

디젤발전기 여자시스템의 고장확률 분석에 관한 연구

이주현, 임익현, 류호선, 허태영
전력연구원, 전력연구원, 전력연구원, 한국신뢰성서비스(주)

Evaluation of Probability of Failure on Demand (PFD) for Emergency Diesel Generator Excitation Control System

Joo-Hyun Lee, Ick-Hun Lim, Ho-Sun Rhew, Tae-Young Huh
KEPRI. KEPRI. KEPRI. KoRTS

Abstract - 본 논문은 원자력발전소 안전계통인 비상전원 공급용 디젤발전기의 여자시스템에 대해서 신뢰성 불력선도를 이용하여 시스템을 모델링하고, 신뢰성 분석을 수행하고 그 결과 기동요구 시 실패확률을 산출하는 방법과 결과를 기술하였다. 비상디젤발전기 여자시스템을 구성하는 모든 부품의 고장률을 Telcordia SR-332 기준서의 부품수 방법을 이용하여 분석하고 FMEA (Failure Mode Effect Analysis)를 수행하며 IEC 61508에서 제시하고 있는 기동요구 시 실패확률(Probability of Failure on Demand, PFD)을 산출하였다.

1. 서 론

비상전원공급 디젤발전기는 예비발전설비로 디젤엔진 구동의 3상 교류 발전기이며 주 발전기의 발전중단과 전력계통으로부터 수전 중단으로 인한 소내 전원의 상실 시에 자동으로 기동하여 필수적인 부하들에 순차적으로 전원을 공급해 준다.

발전기의 용량은 발전소의 핵연료 용융사고를 예방하고 안전한 정지를 위해 필요한 부하에 전력을 공급할 수 있는 양이며 디젤엔진 설계상 24시간 중 2시간 범위 내에서는 정격용량의 10%를 부가한 최대허용용량의 운전이 가능하여야 한다. 비상전원공급 디젤발전기는 부하의 우선순위가 정해진 자동순서투입장치를 통해 순서적으로 받아들일 수 있는 능력이 있어야 하는데 여자시스템이 이를 충분히 구현할 수 있어야 한다.

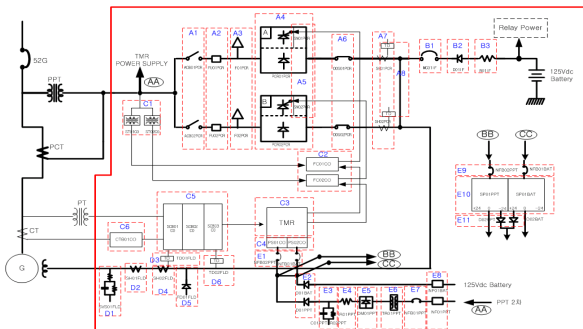
디젤 발전기 여자시스템은 디젤발전기를 필요시 기동하고 기동 후 요구되는 전력을 일정시간 안정적으로 계속 공급할 수 있도록 하는 기기여서 건전성 및 안전성을 확보해야하는 원자력 품질안전등급(Q)으로 분류되는 기기이다. 본 논문에서는 여자시스템의 기동 요구 시 실패확률(Probability of Failure on Demand, 이하 PFD)을 산출하는 방법과 결과들을 기술하였다.

2. 본 론

2.1 디젤발전기 여자시스템 개요

2.1.1 디젤발전기 여자시스템 구성

디젤발전기 여자시스템의 구성은 크게 제어기, 정류기 및 기타 부속 설비들로 나누어지며 아래 [그림 1]은 여자시스템의 구성도를 나타낸다.



[그림 1] 디젤발전기 여자시스템 구성도

[표 1] 여자시스템 구성품의 명칭

구분	명칭	구분	명칭
A1	교류차단기	C2	점호카드
A2	퓨즈	C3	3중화제어기
A3	교류 필터	C4	과위서플라이
A4	정류기	C5	SCB
A5	스너버	E4	저항
A6	직류단로기	E5	다이오드 모듈
A7	SHUNT	E6	변압기
A8	트랜듀서	E7	배선용 차단기
B1	초기여자 전자접촉기	E8	노이즈필터
B2	초기여자 다이오드	E9	배선용 차단기

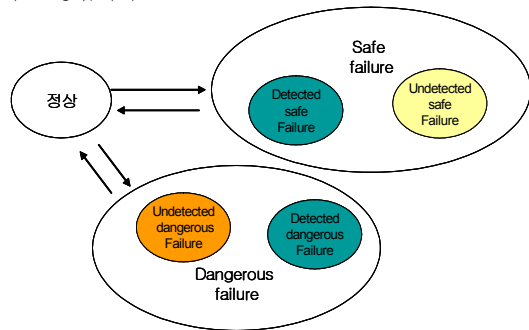
2.1.2 디젤발전기 여자시스템의 운전

디젤발전기의 운전은 초기여자로부터 발전기 전압이 확립되고 여자변압기 2차 권선에서 공급되는 교류전압은 정류기에서 직류 전압으로 변환되어 계자에 직류전류를 공급하게 된다. 신호처리 보드(SCB)는 발전기의 전압과 전류의 신호를 입력을 받아 제어기에 필요한 표준 신호로 변환하고, 유효전력과 무효전력 등의 연산을 수행하여 동일한 3개의 카드에서 제어기(TMR)로 보내어진다. 정류기는 점호카드에서 동기변압기 출력을 기준파형으로 사용하고 제어기에서 제어신호를 받아 정류기의 싸이리스터 게이트에 점호펄스를 주어 위상제어를 수행하여 발전기 전압을 조정하게 된다.

2.2 여자시스템의 고장확률 분석

2.2.1 고장확률 분석

여자시스템의 고장률을 산출하기 위해 Telcordia SR-332의 기준서를 사용하였다. Telcordia SR-332는 Telcordia Technologies사에서 개발한 전자 부품 및 장비의 고장률 예측 기준서이며, 고장률 예측에 있어서 현재 가용한 데이터에 따라 세 가지 방법을 제시하고 있다. 첫 번째는 Black Box라 하여 MIL-HDBK-217F의 부품 수 방법(Parts count method)과 동일한 방법이고, 두 번째는 Black Box 방법에 실험실 고장 데이터를 함께 사용하는 방법이고, 세 번째는 Black Box 방법에 필드 고장 데이터를 함께 사용하는 방법이다.



[그림 2] IEC 61508에서의 고장분류

IEC 61508 “Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems”에서는 정상시스템의 고장을 크게 Safe failure와 Dangerous failure 2가지로 분류한다. Safe failure는 다시 Detected safe failure와 Undetected safe failure로 분류하며, Dangerous failure의 경우도 Detected dangerous failure와 Undetected dangerous failure로 분류한다. [그림 2]는 IEC 61508에서의 고장분류를 나타낸다. Telcordia SR-332을 기준하여 산출한 고장률(Total Failure Rate)과 IEC 61508의 정의에 의한 고장확률 예측의 결과는 [표 2]와 같다. 여기서 산출조건은 원자력발전소의 환경조건보다 더 가혹한 조건을 가정하였다.

[표 2] 여자시스템의 각종 고장확률(예)

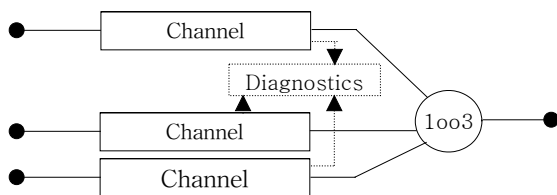
모델명	Q'ty	Total Failure Rate	Safe Failure Fraction*	Safe Failure Rate	Diagnostic Coverage Safe	Safe Detected Failure Rate	Safe Undetected Failure Rate
초기 Flashing	1	0.4094	0.500	0.2047	0.990	0.2027	0.002047
Battery	1	0.0662	0.500	0.0331	0.990	0.0328	0.000331
PPT 2차 전원	1	0.2578	0.500	0.1289	0.990	0.1276	0.001289
Scan Power	2	0.0331	0.500	0.0166	0.990	0.0164	0.000166
CT Board	1	0.0677	0.500	0.0339	0.990	0.0335	0.000339
SCB 1	3	4.2724	0.500	2.1362	0.990	2.1148	0.021362
FIRING CARD	2	9.2996	0.500	4.6498	0.990	4.6033	0.046498
PCR 1	2	0.8688	0.500	0.4344	0.990	0.4301	0.004344

모델명	Q'ty	Dangerous Failure Rate	Diagnostic Coverage Dangerous	Dangerous Detected Failure Rate	Dangerous Undetected Failure Rate
초기 Flashing	1	0.2047	0.990	0.2027	0.002047
Battery	1	0.0331	0.990	0.0328	0.000331
PPT 2차 전원	1	0.1289	0.990	0.1276	0.001289
Scan Power	2	0.0166	0.990	0.0164	0.000166
CT Board	1	0.0166	0.990	0.0164	0.000166
SCB 1	3	0.0339	0.990	0.0335	0.000339
FIRING CARD	2	2.1362	0.990	2.1148	0.021362
PCR 1	2	2.1362	0.990	2.1148	0.021362

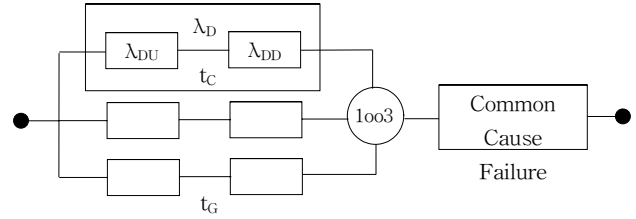
* Safe Failure Fraction은 FMEA의 결과를 통해 산출되며 공통모드 고장의 비율은 0.5%로 가정하였다.

2.2.2 기동요구 시 평균고장 확률(PFD)

[표 2]의 각종 고장률들은 IEC 61508에서 정의하는 PFD를 산출하는데 이용된다. PFD는 단일구조(1-out-of-1), 이중구조(1-out-of-2), 삼중구조(1-out-of-3)등에 따라 산출식이 다르며 기동 요구 시 일어날 평균 고장 확률은 모든 하부계통의 평균 PFD를 계산한 후 이를 결합하여 산출한다. 이 구조는 세 채널의 중복 구조 중 한 채널만 정상적으로 동작하면 정상인 구조이다. 진단 테스트로는 검지된 오류만을 보고할 뿐이며 출력 상태를 변경시키거나 출력 채널을 변경시키지는 않는다고 본다.



[그림 3] 1oo3 물리적 블록선도



[그림 4] 신뢰성 블록선도

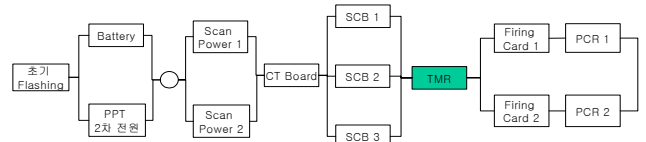
[그림 3]과 [그림 4]는 1oo3에 대한 블록선도이며, 이 구조의 t_{CE} 값은 앞 절과 동일하며 계통 등가 고장 시간 t_{GE}의 계산식과 평균 PFD은 다음과 같다.

$$t_{GE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left(\frac{T_1}{4} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR$$

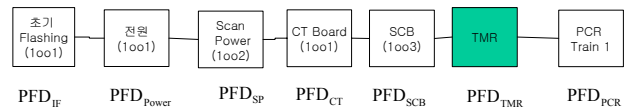
$$PFD_G = 4 \left((1 - \beta_D) \lambda_{DD} + (1 - \beta) \lambda_{DU} \right)^2 t_{CE}^2 + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right)$$

2.3 고장 확률(PFD) 분석결과

[그림 1]의 여자시스템의 구성도를 기준으로 계통별로 신뢰성 블록선도를 나타내면 [그림 5]와 같고, [그림 6]과 같이 축소하여 나타낼 수 있다.



[그림 5] 여자시스템 신뢰성 블록선도



[그림 6] 축소한 여자시스템 신뢰성 블록선도

위의 조건으로 가정하여 분석한 디젤발전기 여자시스템을 구성하는 주요기기의 각종 고장률을 이용하여 앞에서 기술한 방법으로 PFD를 구하면 [표 3]과 같다.

[표 3] 여자시스템 하위 모듈의 PFD

초기 Flashing	전원	Scan Power	CT Board	SCB	TMR	PCR
3.6E-04	2.3E-04	1.5E-07	6.0E-05	1.9E-05	9.1E-06	1.5E-05

3. 결 론

본 연구에서는 비상디젤발전기 여자시스템의 신뢰성분석을 통하여 기동 요구 시 실패할 확률을 산출하였다. 개략적으로 10,000회 기동 요구 시 7-8번 정도 실패할 확률로 예측되었는데, 이는 주기적인 정비노력 여하에 따라 실제와 다를 수 있다. 다만, 기준서를 이용한 고장확률 예측 및 PFD 예측결과 원전 품질등급 Q에 준하는 시스템으로서는 신뢰성이 높은 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] IEC 61508 “Functional safety of electrical/electronic /programmable electronic safety-related systems”
- [2] Telcordia SR-332 “Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment”