



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2012년 12월
석사학위논문

APR-1400 원전
비상디젤발전기의 신뢰성
개선 분석에 관한 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

황 인 삼

APR-1400 원전
비상디젤발전기의 신뢰성
개선 분석에 관한 연구

Analysis of Improvement in the Reliability of Emergency
Diesel Generator for APR-1400 Nuclear Power Plants

2012년 12월

조선대학교 대학원

원자력공학과

황 인 삼

APR-1400 원전
비상디젤발전기의 신뢰성
개선 분석에 관한 연구

지도교수 김진원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2012년 12월

조선대학교 대학원

원자력공학과

황인삼

황인삼의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

위 원 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 부교수 김 진 원 (인)

2012년 12월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차 -----	iii
그림 목차 -----	iv
ABSTRACT -----	v
제1장 서 론 -----	1
제2장 APR1400 원전 EDG 특성 -----	2
제1절 EDG 기능 및 소내전력계통 구성 -----	2
제2절 EDG 설치현황 및 설계기준 -----	4
제3절 EDG 운전특성 -----	7
1. 비상기동신호	
2. 비상정지신호	
3. 정상정지신호	
4. 공학적 안전설비 작동신호에 따른 설비운전	
제3장 국내원전 EDG 고장 사례 -----	11
제1절 EDG 불시기동 사례 분석 -----	11
1. 발생시기 기준	
2. 근본원인 기준	
제2절 SBO 발생 사례 -----	11
1. 소내정전사고(SBO) 정의	
2. 소내정전사고(SBO) 발생사례	
3. 소내정전사고(SBO) 발생 시 대응	
제4장 APR1400 원전 EDG 신뢰성 개선내용 분석 -----	14
제1절 EDG 신뢰도 관리기준 -----	14
1. 최종안전성분석보고서 EDG 신뢰도 개요	
2. 원전별 EDG 신뢰도 관리기준 비교	
3. 유효시험 실패횟수에 따른 EDG 시험계획 단축기준 비교	

제2절 EDG 신뢰성 증진을 위한 설비개선 내용 분석결과 -----	16
1. 기동용 공기계통 SOV 다중화	
2. 디지털 계전기 적용	
3. 계통병입 차단기 이중화	
4. 온라인 성능감시 시스템 도입	
5. 진동차단계통 설치	
6. EDG 용량 증가	
7. 4분면 분리 독립개념 설계 적용	
8. 주제어실 인간공학기반 설계기준 적용	
9. EDG 신뢰도 개선효과 종합분석	
제3절 EDG 신뢰도 입증을 위한 시험 -----	22
1. 제작사 주관 공장시험	
2. 발전소 주관 설치후 시험	
3. EDG 엔진 검증결과	
4. 현장 인수시험	
5. 가동전시험(시운전시험)	
6. 주기별 정기시험 내용	
7. 추가 실증시험을 통한 EDG 신뢰도 증진방안	
제4절 EDG 신뢰도 감시 및 관리 시스템 이해 -----	33
1. DMDS(EDG 온라인 성능감시 시스템)	
2. DREAMS(EDG 신뢰도 종합관리 프로그램)	
3. EDG 신뢰도 및 이용불능도	
제5장 APR1400 원전 EDG 운영 최적화 방안 연구 -----	37
제1절 EDG 통합 예방점검 시행 -----	37
제2절 EDG 정비후시험(길들이기운전) 시행 -----	38
제3절 EDG 기동 및 부하운전 신뢰성 향상방안 -----	39
제6장 결론 -----	43
참고문헌 -----	44

표 목 차

표 2.1.1	운전조건별 안전등급 모선 전원공급방법	2
표 2.3.1	공학적 안전설비 작동신호에 따른 설비 운전	10
표 3.2.1	백색비상 7 발령기준 개념도	13
표 4.1.1	국내 원전의 EDG 신뢰도 비교표	14
표 4.1.2	APR1400 EDG 시험주기	15
표 4.1.3	EDG 목표신뢰도 97.5% 미달여부 결정기준	15
표 4.2.1	원전 EDG 용량 및 설치 위치 비교	19
표 4.2.2	APR1400 및 OPR1000 신뢰도 개선효과 비교	21
표 4.2.3	EDG 및 AAC DG 비교	21
표 4.3.1	제작사 주관 공장시험	22
표 4.3.2	발전소 주관 설치후 시험	23
표 4.3.3	국내 원전 EDG 신뢰성 시험이력	24
표 4.3.4	부하탈락(Load Shedding)	26
표 4.3.5	EDG 트립신호 우회 확인시험 목록	27
표 4.3.6	EDG 'B' 시운전 시험 중 경험 사례	28
표 4.3.7	자동부하투입(Load Sequencing Test)	32
표 4.4.1	EDG DMDS(온라인성능감시변수) 목록	33
표 4.4.2	국내원전 EDG 종합신뢰도 비교	36
표 5.3.1	EDG 출력증발 시 안전운전 요건	40
표 5.3.2	EDG 출력감발 시 안전운전 요건	40

그림 목차

그림 2.1.1	소내전력 공급계통 구성도	3
그림 2.2.1	EDG 외형 개념도	4
그림 2.2.2	EDG 각 부문별 명칭	5
그림 2.2.3	EDG 계통의 구성	5
그림 2.2.4	EDG 현장제어반	6
그림 2.3.1	APR1400 LDP(Large Display Panel) 기준 LOOP 확인 화면	8
그림 4.2.1	소내전력계통 개략도	17
그림 4.2.2	EDG건물, 보조건물 및 원자로건물 공동매트 기초 설계도	18
그림 4.2.3	APR1400 및 OPR1000 주요건물 설계 배치도	19
그림 4.2.4	APR1400 주제어실(MMIS) 조감도	20
그림 4.3.1	EDG 및 안전모선 점검 진행도	30
그림 5.3.1	EDG 부하증발 및 부하감발 곡선	42

ABSTRACT

Analysis of Improvement in the Reliability of Emergency Diesel Generator for APR1400 Nuclear Power Plants

By Hwang, In Sam

Adviser : Prof. Kim, Jin Weon, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Emergency Diesel Generator (hereafter "EDG") of Nuclear Power Plant (hereafter "NPP") automatically starts and supplies safety-related equipment with electric power needed in case of Off-site Power Loss. Therefore, the World Association of Nuclear Operators (WANO) evaluates **"In-operability of EDG"** by using the Safety Performance Indicator because the reliability of EDG is directly related to the safety of NPP.

The EDG of APR1400 NPP was designed as level as 97.5% of target reliability and 99% of equipment reliability by the accumulation of operation experiences of domestic NPPs and by the improvement of design and manufacturing technique of NPP facilities. Accordingly, this thesis proposes optimized measures for test and operation management process to improve the reliability of EDG in APR1400 NPP and to cope with performance degradation resulted from the elapse of EDG life time by concretely analyzing the elements which are considered that they gave a positive impact on improving the reliability of EDG.

First of all, the starting reliability of APR1400 EDG was verified through the 300 times of successful starting tests. The test results can be evaluated to meet 99% of equipment reliability. The load operation and comprehensive reliability, which are related to verifying 97.5% of target reliability, will be evaluated after two years of commercial operation because they require more than 20 accumulated valid test results.

Finally, test management is very important because the target reliability of EDG can be verified through the periodic performance tests. Consequently, introduction of optimized EDG operation process such as "reliability improvement measure during the starting and load operation" was proposed and the operation reliability of EDG will be improved more in case that this process is applied.

제1장 서론

원자력발전소의 비상디젤발전기(EDG)¹⁾는 소외전원 상실사고(LOOP)²⁾ 및 공학적 안전설비 작동신호(ESFAS)³⁾ 발생 시 자동으로 기동되어 원자로의 안전정지를 가능하게 하고, 원자로 냉각재 상실사고 상황에서도 방사능의 소외방출량을 기준치 이하로 유지하기 위하여 안전등급 필수기기 및 설비에 비상전원을 공급하는 원전의 안전성을 담보하는 핵심설비이므로 신뢰성 확보가 중요하다.

EDG는 상시 운전대기 상태를 유지하여 소외전원 상실사고 시 제한된 시간 이내에 기동되고 부하운전이 되어야 하기에 이를 보증하기 위하여 발전소별 EDG의 고유 목표신뢰도를 가지고 있으며, 신뢰성 확보를 위하여 월간 주기 유효시험 결과를 기준으로 운전변수를 평가하여 목표신뢰도 만족 여부와 점검주기 단축 여부를 결정하고 있다.

APR1400⁴⁾ 원전 EDG는 그 동안 국내 원전의 운영경험 반영과 원전기술의 향상으로 목표신뢰도 97.5%에 설비신뢰도는 99% 수준으로 설계, 제작되었다. 이에 본 논문에서는 EDG의 신뢰성 향상에 긍정적인 영향을 주었다고 판단되는 요소를 구체적으로 분석하여 향후 EDG 사용연한 경과에 따른 신뢰성 저하에 대비하고 안전운전을 위한 지속적인 설비개선 활동의 방향을 제시하고 아울러 APR1400 원전 EDG 운영신뢰성 향상을 위해 시험 및 운영관리 프로세스 최적화 방안도 연구하여 제시하고자 한다.

2011년 일본 후쿠시마 원전사고 분석에 따르면 지진해일에 따른 비상전원 확보실패가 주요 원인이었다. 세계원자력발전사업자협회(WANO)에서는 원전 성능지표 중 하나로 “EDG 계통 이용 불능도”를 평가하고 있다. 따라서 기존의 국내원전 EDG 대비 APR1400 원전 EDG의 신뢰성 증진을 위한 설계변경 및 설비개선 내용 분석은 중요한 의미가 있다고 하겠다.

1) Emergency Diesel Generator

2) Loss of Off site Power

3) Emergency Safety Feature Actuation Signal

4) Advanced Power Reactor 1400

제2장 APR1400 원전 EDG 특성

제1절 EDG 기능 및 소내전력계통 구성

1. EDG 기능 및 역할

EDG는 발전소 비정상 조건 및 사고 조건 동안에 원자로 보호계통과 전동기 구동 보조급 수펌프 등 공학적 안전설비 계통에 비상전력을 공급하여 발전소를 안전하게 정지하고 유지하는 데 중요한 역할을 수행하는 필수 안전설비다. 운전조건별 안전등급 모션 전원 공급방법 및 전력 공급단계 우선순위는 표 2.1.1과 같다. 정격출력은 어느 24시간 운전에 대한 연속운전(22시간) 시 8,000kW, 단시간 운전(2시간) 시 8,800kW이며 기동신호 주입 후 17초 이내에 정격전압과 주파수에 도달하여 19초 이내에 안전등급 모션을 가압하고 그 후 사고해석에서 가정한 응답시간을 만족하는 순차적 부하투입이 가능하도록 설계되어 있다. 환경적으로는 폭풍, 외부 비산물, 지진현상으로부터 보호되고 화재 확산을 막는 방화벽 구조로 되어 있다.

표 2.1.1 운전조건별 안전등급 모션 전원공급방법

운전조건	전원공급방법
1. 정상운전	발전기 → UAT ⁵⁾ → 안전등급모션
2. 발전정지	SWYD ⁶⁾ → 주변압기 → UAT → 안전등급모션
3. UAT 고장	SWYD → SAT → 안전등급모션
4. PNS 고장	EDG → 안전등급모션(또는 SWYD → SAT ⁷⁾ → 안전등급모션)
5. 소외전원 상실 시	EDG → 안전등급모션
6. 발전소 정전 시	AAC DG ⁸⁾ → 안전등급모션
전력공급단계의 우선순위	주발전기 ⇒ 주변압기, 소내보조변압기(UAT) ⇒ 대기보조변압기(SAT) ⇒ 비상디젤발전기(EDG) ⇒ 대체교류디젤발전기(AAC DG)

5) Unit Aux. Transformer

6) Switch yard

7) Standby Aux. Transformer

8) Alternate AC Diesel Generator

2. 소내 전력계통 구성

발전소 소내전력계통(그림 2.1.1)은 호기별로 주발전기(1대), 주변압기(1대), UAT(2대), SAT(2대), EDG(2대), AAC DG(1대), 축전지 그리고 보조전력계통으로 이루어져 있다. 정상운전 조건하에서 주발전기는 주변압기와 소내보조변압기에 전력을 공급한다. 정상운전 동안에는 발전소 소내부하 전력이 소내보조변압기를 통해 주발전기로부터 공급된다. 하지만 발전소 기동과 운전정지 동안에는 발전기차단기가 개방되므로, 발전소 소내부하 전력은 스위치야드로부터 주변압기와 소내보조변압기를 통해 공급된다. AAC DG는 모든 소외전원 상실(LOOP) 상태에서 모든 EDG까지 기능을 상실하는 소내 교류전원 완전상실(SBO) 사고에 따른 발전소 비상발령 상황에서 수동으로 기동하여 사고를 완화시키는 기능을 수행한다.

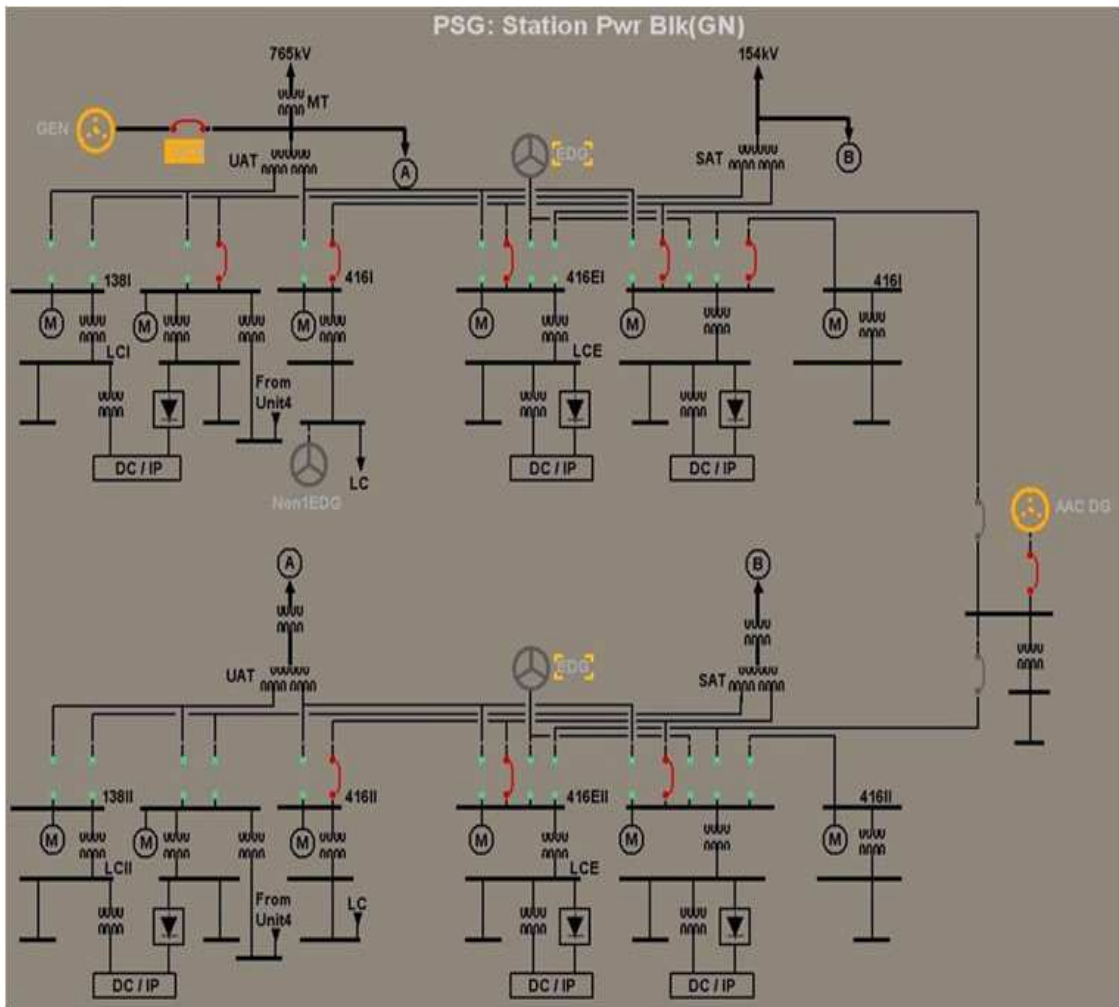


그림 2.1.1 소내전력 공급계통 구성도

제2절 EDG 설치현황 및 설계기준

1. EDG 설치 현황

발전기(좌측) 및 엔진(우측)이 진동을 방지하기 위한 Bed 위에 설치(그림 2.2.1)되어 있고 엔진 윗부분은 실린더 블록, 아래 부분은 크랭크 축, 실린더 라이너, 크랭크 실, 피스톤, 실린더 헤드, 과급기, 연료분사 펌프 등으로 구성(그림 2.2.2)되어 있다.

비상디젤발전기 계통은 저온 냉각수 계통, 고온 냉각수 계통, 윤활유 계통, 기동용 공기계통, 연료유 계통, 연소용 공기 및 배기가스 계통 등으로 구성(그림 2.2.3)되어 있으며, 비상디젤발전기 현장제어반은 경보창, 계측기, 조작스위치 및 온라인 성능감시 시스템(DMDS)⁹⁾으로 구성(그림 2.2.4)되어 있다.

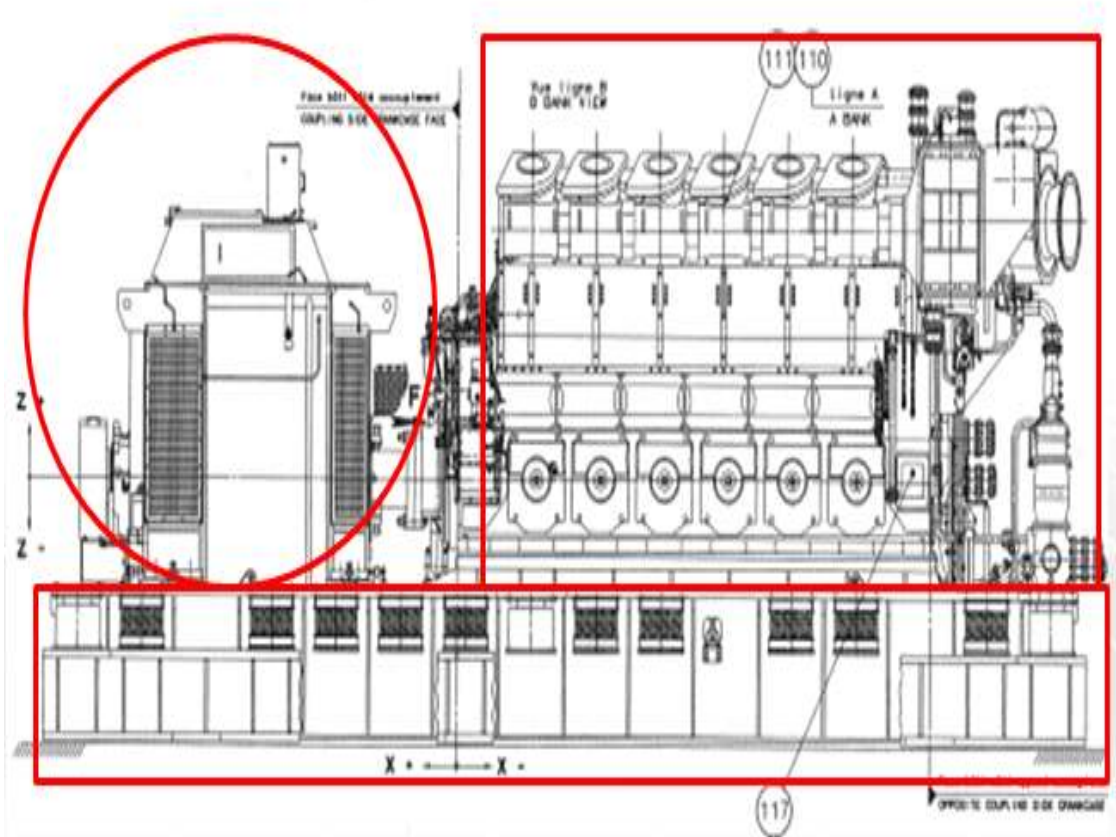


그림 2.2.1 EDG 외형 개념도

9) Diagnostic Monitoring Display System

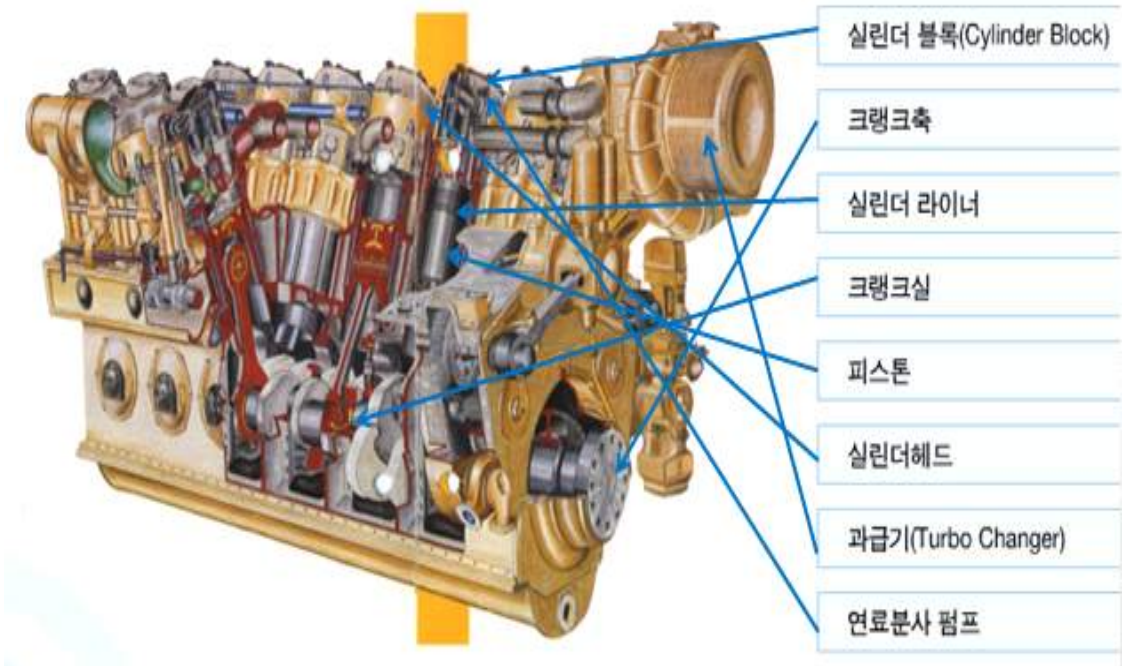


그림 2.2.2 EDG 각 부분별 명칭



그림 2.2.3 EDG 계통의 구성



그림 2.2.4 EDG 현장제어반

2. EDG 설계기준

EDG는 사고 시 안전등급 모션 전력공급이라는 고유기능 만족을 위하여 다음과 같은 설계기준을 가지고 있다.

- EDG 기동 후 17초 이내 정격전압($4,160 \pm 416$ VAC), 정격주파수(60 ± 1.2 Hz) 도달
- 공학적 안전설비 동작신호(SIAS¹⁰), AFAS¹¹), CSAS¹²) 발생 시 자동 기동
- 물리적/전기적 격리 및 중복성을 갖는 2 계열로 구성
- 내진설계 및 주기적인 시험 가능
- 부하 재투입 시 순간전압, 주파수 감소값이 주파수는 95%, 전압은 75% 이하가 되지 않아야 함
- 부하 투입 및 차단 시 주파수는 98%, 전압은 90% 이상 유지하면서 Load Step 사이의

10) Safety Injection Actuation Signal

11) Auxiliary Feedwater Actuation Signal

12) Containment Spray Actuation Signal

시간(5초) 내에 회복되어야 함

- 전부하 상실 시 과속도 정지 설정치까지 도달하지 않아야 함
- 설계용량, 엔진 및 발전기 사양 요약
 - 부하합계 : 6,770kW(설계기준 사고 LOCA + LOOP 시 요구되는 부하)
 - 정격부하 : 8,000kW
 - 설계마진 : 17.29%
 - 엔진사양 : 모델 12PC 2-6B, 실린더 12기통
 - 발전기사양 : 모델 B225V12, 전압 4.16kV, 속도 600rpm

제 3 절 EDG 운전특성

1. 비상기동 신호

가. 안전주입작동신호(SIAS)

원자로건물 고압력 또는 가압기 저압력 시 발생하는 공학적 안전설비¹³⁾ 작동신호(ESFAS)이며 노심 냉각 및 미임계 유지로 핵연료 피복재 보호 기능을 가지고 있다.

나. 보조급수작동신호(AFAS)

증기발생기 저수위(25.0 %)시 발생하는 공학적 안전설비 작동신호(ESFAS)이며 1차측 열 제거원 확보 기능을 가지고 있다.

다. 원자로건물 살수작동신호(CSAS)

원자로건물 고-고압력 시 발생하는 공학적 안전설비 작동신호(ESFAS)이며 원자로건물 내 대기를 냉각하고 방사성옥소를 제거하여 원자로건물 건전성 확보하는 기능을 가지고 있다.

라. 소외전원상실(LOOP)

소외전원이 상실되면 EDG가 자동으로 기동되는 등 다음과 같은 증상들이 나타나는 공학적 안전설비 작동신호(ESFAS)이며 소내전력계통 건전성을 확보하는 기능을 가지고 있다.

- 모든 소내 보조변압기(UAT) 및 대기보조 변압기(SAT) 저전압 경보
- 13.8kV와 4.15kV 모선 저전압 경보 및 지시
- 원자로냉각재펌프 정지 경보 및 차단기 지시

13) 공학적 안전설비의 주요기능 : 핵연료 피복재 보호, 원자로건물 건전성 확보, 원자로건물 내 방사성 물질 제거, 주제어실 건전성 확보, 냉각재 재고량 확보, 자연순환 및 1차측 냉각

- 비상디젤발전기의 자동 기동
- 원자로냉각재펌프 고장 정보
- 복수기 진공 경고
- 원자로냉각재계통 저유량 지시

주제어실 운전원은 신고리 3,4호기 LDP(Large Display Panel)의 2차측 화면(그림 2.3.1)에서 “모든 소내보조변압기(UAT) 및 대기보조변압기(SAT) 저전압 발생”와 “모든 비안전등급(N-1E) 13.8kV 및 4.16kV 모선 저전압 발생”를 1순위로 확인하고, 추가적인 증상들도 함께 고려하여 최종적으로 소외전원상실(LOOP)을 판단한다.

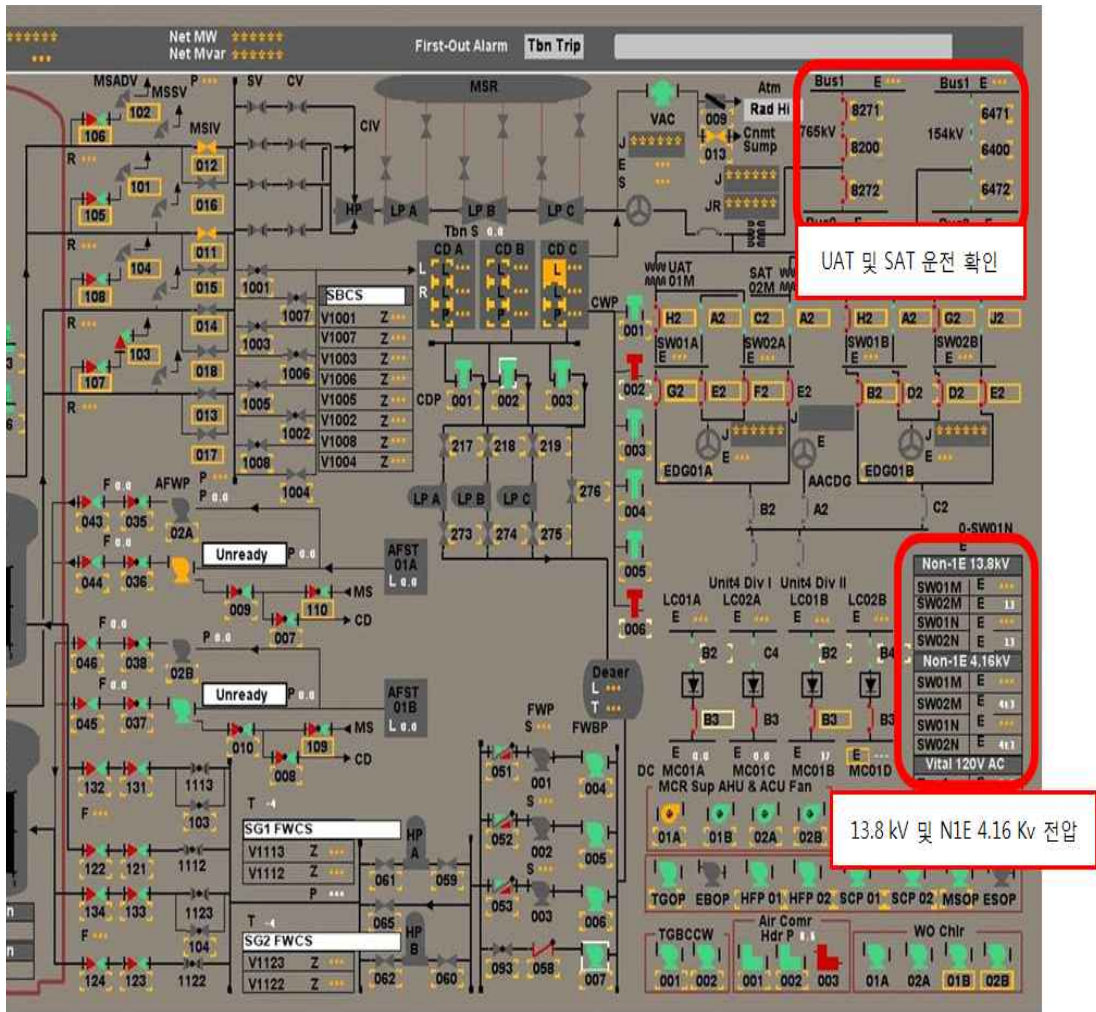


그림 2.3.1 APR1400 LDP(Large Display Panel) 기준 LOOP 확인 화면

2. 비상정지 신호

EDG 비상운전 상태에서도 EDG 보호를 위해 비상정지 되는 신호로서 엔진의 기계적 과속도 및 발전기 차동보호 계전기 동작신호가 해당된다. EDG가 비상기동 신호로 운전되고 있더라도 비상정지가 이뤄진다.

가. 엔진 과속도(115%, 690rpm)

EDG 엔진 과속은 조속기 고장이 원인이며 계속 운전 시 고장 확대로 산업안전 사고로 이어질 수도 있어 비상 정지됨

나. 발전기 차동보호 계전기

EDG 발전기 보호차원에서 계속운전이 불가능한 중대한 문제가 발생되었음을 의미하므로 비상 정지됨

다. 수동

EDG 계속 운전이 불가하다고 판단되는 고장 발생 시 계통전문가 및 발전팀장의 지시 또는 운전원이 판단하여 현장 또는 주제어실에서 수동으로 비상 정지시키는 기능이다.

3. 정상정지 신호

EDG 정상 기동 시 EDG를 정지시킬 수 있는 정지신호를 의미한다. 다음의 신호들은 모두 정상정지 신호이므로 비상기동 중에는 우회(정지되지 않음)되고 시험 또는 정비를 위하여 정상 기동하여 운전되고 있을 때 정지신호로 작동된다.

가. 기계적 보호 트립신호

- 고온 냉각수계통 고온도
- 저온 냉각수계통 저압력
- 크랭크케이스 고압력
- 윤활유 저압력, 윤활유 고온도, 윤활유 저유위
- 연료 저유위
- 저온 냉각수계통 저수위
- 디젤엔진 베어링 고온도

나. 전기적 보호 트립신호

- 발전기 순시 과전류 보호, 과전압/부족전압 보호, 상 불평형 보호, 부족 주파수 보호
- 발전기 계자 상실 보호, 역전력 보호, 지락 보호, 전압 억제부 과전류 보호 등

4. 공학적 안전설비 작동신호에 따른 설비 운전

각 공학적 안전설비 작동신호에 따라 운전되는 설비에 표 2.3.1와 같은 차이가 있다. LOOP(소외전원상실사고)와 AFAS(보조급수작동신호)가 동시에 발생했을 때 동작되는 기기를 예로 설명하면 보조급수펌프, 1차기기냉각수펌프, 1차기기냉각해수펌프, 필수냉방기만 동작한다.

표 2.3.1 공학적 안전설비 작동신호에 따른 설비 운전

번호	설비	공학적 안전설비 작동신호					
		LOOP	LOOP + SIAS	LOOP + AFAS	LOOP + SIAS + AFAS	LOOP + SIAS + CSAS	LOOP + SIAS + AFAS + CSAS
1	안전주입펌프	-	●	-	●	●	●
2	보조급수펌프	-	-	●	●	-	●
3	원자로건물 살수펌프	-	●	-	●	●	●
	정지냉각펌프	-	●	-	●	●	●
4	1차기기 냉각수펌프	●	●	●	●	●	●
5	1차기기 냉각해수펌프	●	●	●	●	●	●
6	필수냉방기	●	●	●	●	●	●
7	SFPC 펌프	-	-	-	-	-	-
8	보조충전펌프	●	-	-	-	-	-
	충전펌프	●	-	-	-	-	-

제 3 장 국내원전 EDG 고장 사례

제 1 절 EDG 불시기동 사례 분석

EDG는 상시 대기상태를 유지한다. 하지만 2001년부터 2012년 8월까지 국내원전 EDG 운전경험 확인결과 시험기동을 제외하고 총 21건의 비상기동 사례가 있었다. 이는 인적오류를 포함한 EDG 불시기동 운전경험 사례였고, 그 중 6건은 소외전원 상실(LOOP)에 따른 자동기동 사례였다. 고장사례를 특성에 따라 분류하면 다음과 같다.

1. 발생시기 기준

EDG 불시기동 사례를 발생 시기 별로 살펴보면, 계획예방정비 기간 중에 14건, 출력운전 중에 7건이 발생하였다. 운전원과 정비원이 현장에 혼재되어 있을 뿐 아니라 일일 작업 진도가 중요하게 관리되는 기간에 해당하는 계획예방정비 중 고장이 출력운전이라는 발전소 안정상태에서 발생한 EDG 고장 대비 2배에 해당한다. 이는 좀 더 여유 있는 계획예방정비 공정 관리로 해결이 가능하다.

2. 근본원인 기준

EDG 불시기동의 원인 별로 살펴보면, 인적 오류가 15건(운전원 3건, 정비원 12건)이고 기기고장이 6건이다. 이들 결과는 운전 중인 기기를 주로 관리하는 운전원과 정지중인 기기를 정비하는 정비원 사이에서 중요 설비를 대하는 안전 문화 측면에서 약간의 인식 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서, 이는 기기고장 관리도 중요하지만 인적 오류 예방을 위한 교육 등 체계적인 활동으로 해결이 가능하다.

제 2 절 SBO 발생 사례

1. 소내정전사고(SBO) 정의

소내정전사고 또는 교류전원 완전상실사고라고 불리는 SBO 사고는 안전등급 및 비안전등급 스위치기어 모선에 교류전원의 완전상실을 의미한다. 터빈 트립과 동시에 소외전원 상실과 소내 교류전원의 이용 불가능을 포함한다. 즉, 소외전원상실(LOOP)과 주발전기 정지가 동시에 발생되고 EDG 등 소내 비상전원도 사용이 불가능한 상태로 발전소 내·외의 교류전

원이 완전히 상실되는 경우에 해당된다. 따라서 SBO 사고가 발생하면 보조급수계통, 잔열 제거계통 및 원자로 건물 열제거계통 등 안전정지계통의 운전불능으로 SBO 지속시간이 길어질 경우 노심 냉각기능 상실로 노심 용융사고 유발할 수 있다. 방사선비상계획¹⁴⁾의 관점에서 본다면 모든 소외전원 상실(LOOP)은 백색비상¹⁵⁾ 발령여부를 검토해야 하는 수준이나 모든 소내 교류전원 완전상실(SBO)은 곧 바로 백색비상을 발령해야 하는 수준의 고장이라 할 수 있다. 적절한 후속조치 미흡으로 15분 이상 SBO 상태가 지속되면 청색비상¹⁶⁾을 발령하고 30분이 지나도록 노심냉각에 필요한 터빈구동 보조급수펌프 운전이 되지 않아 노심용융이 우려되면 즉시 적색비상¹⁷⁾까지 발령해야 한다. 이와 같이 원전의 안전에 EDG를 포함한 전력설비가 중요한 역할을 하고 있으며, 특히 SBO 대처설비로 도입된 대체교류디젤발전기(AAC DG)는 모든 교류전원 완전상실사고 시 대체 교류전원 제공으로 발전소 원전안전을 보장하고 있다.

2. 소내정전사고(SBO) 발생사례

국내에서는 2001년 이후 총 6건의 LOOP 사건이 발생했고 이중 1건은 EDG 기동 실패에 따른 SBO로 이어진 사례가 있었다. 2012년 2월 9일 계획예방정비기간에 발전기 보호계전기 시험 중 정비원의 오류로 소외전원이 상실되는 과도상태가 발생되었고, 대기상태에 있던 EDG 'B'가 기동용 공기 공급계통 고장으로 자동기동이 실패하여 발전소 전력공급 중단으로 모든 교류전원이 약 12분간 상실(SBO)되었다. LOOP 사건 등의 영향으로 안전모선 저전압(LOV)에 의해 EDG가 자동기동하여 안전모선에 전력을 공급하면 원자력안전위원회 고시에 따라 사건발생 4시간 이내에 구두보고하고 60일 이내에 사건상세보고서를 제출하여야 하며 사고고장 등급평가 대상이 된다. 최근 국내원전에서 발생하였던 소외전원 상실 및 EDG 기동실패 사건은 사고고장 2등급으로 평가되었다. 관련하여 작성된 중요사건 보고서에 제시된 사건의 교훈은 다음과 같다.

- 리스크 평가와 계획예방정비 공정관리 철저
- 시험절차서 품질향상과 인적오류 예방기법 활용

14) 방사선 비상사고 발생 또는 우려 시 사고수습 및 확대방지에 필요한 제반사항을 정해 종사자와 주변주민의 건강을 보호하고 재산상의 피해 최소화를 목적으로 작성한 계획서

15) 원전시설 안전상태 유지에 필요한 전원공급 기능 손상으로 방사성물질이 누출되더라도 그 영향이 원자로건물 이내로 국한될 것으로 예상되는 비상사태

16) 백색비상 등에서 원전시설 안전상태 복구기능 저하로 안전시설 손상으로 방사성물질이 누출되고 그 영향이 원전시설 부지 이내로 국한될 것으로 예상되는 비상사태

17) 노심 손상으로 원전시설의 최후방벽이 손상되거나 손상이 우려되는 사고로 방사성물질이 누출되고 그 영향이 원전시설 부지 밖으로 미칠 것으로 예상되는 비상사태

3. 소내정전사고(SBO) 발생 시 대응

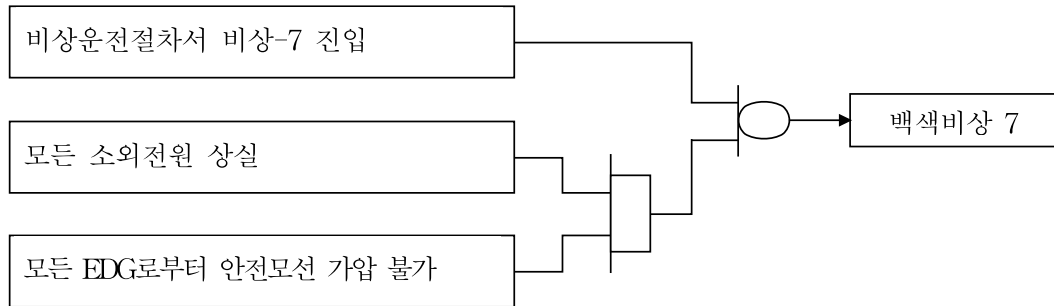
국내 원자력발전소에는 정상운전, 비정상운전, 비상운전과 관련된 일련의 절차서가 준비되어 있다. 비상운전지침서(EOG)¹⁸⁾ 및 비상운전 절차서(EOP)¹⁹⁾는 발전정지 또는 비상사고 시 적용하여 발전소를 안전한 고온정지(운전모드 4) 상태로 전환 및 유지시킨다.

비정상운전 절차서(AOP)²⁰⁾는 계획예방정비 기간을 포함하여 모든 운전모드에서 발전소 과도상태 발생 시 적용하여 안전운전을 도모한다.

고리1호기 SBO 발생사례 후속조치 관련 기술검토 결과 및 타 발전소 적용사례를 참조하여 결정한 신고리 3,4호기 SBO 발생 시 대응방법을 정리하면 다음과 같다.

- 출력운전 중 SBO 발생 시
 - 방사선비상계획서 및 운영절차서 “비상-07(교류전원 완전상실)” 적용
- 저운전모드(운전모드 5-상온정지, 6-계획예방정비기간) 중 SBO 발생 시
 - 방사선비상계획서 및 운영절차서 “비정상-3823(C-1E 4.16kV 모션 저전압)” 적용
 - 장기적으로 저운전모드에서 적용이 가능한 EOG 및 EOP 개발 필요²¹⁾
- SBO 발생 시 연계되는 방사선비상 발령기준
 - 백색비상 7 : 비상운전절차서 비상-07(교류전원 완전상실) 진입 시 또는 모든 소내·외 교류전원 상실(표 3.2.1)

표 3.2.1 백색비상 7 발령기준 개념도



- 청색비상 5 : 모든 소내·외 교류전원 15분 이상 상실
- 적색비상 5D : 모든 교류전원 상실 + 30분 이상 터빈구동 보조급수펌프 운전불능으로 노심용융 우려 시

18) Emergency Operating Guideline

19) Emergency Operating Procedure

20) Abnormal Operating Procedure

21) APR1400 운영허가 대비 선행호기 운전경험 반영 검토 요청사항

제 4 장 APR1400 원전 EDG 신뢰성 개선내용 분석

제 1 절 EDG 신뢰도 관리기준

1. 최종안전성분석보고서 EDG 신뢰도 개요

APR1400 원전 EDG는 KEPIC ENB 6240 및 NRC Reg. Guide 1.9에 따라 50%의 신뢰수준을 갖는 기동과 부하인가 신뢰도 99%를 가진다. 그리고 설계목표 신뢰도 97.5%를 유지하기 위한 요건, 범위, 감시, 평가, 시험, 분석 등을 포함한 신뢰도 프로그램을 작성 운영하여야 한다.

2. 원전별 EDG 신뢰도 관리기준 비교

APR1400 원전은 EDG 제작/시험 기술규격인 IEEE 387에 따라 99%의 신뢰도를 갖는 EDG(12PC-2.6B)를 구비하였다. 발전소 운영 관련 규제지침 NRC Reg. Guide 1.9 및 1.155 요건에 따라 EDG의 설계목표 신뢰도는 97.5% 이상이다

표 4.1.1 국내 원전의 EDG 신뢰도 비교표

구분	제작구매 신뢰도	목표유지 신뢰도	최저유지 신뢰도
APR1400	99%	97.5%	95%
OPR1000	-	97.5%	-
영광1,2발	-	95%	-

3. 유효시험 실패횟수에 따른 EDG 시험계획 단축기준

가. APR1400 EDG 시험주기 단축기준

○ 호기별 단위 EDG를 기준으로 31일 주기 시험이 원칙이나 최근 25회의 유효시험 중 실패횟수가 4회 이상이면 7일 주기로 단축(표 4.1.2)된다.

○ 단축된 시험주기는 대기상태로부터 7회의 연속적인 실패 없이 기동될 때까지 유지되어야 하고 부하 운전시험이 수행되어진다.

○ 만일 연속해서 7회의 기동 실패 없이 수행되어 시험주기가 31일로 복구되었다 해도 이어지는 시험에서 1회 이상의 추가적인 실패 발생 시 최근 25회 시험 중 4회 이상의 실패로 정의되면 시험간격은 다시 위의 표와 같이 단축되고 이후 연속해서 7회의 기동 실패가 없을 때까지 시험간격을 유지한다.

표 4.1.2 APR1400 EDG 시험주기

최근 25회의 유효시험 중 실패횟수	시험주기
≤ 3	31일
≥ 4	7일 (24시간 이내에 수행된 것은 제외)

나. 호기별 EDG 목표신뢰도 관리 및 평가 기준

○ 호기별 EDG 목표신뢰도 유지 여부를 평가하는 기준(표 4.1.3)이며 최근 20회, 50회, 100회 유효시험 중 실패횟수 누적값으로 결정한다.

표 4.1.3 EDG 목표신뢰도 97.5% 미달여부 결정기준

구분	20회 유효시험 중 실패횟수	50회 유효시험 중 실패횟수	100회 유효시험 중 실패횟수
관리 제한치 (트리거값)	≥ 3	≥ 4	≥ 5

○ 호기별 목표 신뢰도 관리기준 초과 시 다음의 조치를 수행한다.

- 목표 신뢰도 관리 제한치를 1개 초과한 경우 : 고장 근본원인 조사 및 재발방지 시정 조치 검토 ⇒ “신뢰도 프로그램 핵심 검토분야 평가표” 작성 ⇒ 신뢰도 프로그램 구성요소 개선 및 도출된 문제점 종결조치

- 목표 신뢰도 관리 제한치를 모두 초과한 경우 : 고장 근본원인 조사 및 재발방지 시정 조치 의뢰 ⇒ EDG의 기능상실을 유발할 수 있는 모든 고장형태 파악 ⇒ 파악된 고장형태 예방을 위한 시정조치 의뢰 ⇒ “신뢰도 프로그램 핵심 검토분야 평가표” 작성 ⇒ 신뢰도 프로그램 구성요소 개선 및 도출된 문제점 종결조치

다. 유효시험 실패의 정의

○ EDG가 운전가능으로 선언된 이후 대기상태에서 기동실패 또는 부하운전 실패가 발생하는 것을 말한다.

○ 또한 대기상태에서 수행하는 예방점검 과정에서 기동 또는 부하운전 실패로 이어질 명백한 결함이 발견된 경우도 1회의 유효시험 실패로 간주한다.

라. 유효시험 실패 예외사항

○ 비상운전모드에서 우회되는 일반 정지신호에 의한 EDG 정지
○ 비상운전모드에서 운전이 요구되지 않은 기기 오동작으로 EDG 정지
○ 소량의 냉각수 및 윤활유 누설 등 EDG 성능에 심각한 영향을 주지 않는 정보 또는 비정상 발생으로 의도적으로 시험을 중지하고자 EDG 정지

○ 정비 중 원인을 찾기 위해 수행하는 시험이나 정비결과 확인 시험 중 EDG 정지

○ 기기 동작불량 또는 운전원 실수로 EDG 시험은 실패하였으나 심각한 문제나 고장정비 없이 수분 내에 재기동하여 부하운전에 성공한 경우

제 2 절 EDG 신뢰성 증진을 위한 설비개선 내용 분석결과

APR1400 EDG의 신뢰도는 기존 원전의 EDG에 비해 높게 설계되었다. EDG의 신뢰도 향상을 위한 설비개선 및 설계변경 요소를 파악하여 요약하면 다음과 같다. 이는 선행호기 EDG의 신뢰도 향상을 위한 기술검토 시 참고기준이 될 수 있을 것이다.

1. 기동용 공기계통 SOV 다중화

EDG는 기동용 공기계통을 이용한다. 기동실패 예방을 위하여 2-Train, 4-Way Starting SOV²²⁾를 적용하여 기동용 공기계통 SOV를 다중화하였다.

2. 디지털 계전기 적용

통합계전기 형태의 GE G60 디지털 계전기 적용으로 개별계전기(ABB Static Type) 사용 대비 고장을 감소 및 정비 편의를 도모하였다.

22) solenoid-operated valve

3. 계통병입 차단기 이중화

EDG 계통병입 실패 예방을 위하여 출력 차단기 수를 EDG 별 기준 1개에서 2개로 증가하여 계통병입용 차단기 이중화(그림 4.2.1)하였다. 다시 정리하면 선행호기 대비 소내전력계통 4.16kV SWGR²³⁾가 2면에서 4면으로 추가됨에 따라 1개 차단기 고장시에도 안정적으로 가압(계통병입)할 수 있는 여건이 마련되었다. 따라서 EDG 기동 시 4.16kV SWGR 2면에 2개의 EDG 인입차단기가 투입되고, 안전등급 부하에 순차적으로 가압을 하게 된다.

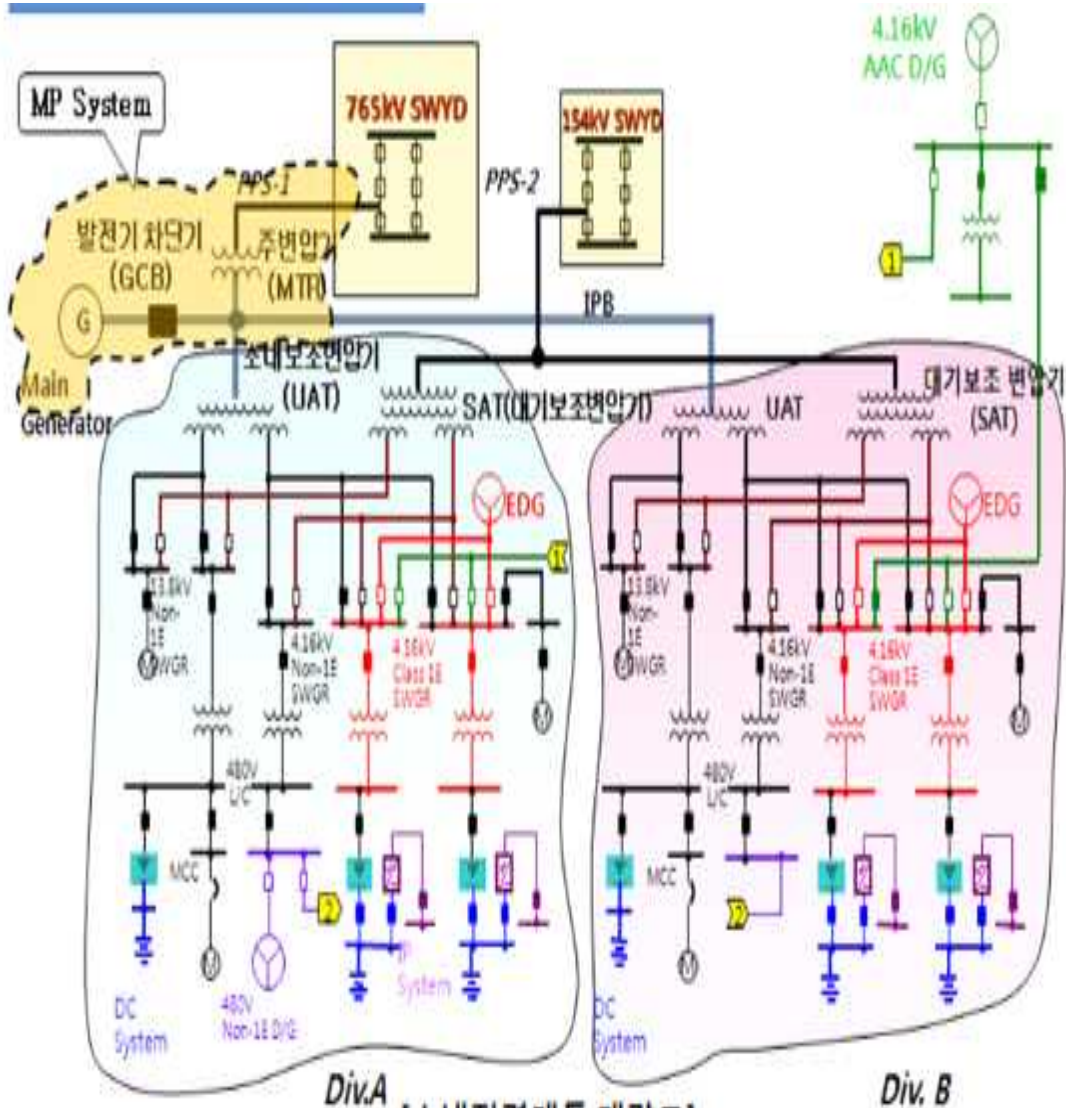


그림 4.2.1 소내전력계통 개략도

23) Switch gear

4. 온라인 성능감시시스템 도입

EDG 온라인 성능감시시스템(DMDS)²⁴⁾ 적용으로 실시간 운전상태 감시 확인, 365일 운전변수 기록 유지 및 DB도 가능하게 되었다.

5. 진동차단계통 설치

기존발전소는 EDG 건물이 별도로 있었으나, APR1400 원전은 EDG 건물을 보조건물에 통합으로 배치(그림 4.2.2)하면서 원자로건물과 공동매트 기초로 설계하였고 EDG 보호를 위하여 지진에 의한 진동차단계통도 설치하였다.

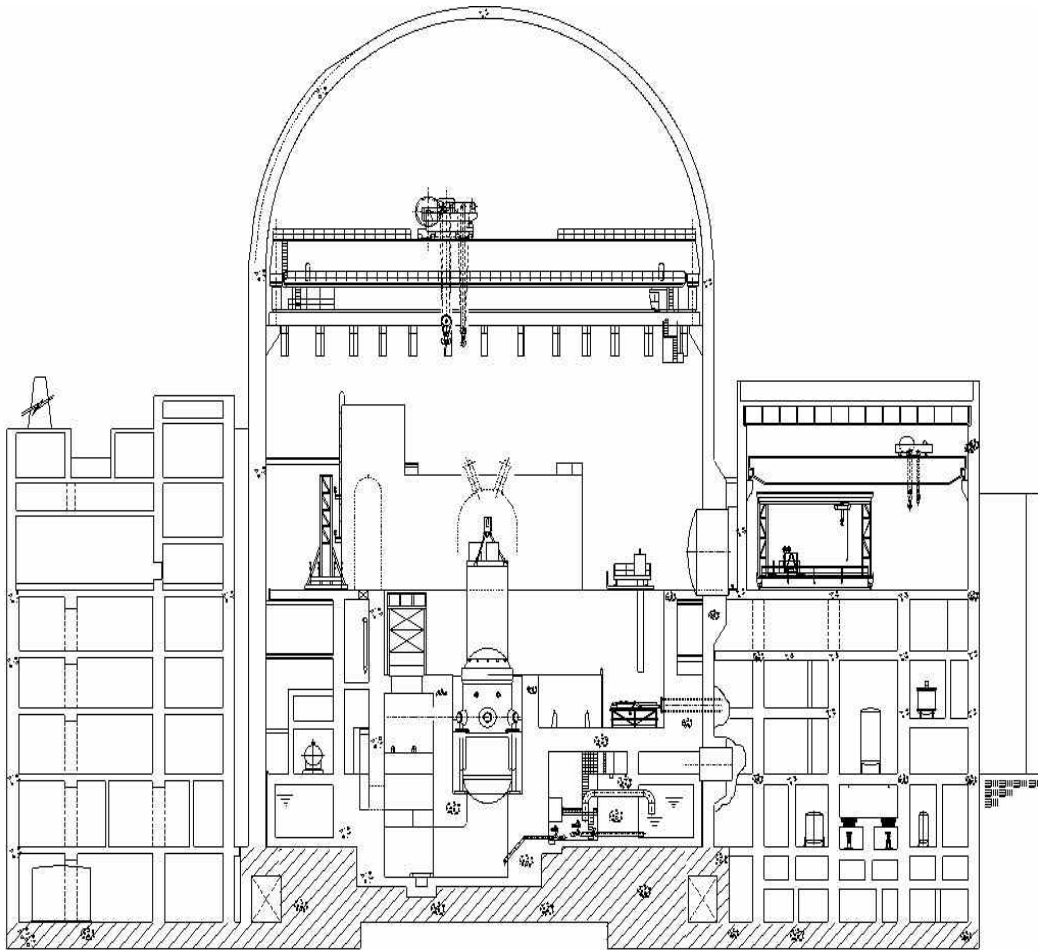


그림 4.2.2 EDG건물, 보조건물 및 원자로건물 공동매트 기초 설계도

24) Diagnostic Monitoring & Display System

6. EDG 용량 증가

APR1400 원전의 용량에 적합한 수준으로 EDG 용량도 OPR1000 신고리1,2호기 6,000kW 대비 8,000kW로 증가시켰다. 국내원전 중 최대용량(표 4.2.1)으로 설계하여 안전모선 필수전원에 대한 여유를 확보하였다.

표 4.2.1 원전 EDG 용량 및 설치 위치 비교

호기	정격출력	정격속도	설치위치
고리3,4	7,000	450	디젤건물
영광5,6	7,200	514	
신고리1,2	6,000	576	
신고리3,4	8,000	600	보조건물

7. 4분면 분리 독립개념 설계 적용

그림 4.2.3에 나타낸 것과 같이 4 채널 안전주입계통 완전분리 및 분할 배치로 화재, 홍수 등 외부사건 대처능력 강화(C, D Channel 추가)로 안전성을 증진하였다.

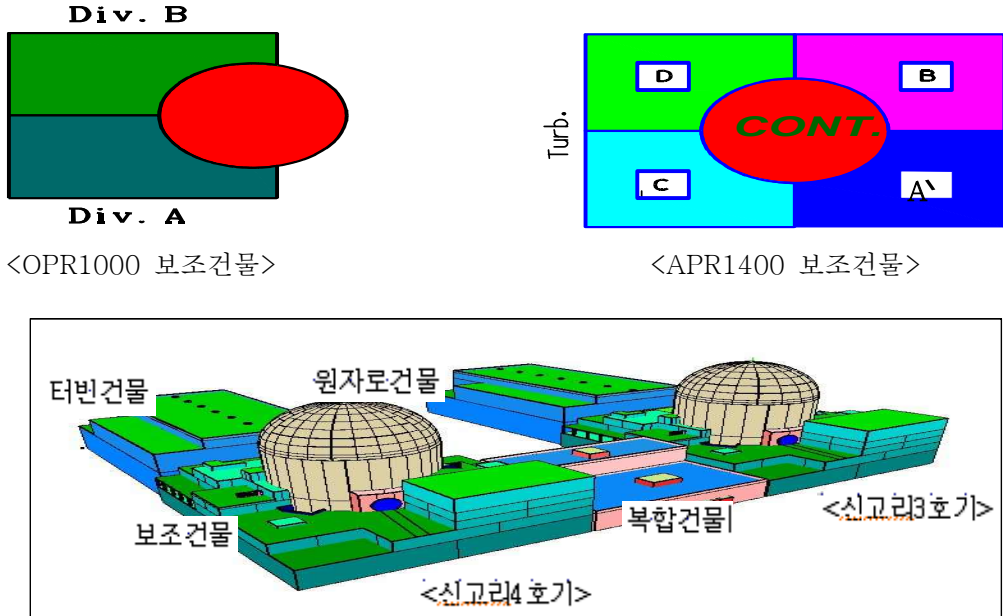


그림 4.2.3. APR1400 및 OPR1000 주요건물 설계 배치도

8. 주제어반에 인간공학기반 설계기준 적용

EDG 운전을 포함한 주제어반 모든 설비 운전은 인간공학 설계기준 반영된 주제어반(그림 4.2.4) 적용으로 다음 사항들이 개선되었다.

- 종합, 비상절차서 등 주요 절차서 전산화
- 워크스테이션 및 대형정보표시판 도입
- 컴퓨터정보처리, Graphic화면 운전정보 표시
- 안전설비 제어를 위한 별도 운전반 설치

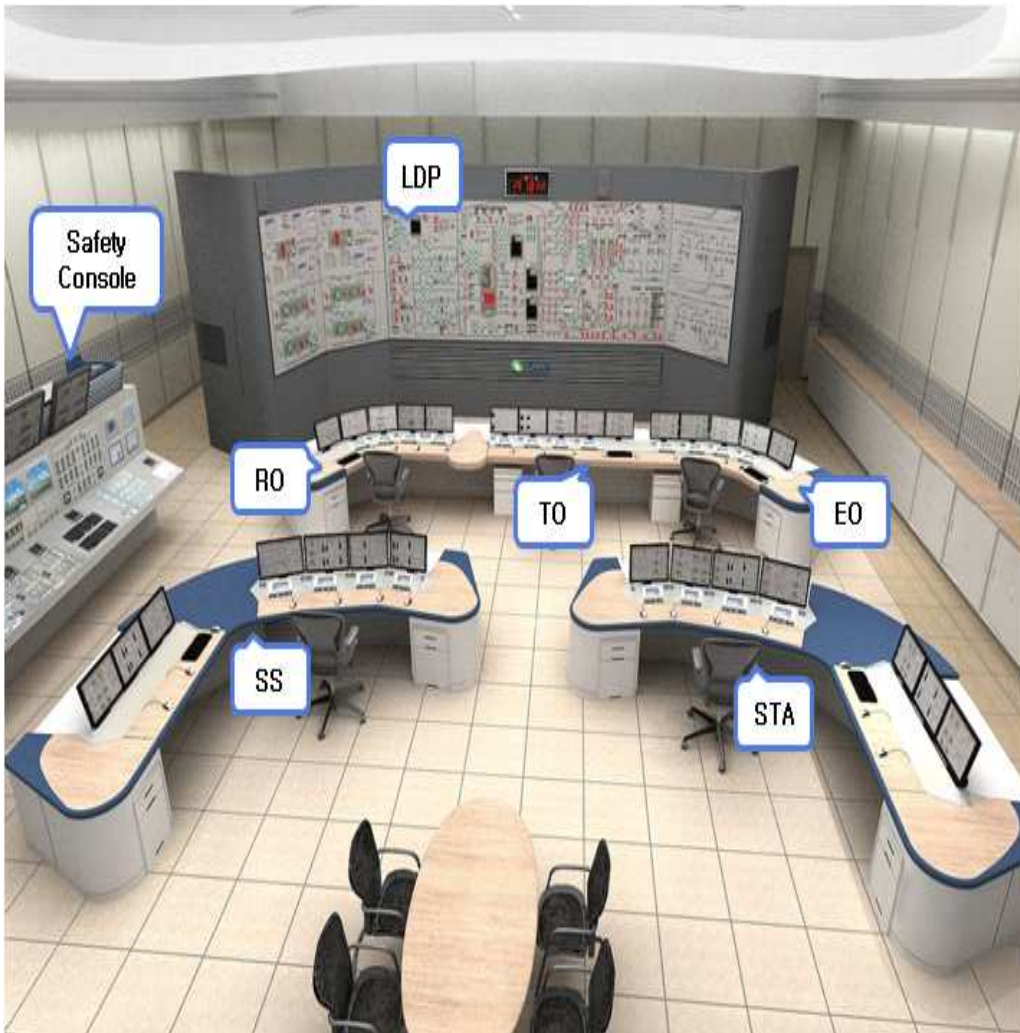


그림 4.2.4 APR1400 주제어실(MMIS) 조감도

9. EDG 신뢰도 개선효과 종합분석

위에서 기술한 EDG 신뢰성 증진을 위한 설계변경 내용을 종합해 보면 EDG 기동시간 7초 증가 및 소내정전 대처시간 4시간 증가라는 정량적인 자료로 정리해 볼 수 있다.

표 4.2.2 APR1400 및 OPR1000 신뢰도 개선효과 비교

구분	OPR1000	APR1400
소내정전 대처시간	4시간	8시간
EDG 기동시간	10초	17초

가. 소내 정전사고 대처시간 변경사항(4시간 ⇒ 8시간) 분석

소내 교류전원 상실(SBO) 상황에서도 발전소는 최소한 8시간 동안 안전한 고온정지 상태를 유지하여야 하며, 교류전원의 상실 가능성 최소화를 위하여 EDG와는 다른 형태의 대체 교류전원 설비(AAC DG)를 설치하여 발전소 완전정전사고 대처능력을 향상시켰다. 소내 정전사고 대처시간은 여유 비상교류전원의 수량, 비상교류전원의 신뢰도, 예상되는 소외 정전사고 빈도 및 소외전원 복구시간에 의해 결정된다. 소내 정전사고 대처시간 이내에 비상교류전원 또는 소외전원이 회복된다. 일본 후쿠시마 원전사고 후속조치 계획에 따르면 이동용 발전차 확보 등으로 전력계통의 여유도를 약 24시간으로 증진시킬 예정이다. 또한 소내 정전사고 발생 시 AAC DG 기동으로 대체교류전원이 10분 이내에 1개 호기, 1개 계열의 안전 모션에 인가됨을 주기적인 시험으로 입증한다.

표 4.2.3 EDG 및 AAC DG 비교

항목	AAC DG	EDG
운전조건	SBO 발생시 10분 내에 필요부하에 전원 공급	LOOP 또는 LOOP+Loca 발생시 약 1분 내 전부하 투입
품질등급/전기등급	“R” Class / Non-1E	“Q” Class / Class-1E
내지진해석	적용	적용
수량	1대 / SKN3,4,5,6호기	2대 / 한호기
정격출력	7,200 kW	8,000 kW

나. 기동 후 정격전압, 주파수 도달시간 변경사항(10초 ⇒ 17초) 분석

EDG 기동신호 발생 약 17초 후에 정격전압 및 정격주파수에 도달하고 EDG 출력차단기가 자동으로 안전모선에 투입되어 필수전원을 공급하게 된다. 이 시점까지 안전모선 정전시간이 약 17초 동안 유지되며, 이는 SIT²⁵⁾ Fluidic Device 설치 등 안전관련 설비 개선에 따른 유량주입시간 연장으로 안전성이 향상되어 선행호기보다 안정적인 기동시간이 확보되었기에 가능하며 기존 원전의 정격전압 및 주파수 도달 요구시간 10초 대비 약 7초의 안전도가 확보되었음을 의미한다.

제 3 절 EDG 신뢰도 입증을 위한 시험

EDG 신뢰도 입증을 위해 초기에 수행하는 시험을 비교하면 제작사 주관 공장시험(표 4.3.1) 및 발전소 주관 설치후 시험(표 4.3.2)이 있다.

1. 제작사 주관 공장시험

제작사 주관 공정시험의 종류에는 공장생산시험, 공장시험, 최초형식시험이 있다.

표 4.3.1 제작사 주관 공장시험

구분	공장생산시험	공장시험	최초형식시험
내용	동력기 또는 발전기에 연결하여 공장시험	엔진과 발전기를 결합하여 시험	최초 형식시험으로 검증되지 않은 EDG를 반드시 엔진과 발전기를 결합하여 최초 형식시험을 거쳐 신뢰성 검증

2. 발전소 주관 설치 후 시험

발전소 주관 설치후 시험에는 현장인수시험, 시운전시험, 주기별 정기시험이 있다. 주기별 정기시험에는 1개월 주기의 기동 및 부하시험, 6개월 주기의 고속기동 및 부하운전, OH(18개월) 주기의 종합 성능시험, 10년 주기의 EDG 'A' 및 'B' 동시 기동시험이 있다. 종합시험은 OH 중 EDG 분해정비 결과를 확인하는 정비후시험의 개념이 포함되어 있고 OH 착수 1주 이내에 수행하게 될 정비전시험 결과와의 비교를 통한 성능개선 정도 평가도 가능하다.

25) Safety Injection Tank

표 4.3.2 발전소 주관 설치후 시험

시험항목	현장 인수시험	시운전 (Pre-op)	주기시험			
			1개월	6개월	OH	10년
Stating	●					
Load acceptance	●					
Rated load	●					
Load rejection	●					
Electrical	●					
Subsystem	●					
Reliability		●				
Slow Start			●			
Load run			●	●		
Fast start				●		
LOOP		●				
SIAS		●				
Combined SIAS,LOOP		●			●	
Largest load rejection		●			●	
Design load rejection		●			●	
Endurance and load		●			●	
Hot restart		●			●	
Synchronizing		●			●	
Protective trip bypass		●			●	
Test modeoverride		●			●	
Independence		●				●

3. EDG 엔진 검증결과

APR1400 원전에 설치한 EDG의 공장시험(표 4.3.3)은 4대 중 1대에 대하여 시행하고 최초 형식시험 자료에 따르면 엔진과 발전기를 결합한 상태에서 300회 시험기동 모두 성공으로 평가되었다.

표 4.3.3 국내 원전 EDG 신뢰성 시험이력

ITEM	12PC2.6B	16PC2.5
Code	IEEE387	IEEE387
Start	300	300
Failure	0	1
Ratio	100%	99%
Year	2007	1995
Plant	APR1400	OPR1000

4. 현장 인수시험

발전소 주관 설치후 시험의 단위 항목이며 다음과 같은 시험으로 EDG 인수여부를 결정한다.

가. 시험내용

- 정상 기동/정지 확인시험 : 초기 기동 및 정지 여부를 확인하는 시험이다.
- 저속 기동 시험 : 기동신호 주입 시 17초 이내에 정격전압 및 주파수에 도달하는 지 확인한다.
- 전부하 운전 시험 : 전출력 운전 가능성을 평가하는 시험이다.
- 전부하 차단 시험 : 전출력 운전 중 전부하 차단 시 EDG가 정지되지 않는 지 확인하는 시험이다.
- 고온 재기동 시험 : 전출력 운전 후 정지하고 5분 이내에 재기동되는 지 확인하는 시험이다.
- 보조계통 기기 시험 : EDG 기능을 보조하는 설비들의 운전가능성을 평가하는 시험들이다.

나. 시험결과 분석

시운전시험 과정에서 우선적으로 수행하였으며 정상기동 및 정지시험 등 모든 시험항목이 만족으로 평가되었다.

5. 가동전시험(시운전시험)

발전소 상업운전을 대비하여 설계요건 만족여부를 최종 확인하는 시험으로 24시간 연속 부하운전, 자동기동, 부하탈락 및 순차 부하투입시험 등을 수행한다.

가. 시험내용

가동전시험(Pre-operational Test)에 해당하는 시운전시험은 적절한 설치와 운전을 보증하기 위해 수행하며 주요절차는 다음과 같다.

- 사전시험
 - 연료유 및 윤활유계통 세정
- 보조계통시험
 - 공기압축기 기능시험 등
- 제작사 현장시험
 - 엔진 단독 기동시험, 공기저장조 용량시험 등
- 24시간 전부하시험
 - 2시간 연속 최대출력(8,800kW) 시험 등
- 25회 연속기동 및 전기/기계적 보호신호 정지시험
- ESFAS 신호 주입에 따른 자동기동 확인시험
 - SIAS, CSAS, AFAS-1, AFAS-2, LOOP
 - 사용전검사 대상 항목
- 부하탈락(표 4.3.4) & Sequencing 시험

모선 LOV Relay 작동 후 0.1초 이후에 UAT에서 수전받는 차단기가 트립되고 0.2초 이후에는 SAT에서 수전받는 차단기 및 각 기기의 차단기가 트립된다.

- 관련회로 사전점검 필요,
- 사용전검사 대상 항목
- 동시 기동시험
 - 가동전시험 완료단계에서 EDG 건전성 재확인 후 수행 필요

표 4.3.4 부하탈락(Load Shedding)

시간	명칭	부하계열	
		A계열	B계열
0.1초	정상 인입차단기	PF-E-SW01A-H2 PF-E-SW02A-C2	PF-E-SW01B-H2 PF-E-SW02B-G2
0.2초	대기 인입차단기	PF-E-SW01A-A2 PF-E-SW02A-A2	PF-E-SW01B-A2 PF-E-SW02B-J2
	안전주입펌프	SI-PP02A/02C	SI-PP02B/02D
	정지냉각펌프	SI-PP01A	SI-PP01AB
	원자로건물살수펌프	CS-PP01A	CS-PP01B
	1차기기냉각수펌프	CC-PP01A/02A	CC-PP01B/02B
	1차기기냉각해수펌프	SX-PP01A/02A	SX-PP01B/02B
	필수냉방기	WO-CH01A/02A	WO-CH01B/02B
	전동기 구동 보조급수펌프	AF-PP02A	AF-PP02B
	충전펌프	CV-PP01A	CV-PP01B
	AAC SWGR 공급 차단기	PF-E-SW01A-G2 PF-E-SW02A-E2	PF-E-SW01B-B2 PF-E-SW02B-E2

○ 전기/기계적 트립신호 정지 우회 확인시험(표 4.3.5)

EDG가 비상기동신호에 따라 운전되고 있다면 유효유 저압력 등 일반적인 EDG 트립신호는 발생되더라도 EDG가 정지되지 않고 계속 운전되어야 하는 설계개념 만족 여부를 평가하는 시험이다.

표 4.3.5 EDG 트립신호 정지 우회 확인시험 목록

번호	정지 신호	경보 명칭
1	계자 상실	"LOSS OF FIELD"
2	과전압	"OVER VOLTAGE"
3	저전압	"UNDER VOLTAGE"
4	발전기 부하불평형	"PHASE(Neg Phas Seq) UNBALANCE"
5	저주파수	"UNDER FREQUENCY"
6	전압억제 발전기 과전류	"GENERATOR OVER CURRENT WITH VOLTAGE RESTRAINT"
7	과전류	"OVER CURRENT"
8	과여자전류	"EXCITATION OVER CURRENT"
9	발전기 접지	"GROUND OVERVOLTAGE"
10	역전력	"REVERS POWER"
11	저온용수 계통의 저 압력	"LT WTR PRESS LOW"
12	저온용수 계통의 저 수위	"LT WTR TANK LEVEL LOW"
13	고온용수 계통의 고 온도	"HT WTR TEMP HIGH-HIGH"
14	윤활유 압력의 저 압력	"LUBE OIL ENG INLET PRESS LOW LOW"
15	윤활유 유위의 저 유위	"LUBE OIL SUMP LEVEL LOW-LOW"
16	크랭크 케이스 고 압력	"GAS CRANK CASE PRESS HIGH"
17	윤활유 온도의 고 온도	"LUBE OIL TEMP HIGH"
18	연료 유위의 저유위	"FO DAY TANK LEVEL LOW-LOW"
19	디젤 엔진 베어링 고온도	"D/G SET BRG TEMP"
20	전기적 엔진 과속도	"ELECTRICAL OVER SPEED"
21	여자기 회전 정류기 고장	"ROTATING DIODE SHORT CIRCUIT"
22	여자기 고장	"EXCITATION FAULT"
23	수동 여자 제어반 제어전원 상실	"EXCITAT CUB. CTRL PWR FAILURE"
24	CO2 동작신호	"CO2 ACTUATOR ACTIVATED"

나. 시운전 시험결과 분석

2012년 11월 현재 신고리3호기 EDG 'B' 계열은 시운전시험이 모두 마무리되었다. 그 결과도 만족스러운 수준이다. 25회 연속기동 및 전기/기계적 보호신호 정지 확인시험은 '12.8.14 ~ 8.20 사이에 수행되었고, 24시간 전부하 연속운전시험은 '12.8.4 ~ 8.5 사이에 수행되었다. EDG 'A' 계열 시험이 '12.9.10일 이후에 수행되고 있으며 단계별 시험이 운영절차서에 따라 제작사, 시공사, 계통엔지니어의 입회하여 적절하게 진행되고 있다. 그리고 EDG 시운전시험 과정에서 취득한 운전변수는 온라인성능감시시스템(DMDS)에 의해 실시간으로 감시 평가되고 있으며 2013년 1월 상업운전 이후 활용을 목표로 구축하고 있는 EDG 신뢰도 종합관리 프로그램이 마련되면 유효한 성능시험 결과를 중심으로 좀 더 구체적인 신뢰도 평가 및 확인이 가능하게 될 것이다.

다. 시운전 경험 사례

2012년 11월 현재 신고리3호기 EDG 시운전시험은 'B' 계열부터 진행되었고 연료공급배관 미세 누유로 시정조치 경험사례(표 4.3.6) 등이 있었지만 대체적으로 시험결과는 판정기준 대비 모두 만족되었다. EDG 'A' 및 'B' 동시기동 시험은 'A' 계열 시운전시험 종결단계에서 수행할 예정이다.

표 4.3.6 EDG 'B' 시운전 시험 중 경험 사례

내용	원인	조치사항
연료공급배관 누설	· 배관용접 불량	Spool 교체
Lube Oil Temp Hi	· 온도센서 단자 접촉 불량	단자 재조임
연료공급배관 2차 누설	· 배관진동에 의한 균열	배관 교체 후 진동측정
Crankcase Hi Pressure	· Sensing line V/V Line-up 오류	계측기 Line-up 점검
CO2 Actuation 신호 발생	· 소방작업자 인적오류	관련 케이블 관리강화
Crankcase Hi Pressure	· Crankcase 배기라인 정체	배기라인 slope 적용

6. 주기별 정기시험 내용

정기시험은 발전소 정상운전에 미치는 영향을 최소화할 수 있도록 계획예방정비기간 중 실시함을 원칙으로 하나, 필요시 발전소 정상운전 중에도 실시할 수 있다. 단, 정상운전 중에 시험을 실시할 경우 발전소 정상운전에 영향을 주지 않아야 한다. 운영기술지침서 점검 요구사항 기준 정기시험 주요절차는 다음과 같다.

가. 31일 주기

- 저속기동 후 정격전압 및 주파수 도달 확인
 - 현장에서 저속으로 기동(Slow Start) 시켰을 때 Slow Speed(330±30rpm)에 도달하는지 확인하고 Slow Speed에서 약 120초 유지하고, 최초 저속 기동 기준으로 140sec 후에 자동으로 Fast Speed(600±12rpm)에 도달함 확인
 - 이후 현장에서 EDG의 전압 및 주파수가 정격 4,160±416V, 60±1.2Hz에 도달하는지 확인
- 계통병입하여 60분 이상 부하운전
 - 가능하면 7,600kW로 운전하되 7,200 ~ 8,000kW 정도의 부하운전 유지
- 각 일일 연료유탱크 연료량 65.6%(584gal) 이상 확인
 - 재충전 없이 EDG를 정격출력(8,000kW)에서 최소 60분간 운전할 수 있는 연료 및 10%의 여유 연료량
- 윤활유 재고량 80%(500gal) 이상 확인
- 각 연료저장탱크 연료재고량 97%(101,400gal) 이상 확인
 - EDG 정격출력에서 7일 동안 공급할 수 있는 연료량
- 각 EDG 기동용 공기저장조 압력 40.78kg/cm² 이상 확인
- 각 연료저장탱크에 축적된 수분 점검 및 제거

나. 92일 주기

- 연료유이송계통의 자동운전 여부 확인
 - 연료저장탱크에서 일일 연료탱크로 연료를 이송하는 연료유 이송계통이 자동적으로 운전되는 지 확인한다.

다. 184일 주기

- 기동 후 17초 이내 정격전압 및 주파수 도달 확인
 - 엔진 예열 상태에서 각 EDG를 고속으로 기동(Fast Start) 시켰을 때 17초 이내에 전압은 3,744 ~ 4,576V, 주파수는 58.8 ~ 61.2Hz 범위에 도달하는 지 확인한다.

라. 18개월 주기

계획예방정비 기간 중 EDG가 운영기술지침서 점검요구사항들을 만족하는 지 입증하기 위하여 다음의 시험(그림 4.3.1)을 단계별로 수행한다.

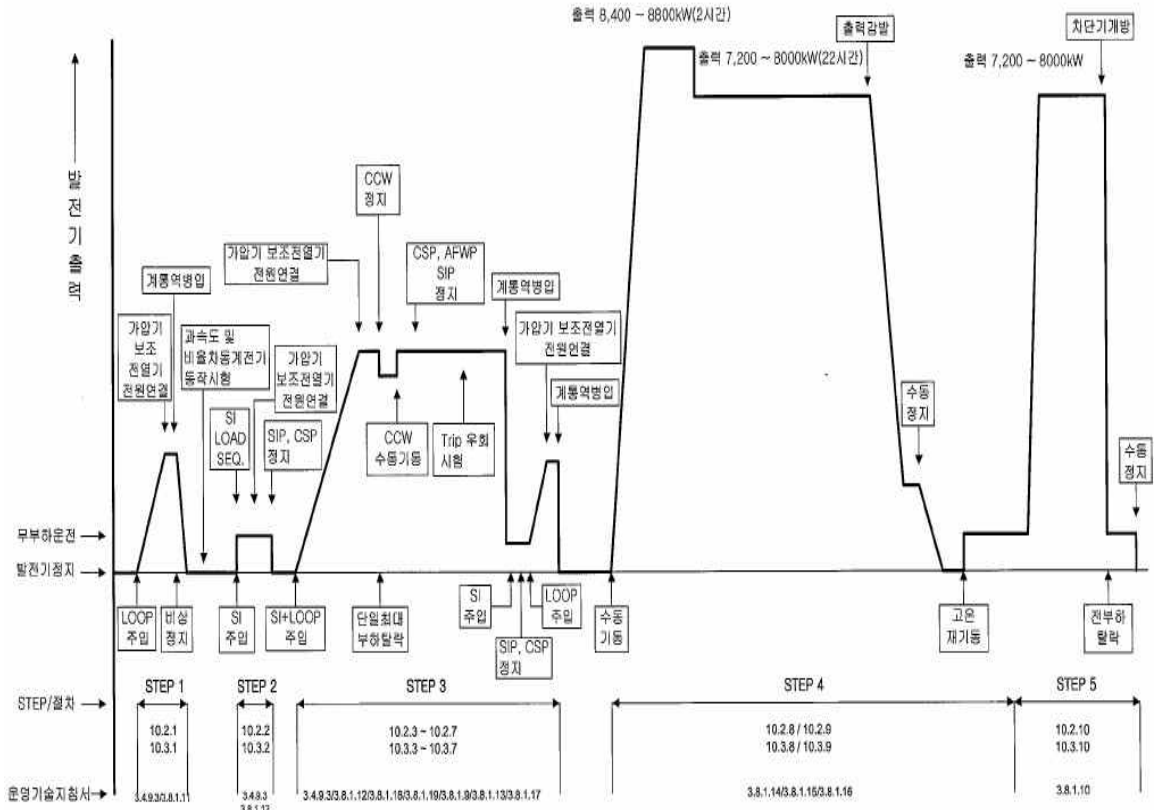
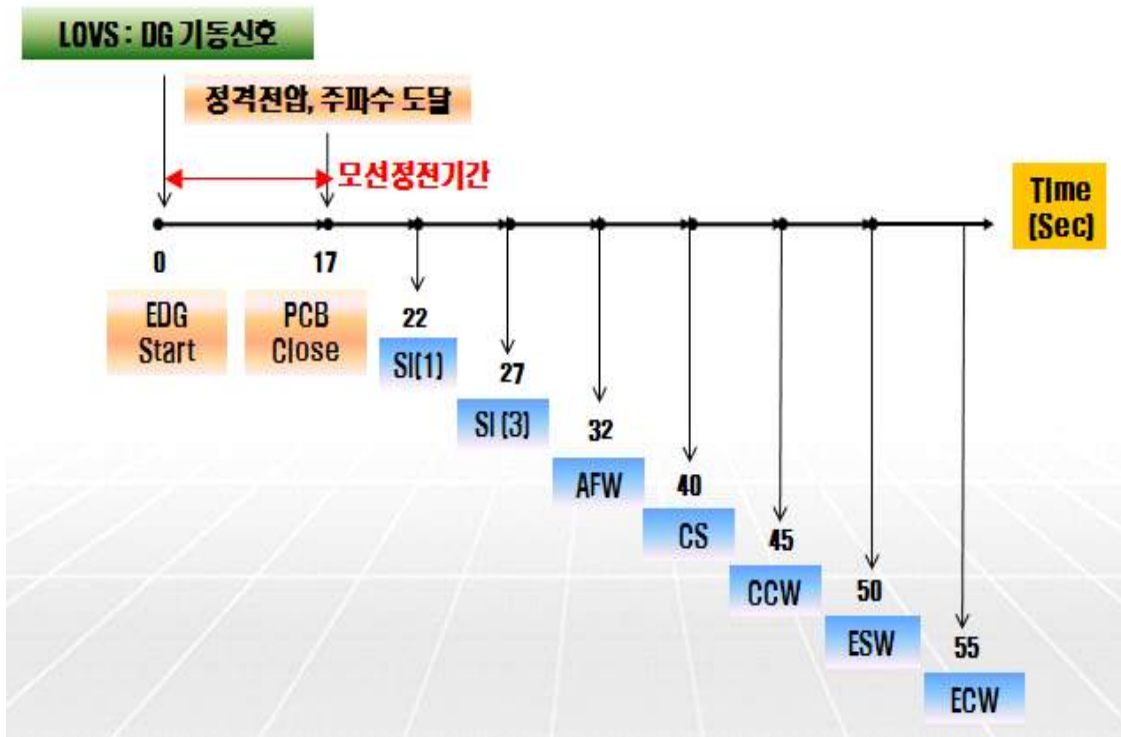


그림 4.3.1 EDG 및 안전모션 점검 진행도

- 육안점검
 - 운전 누계시간, 발전기 회전자 및 고정자 권선 발열흔적 등 손상 여부
- 절연저항 측정
 - 발전기 회전자 및 고정자 권선 절연저항 측정
- 엔진상태 점검
 - 발전기 윤활유, 연료유, 냉각수계통 점검
- 저속 수동기동 점검
 - 현장에서 저속으로 기동, 정격전압 및 주파수 상태로 15분 무부하 운전
- 고속 수동기동 및 계통병입 점검

- 현장에서 고속으로 기동, 17초 이내 정격전압 및 주파수 도달 확인
- 계통병입 후 25%, 50%, 75%, 100%, 110% 단계별 출력 상승 운전
- 소외전원 상실신호(LOOP) 시험
 - 소외전원 상실신호에 의해 EDG 자동기동
 - 19초 이내에 안전모션을 가압하고 전압 및 주파수 정격유지
 - 계통병입 후 부하운전 확인
- Load Shedding & Sequencing Test
 - Load Sequencing Test(표 4.3.7)는 소외전원 상실 신호 이후부터 0초에 EDG START, 17초에 PCB CLOSE, 22초 및 27초에 SIP 기동, 32초에 보조급수펌프, 40초에 원자로건물 살수펌프, 45초에 기기냉각수 펌프, 50초에 기기냉각해수펌프, 55초에 필수 냉방기 차단기가 투입된다.
 - 각 비상부하 단위로 차단기 순차투입 간격이 설계치의 $\pm 10\%$ 이내인 지 확인
- 안전주입 신호(SIAS) 시험 : 안전주입 신호에 의해 EDG 자동기동
- 안전주입 신호(SIAS)를 동반한 소외전원 상실 신호(LOOP) 시험
 - 안전주입신호 동반 소외전원 상실 신호에 EDG 자동기동 후 부하운전 확인
- 안전성 부하 탈락 시험
 - EDG 출력이 8,000kW 미만으로 운전 중 최대 단일부하를 탈락시키고 시 EDG 전압 및 주파수가 3초 이내에 정상으로 회복되는 지 확인
- 트립신호 우회 확인시험
 - 모의 공학적 안전설비 작동신호 또는 안전모션 전압 상실신호를 발생시켜 EDG를 비상기동하고 엔진과속도, 발전기 차동 보호계전기 동작에 따른 비상보호 트립신호를 제외하고는 EDG 자동보호 트립신호가 발생하더라도 EDG를 정지시키지 않고 우회하는 지 확인
- 24시간 연속 전부하 운전 시험
 - 현장에서 고속기동 후 계통병입
 - 초기 2시간 110% 부하운전, 이후 22시간 10% 부하운전
 - 24시간 부하운전시험 완료 후 5분 이내에 고온 재기동시험
- 전부하(7,200~8,000kW) 차단시험
 - 24시간 부하운전시험 완료 후 5분 이내에 고온 재기동시험에 이어 수행
 - 전부하 차단 후 EDG가 정지되지 않고 3초 이내에 전압이 4,576V 이하 유지
 - EDG를 15분 이상 무부하 운전 후, 주제어실에서 수동으로 정지

표 4.3.7 자동부하투입(Load Sequencing Test)



마. 10년 주기

- 대기 중인 2대의 EDG를 동시에 기동하여 17초 이내에 출력전압이 3,744~4,576V(4,160V±416V), 주파수가 58.8~61.2Hz(60Hz±1.2Hz)에 도달하여야 한다.
- EDG 각 연료저장조 연료를 배유하고 침전물 제거 등 청소를 실시한다.
- EDG 각 연료저장조, 펌프와 배관을 포함한 각 연료유 계통에 대해 압력시험을 실시한다.

7. 추가 실증시험을 통한 EDG 신뢰도 증진방안

가. 정비전 시험

- 발전소 계획예방정비 착수 1주일 전부터 해당 EDG 정비 착수시점까지의 기간 중 EDG 정비전 시험을 수행하여 정비를 통해 EDG 성능이 어느 정도 개선되는 지 평가하는 자료로 활용할 예정이다. 발전소별 정비전 시험은 As-Is 상태에서 정기시험 절차서에 따라 수행하므로 정기시험으로 정비전 시험을 갈음할 수 있다.

나. 기동신뢰도 평가 시험

○ 국내원전 EDG 유효시험 실패이력 27건 분석결과 약 89%(24건)가 기동실패에 있었기에 기동신뢰도 제고를 목적으로 운영기술지침서 점검요구사항의 점검주기 31일을 보다 보수적으로 적용하여 7일 주기 7회 반복시험(저속기동으로 5분 무부하 운전)을 수행하고 기동 실패가 없을 경우 원래 점검주기로 복구하되, 문제가 있을 경우 정상화될 때까지 7일 주기 7회 반복시험을 계속 수행하여 원자력발전소 소외전원 정전 시 EDG가 항시 기동되어 발전소 안전을 보증할 수 있도록 할 EDG 신뢰도 증진방안도 수립되어 있다.

제 4 절 EDG 신뢰도 감시 및 관리 시스템 이해

1. DMDS(EDG 온라인 성능감시 시스템)

각 EDG의 현장제어실에 설치된 DMDS²⁶⁾는 EDG의 최대 유효성(이용가능성) 및 신뢰성을 확인하기 위하여 설치되었으며 엔진계통의 트러스트 베어링 온도 등 36개 운전변수(표 4.4.1)를 실시간으로 감시하고 기록하는 시스템으로서 주요 기능은 다음과 같다

- EDG 경보 감시 및 기록
- EDG 기동형태 확인, 기동시퀀스 감시 및 고장 확인
- EDG 비상 및 정상 절차들에 근거한 CRT를 포함한 운전보조
- EDG 불량원인 규명 수단 및 EDG 엔진의 예방정비 보조

표 4.4.1 EDG DMDS(온라인성능감시변수) 목록

순번	점검항목	기준치
1	엔진계통-트러스트 베어링온도	< 90 ℃
2	엔진계통-트러스트 베어링온도	< 90 ℃
3	엔진계통-디젤엔진 베어링온도	< 90 ℃
4	엔진계통-디젤엔진 베어링온도	< 90 ℃
5	엔진계통-디젤엔진 베어링온도	< 90 ℃
6	엔진계통-디젤엔진 베어링온도	< 90 ℃
7	엔진계통-디젤엔진 베어링온도	< 90 ℃
8	엔진계통-디젤엔진 베어링온도	< 90 ℃

26) Diagnostic Monitoring and Display System

순번	점검항목	기준치
9	엔진계통-디젤엔진 베어링온도	< 90 ℃
10	엔진계통-디젤엔진 속도	598~602 rpm
11	흡배기계통-연소용공기온도	< 65 ℃
12	흡배기계통-연소용공기온도	< 65 ℃
13	흡배기계통-연소용공기압력	< 3.2 bar
14	흡배기계통-연소용공기압력	< 3.2 bar
15	흡배기계통-터보차저 입구 배기가스온도	< 600 ℃
16	흡배기계통-터보차저 입구 배기가스온도	< 600 ℃
17	흡배기계통-터보차저 출구 배기가스온도	< 500 ℃
18	흡배기계통-터보차저 출구 배기가스온도	< 500 ℃
19	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
20	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
21	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
22	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
23	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
24	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
25	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
26	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
27	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
28	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
29	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
30	흡배기계통-실린더 배기가스온도	< 520 ℃
31	발전기계통-발전기 유효출력	7,200~8,000 Kw
32	발전기계통-발전기 전압	3,744~4,576 V
33	발전기계통-발전기 베어링온도	< 90 ℃
34	발전기계통-발전기 고정자 권선온도	< 120 ℃
35	발전기계통-발전기 고정자 권선온도	< 120 ℃
36	발전기계통-발전기 고정자 권선온도	< 120 ℃

2. DREAMS(EDG 신뢰도 종합관리 프로그램)

유효시험 실패로 판정될 경우 즉시 EDG 신뢰도를 평가하고 본 프로그램에 따라 적절한 시정조치를 결정하여야 한다.

본 프로그램은 NRC Reg. Guide 1.155에 따라 EDG를 높은 신뢰도로 유지, 관리함으로써 SBO를 예방하기 위해 도입하였으며 이를 토대로 운영기술지침서의 정기시험 요건을 NRC Reg. Guide 1.9 Rev.3 수준으로 완화하여 운영하고 있다. 상세 내용으로는 각 EDG에 대한 운전이력을 관리하고 계획예방정비 전, 후 각 1회씩 출력, 전압, 주파수 등 주요 시험변수에 대한 성능분석을 통하여 성능열화 정도, 목표신뢰도 및 시험주기의 적절성을 평가하는 시스템이며 주요 기능은 다음과 같다.

가. 신뢰도 감시

- 시험이력 데이터 : 유효시험, 무효시험, 부하시험, 기동이력 등
- 신뢰도 평가 : 유효시험 실패이력, 운전불능 이력 등

나. 성능감시/ 추이분석

- 월간 주기 시험변수
- 18개월 주기 시험변수
- 진동데이터
- 화학분석결과 데이터

다. 관련정보 관리

- 고장분석보고서 및 운전경험
- 기타 참고자료

라. 시스템 관리

- EDG 운전정보 전사 공유
- 사용자, 메뉴 및 코드 관리

3. EDG 신뢰도 및 이용불능도

유효시험 결과를 기준으로 EDG 신뢰도를 평가(표 4.4.2)하고 EDG 정비 소요시간을 기준으로 이용불능도를 산출하며 구체적인 내용은 다음과 같다.

가. 신뢰도 산출 방법

EDG는 기동에 성공하면 계통병입 및 부하운전 순서에 따른다. 따라서 신뢰도 산출 방법

도 유효시험 데이터를 기준으로 한 기동신뢰도(식-1)와 부하운전신뢰도(식-2)로 구분하여 정의하고 그 결과를 곱함으로써 유효시험 종합신뢰도(식-3)를 산출한다.

$$\text{기동신뢰도} = \text{기동 성공 수} / \text{총 유효 기동 시도 수} \quad (\text{식-1})$$

$$\text{부하운전신뢰도} = \text{부하공급 성공 수} / \text{총 유효 부하공급 시도 수} \quad (\text{식-2})$$

$$\text{종합신뢰도} = (\text{기동신뢰도}) \times (\text{부하운전신뢰도}) \quad (\text{식-3})$$

또한 유효시험 데이터만을 이용하여 산출하는 상기 유효신뢰도와 달리 무효시험 데이터까지 포함하는 보수적 신뢰도를 산출해 볼 수 있다.

표 4.4.2 국내원전 EDG 종합신뢰도 비교

구분	종합신뢰도(1978년 ~ 2011년)
고리1호기	98.6 ~ 99.3
고리3호기	99.6
울진1호기	98.1 ~ 98.6
월성1호기	98.9 ~ 99.3
영광2호기	99.3 ~ 99.6

나. 이용불능도 산출 방법

EDG 이용불능도 (식-4)는 시험실패 또는 고장이 발생한 EDG를 정비하여 계속 운전할 경우 그 계통의 신뢰도를 나타내는 척도이다. 정비개념이 포함되지 않은 신뢰도에 비하여 보다 보수적인 개념이 적용된 신뢰도의 다른 표현이 이용불능도라고 볼 수 있다. 따라서 EDG의 이용불능도는 EDG에 대한 신뢰도를 보다 현실성 있게 감시할 수 있는 수단이며 정비 등의 원인으로 발생한 이용불능시간을 EDG의 운전요구시간으로 나눔으로써 산출된다.

$$\text{이용불능도} = \text{이용불능시간} / \text{EDG 운전요구시간} \quad (\text{식-4})$$

제 5 장 APR1400 원전 EDG 운영 최적화 방안 연구

제 1 절 EDG 통합 예방점검 시행

1. 필요성

EDG의 신뢰성은 기동운전 및 부하운전 성공여부를 평가함에 있다. 그러므로 EDG에 대한 정기적인 성능시험은 신뢰도를 평가하는 중요한 방법이다. 그 동안의 EDG 운전경험을 살펴보면 유효시험 실패 원인의 약 80%는 기동실패였다. 따라서 EDG 시험 전 예상되는 문제점 파악, 적절한 시정조치 등 EDG 고장 최소화를 위한 선제적 대응조치가 필요하다.

2. 통합 예방점검 방법

EDG 성능시험 수행 전 분야별(기계, 전기, 계측, 발전) 예방점검을 수행하고 시스템 엔지니어 측면에서 최종적으로 통합 예방점검 분석결과를 종합하여 시험의 초기조건 “만족”이라는 공통결론에 도달했을 때 정기시험을 착수함으로써 유효시험 실패를 예방하고 EDG 운영 신뢰도를 증진시키는 것이 필요하다.

3. 부서별 책임사항 및 역할

- 계통기술부서
 - EDG 성능시험 전 수행하는 부서별 통합점검이 원활히 수행될 수 있도록 관리
 - EDG 부서별 예방점검 실적 종합평가 및 의견 제시 : 필요시 시정조치 계획 수립
 - EDG 통합 예방점검 지침 수립 : 필요시 국내 및 해외원전 벤치마킹
- 기계부서, 전기부서, 계측제어부서
 - EDG 성능시험 전 분야별 예방점검 수행
 - 예방점검 기록관리, 이상 발견 시 시정조치 주관
- 발전부서
 - EDG 성능시험 절차서 실증시험 및 2인 1조 시험참여 원칙 준수로 시험 완결성 제고
 - EDG 성능시험 시나리오 작성 및 이미지 트레이닝을 통해 시험 중 인적오류 예방
- 품질부서
 - EDG 고장예방 및 신뢰도 증진활동이 적절하게 이뤄지고 있는 지 평가 및 기술지원

제 2 절 EDG 정비후시험(길들이기 운전) 시행

1. 필요성

EDG의 성능열화 정도를 평가하고 다음 주기의 운전가능성을 보증하기 위하여 매 계획예 방정비 기간에 분해점검을 시행하고 있다. 그러나 국내원전 운전경험으로 보아 EDG 분해 정비 후 초기 기동시험 과정에서 기동실패 또는 부하운전 실패사례가 많았다. 따라서 운전 품질 향상뿐만 아니라 정비품질 향상이 EDG 신뢰도 향상에 미치는 영향이 크므로 EDG 정비가 완료된 후 “길들이기 운전” 수준의 정비후시험을 통해 각 분야별 예상문제점을 파악, 도출하고 적절하게 시정조치하여 EDG의 신뢰도를 확보할 필요가 있다.

2. EDG 정비후시험 방법

EDG 분해정비 후 정비결과 확인차원에서 분야별(기계, 전기, 계측, 발전) 육안점검 수준의 예방점검을 수행하고 기동 및 부하운전에 문제가 없다고 판단되면 분야별 EDG 유지관리 및 정비 책임자급 실무자 임회하여 시스템 엔지니어 주관으로 초기조건 확인, 엔진 공회전, 현장 저속기동, 주제어실 고속기동, 부하운전 등 “길들이기 운전” 수준의 정비후시험을 수행하여 정비결과가 “만족”으로 평가되었을 때 운영부서에 인계하여 관리되도록 한다.

3. EDG “길들이기 운전” 수준의 정비후시험 순서

- 초기조건 확인
- 엔진 공회전 : 현장에서 2회 반복
- 현장 저속으로 수동기동 : 10분 정도 무부하 운전 후 정지
- 주제어실에서 고속으로 수동기동 : 10분 정도 무부하 운전
- 계통병입 및 단계별 출력상승 시험
 - 25% 출력 : 10분 정도 부하 운전
 - 50% 출력 : 10분 정도 부하 운전
 - 75% 출력 : 10분 정도 부하 운전
 - 100% 출력 : 10분 정도 부하 운전
- 주제어실에서 수동정지
- 정비후시험결과 종합평가 후 시험기록 및 특기사항 발전부서에 제공

제 3 절 EDG 기동 및 부하운전 신뢰성 향상방안

1. EDG 기동 시 고속기동(Fast Start) 제한

○ APR1400 원전 EDG는 고속기동 시 정격 속도까지 17초 이내에 가속한다. 그러나 EDG 엔진은 한 달여 간 쉬고 있었기 때문에 실린더 라이너에 남아 있는 윤활유는 모두 빠져 피스톤의 첫 행정의 윤활유가 없는 상태로 운전될 것이다. 거기다 엔진기동 기간에 연료 랙은 전 부하위치에 옮겨가고, 이에 따른 미연소 연료는 이전 엔진정지로부터 실린더 라이너에 그나마 남아 있는 윤활유의 얇은 막을 저하시킨다. 또한 엔진 기동기간 중 과도하게 분사된 연료는 피스톤 크라운과 피스톤링의 상부에 카본 부착물을 형성하여, 라이너를 문질러 윤을 내어 윤활유가 실린더 벽에 부착하는 것을 더욱 어렵게 한다.

○ 결국 EDG 엔진의 고속기동은 연소실 내의 고온 때문에 피스톤 크라운을 급격히 가열하게 된다. 이 열의 대부분은 피스톤의 상부 스커트부로 전달되어 그것을 팽창시키게 된다. 그러나 실린더 라이너 온도는 비교적 안정적이고 냉각수 온도보다 약간 높은 상태다. 이에 따라 윤활이 부족한 상태에서 피스톤 크라운, 피스톤 스커트 그리고 실린더 라이너 간의 그 온도 차이는 금속-금속 접촉을 야기하여 마모를 가속시킨다.

○ 규제기관에서는 이러한 문제점을 인식하고 Reg. Guide 1.9 Rev.3을 통하여 월간시험 시에 제작사의 권고에 따라 저속기동(Slow Start)을 할 수 있도록 하고 고속기동(Fast Start) 시험은 6개월 주기로 수행토록 하였다.

2. EDG 출력증발 시 급속 부하투입(Fast Loading) 제한

○ EDG 급속 부하투입은 1분 이내에 정격출력 100%의 부하를 투입하는 시험이다. 이 시험은 엔진 부품들이 온도 평형에 도달하는 데 충분한 시간을 갖지 못함으로 인한 부가적인 스트레스가 발생한다. 제작사 및 규제기관의 권고에 따르면 급속 부하투입의 문제점을 인식하고 18개월 주기로 수행하는 LOOP 시험을 제외하고 모든 시험 시 EDG 열응력과 마모를 최소화하기 위하여 출력을 서서히 증·감발하도록 권고하고 있다.

○ 따라서 정기시험 과정에서 EDG 기동 후 열충격에 의한 기기 손상을 방지하기 위하여 출력을 약 30분에 걸쳐 75%까지 올리고 이후 10분 유지 후 추가 10분에 걸쳐 전 출력까지 단계별 서서히 증발해야 한다. 이는 과도한 운전으로 EDG 성능이 열화되는 것을 예방하기 위함이며 기동 후 무부하 운전 유지시간, 계통병입 후 초기 1,000kW 까지의 출력 증발시간 및 단계별 부하증발 과정은 표 5.3.1 및 그림 5.3.1을 참조하여야 한다.

표 5.3.1 EDG 출력증발 시 안전운전 요건

구분	내용
기동 후	약 2분간 무부하 운전
계통병입 직후	1,000 kW 출력까지 즉시 증발
50% 출력까지	15분간 서서히 증발 후 5분 유지 ²⁷⁾
75% 출력까지	10분간 서서히 증발 후 10분 유지 ²⁸⁾
100% 출력까지	10분간 서서히 증발

3. EDG 출력감발 시 안전운전 기준 적용

○ EDG 부하운전 후 정지과정에서 급정지로 인한 변형, 손상을 방지하기 위하여 출력을 약 20분에 걸쳐 서서히 감발하고 계통병해 후 무부하 상태에서 약 15분 정도 운전을 실시하고 정지하는 등 부하감발 및 정지 과정은 표 5.3.2 및 그림 5.3.1을 참조하여야 한다.

표 5.3.2 EDG 출력감발 시 안전운전 요건

구분	내용
전출력에서 1,000kW까지 감발	20분간 서서히 감발 후 계통병해
정지 전 무부하 운전 유지시간	엔진 열방출을 위해 약 15분 무부하 운전 후 정지 (급정지로 인한 변형손상방지)
기타	무부하 또는 정격출력의 35% 이하 저출력 유지 제한시간 : 10시간

4. 기타 EDG 성능시험 시 신뢰성 향상방안

가. 고출력운전 최소화

○ EDG 엔진에 치명타를 가할 수 있는 과 출력 입증시험인 110% 운전은 엔진 제작의

27) 배기온도가 평형을 이룰 때까지

28) 엔진이 열평형을 이룰 때까지

적정성을 평가하는 시험으로 공장에서 한번 실시하는 것으로 족하다. 미국의 원자력규제위원회(NRC)의 규제지침서인 Reg. Guide 1.9 rev.3에서도 디젤엔진의 용량을 사고 시 투입되는 투입부하의 총합이 연속 정격 출력을 초과하지 않도록 설계토록 규정하고 있다.

○ 이는 비상시에도 EDG 엔진에 110%의 부하가 투입되는 경우는 없음을 반증하는 것이다. 만약 EDG 110% 출력의 시험운전이 필요하다더라도 운전의 초반부에 할 것이 아니라, 100%부하로 충분히 운전되고 난 후반부에 실시하여야 한다. 원전용 EDG 엔진을 제외하고 최대출력의 90% 이상에서의 운전 경험은 산업계에서 갖고 있지 않다.

나. 운전경험 활용

○ EDG 정비후 윤활유계통의 충분한 배기

- EDG 정비후 윤활유 계통을 충분히 배기하지 못하여 기동과정에서 윤활유 저압력에 따라 정지된 사례 있음.

○ EDG 차단기 조작 시 동시확인 철저

- EDG 시험을 위하여 AAC DG 모션 전원을 B에서 A로 전환하는 과정에서 인적오류로 인접한 안전모션 B의 정상공급 전원차단기를 개방하여 모션 정전 유발사례 있음.

○ EDG 시험 시 조작할 스위치에 인식표 부착

- EDG 기동 후 계통병입을 위하여 가버너를 조작하여야 하나 인접한 기동/정지 스위치를 조작하여 EDG가 정지된 사례 있음.

- EDG 기동 후 계통병입을 위하여 EDG 'B'의 스위치를 조작하여야 하나 인접한 안전모션 공급차단기를 조작하여 안전모션을 정전시킨 사례 있음.

○ EDG 시험 전 AAC DG 차단기 위치 확인

- AAC DG가 안전 모션 'B'에 연결된 것을 확인하지 못하고 EDG 'B'를 계통병입 시도하였으나 실패한 사례 있음.

다. EDG 부하증발>Loading) 및 감발(Unloading) 곡선 활용

○ EDG 부하증발 곡선(그림 5.3.1)은 엔진의 예열상태 등 초기조건을 기준으로 부하증발 시 적용하는 EDG의 성능열화를 예방할 수 있는 안전한 운전방법이다. 곡선 ①, ②는 계획 예방정비 중 분해정비를 마치고 수행하는 종합 성능시험 수행 시 적용하고, 곡선 ③은 월간주기 성능시험 수행 시 적용이 필요하다.

- Loading 곡선 ① : 엔진오일온도가 45℃ 이상일 때 비상기동 시 적용

- Loading 곡선 ② : 최소한 1시간 이상 운전 후 정지시간이 2시간 경과 이전 적용

- Loading 곡선 ③ : 정상운전 중 시험 기동 시 단계별 출력 상승 시 적용

○ EDG 감발증발 곡선(그림 5.3.1)은 부하운전 후 엔진에 축적된 열을 방출하는 시간 등을 고려하여 EDG 출력을 서서히 감발하고 정지하여야 한다는 의미를 가지고 있으며 EDG 고장을 최소화할 수 안전한 운전방법이다.

- Unloading 곡선 : 약 20분에 걸쳐 서서히 출력을 감발하면서 적용

Loading & Unloading Process

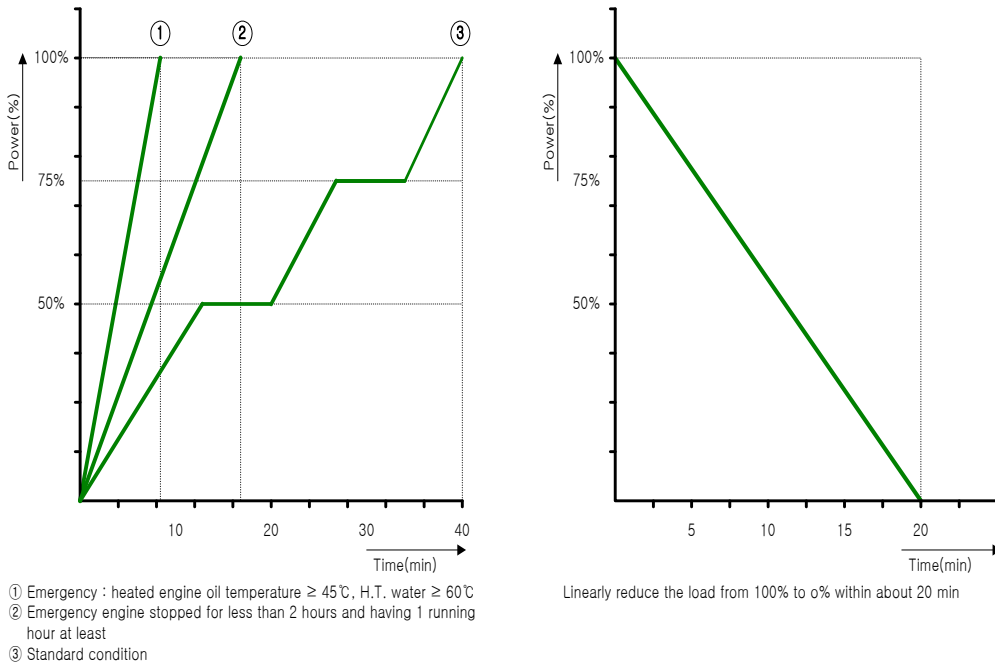


그림 5.3.1 EDG 부하증발(Loading) 및 감발(Unloading) 곡선

제 6 장 결 론

APR1400 원전은 SBO 대처능력 제고를 위하여 발전소 교류전원 완전상실 상황에서도 최소한 8시간(기존 원전은 4시간) 동안 전원을 공급할 수 있도록 설계되었다. 이는 APR1400 원전 공학적 안전설비 계통의 안전성 증진을 위한 설계변경, AAC DG 도입 및 EDG의 설비개선을 통한 신뢰성 향상(설비신뢰도 99%, 목표신뢰도 97.5%)이 기여하는 바가 크다고 할 수 있다.

이에 본 논문에서는 APR1400 원전 EDG 신뢰도 향상요소라고 판단되는 설비개선 내용들에 대하여 구체적으로 분석하였고 EDG의 기동신뢰도가 최초 형식시험 결과에서 총 300회 시험기동 모두 성공하여 100% 수준으로 평가되었다는 사실도 확인하였다. 향후 시운전시험이 종료되고 EDG의 운전가능성이 선언된 이후 수행될 유효시험 결과가 20회 이상 누적된다면 APR1400 원전 EDG에 대한 부하운전신뢰도 및 종합신뢰도 산출이 가능할 것이고 신뢰성 개선 분석결과 및 형식시험 과정에서의 기동신뢰도 등으로 보아 충분히 만족될 것으로 예상된다.

그리고 EDG의 주기적인 시험과정에서 취득된 운전변수 실시간 감시 및 평가시스템(DMDS)을 통해 EDG의 신뢰성을 계속 확인하고 이상변수가 확인되거나 유효시험 실패 등 목표신뢰도에 영향을 미치는 고장 발생 시 신뢰도 종합관리 프로그램(DREAMS)에 따라 최적의 시정조치를 수행한다면 APR1400 원전 EDG의 안전성과 신뢰성은 충분히 확보될 것으로 기대된다.

EDG의 신뢰도는 결국 주기적인 성능시험을 통하여 입증되므로 완벽한 시험 관리가 중요하다. 따라서 본문에서 APR1400 원전 EDG 신뢰성 분석결과를 바탕으로 EDG 신뢰성 향상을 위한 제언으로 제시한 “시험 전 분야별 전문가의 통합 예방점검 수행”, “분해점검 후 시스템 엔지니어 주관 길들이기 운전 수행”, “기동 및 부하운전 시 신뢰성 향상방안 적용” 등 체계적인 EDG 시험 및 운영관리 프로세스 적용이 필요하다. 그렇게 되면 APR1400 원전 EDG의 우수한 설비신뢰도(99%)를 기반으로 APR1400 원전 EDG의 운영신뢰도 역시 더욱 향상될 것이다. 끝.

참고문헌

- [1] 신고리제2발전소, 2012, APR1400 전력계통 및 기타 보호계통 교육자료
- [2] 중앙연구원, 2012, 국내원전 EDG 불시기동 관련 인적오류 공통원인 주제보고서
- [3] 신고리제2발전소, 2012, APR1400 시운전절차서 P-C-591-03(Rev.1). CLASS 1E EMERGENCY D/G-Elec. and Mech.
- [4] 신고리제2발전소, 2012, APR1400 시운전절차서 9P-C-591-06 CLASS 1E EMERGENCY D/G-Site Acceptance Test
- [5] 신고리제2발전소, 2012, APR1400 정기시험절차서 정기-3591-01 비상디젤발전기 성능점검
- [6] 신고리제2발전소, 2012, APR1400 시험절차서 정기-3591-02 비상디젤발전기 동시 기동시험
- [7] 신고리제2발전소, 2012, APR1400 시험절차서 정기-3591-03 계열별 비상디젤발전기 및 안전모션 정기점검
- [8] 신고리제2발전소, 2012, APR1400 운영절차서 계통-3591 비상디젤발전기 운전
- [9] 신고리제2발전소, 2012, APR1400 운영절차서 비정상-3823 C-1E 4.16kV 모션 저전압
- [10] 원자력환경기술원 신형원전개발센터, 2002, APR1400 설계특성 자료집
- [11] 신고리제2발전소, 2012, APR1400 시운전 핸드북
- [12] NRC Reg. Guide 1.155
- [13] NRC Reg. Guide 1.9
- [14] ANSI/IEEE 387
- [15] APR1400 운영기술지침서
- [16] APR1400 최종안전성분석보고서
- [17] 대한전기협회, 2000년, KEPIC ENB 6240
- [18] 대한전기협회, 2000년, KEPIC ENF 3300
- [19] WANO Performance Indicator Programme Reference Manual, 2012년, KHNP

감사의 글

“시작이 반이다”, “빨리 가려면 혼자 가고 멀리 가려면 함께 가라”는 속담의 진정성에 스스로 놀라 했던 2012년이 저물고 있습니다.

[시작이 반이다]

밤 늦은 퇴근과 휴일에도 출근하기가 다반사이던 어느 날 지인으로부터 대학원 진학을 권유받고 “시작은 어렵지 않겠지만 과연 마칠 수는 있을까?” 하는 염려로 등록하기까지 고민도 많이 했었습니다. 그러나 졸업논문을 쓰고 학회에 가서 발표를 하고 이제 감사의 글을 쓰기에 이르렀습니다. 2년의 과정이 결코 쉽지만은 않았지만 뜻한 바를 이뤘고 더 나아가 또 다른 시작을 구상해보는 시간이 되었습니다.

[빨리 가려면 혼자 가고 멀리 가려면 함께 가라]

새로운 시도를 주저하지 말고 도전하고 성취하는 삶을 즐기라고 강조하신 영광3발전소 기술실장님으로 계시는 김철준 박사님, 어떤 어려움이 있더라도 기꺼이 함께 하겠다며 용기를 북돋아 준 김천호 차장, 박정진 차장 그리고 이왕지사 시작했으면 꼭 적기에 마쳐야 한다며 격려를 아끼지 않았던 김종호 영광1발전소 지부위원장, 김금옥 과장, 허중기 과장, 하석종 차장, 천중 차장 등 지인들에게 감사드립니다.

또한 학위논문을 쓰게 되기까지 많은 도움을 준 UAE 수출 원전, APR-1400, 신고리 제2발전소에 근무하는 석기영 소장님, 윤종성 실장님, 김병호 팀장님, 민봉근 팀장님을 비롯한 직장 상사, 동료 및 선배님들 모두에게 감사드립니다.

그리고 지난 2년 동안 각별한 관심과 애정으로 아낌없는 격려와 지도를 해주시고 열정적인 강의를 해 주신 김승평 교수님, 나만균 교수님, 이경진 교수님, 송종순 교수님 그리고 김진원 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 바쁜 회사 업무에도 불구하고 어려운 시간을 내어 훌륭한 강의를 해 주신 박병주 소장님, 김홍우 소장님 전제근 소장님 및 김경구 소장님께 감사드립니다.

끝으로 남편의 때 늦은 학업을 자랑스럽게 여기고 적극 응원해 준 사랑하는 아내 김종순, 참되고 은혜로운 사회복지사로서 어려운 가정의 아이들을 찾아 미래의 꿈나무로 키워 내고자 ‘Vision 형성 및 진로상담 전문가’로 활동하고 있는 큰 딸 은진, 의경으로 국방의 의무를 다하며 어학과 디자인에 관심이 많고 더불어 잘사는 정의사회를 추구하는 둘째 아들 동하, 고등학교 1학년으로 다소 민감한 시기에 고향 친구들을 뒤로 하고 멀리 부산까지 엄마, 아빠를 따라 와 열심히 공부하여 부모에게 큰 힘이 되어 주고 있는 셋째 아들 슬기동이 영하에게도 이 논문을 통해 감사의 마음을 전합니다.

2012년 12월
황 인 삼

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20117295	과 정	석사
성 명	한글 : 황 인 삼, 한문 : 黃 仁 三, 영문 : Hwang, In Sam				
주 소	부산광역시 기장군 기장읍 차성서로 51, 이진캐스빌 103동 1902호				
연락처	e-mail : his6357@khnp.co.kr				
논문제목	한글 : APR-1400 원전 비상디젤발전기의 신뢰성 개선 분석에 관한 연구				
	영문 : Analysis of Improvement in the Reliability of Emergency Diesel Generator for APR-1400 Nuclear Power Plants				


본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함(다만, 저작물의 내용변경은 금지함)
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함

동의여부 : 동의(○) 반대()

2012 년 12 월 10 일

저작자 : 황 인 삼 

조선대학교 총장 귀하