

스위치야드 기기 신뢰도 구축방안

문수철, 김건중\*

한국원자력안전기술원, 충남대학교\*

Reliability Establishment Method of Switchyard Equipment

Moon Su Cheol, Kim Keron Joong

Korea Institute of Nuclear Safety, Chung-Nam National University

**Abstract** - The nuclear power plant uses the steam which occurs from reactor and T/G the drive. By the T/G in consequence of the fact that the electricity which is produced the power and supplies in transmission system. But, recently the transmission and generation system are placed under deregulation situation from domestic and foreign. the maintenance control is difficult with the accident or the breakdown which relates is increasing. Hereupon, considering for effect to the reactor core against trip element which it does apply a probability concept from the NRC of the United States and it study and the recognition for the importance of the switchyard which is a power equipment which will be reevaluated. Hereupon using the American example, the reliability establishment method which is suitable in domestic and it searches it does.

도 신뢰도를 충분하게 검토할 필요성이 있다.

2.2 스위치야드

표준원전과 차세대 원전인 경우 계통전압은 345/765 kV(154/345 kV)로 두 호기에 공용으로 사용하며 GIS(Gas Insulation Switchgear) 형식, 2 주모선/ 4 Bay(1.5CB)로 구성하고 있다.

운영 전 FSAR(Final Safety Analysis Report)에는 소내의 전력계통에 대해 고장용량, 조류검토 및 안정도 검토를 수행하며 확률적안전성분석을 통하여 신뢰도를 검토를 수행하나, 운영 후 계통변경, 설계변경시 신뢰도 평가(가)을 적시에 수행하지 않고 있다. 이로 인해 전력계통 사고원인(Plant, Grid, Weather-Related 등)으로 LOOP(Loss of Offsite Power), SBO(Station BlackOut)가 국내에서도 발생할 가능성이 있다.

2.3 우선전력계통

송전계통으로부터 2개 이상의 독립회로로 구성되어 안전 등급계통에 전력을 공급하는 계통으로 계통사고 후나 사고 중 LOOP 및 SBO를 예방하고자 다중화, 다양화 개념을 반영하고 있다. 그러나 계통설비인 스위치야드 설비는 비안전 등급으로 안전계통의 설계개념이 기술기준으로 반영되고 있지 않다.

2.4 연구방법

2.4.1 국내사례

정부주도하에 전력산업이 관리되어 노후 및 고장유발설비를 적절히 개선하여 왔으나 전력산업구조개편(2002년)으로 6개 발전회사로 분할되면서 스위치야드는 소유자와 관리자 이원화로 유지보수 및 관리에 어려움을 겪고 있다.

표1 발전소 발전정지 현황 분석

구분	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	계
고장정지	13	6	13	8	8	8	11	12	10	11	100
중간정지	-	1	6	1	2	3	4	3	1	4	25
파급정지	7	-	-	2	6	1	4	3	3	2	28
급전정지	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
계	20	7	19	11	16	12	19	18	15	17	154

구분	Gen	Ex	Tr	Ry	PT	HM	Grid	Exc	계
KSNP(8)	5	1	4	2	-	3	1	-	16
WH(6)	1	4	2	2	2	2	2	3	18
PHWR(4)	2	2	3	-	-	-	5	2	14
FM(2)	5	1	2	1	-	-	1	-	10
계	13	8	11	5	2	5	9	5	53

기타 : 고장파급(4), 사공불량(1), 정비불량(1), 설제야동(1), 제작불량(1), 기타(1)

\*Source: 제11회 기술정보회의 한수원(주) 발표자료

표2 년도 별 원자로정지 건수/전기계통

3) IEEE Std. 765-2002 IEEE Standard for Preferred Power System(PPS) for Nuclear Power Generating Stations

1. 서 론

원자력발전소는 원자로에서 발생한 증기를 터빈발전기에 의해 생산한 전력을 스위치야드를 통해 전력망에 공급하도록 계통이 구성하고 있다. 최근 국내·외 스위치야드 설비 사고의 증가원인은 소유와 관리의 이원화적인 전력산업의 규제완화로 분석되고 있고, 이로 인해 원자로정지가 증가되어 전력계통사고가 확률적으로 원자로노심에 직·간접 영향을 줄 수 있다고 검토되어 그 동안 소홀하던 전력계통설비인 스위치야드설비에 대해 중요성이 부각되고 있다. 이에 국내에서는 정례화되지는 않았으나 미국 사례를 통해 국내에 적합한 신뢰도 구축방안을 제안하고자 한다.

2. 본 론

원자력분야에서는 확률적안전분석에 소홀하게 관리하던 계통 및 설비에 대해 2003년 북미지역 Blackout 이후 안정도와 신뢰도 평가를 NRC(Nuclear Regulation Commission), INPO(Institute of Nuclear Power Operations), FERC(Federal Energy Regulation Commission) 및 NERC(North America Electric Reliability Corporation)간 지속적인 협의를 통해 본격적으로 연구하기 시작하였다.

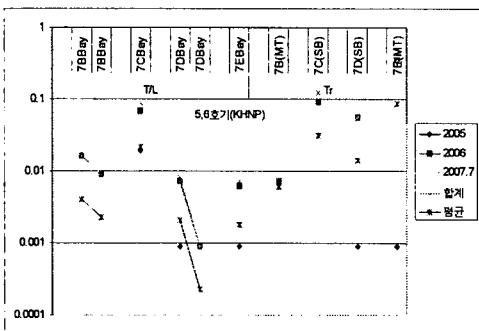
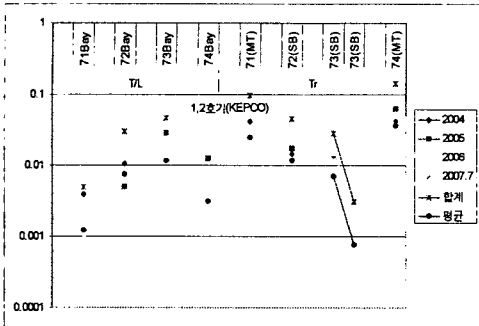
2.1 일반사항

미국<sup>1)</sup> 원전은 전력생산에 19.3%로 예비적인 전력공급원 성격이나, 국내<sup>2)</sup>는 부하의 급속한 증가와 안정적인 전력공급 필요성으로 39.0% 이상 차지하고 있어, 국내 원자력 안전규제의 통합의 목적에도 부합하고, 전력산업구조개편으로 예상되는 문제점을 예방하기 위해 1차 계통에 대해서만 신뢰도 평가를 수행하던 업무를 비안전등급 설비에 대해서

1) 2005년 Energy Information Administration, Form EIA-860, "Annual Electric Generator Report."  
2) 2006년도 전력거래소 발전설비운영실적(3,815.4/1,489.7 만kW)

구분	총 건수	발생건수
78년-03년	625	81
04년-06년	58	7
Deregulation(2001.4)	Before	62
	After	26
소 계	683	88

표3 호기별 고장 및 유지보수시간



\*Source: 운영일지/ 8,760h/1년, 13,140h/18개월, 30,960h/43개월  
- 전원제동 신뢰도 지수 : 0.5일/년(12/8760=0.001369863),

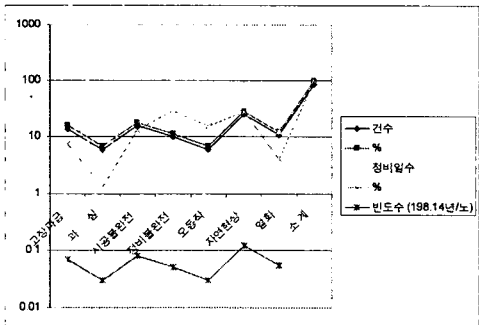


표4 SWYD Trip signal

구분	종류
PCB	7x51, 7x00, x 7x22
터빈	HP MSV(1/4), LP ISV(2/6)
GCB	phase discrepancy, over-current, reverse-power etc
81	57.3(0.99s), 57.7(1.0s), 58.1(1m), 58.5(10m)
PNL	21, 50BF, 50/51, 59/G, 60(전압평형), 87, 96B, 96D

\*Source: trip logic circuit

## 2.4.2 미국사례

표5 전력망 상실사고 현황

구분	related	1986-1996			1997-2004		
		건수	운영/년	빈도수	건수	운영/년	빈도수
연	Plant	11	877.2	3.31E-02	1	724.3	2.07E-03
종	SWYD	23	877.2	2.68E-02	7	724.3	1.04E-02
	Grid	1	877.2	1.71E-03	13	724.3	1.86E-02
	Weather	3	877.2	3.99E-03	3	724.3	4.83E-03
	total	38		4.56E-02	24		3.59E-02
정	Plant	14	278.5	5.21E-02	5	104.7	5.25E-02
지	SWYD	31	278.5	1.13E-01	7	104.7	7.16E-02
중	Grid	1	278.5	5.39E-03	2	104.7	2.39E-02
	Weather	9	278.5	3.41E-02	4	104.7	4.30E-02
	total	55		2.05E-01	18		1.91E-01

일시	발전소	고장원인
1985. 2.6	Palo Verde	발전소 계통규정안입 상실
1987. 7.22	Clinton Power	허계부하에 대한 소외 전력안전성 미검토, 과부하로 송전계통 상실
1988. 9. 1	Pickering	전력망 저전압 미인지 LOCA 인식
2000. 3.	Sequoyah #1	여자기 상실로 주발전기 trip, 보호계전기오동작, 터빈/원자로 정지
2003. 7.	Palo verde	전력제동용 펌프, 분수조파 공진발생, 과도토크보호로 주발전기정지
2003. 8.14	North American	캐나다/연계계통 대규모 정전사고, 발전소안전분석 미 포함 사고
2004. 5. 5	Dresden Unit 2,3	스위치야드 차단기 결상, 연계된 원자로 정지, ECCS 작동
2004. 7.	Palo verde	relay 접점불량, 송전선로 지락 마보호(25초), 소외전력상실 정지
2006. 6.20	Catawba	PCB 보호용 CT 고장, LOOP 발생
2006. 7.25	Forsmark-1	스위치야드 단락사고, 안전계통(AC, DC) 전력상실

\*Source: NRC RIS 04-05, 24, IN 00-06, 06-06, KPX 자료실, SOER 99-01

표6 LOOP 원인별 Event

구분	외부 사고	하드웨어	인적실수		전력계통	기상악화	계	percent (%)
			가동중	정지중				
발전소관련	-	11	8	12	-	3	34	23
SWYD관련	-	42	3	21	1	8	75	51
송전망관련	-	3	1	-	14	-	18	12
기상관련	6	-	-	-	-	15	21	14
계	6	56	12	33	15	26	148	100
percent(%)	4	38	8	22	10	18	100	

\*Source: NUREG/CR-6890 Vol.1

## 2.5 신뢰도 연구

LOOP와 SBO를 유발하고 계통망 전압저하로 전압안정도에 중요한 영향을 미치는 PPS(Preferred Power System) 스위치야드 설비에 대해 NRC는 관련시간 의견조율과 정보공유를 통하여 신뢰도를 강화하기 위해 다음 4가지 사항을 수행하도록 제안했고, FERC는 NERC를 신뢰도 전문규제기관으로 선정하여 연구를 수행하도록 하고 있다.

- 1) 발전소, 송전계통 및 독립계통 운영자간 Protocol 사용
- 2) NPP(Nuclear Power Plant) 및 TSO(Transmission System Operator)간 위험도평가 고려한 RTCA(Real-Time Contingency Analysis) 프로그램 운용
- 3) RG 1.155 2(offsite power) 소외전력 복구절차 수립 및 이행
- 4) RG 1.155 주파수 변동으로 계통망 실패시 소외전력상실 검토

국내 상황은 미국상황보다는 제도적으로 보완된 상황<sup>4)</sup>이나 전력산업개편에 따른 후속조치가 향후 예상되고 소유와 관리가 이원화로, 사업자간 의사교환이나 정보공유 부족이 원전 안전성에 증대한 영향을 미칠 수 있기 때문에 NPP와 TSO간 정보공유 및 의견조율이 현 시점에서 절실히 필요하다고 판단한다.

NRC는 원전 위험도 분석과 LOOP를 유발할 수 있는 모든 가상조건에 대해서 CDF(Core Damage Frequency)에 큰 영향을 줄 수 있다고 분석하고 있으며, LOOP Event별 Plant, Weather, Grid center로 분류하여 계통망 안정도와 신뢰도 중요성을 거듭 강조하고 있다. 또한, Maintenance Rule(10CFR50.65)와 Station Blackout(10 CFR50.63)에 따른 소외전력신뢰도를 향상시키기 위한 Feedback correction을 반드시 수행하고 소외전력 이용이 불가능할 때 소외전력 복구절차서와 인근 전원계통 사용에 대한 사항을 포함한 Audit를 정기적으로 수행하여 다음의 잠재적인 원인사항을 개선, 반영하도록 제시하고 있다.

가) 전력망 저전압 및 붕괴

4) 2005.5.1 안전규제업무 통합으로 관련 법령정비

나) 이상기후에 대한 전력손실

다) 필수 스위치기어(배전) 모선의 전력손실

이에 국내도 전력계통망 신뢰도에 대해 LOOP 경험 자료를 수집·분석하여 상실빈도, 회복시간, 계통의 영향 등을 고려하여 다음과 같은 사항에 대해 검토가 필요하다.

가) 사업자간 지속적인 정보회의의 구축

나) TSO와 NPP간 협력 구축

다) 과거이력(정비, 보수 및 사고 등) 정보수집 및 분석

라) 사고예방방지 프로그램 구축

마) 신뢰도 향상 노력 지속

바) 운영경험 반영

사) 시정조치

발생되어 관련자간 주기적이고 적극적인 인터페이스 활동이 절실히 필요하다.

2) 기기 건전성 향상과 신뢰도 향상을 위해 분명한 사고 분석과 적극적인 시정조치활동으로 설비 신뢰도를 확보할 수 있어야 한다.

3) 확률론적 신뢰도와 Maintenance Rule 개념을 도입하여 차등적인 품질활동으로 사업자 업무 효율성과 효과성을 증진시킬 수 있는 방안이 검토되어야 한다.

4) 향후 전문Pool를 구성하여 전력산업의 문제점을 분석하고 향후의 상정하지 못한 사고에 대해서 대체할 수 있는 제도가 마련되어야 한다.

### [참 고 문 헌]

#### 2.3.1 NUREG-1784에 의한 신뢰도 평가

NRC는 소의전력 계통망에 대해 규제대상은 아니지만 안전 측면에서 EDG(Emergency Diesel Generator)와 관련한 소의전력상실을 위험도평가에 중요한 요소로 판단하여 사업자와 계통망 신뢰도 향상방안을 위해 수 년에 걸쳐 협력을 지속하고 있다. 이에 국내에서도 유사 협력강화내용을 적극적으로 검토하여 반영할 시점에 있다.

- 1) LOOP는 특정시기에 집중 발생하여 EDG와 연계된 송전 계통과 보호협조 고려
- 2) 전력계통망 변경 및 전압변동 원인에 대해 신뢰도 평가 수행
- 3) NPP와 TSO는 계통안정도와 신뢰도를 유지하기 위해 실시간 기술적활동 수행
- 4) 발전소 위험도 평가시 LOOP 중요 요소(무효전력 부족, 기기/설비 노후화) 검토·반영
- 5) 직결모선 전압·주파수변동이 RCP 유속과 연료제어봉인 양기 작동에 미치는 영향 검토
- 6) RCP 저전압과 저주파수의 원인이 되는 주변압기 탭절환기와 주발전기 여자기 전압/주파수[V/Hz] 보호제전기 설정치에 대한 보호협조 검토

#### 2.3.2 INPO SOER(Significant Operating Experience Report) 99-01에 의한 신뢰도 평가

스위치야드내 기기결함, 불충분한 사고방지, 보호장치, 인적실수 등에 기인한 사고는 2003년 기준으로 과거 3년대비 약 8배 증가하고 복구시간도 점차 증가하면서 TSO와 RTO(Regional Transmission Operator) 교육항목에 simulation을 이용한 사고 전·후 전압제한 요건과 계통망 전압사항에 대해 다음 사항을 고려하도록 제시하고 있다.

- 1) 원자로발전소와 TSO간 적절한 Protocol(communication and coordination) 수립
  - 2) 전력계통망 상실에 대한 적절한 이행 및 복구절차 수립
  - 3) 발전소, 스위치야드 계통망과 기기 예방프로그램 운영
- 발전소 소의전력계통의 신뢰도를 향상시키기 위해 Exciter, Governor, OLTC(On Load Tap Changer) 등 TSO 분석 결과와 부합되는 예방관리프로그램을 제공하고 검토하여야 한다.
- 4) 예상하지 않은 기기 Trip으로 긴급전력 이용이 불가능하여 전력계통 저전압시 안전기기의 설계치 분석.
  - 5) 운전원 교육
  - 6) 전력계통 운영기준에 부합되고 발전소안전과 전력계통망에 적절한 복구 대응설비 반영
  - 7) 비필수전력 상실에 대한 의사교환체계
  - 8) 스위치야드 관련기기의 문제점을 운영경험에 반영, 기록 유지 및 발전소안전성 향상에 기여하여야 한다.

### 3. 결 론

미국의 NUREG-1784와 원전운영보고서 INPO 99-01를 기반으로 국내의 스위치야드 신뢰도구축방안을 다음과 같이 도출하고자 한다.

- 1) 전력산업구조개편과 규제완화로 사업자간 공유하지 못하는 설비가 발생되면서, 적기에 교체나 유지보수 어려움이

- [1] INPO SOER 99-01, "Loss Of Grid - Addendum", 2005
- [2] NUREG/CR-6890, Vol.1, "Reevaluation of Station Blackout Risk at NPP", 2005
- [3] "NUREG-1784, "Operating Experience Assessment-Effects of Grid Events on NPP Performance", 2003
- [4] SECY-05-0219, "Grid Reliability and The Impact on Plant Risk and The Operability of Offsite Power", 2005
- [5] NRC IS 00-24, "Concern about Offsite Power Voltage Inadequacies and Grid Reliability Challenges due to Industry Deregulation", 2000
- [6] NRC GL 06-02, "Grid Reliability and The Impact on Plant Risk and The Operability of Offsite Power", 2005
- [7] Michal E. Mayfield Director, "Grid Reliability", April 24, 2006
- [8] EPRI, "Method to Monitor Nuclear Power Plant Risk from Transmission Grid Conditions", 2004