

# 송전계통망의 신뢰도 평가

최 재 석

(경상대 전기전자공학부)

## 1. 서 론

최근 현대 에너지 산업의 핵심적인 위치를 차지하고 있는 전력산업에서 독점상태, 과도한 규제, 과도한 공공소유 등을 특징으로 하던 기존 개념이 규제완화와 경쟁도입의 과정을 통하여 새로운 개념으로 이해되고 있다. 이에 준하여 전 세계적으로 국가주도형 독점체제로부터 자유경쟁체제로 전환하기 위하여 각종 관련 규제가 철폐되거나 완화되고 있으며 전력산업의 구조개편도 활발히 이루어지고 있다. 국내적으로도 우리 나라 정부에서는 발전부분을 6개의 발전회사로 분리하는 등 우리 나라 전력산업구조개편을 위한 기본 계획안에 대한 법률이 국회를 통과한 바 있다. 이에 따라 전력시장의 기존 틀은 필연적으로 불가피하게 변화될 것이며, 더불어 전반적인 전력사업 운영에도 심대한 영향을 끼치게 될 것으로 보인다. 이러한 전반적인 자유경쟁체제는 어디까지나 시장경제논리에 근거하고 있으므로 전력산업의 운영 및 계획의 기반체계를 공급자와 수요자의 쌍방거래 일치점에서 결정되도록 시장기능에 맡기고 있다.

이에 따라 계통 망사업자는 과거의 계통전체의 신뢰도기준의 설정과 더불어 이제 계통 망의 확충계획 및 운용을 위하여 송전계통망의 신뢰도 평가를 어떻게 실시하고 및 그 기준을 얼마로 할 것인가에 초점이 모아지고 있다. 그 이유들 중 하나로는 계통 망의 확충계획은 건설을 위한 필요기간을 갖고 있는데 비해서 실 시간적으로 운용되는 자유경쟁시장에서는 부하지점별로 선택 가능한 품질을 지닌 전력에너지의 공급이 이루어져야 하므로 과연 이를 어떻게 조화롭게 계획하고 운용해야 할 것인가가 구조조정이후에 자유경쟁시장체제에서 계통 망사업자가 계획 및 운용측면에서 첫 번째로 갖게 되는 과제이기 때문이다. 송전계통망의 신뢰도 평가 및 그 기준 설정은 합당한 이론적 배경을 토대로 최적의 기준의 정량적 값을 찾아내야 할 것이지만 송전계통이 갖고 있는 선로제약조건 및 각 모선의 전압제약조건 등으로 인하여 현실적으로 이 작업은 매우 어려운 과제이다. 더구나 송전계통의 주요요소들의 불확실성까지 감안한 최적의 기준을 찾는 문제는 현재의 기술수준으로는

해결하기가 불가능한 일일지도 모른다. 이를 위해서는 자유경쟁시장에서 전력에너지의 신뢰도 및 품질의 평가 및 관리 기술의 이론적 밑받침이 선행되어야 하며 이에 대한 세밀한 연구가 있어야 한다. 또한, 그 평가 및 기준설정과 관련한 기술은 그 문제 특성상 전력경제이론, 전력계통신뢰도 평가이론, 최적화이론 및 전력계통운용 및 계획에 대한 전반적인 개념을 요구하기 때문에 전력계통공학의 종합적이고도 최고급의 기술이라 할 수 있다.

이와 같이 계통 망을 성공적으로 운용하기 위해서는 규제완화조건에서 합리적인 계통계획을 수립할 수 있는 평가방법의 개발 및 기준에 대한 이론적 검토를 실시하여 하루 빨리 우리 나라 계통에 합당한 송전계통망 신뢰도 평가방법 및 그 기준을 마련할 필요가 있다. 특히 송전선로, 변전소 주요 기기 등의 사고율을 고려한 확률론적 계통계획기법을 적용하기 위해서는 외국 선진국의 사례연구 및 확률론적 계통계획기준에 대한 적절한 이론적 검토가 선행되어야 하고 나아가 우리 나라 실정에 맞는 평가 기법의 기술개발이 곧 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 특집에서는 송전계통망의 신뢰도 평가방법들 중 한가지를 소개하고 이를 이용하여 소규모계통에 적용한 사례연구를 통하여 그 타당성을 간단히 살펴본 뒤 향후 이문제와 관련하여 해결해야할 연구문제들을 모색하기로 한다.

## 2. 규제완화된 전력시장 하에서의 전력계통의 신뢰도 평가

소비자에게 전기에너지를 정전없이 공급한다는 것은 전력계통의 설계자나 운용자에게 모두 기본적인 개념이다. 그러나 전력계통구성요소의 우발적 사고와 경제적제약으로 인하여 정전없이 전기에너지를 공급한다는 것은 불가능하므로 적정수준의 공급여유력과 신뢰도의 기준이 필요하며 전력회사들은 전력공급에 있어 이러한 신뢰도 적정수준을 계속적으로 유지·확보하여야 한다. 전력계통의 적정공급능력 및 신뢰도평가 수법에는 해석모델에 따라 결정론적 방법



과 구성요소의 사고율등을 감안하는 확률론적인 방법이 있다. 확률론적 방법은 1930년대부터 시도되었으며 1947년에 확률론적인 신뢰도지수인 LOLP(Loss of load probability)와 F&D(Frequency and duration)의 개념 및 계산방법이 제시되면서 많은 연구가 이루어 졌다. 1960년대 이후 선진국들이 대형의 정전사고를 경험하면서부터 전력시스템의 신뢰도에 대한 관심은 더욱 커졌다. 확률론적 방법중에서 정확한 결과를 얻을 수 있는 해석적 방법은 미국, 캐나다, 영국등을 중심으로 연구되어왔으며 정확도는 다소 떨어지지만 대규모계통에서 오히려 실용성이 높다고 인정되고 있는 Monte Carlo법이 프랑스를 중심으로 개발되어져 내려오고 있다. 그러나 이러한 연구들은 모두 주로 발전계통을 대상으로 한 연구이고 송전선로사고율과 같은 송전선로의 불확실성을 고려한 연구 및 그 응용범위는 많지 않은 실정이다. 송전계통까지 감안한 복합전력계통의 확률론적 신뢰도평가 지수 및 해석수법이 이미 1960년대 말에 개발되었음에도 불구하고 그 응용 및 활용은 여전히 매우 미흡한 실정이다. 그 이유는 복합전력계통의 신뢰도가 각 설비의 구성요소 및 각 지점의 부하크기와 복잡하게 관련되어 있어 그 해석이 쉽지 않기 때문이며 복합전력계통에 대한 다각적인 각도에서의 확률론적 신뢰도 평가방법의 기존연구가 부족한데서 비롯된다. 그림 1은 복합전력계통의 신뢰도평가분야와 관련하여 시급히 해결해야 하는 과제들의 개념도를 나타낸 것이다.

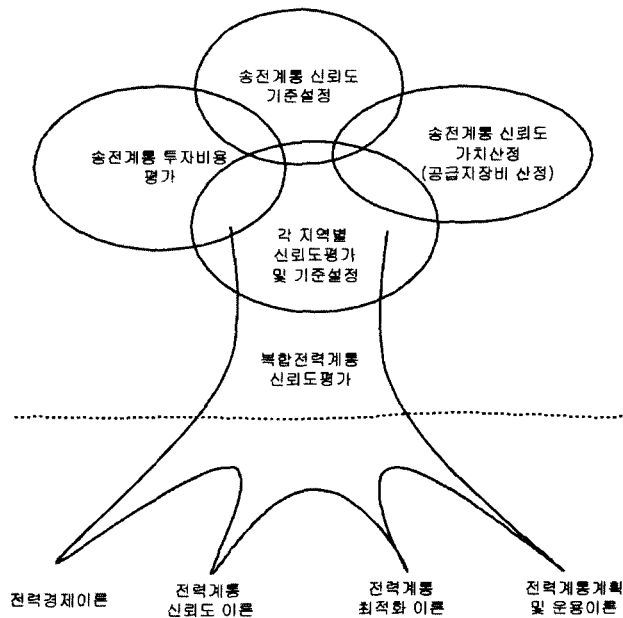


그림 1. 복합전력계통의 신뢰도평가 관련분야 개념도.

### 2.1 전력계통의 계층구조

통상 전력계통을 그 구성요소, 그리고 운영 및 계획 특성 상 그림 2와 같이 분류하여 각종 평가 및 해석을 실시하고 있다. 여기서 보는 것처럼 발전계통 및 송전계통을 포함한

복합전력계통(HLII)까지의 신뢰도 지수와 발전계통만의 신뢰도 지수의 차는 곧 송전계통만의 신뢰도 지수가 될 수 있음을 알 수 있다[8,9].

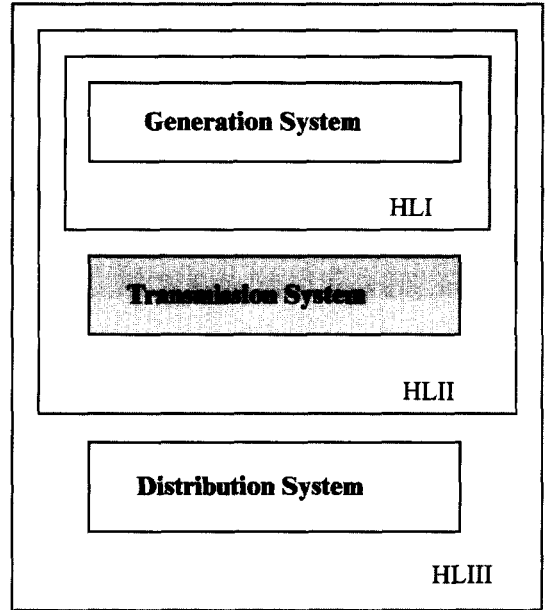


그림 2. 전력계통의 계층구조.

### 2.2 HLI의 신뢰도 평가

HLI에서의 유효부하지속곡선  $HLI\Phi(x)$ 를 이용하여 발전계통만의 신뢰도 지수들인 전력부족확률( $LOLP_{HLI}$ ; Loss of load expected) 및 공급지장전력량의 기대치( $EENS_{HLI}$ ; Expected energy not supplied) 등을 식 (1) 및 식 (2)처럼 구할 수 있다.

$$LOLP_{HLI} = HLI\Phi(x)|_{x=IC} \text{ [pu]} \quad (1)$$

$$EENS_{HLI} = \int_{IC}^{IC+Lp} HLI\Phi(x) dx \text{ [MWh]} \quad (2)$$

단,  $IC$  = 총설비용량[MW]

$$\begin{aligned} HLI\Phi(x_e) &= HLI\Phi_{i-1}(x_e) \otimes HLI\Phi_{oi}(x_{oi}) \\ &= \int HLI\Phi_{i-1}(x_e - x_{oi}) HLI\Phi_{oi}(x_{oi}) dx \end{aligned} \quad (3)$$

$\otimes$  : 상승적분을 의미하는 연산자

$$HLI\Phi_{oi}(x_e - x_{oi}) = HLI\Phi(x_L)$$

$HLI\Phi_{oi}(x_{oi})$  :  $i$ 번째 공급지장전력의 사고용량 확률분포함수

$Lp$  : 계통 최대부하[MW]

### 2.3 HLII의 신뢰도 평가

HLII에 대한 수많은 신뢰도 지수가 현재까지 개발되어져 있다[9,10]. HLII에 대한 이들 신뢰도 지수는 그 평가목적에

따라 각 부하지점별에 대한 것 및 Bulk 계통에 대한 것등 크게 2가지로 분류되어진다. 현재까지 개발된 가장 일반적 이면서 대표적인 신뢰도 지수들인  $LOLE$ ,  $EENS$ ,  $EDNS$  (Expected demand not supplied) 및  $ELC$ (Expected load curtailments) 들이 아래와 같이 산정될 수 있다.

(1) 각 부하지점별 신뢰도 지수

복합전력계통의 각 부하지점에서의 유효부하지속곡선  ${}_k\Phi(x)$ 를 이용하여 각 부하지점별 전력부족시간기대치 ( $LOLE_k$ ) 및 공급지장전력량의 기대치( $EENS_k$ ) 등을 식 (4) 및 식 (5)처럼 구할 수 있다[10-12].

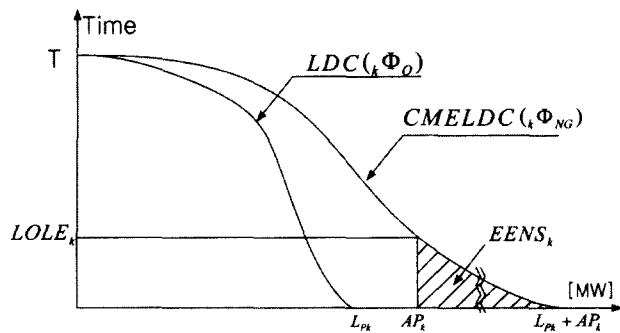


그림 3. 부하지점 k에서의 유효부하지속곡선과 신뢰도 지수.

$$LOLE_k = {}_k\Phi_{NG}(x)|_{x=AP_k} \text{ [day]} \quad (4)$$

$$EENS_k = \int_{AP_k}^{AP_k + L_{pk}} {}_k\Phi_{NG}(x) dx \text{ [MWh]} \quad (5)$$

단,  $AP_k$  = k부하지점의 최대도달가능 공급전력 [MW]

$$\begin{aligned} {}_k\Phi_{NG}(x_e) &= {}_k\Phi_o(x_e) * {}_kf_{osi}(x_{oi}) \\ &= \int {}_k\Phi_o(x_e - x_{oi}) {}_kf_{osi}(x_{oi}) dx_{oi} \end{aligned} \quad (6)$$

단,  ${}_k\Phi_o = \#k$  부하지점에서의 부하지속곡선

${}_kf_{osi}$ : #k 부하지점에서의 #1에서 #i 발전기까지 운전된 경우의 종합적인 가상발전기(Synthesized fictitious generator)의 사고용량 확률분포 함수

(2) Bulk 계통의 신뢰도 지수

HLII까지의 Bulk 계통의 신뢰도 지수 중 공급지장전력량의 기대치( $EENS_{HLII}$ )는 식 (7)처럼 앞서의 각 부하지점별 신뢰도 지수중 각 부하지점별 공급지장전력량의 기대치 ( $EENS_k$ )를 합하면 구할 수 있다. 그러나 Bulk 계통의 전력 부족확률( $LOLE_{HLII}$ )은 그렇게 구할 수 없으므로 식 (9)와 같이 구하도록 한다.

$$EENS_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} EENS_k \text{ [MWh]} \quad (7)$$

$$ELC_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} ELC_k \text{ [MW/cur.yr]} \quad (8)$$

$$LOLE_{HLII} = EENS_{HLII} / ELC_{HLII} \text{ [day]} \quad (9)$$

단, NL : 부하지점의 수

$$ELC_k = EENS_k / LOLE_k \text{ [MW/cur.yr]}$$

## 2.4 송전계통망의 신뢰도평가

앞서의 HLI 및 HLII수준의 신뢰도 지수들을 이용하여 송전계통망의 신뢰도 지수인  $LOLE_{TS}$  및  $EENS_{TS}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$LOLE_{TS} = LOLE_{HLII} - LOLE_{HLI} \text{ [pu]} \quad (10)$$

$$EENS_{TS} = EENS_{HLII} - EENS_{HLI} \text{ [MW/yr]} \quad (11)$$

또한, 연구대상기간 동안의 평균공급부족전력을 의미하는  $EDNS$ (Average Expected Demand Not Served)와 공급부족이 발생하는 시간동안의 공급부족전력을 의미하는  $ELC$  (Expected Load Curtailments)를 구하면 각각 식 (12) 및 식 (13)과 같다.

$$EDNS_{TS} = EENS_{TS} / T \text{ [MW/ pu.yr]} \quad (12)$$

$$ELC_{TS} = EENS_{TS} / LOLE_{TS} \text{ [MW/ pu.cur.yr]} \quad (13)$$

단, T: 연구대상기간

## 3. 해석적 방법과 Monte Carlo 법

HLI의 신뢰도 평가는 HLII 에서의 신뢰도 평가의 송전계통이 무한대의 송전용량 및 100 %의 신뢰도를 갖는 경우라고 가정할 특별한 경우라고 할 수 있다. 그러므로 HLII에 대한 신뢰도 평가방법들을 살펴보면 다음과 같다.

### 3.1 해석적 방법

(1) 상태확률

실계통에서는 발전기와 송전선로가 100개 정도일 때 상태수는  $2^{100}$ 이 된다. 이는 현재의 계산기로도 천문학적인 계산시간이 소요된다. 그러나 다행히 여러 개의 발전기나 송전선로가 동시에 탈락될 확률값은 0에 가까우므로 이들을 모두 고려하여 계산할 필요는 없다. 그러므로 근사값이긴 하지만 계산시간 면에서 현실적인 식 (14)를 이용하는 것이 유리하다.

$${}_kq_j = \begin{cases} \sum_{v \in e_j} [P(B_v)P_b] & n(\bar{e}_j) \leq 5 \\ 0 & n(\bar{e}_j) > 5 \end{cases} \quad (14)$$



단,  $\bar{e}_j$  : 상태 #j에서의 사고요소의 집합

$n(e_j)$  :  $\bar{e}_j$  집합의 사고요소의 수

$P(B_j)$  : 사고용량  $B_j$ 의 확률

$P(B_{ij})$  : 상태 #j에서의 공급지장시간확률

(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 (15)와 같다. 여기서  $L_{pk}$ 와  $x_k$ 는 각각 k부하지점의 최대부하[MW] 및 최대공급전력[MW]를 의미한다.

$$\text{Minimize } \{ \text{Max}(L_{pk} - x_k) / L_{pk} \} \quad k \in B_L \quad (15)$$

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 (16)과 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.

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq CG_i \quad i \in B_B \quad (16)$$

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 (17)과 같다.

$$-CT_{jmax} \leq x_j \leq CT_{jmax} \quad j \in B_T \quad (17)$$

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 (18)과 같다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Minimize } \lambda \\ \text{Subjective to} \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq CG_i \quad i \in B_B \\ -CT_{jmax} \leq x_j \leq CT_{jmax} \quad j \in B_T \\ (L_{pk} - x_k) / L_{pk} \leq \lambda \quad k \in B_L \end{array} \right\} \quad (18)$$

그러므로 부하지점별로 식 (6) 및 식 (18)에 따라 각 상태에 대한 상태확률 및 최대공급전력을 구하여 이에 따른 사고용량 확률분포함수를 작성하고 이를 부하지속곡선과 상승적분 함으로써 복합전력계통에 대한 유효부하지속곡선을 작성 할 수 있다. 흐름도는 그림 4와 같다.

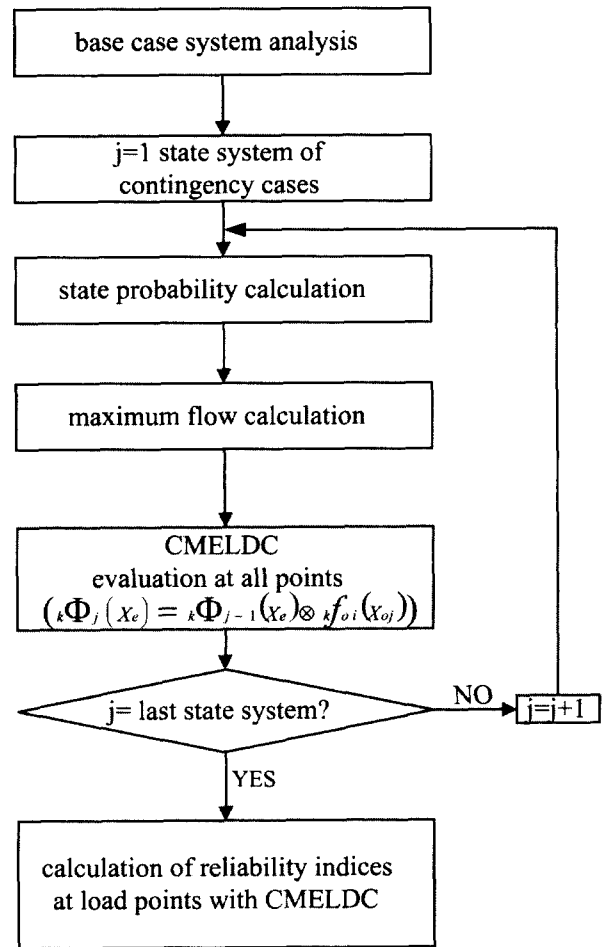


그림 4. 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성 및 신뢰도 지수 산정을 위한 흐름도

3.2 Monte Carlo

(1) 상태확률

복합전력계통에서 어떤 상태가 임의의 부하지점에 대하여 공급지장을 일으킬 상태의 확률을 계산하기 위하여 각 구성요소들의 상태가 운전상태와 고장상태 만을 갖는다고 가정하면 식 (19)과 같이 모의된다.

$$\begin{cases} S_i=0 \text{ (운전상태)} & x \geq FOR_i \\ S_i=1 \text{ (고장상태)} & 0 \leq x < FOR_i \end{cases} \quad (19)$$

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 상태벡터  $S$ 가 모의된다.

각각의 요소를  $n$ 번 모의할 경우 각 요소들의 사고율은 식 (20)과 같다.

$$FOR_i \approx \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (20)$$

$N$ 번의 상태모의를 할 경우 어떤 상태벡터  $S$ 가 1회 나왔다고 하면 이것의 확률은 식 (21)과 같다.

$$q(S) = \frac{1}{N} \quad (21)$$

이 모의중 상태벡터  $S$ 가 출현한 횟수를  $n(S)$ 라고 하면 이 상태의 출현확률은  $n(S)q(S)$ 가 되고 반복횟수를 무한히 크게 하면 출현확률은 식 (22)와 같이 되며 이는 해석적인 방법으로 구할 때의 출현확률에 수렴한다.

$$P(S) = \prod_{i=1}^M FORS_i \approx n(S)q(S) \quad (22)$$

단,  $P(S)$ : 상태벡터  $S$ 의 출현확률  
 $M$ : 구성요소의 수  
 $FORS_i = \begin{cases} FOR_i & (S_i=1, \text{고장상태}) \\ 1-FOR_i & (S_i=0, \text{운전상태}) \end{cases}$   
 $n(S)$ : 상태벡터  $S$ 가 출현한 횟수

(2) 최대공급전력 산정

임의의 계통상태에서 전력조류, 부하지점에서의 최대도달 가능전력 및 공급전력량을 산정하기 위해서는 최적화모델에 의한 최적조류계산을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 아래와 같이 직류법조류계산에 기초한 전력조류계산을 실시하여 각 상태에서의 전력조류, 최대가능전력 및 공급전력

량을 각각 구하도록 하였다.

1) 목적함수

복합전력계통의 신뢰도해석을 위해서 설정하는 목적함수로는 ① 공급지장모선 개소의 수를 최소로 하는 방법, ② 최대공급지장전력을 최소로 하는 방법 등이 있으나 본 연구에서는 중요한 부하는 가능한 한 차단하지 않고 전 계통의 부하차단을 최소로 함을 목적함수로 삼기로 하고 이를 식 (23)과 같이 설정하였다[7].

$$\text{Minimize } \sum_{i \in NC} \{ W_i \sum_{k=1}^{MS} \beta_k (P_{L,ik \text{ peak}} - P_{L,ik}) \} \quad (23)$$

단,  $P_{L,ik \text{ peak}}$ : 모선  $i$ 의  $k$ 부하종류의 최대부하[MW]  
 $MS$ : 부하종류의 수 (2~3개)  
 $P_{L,ik}$ : 모선  $i$ 의  $k$ 부하종류를 공급할 수 있는 공급부하전력(독립변수)[MW]

여기서,  $W_i$ 는  $i$ 번째 부하모선의 중요도를 나타내는 가중치이며  $\beta_k$ 는 각 부하모선마다 다른 종류의 부하들이 있으므로 이러한 종속된 부하의 중요도를 나타내는  $k$ 부하종류의 가중치이다. 그리고  $NC$ 는 부하모선의 집합을 나타낸다[7].

2) 제약조건

식 (24)는 전력상차각 관계식을 응용한 직류조류제약, 식 (25)는 각 모선의 수급전력제약 그리고 식 (26)은 부하지점별 부하의 종류의 비를 나타낸다. 식 (27)~(29)는 발전기용량, 송전선로용량, 부하의 한계를 나타내는 제약조건이다.

(1) 전력상차각 제약

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1,n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n,1} & k_{n,2} & \dots & k_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G1} - P_{L1} \\ P_{G2} - P_{L2} \\ \vdots \\ P_{Gn} - P_{Ln} \end{bmatrix} \quad (24)$$

단,  $k_{ij} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{x_{ij}} \quad (j \neq i)$   
 $x_{ij}$ : 모선  $i$ 와 모선  $j$ 사이의 송전선로의 리액턴스[Ω]  
 $P_{Gi}$ : 모선  $i$ 의 발전량 [MW]  
 $P_{Li}$ : 모선  $i$ 의 공급부하전력 [MW]

(2) 각 모선의 수급전력 제약

$$P_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (j \neq i) \quad (25)$$

단,  $P_i$ : 모선  $i$ 의 모선전력 (=  $P_{Gi} - P_{Li}$ )[MW]  
 $P_{ij}$ : 모선  $i$ 와 모선  $j$ 사이의 송전선로에 흐르는 선로조류[MW]

(3) 부하지점별 부하종류의 구성비 제약

$$P_{L,ik} = \alpha_{ik} P_{Li} \quad (k=1 \sim MS) \quad (26)$$

단,  $\alpha_{ik}$ : 모선  $i$ 의  $k$ 부하의 구성비 [pu]  
 $\sum_{k=1}^{MS} \alpha_{ik} = 1.0$

(4) 발전기 출력상한 제약

$$0 \leq P_{Gi} \leq P_{Gi} \max \quad (27)$$

단,  $P_{Gi} \max$  : 모선  $i$ 에서의 최대발전용량[MW]

(5) 송전선로 용량제약

$$-P_{ijmax} \leq P_{ij} \leq P_{ijmax} \quad (28)$$

단,  $P_{ij}$  : 모선  $i$ 와 모선  $j$ 간 선로의 조류[MW]

$P_{ijmax}$  : 모선  $i$ 와 모선  $j$ 간 선로의 최대용량[MW]

(6) 부하의 한계제약

$$0 \leq P_{Li} \leq L_{pi} \quad (29)$$

단,  $L_{pi}$  : 모선  $i$ 의 최대부하[MW]

일반적인 직류법조류계산식에서는 전력과 위상각의 관계식을 이용하여  $n$ 개의 모선중  $n-1$ 개의 전력을 지정하고 나머지 한 개의 모선(Swing모선)의 전력은 계산과정에서 구해낸다. 본 연구에서는  $n-1$  대  $n-1$ 의 행렬을  $n$  대  $n$ 의 행렬로 확장하여 직류법조류계산을 선형계획법의 제약조건으로 설정이 가능토록 하였다. 그러므로 임의의 주어진 계통상태에 대하여 식 (24)~(29) 제약조건을 만족하면서 식 (23)을 최소화하는 각 모선의 부하종류별 공급부하전력  $P_{Lik}$ , 공급부하전력  $P_{Li}$ , 그리고 선로조류량  $P_{ij}$  등을 선형계획법을 이용하여 구할 수 있다. 이의 흐름도는 그림 5와 같다.

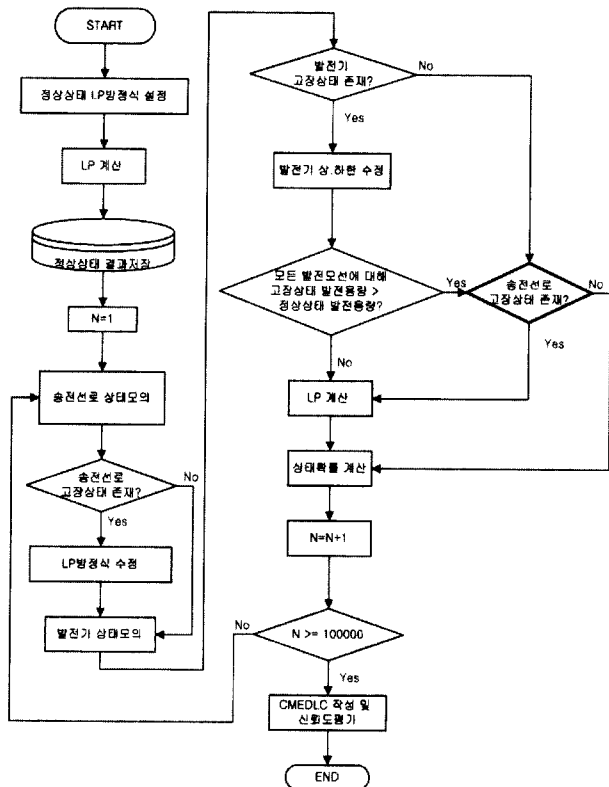


그림 5. Monte Carlo 법에 의한 복합전력계통의 신뢰도 산정 흐름도

## 4. 사례 연구

제한된 수법의 유용성을 보이기 위하여 그림 6과 같은 MRBTS에 적용하여 보았다[9,10].

HLI과 HL2의 신뢰도 지수의 차는 표 1에 보인바와 같으며 이 차이는 송전계통만의 신뢰도 지수를 나타낸다. 본 사례연구에서, 편의상 부하는 일일부하로 가정하였고 송전선로 1회선을 증설하였을 경우와 발전기의 증설에 대한 신뢰도변화를 보인다.

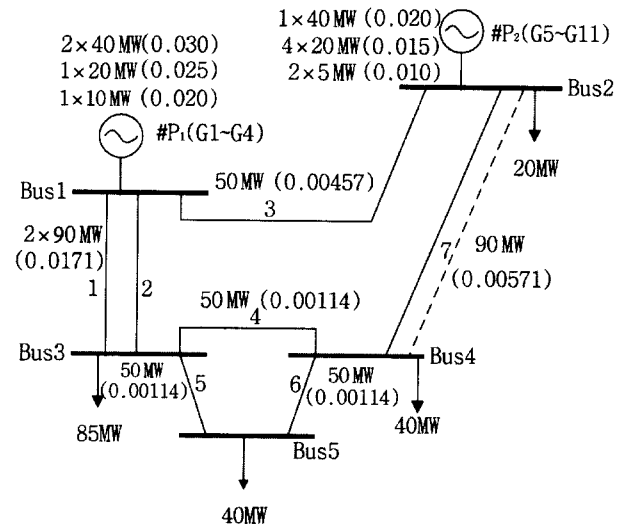


그림 6. 사례연구-MRBTS.

표 1. Reliability Indices - Case 1(base case)

Index	Level	HLII	HLI	Transmission system	RGTAI
LOLE [hrs/day]		0.0299	0.0171	0.0128	1.336
EENS [MWh/day]		0.7769	0.3836	0.3933	1.025
ELC [MW/cur.day]		26.0137	22.3822	30.7266	0.728

표 2. Reliability Indices (Case 2) (case of acct added at T/L7 between buses #2 and #4)

Index	Level	HLII	HLI	Transmission system	RGTAI
LOLE [hrs/day]		0.0713	0.0171	0.0002	85.5
EENS [MWh/day]		0.3895	0.3836	0.0059	65.5
ELC [MW/cur.day]		22.5446	22.3822	29.5	0.76

표 2는 모선 #2와 #4간에 송전선로를 1회선 증설할 경우의 송전계통의 신뢰도 지수변화를 보인 것이다. 이것은 표 1에서 보인 Case I(Standard case)과 비교할 때 HLI의 신뢰도 수준의 변화가 없는데 비하여 HLII의 신뢰도 수준이 상당히 향상되었음을 보여주고 있으며 앞으로 규제완화된 전력시장 하에서 망사업자의 송전계통망의 운전 및 계획시 유용하게 사용될 것으로 기대된다. 참고로, 표 1~3에서 보인 RGTAI(Ratios of generation-transmission adequacy indices)는 발전계통-송전계통의 적정도를 나타낸 것이다.

발전기 증설에 따른 효과를 보이기 위하여 모선 #1에 40MW를 추가하여 그 결과를 표 3에 나타내었다. 표 3을 표 1의 Case I과 비교할 때 HLI의 신뢰도 수준은 급격히 향상하였으나 HLII의 신뢰도 수준은 상대적으로 거의 변하지 않는다는 것을 알 수 있다.

위의 두 사례연구를 통하여 송전계통의 변화는 HLI의 신뢰도 수준에 영향을 미치지 않으나 발전계통의 변화는 HLI와 HLII 모두의 신뢰도 수준에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

표 3. Reliability Indices (Case 3)  
(case of a 40MW generator added at bus #1)

Index \ Level	HLII	HLI	Transmission system	RGTAI
LOLE [hrs/day]	0.0023	0.0006	0.0017	0.353
EENS [MWh/day]	0.0834	0.0140	0.0694	0.202
ELC [MW/cur.day]	36.0003	22.2272	40.8235	0.544

그림 7~9는 (n-1)안전도 기준에 따른 확률론적 혼잡도(Congestion)를 구하기 위한 각 부하시점별 송전계통의 신뢰도 지수를 나타낸 것이다. 각 부하시점별 송전계통의 신뢰도 지수들은 구조개편하에서 ISO 또는 ITO를 위하여 유용하게 사용될 수 있을것으로 기대된다.

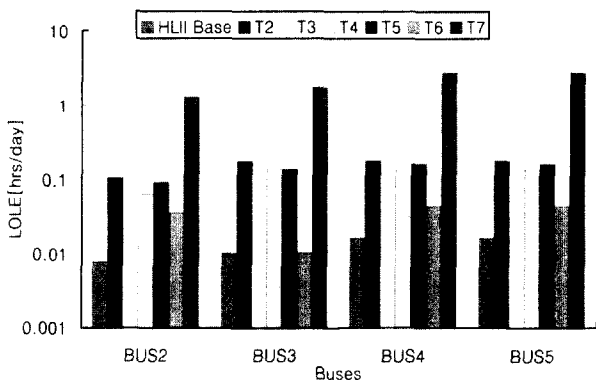


그림 7. 송전계통의 각 부하시점별 LOLE<sub>TS</sub>.

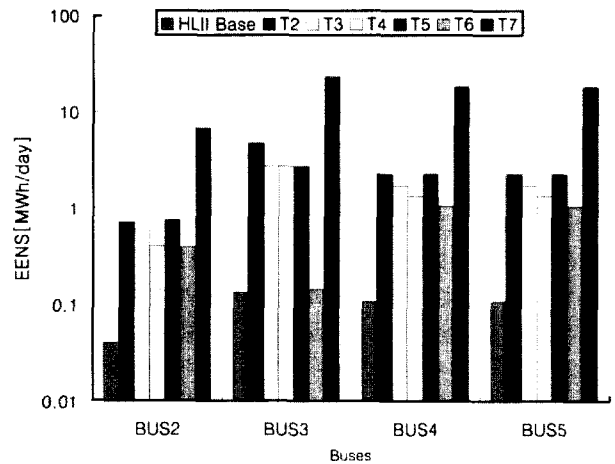


그림 8. 송전계통의 각 부하시점별 LOLE<sub>TS</sub>.

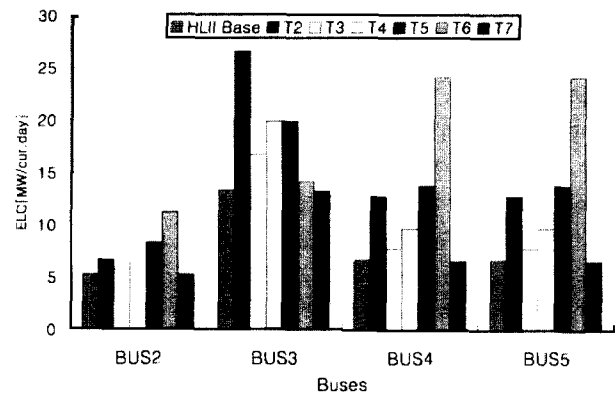


그림 9. 송전계통의 각 부하시점별 LOLE<sub>TS</sub>.

### 5. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 송전계통만의 신뢰도를 평가할 수 있는 알고리즘 중 Adequacy 부분으로 한정하여 그 한 방법을 제시하였다. 제시하는 알고리즘의 주된 개념은 복합전력계통(HLII)의 신뢰도 지수와 발전계통(HLI)만의 신뢰도 지수와의 차는 곧 송전계통만의 신뢰도 수준을 의미할 수 있는데 있다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 어느 송전선로의 증강이 송전계통의 전체 신뢰도를 얼마나 상승시키는지를 정량적으로 분석할 수 있으므로 송전계통의 계획 및 운용에 합리성을 기할 수 있는 자료를 제공해줄 수 있다.
- 2) 전원의 증가나 발전기의 합리적인 운용은 역시 미약하지만 송전계통의 신뢰도를 다소 상승시킬 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) 각 송전선로의 고장시 송전계통전체에 미치는 신뢰도 수준을 산출할 수 있으므로 각 송전선로의 신뢰도 측면에서의 감도분석이 가능하다.
- 4) 나아가 각 송전선로가 각 부하시점별로 얼마나 신뢰도 수준에 영향을 미치는지를 상세하게 검토할 수 있으므로



차후 각 송전선로의 신뢰도를 가치로 평가할 수 있는 길을 마련하였다.

본 알고리즘은 앞으로 규제완화된 전력시장 하에서 신뢰성을 갖는 송전계통망을 계획하고 운용하는데 다소 도움이 될 수 있으리라 기대된다. 그러나 여기서는 조류를 유량법으로 계산하였으나 AC조류법을 이용하면 전압의 크기나 선로손실까지 감안한 송전계통 신뢰도평가가 이루어질 것으로 사료되며 차후 이에 대한 연구가 유망된다.

근래 본 연구와 유사한 목표로 국외에서는 적극적으로 연구를 진행하고 있다. 그러나 규제 완화된 전력시장에서의 전력계통 신뢰도 평가 방법 및 프로그램 개발의 종합적이고도 체계화된 보고서는 아직 나와있지 않다. 그 이유는 본 연구의 특성상 전력에너지 산업이 그 나라의 국가기반산업이고 전력품질은 국가적으로 경쟁력을 갖는 산업이므로 그 노하우(Know-how)를 깊이 있게 공개하지는 않으며 각 나라별로 전력계통의 특성이 같지가 않아서 실제 적용 시에는 그 타당성을 깊이 살펴 보아야하기 때문이다. 현시점에서, 규제완화 특성을 고려한 확률론적인 모델에 토대를 둔 송전계통 신뢰도 계획 및 운용부분의 평가기술 및 지수개발, 자유경쟁원칙을 고려한 발전측 및 수용가측의 확률론적 신뢰도 할당문제 해결 기술, 그리고 확률론적 실시간 신뢰도 평가기술 및 지수개발 등이 시급히 요청되는 연구과제라 할 수 있다. 특히, 우리 나라의 경우 구조개편이 출발 단계에 있는 만큼 효율적인 전력거래소의 운영 및 객관적인 시장감시기능의 강화기술확보 측면에서 이의 완성을 위해서는 장기적인 안목에서 다음과 같은 연구분야가 우선적으로 완료되어야 할 것으로 사료된다.

▶ 기술개발측면:

- 송전계통 신뢰도 제약을 고려한 지역별 및 수용가별 신뢰도가치 평가기술
- 송전계통 신뢰도 제약이 발전측에 미치는 영향 평가기술
- 확률론적 실시간적 신뢰도 지수 및 평가기술
- 송전계통 신뢰도 평가기술
- 송전선로 혼잡도 평가기술

▶ 프로그램개발측면 :

- 복합전력계통 및 송전계통망의 신뢰도 평가 프로그램 개발
- 복합전력계통 및 송전계통망의 신뢰도 가치평가 프로그램 개발
- 복합전력계통 및 송전계통망의 신뢰도 최적기준설정 프로그램 개발 및 부하지점별(Nodal) 기준설정평가 프로그램
- 부하지점별(Nodal) 신뢰도 최적기준설정 프로그램 개발

▶ 데이터베이스 측면:

- 복합전력계통의 신뢰도 관련자료의 데이터베이스 구축화 및 이의 효율적인 운용방안 개발

이와 같은 자유경쟁시장에서의 종합적이고도 체계적인 신뢰도 평가기술 개발은 어느 한사람의 연구로 수행될 수 없을 것이며 발전계통과 송전계통을 함께 고려한 복합전력계통에 대한 신뢰도 평가기술 및 전력산업구조개편에 관한 전반적인 개념이 충분히 확보된 상태에서 전력계통을 폭넓게 이해하면서 각 연구자의 부족한 영역을 상호 보충함으로써 효율적이고도 체계적인 연구를 진행할 때 성공적으로 그 사업을 완수할 수 있을 것임은 자명하다.

참고문헌

- [1] 전동훈, 안재욱, 장의태, 이 선, 김발호 및 Ross Baldick, "전력산업 구조변화 및 전력탄송에 관한 연구" 한국전력공사 전원계획처 보고서, 1998, 3.
- [2] 박종근, 김발호, 박종배 및 정도영, "전력산업구조개편 개론" 기초전력공학공동연구소보고서, 1999, 8.
- [3] 서울대학교 경제연구소 및 한국전력공사 전력산업구조조정실, "전력시장 경쟁도입을 위한 기초연구" 한국전력공사 전력산업구조조정실 보고서, 1999, 8.
- [4] 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, p4~14.
- [5] 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.
- [6] M. Ilic, et al, "Power Systems Restructuring; Engineering and Economics" Kluwer Academic Pub., 1998.
- [7] S. Niioka, R. Yokoyama, K. Okada & H. Asano, "Impact Evaluation of Reliability Management and Operation under the Deregulated Electric Power Market", IEEE PES WM2000, Singapore, Jan., 2000.
- [8] Roy Billinton and Wenyuan Li, "Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods", Plenum Press, 1994.
- [9] Roy Billinton and Ronald N. Allan, "Reliability Assessment of Large Electric Power Systems", Kluwer Academic Pub., 1988.
- [10] 문승필, 최재석, 신흥교, 이순영, 송길영; "Monte Carlo 법에 의한 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성법 개발 및 신뢰도해석" 대한전기학회 논문지, 1999년 5월, Vol. 48A, No. 5, pp. 508-515.
- [11] 최재석, 김홍식; "전력계통의 건강도 해석에 관한 기초연구" 2000년, 5월, 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집 pp.45-48.
- [12] 김홍식, 임채현, 최재석, 이순영, 차준민, "규제완화된 전력시장 하에서의 전력계통 신뢰도 할당 방법에 관한 연구" 2000년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.



394-396.

[13] 차준민, 김홍식, 최재석, 오광해, "규제완화된 전력시장 하에서의 송전계통 신뢰도 평가방법의 개발" 2000년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 397-399.

[14] CEA, *Industry Restructuring - News & Info*: CEA connections online news, March 2000.

[15] IMO, "Participating in Ontario's New Competitive Electricity Market" Overview Report by IMO, November 1999.

[16] 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.

[17] Jaeseok Choi, Seougpil Moon, Hongsik Kim, Byongjun Lee and Roy Billinton: "Development of ELDC and Reliability Evaluation of Composite Power System Using Monte Carlo Method", IEEE, PES, SM2000, Seattle, USA.

[18] Jaeseok Choi, Seougpil Moon, Hongsik Kim, Jinjung

Kang, Hoyong Kim and Roy Billinton: "Development of an Analytical Method for Outage Cost Assessment in a Composite Power System", PowerCon 2000, Perth, Australia

[19] 전력사업장기전망 조사위원회; "전력수급 및 관련기술 현황과 전망" 대한전기학회 기술조사보고, 1992, 11.

## 저 자 소개



### 최 재 석 (崔 在 錫)

1958년 4월 29일생. 1981년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987~1988년 고려대 공대 전기공학과 시간강사. 1996년~1997년 University of Saskatchewan 방문교수. 1990년~현재 경상대 전기전자공학부 부교수.