



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2016년 8월  
석사학위 논문

원자력발전소 제어봉 구동장치  
전원공급계통 신뢰도 증진에 관한 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

최 일 영

원자력발전소 제어봉 구동장치  
전원공급계통 신뢰도 증진에 관한 연구

A Study on Reliability Enhancement in Power Supply System of  
Control Element Drive Mechanism in NPPs

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

최 일 영

원자력발전소 제어봉 구동장치  
전원공급계통 신뢰도 증진에 관한 연구

지도교수      김   진   원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

원자력공학과

최   일   영

## 최일영의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 (인)

위원 조선대학교 교수 이경진 (인)

위원 조선대학교 교수 김진원 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

## 목 차

ABSTRACT .....	vi
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 제어봉 전원공급 및 제어계통 특성 .....	2
제 1 절 전동발전기 .....	2
1. 전동발전기 기능 .....	2
2. 전동발전기 구성 기기별 특성 .....	4
제 2 절 제어봉 구동장치와 제어봉 구동장치 제어계통 .....	6
1. 제어봉 구동장치 .....	6
2. 제어봉 구동장치 제어계통 .....	8
제 3 장 전동발전기 안정성 향상조치 및 신뢰도 평가 .....	10
제 1 절 발전기측 베어링 과열 해소 .....	10
1. 베어링 과열 발생 .....	10
2. 점검 및 분석 .....	13
가. 분해점검 .....	13
나. 베어링 온도변화 분석 .....	14
(1) 베어링 온도감지기 위치 .....	14
(2) 고장 전 베어링 온도경향 .....	15
(3) 동일모델 온도경향 .....	16
(4) 국산화 전동발전기 온도경향 .....	21
다. 베어링 손상분석 .....	23
3. 전동발전기 베어링 및 Seal 형식 변경 .....	25
가. 베어링 형식변경 .....	25
나. Seal 형식변경 .....	27
4. 결과 및 고찰 .....	29

제 2 절 보호 및 감시설비 개선 .....	31
1. 배경 .....	31
2. 보호 및 감시설비 개선 .....	33
제 3 절 제어봉 구동장치 제어계통 고조파 저감 .....	37
1. 고조파 발생 및 영향 분석 .....	37
가. 제어봉 구동장치 제어계통 고조파 전압발생 메커니즘 .....	37
나. 주요기기별 고조파 영향 분석 .....	39
(1) 전동발전기 동기검정기 .....	39
(2) 전동발전기 자동전압조절기 .....	41
(3) 제어봉 구동장치 제어계통 저전압계전기 .....	42
다. 고조파 저감 대책 .....	44
(1) Passive Harmonic Filter .....	44
(2) Active Harmonic Filter .....	44
(3) Delta-wye Transformer .....	44
(4) Generator Oversizing .....	44
2. 설비 개선 및 결과 분석 .....	45
가. 전동발전기 유입 고조파 측정 .....	45
나. 제어봉 구동장치 제어계통 R-C 필터 설치 및 개선 결과 분석 .....	48
제 4 장 결 론 .....	51
<b>【참고문헌】</b> .....	53

## 표 목 차

Table 1. MG Set Specification .....	10
Table 2. Present condition of MG Set protection signals [September 2012] .....	32
Table 3. Result of operating characteristic test .....	40
Table 4. Comparison of the harmonic ratios before and after exchanging CEDMCS .....	43
Table 5. Calculated generator capacity by oversizing factor .....	34
Table 6. THD and notch of MG Sets in Unit-D and Unit-E .....	45
Table 7. Variations in THD and Vpeak with number of filter installed .....	49



## 그림 목차

Figure 1.	MG Set power supply system .....	3
Figure 2.	MG Set and control panel .....	3
Figure 3.	Block diagram of a MG Set power supply .....	4
Figure 4.	Control element drive mechanism .....	6
Figure 5.	Extension shaft assembly and RSPT .....	7
Figure 6.	The principle of automatic control of the CEA .....	8
Figure 7.	CEDMCS digital control panel .....	9
Figure 8.	MG Set bearing position .....	11
Figure 9.	MG Set 02RN bearing temperature transition(Max. 56℃) .....	12
Figure 10.	Generator bearing cage damage .....	13
Figure 11.	Outer cap/sealing ring and shaft spacer contact overheating .....	13
Figure 12.	Bearing thermometer install position .....	14
Figure 13.	MG Set 02RN Bearing Temperature Transition .....	15
Figure 14.	Unit-D MG Set BRG temperature transition (2008.11.12.~2009.01.03) .....	16
Figure 15.	Unit-D MG Set BRG temperature transition (2010.03.15~2010.05.15) .....	16
Figure 16.	Unit-D MG Set BRG temperature transition (2011.06.07~2011.07.12) .....	17
Figure 17.	Unit-E MG Set BRG temperature transition (2009.11.01.~2010.03.01) .....	17
Figure 18.	Unit-E MG Set BRG. temperature transition (2011.03.05~2011.04.01) .....	18
Figure 19.	Unit-E MG Set BRG temperature transition (2011.12.26~2012.01.05) .....	18
Figure 20.	Unit-C MG Set BRG temperature transition (2007.02.24~2007.12.24) .....	19
Figure 21.	Unit-F MG Set BRG temperature transition (2009.02.20~2009.12.20) .....	19
Figure 22.	Unit-G MG Set BRG temperature transition (2011.03.09~2012.03.08) .....	21
Figure 23.	Unit-H MG Set BRG temperature transition (2011.03.09~2012.03.08) .....	21
Figure 24.	Unit-I MG Set BRG temperature transition (2011.03.09~2012.03.08) .....	22
Figure 25.	Result of cage maintenance .....	23
Figure 26.	Cage spin and contact .....	23
Figure 27.	Change to NU type .....	25
Figure 28.	N & NU type .....	26
Figure 29.	Roller skidding + friction .....	26
Figure 30.	The installation of a felt ring(Outer cap) .....	27
Figure 31.	V-Ring .....	27
Figure 32.	V-Ring installed in the form of MG Set .....	28
Figure 33.	Groove processing for inner and outer felt sealing .....	28
Figure 34.	Generator side bearing temperature transition .....	29

Figure 35.	Vibration and frequency characteristic .....	30
Figure 36.	Sudden stop sequence .....	31
Figure 37.	Improvement of protection and monitoring system .....	33
Figure 38.	MG Set control panel and new protection panel .....	34
Figure 39.	Possibility of unexpected stop at the wrong reverse power signal .....	35
Figure 40.	Improvement of the stop and alarm circuit .....	36
Figure 41.	Generating mechanism of the harmonic voltage .....	37
Figure 42.	Definition of notch depth and notch area .....	38
Figure 43.	Results of harmonic analysis for voltage waveform .....	39
Figure 44.	Diagram of synchronizer harmonic characteristic test .....	40
Figure 45.	Unit-B MG Set AVR input and output waveform – unstable .....	41
Figure 46.	Under voltage relay trip scheme of CEDMCS .....	42
Figure 47.	Parallel and series operation waveform .....	43
Figure 48.	Waveform of voltage and current tested in Unit-D .....	46
Figure 49.	Analyzing harmonic of voltage and current tested in Unit-D .....	46
Figure 50.	Waveform of voltage and current tested in Unit-E .....	47
Figure 51.	Analyzing harmonic of voltage and current tested in Unit-E .....	47
Figure 52.	Installation of the filter for harmonic reduction .....	48
Figure 53.	Waveform graph in accordance with the installation quantity of filter .....	50

## ABSTRACT

### **A Study on Reliability Enhancement in Power Supply System of Control Element Drive Mechanism in NPPs**

Choi Il Young

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

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Fission reaction in the nuclear power plants(NPPs) is controlled by Control Element Assembly(CEA). Thus, the stability and reliability of Motor Generator Set(MG Set), which is a power supply system to Control Element Drive Mechanism(CEDM), is considered to be very important in the viewpoint of safety of NPPs.

However, MG Sets of Korean Standard NPPs had repeatedly experienced that the temperature and vibration in their generator-side bearing were abnormally increased. The inspection showed that the abnormal temperature and vibration were induced by a wear damage of bearing wheel and roller, which was caused by introducing small chips of cage and V-ring into bearing. In order to improve the operational reliability of MG Set by resolving the high temperature and vibration of MG Set bearing, type of bearing was changed, i.e., N type bearing changed into NU Type bearing, and also V-rings that are sealing system were removed and Felt rings were installed on the inner and outer caps of MG Set. It showed that such modifications reduced the temperature and vibration level of MG Set bearings.

Installing protection relay panels and revising sudden stop signals were improved the protection and monitoring systems to new power plants level. Rewiring reverse power relay and reverse power auxiliary relay was prevented unexpected shutdown and ensured a monitoring channel at Main Control Room.

Harmonics generated by Control Element Drive Mechanism Control System(CEDMCS) affected the MG Set operation such as increased voltage waveform distortion and instantaneous maximum voltage. It was verified decreasing voltage Total Harmonic Distortion(THD) and instantaneous maximum voltage by analyzing harmonics effect, installing RC filter, and measuring voltage waveform.

## 제 1 장 서론

원자력발전소(이하 원전)는 안전을 최우선으로 고려하고 있기 때문에 핵연료를 연소시켜 열을 발생시키는 것보다 핵분열을 제어해서 갑작스런 기기 고장이나 송전계통의 외란(外亂)으로 인한 발전소 정지시 과도현상을 방지할 수 있도록 원자로의 출력을 조절하는 것이 더욱 중요하다. 원전에서 원자로의 출력을 조절하거나 정지시키는데 제어봉(CEA : Control Element Assembly)을 이용한다. 이들 CEA는 제어봉 구동장치(CEDM : Control Element Drive Mechanism)에 의해 구동되며, CEDM은 전동발전기 세트(MG Set : Motor Generator Set)에서 전원을 공급받고, 제어봉 구동장치 제어계통(CEDMCS : Control Element Drive Mechanism Control System)에서 자동 또는 수동으로 동작신호를 받아 작동된다. 따라서, 원전의 CEDM에 전원을 공급하는 시스템인 MG Set의 안정성과 신뢰성 확보는 필수적이다.

MG Set은 초기원전에서부터 오랜 운전이력으로 고유의 장점이 입증되었지만 표준형원전 도입모델의 기계적인 원인으로 인한 베어링 온도 불안정과 진동에의 영향, 병렬운전중인 2대의 전동발전기 중 1대 고장발생시 과급방지 실패로 인한 원전 불시정지, 그리고 CEDMCS의 디지털 기반 2중화에 따른 고조파 발생 및 그 영향으로 MG Set 동기투입 실패 등 CEDM 전원공급의 신뢰성을 저해하는 문제가 발생한 사례가 있었다.

따라서 본 논문에서는 이들 원전의 CEDM 전원공급 계통에 대한 운영 신뢰도를 높이기 위해서, MG Set과 CEDMCS 구성설비의 고장 사례를 분석하고 현장에서 측정된 데이터를 분석하였다. 이를 바탕으로 신뢰성을 저해시키는 문제의 근본 원인을 파악하고 개선 방안을 도출하였다. 또한, 개선 방안 적용에 따른 CEDM 전원공급 계통의 신뢰성 향상 결과를 현장시험을 통해 확인하였다.

## 제 2 장 제어봉 전원공급 및 제어계통 특성

원자력 발전소에서 제어봉(CEA : Control Element Assembly)을 이용해서 원자로 출력을 조절하거나 급감발 또는 즉시 낙하시켜 원자로를 정지시키는 제어봉 구동장치(CEDM : Control Element Drive Mechanism)는 전동발전기 세트(MG Set : Motor Generator Set)에서 안정적인 전원을 공급받고 제어봉 구동장치 제어계통(CEDMCS : Control Element Drive Mechanism Control System)에서 자동 또는 수동으로 동작신호를 받아서 구동된다.

### 제 1절 전동발전기

CEDM의 전원공급 시스템인 MG Set은 전동기와 발전기가 동일 축에 연결되어 회전하고 무정전 전원 보상을 위한 플라이 휠(Fly wheel)이 양단에 조립되어 순간정전시 Ride through 기능을 제공하는 회전형 무정전 전원공급 장치의 일종으로 미국이나 유럽등 경수로형 초기 원전부터 지금까지 운용되고 있다[1, 2].

#### 1. 전동발전기 기능

발전소 1호기당 100% 용량을 갖는 2대의 MG Set으로부터 CEDM으로 전원을 공급한다. MG Set은 농형 유도전동기(N-1E 480V AC), 3상 동기발전기(250kVA, 240V AC)와 Fly wheel이 한 축에 연결되어 있으며 발전기 출력전압을 제어하는 자동전압조절기, 병렬운전을 위한 싱크로 장치와 각종 보호 및 감시장치가 내장된 제어반 각 1대씩으로 구성된다. 정상운전 중 2대가 병렬운전되어 각 MG Set이 50%씩 부하를 분담하고, 어느 1대가 고장 또는 정지시 나머지 1대가 100% 부하를 담당한다.

MG Set 2대 모두 고장 또는 정지시 CEA 구동전원 상실에 의한 CEA 낙하로 원자로 정지가 발생한다. 또한, 원자로보호계통에서 원자로 정지신호가 발생되면 원자로정지차단기 개방에 의해 CEDM의 코일에 공급되는 전원이 상실되고 그리퍼가 CEA 연장 축을 놓게 되며 CEA가 중력으로 노심 하부에 낙하되어 원자로가 정지된다.

MG Set 전원공급 계통의 구성은 Figure 1. 과 같으며 Figure 2. 는 한국표준형 원전의 MG Set과 제어반을 보여주고 있다.

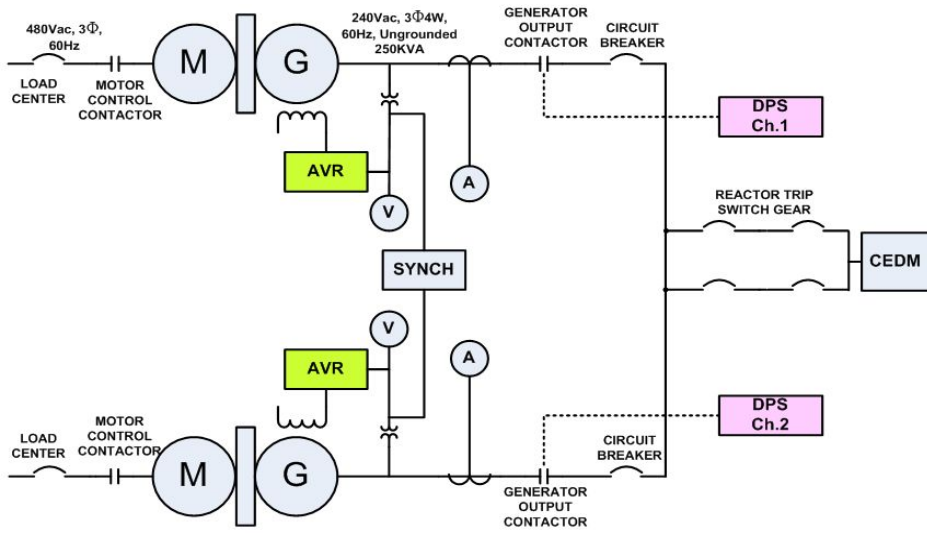


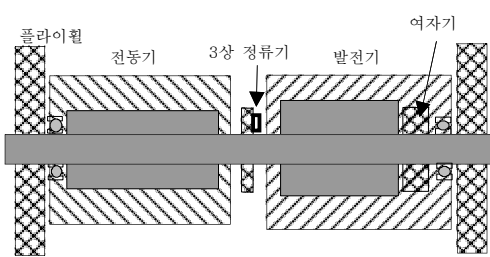
Figure 1. MG Set power supply system



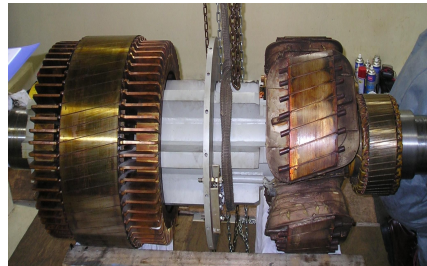
(a) MG Set

(b) Fly wheel

(c) Control panel



(d) Diagram



(e) Disassembled MG Set

Figure 2. MG Set and Control panel

## 2. 전동발전기 구성 기기별 특성

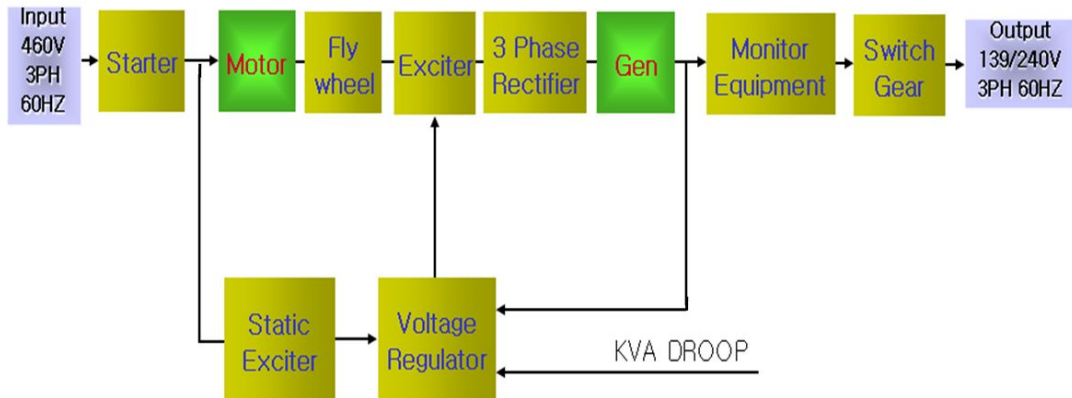


Figure 3. Block diagram of a MG Set power supply

Starter는 전동기에 입력전원을 제공하는 설비로서 과부하 및 저전압 보호기능이 있고, Time Delay Relay를 사용하여 순간적인 입력전원 상실시에도 전동기가 자동 재기동 되도록 기동회로를 유지한다.

전동기는 3상 교류농형 유도전동기로서 최대1% 미만의 슬립으로 다양한 부하변동에 서도 일정속도(1787~1800RPM)를 유지하도록 설계되었다. 정격출력 261kW, 회전수 1787RPM, 전압 460Vac, 주파수 60Hz, 정격전류 420A, 4극, 절연등급 B종, 권선저항 8.95mΩ 이다. 효율은 전부하시 92%, 1/2부하시 78%, Power Factor는 전부하시 0.87, 1/2 부하시 0.78이다.

Exciter는 무브러쉬형으로 발전기 내부에 내장되어 발전기에 여자전류를 공급하며 Static Exciter와 3상 정류기 사이에 설치되어 있다. 정격전압 110V, 전류 26.3A, 주파수 120Hz, 3상 8극, 권선저항 0.1345Ω, 계자저항 9.0Ω이다. 보통 여자기 출력은 컬렉터 링과 브러쉬를 통해 발전기로 유입되나 MG Set은 같은 축에 기기들이 위치하기 때문에 컬렉터 링 및 브러쉬가 필요없다.

Exciter 출력은 회전자 밸런스 링에 위치한 3상 Bridge Rectifier에 접속되어 있고, 6개의 다이오드로 구성된 3상 Bridge Rectifier DC 출력은 발전기 회전자에 공급된다.

발전기는 3상 교류 동기발전기로서 정격출력 200kW, 역률 0.8, 전압 240/139 Vac, 주파수 60Hz, 정격전류 601A, 4극, 절연등급 F종, 3상 4선, 권선저항 5.15mΩ, 중성선 접지방식으로 3상 및 중성선의 접지검출이 가능하다.

Static Exciter는 전동기 기동 90초 후 Main Exciter에 여자전원을 공급하며 전원상 실시 Self Exciting 기능이 있다. 발전기의 출력전압이 형성되어 정격전압까지 상승하면 Exciter로의 전원공급을 중단하고 AVR에 의해 공급된다.

Auto Voltage Regulator는 MG Set 출력전압을 감시하면서 여자전류를 공급 및 제어하여 발전기 출력전압이 일정하게 유지되게 하며 발전기 출력이 정격부하에서 무부하 또는 무부하에서 정격부하까지 급변동시에도 정격전압의 2%를 넘지 않도록 한다.

Monitoring Equipment는 각 제어반에서 MG Set 출력전압을 감시할 수 있도록 상(Phase)선택 스위치와 전압계, 전류계 및 여자의 계자 전류를 감시할 수 있는 전류계가 있다.

Fly wheel은 축의 양단에 각 1개씩 조립되며 회전 관성력을 축적하여 주파수가 불안정한 경우나 일시적인 전동기 입력전원 상실시에도 1초동안 발전기 출력을 정격 출력전압 및 주파수(58Hz이상)로 유지할 수 있도록 충분한 회전관성 에너지를 가지고 있다[3].



## 제 2절 제어봉 구동장치와 제어봉 구동장치제어계통

### 1. 제어봉 구동장치

CEDM은 원자로용기 헤드 상부에 CEA마다 한 개씩 설치되어 있는데 CEA 연장축을 통해서 CEA를 삽입, 인출할 수 있도록 Figure 4. 와 같이 4개의 코일(Upper Lift/Upper Gripper/Lower Lift/Lower Gripper)로 구성되어 있고 Upper Gripper Coil과 Lower Gripper Coil에 의해서 작동되는 Upper Latch와 Lower Latch가 120°간격으로 배분되어 있다. 이는 CEA 연장축(Extension Shaft)이 편중되지 않고 Miss Stepping 없이 CEA를 구동시키기 위한 것이다.

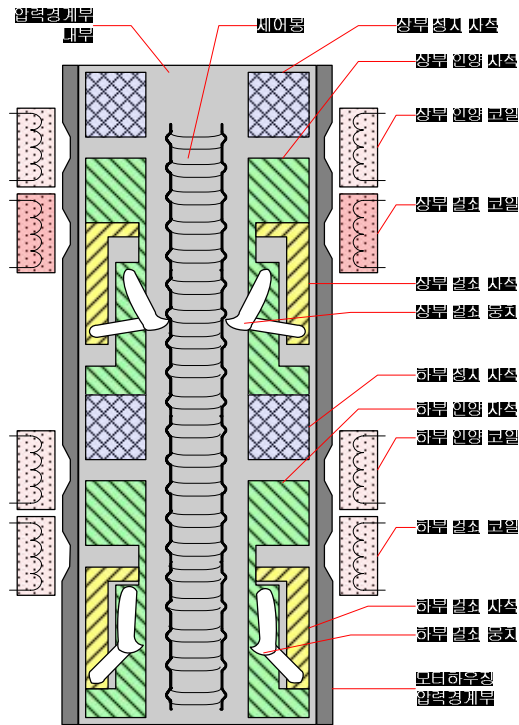


Figure 4. Control element drive mechanism

CEA 연장축(Extension Shaft)은 Figure 5. 와 같이 CEDM와 CEA을 연결하는 축으로, 연장축 상부에는 CEA 위치를 검출하기 위한 Reed Switch를 작동시키는 영구자석이 설치되어 있다. 제어봉 위치에 비례하는 출력전압을 발생시키는 리드스위치 집합체(RSPT : Reed Switch Position Transmitter)가 제어봉마다 2개씩 설치되어 제어봉연산기(CEAC : Control Element Assembly Calculator)에 CEA 위치신호를 제공한다.

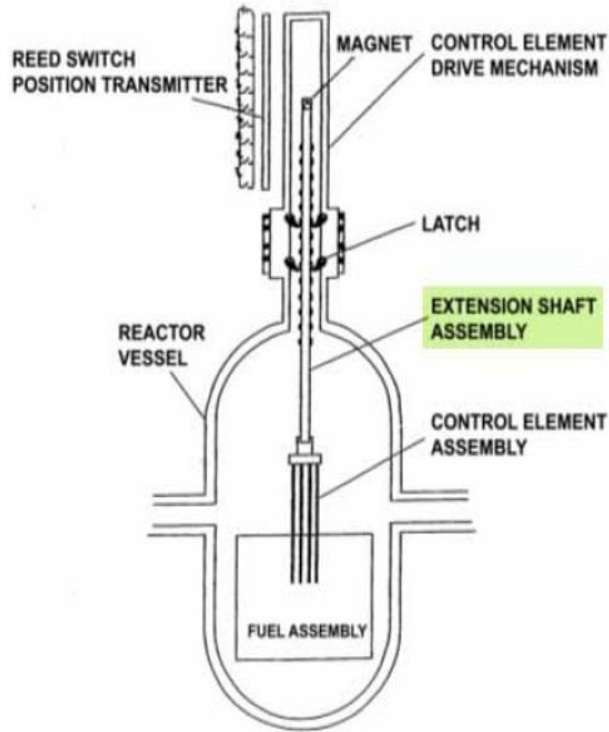


Figure 5. Extension shaft assembly and RSPT

CEDM은 한 스텝에 3/4inch씩 총 200스텝(150inch)을 동작시킬 수 있으며 운전조건에 따라 CEA가 고속(30inch/분) 및 저속(3inch/분)으로 동작된다. CEA는 CEDMCS 캐비닛에 있는 SCR 전원 스위치의 DC 전류를 CEDM 코일에 순서대로 여자 시킴으로써 구동되고, CEDM 상부 그리퍼에 의해서 CEA의 정지가 가능하다.

CEA는 CEDMCS 캐비닛에 있는 SCR 전원 스위치의 DC 전류를 CEDM 코일에 순서대로 여자 시킴으로써 구동되고, CEDM 상부 그리퍼에 의해서 CEA의 정지가 가능하다.

## 2. 제어봉 구동장치 제어계통

CEDMCS는 CEA를 움직이는 CEDM을 제어하여 노심의 중성자속 준위와 분포를 제어하며, 원자로 제어계통(RRS : Reactor Regulating System)에서 제공되는 제어봉 동작요구신호(구동방향 및 속도)에 의해 자동으로, 또는 주제어실(MCR : Main Control Room) 운전원 모듈에서의 조작에 의해 수동으로 CEDM을 제어한다. Figure 6. 은 CEA가 자동으로 제어되는 원리를 나타낸 것이다.

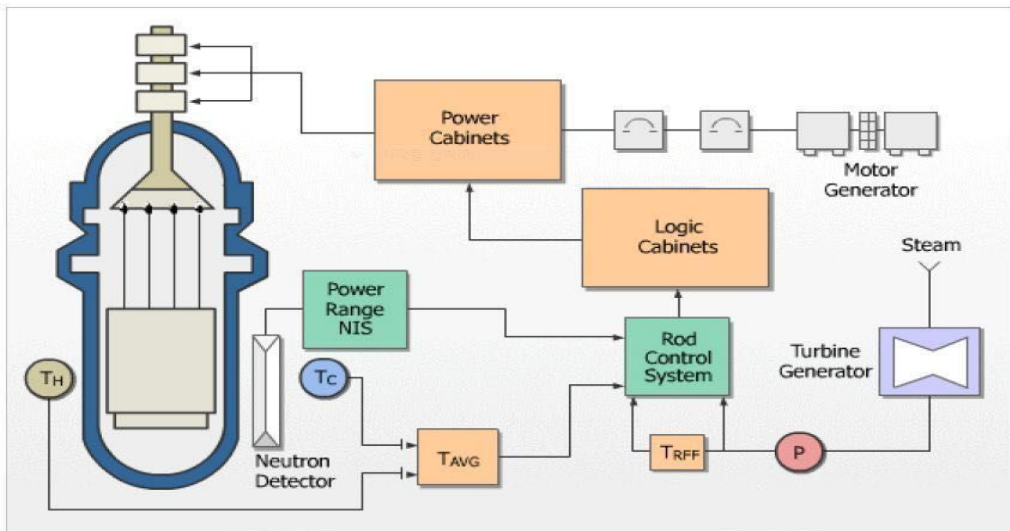


Figure 6. The principle of automatic control of the CEA

한국표준형 원전의 CEDMCS는 73개의 CEA를 제어하고 노심 중앙의 CEA가 조절 그룹으로 분류되는 것을 제외하고 4개의 CEA로 구성된 18개의 부그룹으로 나뉘고, 각 부그룹에 속한 4개의 CEA는 균일한 중성자속 제어를 위해 방사상, 대칭적으로 4분면에 한 개씩 설치되어있다.

18개의 부그룹은 8개의 그룹(2개의 정지그룹, 5개의 조절그룹, 1개의 부분강그룹)에 배분되며 CEDMCS는 5가지의 운전모드(자동순차, 수동순차, 수동그룹, 수동개별, 대기)중 하나가 선택되어 운전된다.

CEDMCS는 원자로출력 급감발계통(RPCS : Reactor Power Cutback System) 기능도 수행한다. 발전소 정상운전 중 터빈 정지 또는 운전중인 2대의 주급수펌프 운전 중 1대 정지시 미리 선택된 조절그룹의 CEA를 낙하시켜 원자로출력을 급감발하여 원자

로 출력을 1차 계통에서 수용가능하게 함으로써 원자로 불시 정지를 방지한다[4].

각 CEA는 CEDM의 스텝운동에 의해 움직이며, CEDM의 스텝운동은 4개의 직류 자기코일에 의해 제어되고 모든 코일의 전원은 MG Set에서 공급된다. 공급전원이 상실 되면 CEDM의 연장축에 연결된 모든 CEA가 노심내로 낙하된다. CEDMCS는 CEA의 동작(삽입 및 인출)을 위해 정해진 순서에 따라 CEDM의 4개의 코일에 고전압, 저전압, 영전압을 공급하고, CEDM의 스텝동작을 Counting 하여 CEA 위치를 제공한다.

한국표준형 원전에서는 설비 신뢰도 향상을 위해 최근 CEDMCS를 디지털 기반 2중화 제어설비로 교체하였다. Figure 7. 은 교체 설치된 CEDMCS 제어반을 보여주고 있다.



Figure 7. CEDMCS digital control panel

## 제 3 장 전동발전기 안정성 향상조치 및 신뢰도 평가

CEDM에 안정적인 전원 공급 및 제어를 위해 MG Set의 기계적/전기적 문제점 도출, 원인분석 및 성능향상 조치를 수행했다. 발전기측 베어링 Type 변경, 전기적 보호 신호 개선 및 CEDMCS로부터의 고조파 유입 저감조치를 한 후 신뢰성 향상 평가를 수행했다.

### 제 1절 발전기측 베어링 과열 해소

#### 1. 베어링 과열 발생

한국표준형 원전에 설치된 MG Set의 주요사양은 Table 1. 과 같고 Figure 8. 은 MG Set 베어링 설치위치이다.[5]

Table 1. MG Set Specification

구 분	국산화 이전 MG Set	국산화 MG Set
제작사	T 社	H 社
Model	39900015	SF020E
형 식	유도전동기 및 동기식 교류발전기 (일체형)	유도전동기 및 동기식 교류발전기 (일체형)
정격출력	261kW(전동기), 200kW(발전기)	260kW(전동기), 200kW(발전기)
정격전압	460V(전동기), 240V/139V AC(발전기)	460V(전동기), 240V/139V AC(발전기)
회전속도	1800rpm	1800rpm
전동기측 베어링	6330M-C3 (F 社)	NU326ECM-C3 (S 社)
발전기측 베어링	N230E-M1-C3 (F 社)	6326M-C3 (S 社)
베어링 윤활	그리스 윤활(주기적 주입)	그리스 윤활(주기적 주입)

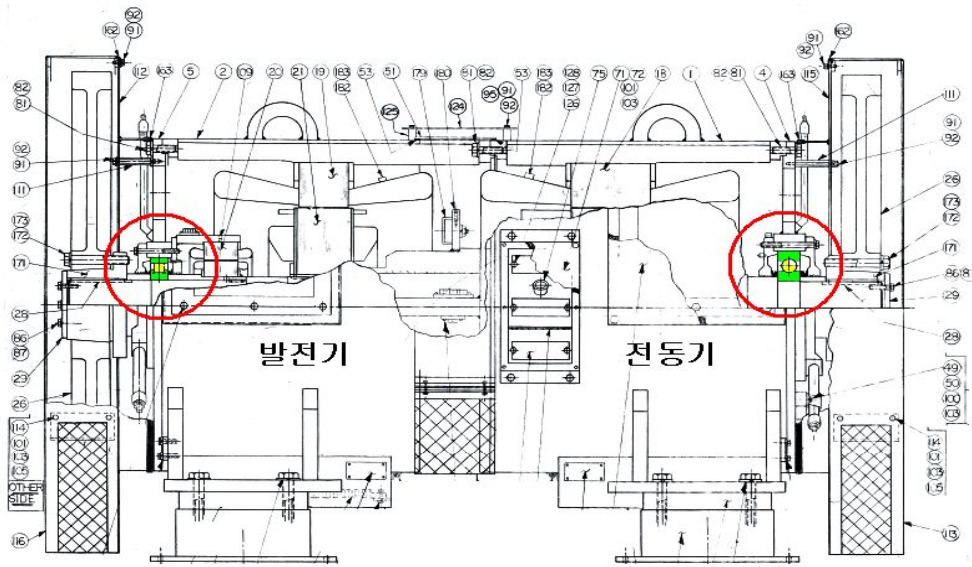


Figure 8. MG Set bearing position

MG Set은 축, 베어링과 밀봉부의 마찰에 의한 밀림, 그리스 유종, 주입량의 영향으로 발생하는 기계적 불균형에 민감한 설비이다. 특히 전동기축에 하중지지 능력이 큰 Ball 베어링을(고정단), 발전기축에 Roller 베어링(자유단)을 사용하는 원전에서는 발전기축 베어링 온도와 진동의 비정상 사례가 F호기(02RN 고온/고진동 및 발전정지)부터 C호기(01RN 3시간 간격 56℃↔97℃ 반복/02RN 50℃↔81℃ 주기적 반복), D호기(01RN 33℃→85℃ 상승)등 반복 발생되었다.

최근에는 E호기 02RN 베어링 고온경보 및 발전기측 베어링 온도가 25분동안 최대 132.7℃까지 상승한 후 정상온도인 38℃로 회복하여 그리스 주유주기를 분기당 28g에서 매월 8.4g으로 변경 운영했다. 그 후 Figure 9. 와 같이 02RN 발전기측 베어링 온도가 36℃에서 56℃로 상승, 고온/고진동 경보, 불규칙한 이음과 그리스 배유구에서 탄화유 배출을 확인하여 01RN으로 부하 전담 조치 후 수동으로 정지했다.

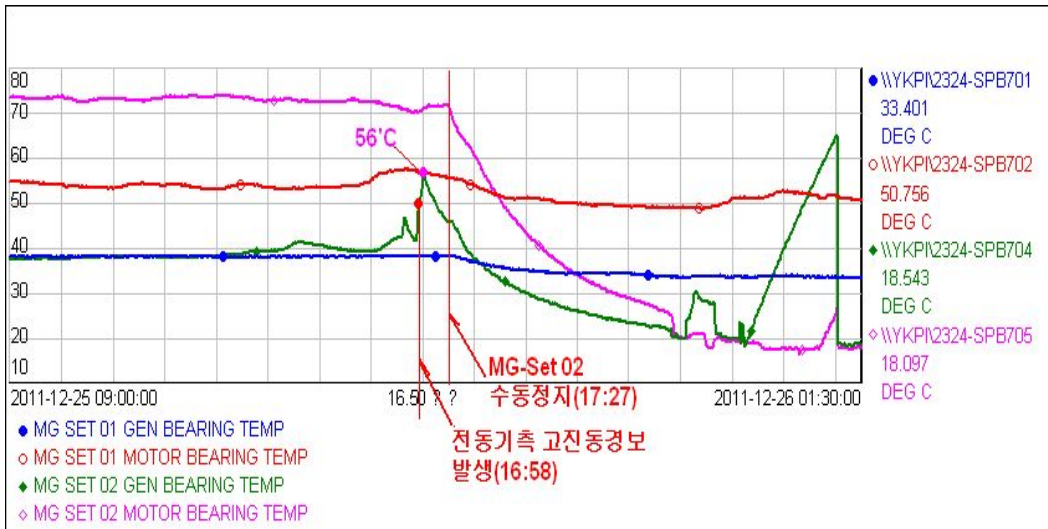


Figure 9. MG Set 02RN bearing temperature transition(Max. 56℃)

## 2. 점검 및 분석

### 가. 분해점검

MG Set 02RN 분해점검 결과, Figure 10. 과 같이 발전기측 베어링 Roller의 간격을 유지하기 위한 목적인 황동재질 Cage의 칸막이 1개소가 이탈되어 베어링 내부에서 발견되었고, 그리스 밀봉을 위해 축에 설치되는 고무 재질 V-Ring 조각이 발견되었다. 파손된 케이지 및 V-Ring의 유입에 따른 과급 손상으로 베어링 룬과 Roller들의 마모 및 손상은 심한 편이었다.

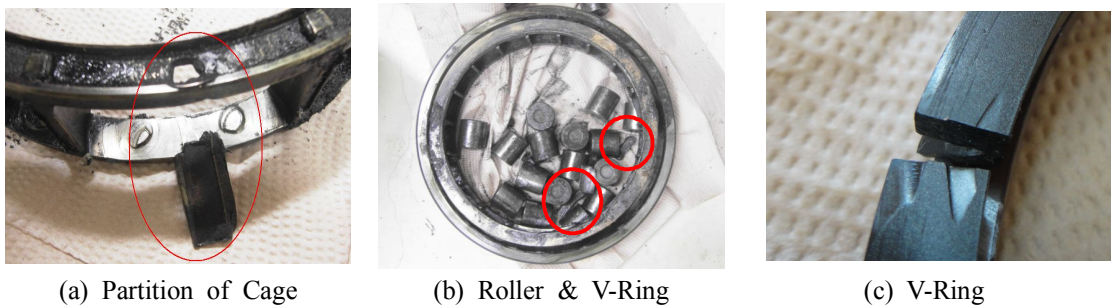


Figure 10. Generator bearing cage damage

또한, Figure 11. 과 같이 Outer CAP/Seal Ring과 축 Spacer 접촉과열을 확인했다. 발전기 측 Outer CAP(I/N:9) 및 Inner CAP의 Seal Ring(I/N:22)과 축의 Spacer Bushing (I/N:33)이 운전 중 접촉되어 상호 마찰 손상되었고, 발생한 과열로 인해 주물 재질인 Outer CAP에 균열이 확인되었다.

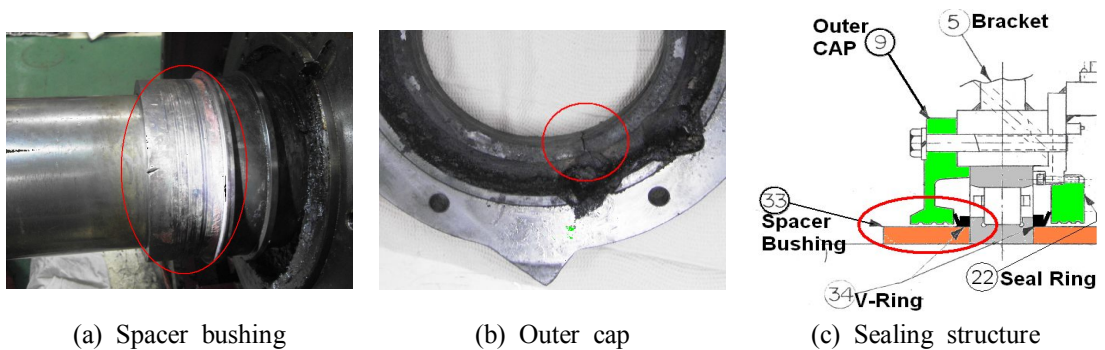


Figure 11. Outer cap/sealing ring and shaft spacer contact overheating



축의 Spacer Bushing과 Outer CAP/Seal Ring의 접촉은 케이시 칸막이 파손에 따른 전동체(Roller)의 Pitch 변화로 베어링의 내부간극이 증가되어 발생한 것으로 판단되며, 손상 당시 베어링 외륜 측 온도계에 감지된 최대온도는 56℃ 수준으로 그리스의 탄화는 베어링이 아닌, 마찰부 발열로 인해 발생하였을 것으로 추정된다.

## 나. 베어링 온도변화 분석

MG Set 02RN의 고장전 베어링 온도변화 이력 및 동일모델 원전 MG Set의 베어링 온도 경향을 분석했고, 온도경향 파악에 앞서 온도감지기의 온도편차 가능성과 관련해 위치 적절성을 확인했다.

### (1) 베어링 온도감지기 위치

MG Set 베어링 온도감지기는 베어링 브라켓(하우징) 내로 삽입되어 외륜 측에 근접 설치되며 실제 베어링 외륜 온도의 민감한 감시가 가능한 구조이다. 또한 발전기 측 베어링 온도 상승시의 기록 상 감지온도 편차 확인을 위해 감지기 인출 후 베어링 외륜 표면의 온도를 직접 실측한 적이 있고, 현장 실측 온도와 감지기에서 전송되는 온도 간에 편차는 없었다. Figure 12. 는 온도감지기 위치를 보여주고 있다.

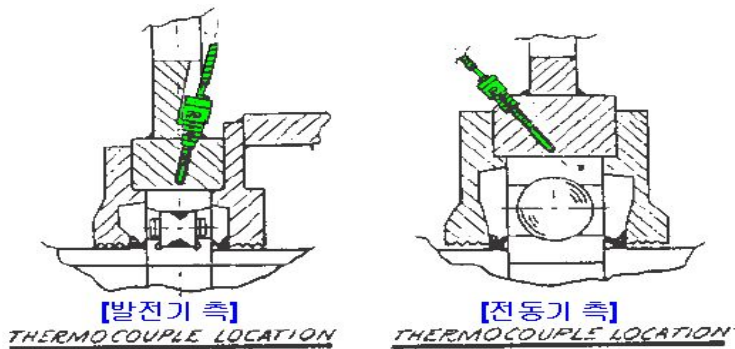


Figure 12. Bearing thermometer install position

(2) 고장 전 베어링 온도경향

Figure 13. 은 손상 발생 전 MG Set 02RN 베어링의 온도변화 기록이다. 초기기동 이후 발전기 측 베어링은 약 70℃까지 상승 후 50~60℃ 내외를 유지하였고, 1개월 후에는 약 8일간 45~95℃사이의 큰 온도등락을 반복하였으며, 4개월 이후에는 38~55℃사이의 온도등락을 나타냈다.

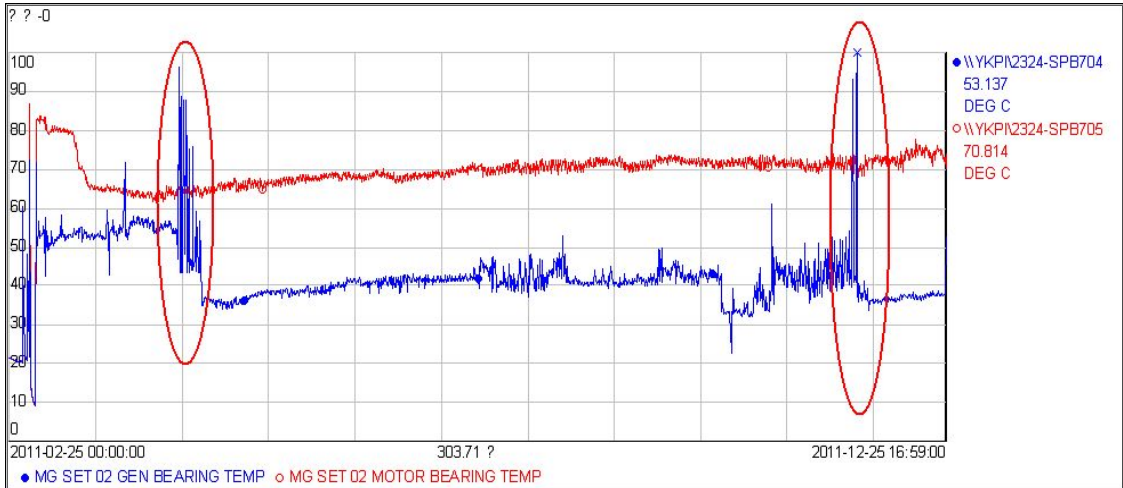


Figure 13. MG Set 02RN Bearing Temperature Transition

이후 안정되는 듯 보였으나 7개월 후 부터 소폭의 변동이 재현되었고 불안정한 온도 추이를 보이다가 8개월 후 약 92℃, 11월 26일 110℃이상 상승 후 감소하여 약 38℃ 내외를 유지하였다. 과열고장은 이후 약 1개월 지나서인 초기기동 9개월 후 특별한 사전 징후 없이 발생하였다. 온도 기록 상으로 볼 때 기동 8개월 이후 발전기 측 베어링에 상당수준의 열화가 진행되었을 것으로 추정되는 부분이다.

(3) 동일모델 온도경향

국내원전에 적용된 동일모델 MG Set의 추이분석을 위해 Figure 14~21. 과 같이 D&E호기 및 C&F호기 과거 온도경향을 확인했다.

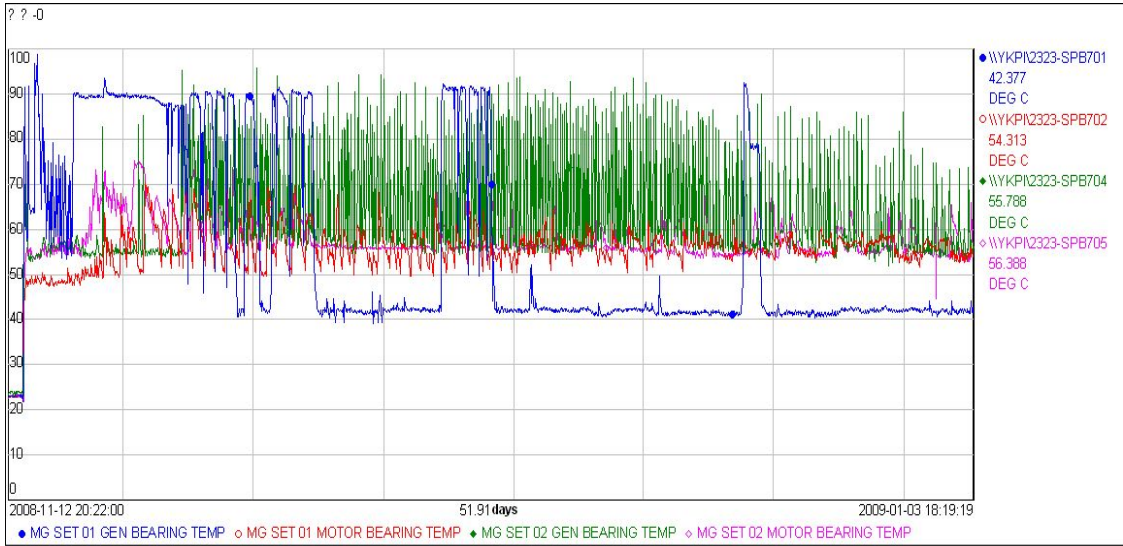


Figure 14. Unit-D MG Set BRG temperature transition (2008.11.12.~2009.01.03)

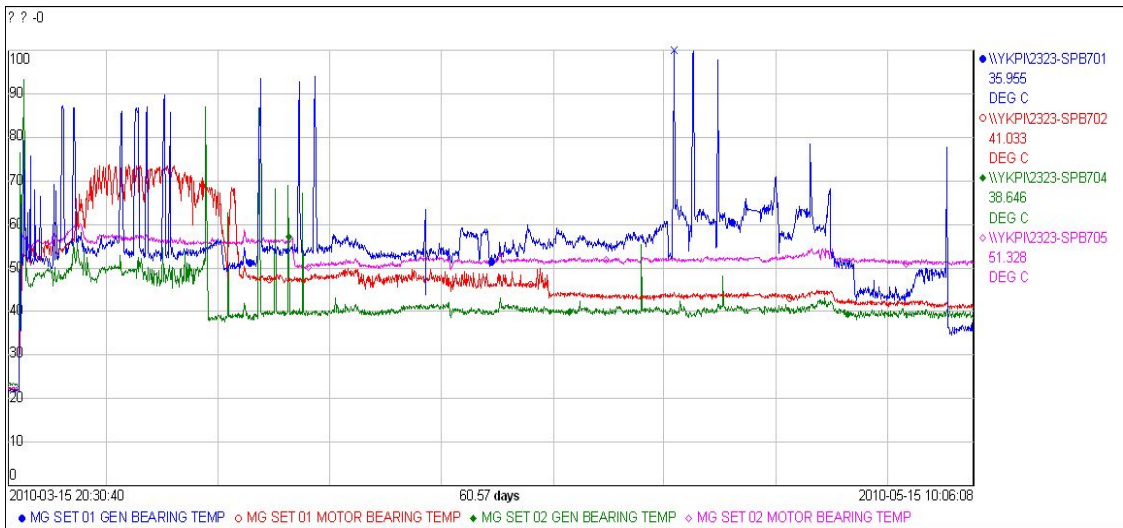


Figure 15. Unit-D MG Set BRG temperature transition (2010.03.15~2010.05.15)

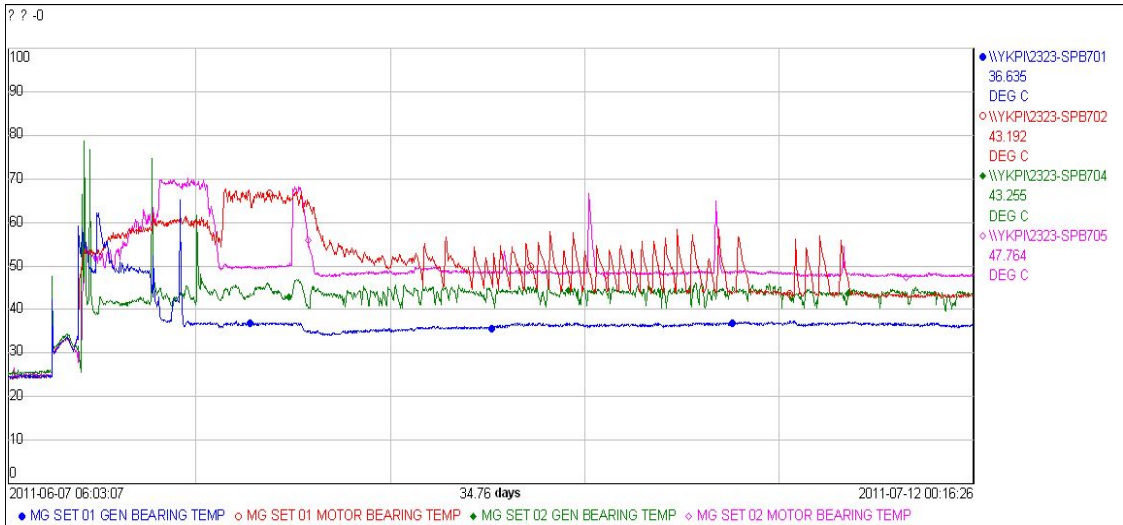


Figure 16. Unit-D MG Set BRG temperature transition (2011.06.07~2011.07.12)

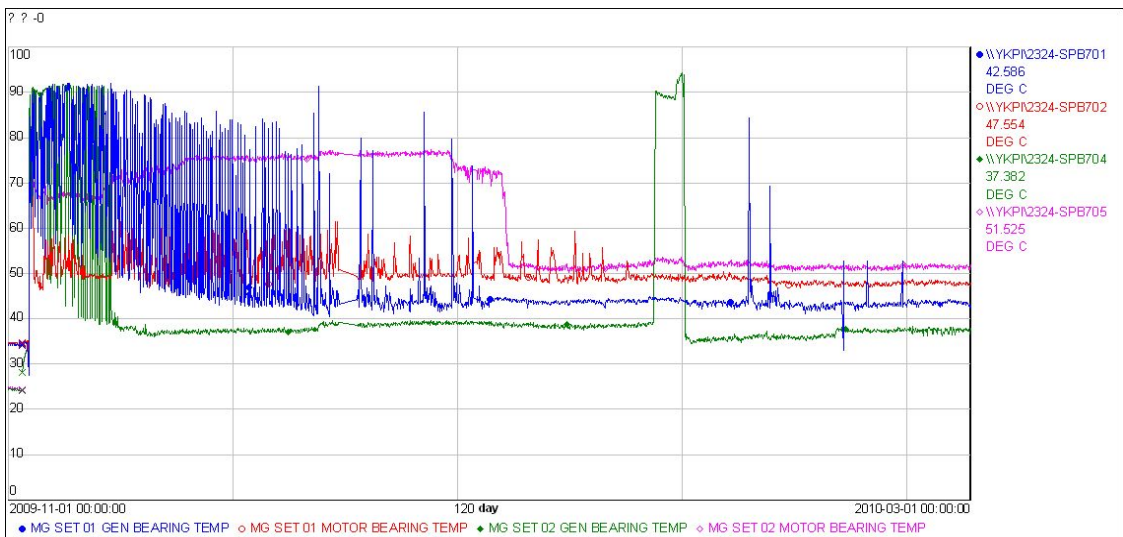


Figure 17. Unit-E MG Set BRG temperature transition (2009.11.01~2010.03.01)

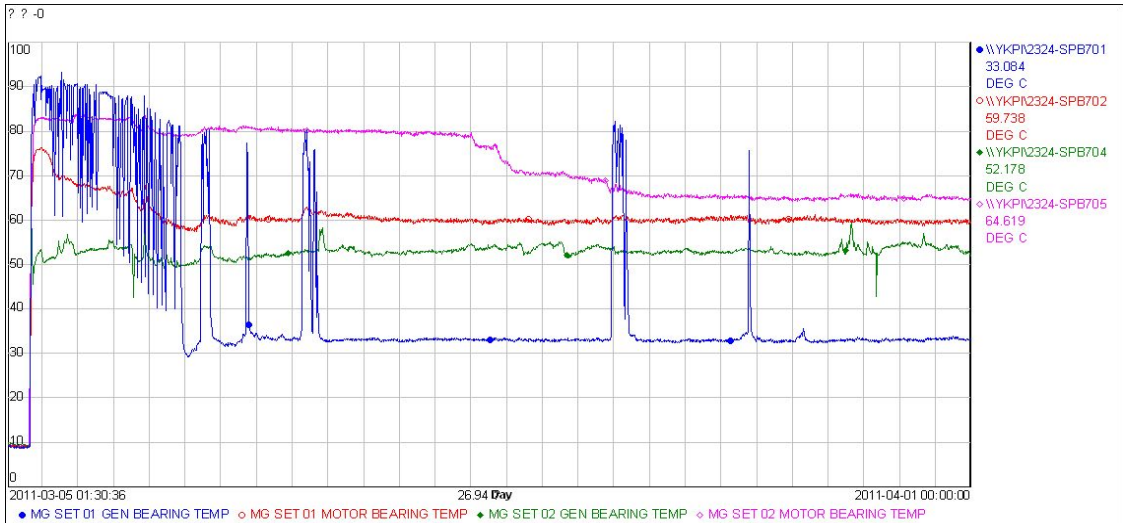


Figure 18. Unit-E MG Set BRG. temperature transition (2011.03.05~2011.04.01)

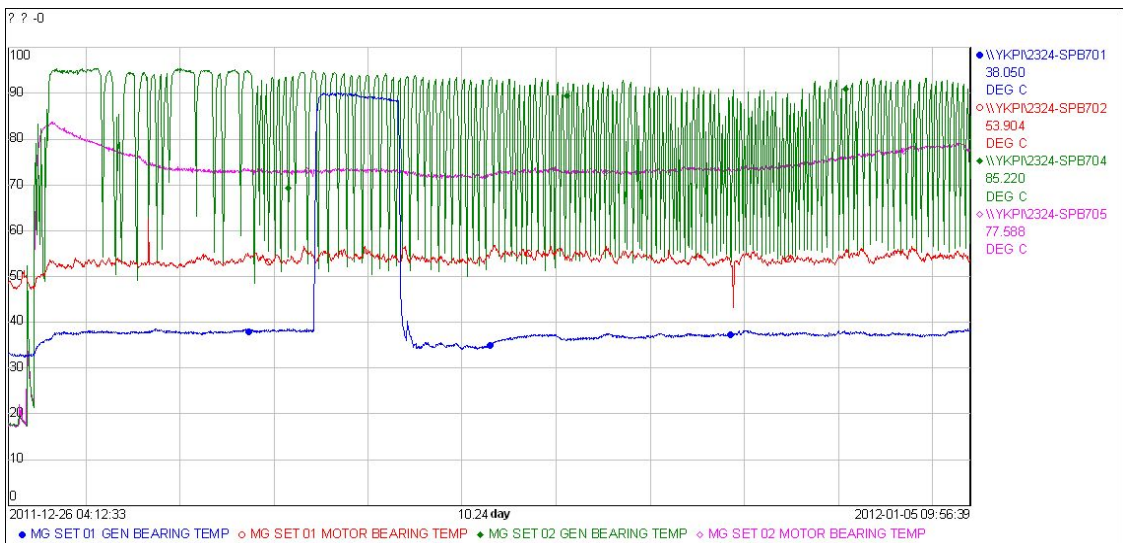


Figure 19. Unit-E MG Set BRG temperature transition (2011.12.26~2012.01.05)

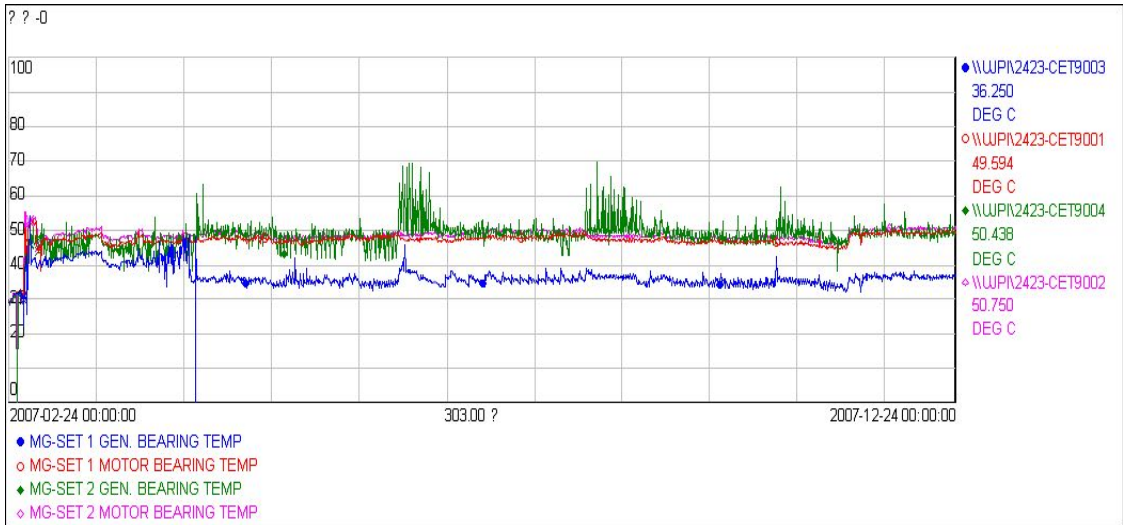


Figure 20. Unit-C MG Set BRG temperature transition (2007.02.24~2007.12.24)

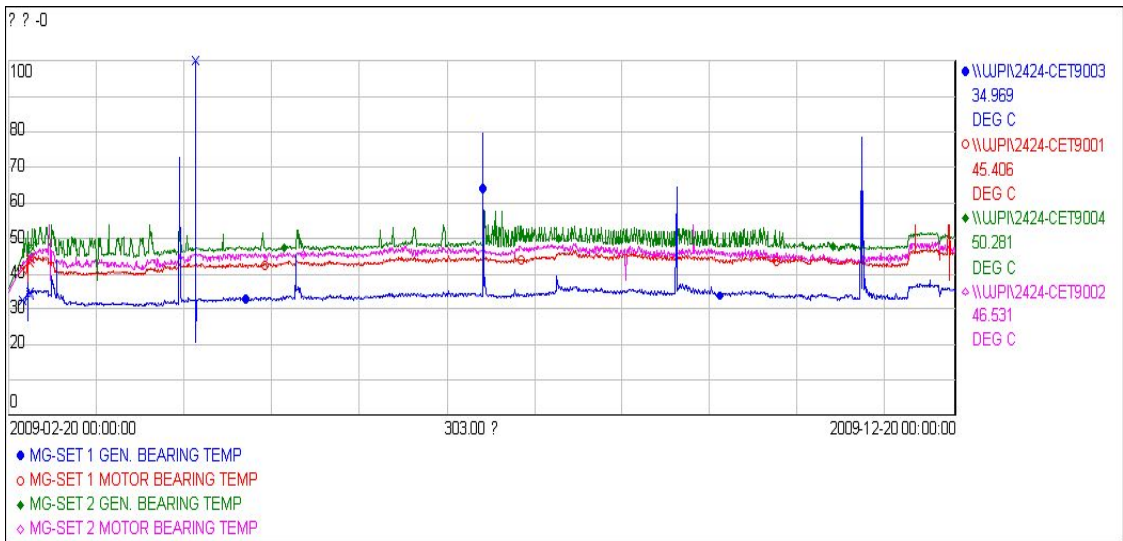


Figure 21. Unit-F MG Set BRG temperature transition (2009.02.20~2009.12.20)

확인결과 D&E호기 MG Set은 과거부터 신폼베어링 교체 이후 기동 초기부터 발전기 측 베어링 온도가 큰 변동폭을 나타내는 경우가 많았고, 운전중 불안정한 온도추이를 나타내는 경향이 있었다. 동일 모델이 설치된 C&F호기 MG Set에서도 정도는 크지 않으나 유사한 불안정 현상이 나타났다.

신폼베어링 및 신규그리스가 적용된 초기부터 나타나고, 국산화 이전 MG Set에서 반복적으로 나타나는 점 등을 고려할 때, 단순한 베어링 손상이나 그리스 오염, 윤활부족 등의 문제로 보기 어려운 면이 있다. 또한 E호기 MG Set 02RN의 전동기 측 베어링은 70~80℃ 내외로 변동하여 타 호기 MG Set 대비 상대적으로 온도가 높고 불안정한 경향을 보이는 경우가 많았다.

(4) 국산화 전동발전기 온도경향

베어링 크기 및 사양에 차이가 있는 국산화 MG Set은 그리스 주입시의 일시적인 온도 상승 외에는 Figure 22~24. 와 같이 불안정한 온도등락이 거의 나타나지 않는 것으로 나타났다.

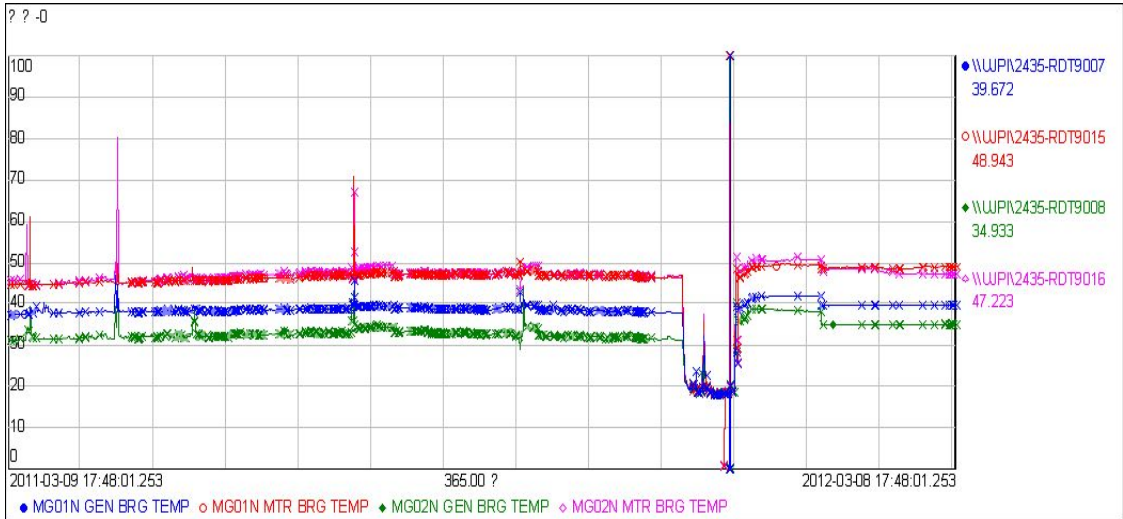


Figure 22. Unit-G MG Set BRG temperature transition (2011.03.09~2012.03.08)

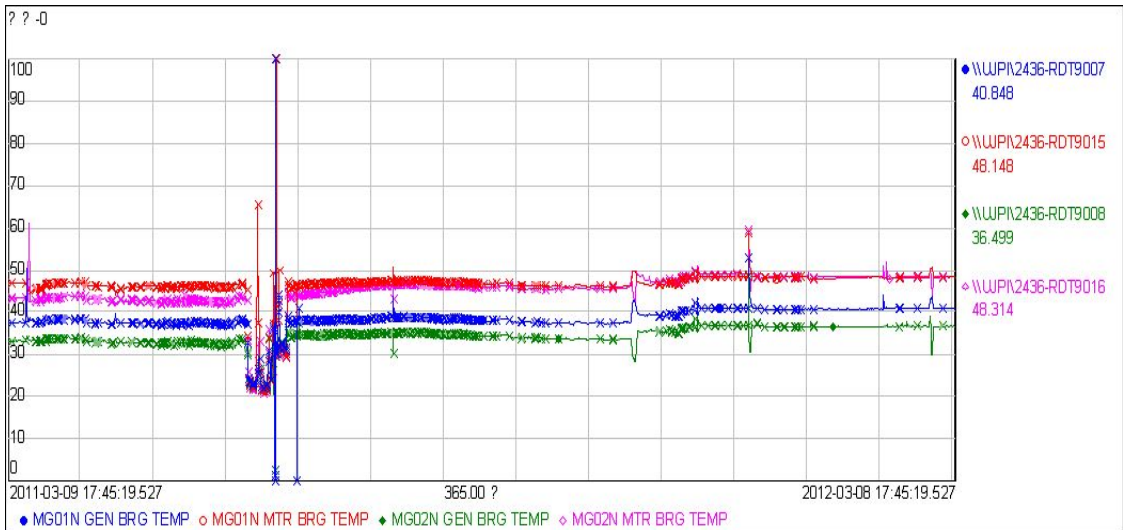


Figure 23. Unit-H MG Set BRG temperature transition (2011.03.09~2012.03.08)



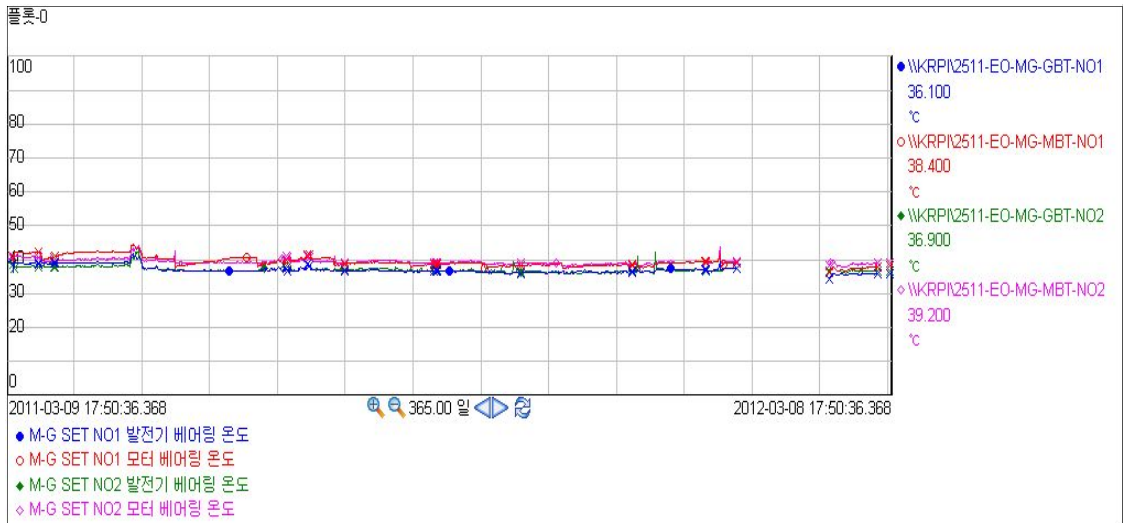
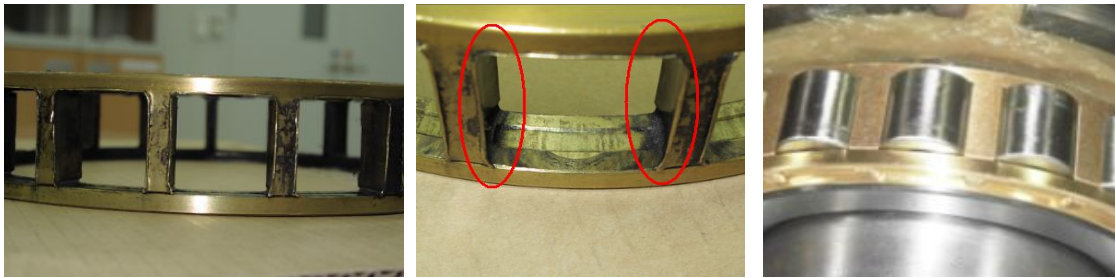


Figure 24. Unit-I MG Set BRG temperature transition (2011.03.09~2012.03.08)

### 다. 베어링 손상분석

손상된 베어링의 운전궤적 및 구름면 표면을 분석하였다. 케이지 점검결과 Figure 25. 과 같이 정상적인 케이지 칸막이 Roller 접촉부 양쪽 모두에 1mm 이상의 과도한 마모가 확인되었고, 과도 압력의 영향으로 추정되는 살밀림이 양쪽면 모두 발생했다. 신품과 비교할 때 마모로 인해 칸막이 폭이 상당 수준 감소하였음을 알 수 있다.



(a) Partition abrasion

(b) Extended material

(c) New cage

Figure 25. Result of cage maintenance

구름베어링의 케이지는 Figure 26. 과 같이 Roller의 간격을 유지하기 위한 목적으로 설치된다. 발전기 측 베어링인 N230E는 총 19개의 Roller를 갖고, 케이지는 Roller들의 구름으로 인해 밀려 축 1회전 당 0.429바퀴 회전하게 된다. Roller들은 운전 중 내·외륜에 접촉하여 구르게 되며, 자리를 잡은 후에는 케이지의 한쪽에 접촉하고 분산하여 케이지를 밀게 되므로 정상적인 경우 케이지에 과도한 부하나 발열을 수반하지 않는다 [6].

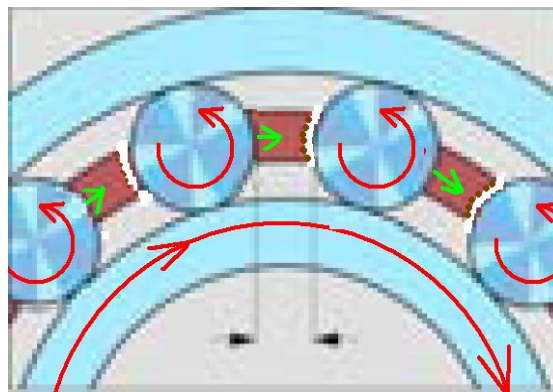


Figure 26. Cage spin and contact

케이지의 모든 칸막이 양쪽에 과다 마모가 수반되었다는 것은 Roller들이 각자 지속적으로 위치를 바꾸며 19개 전체 Roller 중 일부만 케이지에 접촉하거나, 다른 방향으로 접촉하여 과다한 힘 및 마찰이 작용하였음을 알 수 있다.

### 3. 전동발전기 베어링 및 Seal 형식 변경

이러한 분석을 통해 국산화 이전 MG Set의 문제점을 근본적으로 해결함으로써 기기 신뢰성을 향상 시켰다.

#### 가. 베어링 형식변경

발전기축 베어링을 Figure 27. 과 같이 기존의 N Type(N230E-C3)에서 NU Type(NU230E-C3)으로 변경했다. N Type과 NU Type은 부하지지능력은 동일하나 단지 전동체(Roller)의 축방향 고정위치에 차이가 있으며 한계속도에 미미한 차이가 있다. N Type은 Roller를 내륜에, NU Type은 외륜에 고정하는 형식이다.[7]

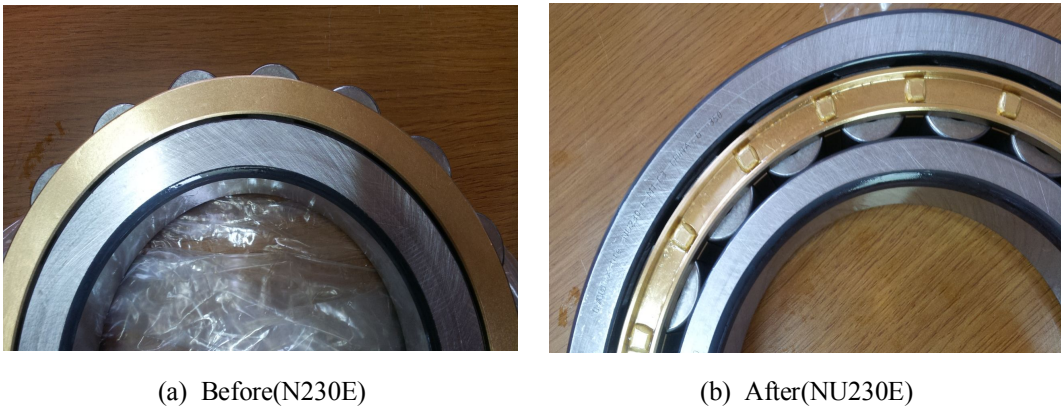


Figure 27. Change to NU type

Figure 28. 과 같이 축방향 변위(외력 또는 열팽창 등)나 진동이 발생하는 경우 NU Type은 내륜만 움직이므로 움직임이 자유로운 반면, N Type은 내륜과 함께 상당무게를 갖는 전체 Roller들의 변위를 수반하므로 마찰 등 NU Type에 비하여 불리한 면이 있다. 또한, Figure 29. 와 같이 N Type은 과다 간극으로 Roller의 미끄러짐(Skidding) 가능성이 있는 경우 내륜과 Roller의 축방향 마찰이 발생하면, Roller 전체가 내륜을 따라 회전할 가능성이 NU Type에 비해 상대적으로 커서, 유사상황에서의 발열 가능성이 NU Type에 비하여 높다.

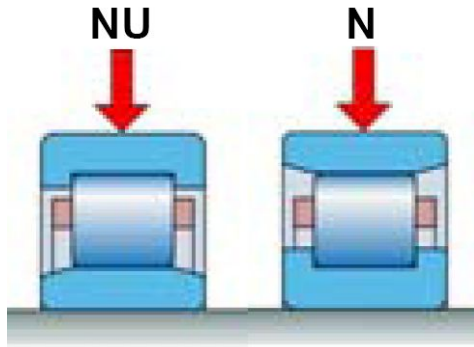


Figure 28. N & NU type

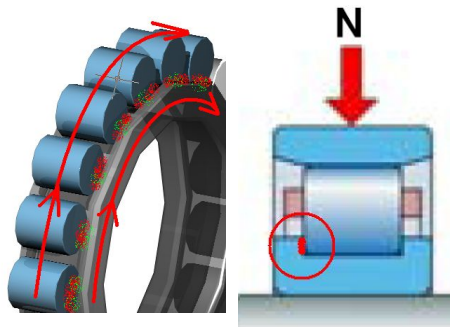


Figure 29. Roller skidding + friction

## 나. Seal 형식변경

다음으로, V-Ring을 제거하고 Figure 30. 과 같이 전동기/발전기측 Inner/Outer Cap 에 Felt를 삽입했다.

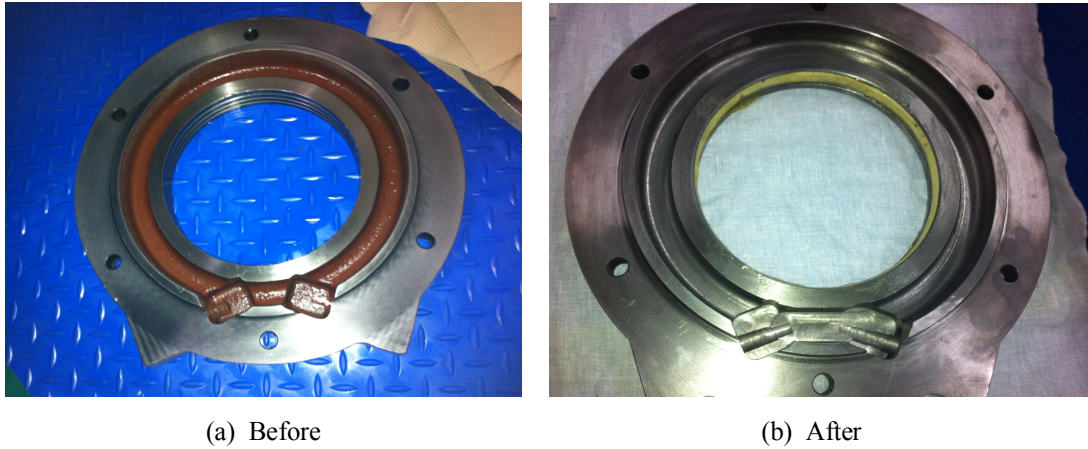


Figure 30. The installation of a felt ring(Outer cap)

V-Ring은 Figure 31. 과 같은 형태로 Grease 누출방지 및 이물질 유입방지의 기능을 가지며 보통 2차 Seal로 1차 Seal 외측 및 베어링 Bracket 또는 베어링 Cap의 바깥에 설치된다. 그러나 MG Set는 Figure 32. 과 같이 베어링과 Inner/Outer Cap 사이에서 양쪽이 접촉되는 1차 Seal로 V-Ring을 사용하고 2차 Seal로는 Labyrinth Seal로 밀봉장치를 설계하였다[8].

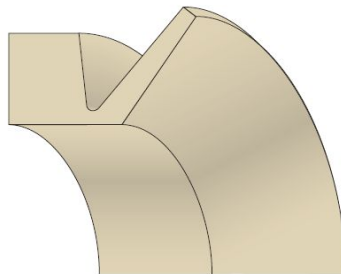


Figure 31. V-Ring

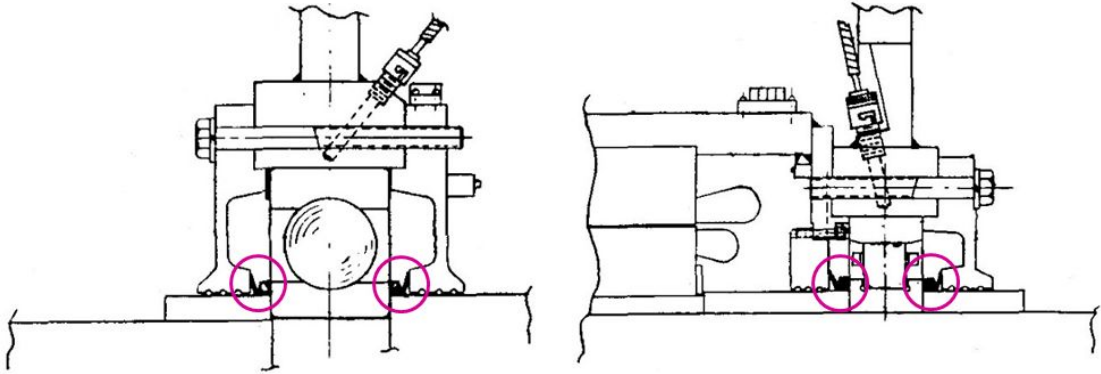


Figure 32. V-Ring installed in the form of MG Set

1차 Seal로 사용되는 V-ring의 견전성 유지에 어려움이 예상되고 파손시 Roller에 유입되어 2차손상 유발 가능성을 배제하기 위해 Figure 33. 과 같이 V-Ring을 제거한 후 Inner/Outer Cap의 Labyrinth Seal 내경 Groove 3개중 안측 1개를 절삭 및 깊이 4.5mm로 가공하여 Felt를 삽입했다.

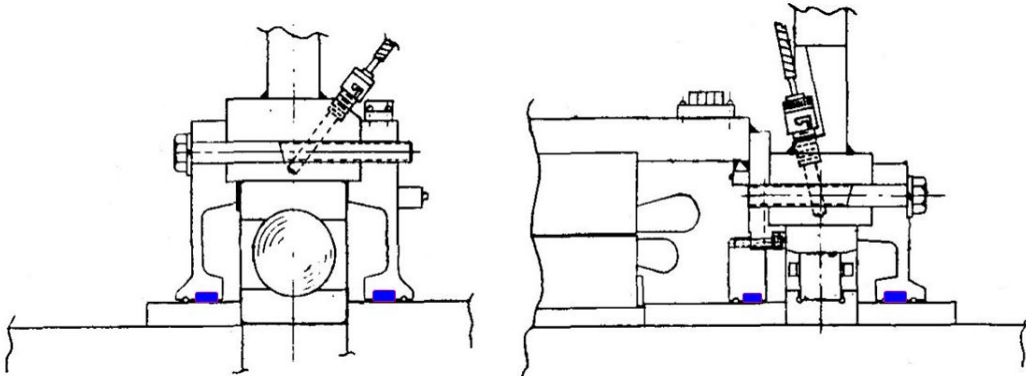
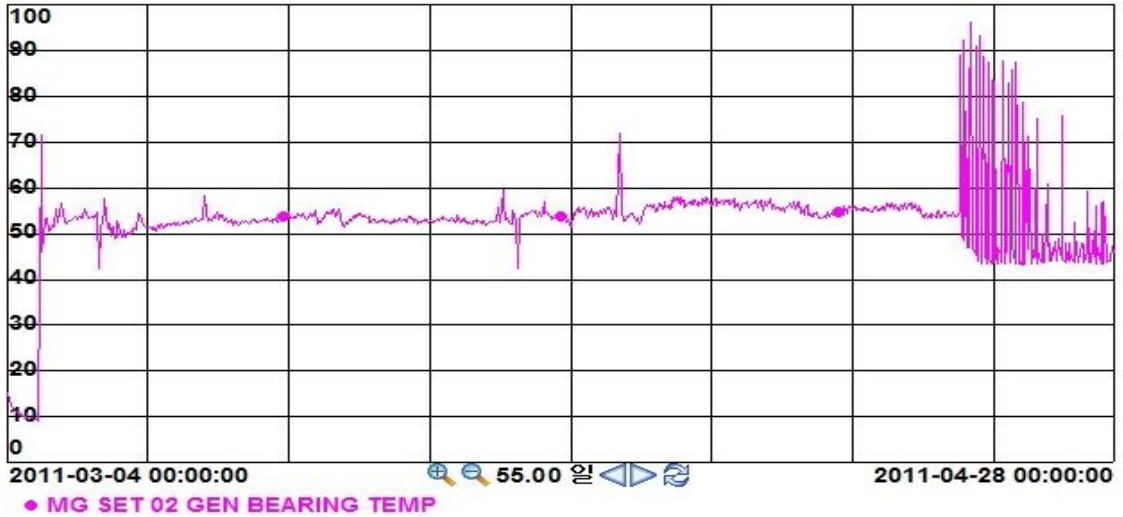


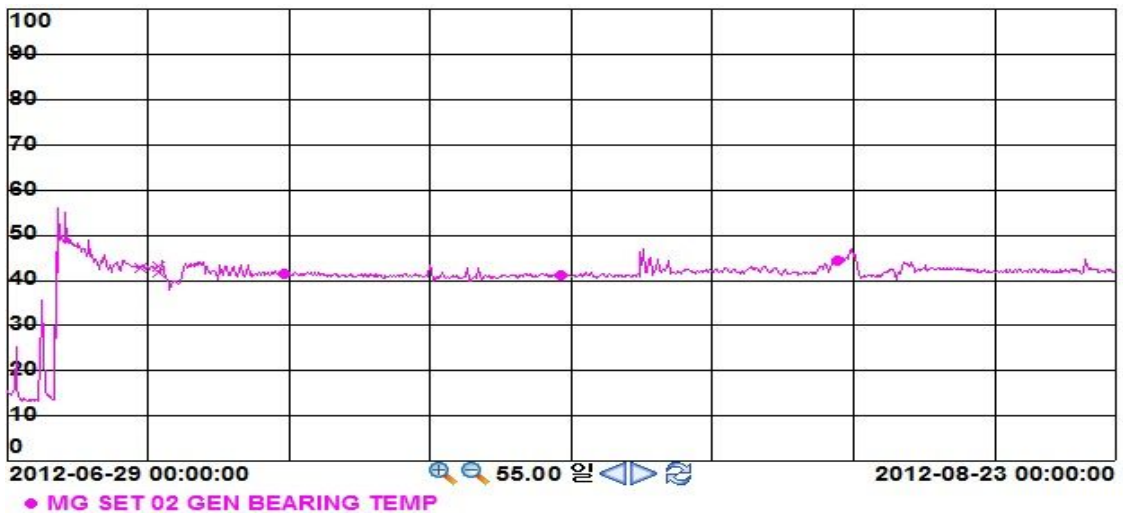
Figure 33. Groove processing for inner and outer felt sealing

#### 4. 결과 및 고찰

MG Set 기동 후 확인결과 Figure 34. 와 같이 발전기측 베어링 온도의 개선을 확인하였다. 설비개선 전에는 발전기측 베어링 온도가 71℃까지 상승 후 43~71℃로 변동하다가 45일 후 다시 불안정한 온도추이를 보였으나, 설비개선 후에는 55℃까지 상승 후 40~45℃로 안정적 유지되는 것을 확인하였다.



(a) Before

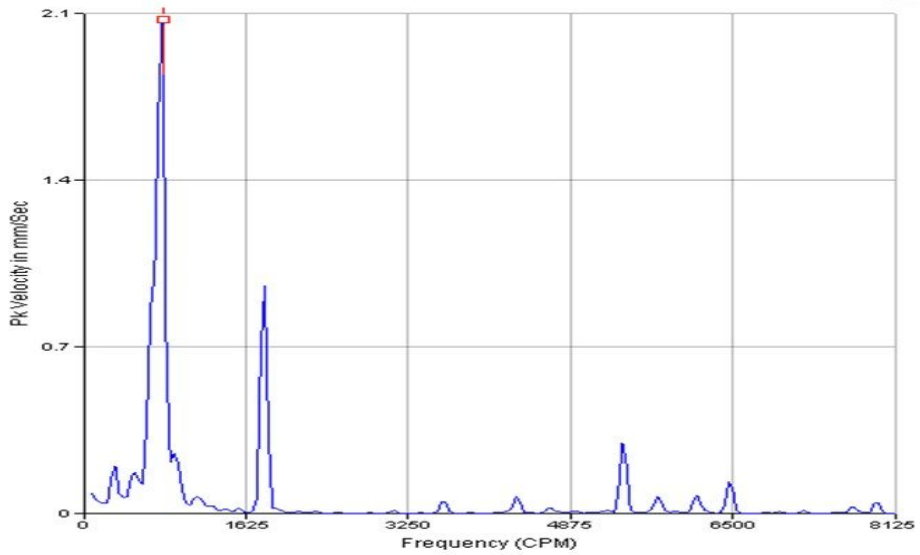


(b) After

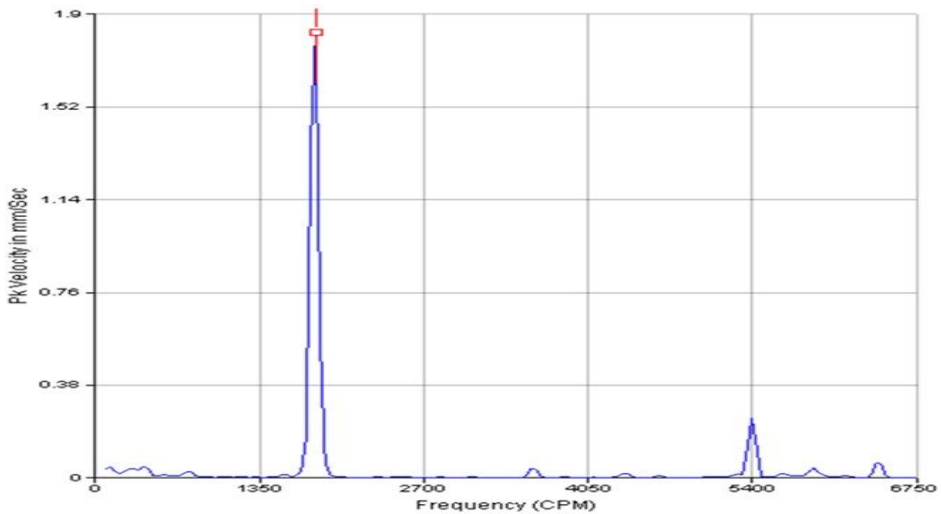
Figure 34. Generator side bearing temperature transition



또한, Figure 35. 와 같이 기계적인 진동 및 주파수 특성에서도 효과를 확인하였다.



(a) Before



(b) After

Figure 35. Vibration and frequency characteristic

개선 전 진동기 및 발전기 수직방향 진동은 1.5~2.7mm/sec(변위 : 20~65 $\mu$ m) 수준으로 높지는 않았으나 그리스 주입 등 운전환경 변화에 따라 변동이 발생했고, 787CPM(0.44X)에서 지속적인 결함주파수가 발생했다(속도기준 2.1mm/s).

개선 후의 진동은 1.0~1.8mm/sec (변위 : 6.1~10.5 $\mu$ m)로 매우 낮은 수준으로 안정적으로 유지되었고, 787CPM(0.44X)에서의 결함주파수 성분도 없어졌다.

## 제 2 절 보호 및 감시설비 개선

### 1. 배경

H호기에서 AVR 고장에 의한 발전정지 사례가 발생했다. 1대의 AVR 제어불량으로 단자전압이 변동되었고 2대의 MG Set 계통에 큰 순환전류 발생으로 각각의 역전력 계전기가 동작하여 2대 모두 정지되었다. Figure 36. 은 발전정지 순서도이다.

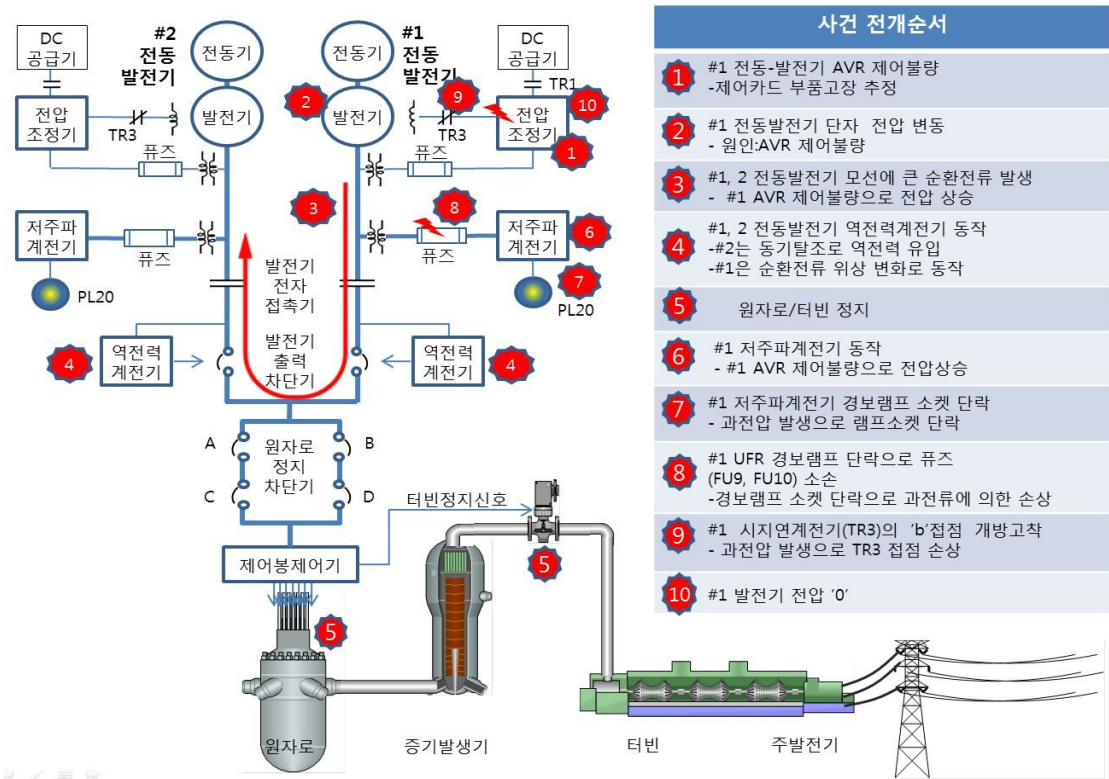


Figure 36. Sudden stop sequence

MG Set은 2대가 50%로 부하분담하여 CEDM에 전원을 공급한다. 2대 병렬운전의 목적은 1대가 고장나거나 정지되어도 나머지 1대가 100% 부하를 감당하도록 함으로써 상시 안정적인 전원공급을 하는데 있다. 그러나 Table 2. 와 같이 표준원전 MG Set의 전기적 보호신호가 I호기등 신규원전 및 설비개선 발전소에 비해 취약하여 H호기 사례처럼 1대 고장 발생시에도 고장파급을 방지하기 위한 보호설비가 없어 MG Set 2대 모두 정지되어 발전정지가 유발되는 문제가 있었다.

Table 2. Present condition of MG Set protection signals [September 2012]

항목 \ 호기	O, P, Q, R S, T	D, E C, F	A, B, G, H	I, J M, N	U, V K, L
MS Set 제작사	E 社	T 社	H 社	H 社	H 社
AVR 제작사	W 社	T 社	B 社	B 社	B 社
발전기 보호신호	방향성과전류 과전압 과전류	저주파수 과부하 역전력	저주파수 과부하 역전력	저주파수 과부하 역전력 과전압+ 과여자 계자상실	저주파수 과부하 역전력 과전압+ 과여자 계자상실 차동보호

## 2. 보호 및 감시설비 개선

한국표준형 원전의 MG Set 보호 및 감시시스템을 Figure 37. 과 같이 신규원전 기준으로 개선했다. 기존의 저주파수/과부하/역전력 계전기에서 별도의 보호계전기반을 신설하여 과여자/과전압/계자상실 계전기를 추가 설치해서 총 6개로 보호신호를 확대했다. 역전력계전기는 보호계전기 신뢰성 증진을 위해 자동전압조절기 공급사의 보호계전기로 교체했다. Figure 38. 은 기존 MG Set 제어반과 신설 보호계전기반이다.

추가된 과여자/계자상실/과전압계전기 정지신호는 모두 전기적 요소로서 과도한 정지신호는 오동작에 의한 불시정지 가능성을 배제할 수 없으며 상대 MG Set의 오신호에도 고장파급 가능성이 있으므로 좀 더 많은 개선책이 필요했다. 그래서 추가된 3개의 정지신호를 경보신호로 변경하고 역전력계전기는 기계적 보호신호(고진동 OR 고온도)와 AND 조건으로 정지신호를 재설정했다. 이에따라 1대 고장 발생시에도 파급을 방지할 수 있게 되었다. 그리고, 실제 역전력이 발생하게 되면 순환전류에 의한 전동발전기의 진동 및 온도가 증가하게 되지만 일시적인 역전력 혹은 오동작이 전동발전기를 정지시킬 수 없게 개선했다[9].

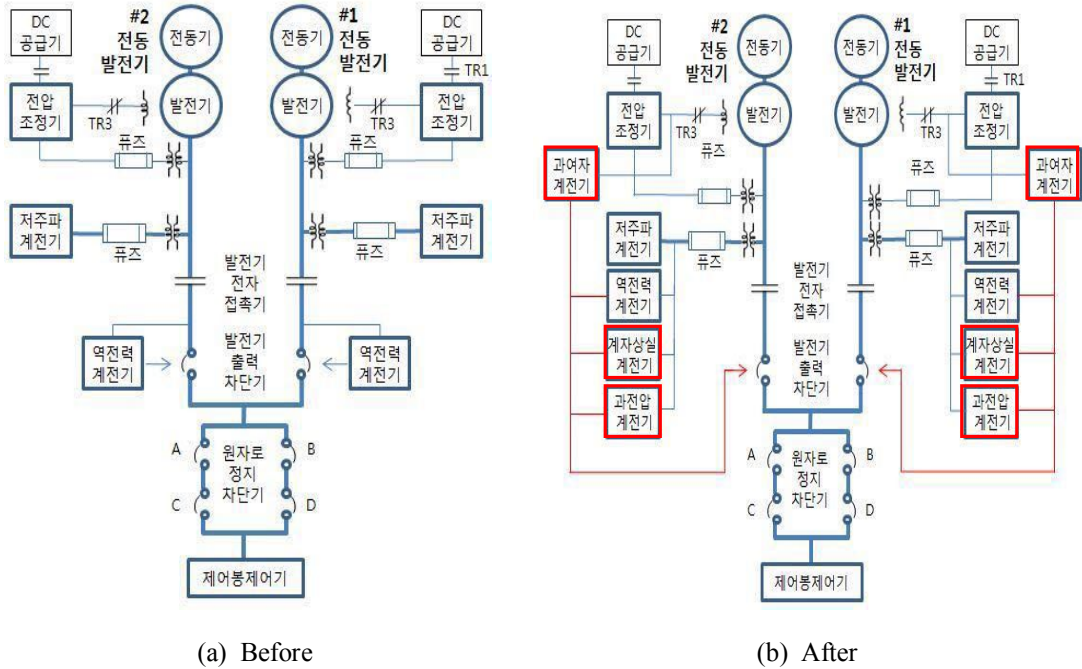


Figure 37. Improvement of protection and monitoring system



Figure 38. MG Set control panel and new protection panel

또한, MG Set 보호 및 감시설비 개선 설계변경 준공 후 최종검토 중 최초 설계 개념과 상이한 사항을 발굴했다.

첫번째 역전력 오신호 발생시 MG Set이 불시정지 될 수 있는 위험성이 존재했다. Figure 39. 와 같이 MG Set 정지회로에 역전력계전기 보조릴레이(RPRX)로 자기유지회로가 구성되어, 역전력 오신호 발생후 현장 보호계전기만 Reset 미수행 상태에서 기계적 보호신호(고진동 OR 고온도, 오신호 포함) 발생시 MG Set이 정지된다.

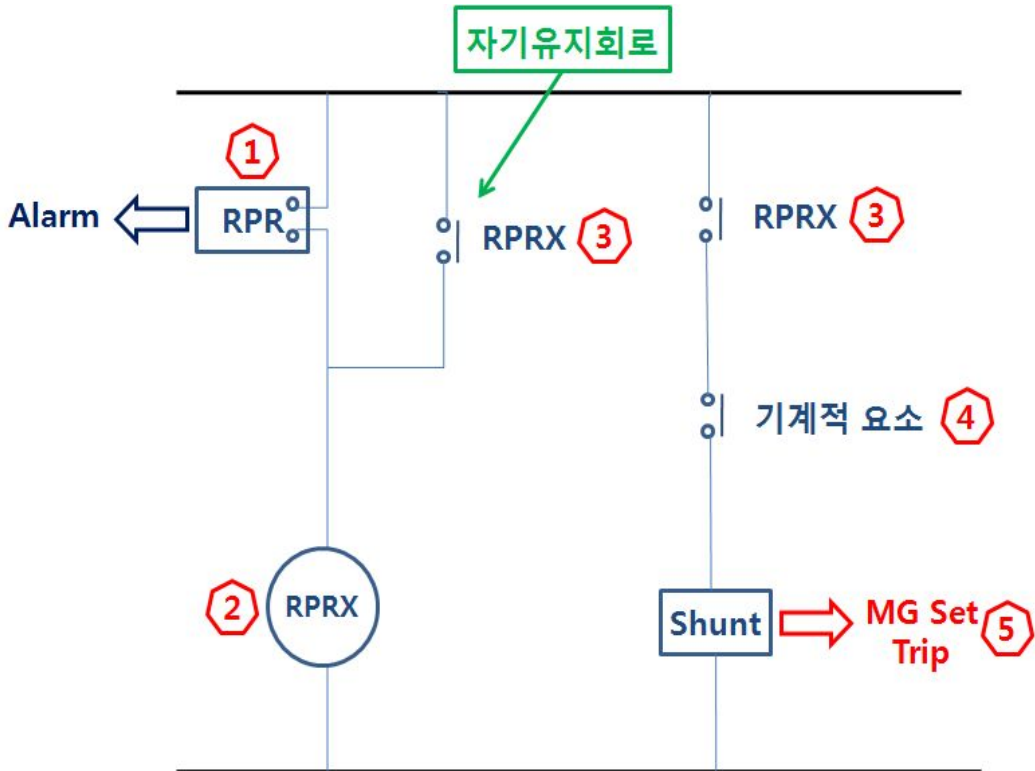


Figure 39. Possibility of unexpected stop at the wrong reverse power signal

역전력 보호계전기가 오동작 또는 일시적인 동작(①) 후 복귀 되어도 역전력 보조릴레이가 동작(②)하고, 자기유지 회로가 구성되어 역전력 보조릴레이 접점의 동작상태가 유지(③)된다. 이때 기계적 보호신호(고진동 OR 고온도, 오신호 포함) 발생(④)시 MG Set이 불시 정지(⑤)된다.

두번째로 역전력계전기 동작시 MCR에서 인지할 수 없는 가능성이 있었다. 역전력 계전기 보조릴레이(RPRX)를 거치지 않고 역전력계전기(RPR) 접점 신호로 주제어실

경보를 발생시키게 함으로써, 역전력계전기 일시적인 동작후 복귀되면 현장 보호계전기 기반 Reset 수행과 무관하게 MCR 경보가 소멸되어 보호계전기가 동작했음을 알 수 없는 상황이 유발된다.

이 두가지의 중대한 문제점을 개선하기 위해 현장시공변경서 발행후 회로개선 작업에 착수했다. 먼저 역전력 오신호 발생시 MG Set 불시정지 위험성을 제거하기 위해 Figure 40. 과 같이 MG Set 정지회로의 접점을 역전력계전기 보조릴레이(RPRX)에서 역전력계전기(RPR)로 변경하여 실제 역전력계전기가 동작한 상황에서만 정지조건을 형성할 수 있도록 했다. 다음으로 MCR 경보신호 접점은 역전력계전기(RPR)에서 역전력계전기 보조릴레이(RPRX)로 변경하여 현장 보호계전기기반에서 Reset을 수행해야 MCR 경보가 소거될 수 있도록 함으로써 역전력계전기 동작시 MCR에서 인지할 수 있는 경로를 확보했다.

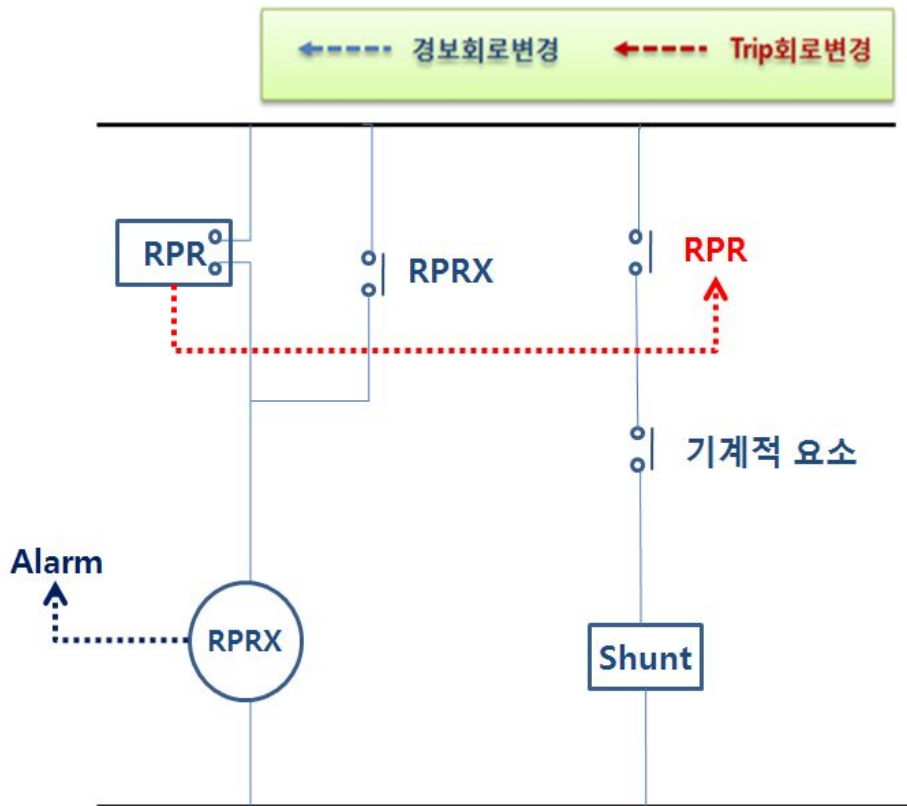


Figure 40. Improvement of the stop and alarm circuit

### 제 3 절 제어봉 구동장치 제어계통 고조파 저감

#### 1. 고조파 발생 및 영향 분석

한국표준형 원전은 CEDMCS의 안정성 향상 목적으로 디지털기반 2중화 제어설비로 교체한 이후, CEDMCS 정류회로에서 과생된 고조파의 유입으로 MG Set 동기투입 실패와 CEA 구동시험 중 CEDMCS 저전압계전기 소손등 MG Set에 운전영향을 미치는 사례가 발생했다.

#### 가. 제어봉 구동장치 제어계통 고조파 전압발생 메커니즘

고조파 전압발생 메커니즘은 Figure 41. 에 나타난 바와 같이 CEDMCS DC 정류회로 동작시에  $6N \pm 1$  차수의 고조파 전류( $I_h$ )가 발생되고(①),  $I_h$ 는 임피던스가 낮은 전원계통 즉, MG set 발전기측으로  $I_{h1}$ 과  $I_{h2}$ 로 분류되어 유입되며,  $I_{h1}$ 과  $I_{h2}$ 의 크기는 발전기 내부 임피던스에 따라 달라진다(②). 유입된 고조파 전류와 MG Set 발전기 계통 임피던스에 의해 고조파 전압이 생성되고, 이 고조파 전압과 발전기 단자에 유기된 기본파 전압이 합성되어 출력전압을 왜곡시킨다(③).

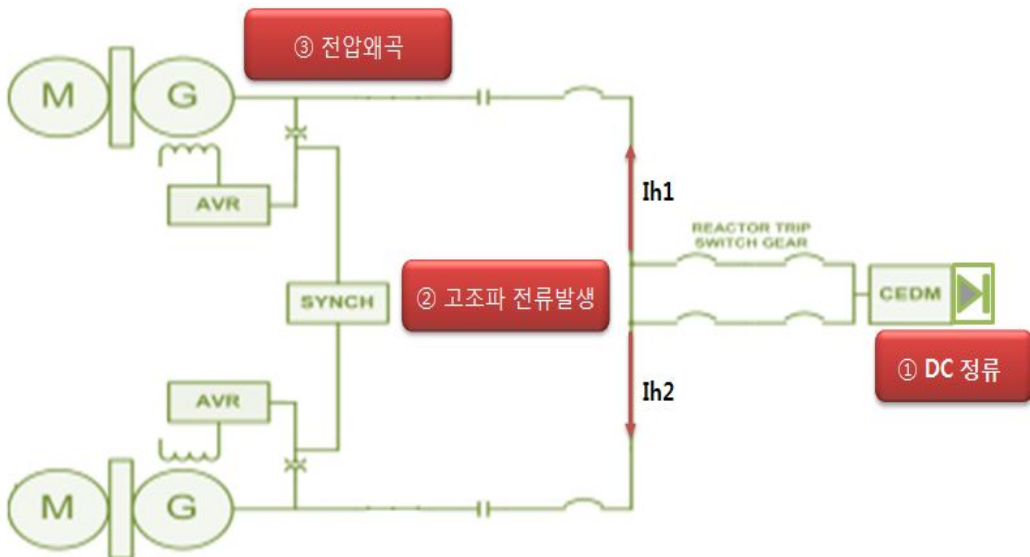


Figure 41. Generating mechanism of the harmonic voltage



고조파 영향분석 및 저감을 위해 고조파에 대한 기술기준을 살펴보면, 전원계통과 분리된 MG Set 계통에 대한 별도의 기술기준이 없다. 따라서, 여기서는 IEEE Std 519의 전력계통에 연계되는 고조파 발생 부하에 대한 기술기준을 적용하여 평가하였다 [10]. 식(1)의 THD(Total Harmonic Distortion)는 왜형율이라 하며 전원계통 전압에 대한 고조파의 영향을 수치로 정의한 것으로 기본파(60Hz) 대비 고조파 성분비를 %로 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \text{THD} &= \sqrt{\frac{\text{sum of all squares of amplitude of all harmonic voltages}}{\text{square of the amplitude of the fundamental voltage}}} \cdot 100\% \\
 &= \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V^2 h}}{V_1} \cdot 100\% \quad (1)
 \end{aligned}$$

또한 Figure 42. 와 같이 정류시 발생하는 순간적인 정류회로 단락에 의한 AC계통 전압저하 현상을 Notch라 한다.

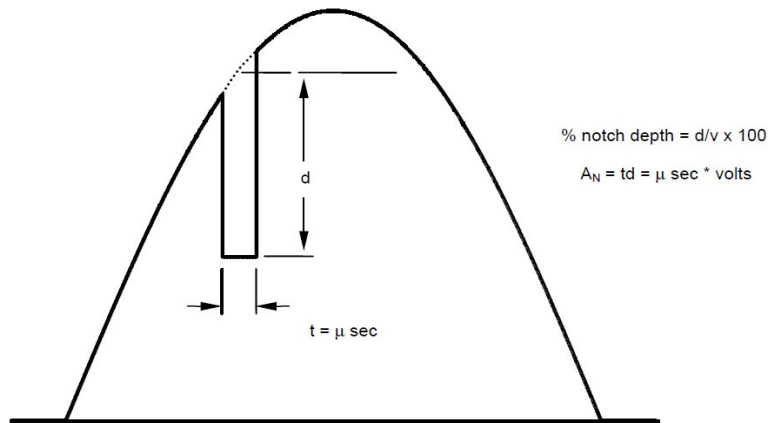


Figure 42. Definition of notch depth and notch area

저전압 계통에 권장되는 전압 THD는 10% 이내이며, Notch의 Depth와 지속시간은 각각 50%와 18,250 $\mu$ s 이내이다.

## 나. 주요 기기별 고조파 영향 분석

디지털 기반 2중화 제어설비로 교체 한 이후 CEDMCS 정류회로에서 파생된 고조파 증가로 한국표준형 원전에서 발생한 MG Set과 CEDMCS 주요기기별 고조파 영향 사례들을 분석하였다.

### (1) 전동발전기 동기검정기

계획예방정비를 마치고 MG Set 초기기동시 또는 정상운전중 MG Set 1대 불시정지로 정비후 재기동시 2대중 1대에 부하를 먼저 연결한 상태에서 나머지 1대를 동기투입한다. 부하에 전원을 공급하는 1대의 MG Set은 무부하로 운전되는 MG Set보다 회전수가 약간 느리고 이는 곧 주파수가 낮은 것을 의미한다. 이 주파수 차이( $\Delta f$ )가 동기투입을 가능하게 만든다. 그러나 국내 원전 A호기의 MG Set 1대가 고장정비 후 동기투입에 실패한 바 있다. MG Set의 출력전압 측정결과, 무부하 운전전압은 sinewave를 유지하고 고조파 왜곡현상이 없는 반면, CEDM 부하를 공급하는 출력전압은 고조파 전류유입에 의한 전압파형 왜곡현상이 심하게 발생한 것을 확인하였다. 전력분석기를 이용하여 MG Set 동기검정용 출력전압을 측정 후 파형분석 결과 Figure 43. 과 같이 CEDMCS의 3상 전파 정류회로에서 발생하는  $6N \pm 1$  (5,7,11,13, ...)차수 고조파 전류가 모션전압에 유입되어 파형왜곡이 심화되고 전압차가 크게 발생하여 동기투입에 실패하였다.

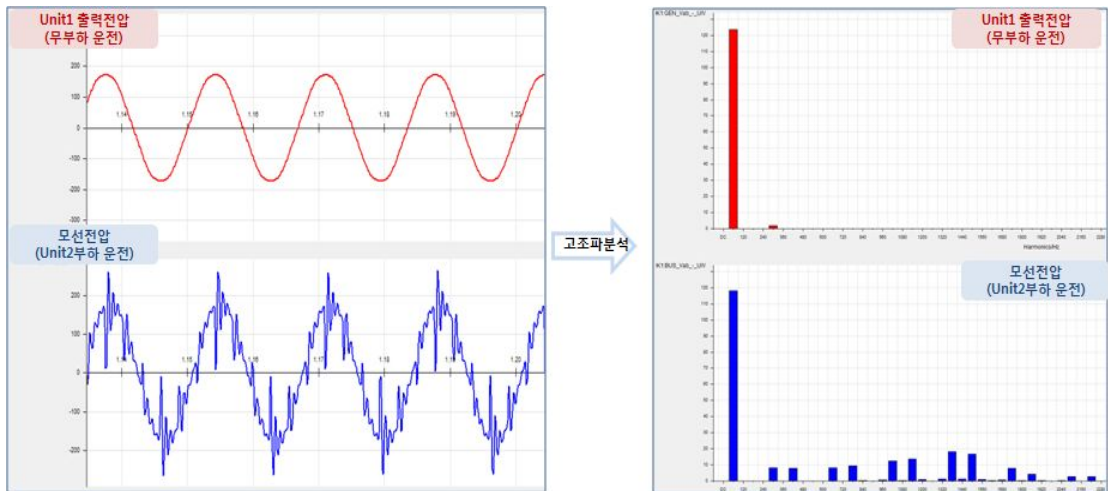


Figure 43. Results of harmonic analysis for voltage waveform

2대의 MG Set에 대한 전압, 주파수 및 위상등 동기투입 조건을 검출하여 동기투입을 가능하게 하는 동기검정기의 동작특성을 분석하기 위해서, Figure 44. 와 같이 동기투입 실패시 취득한 기본파 전압과 고조파 전압의 동 위상 구간 2 cycle 파형을 동기검정기 전압입력 양단에 지속인가 후 동기신호가 발생하는 시점까지 설정값을 변경하여 동작특성 시험을 수행하였다.

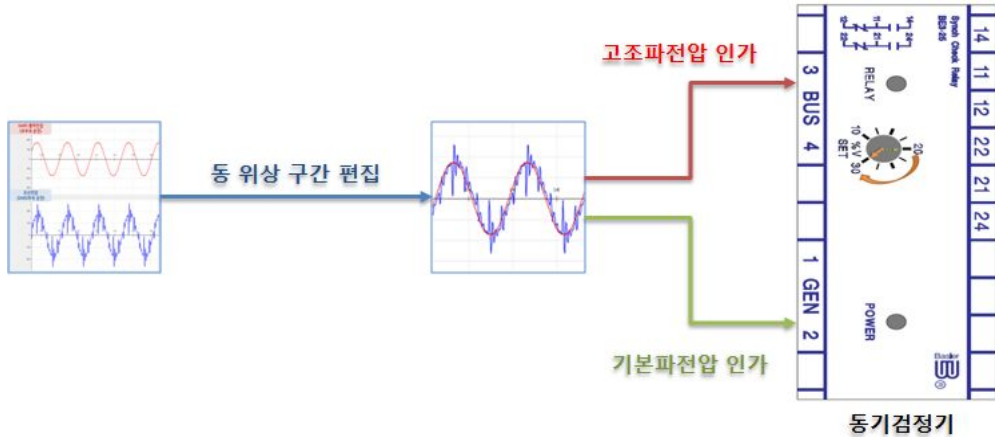


Figure 44. Diagram of synchronizer harmonic characteristic test

시험결과 Table 3. 과 같이 동일한 크기 및 위상의 전압을 인가하더라도 고조파에 의한 전압왜곡과 전압차 발생으로 동기검정기가 현 정정 20%(24V)에서는 동작하지 않고, 설정값 23% 이상에서 동작하였다.

Table 3. Result of operating characteristic test

시험 조건	동작 값	비 고
BUS전압 : 고조파 120V ∠0° GEN전압 : 기본파 120V ∠0°	23% 이상 (전압차 27.6V)	현 정정 20%
BUS전압 : 기본파 120V ∠0° GEN전압 : 기본파 120V ∠0°	최소값	

(2) 전동발전기 자동전압조절기

국내 원전 B호기에서 MG Set AVR Trouble 경보가 발생하며 Figure 45. 와 같이 고장기록계(F/R : Fault Recorder)에 데이터가 기록되었다. 유사한 계자전압 진동현상이 F/R 저장시간 (10sec) 동안 전압변동 폭이 작아 경보가 발생하지 않은 5회를 포함하여 총 6회 발생한 것을 확인하였다.

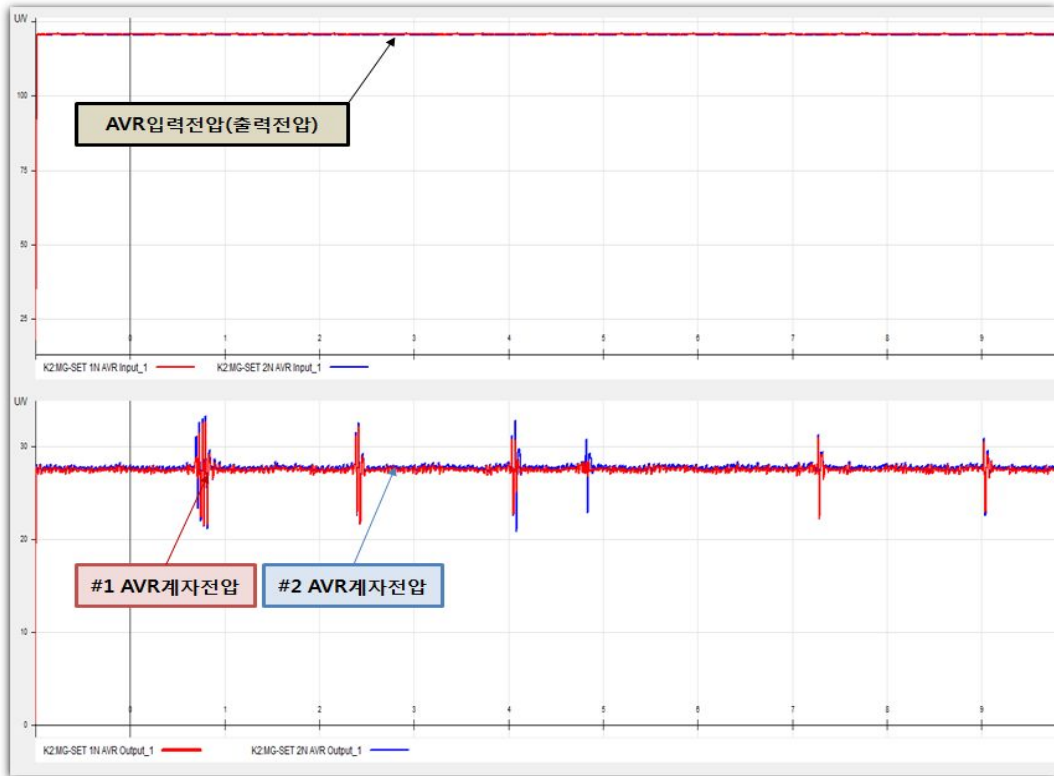


Figure 45. Unit-B MG Set AVR input and output waveform - unstable

MG Set 2대의 자동전압조절기(AVR : Automatic Voltage Regulator) 계자전압이 동시 응동하는 것으로 보아 발전기 출력단(AVR 제환신호원)의 영향을 받으며 출력단의 영향이 과도 할 경우, 빈번한 경보 가능성이 있다. CEDMCS에서 유입되는 고조파(Notch포함) 등의 영향에 의해 AVR 제어가 교란되는 것으로 보인다.

(3) 제어봉 구동장치 제어계통 저전압계전기

국내 원전 C호기에서 CEDMCS 설비개선 후 성능검증을 위해, MG Set 단독운전 상태에서 CEA 구동시험중 CEDMCS 제어반 내 저전압계전기(UVR : Under Voltage Relay) 총 4대중 1대가 소손되고 3대의 성능저하가 발견되었다[11]. 상시 여자상태인 CEDMCS UVR 4대중 2대 이상 소손시 Figure 46. 과 같이 터빈 트립에 의한 발전정지가 유발된다.

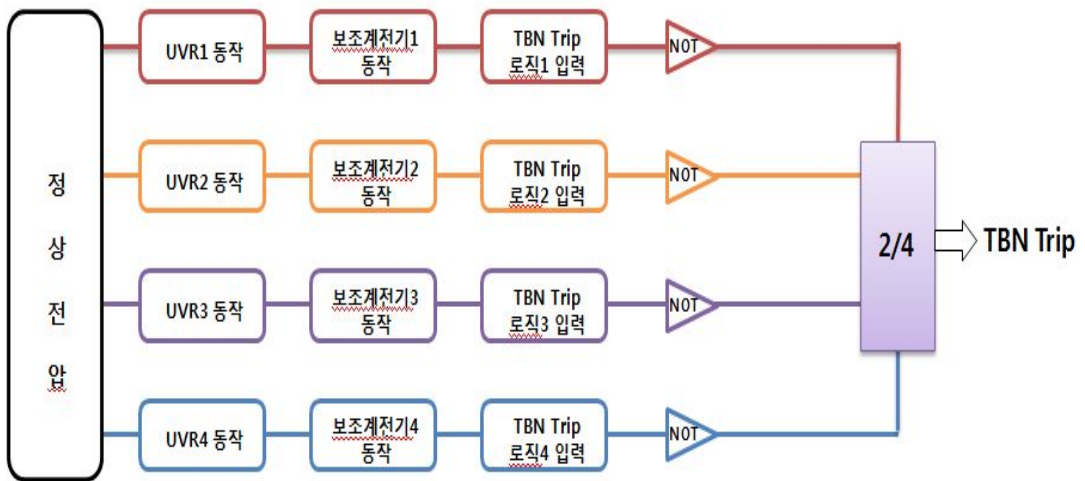


Figure 46. Under voltage relay trip scheme of CEDMCS

원인분석 결과, CEDMCS 정류회로에서 파생된 고조파 증가 때문으로 확인되었다. MG Set 2대 병렬운전시 분류되어 흐르던 고조파 전류가 MG Set 1대 단독운전으로 운전상태 전환 후 운전 중인 설비로 집중되어 Figure 47. 과 같이 전압 THD가 증가하고 Notch, Ringing 등 전압파형의 왜곡 현상이 심화되었다. 따라서, Table 4. 와 같이 CEDMCS UVR에 정격을 초과하는 순시 최대전압(peak)이 지속적으로 인가되어 소손이 야기된 것을 알 수 있다.

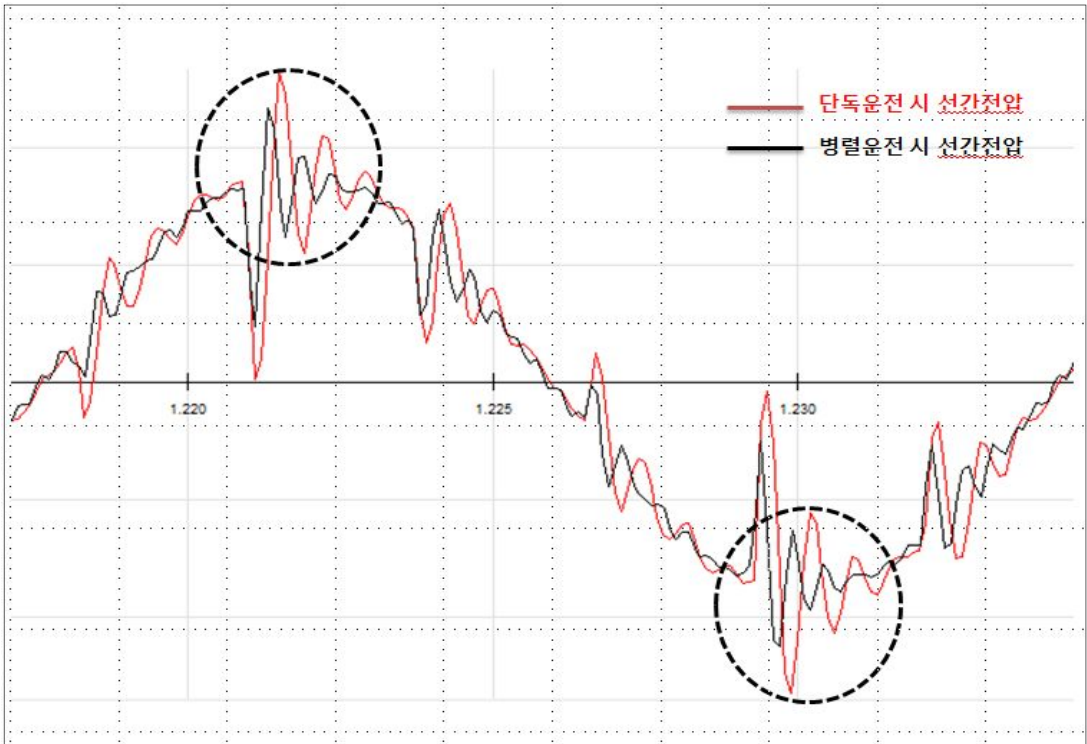


Figure 47. Parallel and series operation waveform

Table 4. Comparison of the harmonic ratios before and after exchanging CEDMCS

구분	CEDMCS 교체 전	CEDMCS 교체 후
전압 THD	15% 미만	31% 초과
순시 최대전압 크기	225 V <sub>peak</sub>	286 V <sub>peak</sub> 이상

## 다. 고조파 저감 대책

MG Set 설비의 고조파 저감 대책을 살펴보면 다음과 같다[12].

### (1) Passive Harmonic Filter

제거하고자 하는 고조파 유입시 수동형 필터를 설치하여 태워 없애는 방법으로, 정류부하의 경우 부하로부터 유입되는 5, 7고조파 성분이 대상이다.

### (2) Active Harmonic Filter

고조파 전류가 유입되면 해당 고조파 역 위상( $180^\circ$ ), 동일크기의 고조파 전류를 발생시키는 능동형 필터를 설치하여 고조파를 상쇄시키는 방법으로, 최근 사용이 확대되고 있다.

### (3) Delta-wye Transformer

저압측이 Delta와 Y결선인 3권선 변압기의 권선간 위상차를 이용하여 유입되는 고조파 전류를 상쇄시키는 방법으로, 주발전기 여자시스템과 UPS 시스템에 적용하고 있다.

### (4) Generator Oversizing

고조파에 대한 내부 임피던스를 낮게 하기 위해 부하특성별로 Oversizing Factor를 적용하여 발전기 용량을 증대하는 방법으로, Table 5. 에 정리한 한국표준형 원전 MG Set에 대한 검토 결과, 발전기 정격 전류용량은 적정하게 선정된 것을 알 수 있다.

Table 5. Calculated generator capacity by oversizing factor

부하 특성	Oversizing Factor	기준 전류	발전기 용량	결과
3상전파	1.5	588A	601A	만족

## 2. 설비 개선 및 결과 분석

앞서 검토 결과, MG Set 동기투입 실패와 CEDMCS UVR 소손의 주요 원인이 CEDMCS에서 유입된 고조파에 기인한 것으로 파악되었다. 따라서, 운전중인 MG Set의 유입 고조파를 측정하고 전압파형을 분석하였다. 이들 결과를 바탕으로 고조파를 저감하기 위해 설비를 개선하고 현장시험을 통해 개선 결과를 확인하였다.

### 가. 전동발전기 유입 고조파 측정

MG Set으로 유입되는 고조파를 국내 원전 D & E호기의 MG Set에서 실측하였다. 출력전압은 MG Set 발전기 출력모선에서 직접 각 상전압을 측정했고, 출력전류는 Meter용 CT 2차측에서 각 상전류를 측정하였다. MG Set과 CEDMCS 제작사는 각각 T社와 D社이고, CEDMCS 정류방식은 전류제어 전파정류방식이다.

측정 결과 Table 6. 에 나타낸 바와 같이 전압 THD가 20% 이상으로 왜곡이 심하며 Notch도 Depth가 크고, Area가 길게 형성되어 MG Set 자동전압조절기, 동기검정기, CEDMCS 측 UVR의 오(부)동작 및 손상 가능성이 있다. 또한, Figure 48~51. 과 같이 Notch 발생 후 회복과정에서 전압의 급상승(Over Shooting) 및 진동(Oscillation)이 발생하여 전압이 안정화 되는데 1ms이상이 소요되어 전반적인 MG Set의 출력전압 품질이 저하된 것을 알 수 있다.

Table 6. THD and notch of MG Sets in Unit-D and Unit-E

구분	고조파 왜형율(THD, %)		Notch	
	전압	전류	Depth(%)	Area( $\mu$ s)
기준	10% 이내	-	50% 이내	18,250 이내
D호기	23.9	32.6	82.1	86,400
E호기	23.9	33.8	83.0	80,400



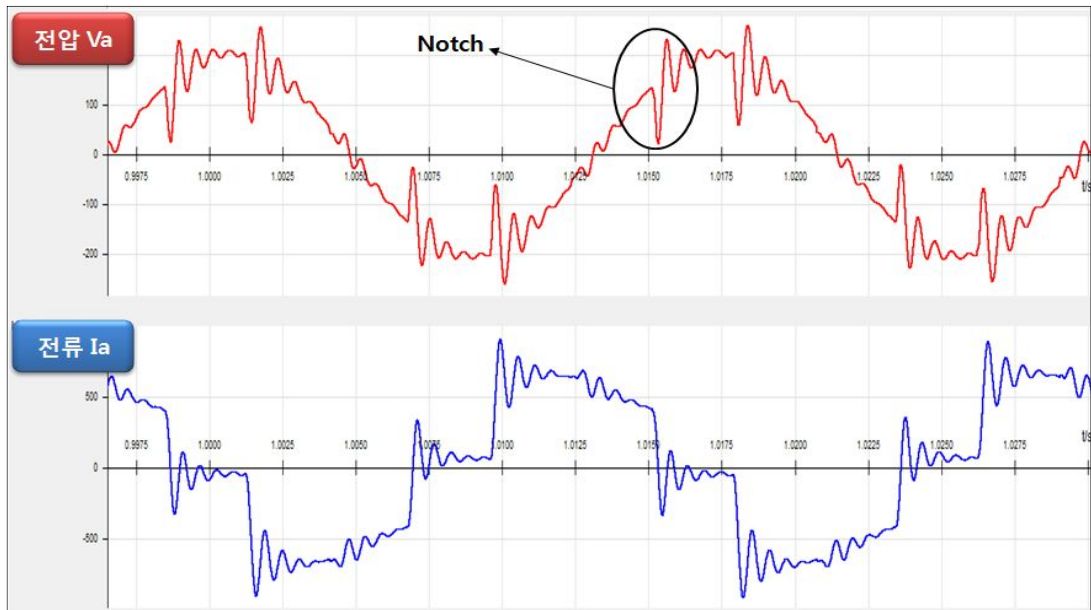


Figure 48. Waveform of voltage and current tested in Unit-D

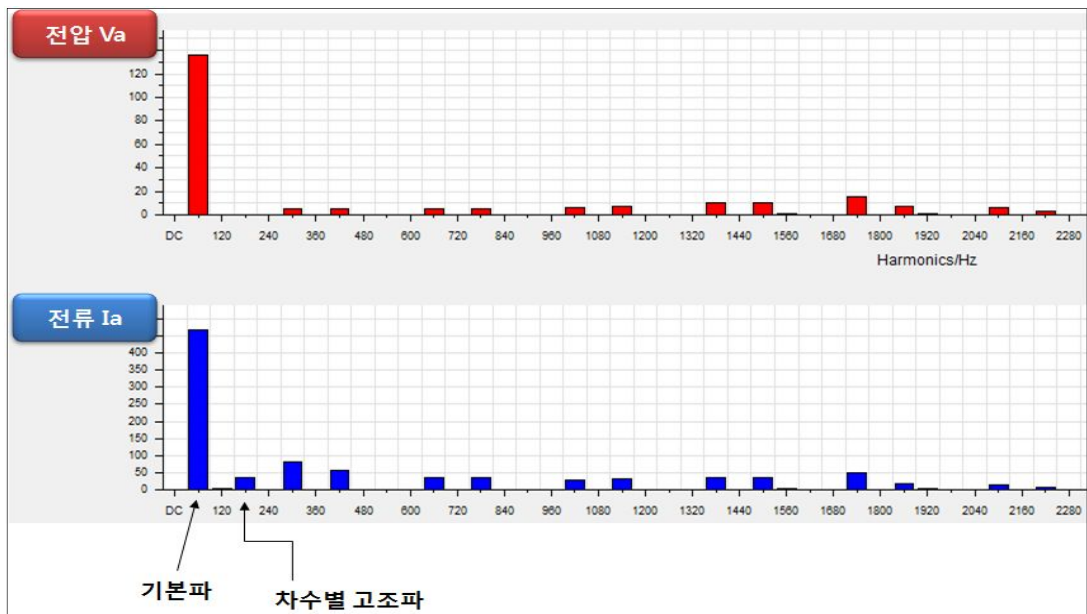


Figure 49. Analyzing harmonic of voltage and current tested in Unit-D

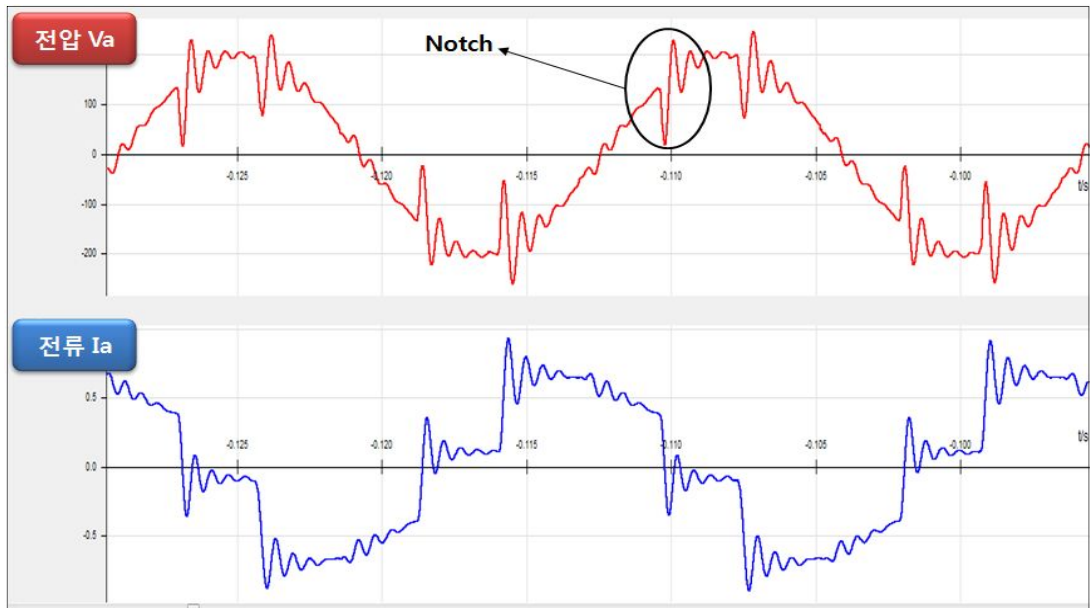


Figure 50. Waveform of voltage and current tested in Unit-E

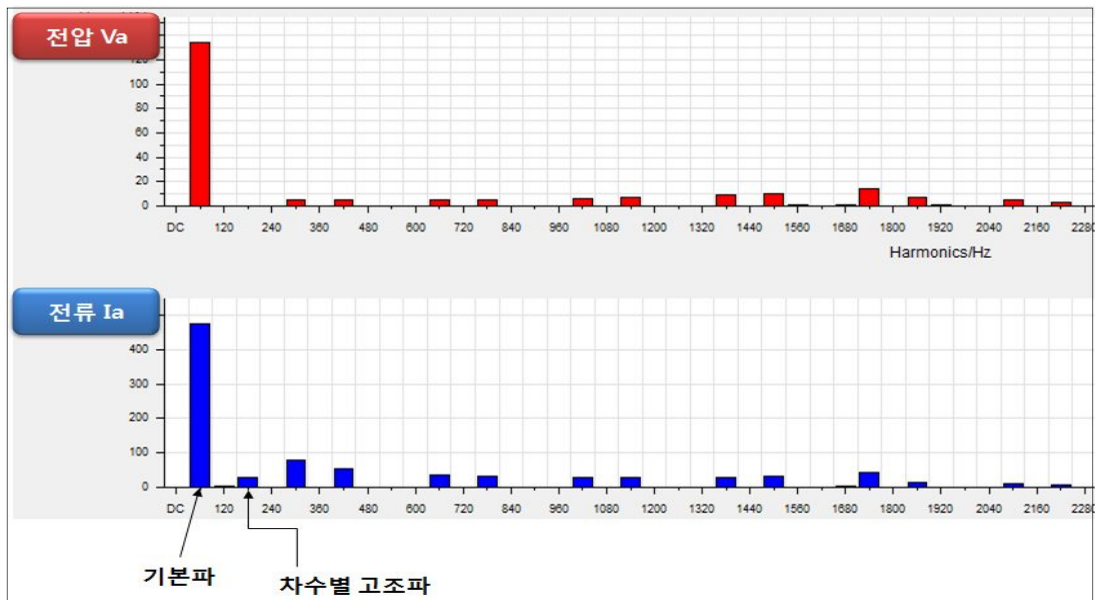


Figure 51. Analyzing harmonic of voltage and current tested in Unit-E

## 나. 제어봉 구동장치 제어계통 R-C 필터 설치 및 개선 결과 분석

고조파 저감 대책들 중 원자력발전소에 가장 적합한 방안인 3상 전원에 발생된 고조파 성분을 저항으로 태워 제거하기 위한 저감용 필터를 설치하였다. Figure 52. 의 ② CEDMCS 정류회로에서 발생된 고조파가 ① MG Set에 유입되기 전에 3상 전원에 병렬로 설치된 ③의 고조파 저감용 R-C 필터에서 제거된다.

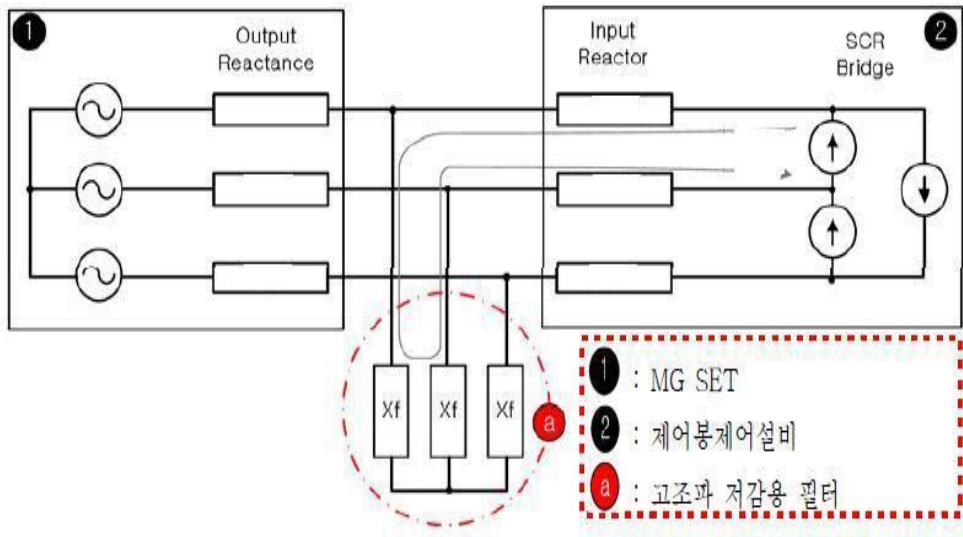


Figure 52. Installation of the filter for harmonic reduction

CEDMCS에 R-C 필터 설치 전/후, 설치 수량에 따른 파형을 비교분석하여 고조파 왜형률(THD), 순시 최대전압, Notch 등에 대한 개선효과를 검증하기 위하여 국내 원전 D호기에서 MG Set 출력파형을 재측정하였다.

CEDMCS R-C 필터를 추가 설치함에 따라 Table 7. 에서 나타낸 바와 같이 단독운전 기준으로 전압 THD는 35%에서 21.4%로, 최대 순시전압 크기는 283.0 V<sub>peak</sub>에서 205.3 V<sub>peak</sub>로 감소되었다.

Table 7. Variations in THD and Vpeak with number of filter installed

RC필터 수	전압고조파 왜형율(THD, %)		최대순시전압 (Vpeak)
	단독운전	병렬운전	
미설치	35 이상	23.9	283.0
3 대	31.2	19.2	223.1
4 대	29.4	17.6	217.7
8 대	21.4	14.6	205.3

전압파형은 R-C필터 4대 설치시 Notch의 Depth, 지속시간은 변동 없으나, Ringing 현상과 Notch 회복 과정에서의 전압 급상승(Over Shooting) 현상은 저감되었다[Figure 53. ①구간]. R-C필터 8대 설치 한 후에는 전반적으로 Notch, Ringing, 전압 급상승 등의 파형왜곡 현상이 완화되었다[Figure 53. ②구간].

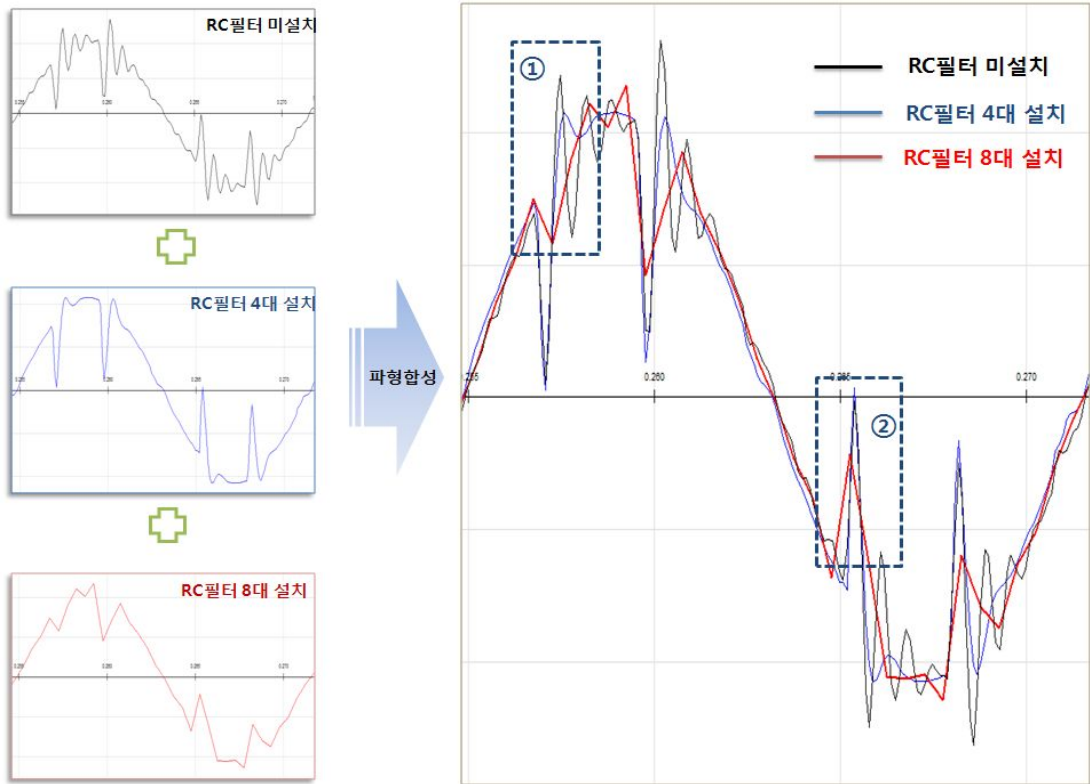


Figure 53. Waveform graph in accordance with the installation quantity of filter

따라서, 고조파 저감용 필터를 3상 전원에 병렬로 설치함으로써 MG Set 동기투입이 가능하게 하고 CEDMCS UVR의 소손을 방지할 수 있는 것으로 확인되었다. 또한 Notch, Ringing, 전압 급상승 등의 파형왜곡 현상이 완화되어 MG Set의 운전 신뢰성과 CEDM의 구동 안정성을 향상시킬 것으로 판단된다.

## 제 4 장 결 론

원자력 발전소 CEDM 전원공급 설비인 MG Set의 전원공급 안정성 향상을 위해 기계적, 전기적 특성 분석 및 문제점 도출을 통해 최적화된 설비개선을 수행하고 결과를 검증했다.

한국표준형 원전 MG Set 발전기축 베어링 과열손상에 따른 기기정지등 시운전 이후 지속되고 있는 베어링 온도 불안정 요인을 근본적으로 해결하기 위해 베어링을 N Type에서 NU Type으로 변경했다. 그리고 V-Ring을 제거하고 전동기와 발전기 Inner/Outer Cap에 Felt Ring을 설치했다. 그 결과 베어링 온도가 71℃에서 41℃로 개선되었고, 진동 주파수도 안정되었다.

표준원전 MG Set의 전기적 보호신호가 신규원전 및 설비개선 발전소에 비해 취약하여, 병렬운전중인 MG Set 2대중 1대 고장발생시 고장파급 방지에 실패해서 발전정지까지 초래된 사례가 있었다. 이에따라 MG Set 보호 및 감시시스템을 신규원전 수준으로 개선했다. 별도의 보호계전기반을 신설하고 정지되는 연동사항을 수정했다. 또한, MG Set 정지회로의 접점을 역전력계전기 보조릴레이에서 역전력계전기로 변경하여 실제 역전력계전기가 동작한 상황에서만 정지조건을 형성할 수 있도록 했고, MCR 경보신호 접점을 역전력계전기에서 역전력계전기 보조릴레이로 변경하여 현장 보호계전기반에서 Reset을 수행해야 MCR 경보가 소거될 수 있도록 함으로써 역전력계전기 동작시 MCR에서 인지할 수 있는 경로를 확보하여 신뢰성을 향상시켰다.

CEDMCS를 디지털 기반 2중화 제어설비로 교체한 이후 CEDMCS 정류회로에서 파생된 고조파 증가로 전압파형 왜곡이 심화되고 전원계통의 순시최대전압이 상승하여 MG Set 동기투입 실패와 CEDMCS의 UVR 소손 가능성이 발견되었다. 이에따라, 기별 고조파 영향과 대책을 분석하여 CEDMCS에 R-C 필터를 설치했다. MG Set 출력전압 파형 실측을 통해 THD와 최대 순시전압 감소를 확인하여 MG Set의 동기투입과 CEDMCS측 UVR 소손방지가 가능함을 검증했다.

## 감 사

한빛 원자력본부 제2발전소 전기팀에서 총 3번의 계획예방정비를 거치면서, 더욱이 아내와 함께 두 아이를 돌보아야 하는 가장으로서 대학원 학업을 병행하는 것은 결코 쉬운 과정은 아니었습니다. 하지만, 학문적인 갈증은 늘 제게 아쉬움을 주었기에 용기를 내어 대학원에 진학하게 되었고, 속도는 느렸지만 조금이나마 목마름을 해소할 수 있었습니다.

조선대학교와 한빛 교육훈련센터를 번갈아 가며 수강한 2년여의 세월이 벌써 훌쩍 지나가고 석사논문 제출이라는 마지막 단계까지 왔습니다. 처음 시작할 때는 석사학위 취득이라는 목표를 과연 달성할 수 있을지 걱정이 앞섰지만 많은 분들의 도움 덕에 오늘을 이룰 수 있었습니다.

한빛본부 대학원생들을 위해 바쁜 시간도 쪼개어가며 열정으로 지도해주신 조선대학교 원자력공학과 정운관, 송종순, 이경진, 나만균 교수님께 감사를 드립니다. 특히 변함 없는 애정과 관심으로 너무나도 부족한 제자를 지도해 주시고 대한기계학회 신뢰성부문 2016년도 춘계학술대회와 한국압력기기공학회에 논문 발표와 논문집 등재를 하는데 따뜻한 조언과 격려를 아끼지 않으신 김진원 교수님께 감사를 드립니다. 또한 물심양면 아낌없는 지원으로 학업을 끝마치는데 큰 힘이 되었던 문중옥, 최진우 주임께도 진심으로 감사함을 전합니다.

마지막으로 말쑥꾸러기 여섯 살, 세 살 두 아들을 돌보며 힘들지만 내색 않고 용기를 북돋아 준 아내와, 존경하는 부모님께 사랑으로 보답 할 것을 약속하며 감사의 글을 마칩니다.

## 참고문헌

- [1] Youngjun Lee, A study on Matlab modeling of a motor generator set and application of static UPS as substitute, Chungnam National University, 1, (2012)
- [2] Tech systems, Technical Manual operation maintenance instruction for Control Element Drive Mechanism Motor Generator Set, 1-2 (1993)
- [3] KHNP, Unit-D&E Control Element Drive Mechanism operation procedure, 3 (2015)
- [4] KHNP, Unit-D&E System Manual, 522, 523 (2015)
- [5] KEPCO KPS, Maintenance Procedures of MG Set, 2, 3, 13 (2012)
- [6] KHNP, Technical Report related with Analysis of Bearing abnormal temperature rise of Unit-E MG Set, 7 (2012)
- [7] SKF, General Catalogue, 509 (2013)
- [8] KEPCO KPS, Controlling the temperature rise of Unit-E MG Set 02RN bearing, 15 (2012)
- [9] KHNP, Revision of MG Set protection and monitoring equipment specifications, 3 (2013)
- [10] IEEE Std 519, Recommended Practices and Requirements for Harmonic control in Electrical Power Systems, 56, 70, 71 (1992), 16 (2014)
- [11] KHNP Issue Report, Under Voltage Relay Malfunction of CEDMCS in Unit-C, 2 (2015)
- [12] EPRI Technical Report, Impact of Nonlinear Loads on Motor Generator Sets, 4-1, 5-1, 5-4 (2001)



## 저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20147277	과 정	석사
성 명	한글 : 최 일 영    한문 : 崔 日 榮    영문 : Choi Il-young				
주 소	전남 영광군 홍농읍 홍농로 546 한국수력원자력 사택 113동 1301호				
연락처	E-mail : digitaltv1@naver.com				
논문제목	원자력발전소 제어봉 구동장치 전원공급계통 신뢰도 증진에 관한 연구				
	A Study on Reliability Enhancement in Power Supply System of Control Element Drive Mechanism in NPPs				

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( O )    반대(    )

2016년 6월

저작자:    최 일 영    (인)

## 조선대학교 총장 귀하