

확률론적 평가를 이용한 원자력발전소 소내전력공급계통 신뢰도 감시 방법

논문
58-3-3

A Method to Monitor the Reliability of In-house Power Supply Systems in Nuclear Power Plants Based on Probabilistic Assessment

박진엽* · 정동욱†
(Jin Yeub Park · Dong Wook Jerng)

Abstract - This paper introduces a method to establish performance criteria of the in-house power supply system in nuclear power plants. The performance criteria of the system is presented in terms of the number of function failures and amount of the out-of-service time that can be allowed commensurate with the probabilistic safety assessment results of the nuclear power plants. To obtain the performance criteria such as reliability and availability, the functions of the system were analyzed and probabilistic assessment results were utilized. This method provides quantitative guidelines in selecting and monitoring system functions to determine an adequate level of maintenance quality in order to ensure the probabilistic goals for the safety of the nuclear power plants.

Key Words : Reliability, PSA, In-house power system, Maintenance effectiveness, Function failure

1. 서론

일반적으로 발전소 설비는 화력, 원자력 등 1차 에너지를 기계적 에너지로 전환하고 이를 다시 전기적 에너지로 변환하여 전력망에 전력을 공급하는 설비로 이루어져 있다. 원자력발전소는 이에 더하여 발전소를 안전하게 제어하고 외부로의 방사능 누출을 방지하기 위한 안전설비들이 추가되어 있다. 원자력발전소의 안전성은 각종 안전설비를 이용하여 원자로심의 손상을 방지하는데 일차적인 목표를 두고 있으며 확률론적 안전성분석(Probabilistic Safety Assessment) 방법을 사용하여 정량적인 안전성 수준을 평가하게 된다. PSA 방법에 의한 안전성 수준은 노심손상확률의 형태로 평가되는데 이는 초기사건이 발생할 확률과 사건 발생을 완화시키는 설비의 고장률에 의해 결정되며 원자력발전소의 안전설비는 PSA 분석에 가정된 설비 고장률이 초과되지 않도록 적절히 유지보수 되어야 한다.

설비 유지를 위한 정비관행은 기기공급자의 기술사양서 및 경험에 따라 수립된 정비주기에 따라 점검 및 교체를 시행하고 있으나 그 정비활동이 원자력발전소의 안전성에 어떠한 영향을 미치고, 또 영향을 미치지 않도록 하기위해 어떻게 해야 하는지는 고려되지 않았다. 최근 미국에서는 PSA 방법에 의해 평가된 정량적 안전성 수준을 만족하기 위하여 설비의 성능 수준을 정하고 이를 초과하지 않도록 감시 및 정비를 하여 정비효과성을 지속적으로 측정하고 개

선하도록 규제요건으로 시행하고 있으며, 국내의 원자력 발전소도 정비선진화와 안전성 보장을 위해 미국 원자력사업자 협의회가 제시한 NUMARC 93-01 지침을 기반으로 정비효과 감시프로그램을 도입하고 있다[1]. NUMARC 93-01에서 제시하고 있는 정비효과 감시프로그램은 그림 1에 묘사되어 있는 바와 같이 4개 단계로 구성되는데 첫째, 관리해야 하는 기능을 판단하는 관리대상 기능선정, 둘째, 관리수준을 선별적으로 정할 수 있도록 선정된 관리대상 기능의 안전중요도 결정, 셋째, 안전중요도에 따라 관리 수준, 즉 성능기준 수립, 마지막으로 설정된 성능기준을 초과하지 않는 지 감시하고 초과 시 조치계획을 세우는 감시단계로 구성되어 있다.

본 논문에서는 원자력발전소 소내전력계통을 대상으로 기능분석에서 성능기준 수립까지 그림 1에 묘사된 각 단계를 NUMARC 93-01의 지침을 활용하여 실질적으로 구현하는 방법을 소개하고 산출된 성능기준에 대비하여 최근 3년 동안 이루어진 정비활동 데이터를 근거로 성능기준 설정의 적정성 및 정비신뢰성을 평가하고자 한다.

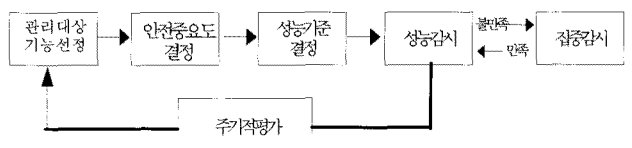


그림 1 정비효과 감시프로그램 개발 및 운영프로세스
Fig. 1 Process diagram of the maintenance effective monitoring program

* 정 회 원 : 원자력발전기술원 선임전문원 · 석사
† 교신저자, 정회원 : 원자력발전기술원 책임연구원 · 공학
E-mail : dwjerng@khnp.co.kr
접수일자 : 2008년 10월 16일
최종완료 : 2008년 12월 23일

2. 본 론

2.1 원자력발전소 소내전력계통 구성

소내전력계통은 안전관련 설비에 전원을 공급여부에 따라 안전관련 전력공급계통(Class 1E)과 비 안전관련 전력공급계통(Non Class 1E)으로 구분된다. 안전관련 전력계통은 냉각재 상실사고와 같은 가상사고 조건에서 발전소를 안전하게 정지시키고 안전정지상태로 유지하는데 필요한 공학적 안전설비에 전력을 공급한다. 안전등급 전기계통은 IEEE Std.308-1978에 따라 안전계통의 동시사고를 방지하기 위해 다중성과 물리적 및 전기적 독립성을 충분히 갖도록 설계되어 있다. 안전등급 전력공급계통은 4.16kV, 480V AC, 120V AC, 125 V DC 공급 등 전원별로 여러 계통이 있지만 이 중에서도 4.16kV 전력공급계통은 원자력발전소의 사고시 안전정지와 원자로냉각을 유지하는 비상냉각수공급계통 등 공학적 안전설비에 전력을 공급하는 계통으로써 특히 중요한 전력공급계통이다.

안전등급 4.16kV와 관련된 전력공급계통은 외부로부터 345kV 전원을 수전 받아 4.16 kV로 변환시키는 기동용변압기 계통, 안전관련 설비에 전원을 공급하는 4.16kV 공급계통, 소의 전원상실시 안전관련 모선에 비상전원을 공급하는 비상디젤발전기계통과 비상디젤발전기의 전압을 제어하고 4.16 kV 모선에 연계하는 비상디젤발전기 전기계통으로 구성되어 있으며, 이 중 안전등급 4.16kV 계통은 전기적 및 물리적으로 독립된 2개의 모선으로, 안전관련 4.16kV 부하 및 480V Load Center에 전원을 공급하며 이 계통은 단일기기의 고장이 발생해도 전력공급계통 전체의 기능이 상실되지 않도록 구성되어 있다. Class 1E 전력공급계통의 단선도는 그림 2와 같으며, 정상운전 중에는 스위치야드의 345kV 기동용 변압기를 통해 외부전원을 수전하고, 외부전력 또는 기동용 변압기가 상실된 경우에는 비상디젤발전기가 기동하여 전원을 공급하도록 되어 있다[2].

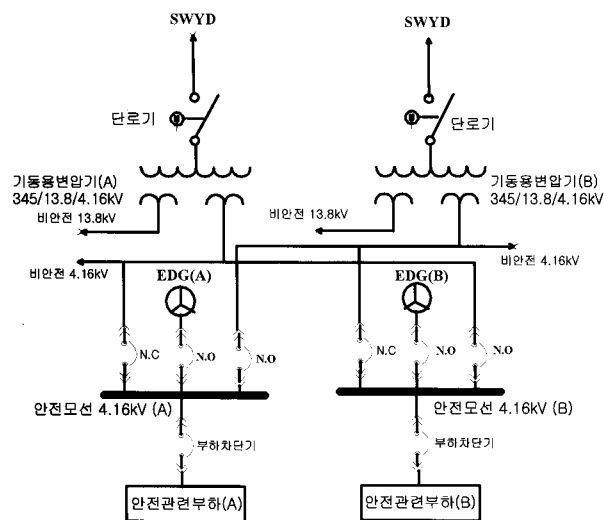


그림 2 안전관련 4.16kV 전력공급계통

Fig. 2 Schematic for Class 1E 4.16kV power system

주1) EDG : 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator)

주2) A, B : 시스템을 구성하는 계열(Train A 및 B)

2.2 기능분석 및 관리대상 기능 선정

계통설비의 성능을 감시하고 정비효과를 측정하기 위해서는 계통의 기능을 분석하여 그중에서 어느 기능을 관리 대상으로 할 것인가를 결정해야 한다. 정비효과 감시프로그램 수립을 위한 일반 지침인 NUMARC 93-01에 의하면 계통의 기능은 설계문서를 참조하여 분석하고, 표 1의 판단기준을 적용하여 관리대상 여부를 결정한다. 예를 들면, 분석된 기능이 설계기준사고 시에 '원자로냉각재 압력경계 전전성유지'에 기여한다고 판단되면 성능기준을 세우는 대상으로 결정하는 것이다.

표 1 관리 대상 기능 여부 판단 기준

Table 1 Selection criteria to determine the scope of monitoring

계통 유형	판단 기준	판단 기준 정의
안전 관련 계통	SR1*	원자로 냉각재 압력경계 전전성 유지기능
	SR2	원자로를 정지시키고 안전정지 상태 유지기능
	SR3	소의 방사능 누출을 유발할 수 있는 사고의 결과를 완화하거나 방지하는 기중
비 안전 관련 계통	NSR1*	안전성분석보고서에 기술된 사고나 과도상태를 완화시키는데 필요한 비 안전관련 기능
	NSR2	비상운전절차서에 사용되는 중요한 비 안전관련 기능
	NSR3	고장이 발생할 경우 안전관련 설비의 안전기능 수행을 저해하는 비 안전관련 기능
	NSR4	고장이 발생할 경우 원자로 불시 정지나 안전계통의 동작을 초래 하는 비 안전관련 기능

*주) SR : Safety Related, NSR : Non-Safety Related

안전등급 4.16 kV 전력공급계통은 기동변압기 A/B, 비상디젤발전기로부터 전원을 공급받는 기능과 4.16 kV 부하에 전력을 공급하는 기능, 4.16 kV 모선을 보호하는 기능 등 3개의 기능으로 분류할 수 있으며, 이 기능들은 원자로의 안전정지유지 및 사고완화에 사용되는 기기들에 전력을 공급하는 역할을 함으로 표 1의 SR2와 SR3 판단기준에 의해 관리대상 기능으로 선정된다. 안전등급 4.16 kV 계통과 관련된 나머지 계통인 비상디젤발전기, 비상디젤발전기 전기계통, 기동용변압기계통에 대한 기능분석과 관리대상 판단 적용결과는 표 2에 정리되어 있다.

2.3 안전중요도 결정

관리대상기능이 결정되면 성능관리 수준을 정하기 위하여 기능의 안전중요도 분석을 하는데, 안전중요도 분석은 확률론적 안전성분석(PSA) 결과를 바탕으로 해야 하나 PSA 모델링이 되지 않은 계통은 델파이 기법을 이용한 전문가 판단

표 2 안전등급 4.16 kV 전력공급계통 기능분석 및 관리 대상 판정 결과

Table 2 Results of function analyses and scoping for Class 1E 4.16kV power system

세부 계통명	계통기호	기능번호	기능명	적용기준
비상 디젤 발전기	KJ	KJ-01	비상전력공급	SR2, SR3
		KJ-02	디젤에 연료유 공급	
		KJ-03	디젤엔진 윤활/냉각	
		KJ-04	기동용 공기 공급	
		KJ-05	비상디젤 속도제어	
		KJ-06	비상디젤 냉각수배관 건전성유지	
기동 변압기	MC	MC-01	안전관련 부하에 전원 공급	NSR2 NSR3 NSR4
		MC-02	기동 변압기 보호	
4.16 kV 전력 공급 계통	PB	PB-01	3개의 독립전원 수전	SR2 SR3
		PB-02	안전등급 4.16kV 부하에 전원 공급	
		PB-03	안전등급 4.16kV 모선 보호	
비상 디젤 발전기 전기 계통	PE	PE-01	안전모선 전원공급	SR2 SR3
		PE-02	비상디젤발전기 전기적 보호	
		PE-03	비상디젤발전기 전압제어	

을 적용한다. 안전중요도는 고 안전중요도와 저 안전중요도의 두 범주로 결정되며 고, 저 안전중요도 결정에 따라 성능 기준 설정방법과 수준이 달라진다.

PSA는 설비의 고장으로 인한 발전소위험도 증가 정도를 평가함으로 설비의 위험도감소가치 (Risk Reduction Worth)와 위험도증가가치 (Risk Achievement Worth)를 기준으로 안전중요도를 판단할 수 있다[3]. 위험도감소가치는 해당 설비가 100%의 신뢰성을 가질 경우 노심손상 확률을 감소시키는 정도를 의미하며 위험도감소가치가 1.005 이상이면 그 설비가 수행하는 기능은 고 안전중요도로 결정한다. 위험도증가가치는 해당 설비의 신뢰도가 0일 경우, 노심손상확률이 증가되는 정도를 의미하며 위험도증가가치가 2.0 이상이면 고 안전중요도로 결정한다. 위험도 증가, 감소 가치 이외에도 고장 시 노심손상에 미치는 영향이 큰 기능부터 기능 고장으로 인한 노심손상빈도를 누적하여 누적 노심손상빈도가 전체 노심손상빈도의 90%에 해당하는 범위에 포함된 기능은 고 안전중요도로 평가한다.

표 2의 기능 중 안전등급 4.16kV 전원공급과 관련한 PB 계통의 기능에 대하여 안전중요도 결정 예를 들면, PB-01의 '3개의 독립된 전원수전' 기능의 경우 '안전등급 4.16kV SWGR 모선작동 중 실패' 사건을 기본사건으로 RAW, RRW 값 및 CDF 90% 포함여부를 평가한 결과 RAW가 51.45, RRW가 1.00038, CDF 90% 범위에 포함되는 걸로 평가되었으며 RAW가 기준값 2를 초과하므로 고안전중요도로

결정되었다. PB-02의 '안전등급 4.16kV 부하에 전원제공' 기능의 경우 PSA의 '안전등급 4.16kV 차단기 작동 중 고장실패' 사건을 기본사건으로 분석한 결과 RAW가 8.45, RRW가 1.000055, CDF 90% 범위에 포함되지 않는 것으로 평가되었으나 PB-01과 같이 RAW가 기준값 2를 초과하여 고안전중요도로 결정되었다. PB-03등 다른 계통의 기능들도 PSA에 모델링이 된 경우에는 동일한 방법으로 안전중요도를 결정하였다. 표 2의 14개 기능에 대한 안전중요도 결정 결과는 표 3과 같다.

표 3 각 계통별 PSA 결과에 따른 안전중요도 판정결과
Table 3 Safety significance of the system functions according to the PSA results

계통	기능번호	PSA분석 대표사건	RAW	RRW	안전중요도
KJ	KJ 01 ~06	비상디젤발전기 기동실패	8.23	1.0446	고
MC	MC-01	기동변압기의 정비로 인한 이용불능	16.11	1.0116	고
	MC-02	소외전원 상실	18.79	1.784	저*
PB	PB-01	안전등급4.16kV SWGR 모선작동중 실패	51.45	1.0004	고
	PB-02	안전등급 4.16kV 차단기 작동중 실패	8.45	1.00006	고
	PB-03	모선 상실시 디젤 발전기 기동	7.23	1.00001	고
PE	PE-01	비상전원공급용 차단기 투입실패	8.19	1.00496	고
	PE-02	모델링 안됨	델파이 평가로 결정		저
	PE-03	비상디젤발전기 기동실패	8.23	1.04463	고

* 소외전원상실사건을 기본사건으로 분석하면 노심손상을 일으킬 확률이 높아 RAW, RRW 값은 기준값을 초과하나 기동변압기 보호기능으로 인한 소외전원 상실사고가 발생할 확률이 극히 낮아 저안전중요도로 결정

2.4 성능기준 설정

2.4.1 성능기준의 종류 및 설정 방법

관리대상 기능의 안전중요도가 결정되면 선정된 기능에 대해 성능기준을 설정하게 되는데 안전중요도 및 운전형태에 따라 그림 3과 같이 계통수준, 계열수준에서 신뢰도성능기준(Reliability Performance Criteria, RPC), 이용도성능기준(Availability Performance Criteria, APC), 상태감시성능기준(Condition Monitoring Criteria, CMC) 및 호기수준성능기준(Unit Level Performance Criteria, ULPC)을 설정한다. RPC는 일정한 감시기간 동안 허용되는 고장횟수이며, APC는 허용되는 이용불능시간, CMC는 기능고장이 허용되지 않는 경우 (RPC가 '0'인 경우) 기능고장을 사전에 방지하기 위한 상태감시조건을 의미한다. ULPC는 각 개별 기능단위의 성능기준이 아니라 발전소 전체적인 관점에서 관리되는

성능기준으로 발전소 불시정지횟수 등이 해당 된다.

신뢰도성능기준 설정은 PSA에 모델링 된 경우에는 미국 전력연구소 방법론을 사용하는데 PSA의 고장률데이터와 기기의 운전요구횟수, 운전요구시간 등을 파악하여 운전요구시간 동안에 고장이 발생할 확률은 포와송 확률밀도 함수를 이용하여 구하며, 작동 요구신호 발생 등으로 작동이 필요할 때 고장이 발생할 확률은 이항 확률밀도함수를 이용하여 계산한다[4][5]. PSA에 모델링이 되지 않은 경우에는 안전중요도에 따라 동작요구횟수에 대하여 고안전중요도인 경우에는 5%의 고장을 허용하며, 저안전중요도인 경우에는 10%를 허용하여 설정한다.

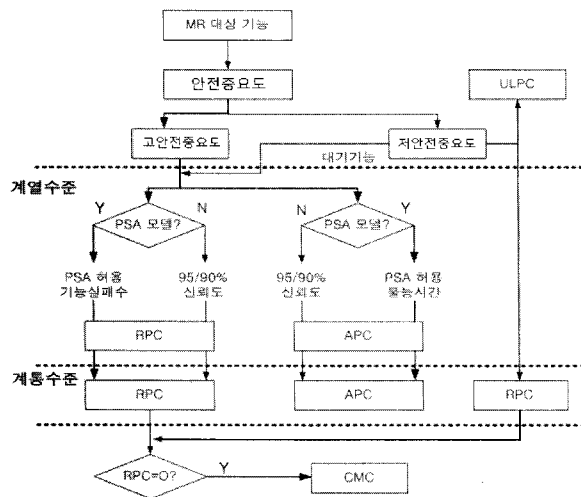


그림 3 성능기준 설정 유형 결정 프로세스
Fig. 3 Process for determination of performance criteria types

포와송 확률밀도 함수와 이항 확률밀도함수 식은 다음과 같다

포와송 확률밀도함수 :

$$P(n) = \frac{(\lambda T)^n}{n!} e^{-\lambda T} \quad (1)$$

여기서, P(n)은 운전이 요구되는 T시간 동안 n회의 고장이 발생할 확률이며, λ는 기기 고장률이다.

이항 확률밀도함수 :

$$P(r) = \frac{n!}{r!(n-r)!} P^r (1-P)^{n-r} \quad (2)$$

여기서, P(r)은 운전이 요구되는 n회의 작동횟수 중 r회의 고장이 발생할 확률이며, P는 기기 고장확률이다.

이용도성능기준은 관리대상기능이 기능고장, 정비, 시험 등으로 발생하는 이용불능시간이 노심손상확률에 일정 범위 이상의 영향을 주지 않도록 하기 위해 설정하는데, PSA에 모델링이 된 경우에는 PSA의 시험 및 정비에 따른 이용불능도에 감시기간 동안의 운전요구시간을 고려하여 계산하게 된다. PSA 모델이 없을 경우에는 발전소의 정비 경험, 운영기술지침서의 허용고장정지 시간 등을 고려하여 합리적으로

정하게 된다.

이용도성능기준 계산식은 다음과 같다.

$$\text{이용불능시간} = \text{PSA의 시험 및 정비로 인한 이용불능도} \times \text{운전요구시간} \quad (3)$$

2.4.2 성능기준항목 선정

성능기준을 설정하기 위해서는 감시할 성능기준항목을 우선 정해야 하며, 이를 위해 기능 간 상호 연관관계를 분석하여야 한다. 기능간의 연관관계는 '일방지원', '상호지원 및 영향', '필수기기 공유', '성능 공유' 등으로 분류할 수 있는데, 기능 간 연관관계에 따라 하나의 기능이 하나의 성능기준으로 설정될 수도 있고, 여러 개의 기능이 하나의 성능기준으로 통합 되거나, 하나의 기능이 여러 성능기준으로 감시가 될 수 있기 때문에 효과적인 성능감시가 될 수 있도록 성능기준 항목을 선정해야 한다.

표 2에서 선정된 기능에 대하여 기능 연관관계 분석을 한 결과 KJ-02~06 및 PE-01~03은 KJ-01로 정의된 비상전력을 공급하기 위한 비상디젤발전기의 기능수행을 지원하고 있어, 이들 기능의 고장은 곧 KJ-01 기능의 고장으로 이어짐으로 성능기준을 KJ01로 통합하였고, 동일한 원리를 적용하여 MC-02 역시 주 기능인 MC-01에 통합하여 성능기준 MC01을 수립하였다. PB계통은 PB-01과 PB-03을 통합하여 PB01로, PB-02는 별도의 독립된 성능기준으로 항목을 정하였다. 표 4는 표 2의 12개 기능에 대하여 선정한 성능기준 항목이다.

표 4 성능기준 항목 선정

Table 4 Determination of performance criteria items

계통 기호	기능 번호	기능명	성능기준항목
KJ	KJ-01	비상전력공급	KJ01: 소외전원 상실시 비상전원 공급
	KJ-02	디젤에 연료유급	
	KJ-03	디젤엔진 윤활/냉각	
	KJ-04	기동용 공기 공급	
	KJ-05	EDG 속도제어	
	KJ-06	EDG 냉각수배관 건전성유지	
PE	PE-01	EDG→PB모선 전원공급	
	PE-02	EDG 전기적보호	
	PE-03	EDG 전압제어	
MC	MC-01	안전관련 부하에 전원공급	MC01: 공학적 안전설비 부하에 상시전원 공급
	MC-02	기동 변압기 보호	
PB	PB-01	3개의 독립된 전원수전	PB01: 안전등급 4.16 kV 모선, 인입차단기
	PB-03	안전등급 4.16kV 모선보호	
	PB-02	안전등급 4.16 kV 부하에 전원 공급	

2.4.3 성능기준 설정

성능기준설정은 그림 3의 프로세스에 따라 필요한 유형을 결정하고 정비효과성 제고, 설비관리주체, 기능단위 감시, 가능한 한 발전소의 정비프로그램을 이용한 감시가 될 수 있도록 설정해야 한다. 아래에서는 안전관련 4.16kV 전력공급 계통의 성능기준 항목인 PB01과 PB02의 성능기준 설정을 소개한다.

2.4.3.1 PB01 성능기준 설정

PB01은 고안전중요도이고, 두개의 계열로 되어 있으므로 그림 3의 프로세스에 따라 계열수준의 신뢰도성능기준 및 이용도성능기준을 설정해야 한다. 성능기준설정을 위해서는 감시주기 동안 핵심기기의 운전요구 횟수 및 운전요구 시간 등 Demand Data를 조사해야 하는데, 발전소에서 수행되는 시험절차서 및 운전특성 등을 통해 확인해야 한다. 감시 주기는 성능기준 산정의 기준 기간으로서 통상 2회의 핵연료 교체주기, 즉 3년을 기준으로 하며 이 기간 동안 발생하는 고장 횟수나 이용 불능이 허용기준을 넘지 않도록 하여야 한다.

PB01의 핵심기기는 모선인입차단기로서 계열 당 3대이며 전체 차단기에 대해 운전요구 횟수 및 운전요구 시간 (Demand Data)을 파악하면 다음과 같다[6][7].

- 1) 운전요구시간 : 78,840시간 = 8760시간/년*3년*3대 (상시 운전중임으로 감시주기 3년간 계속 운전이 필요)
- 2) 운전요구횟수 : 60회 = 44회(비상디젤발전기 시험시 차단기 투입횟수)+16회(원전절체 시험시 차단기 투입횟수)

신뢰도성능기준은 위에서 확인된 Demand Data와 PSA에서 사용된 차단기 관련 고장률 데이터에 기기수를 곱하여 구한 각각의 값을 합하면 예상고장률(AT)이 계산되며 이 값을 식(1)의 포와송 확률밀도함수에 대입하여 산출한다. 산출 결과는 표 5에 요약된 바와 같이 3년 동안 1회의 고장을 허용하는 것으로 계산되었다.

표 5 성능기준 PB01 신뢰도성능기준 계산 (예)
Table 5 Example of reliability performance criteria for PB01

성능 기준항목	핵심 기기	실패율	Demand Data	예상 고장률*	계산 결과	성능 기준
PB01	차단기	3.1E-7 : 개방실패	78,840시간	6.55E-2	1.1회	1회
		6.9E-4 : 닫힘실패	60회			

*주) 예상고장률=3.1E-7*78,840 + 6.9E-4*60

이용도성능기준은 PSA에 이용불능 확률이 모델 되어 있지 않으므로 운영기술지침서의 허용고장시간과 발전소 정비경험 및 신뢰도성능기준과의 균형을 고려하여 결정하였다. 즉, 운영기술지침서에서는 고장발생시 3일(72시간)의 고장을 허용함으로 PB01의 이용도성능기준은 신뢰도성능기준 1회 × 허용고장시간 3일을 적용하여 3일로 설정하였다.

2.4.3.2 PB02 및 기타 성능기준 설정

PB02 '안전등급 4.16kV 부하차단기'는 24대의 부하차단기로 구성되어 동일 유형 기기의 고장추이를 감시할 수 있도

록 기기군(Population)으로 감시하게 된다. PB02의 신뢰도성능기준을 설정하기 위하여 PB01에서와 같이 총 차단기 24대에 대한 Demand Data를 조사한 결과 3년 동안 운전요구 시간은 26280시간이고, 교체운전 및 시험에 따른 운전요구 횟수는 317회 작동하는 것으로 확인되었다. 이를 근거로 하여 차단기관련 고장률 데이터를 적용하여 계산한 결과 PB02의 신뢰도성능기준은 2회로 설정되었다. 즉, 3년 주기의 감시기간 동안 24대의 차단기 중 2회의 고장까지 허용된다. 이와 같은 과정을 거쳐 표 4의 나머지 성능기준항목에 대한 성능기준을 설정하였으며 그 결과는 표 6에 정리되어 있다.

표 6 성능기준 설정 결과
Table 6 Results of performance criteria

성능기준 번호	성능기준명	성능기준 설정결과
KJ01	소외전원 상실시비상전원 공급	RPC : 4회 APC : 12일
MC01	공학적안전설비 부하에 상시전원 공급	RPC : 1회 APC : 3일
PB01	안전등급 4.16 kV 모선 인입차단기	RPC : 1회 APC : 3일
PB02	안전등급 4.16kV 부하차단기	RPC : 2회

2.4.4 기능고장 정의

성능감시는 기능고장과 이용불능시간을 판정하고 성능기준과 비교를 수행하는 것으로서 이를 위해서는 판단 기준인 기능고장 정의가 필요하다. 예를 들면, PB01은 성능기준 설정수준은 계열수준이고 신뢰도성능기준이 1회, 이용도성능기준이 3일이므로 PB계통 한 계열 차단기 3대에 대해서 3년 동안 1회의 고장만 허용하고 그 이상 고장이 발생되거나 차단기고장으로 인한 이용불능시간이 3일을 초과하게 되면 성능이 저하된 것이므로 성능회복을 위한 조치를 해야 한다. 아래 표 7은 각 성능기준 항목에 대한 기능고장 정의를 보여주고 있다.

표 7 성능기준에 대한 기능고장 정의
Table 7 Definitions of function failures corresponding to performance criteria

성능 기준항목	기능고장정의
KJ01	1)비상디젤발전기가 기동되지 않는 경우 2)규정된 시간 내에 정격 전압과 주파수에 도달되지 못하는 경우 3)안전등급 4.16 kV Bus에 전력을 공급할 수 없는 경우 4)정격 출력으로 계속 운전할 수 없는 경우 5)비상디젤발전기 부하시퀀스 제어기능 기능 상실 6)연료저장 및 이송계통을 포함한 보조계통의 고장으로 비상디젤발전기 운전이 불가능한 경우 7)비상디젤발전기 신뢰도프로그램에서 정의 하는 유효시험 실패

MC01	기동변압기 기기결함 및 보호계전기 오동작에 의한 기능상실
PB01	차단기 개폐 또는 전원절체 실패
PB02	차단기 개폐 실패 또는 모선 저전압에 의한 부하탈락 실패

2.4.5 성능기준 적정성 평가

기기고장률과 운전요구횟수를 기반으로 설정된 성능기준이라도 정비효과성을 도모하기 위해서 성능기준을 강화할 수도 있고, 반대로 인력과 예산 등 운영 자원을 효율적으로 배분하기 위하여 일부 기능에 대한 성능기준은 완화할 수도 있다. 따라서 설정된 성능기준이 적정하게 수립 되었는지를 평가하기 위해 2개 발전소의 PB계통에 대하여 최근 3년 동안 발행된 12건의 고장통지를 분석하였다. 성능기준 PB01과 관련된 기능고장은 없었고, PB02 ‘안전등급 4.16kV 부하차단기’와 관련되어 기능고장으로 평가된 것은 발전소 ‘A’에서 1건이었으므로 발생한 기능고장 건수를 고려할 때 현재 설정된 신뢰도성능기준 2회/3년은 적절한 것으로 평가되었다. 기능고장으로 평가된 고장은 차단기의 Cell 스위치 불량으로 차단기가 Disable 상태가 되면 차단기 동작 요구시 차단기가 작동될 수 없으므로 표 7의 PB02 기능고장 정의에 따라 기능고장으로 평가되었다.

표 8 4.16kV 전력공급계통(PB) 기능고장 분석결과
Table 8 Results of functional failure analyses for Class 1E 4.16kV power system(PB)

발전소	발생일	고장통지 내역	기능 고장여부
A	'05.07.02	차단기 RACK-DOWN 동작 불량.	×
	'06.04.11	Breaker CHARGE→DISCH 전환 안됨	×
	'06.09.15	BUS 전류계 지시 안됨	×
	'06.11.12	차단기 현장 전류값 오지시	×
	'06.12.24	필수냉각기 B MAIN BKR Cell 스위치 불량	○
	'07.04.25	주제어실 전류지시계 점검	×
B	'05.06.30	전류지시계 전류값 지시안됨	×
	'06.02.15	Breaker 이음발생	×
	'06.02.15	Breaker 이음발생	×
	'06.09.07	Breaker R/O시 Disabled 경보발생 안됨	×
	'06.09.19	전압지시계 전압지시 낮음	×
'08.01.24	현장판별 상태지시등 꺼져있음	×	

3. 결 론

국내 원자력발전소의 정비선진화를 위해 도입하고 있는 정비효과 감시 프로그램은 확률론적 안정성분석을 바탕으로 안전성을 보증하고 또 효율적인 정비를 위한 성능기준을 제시하는 것을 목적으로 한다. 성능기준 수립까지 필요한 일련의 과정을 안전관련 4.16kV 전력계통에 적용하여 구체적인

방법을 제시하였다. 또한 수립된 성능기준에 대하여 발전소에서 과거 3년 동안 실제 발생된 고장통지를 분석하여 설정된 성능기준의 적정성을 평가하였으며 안전관련 전력계통의 신뢰성과 지금까지 시행된 전력계통에 대한 유지관리가 적절하게 이루어지고 있음을 확인 할 수 있었다.

본 논문에서 소개한 방법은 원자력발전소 뿐 만 아니라, 화력발전소 및 시스템 안정성이 중요하고 다수의 계통/기기로 구성된 전력계통 등에도 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 기기 단위의 정비 관행에서 기능 중심의 정비 관점과 정비에 투입되는 자원의 효율적 배분을 합리적으로 제시할 수 있어 적절한 정비가 필수적인 대형 시스템의 정비계획 수립에도 응용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Nuclear Management and Resources Council, NUMARC 93-01, Rev.3, "Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants, Rev.2", 2000. 7
- [2] 한국수력원자력(주) "영광1,2호기 계통교육교재 Rev 0" 2007.01
- [3] 한국수력원자력(주), "K34-PSA-INT-01 고리4호기 PSA 초기사건분석 보고서, Rev.0", 2003.06
- [4] EPRI Technical Bulletin 96-11-01 "Monitoring Reliability for Maintenance Rule" 1996.11
- [5] EPRI Technical Bulletin 97-03-01 "Monitoring Reliability for Maintenance Rule" 1997.03
- [6] 한국수력원자력(주) "정기-발-61 비상디젤발전기 계통 점검 및 성능점검 절차서, Rev.30", 2008.06
- [7] 한국수력원자력(주) "정기-전-06 소외전원 수동전원절체 시험절차서, Rev.7", 2008.03

저 자 소 개



정 동 옥 (鄭 桐 旭)

1961년 02월 7일생. 1992년 MIT 원자력 공학과 졸업(공학). 1983년~ 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원 책임연구원
 Tel : 042-870-5570
 Fax : 042-870-5518
 E-mail : dwjerng@khnp.co.kr



박 진 엽 (朴 珍 燁)

1967년 10월 12일생. 2002년 울산대학교 산업대학원 메카트로닉스 졸업(석사). 1984년~2007년 원자력발전소 근무. 2008년~현재 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원 선임전문원
 Tel : 042-870-5657
 Fax : 042-870-5688
 E-mail : parkjinyb@khnp.co.kr