우리나라 전력계통의 공급적정도 평가에 관한 사례연구

전동훈 * 곽노홍 * 박상호 * 한경남 * 최재석 ** 김건중 ***
* 한국전력공사 ** 경상대학교 *** 충남대학교

A Case Study on Probabilistic Adequacy Assessment of KEPCO System

D.H.Jeon * N.H.Kyak * S.H.Park * K.N.Han * J.S.Choi ** K.J.Kim ***
* KEPCO ** Gyeongsang National Univ. *** ChungNam National Univ.

Abstract - This paper evaluates probabilistic reliability of KEPCO system using TRELSS, which is a probabilistic reliability evaluation program for large-scaled power system. In order to systematically evaluate probabilistic reliability of KEPCO system, contingency cases causing load loss in (N-1) & (N-2) contingency depth was analyzed and reliability indices such as LOLP, EDLC, EENS according to change of FOR was calculated.

1. 서 론

전력계통의 신뢰도(reliability)란 전력계통이 운전 제약조건을 만족하면서 소비자가 요구하는 전력에너지를 공급할 수 있는 능력의 정도로 정의되는데, 협의의 신뢰도로 전력계통이 소비자가 요구하는 전력에너지를 공급할 수 있는 능력의 정도로 정의되는 공급신뢰도(적정도, adequacy)와 광의의 신뢰도로 공급신뢰도와 함께 전력계통이 갑작스러운 왜란에 대해 안정한 상태를 유지할 수 있는 능력의 정도로 정의되는 안전도(security)를 포함하고 있다.

전력계통의 신뢰도를 평가하는 방법에는 크게 결정론적(deterministic) 방법과 확률론적(probabilistic) 방법이 있는데, 계통사고, 설비고장, 소비자의 부하 등 신뢰도에 영향을 미치는 전력계통의 불확실성 고려 여부로 구분되어진다.

아직까지 대부분의 국가에서는 전력계통의 안정운용을 최우선으로 하여 부하수준별 Base Case와 (N-1), (N-2) 상정사고에서의 중요 상정사고 Case만을 대상으로 공급신뢰도와 안전도를 포함하는 전력계통의 신뢰도를 결정론적인 방법으로 평가하고 있다. 그러나 결정론적 방법은 전력계통의 안정운용 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 여지가 있다.

이에 반하여 확률론적 방법은 대규모 전력계통에서 발생 가능한 모든 Case를 대상으로 하는데, 부하수준별 Base Case는 물론 (N-1), (N-2) 상정사고에서의 모든 상정사고 Case를 대상으로 전력계통의 신뢰도를 평가하며, 필요한 경우 (N-k) 상정사고에 대한 평가도 가능하다. 그러나 대개의 경우 확률론적 방법은 공급신뢰도만을 평가하며, 최근 안전도까지 그 영역을 넓히는 연구가 진행되고 있다. 또한 상기와 같은 이유로 결정론적 방법에 확률론적 방법을 보완적으로 사용하는 방안들도 지속적으로 연구되고 있다.

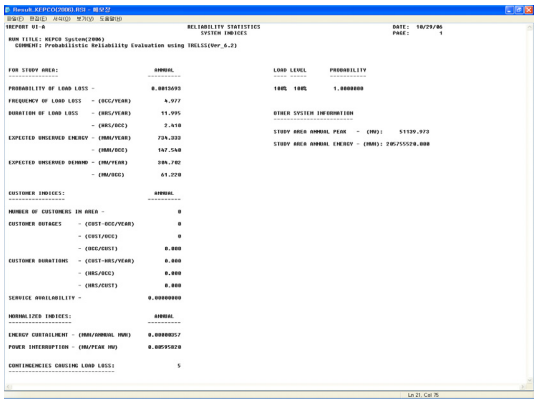
본 논문에서는 TRELSS(Transmission Reliability Evaluation for Large-Scale Systems)를 이용하여 우리나라 전력계통의 공급신뢰도를 확률론적인 방법으로 평가하였다. 발전기와 선로로 조합된 (N-1), (N-2) 상정사고와 선로의 Common Mode 상정사고에 대해 공급지장을 일으키는 상정사고 Case를 분석하고, 고장확률에 따른 공급신뢰도를 평가함으로써 우리나라 전력계통의 공급신뢰도를 체계적으로 평가하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 TRELSS

TRELSS(Transmission Reliability Evaluation for Large-Scale Systems)는 1992년 미국 EPRI에서 개발한 확률론적 신뢰도평가 프로그램으로 대규모 복합계통을 대상으로 PCG(Protection Control Group), Common Mode, Must-Run 및 Independent 상정사고 해석을 수행하여 다양한 형태의 신뢰도지수를 계산하고, 사용자가 요구하는 수준에 맞는 상세한 결과보고서를 출력한다.

TRELSS는 최대 10개의 Base Case와 발전기와 선로로 조합된 최대 (N-6)의 상정사고 Depth를 처리할 수 있는데, Base Case와 상정사고 Case들을 AC 또는 DC 조류계산법으로 해석하여 선로 과부하, 모선 고/저전압, 모선 전압변동, 조류계산의 발산, 부하차단, 계통분리 등의 System Problem을 검토한다. TRELSS는 System Problem 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, LOLP, EDLC(시간/년), EENS(MWh/년) 등의 System Indices와 Energy Curtailment(MWh/Annual MWh), Power Interruption (MW/Peak MW) 등의 Normalized Indices가 제공된다. 그림 1은 신뢰도 평가 결과화면의 예이다.



<그림 1> TRELSS의 신뢰도평가 결과화면

2.2 우리나라 전력계통의 확률론적 공급신뢰도 평가

우리나라 전력계통의 공급신뢰도를 확률론적인 방법으로 평가하였다. 공급신뢰도 평가에는 미국 EPRI에서 개발한 TRELSS 프로그램을 이용하였으며, 다음과 같은 입력데이터들을 사용하였다.

- 조류계산 데이터 : 100% 부하수준의 PSS/E용 조류계산 데이터
- 설비사고 데이터 : 발전기와 선로로 조합된 (N-1), (N-2) 상정사고, 선로의 Common Mode 상정사고
- 계통부하 데이터 : 2005년 8760시간대별 전체부하 실적

공급신뢰도 평가에 사용된 조류계산 데이터는 한전에서 계통계획 업무에 참고하기 위해 2005년 수립한 2006년도 첨두부하시 우리나라 전력계통으로 1402개의 모선, 2165개의 선로, 251대의 발전기, 415대의 변압기로 구성되어 있으며, 최대부하 53,469(MW)에 공급능력은 58,816(MW)으로 공급예비력은 약 10(%) 이다.

한편 공급신뢰도를 확률론적인 방법으로 평가하기 위해서는 대상계통을 구성하고 있는 발전기와 선로 등에 대한 정확한 고장 발생빈도와 고장 지속시간 등의 데이터가 필요하나, 현재 우리나라는 발전기, 선로 등 전력설비의 고장관련 데이터베이스가 완벽하지 않아 정확한 통계자료를 이용하는데 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 발전기 및 선로의 고장 발생빈도와 고장 발생시간을 표 1과 같이 가정하고, 여기서 계산된 고장확률을 공급신뢰도 평가에 사용하였다. 고장확률 계산에는 날씨효과나 전력설비의 유지보수를 고려하지 않은 Markov 2 State 모델을 사용하였으며, 모든 발전기, 선로의 고장확률은 동일한 것으로 가정하였다.

본 연구에서는 Base Case 및 상정사고 Depth에 따른 각각의 상정사고 Case를 AC 조류계산법으로 해석하여 계통분리, 선로 과부하, 모선 전압변동 등의 System Problem을 파악하였는데, 이중 공급신뢰도에 직접적인 영향을 미치는 계통분리로 인해 공급지장을 일으키는 상정사고만을 신뢰도평가에 반영하였으며, 평가결과로는 LOLP, EDLC, EENS, EC 등의 신뢰도지수를 비교, 분석하였다.

<표 1> 고장 발생빈도 및 고장 발생시간에 따른 고장확률

고장확률 ($\times 10^{-5}$)		고장 발생빈도			
		10년 1회	5년 1회	2년 1회	1년 1회
고장 지속시간	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
	2.0 시간 (120분)	2.28311	4.56621	11.41553	22.83105
	3.0 시간 (180분)	3.42466	6.84932	17.12329	34.24658

2.2.1 발전기의 (N-1) 상정사고 경우

고장 발생빈도와 고장 발생시간의 조합에 의해 계산된 표 1의 고장확률을 이용하여 발전기의 (N-1) 상정사고에 대한 공급신뢰도를 평가하였다.

<표 2> 발전기의 (N-1) 상정사고에 대한 공급신뢰도 평가결과

Contingency Depth	Contingency causing Load Loss	LOLP	EDLC	EENS	Energy Curtailment
(N-1) 1G 0T	0	0	0	0	0

표 2에서와 같이 발전기의 (N-1) 상정사고에 대해서는 공급지장을 일으키는 상정사고 Case가 1건도 발생하지 않았으며, 고장확률에 상관없이 LOLP를 포함한 모든 신뢰도지수가 0의 값을 가졌다. 이러한 결과는 사례연구 대상계통이 발전기의 (N-1) 상정사고에 대해서는 어떤 공급지장도 일으키지 않음을 나타내는데, 상기와 같은 모의조건에서는 발전기의 (N-1) 상정사고에 의한 최대 공급지장 가능전력이 1,000(MW)인 반면, 공급예비력이 최대부하의 10(%)로 약 5,000(MW)인 까닭에 어떤 상정사고 Case에서도 부하에 충분한 전력을 공급할 수 있기 때문이다. 발전기의 (N-2) 상정사고 경우에도 평가결과가 동일하였다.

2.2.2 선로의 (N-1) 상정사고 경우

고장 발생빈도와 고장 발생시간의 조합에 의해 계산된 표 1의 고장확률을 사용하여 선로의 (N-1) 상정사고에 대한 공급신뢰도를 평가하였다.

<표 3> 선로의 (N-1) 상정사고에서 공급지장 유발 상정사고 Case

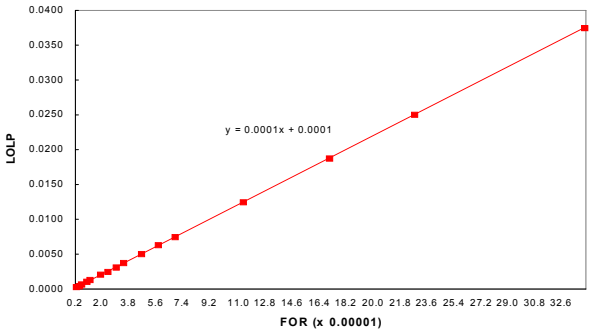
Case	Voltage Level (kV)	Load Loss (MW)	고장 발생빈도 (OCC/YR)	고장 지속시간 (HR/OCC)	공급지장 기여도		
					EENS (MWh/Year)	%	기여 순위
A	154	59.0	1.0	2.41	141.541	19.3	4
B	154	89.7			215.190	29.3	1
C	154	69.0			165.531	22.5	2
D	154	65.7			157.614	21.5	3
E	154	22.7			54.458	7.4	5
계	5 건	306.1			734.334	100.0	

표 3에서와 같이 선로의 (N-1) 상정사고에 대해서는 공급지장을 일으키는 상정사고 Case가 5건 발생하였는데, 모두 154kV 부하선로였으며, 특히 공급지장을 일으키는 각각의 상정사고 Case가 전체 공급지장에 기여한 순위는 상정사고로 인한 부하손실에 비례하였다. 표 3의 EENS는 고장확률이 0.0002774인 경우의 값이다.

<표 4> 고장확률에 따른 신뢰도지수 계산결과

신뢰도지수 \ 고장확률	FOR ($\times 10^{-5}$)							
	0.18265	0.57078	1.14155	3.42466	5.70776	17.12329	22.83105	34.24658
LOLP ($\times 10^{-5}$)	0.910	2.840	5.680	17.050	28.410	85.230	113.630	170.450
EDLC	0.080	0.249	0.498	1.493	2.489	7.466	9.954	14.932
EENS	4.875	15.235	30.470	91.411	152.351	457.053	609.404	914.107
EC ($\times 10^{-5}$)	0.002	0.007	0.015	0.044	0.074	0.222	0.296	0.444

표 4는 선로의 (N-1) 상정사고에 대하여 고장확률에 따른 신뢰도지수를 계산한 것인데, 고장확률이 증가할수록 신뢰도지수도 증가하였다. 그림 2는 고장확률에 따른 신뢰도지수 LOLP의 변화를 그래프로 나타낸 것으로 다른 신뢰도지수 EDLC, EENS, EC도 고장확률에 비례한다. 이때 그래프의 기울기는 공급예비력, 계통의 토폴로지(Topology), 부하, 상정사고 Depth 등에 영향을 받기 때문에 사례연구 대상계통이 상기와 같은 모의조건에서만 가지는 고유한 특성이 될 수 있다. 선로, 발전기의 (N-2) 상정사고 경우와 선로의 (N-2) 상정사고 경우에도 평가결과가 동일하였다.



<그림 2> 고장확률에 따른 LOLP 변화

2.2.3 선로의 Common Mode 상정사고 경우

고장 발생빈도와 고장 발생시간의 조합에 의해 계산된 표 1의 고장확률을 사용하여 선로의 Common Mode 상정사고에 대한 공급신뢰도를 평가하였다.

<표 5> Common Mode 상정사고에서 공급지장 유발 상정사고 Case

Voltage Level (kV)	Contingency causing Load Loss (건)	Load Loss (MW)	고장 발생빈도 (OCC/YR)	고장 지속시간 (HR/OCC)	공급지장 기여도		
					EENS	(%)	기여 순위
345	3	2209.5	0.1	1.096	241.1	19.1	2
154	107	7279.2			1018.3	80.9	1
계	110	9488.7			1259.4	100.0	

표 5에서와 같이 선로의 Common Mode 상정사고에 대해서는 전체 642건의 Common Mode 상정사고중에서 공급지장을 일으키는 상정사고 Case가 110건 발생하였는데, 이중 3건의 상정사고가 345kV 선로였고, 나머지 107건의 상정사고가 154kV 선로였다. 표 5의 EENS는 고장확률이 0.0002774인 경우의 값이다.

<표 6> 고장확률에 따른 신뢰도지수 계산결과

신뢰도지수 \ 고장확률	FOR ($\times 10^{-5}$)							
	0.18265	0.36530	0.57078	0.91324	1.14155	1.82648	2.28311	2.85388
LOLP ($\times 10^{-5}$)	20.000	40.000	62.500	100.000	125.000	200.000	249.990	312.490
EDLC	1.752	3.504	5.475	8.760	10.950	17.520	21.900	27.374
EENS	183.848	367.696	574.525	919.239	1149.049	1838.479	2298.099	2872.624
EC ($\times 10^{-5}$)	0.089	0.179	0.279	0.447	0.558	0.894	1.117	1.396

표 6은 선로의 Common Mode 상정사고에 대하여 고장확률에 따른 신뢰도지수를 계산한 것인데, LOLP, EDLC, EENS, EC 등의 신뢰도지수가 고장확률에 정비례함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 발전기와 선로로 조합된 (N-1), (N-2) 상정사고와 선로의 Common Mode 상정사고에 대한 공급신뢰도 평가를 통해서 다음의 사실을 확인하였다.

1) 발전기의 (N-1) 상정사고는 표 2에서와 같이 사례연구 대상계통의 공급신뢰도에 어떤 영향도 미치지 않았는데, 이는 계통의 공급예비력 수준에 기인한다.
2) 선로의 (N-1) 상정사고는 표 3에서와 같이 사례연구 대상계통의 공급신뢰도에 영향을 미쳤는데, 이는 계통의 토폴로지에 기인한다. 5건의 상정사고 Case가 공급지장을 일으켰으며, 공급지장 정도는 고장확률에 정비례하였다.
3) 선로의 Common Mode 상정사고는 표 5에서와 같이 사례연구 대상계통의 공급신뢰도에 영향을 미쳤는데, 이는 계통의 토폴로지에 기인한다. 110건의 상정사고 Case가 공급지장을 일으켰다.

[참 고 문 헌]

[1] Pei Zhang, "Transmission Reliability Evaluation for Large-Scale Systems(TRELSS) User's Manual", 2003.

[2] 전동훈, 최재석, 김건중, "TRELSS를 이용한 우리나라 전력계통의 확률론적 신뢰도 평가에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 제55권 제11호, 2006.