

송전계통의 확률론적 신뢰도 평가에 관한 연구

강성록, 김근호, 트란트롱 틴, 최재석, 이용태, 문승필, 추진부  
 경상대학교, 전력연구원

A Study on Probabilistic Reliability Evaluation of Transmission System

S.R. Kang, K.H. Kim, T.T. Tinh, J.S. Choi, D.H. Jeon, Y.T. Lee, S.P. Moon, J.B. Choo  
 Gyeongsang National University, KEPRI

**Abstract** - This paper presents a method for assessing reliability indices of transmission system. Because successful operation of electric power under the deregulated electricity market depends on transmission system reliability management, quantity evaluation of transmission system reliability is very important. The key point idea is based on that the reliability level of transmission system is equal to reliability level difference of between composite power system(HLII) and generation system(HLI). It is the reason that composite power system includes uncertainties and capacity limit of transmission lines. The practicality and effectiveness of this methodology are illustrated by the case study using the KEPCO size system.

Florida Power Corporation의 GATOR, Hydro Quebec의 PREFIAPT & FIAPT, Shawinigan Consultant의 SYREL, Saskatchewan대학의 COMREL, Georgia Power Georgia Inst. of Tech.의 RECS 등이 있다. 그리고 몬테카르로 시뮬레이션 기법을 도입한 프로그램 패키지로는 ENEL의 SICRET, EDF의 METRIS, CEPEL의 CONFTRA 등이 있다. 국내에서는 주로 결정론적 방법에 의한 송전계통의 신뢰도평가를 연구하고 이용하고있으며 확률론적 방법을 이용한 송전계통의 신뢰도평가에 관련한 국내 연구 및 논문발표는 지금까지 극히 미비한 실정이라할 수있다. 표 1는 현재 세계적으로 개발되어져서 송전망계획용 신뢰도 평가용으로 활용되거나 연구용으로 이용되고있는 프로그램들을 보인 것이다. 한편 표 2는 송전망 신뢰도 평가의 결정론적인 및 확률론적인 방법을 상호비교한 것을 요약한 것이다[6-8].

1. 서 론

근래 규제완화 된 경쟁시장체제의 전력시장 하에서 송전계통의 신뢰도평가는 더욱 중요한 부분을 차지하게 되었다. 계통 망사업자(ISO 또는 ITO) 및 망 소유자는 과거의 계통전체의 신뢰도기준의 설정과 더불어 이제 계통 망의 확충계획 및 운용을 위하여 송전계통망의 신뢰도기준을 얼마나 한 것인가에 초점이 모아지고 있다 [1-3]. 그러나 전력계통의 체계적인 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. 그러므로 본 논문에서는 현재까지의 송전망 신뢰도 평가방법론을 살펴본 후 복합전력계통의 유효부하지속곡선(CMELDC)을 이용하여 복합전력계통의 확률론적 신뢰도 평가에 관한 한 방법론을 제시하고 이를 한전계통규모에대한 사례연구를 통하여 제시한 방법의 실용가능성을 살펴보았다[4-5].

2. 전력계통의 신뢰도 평가

2.1 국내 · 외 연구동향.

복합전력계통 또는 송전계통의 확률론적 신뢰도평가는 1960년대부터 유럽과 북미를 중심으로 이루어져 왔다. 1960년대 후반부터 복합전력계통의 신뢰도평가에 관한 연구가 활발히 이루어지는데 이러한 연구들은 해석적 방법과 시뮬레이션방법으로 크게 구별 되고 프랑스와 이탈리아를 중심으로 양수발전을 포함한 수많은 수력발전을 포함하기 위해 몬테카르로 시뮬레이션 기법을 도입하였다. 복합전력계통 또는 송전계통의 신뢰도평가를 위한 해석적 방법의 프로그램 패키지들은 EPRI의 SYREL,

Table 1 Tools for Evaluating the Probabilistic Reliability of the Composite Power System for Grid Expansion Planning.

Name	System	Methodology	Maker or User	Remark
METRIS	Composite Power System	Monte Carlo	EDF (France)	Commercial & Educational
TPLAN	Transmission System	Monte Carlo & Enumeration	Power Technology (USA)	Commercial & Educational
SICRET	Composite Power System	Monte Carlo	(Italy)	Commercial
CONFTRA	Composite Power System	Monte Carlo	(Brazil)	Commercial
PACOS	Composite Power System	Monte Carlo	(Brazil)	Commercial
CREAM	Composite Power System	Monte Carlo	EPRI (USA)	Educational
COMREL	Composite Power System	Enumeration	University of Saskatchewan (Canada)	Educational
GATOR	Transmission System	Enumeration	Florida Power Corporation (USA)	Commercial
PROCOSE	Composite Power System	Enumeration	Ontario Hydro (Canada)	Commercial
REPLACES	Transmission System	Enumeration	University of Manchester Institute of Science and Technology (UK)	Educational
SYREL	Transmission System	Enumeration	Electric Power Research Institute/ Power Technology Inc. (USA)	Commercial & Educational
SYREL	Transmission System	Enumeration	Shawinigan Lavalin (Canada)	Educational
TranRel	Transmission System	Enumeration & Monte Carlo	GSNU (Korea)	Educational
CMREL	Composite Power System	Enumeration & Monte Carlo	GSNU (Korea)	Educational

Table 2 Comparisons between Deterministic Approach and Probabilistic Approach for Reliability Evaluation of the Composite Power System

	결정론적방법	확률론적방법
평가기본개념	공급 또는 수송능력평가	공급지장수준 평가
신뢰도개념	(N-n) 개념 (단, n=정수) 주로, N-1, N-2, N-1-1 개념에 의한 공급능력도평가	사고확률을 고려한 (N-r) 개념 (단, r=정수) 즉, (N-2.6)의 개념
주요입력자료	발전기, 변압기 송전선로 용량 및 임피던스	발전기, 변압기 송전선로 용량, 사고확률 및 임피던스
평가모형	DRP: TTC - Load [MW] DRR: DRP/100 Load [%] ATC: TTC - TRM - CRM [MW] 단, DRP: Delivery Reserve Power TTC: Total Transfer Capability DRR: Delivery Reserve Rate ATC: Available Transfer Capability TRM: Transmission Reliability Margin CRM: Capacity Benefit Margin	LOLE <sub>TS</sub> -LOLE <sub>HLI</sub> -LOLE <sub>HLI</sub> (days/yr or hr/yr) EENS <sub>TS</sub> -EENS <sub>HLI</sub> -EENS <sub>HLI</sub> (MW/yr) 단, LOLE: Loss of Load Expectation EENS: Expected Energy Not Served HLI and HLI: Hierarchical Level I and II
계통량 조류계산	AC 또는 DC 조류계산법 이용하여 TTC 평가	AC 또는 DC 조류계산법 이용하여 LOLO 및 EENS 평가
신뢰도지수	1. 계통의 DRR, ATC 2. 각 모선의 최대도입전력 (MAP)	1. 계통의 EENS, LOLE 2. 각 모선의 EENS, LOLE
기법형태 및 사용국가 비교	후진국형 평가기법	선진국형 평가기법 (미국, 캐나다, 프랑스, 영국등)
주요 사용모드	운영모드형 신뢰도평가기법	계획모드형 신뢰도평가기법
장단점 비교분석	장점 1. 평가가 간편함. 단점 1. 불확실성을 고려하지못함. 2. 같은 용량이면 동일한 신뢰 도지수가 얻어짐	장점 1. 계통의 불확실성을 고려함. 2. 같은 용량이라도 선로회수 및 사고확률에 따라 신뢰도지수 가 달라짐 이는 송전선로건설 시 송전선로의 종류, 입지조건 및 기후영향등을 반영할 수 있 음을 의미함. 3. 정확한 신뢰도평가 신뢰도 지수를 정량적으로 평가하여 제시함으로써 수요자와의 분배 방형서 보다 논리적으로 접근 할 수 있음. 단점 1. 평가모델 및 절차가 상대적 으로 복잡함.
최근 국제동향	근래 급격한 전사계산기의 발달 및 정보수집의 가능성으로만 미약아 과거 불가능하였던 확률론적 평가모델의 복잡성이 해 소되었음 특히, 최근 전력산업경쟁체제로 나아감에 따라 송전망 소유자 에 대한 송전망하중계획의 신뢰도평가시 확률기법을 거의 강제 적으로 요구하고있는 실정임(미국)	

2.2 복합전력계통(HLII)의 확률론적 신뢰도 평가를 위한 상태공간모형

(1) 상태공간모형

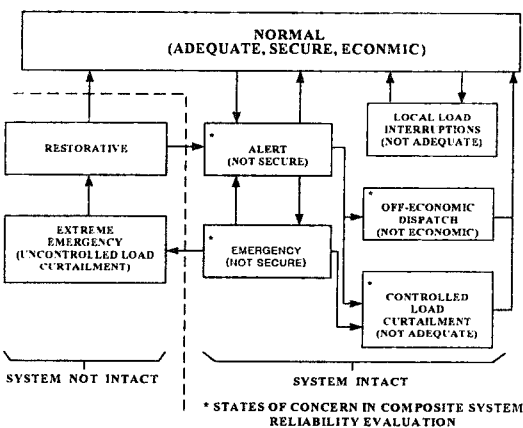


Fig 1 System Operating States to Recognize Local load Interruptions, Controlled Load Curtailment and Off-Economic Dispatch

(2) 송전망 신뢰도 평가를 위한 집합이론

발전기 및 송전선로의 사고확률을 고려한 경우에는 필연적으로 계통이 수용가 부하를 만족시키지 못하게 할 수도 있는 사건을 발생시킨다. 이는 계통의 상태공간 내에서 한 사건의 집합을 형성하며, 이 사건을 '공급지장(Loss of Load)사건' 이라고 부른다. 이 공급지장사고 전체집합에속하는 상태들을 L 이라고하면 식 (1)처럼 표현된다[9].

$$L = G + T + C \quad (1)$$

여기서,  
G:유요한 총발전량이 전체 수용가부하보다 적은 계통의 상태들.  
T:모든 발전기가 유효할지라도 계통부하가 공급될 수 없는 계통 상태들.  
C: G 및 T에 포함되지 않으면서 시스템 사고정지를 유발하는 상태 (C= $\bar{G} \cap \bar{T} \cap L$ )

그림 2는 이들 집합을 알기쉽게 나타낸 것이다.

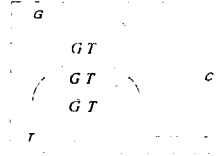


Fig. 2. Venn diagram about loss of load.

그러므로 송전망만에 의한 공급지장을 일으키는 상태들은 식 (2)처럼 계산될 수 있으며 이들 상태에 의한 확률 기대치값또는 공급지장전력량기대치값들이 신뢰도 지수가 된다.

$$T = L - (G + C) \quad (2)$$

그러나 실제계통에서는 C 가 G 및 T에 비하여 매우 미소하므로 T=L-G로 하여 통상 계산하고 있다. 본 연구에서도 이를 이용하여 산정하도록 한다. 그러므로 G 즉, 발전기만을 대상으로한 HLI(Hoerarchical Level I)에서의 신뢰도지수를 먼저 구하고 L 즉, 발전 및 송전계통까지 포함한 복합전력계통에서의 HLI(Hierarchical Level II)에서의 신뢰도지수를 구하여 T 즉, 송전계통망만의 신뢰도지수를 구하도록 한다.

2.3 HLI의 신뢰도 평가

HLI에서의 유효부하지속곡선  $HLI\Phi(x)$ 를 이용하여 발전계통만의 신뢰도 지수들인 전력부족확률(LOLP<sub>HLI</sub>; Loss of load expected) 및 공급지장전력량의 기대치(EENS<sub>HLI</sub>; Expected energy not supplied) 등을 식 (3) 및 식 (4)처럼 구할 수 있다.

$$LOLP_{HLI} = HLI\Phi(x)|_{x=IC} \quad [pu] \quad (3)$$

$$EENS_{HLI} = \int_{IC}^{IC+Lp} HLI\Phi(x) dx \quad [MWh] \quad (4)$$

단, IC=총설비용량[MW]

$$HLI\Phi_i(x_e) = HLI\Phi_{i-1}(x_e) \otimes HLI f_{oi}(x_{oi}) = \int HLI\Phi_{i-1}(x_e - x_{oi}) HLI f_{oi}(x_{oi}) dx \quad (5)$$

⊗ : 상승적분을 의미하는 연산자

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

${}_{HLI}f_{oi}(x_{oi})$  :  $i$ 번째 공급지장전력의 사고용량 확률분포함수

$L_p$  : 계통 최대부하[MW]

## 2.4 HLII의 신뢰도 평가

(1) 각 부하지점별 신뢰도 지수

복합전력계통의 각 부하지점에서의 유효부하지속곡선  ${}_k\Phi(x)$ 를 이용하여 전력부족확률( $LOLP_k$ ) 및 공급지장전력량의 기대치( $EENS_k$ ) 등을 식 (6) 및 식 (7)처럼 구할 수 있다.

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

$$EENS_k = \int_{AP_k}^{AP_k+Lp_k} {}_k\Phi(x) dx \quad [MWh] \quad (7)$$

단,  $AP_k$  :  $k$ 부하지점의 최대도달가능 공급전력 [MW]

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

⊗ : 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]

(2) Bulk 계통의 신뢰도 지수

HLII까지의 Bulk 계통의 신뢰도 지수 중 공급지장전력량의 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.

$$EENS_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} EENS_k \quad [MWh] \quad (9)$$

$$LOLP_{HLII} = \sum_{k \in R} P(B_k) P_{pk} \quad [pu] \quad (10)$$

단,  $NL$  : 부하지점의 수

$R$  : 공급지장이 발생하는 상태들의 집합

$P(B_k)$  : 사고용량  $B$ 가 발생할 확률

$P_{pk}$  :  $k$ 상태에서의 공급지장시간확률

## 3. 송전계통의 신뢰도평가

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

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

$$EENS_{TS} = EENS_{HLII} - EENS_{HLI} \quad [MW/yr] \quad (12)$$

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

식 (14)와 같다.

$$EDNS_{TS} = EENS_{TS}/T \quad (MW/pu.yr) \quad (13)$$

$$ELC_{TS} = EENS_{TS}/LOLP_{TS} \quad [MW/pu.cur.yr] \quad (14)$$

단,  $T$  : 연구대상기간

## 4. 사례연구

본 연구에서 제안한 방법의 유용성을 살펴보기 위해 그림 3과 같은 154kV 이상의 계통만을 대상으로 하여 적용하여 보았다.

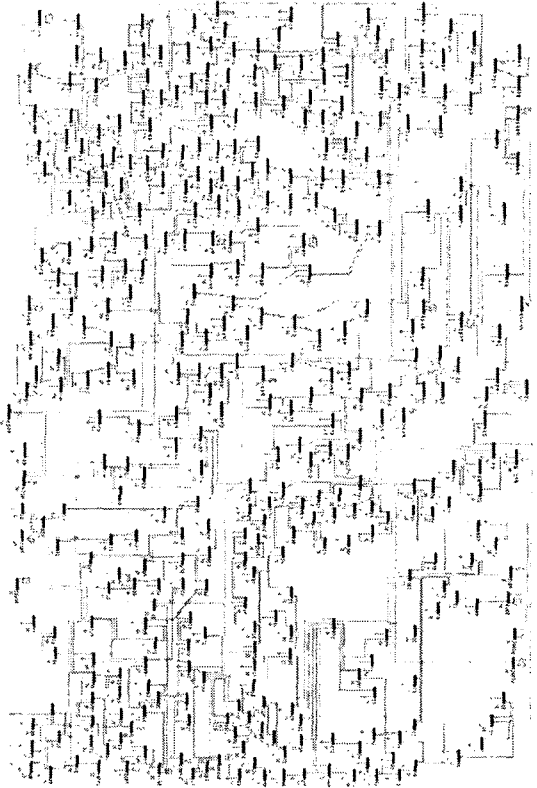


Fig. 3. The single line diagram of the KEPCO system.

표 3은 154kV 이상의 송전계통현황을 보인 것이다. 본 사례연구에서는 그림 3과 같은 한전계통 중 154kV 이상 계통만을 대상으로 하였음에도 불구하고 부하지점의 총수가 330지점을 넘어 모든 부하지점의 신뢰도를 나타내는 것은 어려운 일이므로 표 4에서는 중요 부하 몇 개만의 신뢰도를 나타내었다.

Table 3. Transmission systems data higher than 154kV(c-km)

	1980	1995	1996	1997	1998	1999	2000
765kV	-	-	-	-	54	286	595
345kV	2,044	5,952	6,256	6,442	6,491	6,664	7,281
154kV	6,062	13,530	14,181	15,079	15,821	16,065	16,747

Table 4. Nodal reliability indices at important load points

Bus No.	Peak Load (MW)	LOLE (hr/day)	EENS (MWh/day)
220	525.8	0.09001	1.93105
274	418.8	0.08946	1.39364
77	392.7	0.09086	1.98040
349	364.2	0.08771	1.00268
34	355.4	0.09078	1.62315
351	327.4	0.08941	1.08049
322	319.8	0.08982	1.14063
152	316.1	0.09082	2.14584
205	298.1	0.08985	0.97908
92	295.8	0.09081	1.42031
228	273.2	0.09079	1.85563
57	260.3	0.09067	1.26446
7	258.0	0.09009	0.97315
106	247.5	0.09077	1.17550
177	243.0	0.09017	0.91219
260	237.4	0.09013	0.90202
75	229.5	0.09154	1.26512
153	228.4	0.09074	1.12910
254	215.5	0.09066	0.96266
224	215.4	0.09077	0.98325
159	214.6	0.08558	0.49089
276	214.5	0.08877	0.66192
166	213.7	0.09137	1.15881
46	212.6	0.09071	0.92491
208	209.2	0.09036	0.84083
162	207.0	0.08881	0.64145
384	201.2	0.09069	0.89926
381	200.6	0.09073	1.35501
277	199.4	0.09057	0.85777
147	199.1	0.09097	0.99542

표 5 은 HLI과 HLII의 신뢰도 지수 및 송전계통의 신뢰도 지수를 보이고 있으며 RGTAI(Ratios of Generator-Transmission Adequacy Indices)값 또한 보이고 있다. 여기서 RGTAI 값은 발전계통과 송전계통의 적정도 비율을 나타내는 값으로 어느 영역의 보강이 필요한지를 보여주는 지수이다. RGTAI 값이 1.0보다 클 경우 발전계통이 전력용량이 부족한 것이고 1.0보다 작을 경우는 송전계통의 보강이 필요한 것임을 나타낸다. 한전계통의 송전선은 모선간의 거리가 비교적 짧은 편이다. 345kV 송전선로의 경우 평균 56(km/circuit)이고 154kV 송전선로의 경우 18(km/circuit)이다. 표 2에서 보이고 있는 RGTAI값들이 모두 송전계통에 영향을 많이 받고 있다. 그 중 LOLE와 관련된 값이 EENS와 관련된 값에 비해 송전계통에 영향을 많이 받고 있다. 이 결과는 낮은 사고율과 높은 송전선로의 용량이 잘 반영된 것이다.

Table 5. Bulk reliability indices of KEPCO systems

	LOLE (hr/day)	EENS (MWh/day)
HLII	0.15882	792.48
HLI	0.07077	54.95
Transmission	0.08805	737.5
RGTAI	0.80375	0.07451

### 5. 결 론

본 연구에서 현재까지의 송전망 확충계획용 신뢰도평가의 방법론 및 패키지를 살펴본 후 앞서 본 연구자들이 제안한 바 있는 복합전력계통의 유효부하지속곡선(CMELDC)을 이용하여 발전기, 송전계통 및 주요 변압기의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 복합전력계통의 확률론적 신뢰도 평가에 관한 연구를 실시하여 보았다. 특히 비교적 많은 계통의 해석에 있어 유리하다고 알려

져 있는 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 이용하여 송전계통만의 신뢰도를 평가하여 보았다.

본 연구자들이 제안한 방법의 유용성 및 실용성을 정리하면 다음과 같다.

- 발전기, 송전계통 및 주요변압기의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 복합전력계통의 확률론적 신뢰도 평가를 더욱 상세하고도 용이하게 평가할 수 있게 되었다.
- 최근 활발히 진행되고 있는 규제완화된 전력시장하에서의 각 부하지점별(nodal) 최적신뢰도 기준을 설정할 수 있게 되었다.
- 송전계통만의 신뢰도지수를 산출함으로써 계통망사업자(ISO 또는 ITO) 및 망 소유자의 측면에서 고려될 수 있는 계통망의 확충계획 및 운용을 위한 신뢰도 기준설정에도 도움이 될 수 있다고 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의(과제번호 : 02230-05)지원에 의하여 전력 연구원 주관으로 수행된 결과의 일부임.

### [참 고 문 헌]

- [1] 전동훈, 안재욱, 장의태, 이 선, 김발호 및 Ross Baldick, "전력산업 구조변화 및 전력태충에 관한 연구" 한국전력공사 전원계획처 보고서, 1998, 3.
- [2] W.S Read, W.K. Newman, I.J. Perez-Arriaga, H.Rudnick, M.R. Gent & A.J. Roman (December 1999). Reliability in the New Market Structure(Part1). IEEE Power Engineering Review, p.4-14.
- [3] W.S Read, W.K. Newman, I.J. Perez-Arriaga, H.Rudnick, M.R. Gent & A.J. Roman (January 2000). Reliability in the New Market Structure(Part2). IEEE Power Engineering Review, p.10~16.
- [4] Jaeseok Choi, Daeho Do, Seungpil Moon and Roy Billinton (June 1999). Development of a Method for ELDC Construction in a Composite Power System. LESCOPE '99 proceedings, Halifax.
- [5] 문 승필, 최 재석, 신 흥교, 이 순영, 송 길영; "Monte Carlo법에 의한 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성법 개발 및 신뢰도해석" 대한전기학회 논문지, 1999년 5월, Vol. 48A, No. 5, pp. 508-515.
- [6] Roy Billinton and Wenyuan Li (1994). Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Plenum Press.
- [7] Roy Billinton and Ronald N. Allan (1996). Reliability Evaluation of Power Systems, Second Edition, Plenum Press.
- [8] M. P. Bhavaraju, R. Billinton, N. D. Reppen and P. F. Albrecht (Feb. 1988). Requirements for Composite System Reliability Evaluation Models. IEEE Trans., Vol. 3, No. 1, pp. 149-157.
- [9] 한국전력공사 기술연구원, "대전력계통 공급신뢰도 평가 방안 및 Data Base 구축연구," 한국전력공사 기술연구원 보고서, 1991, 10.
- [10] 경상대학교, 한국전력공사 전력연구원, "송전계통의 확률론적 공급신뢰도 평가(1차 분기)," 한국전력공사 전력연구원 위탁과제 보고서, 2002, 11.
- [11] 경상대학교, 한국전력공사 전력연구원, "송전계통의 확률론적 공급신뢰도 평가(2차 분기)," 한국전력공사 전력연구원 위탁과제 보고서, 2003, 2.
- [12] EDF Research & Development (Feb. 2002), "METRIS Version3 USER'S MANUAL," EDF.
- [13] EDF Research & Development (Sept. 2001), "METRIS Version3 MODELLING AND DATA," EDF.