상태들의 집합

$P(B_k)$: 사고용량 B 가 발생할 확률

P_{lk} : k 상태에서의 공급지장시간확률

4. 송전계통의 신뢰도평가

앞서의 HLI 및 HLII수준의 신뢰도 지수들을 이용하여 송전계통만의 신뢰도 지수인 LOLP_{TS} 및 EENS_{TS} 를 구하면 다음과 같다[3].

$$\text{LOLP}_{TS} = \text{LOLP}_{HLII} - \text{LOLP}_{HLI} \quad [\text{pu}] \quad (11)$$

$$\text{EENS}_{TS} = \text{EENS}_{HLII} - \text{EENS}_{HLI} \quad [\text{MWh/yr}] \quad (12)$$

5. 경인·영동지역 신뢰도

KEPCO SYSTEM중 경인지역과 영동지역의 계통을 보이면 그림 2와 같다.

5.1 입력자료

대상으로 한 경인·영동지역 전력계통의 주요현황은 표 1과 같다.

표 1. 경인·영동지역의 종합자료

모선 수	191	모선
발전기 수	119	기
총 발전량	18,651	(MW)
부하 수	163	모선
총 부하량	16,511	(MW)

5.1.1 발전기 자료

입력된 발전기 자료는 표 2와 같다.

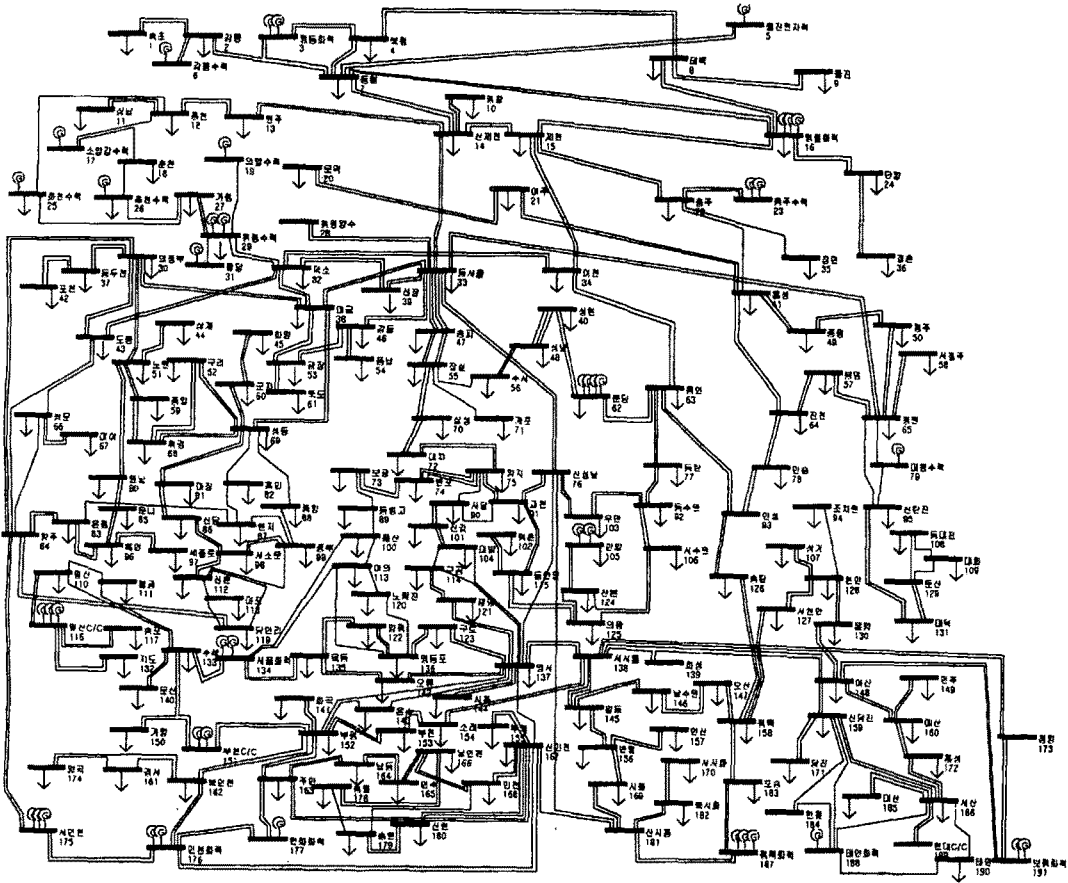


그림 2. 경인·영동지역 전력계통

표 2. 발전기 자료

구분	발전용량[MW]	발전기수
기력	8024.9	24
원자력	1900.0	2
수력	1113.2	26
복합	7613.6	67

5.1.2 송전선 자료

송전계통의 입력자료 중 가공송전선로의 입력자료는 표 3과 같다. 한편, 지중Cable의 용량은 Cable의 종류와 길이에 따라 차등 적용하였으며 사고율은 345kV Cable일 경우 0.00005로, 154kV Cable은 0.0001로 가정하였다.

표 3. 가공송전선로 자료

전압[kV]	선종	허용용량[MW]	사고율[pu]
345	A480×2	1000	0.0001
	A480×4	2000	0.0001
154	A240	143	0.0005
	A330	173	0.0005
	A410	204	0.0005
	STA240	282	0.0005
	STA330	342	0.0005
	STA410	402	0.0005

(A:ACSR, STA:STACIR)

5.1.3 부하자료

각 부하지점별 부하는 연중 대표일 부하를 이용하였으며 최대부하의 합은 16,511[MW]이다. 부하지속곡선은 최대 100%에서 최소 35%로 가정하였다.

5.2 각 부하지점별 신뢰도지수

계산결과 얻어진 각 부하지점별 신뢰도지수들 중 최대 부하 200[MW]이상의 부하지점의 신뢰도지수를 보이면 표 4와 같다.

표 4. 각 부하지점별 신뢰도지수(최대부하 200MW 이상)

모선이름	최대부하[MW]	LOLE[hr/day]	EENS[MWh/day]
봉명	260.3	0.0891	2.87241
동해	258.0	0.0867	4.63523
서수원	247.5	0.0906	2.81210
동탄	229.8	0.0892	2.48827
양지	229.5	0.0909	3.20198
부천	228.4	0.0892	2.39820
부평	225.0	0.0870	4.04640
이천	215.1	0.0880	2.14584
신당진	214.6	0.0423	0.27319
강동	212.6	0.0867	2.04755
부인천	207.0	0.0776	0.98677

경인·영동지역 중 LOLE값이 가장 작은 지역은 신당진(0.0423 (hr/day)) 가장 큰 지역은 대덕(0.0974(hr/day))으로 나타났다. 대덕지역은 덕진으로 그리고 둔산-동대전을 경유하여 남대진과도 연계되어 있어 전 계통을 대상으로 할 경우 신뢰도 지수가 많이 향상될 것으로 예상된다.

5.3 송전계통 신뢰도

경인·영동지역의 송전계통 신뢰도해석을 한 결과는 표 5와 같다. 여기서 RGTAI(Ratios of Generator - Transmission adequacy Indices)는 송전계통 신뢰도 지수에 대한 HLI의 신뢰도지수비로 정의되는 값으로써 1보다 크면 그 계통의 신뢰도는 발전계통에 영향을 많이 받고 있으며 1보다 작으면 그 계통의 신뢰도는 송전계통에 영향을 많이 받는 것을 의미한다.

표 5. 송전계통의 신뢰도 지수

구 분	LOLE(hr/day)	EENS(MWh/day)
HLII	0.08595	175.7011
HLI	0.00970	3.6821
송전계통	0.07625	172.0190
RGTAI	0.12720	0.0214

6. 결 론

경인·영동지역을 대상으로 신뢰도평가를 한 결과 가정된 사고율 아래에서는 송전계통이 신뢰도에 미치는 영향이 대단히 큰 것으로 나타났다. 이는 복합전력계통의 신뢰도평가와 송전계통의 신뢰도평가의 중요성을 보여주고 있다. 그러나 실제계통에서는 송전선로의 사고율이 보다 낮은 값을 갖는다고 사료되며 차후 실제계통에 대한 확실 자료들의 D/B구축이 완료되면 실제적인 평가가 가능하리라 사료된다.

한편, 이번 연구에서는 송전계통망에서 중요한 위치를 차지하고 있는 송전선로의 송전선로 과부하 유무에 대한 고려는 하지 못하였으나 차후 이를 고려한 방법의 개발이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소 (과제번호 : 제01-004호) 지원으로 수행된 결과의 일부임.

(참 고 문 헌)

- [1] 차준민, 김홍식, 최재석, 오광해: "규제완화된 전력시장 하에서의 송전계통 신뢰도 평가방법의 개발" 2000년, 7월, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp397-399.
- [2] Jaeseok Choi, Daeho Do, Seungpil Moon, & Roy Billinton: "Development of a Method for ELDC Construction in a Composite Power System" Large Engineering Systems Conference on Power System, June 20-22, 1999, Halifax, Canada.
- [3] Jaeseok Choi, Hongsik Kim, Seungpil Moon, Younhyun Moon and Roy Billinton: "Nodal Probabilistic Production Cost Simulation and Reliability Evaluation at Load Points of Composite Power system" Universities Power Engineering Conference, Sep. 12-14, 2001, Swansea, UK
- [4] 문승필, 최재석, 신홍교, 이순영, 송길영: "Monte Carlo법에 의한 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성법 개발 및 신뢰도해석" 대한전기학회 논문지, 1999년 5월, Vol. 48A, No. 5, pp. 508-515.

- [5] Roy Billinton and Wenyuan Li, "Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods", Plenum Press, 1994.
- [6] 김홍식, 문승필, 최재석, 노대석, 차준민: "각 부하지점별 확률론적 발전비용 산정을 위한 수치해석적 방법의 개발", 대한전기학회 논문지, 2001년 9월, Vol. 501, No. 9, pp.431-439.