

# TRELSS를 이용한 우리나라 전력계통의 확률론적 신뢰도 평가에 관한 연구

論 文

55A-11-2

## A Study on Probabilistic Reliability Evaluation of KEPCO System using TRELSS

田東勳<sup>†</sup> · 崔在錫<sup>\*</sup> · 金建中<sup>\*\*</sup>

(Dong-Hoon Jeon · Jae-Seok Choi · Kern-Joong Kim)

**Abstract** - This paper evaluates the reliability of KEPCO system using TRELSS, which is a probabilistic reliability evaluation program for large-scaled power system. In order to reflect the characteristic of KEPCO system, the sensitivity of reliability indices such as LOLP, EDLC, EENS and Energy Curtailment for variations of TRELSS parameter and input data was analyzed. Additionally, probabilistic reliability of KEPCO system reflecting sensitivity analysis results was systematically evaluated and simulated. Finally, maximum acceptable FOR of KEPCO system to satisfy reliability criterion, which meet in process of establishing the basic plan for long-term electricity supply and demand is suggested.

**Key Words** : Power System Planning, Uncertainty, Probabilistic Reliability Evaluation, TRELSS, KEPCO System

### 1. 서 론

독점체제에서 경쟁체제로의 전력산업 환경변화가 국가적인 효율 증대와 소비자의 편의 증대를 도모할 수 있을지는 모르나, 대규모 전력계통을 계획, 운영함에 있어서 전원개발 및 수요예측의 불확실성을 증가시키고, 특히 시장 논리에 따른 신규 설비투자로 대규모 정전과 같은 국가적인 재난이 발생할 가능성을 더욱 증가시키고 있다. 실제 전 세계적으로 발생한 일련의 대정전사고에 직간접적인 영향을 미친 것으로 보고되고 있으며, 이후 전력계통 안정운영의 일환으로써 전력계통의 신뢰도에 대한 관심이 그 어느 때보다 높아지고 있다.

전력계통에서 신뢰도(Reliability)란 전력계통이 운전 제약 조건을 만족하면서 소비자가 요구하는 전력에너지를 공급할 수 있는 능력의 정도로 정의되는데, 협의의 신뢰도로 전력계통이 소비자가 요구하는 전력에너지를 공급할 수 있는 능력의 정도로 정의되는 적정도(Adequacy)와 광의의 신뢰도로 적정도와 함께 전력계통이 갑작스러운 왜란에 대해 안정한 상태를 유지할 수 있는 능력의 정도로 정의되는 안전도(Security)를 포함하고 있다.[1][2]

전력계통의 신뢰도를 평가하는 방법에는 크게 결정론적(Deterministic) 방법과 확률론적(Probabilistic) 방법이 있다. 계통사고, 설비고장, 소비자의 부하 등 신뢰도에 영향을 미치는 전력계통의 불확실성 고려 여부로 구분되어 지는데, 지

금까지 대부분의 전력계통 계획 및 운영업무에는 결정론적 방법이 사용되어 왔다. 그러나 결정론적 방법은 전력계통의 안정운영 측면에서는 상당히 중요하지만 상대적으로 발생가능성이 작은 상태를 고려할 수 없어 과잉 투자할 우려가 있으며, 반대로 중요하지는 않지만 상대적으로 발생가능성이 큰 상태를 간과할 수 있어 신뢰도에 부정적인 영향을 미칠 소지가 있다.[3]

전력계통의 불확실성을 고려하여 결정론적 방법이 가지는 단점을 해소할 수 있는 확률론적 방법의 필요성은 이미 1950년대부터 인식되어 왔으나, 데이터의 부족, 계산능력의 제한, 확률론적 방법에 대한 이해부족 등으로 사용되지 못하다가 오늘날 신뢰도관련 데이터베이스의 구축, 컴퓨터의 계산능력 향상 등으로 대부분의 문제점이 해소된 상태이며[3], 특히 2003년 캐나다-미국 북동부에서 발생한 광역정전 이후 전 세계적으로 확률론적 방법에 의한 신뢰도 평가 연구가 활발하게 진행되고 있다. 우리나라도 최근 몇 년 동안 전력계통의 계획 및 운영업무에 확률론적 신뢰도 평가기술을 도입, 적용하기 위한 연구를 활발히 진행하고 있다.

본 논문에서는 한국전력공사가 우리나라 전력계통의 계획 업무에 확률론적 방법을 도입하기 위해 운용을 검토중에 있는 TRELSS(Transmission Reliability Evaluation for Large-Scale Systems) 프로그램을 이용하여 우리나라 전력계통의 신뢰도를 확률론적인 방법으로 평가하고자 하였다. 먼저 우리나라 전력계통 특성을 고려하기 위해 감도해석을 수행하여 TRELSS 파라메타와 입력데이터에 따른 신뢰도지수 계산결과를 분석하였다. 다음 감도해석 결과를 반영하여 우리나라 전력계통의 신뢰도를 체계적으로 평가하였다. 마지막으로 전력수급기본계획 수립시 적용하는 신뢰도기준을 충족시키기 위해 우리나라 전력계통이 만족해야만 하는 최대 허용가능 고장확률(FOR)을 제시하였다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓國電力公社 電力研究院 先任研究員  
E-mail : dhjeon@kepri.re.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 慶尙大學校 電氣電子工學部 教授 · 工博

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 忠南大學校 電氣情報通信工學部 教授 · 工博  
接受日字 : 2006年 7月 21日  
最終完了 : 2006年 9月 27日

## 2. TRELSS

TRELSS[4]는 1992년 미국 EPRI에서 개발한 확률론적 신뢰도 평가 프로그램으로 대규모 복합(발전&송전) 계통을 대상으로 보호제어그룹(Protection Control Group), 필수(Must-run), 독립(Independent) 및 동시(Common Mode) 상정사고 해석을 수행하여 다양한 형태의 신뢰도지수를 계산하고, 사용자가 요구하는 수준에 맞는 상세한 결과보고서를 출력할 수 있다. 그림 1은 TRELSS의 주화면을 나타낸 것이다.

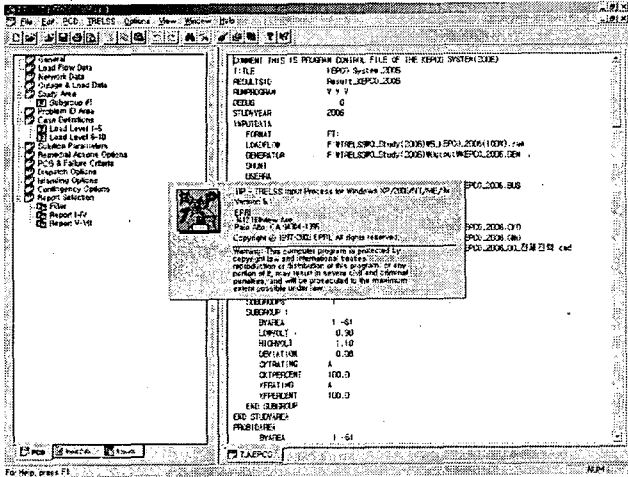


그림 1 TRELSS의 주화면  
Fig. 1 Main Screen of TRELSS

TRELSS는 13,000개의 모선, 26,000개의 선로, 9750개의 발전기, 5200개의 변압기로 구성된 대규모 전력계통에 적용 가능하며 탭절환 변압기(Tap Changing Transformer), 이상기(Phase Shifter), 가변분리기(Switchable Shunt) 등과 같은 대부분의 일반적인 전력설비를 사실적으로 모델링할 수 있다.

TRELSS는 최대 10개의 Base Case와 발전기와 선로로 조합된 최대 (N-6)의 상정사고 깊이(Depth)를 처리할 수 있는데, Base Case와 상정사고 깊이에 따른 상정사고 Case들을 AC 또는 DC 조류계산법으로 해석하여 선로 과부하, 모선 고/저전압, 모선 전압변동, 조류계산의 발산, 부하차단, 계통분리 등의 계통문제(System Problem)를 검토한다.

TRELSS는 계통문제 검토결과와 설비사고 데이터를 이용하여 각각의 Base Case에 맞는 신뢰도지수를 계산한 다음, 8760시간대별 전체부하 실적을 이용하여 선형보간법으로 각 시간대별 신뢰도지수를 계산하고, 이를 통해 해당년도의 신뢰도지수를 계산하는데, 계통지수(System Indices), 수용가지수(Customer Indices), 정규화지수(Normalized Indices) 등의 신뢰도지수를 이용할 수 있다.

TRELSS는 파일준비(File Preparation), 계산(Computation), 신뢰도 계산(Reliability Computation), 보고서 생성(Report Generation) 등 모듈화된 4개의 부프로그램과 사용자 편의를 도모하기 위한 TRELSS 입력처리기(TRELSS Input Processor)로 구성되어 있다.

TRELSS 입력처리기는 제어파일의 생성, 수정, 저장, 삭제 및 입력데이터를 포함한 각종 제어변수의 입력, 수정, 저장 등을 담당하여 신뢰도 평가과정상의 사용자 편의를 도모

한다. 파일준비 부프로그램은 IEEE, PTI, EPRI Converter IEEE PSADD 형태의 조류계산 파일을 읽어 들여 TRELSS 사용자-입력데이터 파일을 준비한다. 계산 부프로그램은 TRELSS의 핵심으로 선택되어진 상정사고 깊이에 해당하는 독립 상정사고 Case는 물론 필요시 동시 및 필수 상정사고 Case에 대한 조류계산을 수행하여 계통문제를 분석한다. 신뢰도 계산 부프로그램은 상정사고 해석결과, 설비사고 데이터, 8760시간 부하지속곡선 등을 이용하여 설비별, 지역별, 전체계통에 대한 신뢰도지수를 계산한다. 그림 2는 TRELSS의 전체 구성을 나타낸 것이다.

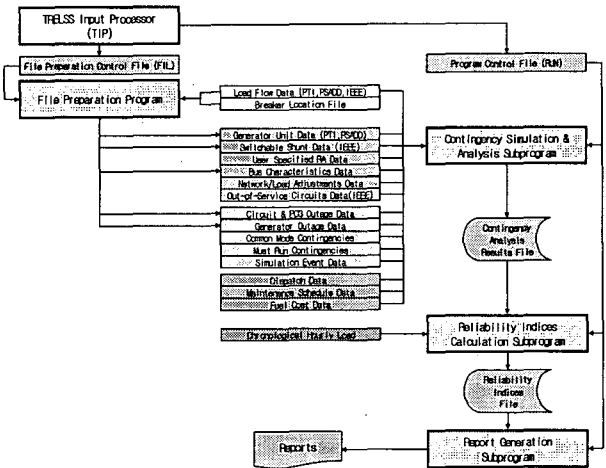


그림 2 TRELSS의 전체 구성도  
Fig. 2 Overall Organization of TRELSS

## 3. TRELSS 파라메타 및 입력데이터에 따른 감도해석

우리나라 전력계통 특성을 고려한 신뢰도 평가를 위해 먼저 TRELSS를 이용하여 1402개의 모선, 2165개의 선로, 251대의 발전기, 415대의 변압기로 구성된 우리나라 전력계통을 대상으로 감도해석을 수행하였다.

TRELSS를 이용하여 신뢰도를 평가하기 위해서는 기본적으로 조류계산 데이터, 설비사고 데이터, 부하 데이터 등의 입력데이터가 필요하다. 본 감도해석에서는 조류계산 데이터로 한전에서 계통계획 업무에 참고하고 있는 2006년의 100%(Peak), 90%, 80%, 70%, 60% 등 총 5개 부하수준의 PSS/E용 조류계산 데이터의 사용을 검토하였다. 참고로 2006년의 100% 부하수준은 53,469(MW)이다. 설비사고 데이터로는 기본적으로 발전기와 선로로 구성되는 (N-1), (N-2) 상정사고뿐만 아니라 실제 한전에서 우리나라 전력계통의 송변전설비 확충계획 수립시 참고하고 있는 345kV 및 154kV 송전선로의 동일루트 2회선 동시사고도 검토하였다. 부하 데이터는 우리나라 전력계통의 2004년도 및 2005년도 8760시간대별 전체부하 실적과 2006년도 8760시간대별 전체부하 예측치의 사용을 검토하였다.

본 감도해석에서는 5개의 Base Case 및 상정사고 깊이에 따른 각각의 상정사고 Case들을 AC 조류계산법으로 해석하여 선로 과부하, 모선전압 변동, 계통분리 등의 계통문제를 분석하였는데, 이중 신뢰도에 직접적인 영향을 미치는 계통분리로 인해 공급지장을 일으키는 상정사고만을 집중 분석

하였으며, 평가결과로써 LOLP(Loss of Load Probability), EDLC (Expected Duration of Load Curtailment, Hrs/Year), EENS (Expected Energy Not Served, MWh/Year), Energy Curtailment (MWh/Annual MWh) 등의 확률론적 신뢰도지수를 비교, 분석하였다.

**3.1 상정사고 깊이에 따른 신뢰도지수 계산결과 비교**

신뢰도 평가를 위한 파라메타로 상정사고 깊이가 신뢰도지수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 발전기와 선로로 (N-1), (N-2) 상정사고를 조합하여 LOLP, EDLC, EENS 등의 신뢰도지수를 계산, 비교하였다. 이때 LOLP, EDLC, EENS 등의 신뢰도지수는 사례연구 대상계통에서 공급지장을 일으키는 상정사고 건수 및 부하수준과 밀접한 관계가 있는데, 이와는 별도로 TRELSS에서 제공하는 정규화된 신뢰도지수로 Energy Curtailment도 계산, 비교하였다. Energy Curtailment는 공급지장에너지를 연간 총 공급에너지로 나눈 값이다.

사례연구에서는 2006년 100% 부하수준의 PSS/E용 조류계산 데이터와 2005년의 8760시간대별 전체부하 실적을 부하 데이터로 사용하였으며, 설비사고 데이터내 발전기 및 선로의 고장 발생건수 및 고장 지속시간은 모두 2년에 1건, 1건당 1시간으로 가정하였다. 상정사고 깊이에 따른 신뢰도지수 계산결과는 표 1과 같다.

표 1 상정사고 깊이에 따른 신뢰도지수 계산결과  
Table 1 Reliability Indices according to Contingency Depth

구 분	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
	(N-1) G1 T0	(N-1) G0 T1	(N-2) G2 T0	(N-2) G1 T1	(N-2) G0 T2	(N-2) CM
LOLP ( $\times 10^{-5}$ )	0	28.41	0	28.41	28.41	749.99
EDLC	0	2.489	0	2.489	2.489	65.699
EENS	0	152.351	0	152.351	152.372	5868.718
EC ( $\times 10^5$ )	0	0.074	0	0.074	0.074	1.632
Contingency causing Load Loss	0	5	0	5	12	132

\* G : 발전기, T : 선로, CM : 동시사고(Common Mode)

표 1의 Case 1 및 Case 3에서와 같이 발전기만으로 이루어진 (N-1), (N-2) 상정사고에 대해서는 LOLP를 포함한 모든 신뢰도지수가 0의 값을 가지는데, 이러한 결과는 사례연구 대상계통이 발전기만으로 이루어진 (N-1), (N-2) 상정사고에 대해서는 공급지장을 일으키는 상정사고 Case의 수가 0건으로 어떤 공급지장도 발생하지 않음을 나타내는 신뢰도 측면에서 완벽한 계통임을 의미한다.

표 1의 Case 2 및 Case 5에서와 같이 선로만으로 이루어진 (N-1), (N-2) 상정사고에 대해서는 LOLP를 포함한 모든 신뢰도지수가 0이 아닌 값을 가지는데, 이러한 결과는 사례연구 대상계통이 선로만으로 이루어진 (N-1), (N-2) 상정사고에서 대해서는 공급지장을 일으키는 상정사고 Case의 수가 각각 5건과 12건이고, 이에 해당하는 EDLC가 2.489(시간/년)로 우리나라의 경우 산업자원부에서 전력수급계획 수립

시 기준으로 사용하는 LOLE가 1년에 0.5일로 12시간 내의 임을 고려한다면 신뢰도 측면에서 상대적으로 우수한 계통임을 의미한다. 특히 Case 2의 (N-1) 상정사고에 대한 신뢰도지수 계산결과와 Case 5의 (N-2) 상정사고에 대한 신뢰도지수 계산결과가 공급지장을 일으키는 상정사고 Case의 수에 차이가 있음에도 불구하고 거의 동일한 값을 가지는 것을 알 수 있는데, 이러한 결과는 사례연구 대상계통에서는 선로에 대한 (N-2) 상정사고가 신뢰도에 미치는 영향이 매우 작음을 의미한다.

표 1의 Case 4에서와 같이 발전기와 선로로 이루어진 (N-2) 상정사고에 대해서는 LOLP를 포함한 모든 신뢰도지수가 0이 아닌 값을 가지나, Case 2의 선로만으로 이루어진 (N-1) 상정사고와 동일한 값을 가지는 것을 알 수 있는데, 이러한 결과는 사례연구 대상계통에서는 발전기에 대한 상정사고가 신뢰도에 미치는 영향이 전혀 없음을 의미하며 이는 Case 1과 Case 3의 결과와도 일치한다.

표 1의 Case 6에서와 같이 선로 동시 상정사고에 대해서는 LOLP를 포함한 모든 신뢰도지수가 0이 아닌 값을 가지는데, 특히 공급지장을 일으키는 상정사고 Case의 수가 132건으로 Case 2, Case 4, Case 5에서 보다 상대적으로 많으며, 공급지장을 일으키는 상정사고 Case의 수와 밀접한 관계가 있는 신뢰도지수들의 값 또한 상대적으로 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 사례연구 대상계통에서는 발전기와 선로에 대한 (N-1), (N-2) 상정사고보다는 선로 동시 상정사고가 신뢰도에 큰 영향을 끼침을 의미하며, 이는 대부분의 전력계통에서 통용되는 일반적인 사실이다. 따라서 보다 가혹한 조건에서 신뢰도를 평가하기 위해서는 (N-1), (N-2) 상정사고뿐만 아니라 동시 상정사고도 함께 고려되어야 한다.

**3.2 조류계산 데이터에 따른 신뢰도지수 계산결과 비교**

신뢰도 평가를 위한 입력데이터로 조류계산 데이터가 신뢰도지수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 조류계산 데이터로 2006년 100% 부하수준의 PSS/E용 조류계산 데이터 한 개를 사용했을 때, 100%, 80% 부하수준의 PSS/E용 조류계산 데이터 두 개를 사용했을 때, 100%, 80%, 60% 부하수준의 PSS/E용 조류계산 데이터 세 개를 사용했을 때, 100%, 90%, 80%, 70%, 60% 부하수준의 PSS/E용 조류계산 데이터 다섯 개를 사용했을 때의 신뢰도지수를 계산, 비교하였다.

사례연구에서는 2005년의 8760시간대별 전체부하 실적을 부하 데이터로 사용하였으며, 설비사고 데이터는 3.1절에서 보인 바와 같이 사례연구 대상계통의 신뢰도에 가장 큰 영향을 미친 선로 동시 상정사고만을 고려하였다. 설비사고 데이터내 고장 발생건수 및 고장 지속시간은 모두 2년 1건, 1건당 1시간으로 가정하였으며, 모든 조류계산 데이터의 토폴로지(Topology)는 동일하다. 조류계산 데이터에 따른 신뢰도지수 계산결과는 표 2와 같다.

표 2에서 Case 7~Case 10의 계산결과를 비교해보면 사용된 조류계산 데이터의 수에 따라 신뢰도지수 계산결과에 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 LOLP, EDLC, EENS 등의 신뢰도지수는 사용하는 조류계산 데이터의 수가 증가할수록 감소하고(그림 1), Energy Curtailment는 Case 7, Case 8, Case 9에서 감소하다가 Case 10에서 다시 증가하고 있다(그림 2).

표 2 조류계산 데이터에 따른 신뢰도지수 계산결과  
Table 2 Reliability Indices according to Load Flow Data

구분	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10
	100% 부하수준의 조류계산 데이터 사용	100,80% 부하수준의 조류계산 데이터 사용	100,80,60% 부하수준의 조류계산 데이터 사용	100~60% 부하수준의 조류계산 데이터 사용
LOLP ( $\times 10^5$ )	749.99	722.13	712.19	697.35
EDLC	65.699	63.259	62.388	61.088
EENS	5868.718	4246.562	3829.993	3210.366
EC ( $\times 10^5$ )	1.632	1.181	1.065	1.492
Contingency causing Load Loss	132	259	380	634

이러한 결과는 사용하는 조류계산 데이터의 수가 증가할수록 반드시 최적의 결과를 보장한다는 의미가 아니라 하나의 조류계산 데이터를 이용하는 것보다는 가능한 한 다수의 조류계산 데이터를 적절히 이용하는 것이 사례연구 대상계통의 특성에 맞는 신뢰도지수를 도출할 수 있음을 의미한다. 또한 사례연구 대상계통의 부하수준과 밀접한 관계가 있는 LOLP, EDLC, EENS 보다는 정규화된 신뢰도지수인 Energy Curtailment가 사례연구 대상계통의 특성을 보다 객관적으로 표현함을 알 수 있다.

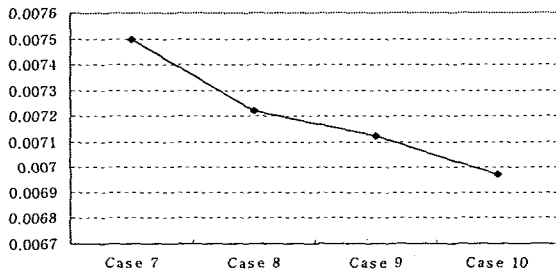


그림 3 LOLP의 변화(Case 7~Case 10)  
Fig. 3 Variation of LOLP(Case 7~Case 10)

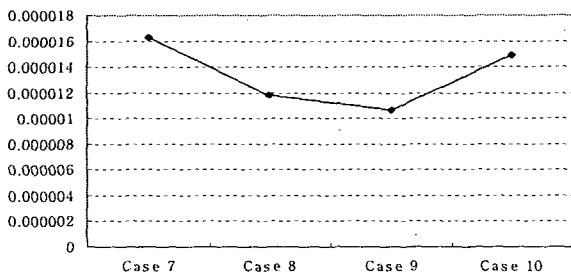


그림 4 Energy Curtailment의 변화(Case 7~Case 10)  
Fig. 4 Variation of Energy Curtailment(Case7~Case10)

이상적인 신뢰도 평가방법은 8760개의 시간대별 조류계산 데이터를 사용하여 신뢰도지수를 계산하는 것이다. 그러나

조류계산 데이터의 준비, 신뢰도지수 계산시간 등에 현실적인 어려움이 있어 TRELSS에서는 최대 10개까지 입력한 조류계산 데이터의 부하수준에 맞는 신뢰도지수를 계산한 다음, 8760시간대별 전체부하 실적을 이용하여 선형보간법으로 각 시간대의 신뢰도지수를 계산하고, 이를 대상년도의 신뢰도지수로 환산한다. 따라서 최대 10개까지 사례연구 대상계통의 부하수준에 맞는 조류계산 데이터를 적절히 사용할 경우 보다 정확한 계산결과를 얻을 수 있다.

한편 표 2의 Case 7~Case 10에서 공급지장을 일으키는 상정사고 Case의 수가 각각 132건, 259건, 380건, 634건으로 그 수가 증가하고 있는데, 이러한 결과는 사용하는 조류계산 데이터의 수가 증가할수록 공급지장을 일으키는 상정사고 Case의 수도 증가한다는 의미가 아니라 특정시점의 계통상태를 나타내는 조류계산 데이터별로 130여건의 공급지장을 일으키는 상정사고가 발생하였으며, 사용한 조류계산 데이터의 수에 비례하여 공급지장을 일으키는 상정사고 Case의 수도 증가한 것이다. 실제 사례연구 대상계통이 특정시점에서 공급지장을 일으킬 상정사고 Case의 수는 특정시점의 부하수준에 따라 약간의 차이가 있을 수 있지만 모두 132건 이내가 될 것이다. 이러한 까닭은 100% 부하수준에서 공급지장을 일으킨 상정사고라 하더라도 100% 이하의 부하수준에서는 부하수준에 맞게 전체 계통의 발전력, 부하 등이 조정되어 공급지장을 일으키지 않을 수도 있기 때문이다.

3.3 부하 데이터에 따른 신뢰도지수 계산결과 비교

신뢰도 평가를 위한 입력데이터로 부하 데이터가 신뢰도 지수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 부하 데이터로 2006년 8760시간대별 전체부하 예측치를 사용한 경우, 2004년 8760시간대별 전체부하 실적을 사용한 경우, 2005년 8760시간대별 전체부하 실적을 사용한 경우의 신뢰도지수를 계산, 비교하였다.

사례연구에서는 3.2절에서 보인 바와 같이 2006년 100%, 90%, 80%, 70%, 60% 부하수준의 PSS/E용 조류계산 데이터를 사용하였으며, 모든 조류계산 데이터의 토폴로지는 동일하다. 설비사고 데이터는 3.1절에서 보인 바와 같이 선로 동시 상정사고만을 고려하였으며, 설비사고 데이터내 고장 발생건수 및 고장 지속시간은 모두 2년 1건, 1건당 1시간으로 가정하였다. 부하 데이터에 따른 신뢰도지수 계산결과를 표 3과 같다.

표 3 부하 데이터에 따른 신뢰도지수 계산결과  
Table 3 Reliability Indices according to Load Data

구분	Case 11	Case 12	Case 13
	2004년 부하실적을 이용한 경우	2005년 부하실적을 이용한 경우	2006년 예측부하를 이용한 경우
LOLP ( $\times 10^5$ )	714.11	697.35	715.98
EDLC	62.556	61.088	62.720
EENS	3885.044	3210.366	4012.269
EC ( $\times 10^5$ )	1.102	1.492	1.116
Contingency causing Load Loss	634	634	634

표 3에서 Case 11~Case 13의 계산결과를 비교해보면 사용된 부하 데이터에 따라 신뢰도지수 계산결과에 차이가 있음을 알 수 있다(그림 5)(그림 6). 즉 어떤 부하 데이터를 사용하는 것이 보다 정확한 결과를 도출할 수 있는지 명확히 말할 수 없지만, 또 계산된 Case별 신뢰도지수사이의 차이가 비교적 작은 값으로 어떤 부하 데이터를 이용하여도 상관없을 수 있으나, 예측과정 자체에 불확실성을 내포하고 있는 예측부하보다는 실제 전력계통의 부하실적이, 똑같은 부하실제이라고 하더라도 전년도보다는 전년도 부하실제 사레연구 대상계통의 부하특성을 보다 잘 반영하고 있다고 말할 수 있기 때문에 신뢰도지수 계산시에는 전년도 부하실적을 이용하는 것이 보다 납득할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

한편 표 3에서 공급지장을 일으킨 상정사고 Case의 수는 사레연구 대상계통의 토폴로지와 밀접한 관련이 있는 값으로 사용하는 부하 데이터와는 상관없음을 알 수 있다.

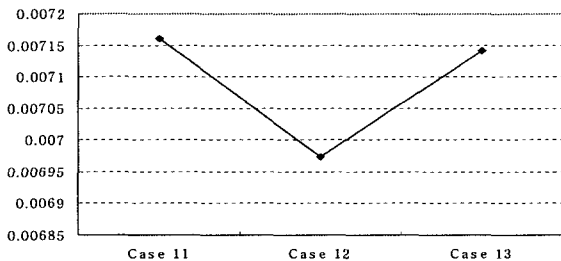


그림 5 LOLP의 변화(Case 11~Case 13)  
Fig. 5 Variation of LOLP(Case 11~Case 13)

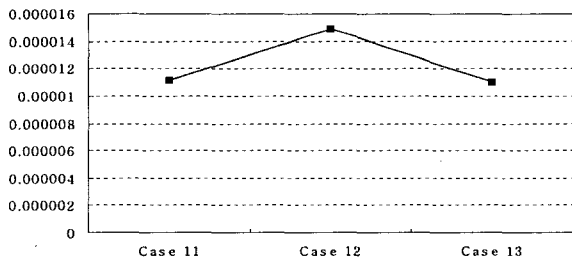


그림 6 Energy Curtailment의 변화(Case 11~Case 13)  
Fig. 6 Variation of Energy Curtailment(Case11~Case13)

4. 우리나라 전력계통의 확률론적 신뢰도 평가

3장에서 TRELSS 파라메타와 입력데이터에 따른 감도해석 결과를 바탕으로 다음과 같은 데이터들을 준비하여 2006년 우리나라 전력계통의 신뢰도를 확률론적인 방법으로 평가하였다.

- 2006년 100%, 90%, 80%, 70%, 60% 부하수준의 PSS/E용 조류계산 데이터
- 2005년 8760시간대별 전체부하 실적
- 선로 동시 상정사고 데이터(전체 642건)

한편 표 1, 표 2, 표 3의 Case 1~Case 13에서 계산된 신

뢰도지수의 값들은 설비사고 데이터내 고장 발생건수와 고장 지속시간에 따라 그 크기가 달라질 수 있다. 따라서 사레연구 대상계통을 구성하고 있는 발전기와 선로 등에 대한 정확한 고장 발생건수와 고장 지속시간이 필요하나, 현재 우리나라는 확률론적 신뢰도 평가에 필요한 발전기, 선로 등 전력설비의 고장관련 데이터베이스가 완벽하지 않아 정확한 통계자료를 사용하는데 어려움이 있다. 이에 모든 발전기 및 선로의 고장 발생건수와 고장 지속시간을 다음과 같이 가정하고, 이를 조합하여 다양한 경우의 신뢰도지수를 계산하였다.

- 고장 발생건수 : 1년 1회, 2년 1회, 5년 1회, 10년 1회
- 고장 지속시간 : 10분, 30분, 60분, 90분

고장 발생건수 및 고장 지속시간에 따른 신뢰도지수 계산 결과는 표 4~표 7과 같다.

표 4 고장 발생건수 및 지속시간에 따른 LOLP 계산결과  
Table 4 LOLP according to Outage Frequency & Duration

LOLP		고장 발생건수			
		10년 1회	5년 1회	2년 1회	1년 1회
고 장 지속시간	0.16시간 (10분)	0.0002232	0.0004463	0.0011158	0.0022315
	0.5 시간 (30분)	0.0006974	0.0013947	0.0034868	0.0069735
	1.0 시간 (60분)	0.0013947	0.0027894	0.0069735	0.0139471
	1.5 시간 (90분)	0.0020921	0.0041841	0.0104603	0.0209206

표 5 고장 발생건수 및 지속시간에 따른 EDLC 계산결과  
Table 5 EDLC according to Outage Frequency & Duration

EDLC (Hrs/Year)		고장 발생건수			
		10년 1회	5년 1회	2년 1회	1년 1회
고 장 지속시간	0.16시간 (10분)	1.955	3.910	9.774	19.548
	0.5 시간 (30분)	6.109	12.218	30.544	61.088
	1.0 시간 (60분)	12.218	24.435	61.088	122.176
	1.5 시간 (90분)	18.326	36.653	91.632	183.264

표 6 고장 발생건수 및 지속시간에 따른 EENS 계산결과  
Table 6 EENS according to Outage Frequency & Duration

EENS (MWh/Year)		고장 발생건수			
		10년 1회	5년 1회	2년 1회	1년 1회
고 장 지속시간	0.16시간 (10분)	102.732	205.463	513.659	1027.317
	0.5 시간 (30분)	321.037	642.073	1605.183	3210.366
	1.0 시간 (60분)	642.073	1284.146	3210.366	6420.731
	1.5 시간 (90분)	963.110	1926.220	4815.547	9631.095

표 7 고장 발생건수 및 지속시간에 따른 EC 계산결과  
Table 7 EC according to Outage Frequency & Duration

Energy Curtailment (MWh/Annual MWh) ( $\times 10^{-5}$ )		고장 발생건수			
		10년 1회	5년 1회	2년 1회	1년 1회
고 장 지 속 시 간	0.16시간 (10분)	0.048	0.096	0.239	0.478
	0.5 시간 (30분)	0.149	0.298	0.746	1.492
	1.0 시간 (60분)	0.298	0.597	1.492	2.988
	1.5 시간 (90분)	0.448	0.895	2.238	4.477

표 4~표 7에서 고장 발생건수 및 고장 지속시간에 따른 신뢰도지수의 변화를 비교해보면 LOLP의 경우 0.0002232에서 0.0209206, EDLC의 경우 1.955(시간/년)에서 183.264(시간/년), EENS의 경우 102.732(MWh/년)에서 9631.095(MWh/년), Energy Curtailment의 경우 0.00000048(MWh/Annual MWh)에서 0.00004477(MWh/Annual MWh)로 고장 발생건수가 증가할수록, 고장 지속시간이 늘어날수록 신뢰도지수의 값도 증가하였다. 그림 7과 그림 8은 고장 발생건수 및 고장 지속시간에 따른 LOLP 및 Energy Curtailment의 변화를 보인 것이다.

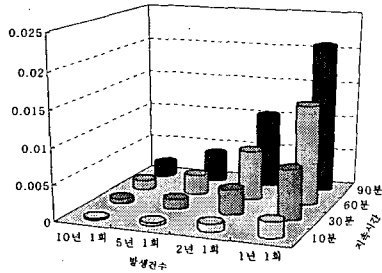


그림 7 LOLP의 변화  
Fig. 7 Variation of LOLP

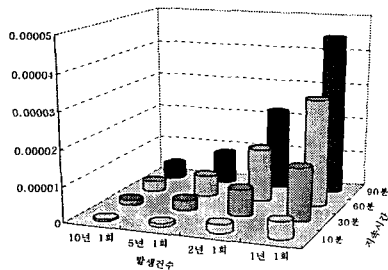


그림 8 Energy Curtailment의 변화  
Fig. 8 Variation of Energy Curtailment

한편 표 4~표 7에서 고장 발생건수가 5년 1회이고, 고장 지속시간이 0.5시간인 경우와 고장 발생건수가 10년 1회이고, 고장 지속시간이 1.0시간인 경우의 신뢰도지수 계산결과를 비교해보면 그 값이 동일하다는 것을 알 수 있다. 마찬가지로

지로 고장 발생건수가 1년 1회이고, 고장 지속시간이 0.5시간인 경우와 고장 발생건수가 2년 1회이고, 고장 지속시간이 1.0시간인 경우에도 신뢰도지수 계산결과를 비교해보면 그 값이 동일하다는 것을 알 수 있다.

실제 LOLP 등의 신뢰도지수는 고장 발생건수와 고장 지속시간으로부터 직접 계산되는 것이 아니라 고장 발생건수와 고장 지속시간으로부터 계산된 고장확률(FOR)을 이용하여 계산되는데, 표 4~표 7에서 각각의 경우에 대한 고장확률을 계산해 보면 표 8과 같다.

표 8 고장 발생건수 및 지속시간에 따른 FOR 계산결과  
Table 8 FOR according to Outage Frequency & Duration

FOR ( $\times 10^{-5}$ )		고장 발생건수			
		10년 1회	5년 1회	2년 1회	1년 1회
고 장 지 속 시 간	0.16시간 (10분)	0.18265	0.36530	0.91324	1.82648
	0.5 시간 (30분)	0.57078	1.14155	2.85388	5.70776
	1.0 시간 (60분)	1.14155	2.28311	5.70776	11.41553
	1.5 시간 (90분)	1.71233	3.42466	8.56164	17.12329

표 8에서 보면 표 4~표 7에서 신뢰도지수 계산결과가 동일하게 나온 경우의 고장확률이 각각  $1.14155 \times 10^{-5}$ 와  $5.70776 \times 10^{-5}$ 으로 동일함을 알 수 있다. 이러한 결과는 고장 발생건수와 고장 지속시간에 의해 결정되는 고장확률이 동일할 경우 신뢰도지수 계산결과도 동일하다는 것을 의미한다. 표 9는 표 4~표 7의 결과를 표 8에서 계산된 고장확률을 기준으로 재정리한 것이고, 그림 9과 그림 10은 고장확률과 LOLP, Energy Curtailment 등 신뢰도지수와의 상관관계를 그림으로 나타낸 것이다.

표 9 고장확률에 따른 신뢰도지수 계산결과  
Table 9 Reliability Indices according to FOR

신뢰도지수 고장확률	FOR ( $\times 10^{-5}$ )	LOLP ( $\times 10^{-5}$ )	EDLC	EENS	EC ( $\times 10^{-5}$ )
FOR ( $\times 10^{-5}$ )	0.18265	22.32	1.955	102.732	0.048
	0.36530	44.63	3.910	205.463	0.096
	0.57078	69.74	6.109	321.037	0.149
	0.91324	111.58	9.774	513.659	0.239
	1.14155	139.47	12.218	642.073	0.298
	1.71233	209.21	18.326	963.110	0.448
	1.82648	223.15	19.548	1027.317	0.478
	2.28311	278.94	24.435	1284.146	0.597
	2.85388	348.68	30.544	1605.183	0.746
	3.42466	418.41	36.653	1926.220	0.895
	5.70776	697.35	61.088	3210.366	1.492
	8.56164	1046.03	91.632	4815.547	2.238
	11.41553	1384.71	122.176	6420.731	2.988
	17.12329	2092.06	183.264	9631.095	4.477

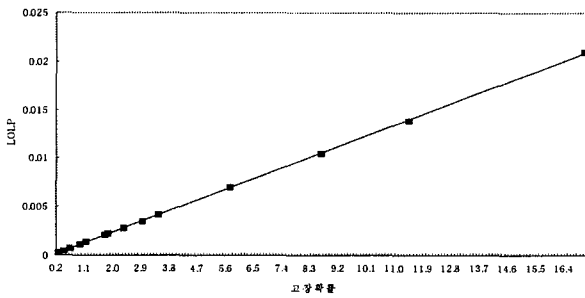


그림 9 고장확률에 따른 LOLP의 변화  
 Fig. 9 Variation of LOLP according to FOR

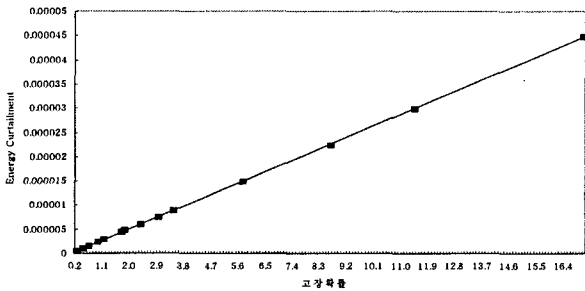


그림 10 고장확률에 따른 Energy Curtailment의 변화  
 Fig. 10 Variation of Energy Curtailment according to FOR

표 9와 그림 9, 그림 10으로부터 LOLP, EDLC, EENS, Energy Curtailment 등의 신뢰도지수는 고장확률에 정비례함을 알 수 있다. 이때 그래프의 기울기는 우리나라 전력계통이 2006년에만 가지는 고유한 특성이 될 수 있다. 단 모든 발전기 및 선로의 고장 발생건수와 고장 지속시간은 동일하다고 가정하였다.

한편 본 사례연구에서는 총 642건의 선로 동시 상정사고가 검토되었는데, 이중 공급지장을 일으킨 132건의 상정사고 Case를 살펴보면 표 10에서와 같이 154kV 방사상 부하가 68건으로 전체 부하손실이 8765(MW), 발전소내 부하가 64건으로 전체 부하손실이 205(MW)로 사례연구 대상계통의 신뢰도는 대부분 방사상계통의 부하선로에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

표 10 공급지장 유발 상정사고 Case  
 Table 10 Contingency Case causing Load Loss

대상년도	Common Mode 상정사고수	공급지장 유발 상정사고수	154kV 방사상 부하선로	발전소내 부하선로
2006	634 건	132 건 8970 MW	68 건 8765 MW	64 건 205 MW

현재 발전기 및 선로에 대한 정확한 고장 통계자료를 이용할 수 없는 상황에서 우리나라 전력계통의 확률론적 신뢰도를 정확히 평가할 수 없다. 그러나, 우리나라의 경우 산업 자원부에서 전력수급기본계획 수립시 적용하는 LOLE가 1년에 0.5일로 12시간 내외임을 이용한다면 역으로 우리나라 전력계통이 EDLC 12시간을 만족하기 위해서 유지해야만 하

는 최대 허용가능 고장확률을 계산할 수 있다. 표 11은 표 9에서 고장확률과 EDLC와의 관계로부터 EDLC가 12시간을 유지하기 위한 고장 발생건수와 고장 지속시간의 조합을 구하고, 이에 따른 신뢰도지수를 계산한 것으로 이때 고장확률은 0.000113이다.

표 11 고장 발생건수와 고장 지속시간의 조합(EDLC=12시간)  
 Table 11 Combination of Outage Frequency & Duration (EDLC=12h)

사고의 종류	LOLP ( $\times 10^{-5}$ )	EDLC	EENS	EC ( $\times 10^{-5}$ )	고장 발생건수	고장 지속시간
선로동시 상정사고 (132/642)	138.08	12.095	635.7	0.295	10년 1회	0.99시간 (59.4분)
					5년 1회	0.49시간 (29.7분)
					2년 1회	0.19시간 (11.9분)
					1년 1회	0.09시간 (05.9분)

\* (공급지장을 일으킨 상정사고 Case수/전체 상정사고 Case수)

표 11로부터 우리나라 전력계통이 2006년의 경우 EDLC 12시간을 충족시키기 위해서는 선로의 동시 상정사고에 대해 최대 허용가능 고장확률이 0.000113으로 고장이 10년에 1회 발생한 경우 고장 지속시간이 59.4분 이내여야 한다는 기준을 수립할 수 있다. 표 11로부터 선로 동시 상정사고에 대해 고장확률이 0.000113인 고장 발생건수와 고장 지속시간의 상관관계를 그래프로 나타내면 그림 11과 같다.

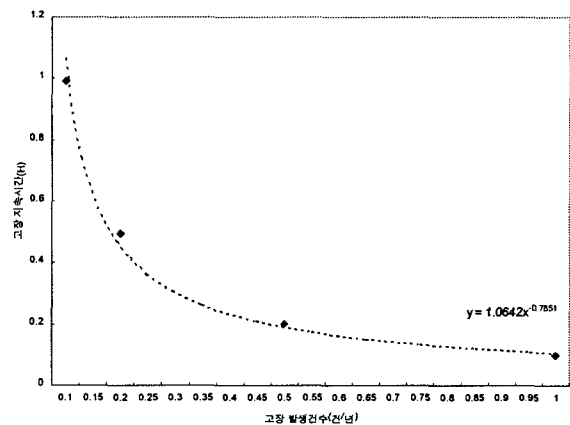


그림 11 고장 발생건수와 고장 지속시간의 상관관계 (선로 동시 상정사고, FOR=0.000113)

Fig. 11 Relationship of Outage Frequency & Duration (Line Common Mode Contingency, FOR=0.000113)

그림 11의 그래프는 지수함수의 형태를 취하는데, 그림 9, 그림 10과 더불어 대상계통의 토폴로지, 이에 종속적인 선로 동시 상정사고 Case, 그리고 해당년도의 부하수준에 영향을 받기 때문에 사례연구 대상계통이 EDLC 12시간을 만족하기 위해 2006년의 경우에만 가지는 고유한 특성이라고 말할 수 있다. 단 모든 발전기 및 선로의 고장 발생건수와 고장 지속시간은 동일하다고 가정하였다.

상기와 같은 최대 허용가능 고장확률과 그래프는 상정사고 깊이가 (N-1), (N-2)인 경우에도 같은 방법으로 계산될 수 있다. 표 12는 선로의 (N-1) 상정사고에 대해 EDLC가 12시간을 유지하기 위한 고장 발생건수와 고장 지속시간의 조합을 계산하고, 이에 따른 신뢰도지수를 계산한 것이다.

표 12 고장 발생건수와 고장 지속시간의 조합(EDLC=12시간)  
Table 12 Combination of Outage Frequency & Duration (EDLC=12h)

사고의 종류	LOLP ( $\times 10^{-5}$ )	EDLC	EENS	EC ( $\times 10^{-5}$ )	고장 발생건수	고장 지속시간
선로에 대한 (N-1) 상정사고 (5/2440)	138.07	12.095	740.4	0.360	10년 1회	24.3시간
					5년 1회	12.2시간
					2년 1회	4.86시간
					1년 1회	2.43시간

\* (공급지장을 일으킨 상정사고 Case수/전체 상정사고 Case수)

표 12로부터 선로에 대한 (N-1) 상정사고의 경우 공급지장을 일으키는 상정사고 Case의 수는 5건으로 EDLC 12시간을 만족시키기 위한 최대 허용가능 고장확률은 0.000277이었다. 그림 12는 선로의 (N-1) 상정사고에 대해 고장확률이 0.000277인 고장 발생건수와 고장 지속시간의 상관관계를 그래프로 나타낸 것이다.

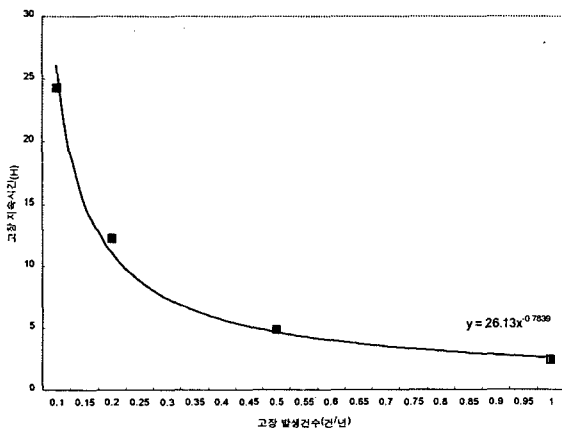


그림 12 고장 발생건수와 고장 지속시간의 상관관계 (선로 (N-1) 상정사고, FOR=0.000277)

Fig. 12 Relationship of Outage Frequency & Duration (Line (N-1) Contingency, FOR=0.000277)

한편 그림 11과 그림 12를 비교해보면 그림 13에서와 같이 동일한 고장 발생건수에 대해서는 선로의 (N-1) 상정사고에 대한 고장 지속시간이 선로의 동시 상정사고에 대한 고장 지속시간보다 훨씬 더 크다는 것을 알 수 있고, 고장 발생건수가 작아질수록 그 차는 더욱 더 커짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 표 11과 표 12에서도 확인할 수 있는데, EDLC 12시간을 만족시키기 위한 고장 지속시간이 선로의 (N-1) 상정사고에 대해서는 2.43(시간/년), 선로의 동시 상정사고에 대해서는 0.09(시간/년) 정도로 고장 지속시간에

현격한 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 11~그림 13은 그림 9, 그림 10과 더불어 향후 계통 계획업무에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

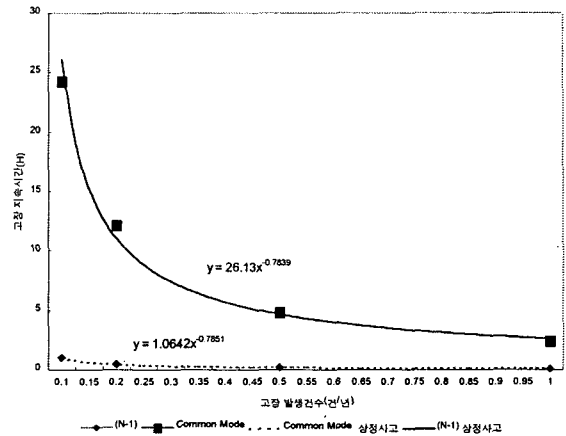


그림 13 고장 발생건수와 고장 지속시간의 상관관계  
Fig. 13 Relationship of Outage Frequency & Duration

### 5. 결 론

본 논문에서는 대규모 전력계통의 확률론적 신뢰도 평가 프로그램인 TRELSS를 이용하여 우리나라 전력계통의 신뢰도를 체계적으로 평가하고, 전력수급기본계획 수립시 적용하는 신뢰도기준을 충족시키기 위해 우리나라 전력계통이 만족해야만 하는 최대 허용가능 고장확률을 제시하였다.

1) TRELSS에서 상정사고 깊이 등의 파라메타와 조류계산 데이터, 부하 데이터 등의 입력데이터에 따른 LOLP, EDLC, EENS, Energy Curtailment 등의 신뢰도지수 계산결과를 분석하여 다음의 사실을 확인하였다.

- ① 우리나라 전력계통의 신뢰도는 2006년의 경우 발전기와 선로에 대한 (N-1), (N-2) 상정사고보다는 선로에 대한 동시 상정사고에 더 큰 영향을 받는다. 보다 가혹한 조건에서 신뢰도를 평가하기 위해서는 (N-1), (N-2) 상정사고뿐만 아니라 선로 동시 상정사고도 함께 고려되어야 한다.
- ② 가능한 한 우리나라 전력계통의 부하수준에 맞는 다수의 조류계산 데이터를 적절히 사용할 경우 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.
- ③ 어떤 종류의 부하 데이터를 사용하는 것이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있는지 명확히 구분짓을 수 없지만, 예측과정 자체에 불확실성을 내포하고 있는 예측 부하보다는 최근의 부하특성을 잘 반영하고 있는 전년도 부하실적을 이용하는 것이 보다 설득력있는 결과를 얻을 수 있다.
- ④ 사례연구 대상계통의 부하수준과 밀접한 관계가 있는 LOLP, EDLC, EENS 등의 신뢰도지수보다는 TRELSS에서 제공하는 정규화된 신뢰도지수인 Energy Curtailment



가 우리나라 전력계통의 신뢰도 특성을 보다 객관적으로 표현할 수 있다.

2) TRELSS에서 파라메타와 입력데이터에 따른 신뢰도지수 분석결과를 바탕으로

- 2006년 100%, 90%, 80%, 70%, 60% 부하수준의 PSS/E용 조류계산 데이터
- 2005년 8760시간대별 전체부하 실적
- 선로의 Common Mode 상정사고 데이터(전체 642건)

와 같은 데이터들을 준비하여 우리나라 전력계통의 신뢰도를 확률론적인 방법으로 평가하였다.

- ① 발전기 및 선로에 대한 신뢰성있는 고장 통계자료를 이용할 수 없는 상황에서 우리나라 전력계통의 신뢰도를 정확히 평가한다는 것은 불가능하다. 이에 대한 대안으로 발전기 및 선로의 고장 발생건수와 고장 지속시간을 다양하게 조합하여 신뢰도지수의 분포를 계산하였는데, 고장 발생건수가 증가할수록, 고장 지속시간이 늘어날수록 신뢰도지수의 값도 증가하였다.
- ② 특히 고장 발생건수와 고장 지속시간에 의해 결정되는 고장확률이 동일한 경우 신뢰도지수 계산결과가 동일하다는 점에 착안하여 그림 9, 그림 10과 같이 고장확률 변화에 따른 신뢰도지수 변화를 그래프로 나타내었는데, 2006년 우리나라 전력계통의 신뢰도지수는 고장확률에 정비례하였다. 이때 그래프의 기울기는 우리나라 전력계통이 2006년에만 가지는 고유한 특성이 될 수 있다. 단, 모든 발전기, 부하의 고장확률은 동일한 것으로 가정하였다.
- ③ 상정사고 깊이별로 공급지장을 일으킨 상정사고 Case 분석을 통해 2006년 우리나라 전력계통의 신뢰도 측면에서의 취약지역을 파악하였는데, 선로에 대한 (N-1) 상정사고의 경우 5건, 선로의 (N-2) 상정사고의 경우 12건, 선로의 동시 상정사고의 경우 132건의 상정사고가 공급지장에 영향을 주었으며, 거의 모든 경우가 방사상 계통의 부하선로였다.

3) 우리나라의 경우 정부에서 전력수급기본계획 수립시 적용하는 신뢰도기준으로 LOLE가 1년에 05.일로 12시간 내외 임에 착안하여 우리나라 전력계통이 EDLC 12시간을 충족시키기 위해 만족해야만 하는 최대 허용가능 고장확률을 제시하였다.

- ① 우리나라 전력계통은 2006년의 경우 최대 허용가능 고장확률이 선로의 (N-1) 상정사고에 대해서는 0.000113, 선로의 동시 상정사고에 대해서는 0.000277이다. 고장 지속시간으로 환산하면 선로의 (N-1) 상정사고에 대해서는 약 2.43(시간/년), 선로의 동시 상정사고에 대해서는 0.09(시간/년) 정도인데, 이러한 값은 우리나라 전력계통에 대한 확률론적 신뢰도 기준으로 사용할 수 있을 것이다.
- ② 우리나라 전력계통이 최대 허용가능 고장확률을 만족시키기 위한 고장 발생건수와 고장 지속시간간의 관

계가 그림 11~그림 13과 같이 지수함수의 형태를 취하고 있는데, 이 역시 그림 9, 그림 10과 더불어 우리나라 전력계통이 2006년에만 가지는 고유한 특성으로 향후 계통 계획업무에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

**감사의 글**

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업(과제번호 : R-2004-0-167, R-2005-0-027)의 지원하에 한전 전력연구원 연구원이 주관하여 수행한 연구결과의 일부임.

**참 고 문 헌**

- [1] R.Billinton, R.N.Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems", 1983.
- [2] R.Billinton, R.N.Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", 1984.
- [3] R.Billinton, Wenyuan Li, "Reliability Assessment of Electric Power Systems using Monte Carlo Methods", 1994.
- [4] Pei Zhang, "Transmission Reliability Evaluation for Large-Scale Systems(TRELSS) User's Manual", 2003.
- [5] "제2차 전력수급기본계획(2004~2017)", 산업자원부, 2004.
- [6] 최재석, 강성록, 트란트롱틴, 전동훈, 추진부, "송전계통의 확률론적 신뢰도 평가에 관한 연구 : TRELSS and TranRel", 대한전기학회 논문지 제53권 제1호, 2004.
- [7] T.Tran, H.Lim, J.Choi, G.Han, D.Jeon, J.Choo, "Reliability Evaluation of KEPCO System using TRELSS", IEEE PES GM, 2005.
- [8] T.Tran, J.Kwon, J.Choi, K.Han, D.Jeon, "Sensitivity Analysis of Probabilistic Reliability Evaluation of KEPCO System using TRELSS", PMAPS, 2006.
- [9] 박동욱, 이용한, "국내의 신뢰도 관리체계 및 기준", 전기학회지 제50권 3호, 2001.
- [10] 김진오, "새로운 전력시장과 신뢰도 평가", 전기학회지 제50권 3호, 2001.

**저 자 소 개**



**전 동 훈 (田東勳)**

1966년 12월 11일생. 1991년 홍익대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 충남대 전기공학과 박사과정 수료. 현재 한전 전력연구원 선임연구원  
Tel : 042-865-5802, Fax : 042-865-5804  
E-Mail : dhjeon@kepri.re.kr



**최재석 (崔在錫)**

1958년 4월 29일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 경상대학교 전기전자공학부 교수

Tel : 055-751-5347, Fax : 055-759-2723

E-mail : jschoi@nongae.gsnu.ac.kr



**김건중 (金建中)**

1953년 2월 12일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 충남대학교 전기정보통신공학부 교수

Tel : 042-821-5659, Fax : 042-823-7970

E-mail : kjkim@ee.chungnam.ac.kr