



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](#)

2013년 8월  
석사학위논문

영광1,2호기 고압터빈정지밸브(TV)  
제어루프 이중화 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

여 현 우

영광1,2호기 고압터빈정지밸브(TV)

제어루프 이중화 연구

A Study on Duplexing of the HP TBN Throttle Valve  
Control System in Yeonggwang Unit #1, 2

2013년 8월 23일

조선대학교 대학원

원자력공학과

여 현 우

영광1,2호기 고압터빈정지밸브(TV)

제어루프 이중화 연구

지도교수 나 만 균

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 5월

조선대학교 대학원

원자력공학과

여 현 우

# 여현우의 석사학위논문을 인준함

위원장    조선대학교    교수 송 종 순 (인)

위    원    조선대학교    교수 정 운 관 (인)

위    원    조선대학교    교수 나 만 균 (인)

2013년 5월

조선대학교 대학원

# 목 차

표 목차 .....	iii
그림 목차 .....	v
ABSTRACT .....	vii
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 영광 1,2호기 터빈 제어 .....	2
제 1 절 터빈제어 일반 .....	2
1. 터빈제어 개요 .....	2
2. 최근 터빈제어 경향 .....	3
3. 터빈 제어장치의 변화 .....	4
제 2 절 영광 1,2호기 터빈제어계통(DEH) 고찰 .....	10
1. DEH 시스템 개요 .....	10
2. DEH Hardware 구성 .....	12
3. DEH 운전방식 .....	20
제 3 절 영광 1,2호기 터빈밸브제어에 관한 고찰 .....	21
1. 고압터빈 조절밸브(GV) 제어 .....	22
2. 고압터빈 정지밸브(TV) 제어 .....	25
3. 저압터빈 제어(IV) 및 정지(RSV)밸브 제어 .....	30
제 3 장 터빈정지밸브 제어루프 이중화 시뮬레이션 .....	31
제 1 절 터빈정지밸브 제어루프 구성 .....	31
1. 밸브 위치제어모듈(RVP) .....	31
2. 서보밸브(Servo Valve) .....	33
3. 밸브 개도검출기(LVDT) .....	36
제 2 절 제어루프 구성품 정비사례 분석 .....	37
1. 밸브 위치제어모듈(RVP) 고장 정비 #1 .....	37
2. 밸브 위치제어모듈(RVP) 고장 정비 #2 .....	41
3. 밸브 개도검출기(LVDT) 고장 정비 .....	43
제 3 절 제어루프 이중화 시뮬레이션 .....	46
1. 제어루프 이중화 방안 .....	46
2. 시뮬레이션 및 결과분석 .....	47

제 4 절 제어루프 개선 효과 분석 .....	56
제 4 장 결론 .....	57
참고문헌 .....	58

# 표 목 차

표 2.1	가동원전 터빈제어설비 현황 .....	9
표 2.2	영광1,2호기 DEH 교체 전·후 .....	10
표 2.3	DEH 소프트웨어 수정 이력 .....	11
표 2.4	DEH 제어기 구성 및 기능 .....	11
표 2.5	DEH I/O Module 구성 .....	16
표 2.6	I/O Module별 전력 소모량 .....	17
표 2.7	DEH 네트워크 구성 .....	19
표 2.8	DEH 운전방식 .....	20
표 2.9	영광 1,2호기 고압 및 저압터빈밸브 .....	21
표 3.1	영광 1,2호기 RVP Module 사양 .....	31
표 3.2	RVP LED 상태 진단 .....	33
표 3.3	TV #3 개도변화에 따른 운전변수 분석 .....	40
표 3.4	RVP 모듈 고장사례 .....	42
표 3.5	RVP 모듈 주요 고장 발생원인 .....	42
표 3.6	RVP 모듈 개선 전·후 비교 .....	43
표 3.7	고압터빈 조절밸브 제어루프 전환조건 .....	43
표 3.8	모의시험 결과 분석 .....	55



# 그림 목차

그림 2.1	발전소용 터빈 제어시스템의 기능 .....	2
그림 2.2	증기터빈 기본 제어 .....	3
그림 2.3	조속장치의 비교 .....	4
그림 2.4	터빈 회전속도 감소 (계통 부하 증가) .....	5
그림 2.5	전기식 조속기(터빈 속도 증가) .....	6
그림 2.6	디지털 제어기 개요 .....	8
그림 2.7	DEH 시스템 구성 .....	12
그림 2.8	DEH Control Cabinet 구성 .....	13
그림 2.9	DEH Operation Overview .....	13
그림 2.10	DEH Operator Console .....	11
그림 2.11	DEH Engineering Console .....	14
그림 2.12	DEH Controller Block Diagram .....	15
그림 2.13	DEH I/O Module 구성 .....	16
그림 2.14	I/O Termination Options .....	17
그림 2.15	Power Supply & Power Distribution Module .....	18
그림 2.16	전원회로 구성도 .....	18
그림 2.17	DEH Operation 화면(계통 병입전) .....	18
그림 2.18	영광1,2호기 증기밸브와 증기배관 .....	21
그림 2.19	고압터빈 조절밸브(GV) 구조도 .....	22
그림 2.20	TV/GV Opening Sequence .....	23
그림 2.21	MW / IMPULSE Feedback 전환화면 .....	24
그림 2.22	고압터빈 정지밸브(TV) 구조도 .....	25
그림 2.23	TV/GV 밸브 전환 운전원 화면 .....	26
그림 2.24	TV 제어도면 1 .....	27
그림 2.25	TV 제어도면 2 .....	28

그림 2.26	TV 제어도면 3 .....	29
그림 2.27	IV / RSV 구조도 .....	30
그림 2.28	고압 및 저압터빈밸브 유압회로도 .....	30
그림 3.1	제어루프 블록 다이어그램 .....	31
그림 3.2	RVP Module 구성 .....	32
그림 3.3	RVP 터미널 블록 결선 .....	32
그림 3.4	서보밸브 구조 .....	33
그림 3.5	Pilot 형식에 따른 서보밸브 종류 .....	34
그림 3.6	영광 1,2호기 서보루프 개략도 .....	32
그림 3.7	LVDT 내부 구조 .....	36
그림 3.8	제어 구성품 고장 발생현황 .....	37
그림 3.9	TV #3 단힘 관련 사건 개요 .....	39
그림 3.9	TV #3 개도변화에 따른 운전변수 .....	40
그림 3.11	TV #1 단힘 관련 사건 개요 .....	40
그림 3.12	RVP 고장 프로세스도 .....	41
그림 3.13	서보밸브 제어신호 상실시 제어유 유로 .....	42
그림 3.14	GV #3 위치지시 편차발생 관련 사건 개요 .....	44
그림 3.15	GV #3 위치지시값 추이 .....	45
그림 3.16	이중화 제어루프 개략도 .....	46
그림 3.17	서보밸브 결선 변경전·후 .....	47
그림 3.18	후비 RVP-B 모듈 고장 시험결과 .....	48
그림 3.19	후비 LVDT Secondary Coil-1 고장 시험 결과 .....	48
그림 3.20	후비 LVDT Secondary Coil-2 고장 시험 결과 .....	49
그림 3.21	후비 LVDT Primary Coil 고장 시험 결과 .....	49
그림 3.22	후비 Servo Coil-2 개방 시험 결과 .....	50
그림 3.23	후비 Servo Coil-2 단락 시험 결과 .....	50
그림 3.24	후비 RVP-B 모듈의 Serial Link 고장 시험 결과 .....	51
그림 3.25	제어 RVP-A 모듈 고장 시험결과 .....	51

그림 3.26	제어 LVDT Secondary Coil-1 고장 시험 결과 .....	52
그림 3.27	제어 LVDT Secondary Coil-2 고장 시험 결과 .....	52
그림 3.28	제어 LVDT Primary Coil 고장 시험 결과 .....	53
그림 3.29	제어 Servo Coil-2 개방 시험 결과 .....	53
그림 3.30	제어 Servo Coil-2 단락 시험 결과 .....	54

# ABSTRACT

## A Study on Duplexing of the HP TBN throttle valve Control System in Yeonggwang Unit #1 ,2

By Yeo, Hyun Woo

Adviser : Prof. Na, Man Gyun, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

In the nuclear power plant, the large scale of turbine is inevitable because of its characteristics using the saturated steam at the secondary side. The facility which surely controls the speed and the load of this large turbine and stops it safely in case of emergency is the DEH(Digital Electro-Hydraulic) control system.

The DEH control system for Yeonggwang unit #1, 2 controls of TV(Throttle Valve), GV(Governor valve), IV (Intercept Valve), and RV(Reheat Stop Valve) along with an amount of steam supplied to a high pressure turbine and a low pressure turbine in order to control the number of rotation of a turbine along with the output of a generator. Among them, TV(Throttle Valve) blocks steam incoming to a high pressure turbine in a condition which requires the operation of the turbine to be stopped, and control the speed of turbine when a power plant operates. In addition, TV (Throttle Valve) deactivates a nuclear reactor when 4 valves are all shut down due to valve control signal errors arisen during normal operation.

This paper is to analyze current status and classification of failures of a throttle valve controller of Yeonggwang unit #1 & 2 and to improve a throttle valve control loop which is composed a single control loop in order to increase the

reliability of an equipment and to enhance the maintenance convenience of an equipment and the stability of turbine output control.

In general, a control loop of TV is composed a RVP (R-Line valve positioner) which is in charge of the control of a valve location at a site upon signals of a controller (controller requested signals), a servo valve which generates a path for a hydraulic system along control signals, LVDT (Linear variable Differential Transformer) which is used for the detection of valve divergence, etc.

Failures of compositions of a control loop of TV arisen from January '06 till the time of writing have been analyzed and it shows that out of 17 failure cases, 8 cases were related with RVP (of 47%) and there were 4 cases of the reduction in output. The analysis of failure cases reveals that a single control loop has a negative side. When individual control equipment is failed, a signal processing process gets stopped and then, TV gets shut down as well.

Therefore, in order to improve a TV control system of Yeonggwang unit #1&2, a control loop of TV should be dualized. Dualization can be divided into RVP dualization, servo valve dualization and LVDT dualization, and if dualization is applied concurrently, it could be considered as a system with fault tolerance against a failure of a single control device.

In order to verify control features of dualized valve control loop, a dualized control loop was composed for conducting the comprehensive fail-over test which includes a primary/secondary position control module failure test, a servo valve coil opening/short-circuit test, a LVDT secondary coil-1/2 failure test, a serial link failure test, etc. and simulations were performed.

It is anticipated that the aforementioned study results would be used as reference data for improving the reliability of Turbine Control System (DEH) of an actual power plant.

# 제 1 장 서 론

원자력 발전소는 2차측에 포화 증기를 사용하는 특성 때문에 터빈의 대형화가 필연적이며 이러한 대형 터빈의 속도와 부하를 효율적이고 확실하게 제어하고 비상시 안전한 정지를 시킬 수 있는 설비가 DEH(Digital Electro-Hydraulic, 디지털유압제어)제어 계통이다.

DEH제어계통은 디지털 컴퓨터에 의하여 고압터빈정지밸브(TV:Throttle Valve), 고압터빈조절밸브(GV:Governor Valve), 저압터빈정지밸브(RV:Reheat Stop Valve), 저압터빈조절밸브(IV:Intercept Valve)를 제어하며 곧 터빈에 공급하는 증기의 양을 조절하여 터빈의 회전수와 발전기 출력을 제어한다. 이러한 제어기능 외에도 터빈을 구성하는 기계적인 부분(밀봉장치, 윤활장치, 유압장치, 기타보조기기 등)의 온도, 진동, 마모, 열응력, 상대팽창에 이르는 전반적인 감시기능과 과속도 등의 보호기능도 담당하고 있다.

영광 1,2호기의 DEH제어계통은 초기에 Westinghouse사에서 공급한 W2500 컴퓨터를 사용한 MOD II Model이 사용되었다. 그 후 2002년에 Westinghouse사의 분산 제어설비인 Ovation System을 사용한 MOD III Model로 교체되었다. 최근 다수의 Westinghouse형 원자력발전소 제어설비에 적용되어 설치되고 있는 분산 제어설비인 Ovation System에서 고압터빈밸브 제어기기 고장으로 출력감발 및 발전정지 등의 여러 문제점들이 발생되고 있는 추세에 있고 조사 결과 표준형 원전의 경우 고압터빈 정지밸브 제어루프가 이중화 또는 삼중화 되어 있어 단일기기 고장에 의한 밸브 닫힘현상이 발생되지 않는 것으로 나타났다.

이에 영광 1, 2호기 터빈정지밸브(TV) 제어기기 고장 발생현황 및 유형을 분석하고 현재 단일제어 루프로 구성된 터빈정지밸브(TV) 제어루프에 대한 최적의 개선 방안을 수립하여 설비신뢰성 확보 및 발전소 안정운전에 기여하고자 본 연구를 시작하게 되었다.

## 제 2 장 영광 1,2호기 터빈제어

### 제 1 절 터빈제어 일반

#### 1. 터빈제어 개요

발전소는 연료의 화학적 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 변환기구이며, 크게 보일러, 터빈 및 발전기로 구성된다. 보일러는 물을 증기로 바꾸는 장치이며, 여기서 분출되는 증기가 터빈과 발전기를 구동한다. 터빈은 증기 및 가스와 같은 압축성 유체의 흐름을 이용하여 충동력 또는 반동력으로 회전력을 얻는 기계장치이다. 여기서 증기를 이용하면 증기터빈, 연소가스를 이용하면 가스터빈이라 한다. 증기터빈은 증기의 열 에너지를 기계적 에너지(회전력)로 변환시키고, 동일 축에 연결된 발전기는 터빈에서 변환된 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 기계장치이다.[1],[2]

발전소의 궁극적인 목표인 발전기의 전기적 출력을 조절하기 위해 터빈의 회전력을 적절히 조절할 필요가 있으며, 이를 위해 터빈 제어시스템이 필요하다. 터빈 제어시스템은 발전소의 핵심 제어 설비 중 하나로서 발전기를 구동하는 터빈의 속도를 저속회전 상태에서 정격속도까지 승속한 후, 발전기가 전력계통에 병렬로 운전되면 전기출력을 조절하게 된다. 전기 품질의 가장 중요한 요소인 정격주파수 유지를 위해서도 터빈 제어시스템의 건전성은 필수적인 요소이다. 또한, 과속도 및 이상상태 발생시 유입 에너지를 차단하여 터빈을 위험 상황으로부터 보호한다.[1],[2]

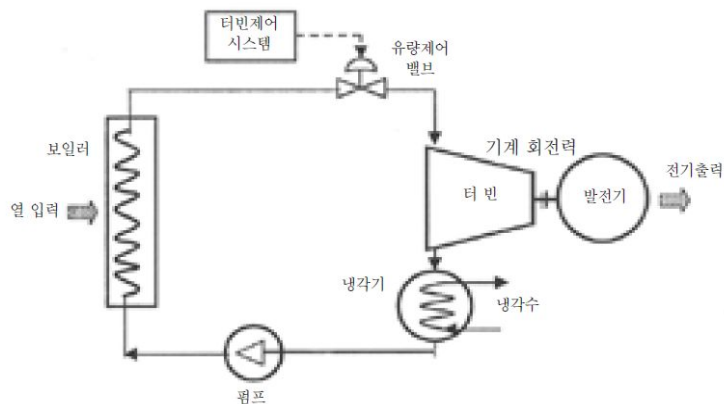


그림 2.1 발전소용 터빈 제어시스템의 기능

저속회전 상태에 있는 터빈을 기동하면 작동유체의 증가에 따라 속도가 상승한다. 그러나 터빈 축과 직결된 발전기가 전력계통에 병렬로 연결되면 작동유체의 유량(증기량) 즉, 터빈으로 유입되는 기계적 에너지가 증가해도 발전기의 출력, 전기적 발전량이 증가할 뿐 터빈의 속도 증가량은 계측할 수 없을 정도로 미세하다. 이것은 터빈의 속도가 증가하려 해도 전력계통의 큰 부하에 전기적으로 구속되어 있어서 속도의 증가량은 거의 없고 투입된 에너지는 전기적 출력으로 나타나는 것이므로 기본적으로는 터빈 속도제어의 결과로 발전기 출력이 발생된다. 따라서 터빈 제어기의 기본기능은 속도제어로서 궁극적으로 터빈의 속도를 조절하므로 조속기라 하며 기계식, 전기식, 디지털 전기식 등이 있다.[1],[2]

## 2. 최근의 터빈제어(최근 터빈제어 경향)

종래의 기계식 조속기는 정격속도의  $100\pm 6\%$  정도의 속도를 조절할 수 있었다. 그러나 근래의 디지털 전기식 조속기는 터빈의 전 범위에 걸쳐서 속도 및 가속을 설정을 통하여 속도를 자동 조절하며 자동 조절이 불가능한 상태에서는 후비 제어반에서 수동으로 제어할 수 있는 경우도 있으며 보통 2중화 또는 3중화로 설계·제작되어 하드웨어의 불시고장에 대비하고 있다.

근래에 건설되는 발전소의 터빈 제어 계통은 증기 온도 및 회전력 변동으로 인한 열응력과 원심응력을 산출하여 운전정보를 제공하는 열응력 감시 기능, 부하추종 운전 중 출력제한 회로 선택 운영시 역기능을 방지하기 위한 주파수 보정기능 등 여러 가지 기능을 갖추고 있다.[1],[3]

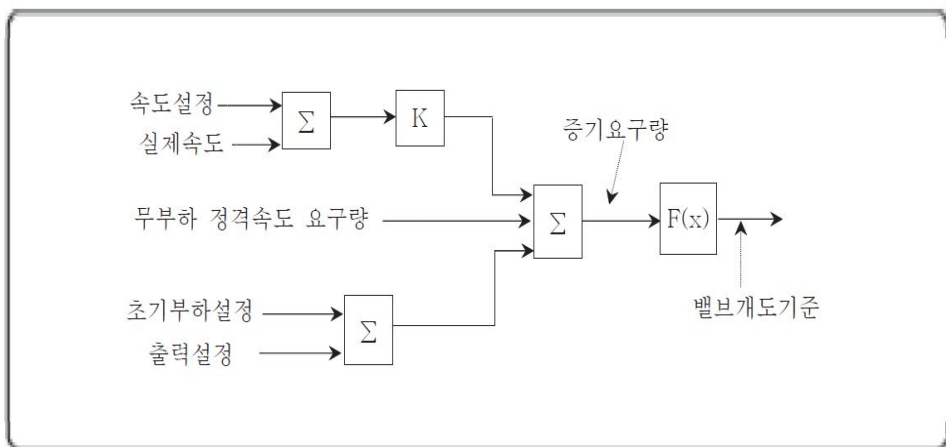


그림 2-2. 증기터빈 기본 제어



또한, 경미한 비정상 상태에 대하여는 경보를 발생하고 터빈 과속도를 비롯한 긴급 이상 상태 발생시 유입증기량을 차단함으로써 터빈을 보호하는 기능을 수행한다. 종래에 제어 대상을 증기유량 제어밸브의 개도에 국한하여 터빈속도와 발전기 출력만을 제어하는 기계식 조속기에서 현재는 터빈 보호장치와, 윤활장치, 증기밀봉장치, 저압터빈 배기 살수제어계통, 고압유 발생장치 등의 보조기기를 제어 대상에 수용하는 디지털 전기식의 터빈 제어시스템으로 발전하였으며 발전기 전압, 역률 및 자동 계통병입 등도 수용하는 추세이다. 발전소의 주기기인 발전기와 이의 원동기인 터빈을 제어하는데 있어서 진동, 윤활유 압력, 밀봉유 압력, 냉각수 온도, 복수기 진동 등 중요한 요소가 많이 있으나 그 중에서 가장 중요한 요소는 속도이다. 종래에 기계식 터빈 조속장치와는 달리 근래의 터빈 조속장치는 디지털 전기식이 개발되어 광범위하게 운전되고 있으며 컴퓨터를 이용한 제어이기 때문에 여러 가지 기능을 구현할 수 있고, 과속도에 보호에 관하여도 다양한 알고리즘이 개발되어 있다.[1],[3]

### 3. 터빈 제어장치 변화

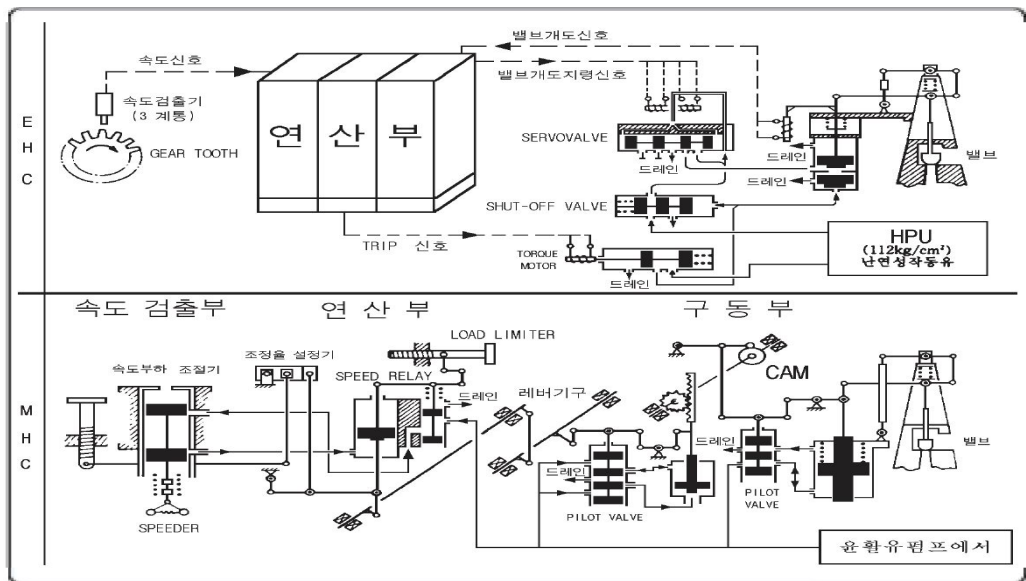


그림 2-3 조속장치의 비교

국내에서 현재 운전되고 있는 터빈 제어기는 크게 기계식(MHC : Mechanical Hydraulic Control), 전기식(EHC : Electric Hydraulic Control), 디지털 전기식(D-EHC : Digital-Electric Hydraulic Control)의 세 종류가 있으며 가장 큰 차이는

기계식에서는 제어신호의 검출, 전달, 연산 및 증폭을 레버, 캠, 링크 및 유압 릴레이, 피스톤 등의 기계적 수단에 의지하고 전기식에서는 연산증폭기, 트랜지스터 등의 전기신호로 수행한다는 점이다.[1],[3]

초기에는 기계식 조속기가 주류를 이루었으나 근래에는 연산증폭기와 트랜지스터 등 전자소자를 이용한 전기식 조속기가 많이 채용되어 운전되었으며, 현재는 중앙처리장치 및 입출력 모듈에 마이크로프로세서를 이용한 디지털 전기식 터빈 제어 시스템이 주류를 이루고 있다. 또한, 기계식 조속기와 전기식 조속기는 경년 열화에 따라 디지털 방식으로 개선되고 있는 추세이다.[1],[3]

### 가. 기계식 조속기(MHC)

기계식 조속기는 터빈 축에 직결 또는 기어에 연결되어 회전하는 원심 추(Fly Weight)의 속도변동에 따른 원심력 변화를 이용하여 터빈의 회전수 변화를 검출하는 방식으로 속도조정 가능 범위는 정격속도 $\pm 6\%$  정도이며 정상운전 중 속도조정을 변경할 수 없다. 또, 속도조정 범위가 전기식에 비하여 대단히 좁고 운전 조작이 어려우며 기계적 연결부위로 인하여 부동대가 크므로 주파수 제어성능이 불량하고 추력의 증·감발이 느리다. 근래에 건설되는 발전소에서는 채용되지 않고 있으며 운전중인 설비도 경제성을 고려하여 유지정비가 편리하고 성능이 우수하며 운전이 용이한 디지털 전기식으로 점차 개조되고 있는 추세이다.[1],[3]

<그림 1-4>은 기계식 조속기의 핵심부분인 원심추를 이용하여 부하가 증가하면 터빈 속도가 감소하여 원심력이 감소하므로 원심추는 중력에 의하여 아래 방향으로 이동하고 밸브는 열린다. 따라서 작동유체가 터빈으로 유입됨에 따라 속도가 상승한다. 즉, 부하가 발전기인 경우 발전기 출력이 증가한다.[1],[3]

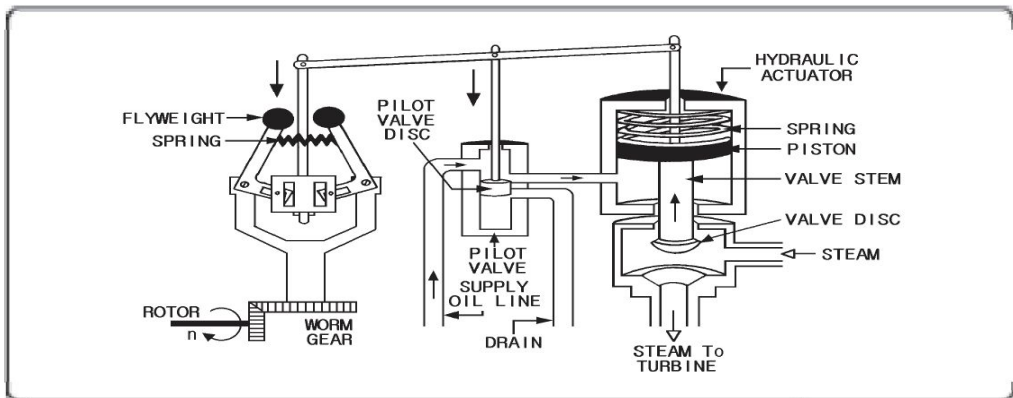


그림 2-4 터빈 회전속도 감소 (계통 부하 증가)

부하가 감소하면 터빈 속도가 증가하여 스프링 장력을 이겨 주는 바깥쪽으로 움직이게 되고 로드( Rod)는 위로 올라가면서 밸브는 닫힌다. 그러므로 작동유체가 터빈으로 유입되는 것을 차단하므로 속도는 감소한다. 즉 부하가 발전기인 경우 발전기 출력을 감소시킨다.[1],[3]

## 나. 전기식 조속기(EHC)

초기에는 기계식 조속기가 주류를 이루었으나 근래에는 전기식이 주류를 이루었으며 전기식이 등장한 배경은 다음과 같다.[1],[3]

첫째, 터빈·발전기의 대용량화 및 제작기술의 진보에 따라 단위 출력당 회전자의 관성이 현저히 감소하여 부하 차단시 과속도 발생가능성이 증가하여 기존의 기계식 조속기로는 부하 차단시 속도 상승을 규정치 이하로 유지하는 것이 어렵게 되었다.

둘째, 기계식 제어장치가 대형화되어 신호전달의 메카니즘(Mechanism)에 기계적 시간지연과 관성이 증가하였으며 동시에 여러 개의 증기밸브를 구동하는 서보모터(Servo Motor)의 구경이 증가하여 시정수가 증가하였다. 따라서 응답이 빠른 제어기의 필요성이 대두 되었다.

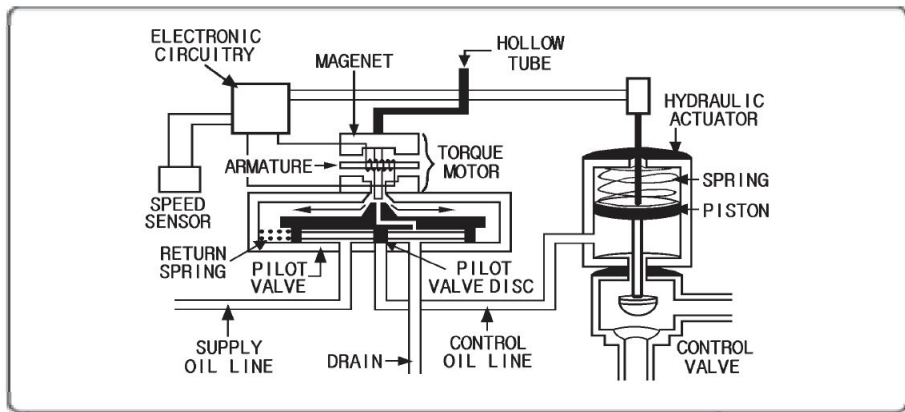


그림 2-5 전기식 조속기(터빈 속도 증가)

셋째, 전자기술의 발달과 원자력발전소 운용이 다양화되는 추세에서 컴퓨터를 중심으로 한 대규모의 자동화 제어가 가능하게 되었다. 한편으로는 계산기와 제어장치를 원활하게 연결할 수 있는 기술이 발달하여 전기식 조속기가 개발되었다. 터빈 속도는 보통 터빈 전면 또는 발전기 끝단의 회전축에 직결되어 운전되는 영구자석 발전기(PMG : Permanent Magnet Generator)의 교류전압을 지류로 변환하여 검출한다. 기계식과 비교하여 전기식 조속기는 다음과 같은 특징이 있다.[1],[3]

- (1) 터빈의 속도를 전기적인 장치로 검출
- (2) 연산부 및 신호전달부가 모두 전기회로로 구성
- (3) 윤활유와는 별도로 설치된 별도의 고압 제어유 사용
- (4) 연산의 정밀도가 높고 비선형 보정을 정확하게 수행
- (5) 전기회로를 사용하기 때문에 검출기와 제어회로 다중화 가능
- (6) 전주분사 운전과 부분분사 운전의 전환이 용이
- (7) 터빈 기동시 용이하게 자동화 및 정상운전 시 속도조정을 변경 가능
- (8) 순시 속도 변동율이 작음
- (9) 속도조정 범위가 대단히 넓음
- (10) 부동대가 작음

#### 다. 디지털-전기식 조속기(D-EHC)

터빈의 용량증대와 신뢰성, 중간부하 운용, 변압운전, 터빈 바이패스 운전 등 발전소 운영 방식의 다양화 요구에 부응하여 전기식 조속기에서 더욱 진보한 디지털 전기식 조속기가 개발되었고 근래에 건설되는 발전소는 여러 가지 부가기능을 수용한 디지털 제어시스템이 채용되고 있다. 이는 컴퓨터 기술을 이용하여 중앙처리장치(CPU : Central Processing Unit)를 중심으로 각각의 신호 종류별로 적합한 입출력모듈을 장착한 형태의 시스템이다.[1],[3]

아날로그 입력신호는 입력 모듈의 변환기를 통하여 디지털 신호로 변환한 후 중앙처리장치에서 신호처리를 수행하고 아날로그 출력신호는 중앙처리장치의 디지털 신호를 출력모듈에서 아날로그 신호로 변환한 후 현장으로 송출한다. 디지털 제어시스템은 보호부분과 제어부분을 별도 시스템으로 하여 완전히 분리하던 종래의 방식과 많은 차이를 보이고 있다. 터빈 제어의 기본 기능인 속도 및 출력 조절은 물론 보호 기능이 통합되어 있다. 또한, 주증기 압력제한, 복수기 진공제한, 발전기 고정자 냉각수 상실시 출력감발 등의 부가기능과 경보, 운전이력, 보조기기 기동정지 등을 동일 시스템 내에 수용하여 통합 터빈 제어시스템으로 탈바꿈 되었다.

속도검출은 터빈 축에 원주방향으로 부착된 치차를 마주 보도록 설치된 속도 검출기를 이용한다. 영구자석에서 발생하는 자속과 터빈의 축에 따라 회전하는 치차가 쇠교하여 페러데이의 전자유도 법칙에 의하여 중간에 위치한 코일에 정현파로 유도되는 기전력의 주파수를 검출하면 터빈의 현재 속도를 측정할 수 있다. [1],[3]

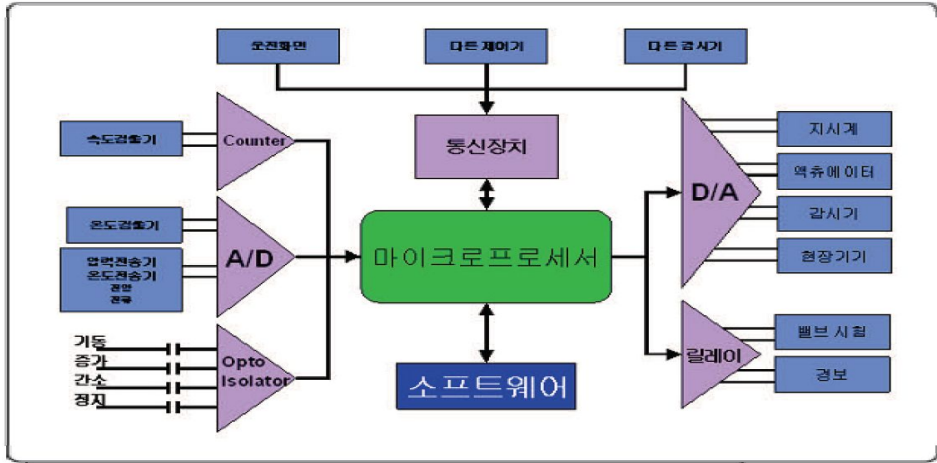


그림 2-6 디지털 제어기 개요

디지털 제어시스템은 마이크로 프로세서와 메모리 소자 등을 사용하며 제어연산은 소프트웨어로 수행한다. 근래에 건설되는 원자력 발전소 터빈 제어시스템에 채용되고 있다. 디지털 전기식 터빈 제어시스템은 종래의 전기식과 비교하여 부하 응답성이 더욱 향상되었으며 다음과 같은 특징을 갖추고 있다.[1],[3]

- (1) 다중화가 보다 철저하게 이루어져 안정성이 높다
- (2) 정상운전 상태에서도 용이하게 보수 가능
- (3) 아날로그에 비해 제어모듈의 수가 감소되고 점유공간이 적다
- (4) 자체 고장진단 기능을 갖추고 있어서 고장발견이 용이하다
- (5) 중앙처리장치와 기억장치를 이용하여 프로그램으로 처리하므로 하드웨어나 배선의 변경이 없이도 제어회로의 수정, 보완 및 신설과 증설이 용이하다
- (6) 터빈 열응력 제어와 운용 등의 다양한 선택사항이 있다.
- (7) 속도조정을 변경이 더욱 용이하며 출력대별로 용이하게 가변할 수 있다.
- (8) 고집적화에 의한 상대적인 가격의 저하와 배선작업 및 조정기간의 단축에 의해 경제성이 우수하다.
- (9) 컴퓨터를 이용한 운전조작반과 키보드 및 마우스 등의 조작으로 플랜트의 감시가 용이하다.
- (10) 제어회로의 파악이 어려우나 개선점이 발견되면 쉽게 수행할 수 있다.

표 2.1 가동원전 터빈제어설비 현황

호기	출력	Platform	제작사	공급사	설비개선	년도			소프트웨어		조속기 제어밸브	LVDT 다중화
						설치	1차	2차	Logic	HMI		
고리1	587	Micro-Net	Woodward	전력연구원	GEC->Woodward	1978	2003		Gap v2.10	Gap v2.10	ABEX	2중화
고리2	650	Micro-Net	Woodward	전력연구원	GEC->Woodward	1983	2005		Gap v2.10	Gap v2.10	ABEX	2중화
고리3	992	Micro-Net	Woodward	전력연구원	GEC->Woodward	1985	2008		Gap v2.16	Gap v2.16	STAR	2중화
고리4	992	Micro-Net	Woodward	전력연구원	GEC->Woodward	1986	2007		Gap v2.16	Gap v2.16	STAR	2중화
월성1	678	Micro-Net	Woodward	전력연구원	NEI >Woodward	1983	2006		Gap v5.03	Gap v5.03	ABEX	3중화
월성2	700	Mark V	GE	GE		1994			-	Cimplicity v6.1	ABEX	3중화
월성3	700	Mark V	GE	GE		1995			-	Cimplicity v6.1	ABEX, Moog	3중화
월성4	700	Mark V	GE	GE		1996			-	Cimplicity v6.1	ABEX, Moog	3중화
영광1	996	Ovation	W,H	Ovation		1984	2002	2009		Ovation3.0.2	Moog	2중화
영광2	996	Ovation	W.H	Ovation		1984	2001	2008		Ovation3.0.2	Moog	2중화
영광3	1000	Micro-Net	Woodward	전력연구원		1994	2010				ABEX	3중화
영광4	1000	Micro-Net	Woodward	전력연구원		1994	2011				ABEX	3중화
영광5	1000	Mark V	GE	GE		1999			-	Cimplicity v6.1	ABEX	3중화
영광6	1000	Mark V	GE	GE		2000			-	Cimplicity v6.1	ABEX	3중화
울진1	986	REC70	Alstom	Alstom	REC70->Mark VIe	1987	2012		ToolboxST V04.02	Cimplicity v6.1	Moog	3중화
울진2	986	REC70	Alstom	Alstom	REC70->Mark VIe	1988	2013		ToolboxST V04.02	Cimplicity v6.1	Moog	3중화
울진3	1000	Mark V	GE	GE		1996			-	Cimplicity v6.1	Moog	3중화
울진4	1000	Mark V	GE	GE		1997			-	Cimplicity v6.1	Moog	3중화
울진5	1000	Mark V	GE	GE		2002			-	Cimplicity v6.1	ABEX	3중화
울진6	1000	Mark V	GE	GE		2003			-	Cimplicity v6.1	ABEX	3중화
신고리1	1000	Mark VI	두중	GE		2009			ToolboxST V11.05.08c	Cimplicity v6.1	Moog	3중화
신고리2	1000	Mark VI	두중	GE		2010			ToolboxST V11.05.08c	Cimplicity v6.1	Moog	3중화

## 제 2 절 영광1,2호기 터빈제어계통(DEH) 고찰

### 1. DEH 시스템 개요

#### 가. 설치 현황

W2500 컴퓨터를 이용한 MOD II Model이 사용되다 2002년에 Westinghouse 분산제어설비인 Ovation System 기반의 MOD III Model로 교체되었다.

- (1) 공급사 및 제작사 : 웨스팅하우스 (설치 이후 제작사가 Emerson으로 변경)
- (2) 설치모델 : Ovation (MOD III, 소프트웨어 버전 1.2)
- (3) 설치연도 : 1호기 - 2002. 2월, 2호기 - 2001. 9월

표 2.2 영광1,2호기 DEH 교체 전·후

항 목	MOD II	OVATION (MOD III)
CPU	W2500, 1 KHz	Pentium 133 ~ 400 MHz
Network	없음	FDDI(Fiber Distributed Data Interface) 및 Coper Media 사용, TCP/IP Protocol 내장 LAN, WAN 개방형 Network 구조 Network 절단 시 자동 Loop 절체(Fault Tolerance) ※ 교체 : FDDI → Fast Ethernet ('08.10)
I/O	40 Point/sec	Ovation I/O 사용, 200K Point/sec 저전력소모형
Controller	단일 제어기 (16 bit) 사용	PC구조의 PCI 32 bit Bus, 개방형 이중화 구조, 다양한 I/O 수용 ※ 교체 : OCR160 → OCR400 ('08.10)
User Interface	없음	PC(Microsoft windows NT4.0), Unix(Sun Microsystems Solaris), Java Browser 사용가능 ※ Windows 계열 Ovation 3.0.4로 업그레이드 ('08.10)
Data 관리	전용DB	Oracle ※ 교체 : 광디스크 저장장치 → DVD 매체 ('08.10)
Power Tools	사용자 환경 수정 불가능	Control Builder, Graphics Builer, Pointer Builder, Report Builder, Config Builder 제공으로 사용자환경 수정 가능
Security	없음	※ 신설 :네트워크 관리 서버(Domain Server), Anti Virus Server, Symantec Norton Anti-Virus Program ('08.10)

표 2.3 DEH 소프트웨어 수정 이력

순번	일자	개선내용	비고
1	'01. 9	○ 최신 디지털시스템(Ovation)으로 전면교체 - 두온시스템 / WestingHouse	선행 호기 기준
2	'07. 5	○ 고압터빈 내장품 교체 관련 프로그램 수정(해외 기술검토 반영) - Alstom / WestingHouse	
3	'07. 5	○ GV RVP 이중화 수행 관련 프로그램 보완 - Westinghouse / Emerson	
4	'07. 5	○ 발전기 및 여자기 교체관련 프로그램 수정 - 자체 수행 / Emerson 기술지원	
5	'08. 10	○ 설계결함 제어기 및 운영체제 개선(영광2호기 발전정지 후속조치, '07. 6) - 제어기 : OCR160 → OCR400 / 운영체제 : Unix → Windows - Westinghouse / Emerson	

#### 나. 설비 구성

DEH는 터빈 Control, Protection, Monitoring을 위해 3개의 다중화 제어패널로 구성되어 있으며 각각 전기적, 물리적으로 격리되어있다.[5],[8]

표 2.4 DEH 제어기 구성 및 기능

제어기	번호	세부내용
터빈거버너제어기 (OAC/OPC)	#3/#53	○ 터빈 기동 및 출력 운전중 운전원 명령에 따라 자동제어 수행 ○ 터빈 과속도 발생 방지 제어기능 수행 (정격속도의 105%, 1890 RPM 이상 속도 상승 방지)
터빈보호제어기 (ETS)	#2/#52	○ 터빈 정지 조건 발생시 터빈 정지신호 발생
운전변수감시제어기 (ATC/MSR/RSM)	#1/#51	○ 고압터빈 축 피로도 감시 ○ 터빈 및 발전기 운전변수 감시 ○ 터빈 증기 습분 분리 및 재열기 온도제어 ○ 발전기 및 발전기 보조계통 운전 변수 감시 ○ 터빈 자동운전 기능 수행(기동 => 전출력 도달)

○ OAC : Operator Auto Controller / ETS : Emergency Trip System

○ ATC : Automatic Turbine Controller / MSR : Reheat Temperature Controller

○ RSM : Rotor Stress Monitor



각 제어기는 이중화 구조(Primary, Secondary)로, 운전 중인 제어기 고장 시 후비 제어기로 자동 전환되며 주제어실에 경보메세지가 출력된다.

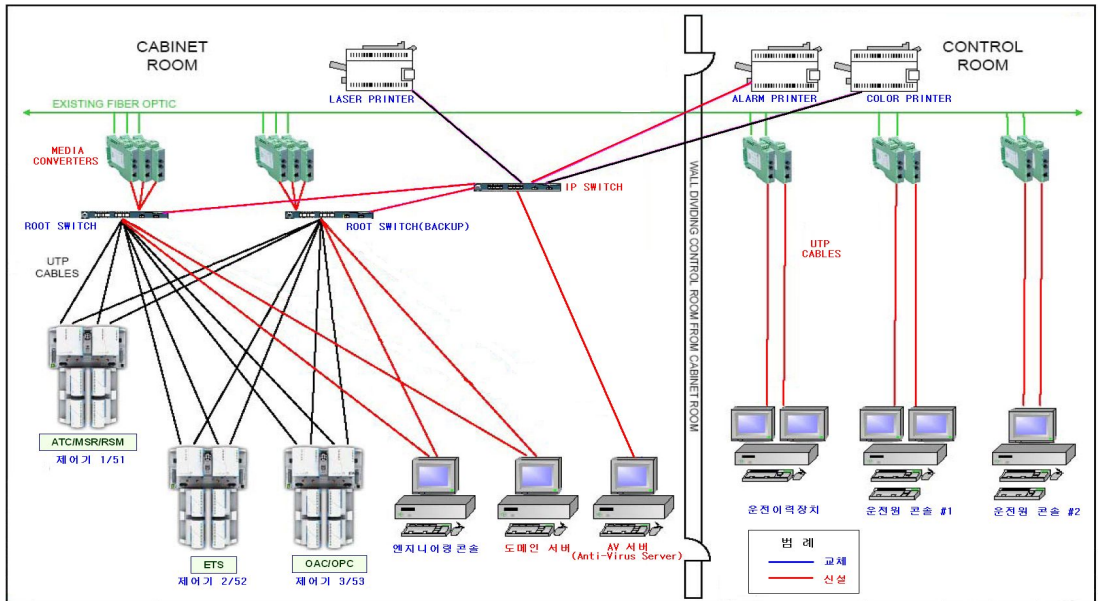


그림 2.7 DEH 시스템 구성

## 2. DEH Hardware 구성

### 가. Control Cabinet

영광 1, 2호기 터빈제어설비의 Control Cabinet은 5개로 구성되어 있다. 터빈거버너 제어(OAC/OPC), 터빈보호제어(ETS), 운전변수감시제어(ATC/MSR/RSM) 기능을 담당하는 Control Cabinet은 4개의 Branch로 구성되며 Branch #1과 #2는 Cabinet 전면, Branch #3과 #4는 후면에 설치되어 있다. 또한, Cabinet 전면 상부에는 이중화된 제어기가 설치되어 있고 후면 상부에는 두개의 전원공급기가 있어 Main과 Backup 전원공급을 담당한다.[8]

캐비닛	구성기기
# 1	ATC/MSR/RSM Controller, ETS controller, I/O Module, Relay Panel
# 2	OAC/OPC Controller, I/O Module, Power Distribution Panel, MW transducer
# 3	Termination panel
# 4	Termination panel
# 5	Engineering Console, Domain Server

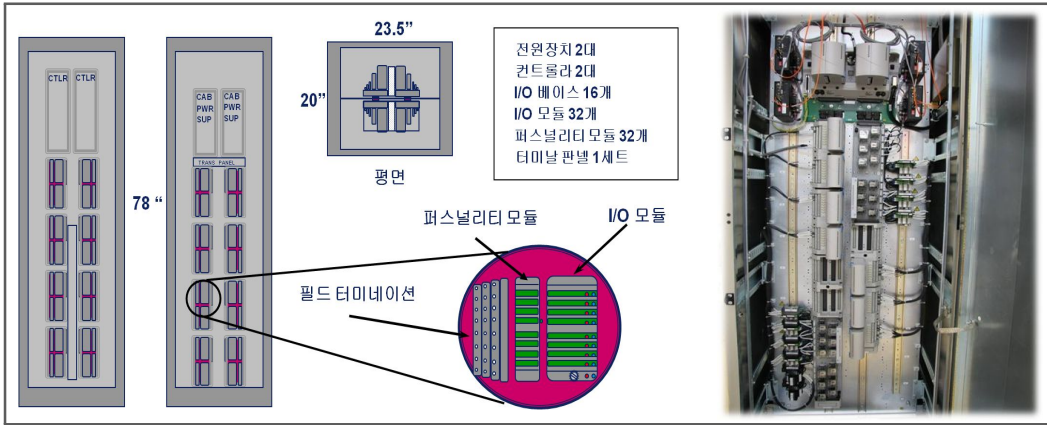


그림 2.8 DEH Control Cabinet 구성

### 나. Human machine Interface(HMI)

영광1,2호기 DEH System의 HMI는 그림 2-3에서 보여주듯이 운전원용 OWS(Operator Work Station), 관리자용인 EWS(Engineering Work Station)로 구성되어있다. 그 외에 경보 및 운전화면 그래픽출력용 프린터(Alarm Event, Hard Copier), 이중화된 통신장치(IP, Root Switch), 바이러스 보호기능 수행을 위한 Anti Virus Server, 네트워크 관리 서버(Domain Server)가 있다.[6]

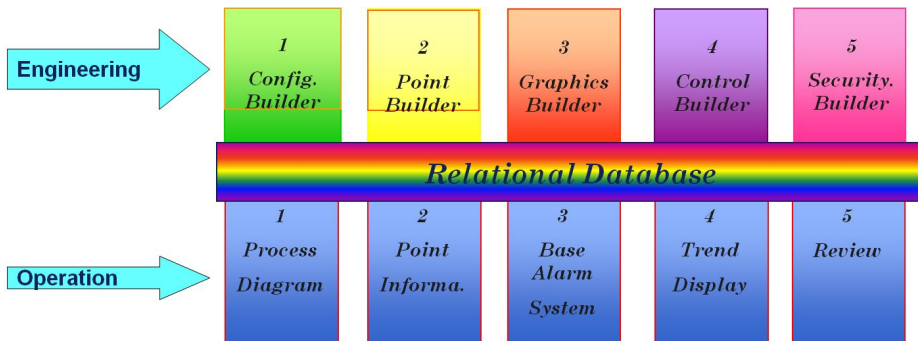
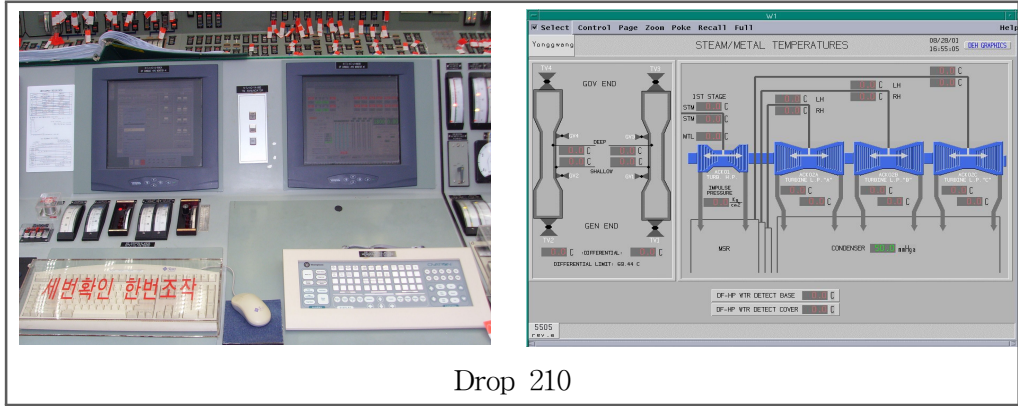


그림 2.9 DEH Operation Overview

#### (1) OWS(Operator Work Station)

운전원이 터빈의 속도, 출력등의 목표값 설정, 그리고 밸브 또는 보호장치의 온라인 시험 등 제어시스템에 명령을 내릴 때 그림 2.9와 같은 Operator Console(Drop 210, 211)을 이용한다. 다양한 그래픽으로 구현되어 터빈 운전 및 감시, 알람 및 이벤트 표시·저장, Real time 및 Historical Trend 분석을 가능하게 한다.[6]



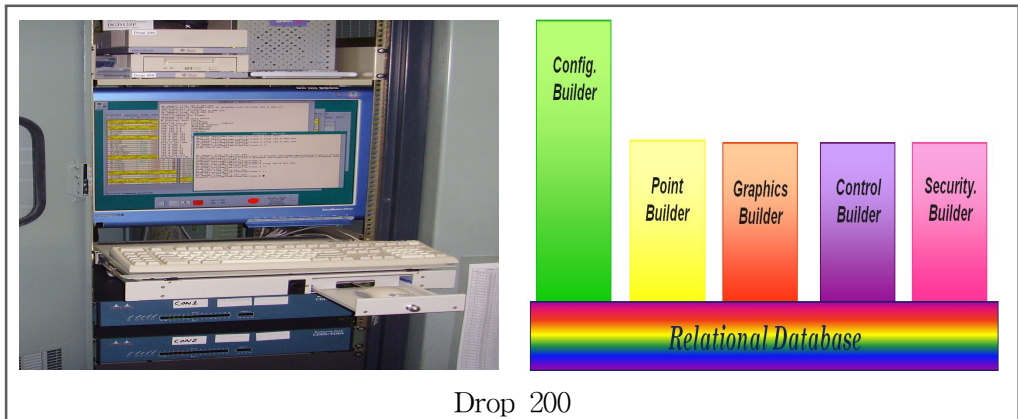
Drop 210

그림 2.10 DEH Operator Console

(2) EWS(Engineering Work Station)

관리자는 Operator Console(Drop 200)의 Control System Software를 이용하여 자세한 시스템 진단 및 분석, 환경설정(Configuration)이 가능하다.[6]

- 관계형 데이터베이스를 이용하는 시스템 구성
- 제어구간 및 제어속도 등과 같은 제어파라미터 설정
- 복잡한 다중레벨의 보안 구성 및 유지
- 내장된 풍부한 제어 알고리즘의 활용
- 프로그램 및 그래픽 작성 및 수정
- Report 및 Historical Data Configuration
- Ovation Engineering Tool(Developer Studio, Contol Builder 등)



Drop 200

그림 2.11 DEH Engineering Console

## 다. Control Module(=Controller)

Contoller는 고속 프로세서, DRAM, Flash Memory, Cache, Ethernet Port, 두 개의 RS232 Port를 수용하고 있으며 Control Cabinet 전면의 Branch #1과 #2 상단에 설치된다.[6]

- Full redundancy, Bumpless failover(tracking algorithms)
- Watchdog functions, I/O bus failure isolation
- Intel Pentium PC processor
- Simple or complex modulating and sequential control
- Originates up to 16,000 points
- Up to ten control areas, each with selectable speeds (10 ms - 30s)
- Off-line simulator capabilities
- Industry standard POSIX real-time operating system
- Industry standard PC architecture with passive PCI bus
- Direct interface to WDPF Q-Line and Ovation I/O products Local and remote I/O
- Supports connection to third-party, field-level devices
- DRAM : 32MB / Flash Memory : 20 MB
- Control Memory : 3 MB (300 Control Sheets)

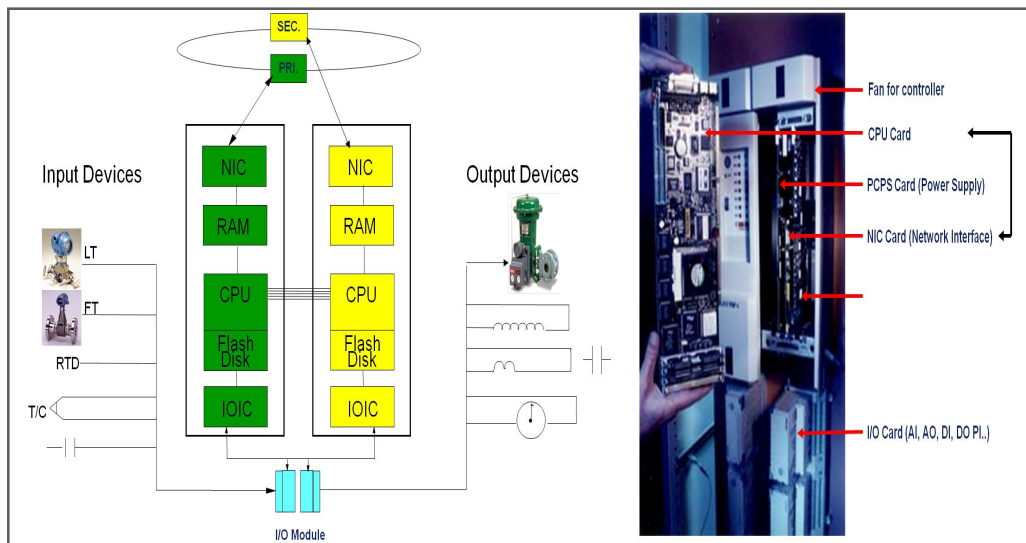


그림 2.12 DEH Controller Block Diagram

## 라. I/O Module

I/O Module은 Controller와 현장기기 사이를 연결(Interface) 시켜주고, 입력신호를 Controller가 읽을 수 있는 신호로 변환(Translation)하는 기능을 수행한다.[6],[9]

표 2.5 DEH I/O Module 구성

구성품	기능
BASE UNIT	<ul style="list-style-type: none"> <li>Printed circuit board(PCB)가 내장된 Plastic housing으로 구성</li> <li>Cabinet DIN Rail에 기계적으로 고정</li> <li>I/O module과 Controller를 연결</li> <li>Field wiring 기능제공 및 field signals을 I/O module에 연결</li> </ul>
E-module	<ul style="list-style-type: none"> <li>Field Signal을 Point Value로 변환시켜 Controller로 전송</li> </ul>
P-module	<ul style="list-style-type: none"> <li>Electronic Module에서 사용할 수 있는 신호로 변환 (Ex. 4~20mA → 1V~5V)</li> <li>Electronic Module 회로보호기능(P-module내 Fuse)</li> <li>Field Device Line에서 Short 발생시 전압 Spike 분산기능 제공</li> </ul>
HART	<ul style="list-style-type: none"> <li>현장 HART(<b>H</b>ighway <b>A</b>ddressable <b>R</b>emote <b>T</b>ransducer) Transmitter로부터 Analog신호(4~20mA)와 함께 Digital Sensor, 주변온도, Digital Pressure, 전송기 Status 등에 관한 Digital Data를 1개 Signal Line을 통해 최대 253개 신호 전송</li> </ul>
Relay Output Module	<ul style="list-style-type: none"> <li>현장에 설치된 기기를 Switch(On/Off)</li> <li>Address 시작은 반드시 Odd(홀수)로 시작(ex. 1, 3, 5, 7)</li> <li>Relay output Base크기는 Standard I/O Module Base의 1.5배</li> </ul>

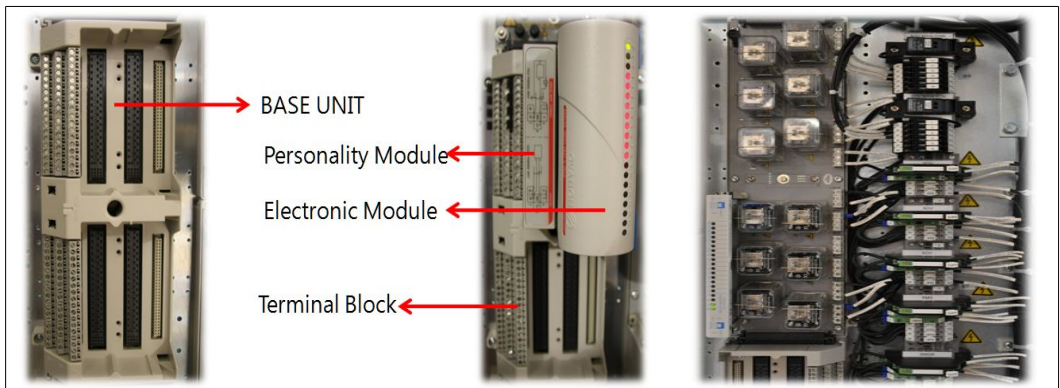


그림 2.13 DEH I/O Module 구성

주(Main)전원공급기로부터 I/O Module 내부 구동 전원을 공급받고 각 I/O Module 별로 내부 Fuse가 설치되어있다. I/O Module별 전력 소모량은 다음과 같다.[6],[9]

표 2.6 I/O Module별 전력 소모량

종류	소모량
Servo Module	4.32 W
Speed Module	6.4 W
Analog input Module	3.4 W
Analog output Module	2/4/5.4 W
Contact Input(SOE) Module	6.1 W
Digital Input Module	1.1 W

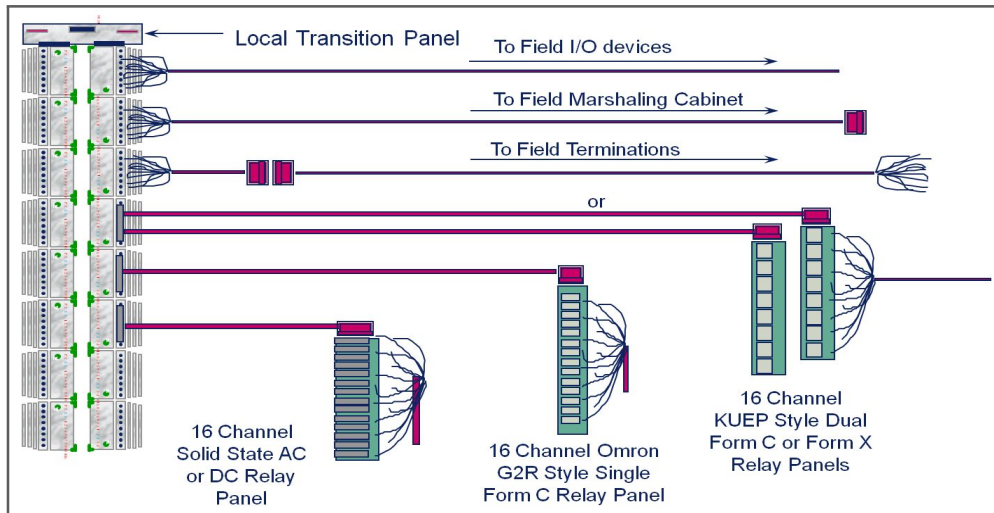


그림 2.14 I/O Termination Options

### 마. Power Supply

제어캐비닛의 전원은 각각 NQ-F002 와 NQ-F005에서 이중화된 교류전원을 공급 받으며 이중화된 전원공급기에 의해 24VDC 출력전압이 제어기로 공급된다. 전원공급기는 Main, Aux 24 VDC의 두 가지 전압을 출력하며, Main 24 VDC의 경우는 제어기 및 Branch에 설치된 각종 모듈에 전원을 공급하고, Aux 24 VDC의 경우는 판넬 내부 릴레이 구동용, 필드파워용으로 사용된다. 전원공급은 각 제어 판넬에 하나씩 설치된 PDM(Power Distribution Module)을 통하여 각 전원공급기로 공급된다.[8]

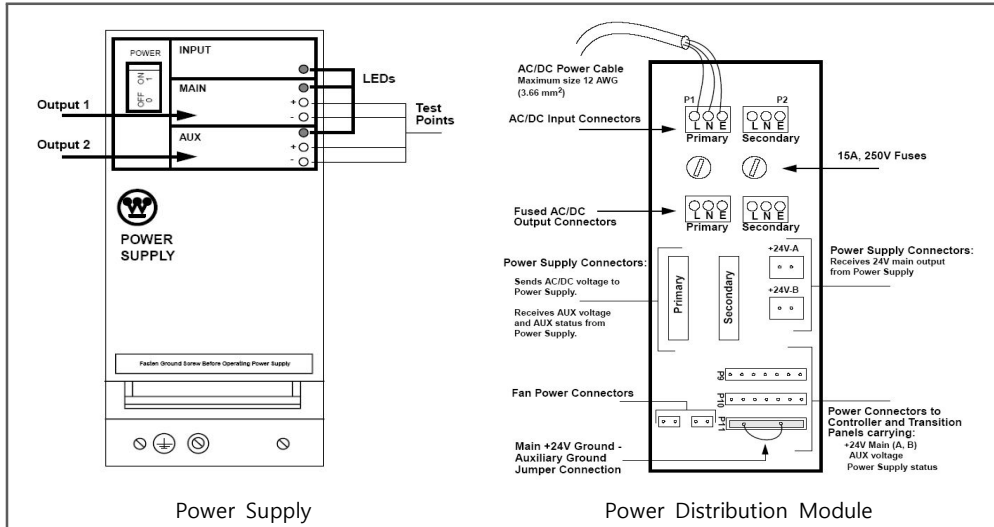


그림 2.15 Power Supply & Power Distribution Module

먼저 NQ-F002 와 NQ-F005의 120Vac는 각각 P1과 P2에 연결된다. 이 AC 전원은 각각 Primary, Secondary 커넥터를 통하여 전원공급기 Primary와 Secondary 전원 공급기에 공급되고, 각 전원공급기의 Aux 24Vdc 및 전원공급기 상태 정보는 이 커넥터를 통하여 다시 PDM에 보내진다. Main 24VDC는 별도의 커넥터를 통해 전원공급기에서 PDM으로 보내진다. PDM에서는 Primary와 Secondary 전원공급기의 출력(24V)은 Main과 Aux 개별 Diode 선택회로를 거친 후 Power 커넥터를 통하여 각 Branch의 Bus 및 각 Controller 내부 전원공급기 Card로 공급된다. Branch에 있는 전원공급 Bus는 Fuse가 없으며, 각 Branch에 설치된 Module 자체에 Fuse가 설치되어 있다.

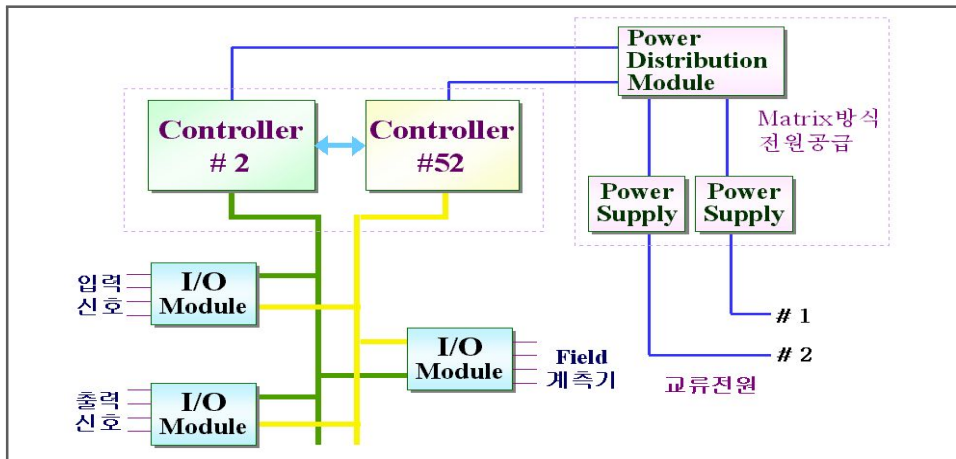


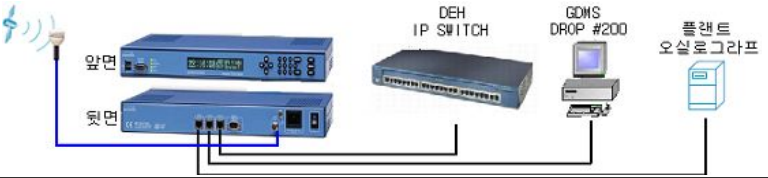
그림 2.16 전원회로 구성도 (터빈 거버너 제어기 기준)

## 바. Network

Fiber Optic 및 UTP(Unshielded Twisted Pair)를 사용하고 고속 대용량의 개방형 전송망(Open Network)으로 전송량은 100Mbps이다. 표준 Ethernet Protocol과 상용 네트워크 기술을 적용하여 고장이 적고 안정적이며 Intelligent Network Switches와 전이중 통신방식(Full-Duplex Communication)을 사용하여 데이터 충돌을 방지한다.[8]

- Ethernet Switches 이중화를 통한 Network 안정성 확보

표 2.7 DEH 네트워크 구성

구성품	기능
Router	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 다른 IP Address를 가진 네트워크를 상호 연결</li> </ul>
Root Switch	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 같은 IP Address를 가진 네트워크를 연결</li> <li>▪ 네트워크 중심역할, 분배허브(Distribution Hub) 형성</li> </ul>
IP Switch	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Traffic을 최소화하기 위해 사용</li> </ul>
Media Converter	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 데이터가 네트워크 상에서 일정한 전송흐름을 유지할 수 있도록 UTP Cable과 Fiber-optic Cable 사이의 데이터 신호를 변환시킴</li> </ul>
Time Server	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ NTP(Network Time Protocol) 통신방식으로 인공위성(GPS) 표준시각 신호를 수신하여, Lan Port를 통해 각 설비에 표준 시각 동기신호 제공</li> </ul> 
Cable	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ UTP Cable : 약 100m 이내 거리에서 사용               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Straight-Thru Cable : Switch ↔ Drop</li> <li>- Crossover Cable : Switch ↔ Switch)</li> </ul> </li> <li>▪ Fiber-optic Cable : 2km 내외 거리에서 사용</li> </ul>



### 3. DEH 운전 방식

표 2.8 DEH 운전방식[5],[8]

모드	운전방법
수동 운전 (Manual)	<ul style="list-style-type: none"> <li>수동원 조작 Manual Graphic 사용</li> <li>Raise/Lower(▲/ ▼) 버튼을 사용하여 TV와 GV 제어, 실제적인 제어는 DEH Controller가 담당</li> <li>수동운전 시 TV 및 GV 동작 속도(Full Valve Stroke)               <ul style="list-style-type: none"> <li>Normal : 180초, Fast : 45초, Rapid : 30초(GV 닫힘시만 적용)</li> </ul> </li> </ul>
자동운전 (Auto)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ATC 프로그램에 기초를 두고 있으며, 다음 사항은 운전원이 결정하고 이에 따른 자동운전을 DEH Controller가 담당               <ul style="list-style-type: none"> <li>Final Speed, Final Load, Change Rate, Valve Hi/Lo Limit</li> </ul> </li> </ul>
전 자동운전	<ul style="list-style-type: none"> <li>DEH에 내장된 ATC(Automatic Turbine Control) 프로그램이 터빈의 기동에서 정격 출력운전까지를 자동으로 제어</li> <li>ATC 조건 불만족시 자동운전모드(Operator Auto Mode)로 전환</li> </ul>

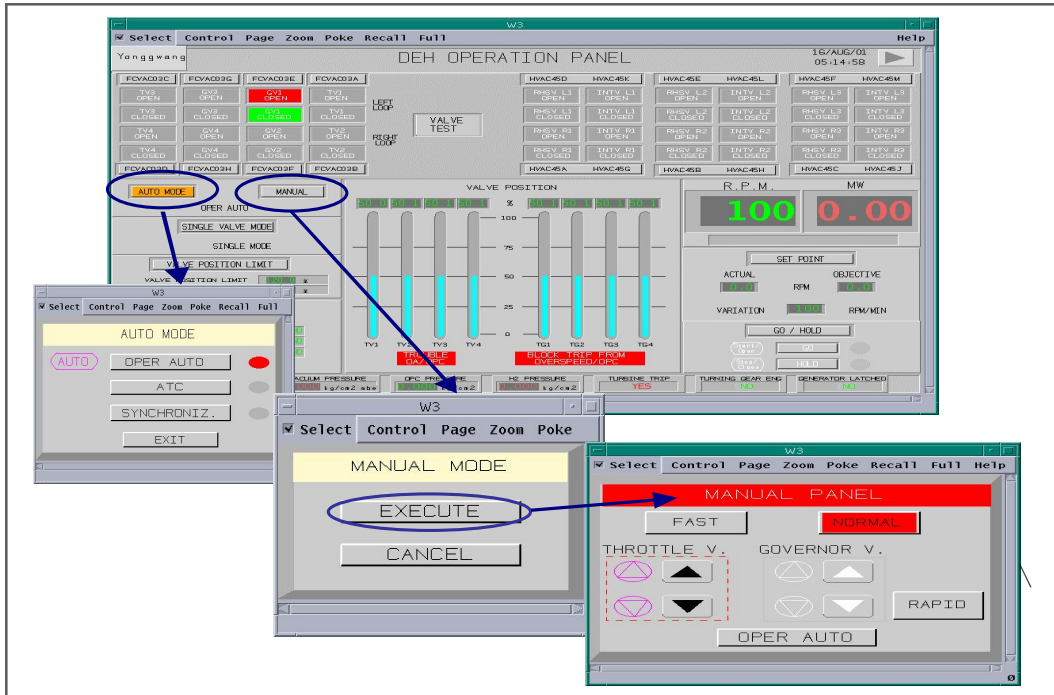


그림 2.17 DEH Operation 화면(계통 병입전)

### 제 3 절 영광1,2호기 터빈밸브제어에 대한 고찰

Digital Electro-Hydraulic(DEH) 제어계통은 디지털 컴퓨터에 의하여 TV(Throttle Valve), GV(Governor Valve), IV(Intercept Valve), RV(Reheat Stop Valve)를 제어하여 터빈에 공급하는 증기의 양을 조절하여 터빈의 회전수와 발전기 출력을 제어한다. 주요 구성기기로는 전자식 제어기와 제어기의 신호에 따라 유압계통의 유로를 만들어주는 서보밸브(Servo Valve)로 구성되어 있다. 제어기의 신호가 Servo Valve의 위치를 결정해 주며, 이 위치에 따라서 제어유의 통로가 형성된다. 증기밸브와 직결된 피스톤의 상하부에 유압이 작용하여 증기밸브를 열고 닫음으로써 터빈에 들어가는 증기량을 조절한다. 증기밸브를 열 때는 유압을 이용하고, 닫을 때는 스프링 및 증기압력에 의해 닫힌다. [5],[8]

표 2.9 영광 1,2호기 고압 및 저압터빈밸브

구 분	기기명	제작사	수 량 (호기)	구동기 기능
고압터빈정지밸브 (TV)	Actuator	Packer(미)	각 4대	기동시 터빈속도 제어 및 비상정지
	Servo V/V	Moog		
고압터빈조절밸브 (GV)	Actuator	Packer(미)	각 4대	발전기 출력제어
	Servo V/V	Moog		
저압터빈정지밸브 (RSV)	Actuator	Packer(미)	각 6대	비상정지
저압터빈조절밸브 (IV)				

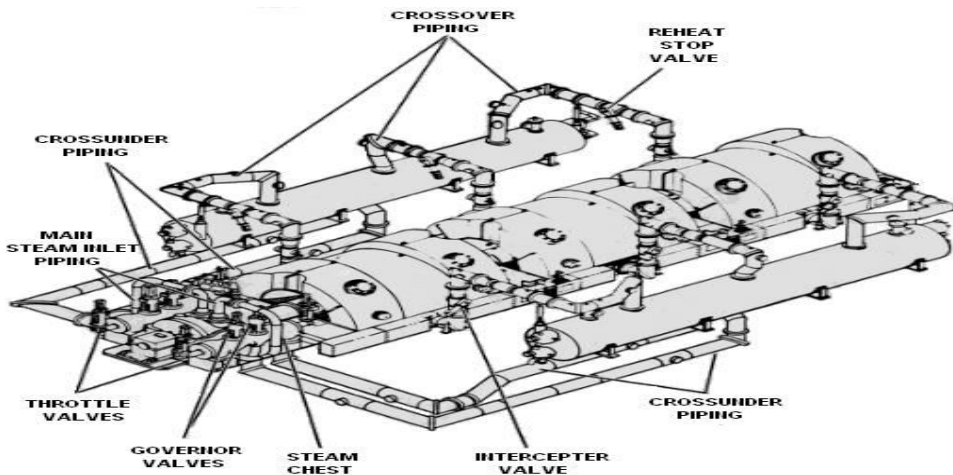
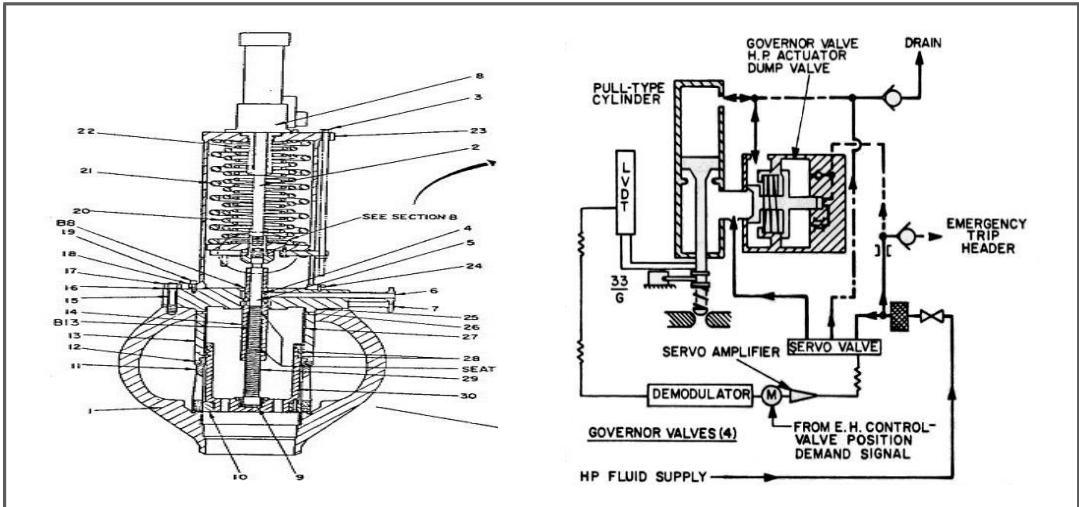


그림 2.18 영광1,2호기 증기밸브와 증기배관

# 1. 고압터빈 조절밸브(GV) 제어



- GV 전체 스트로크(Stroke) : 14 In(35.56 cm)
- GV LVDT 총 스트로크(Stroke) : ±10 In(25.4 cm)
- GV 제어 입력 요소
  - Turbine Speed, 발전기 유효전력(MW), HP Turbine 충동단(Impulse) 압력
- GV 제어 메카니즘
  - OPC 및 AST Header 가압 → Dump Valve 닫힘 → GV 열릴 조건 제공
  - DEH → Servo → Cylinder 가압 → GV Open

그림 2.19 고압터빈 조절밸브(GV) 구조도

## 가. Single 밸브 제어방식

밸브위치 요구 신호가 GV 4개에 동시에 전달되어 4개의 밸브가 함께 동작되도록 하는 운전방식이다. 터빈-발전기의 저온 기동 시점, 또는 터빈 운전시간이 고유수명 기간에 거의 도달한 상태일 경우엔 고압터빈의 회전자와 고정자간의 온도 편차를 최소화하여 터빈의 피로 현상을 감소시켜야 한다. 또한 비정상적인 큰 부하의 빠른 증/감발 현상은 고압터빈 충동단의 과도한 온도 변화를 유발하게 된다. 이러한 상황에서는 ‘Single 밸브’ 제어 형태가 ‘Sequential 밸브’ 제어에 비해 터빈의 피로 현상을 상대적으로 감소시킬 수 있다. [5],[8]

## 나. Sequential 밸브방식(2,3→1→4) : 개방순서 및 밸브그룹 변경가능

순차적으로 밸브를 동작하도록 하는 운전방식으로, 어떠한 밸브 그룹이 완전히 개방될 지점에 이르면 그 다음의 밸브 그룹이 서서히 열리기 시작하여 밸브 중첩운전을

시작하게 된다. 이는, 어떤 밸브 그룹이 완전히 개방될 때 다음의 밸브 위치를 적절히 감소시킴으로써 출력변동을 최소화시키게 한다. 계산된 각각의 밸브 그룹의 위치요구 신호는 분리된 단독 신호로서 GV에 전달된다. 저출력에서 Throttle Loss(밸브가 너무 적게 열려 있을 때 주증기 유량은 밸브를 통과하면서 분산되어 고압터빈 증동단에 충분한 일을 제공하지 못하는 것) 감소로 가능한 한 최상의 운전효율을 갖도록 한다.

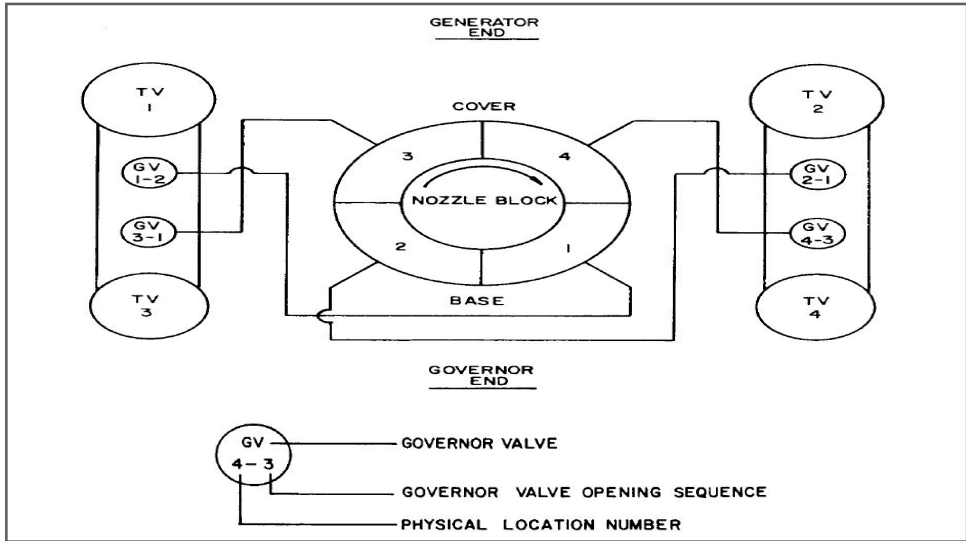


그림 2.20 TV/GV Opening Sequence

### 다. 제어모드 전환(Single ↔ Sequential)

DEH는 터빈-발전기의 다양한 운전상황에 따라 'Single' 또는 'Sequential' 형태를 선택하여 보다 효율적인 터빈 운영을 가능하게 한다. 밸브 제어 형태의 선택 및 전환은 DEH Operation Panel에서 SINGLE MODE / SEQUENTIAL MODE의 선택 여부에 따라 이루어지며 이는 DEH가 자동 상태에서만 가능하다. 밸브 제어모드의 전환은 터빈-발전기 출력 10~90% 사이에서, 'MW IN' 및 'IMPULSE PRESS OUT' 상태에서 실시해야 한다. Sequential 밸브 제어 형태에서 속도제어나 계통병입이 필요한 경우 터빈이 정지된 상태에서 Sequential 밸브 형태로 선택하도록 하며, 속도제어 상태이거나, 터빈 속도 1700rpm에서 밸브형태의 전환을 시도해서는 안 된다. Sequential 상태에서 DEH 자동모드의 운전 불능으로 수동모드로 절체 되면 Sequential 제어 신호는 현 상태에서 그대로 유지한다. 또한, 밸브 제어모드 전환 중 '터빈 런백 신호'가 발생되면 정상적으로 출력감발이 일어나게 되며 Valve Contingency 및 터빈 정지 신호 발생시 Sequential 모드에서 Single모드로 자동 전환된다. [5],[8]

- 밸브 전환시간 : 500 초

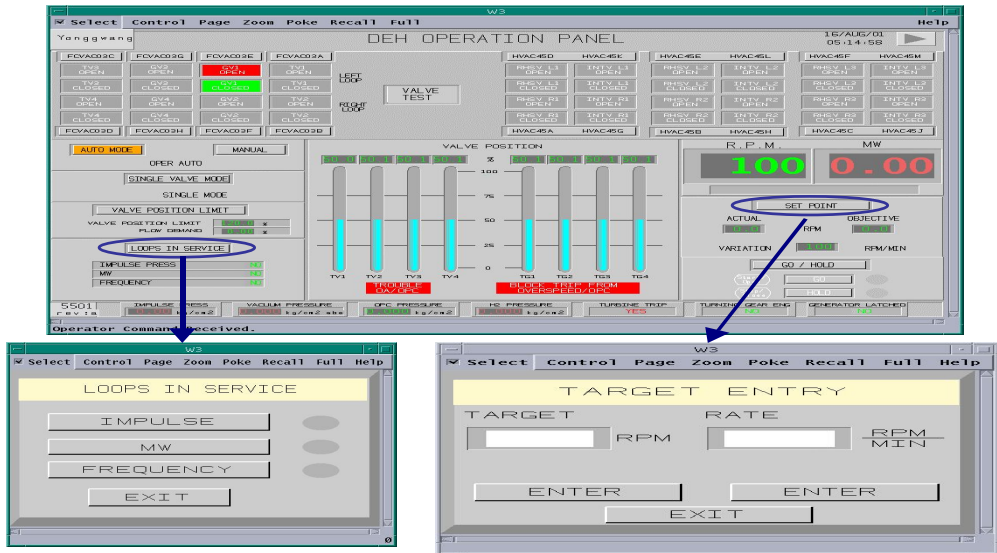


그림 2.21 MW / IMPULSE Feedback 전환화면

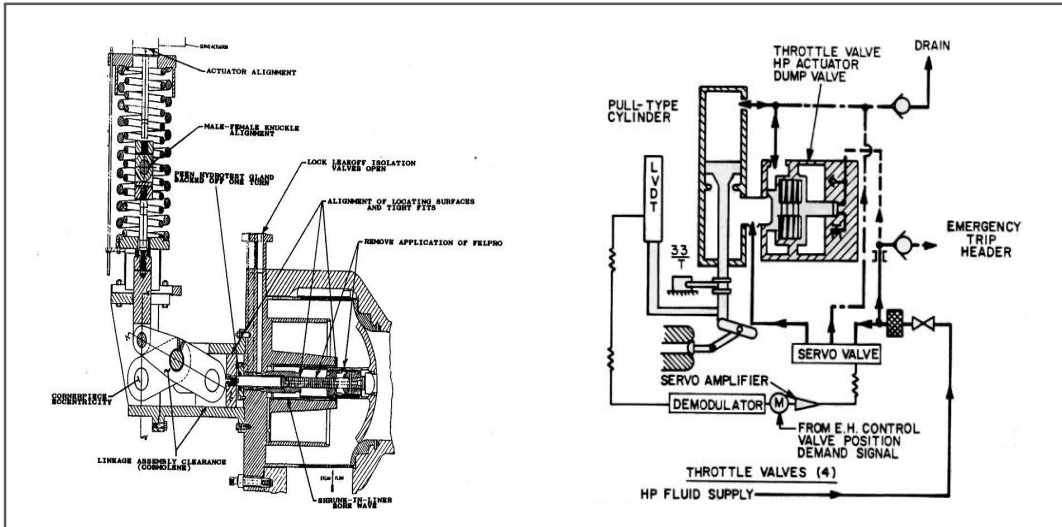
## 라. 밸브의 우발적 동작(Valve Contingency)

DEH에서 발생된 밸브 위치 요구 신호와 각 서보 증폭기로 궤환되는 현장밸브 위치 신호(LVDT)는 서로 비교하여 그 편차신호를 서보 작동기(Servo Actuator)로 공급하게 된다. 밸브 전환(TV / GV Transfer) 또는 고 증/감발울로 인한 부하변동, 밸브의 비정상적 동작등과 같이 TV 및 GV가 빠른 속도로 움직일 경우, DEH가 요구하는 밸브 위치와 'LVDT' 신호는 편차가 발생하게 된다. 이러한 현상은 서보 동작기가 DEH에서 요구한것 만큼 빨리 동작하지 못함에 기인하며, 어느 하나의 밸브라도 편차 정도가 10%(DEH Open Signal과 실제 밸브의 개도 차) 이상 증가하면 우발적 밸브 동작임을 판단하여 적절한 연동신호를 제공하게 된다. [5],[8]

이와 같은 'Valve Contingency' 신호는 'Sequential' 밸브 제어중이라면 밸브의 안정된 동작을 위해 'Single' 밸브 제어로 자동 절체 된다.

- TV : 정보만 발생
- GV :
  - 1개 발생 : 밸브 제어 Single Mode로 전환
  - 2개 이상 발생 : DEH 제어 수동모드로 전환

## 2. 고압터빈 정지밸브(TV) 제어



- TV 전체 스트로크(Stroke) : 15.376 In(39.06 cm)
- TV LVDT 총 스트로크(Stroke) :  $\pm 10$  In(25.4 cm)
- TV 제어 메카니즘  
 AST Header 가압  $\rightarrow$  Dump Valve 닫힘  $\rightarrow$  TV 열릴 조건 제공  
 $\rightarrow$  DEH  $\rightarrow$  Servo  $\rightarrow$  Cylinder 가압  $\rightarrow$  TV Open
- TV 연동 신호 : 한번 TV가 90%를 초과하여 열릴 경우에는 터빈 정지나 밸브 시험신호가 입력되지 않는 한 닫히지 않음
- TBN Latch시 TV Control

그림 2.22 고압터빈 정지밸브(TV) 구조도

터빈 속도는 TV에 의하여 초기에 제어되며, 이때 GV는 완전 열림 상태를 유지한다. 대략 터빈 속도 1700rpm에서 터빈 속도제어는 TV에서 GV로 전환시킨다. 전환 후 GV는 증기 유량을 조절하고, TV는 완전 열림 상태로 된다. 그 후 터빈은 정지가 발생 할 때까지 GV제어를 유지한다. 밸브 전환 요령은 DEH Operation Panel에서 'TRANSFER TV/GV'를 선택하면 된다. 터빈 속도가 약 1700rpm에 이를 때 밸브 전환 신호가 인입되면 DEH는 터빈 속도가 1700rpm 이하로 떨어질 때까지 GV를 닫는다. 이 전환과정에서의 속도제어는 TV가 수행하고, 밸브 제어가 TV에서 GV로 거의 전환된 상태, 즉 GV가 최소 위치(1700 - 30 = 1670rpm)까지 닫히면, TV는 개방 바이어스(Open Bias) 신호에 의해 90%까지 재빨리 열린다. 이때 TV 닫힘을 방지하기 위한 연동신호(THI)가 발생되며, 속도제어 신호는 GV로 옮겨지면서 GV 속도 제어

가 시작된다. 90%까지 열린 TV는 그 이후 완전 열림 위치까지 서서히 개방되고, 그 이후의 속도 및 부하제어 운전시 TV는 항상 완전 열림 상태를 유지한다.[5],[8]

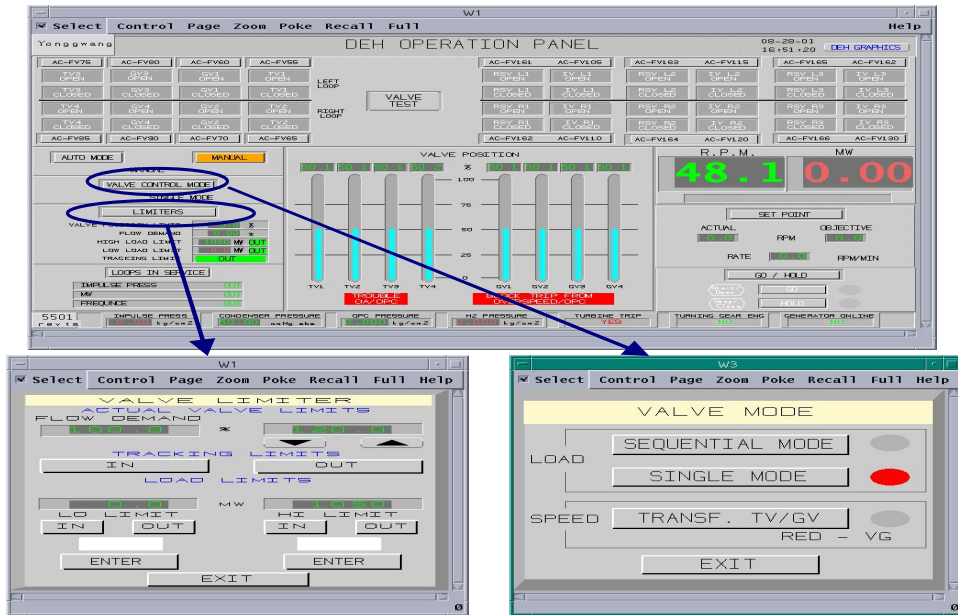


그림 2.23 TV/GV 밸브 전환 운전원 화면

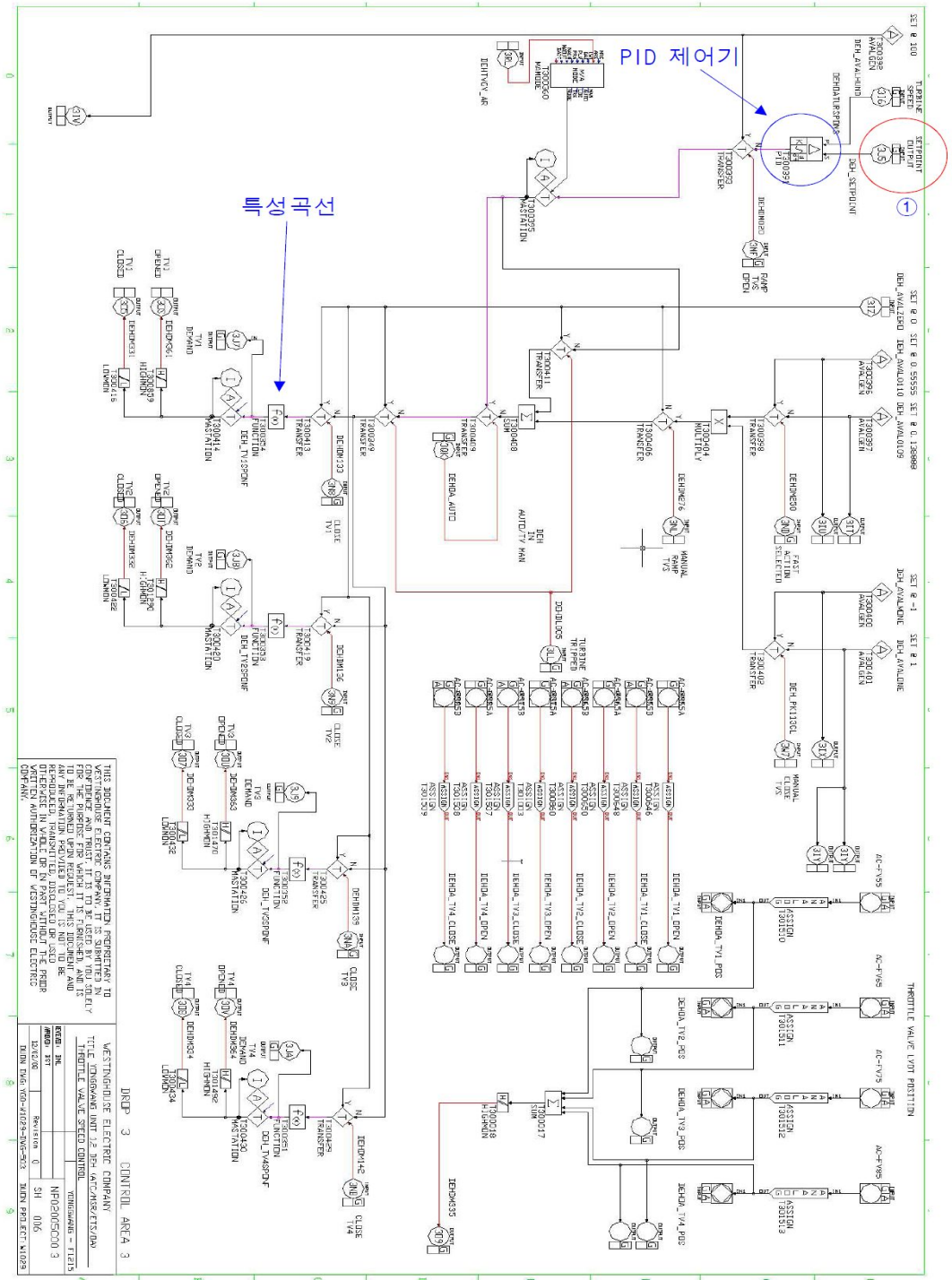


그림 2.24 TV 제어도면 1 [10]



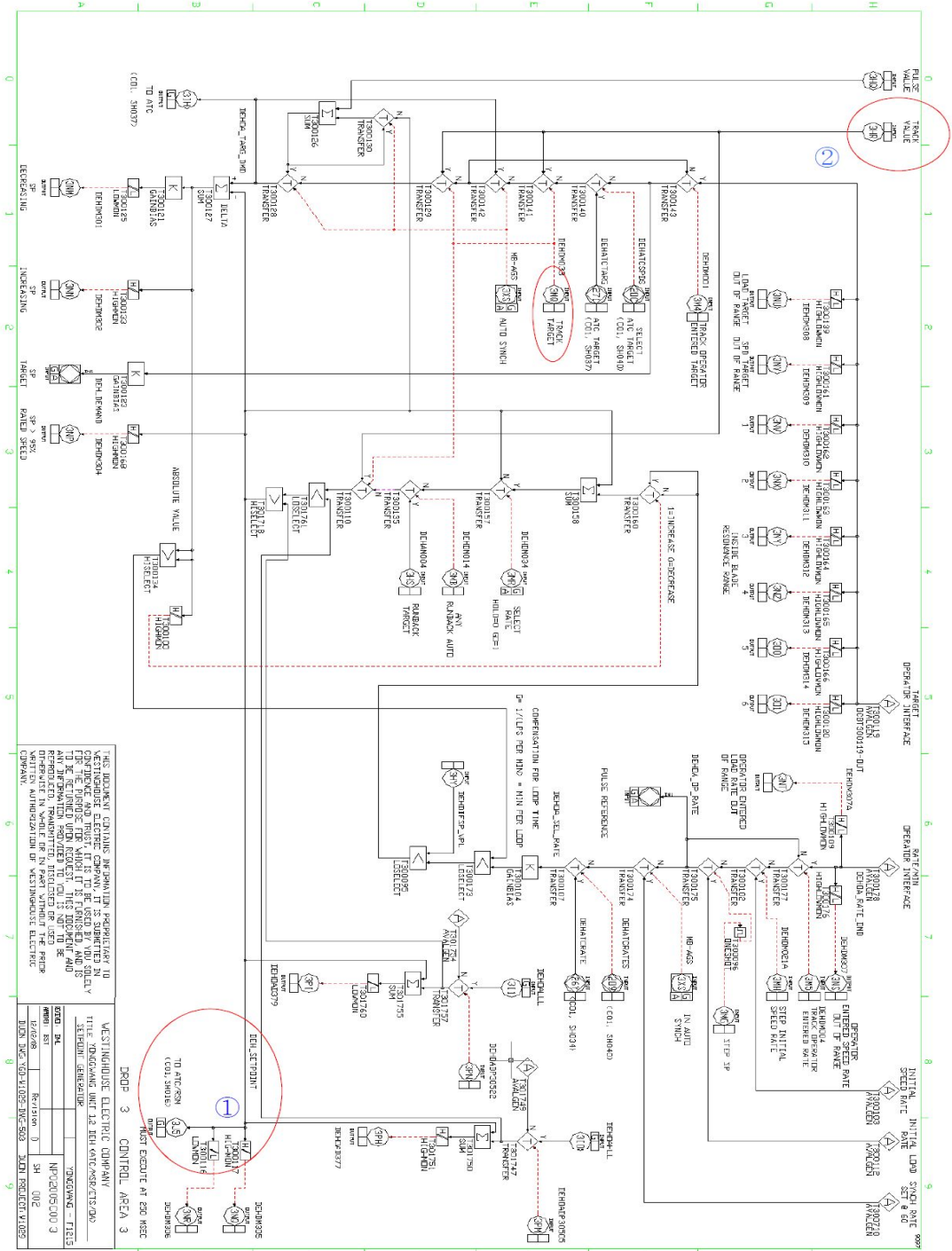


그림 2.25 TV 제어도면 2 [10]

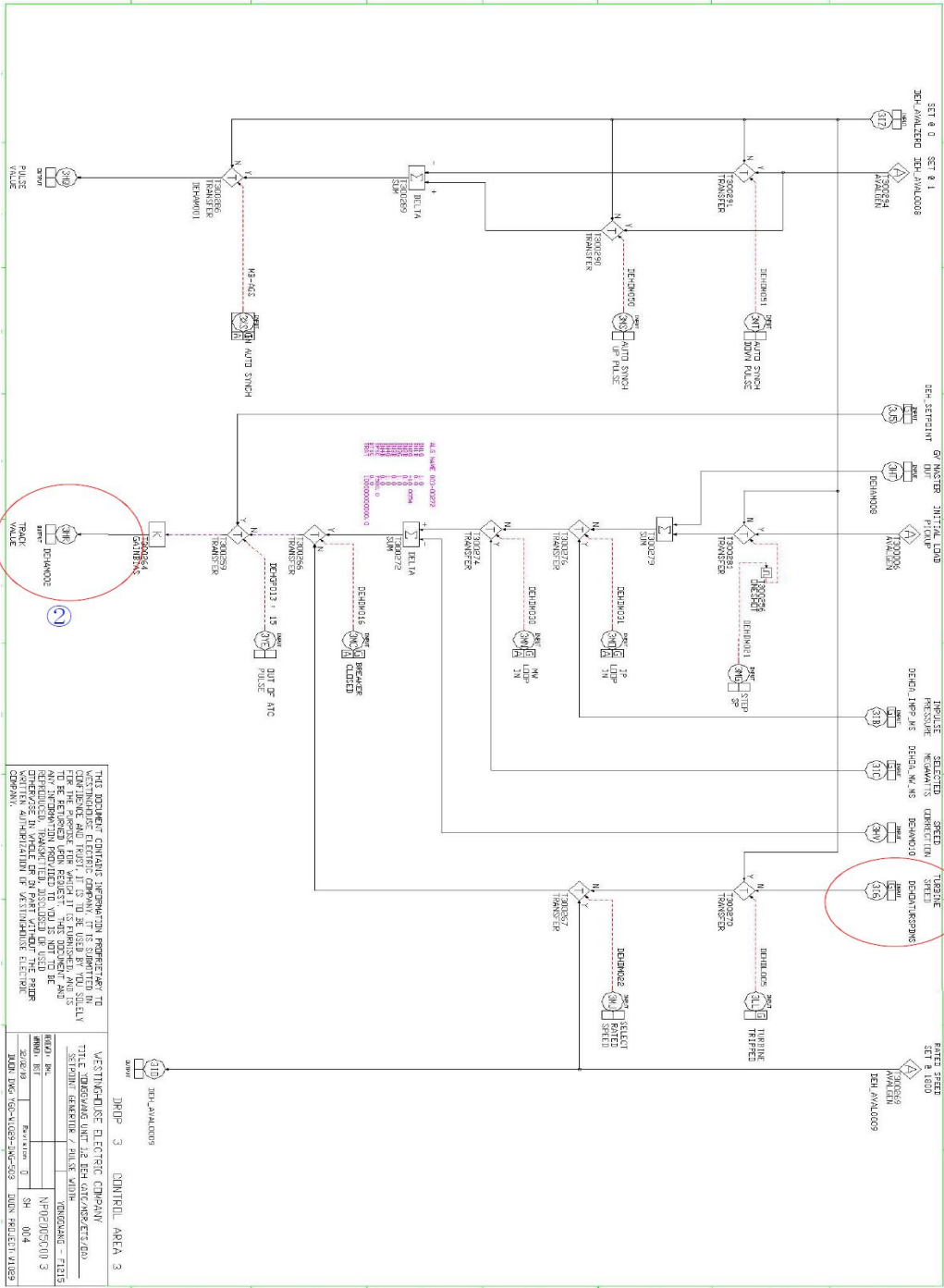
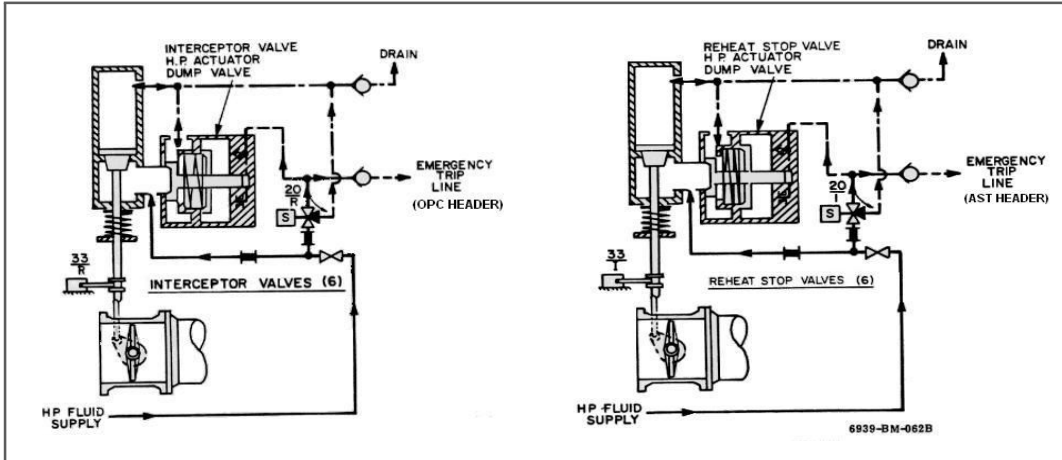


그림 2.26 TV 제어도면 3 [10]

### 3. 저압터빈정지(RSV) 및 조절밸브(IV) 제어 : 각 6개



- 유압에 의한 On-Off 제어(Solenoid Valve 사용)
- Emergency Trip Line 가압되면 바로 열림.
- Solenoid Valve는 Test Close 기능 제공
- RSV : Emergency Trip Line이 AST Header에 연결됨, 열리는 속도 제한(Orifice Size)
- IV : OPC Header 에 연결

그림 2.27 IV / RSV 구조도

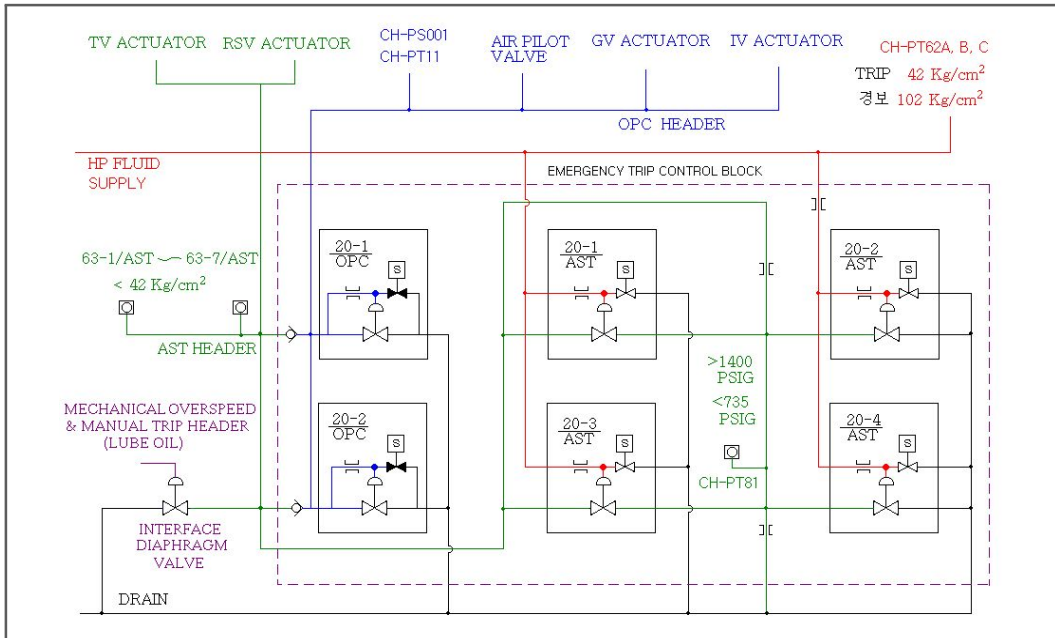


그림 2.28 고압 및 저압터빈밸브 유압회로도

# 제3장 터빈정지밸브 제어루프 이중화 시뮬레이션

## 제 1 절 터빈정지밸브 제어루프 구성

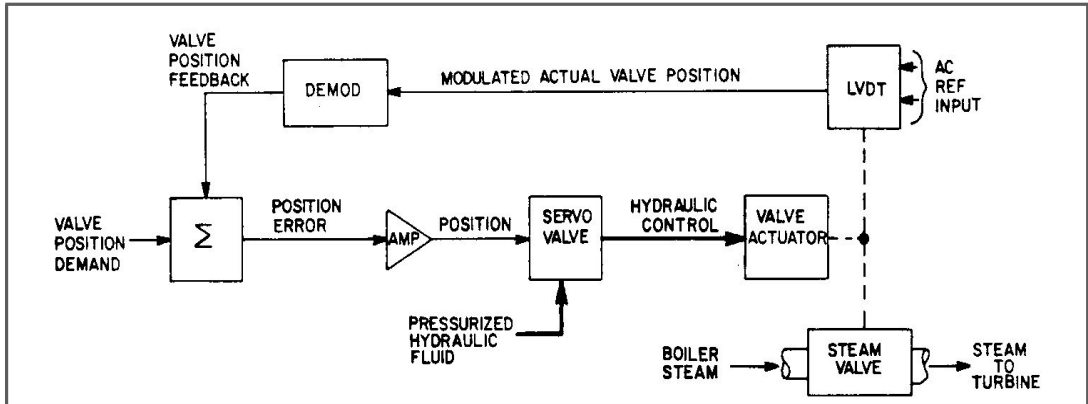


그림 3.1 제어루프 블록 다이어그램

### 1. 밸브위치제어 모듈(RVP)

#### 가. RVP 기능

R-Line Valve Positioner Module(RVP)은 전기-유압 서보밸브(Servo Valve) 작동기와 제어기(Controller) 사이의 인터페이스를 제공하고 서보루프에 의해 제어되는 밸브제어에 사용된다. 80C196 micro controller에 의한 real-time 페루프 비례적분제어, 제어컴퓨터에서 요구한 밸브개도 설정치(set point)에 따라 현장밸브 위치제어, Local Mode 시 SLIM(Small Loop Interface Module)에 의한 수동제어, 서보밸브 코일구동 출력제어신호 제공, LVDT에 의한 밸브 포지션 측정 등의 기능을 수행한다.[7]

#### 나. RVP 구성

RVP는 현장 입출력 신호의 처리를 담당하는 P-Module(Personality Module)과 실제 밸브 개도를 제어하는 E-Module(Electronic Module)로 구성되어 있다.[7]

표 3.1 영광1,2호기 RVP Module 구성

구분	모델번호	기능
E-Module	1C31194G01	AC 17[V] P-P 1KHz LVDT 작동
P-Module	1C31197G01	82[Ω]의 servov Coil에 ±24.9[mA]까지 전류 공급 내부저항 : 330[Ω]

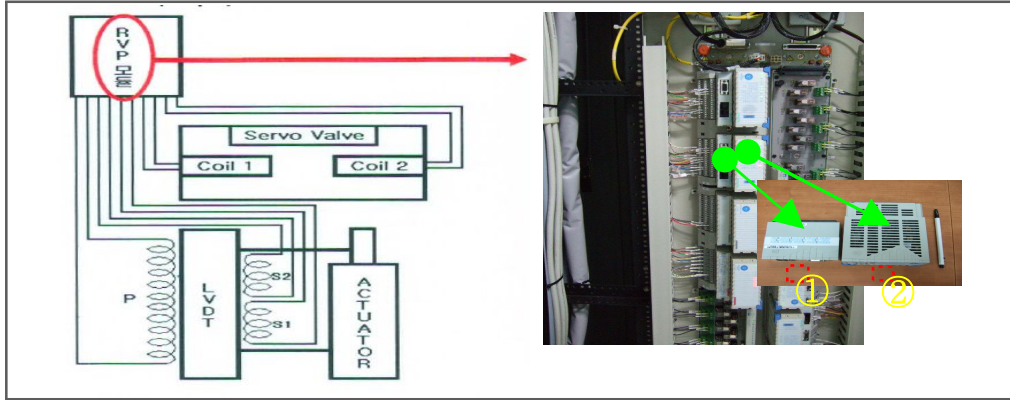


그림 3.2 RVP Module 구성

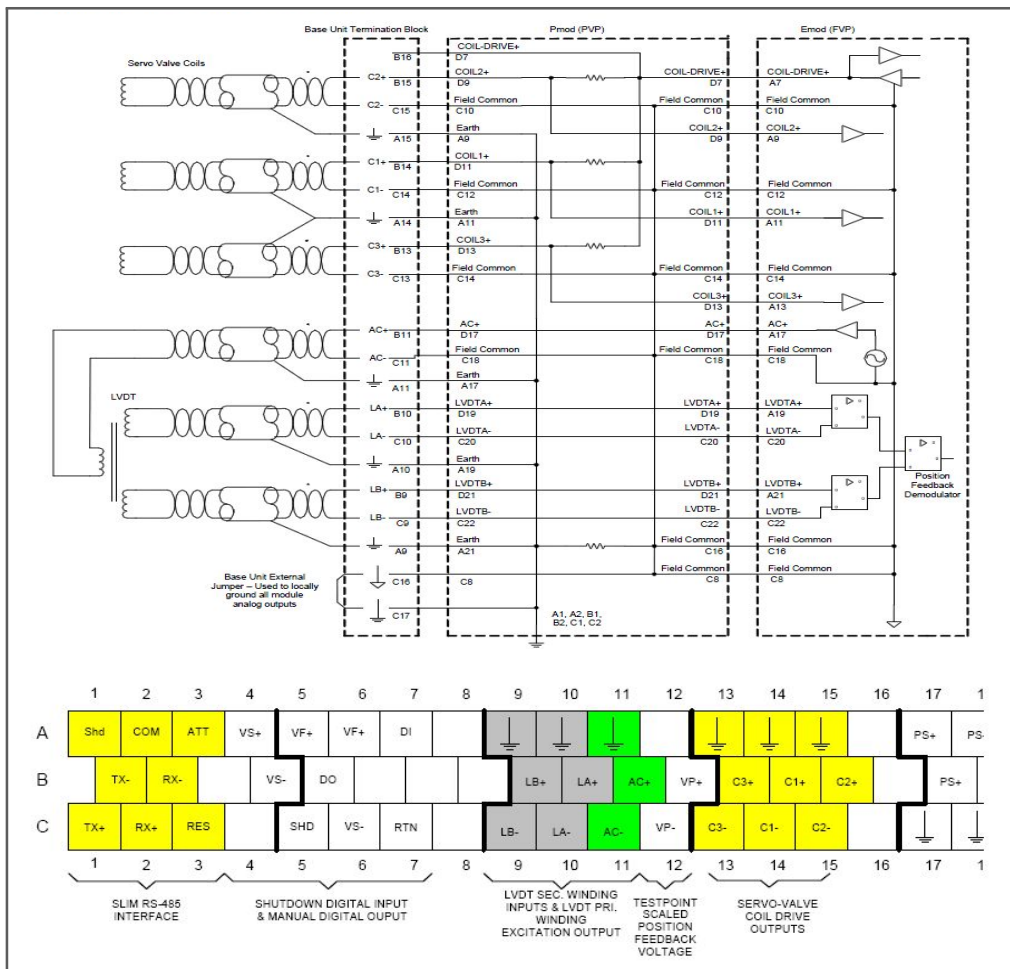


그림 3.3 RVP 터미널 블록 결선도

## 다. RVP 고장진단

RVP 모듈의 전면에는 모듈 동작 상태를 육안으로 확인할 수 있는 LED가 설치되어 있으며 정상 동작중일 경우 P, C, 2, 3, 6 LED가 점등된다. [7]

표 3.2 RVP LED 상태 진단

LED	의미	LED	의미
P	Power OK	3	Normal Mode
C	Communicaton OK	4	PI is detuned
E	External Fault	5	Calibrating
I	Internal Fault	6	(Back)Seating in effect
1	Local-Manual Mode	7	Contingency Condition
2	Servo OK	8	Shutdown

## 2. 서보밸브(Servo Valve)

### 가. 서보밸브 기능

터빈조속기제어계통(DEH)의 제어신호에 따라 터빈제어밸브를 제어하는 핵심 부품으로서 전기신호를 유압신호로 변환(전류 입력신호, 즉 명령에 대하여 오일의 흐름을 발생)시켜 터빈제어밸브(GV) 및 터빈정지밸브(TV)의 개도를 조절함으로써 터빈 속도제어 및 발전기 출력제어를 수행한다.[8]

### 나. 서보밸브 구조 및 동작

서보밸브의 기본적인 구성 요소로 전류 신호에 의해 움직이는 토크모터, 노즐 플래퍼 기구, 유압의 증폭으로 압유의 흐름 방향과 유량을 제어하는 스펴이 있다.[8]

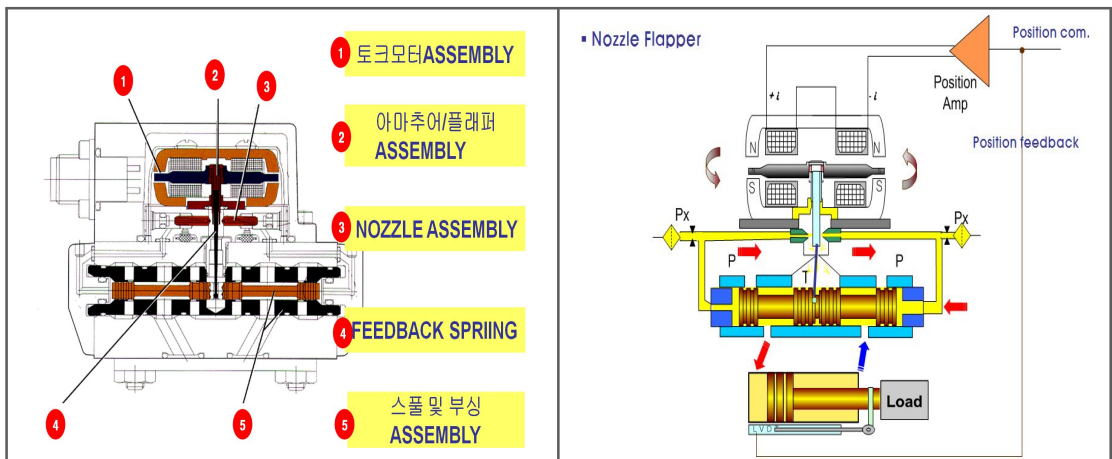
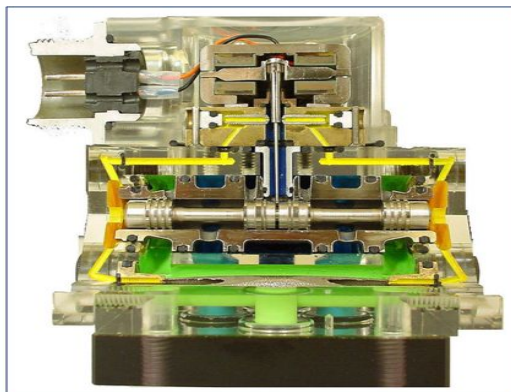
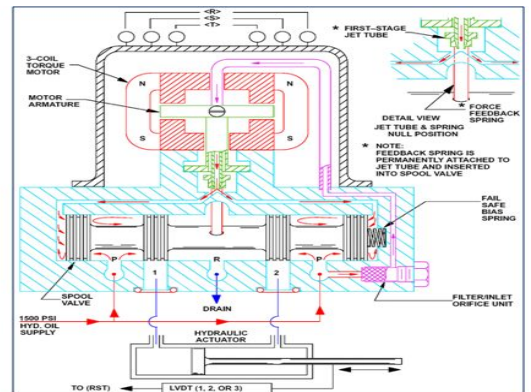


그림 3.4 서보밸브 구조

- ① 토크모터의 영구자석은 상부는 N극 하부는 S극의 극성을 가지며 토크 모터의 코일에 가해지는 직류전류에 의해 발생하는 자력의 크기와 극성에 비례하여 아마추어에 토크가 발생되어 아마추어/플래퍼 Assembly가 움직인다.
  - ② 아마추어/플래퍼 Assembly의 움직임에 의해 플렉서 튜브내에서 아마추어와 일체형인 플래퍼가 한쪽으로 기울어진다.
  - ③ 플래퍼가 움직이면 가까워진 쪽의 노즐을 통과하는 유량은 제한되어 노즐 배압은 올라가고 플래퍼와 멀어진 쪽의 노즐배압은 내려간다.
  - ④ 좌우의 노즐배압은 스톱 양단에 연결되어 있으며 이 배압변화에 따른 압력차에 의해 스톱이 움직인다.
  - ⑤ 스톱이 작동되면 공급포트(P)는 한쪽의 제어포트(C2)로 연결되며 리턴포트(R)는 다른쪽의 제어포트(C1)와 연결된다.
  - ⑥ 스톱의 움직임은 아마추어와 일체형인 피드백 스프링에 아마추어의 자기적 토크와 정반대의 기계적 토크를 발생시켜 준다.
  - ⑦ 아마추어의 자기적 토크와 피드백스프링의 기계적 토크가 같아지면 플래퍼가 중립위치로 돌아오며, 좌우 노즐의 배압이 같게되어 스톱은 새로운 신호가 입력될 때까지 그 위치에서 정지한다.
- ※ 이상과 같은 원리에 의해 서보밸브의 스톱위치는 입력전류의 극성과 크기에 비례하여 밸브의 열림량을 유지할 수 있으며 밸브 압력 강하율이 일정한 경우 부하에 흐르는 유량은 스톱 위치에 비례하게 되므로 토크모터에 가해진 전류에 비례한 유량을 얻을 수 있다.



( Servo Valve Nozzle Flapper )



( Servo Valve Jet Tube )

그림 3.5 Pilot 형식에 따른 서보밸브 종류

다. 고장진단(제작사 관련자료 요약)

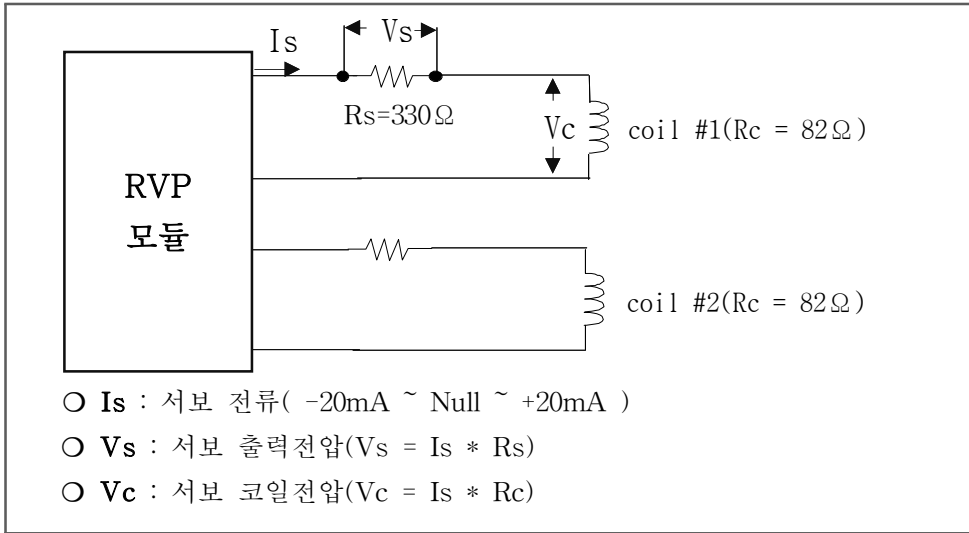


그림 3.6 영광 1,2호기 서보루프 개략도

(1) 서보 코일 'Open' 상태진단[7]

- 서보 출력 전류제한용 저항 양단의 전압을 측정함으로써 서보 코일의 'Open' 여부를 진단한다.
- 서보 코일이 'Open' 되거나, 서보 출력 0 Vdc 서보밸브의 기계적 바이어스가 부적절 조정되어 있으면 0 Vdc를 감지하게 된다.
- 밸브가 안정적인 제어상태에 있고 기계적 바이어스가 적절하게 조정되어 있을 경우 서보 코일전압은 일반적으로 -200mV이다.
- 서보 출력전압이 100mV 미만이 되면 서보 코일 'Open' 감시기능이 해제된다.
- 서보 출력전압이 100mV를 초과한 상태에서 '서보 출력전압과 서보 코일전압 차이'가 50mV 미만이면 서보 코일 'Open' 신호가 발생한다.

(2) 서보 코일 'Short' 상태 진단[7]

- 터미널 블록에서 측정된 전압의 변환된 값이 대략 0Vdc 정도 되면 서보 코일 'Short' 신호가 발생된다.
- 서보 출력전압이 50mV 미만이 되면 서보 코일 'Short' 감시기능이 해제된다.
- 서보 출력전압이 400mV를 초과한 상태에서 'Module Status Resister'의 전압이 50mV 미만이면 서보 코일 Short 신호가 발생된다.
- 서보 출력전압이 50 ~ 400mV 일 때는, 'Module Status Resister'의 전압은 서보 출력전압의 1/8 값으로 계산된 값과 비교된다.
- 'Short'상태가 해소되면, 'Status Ward 1'의 서보코일 'Short' 신호가 해소된다.



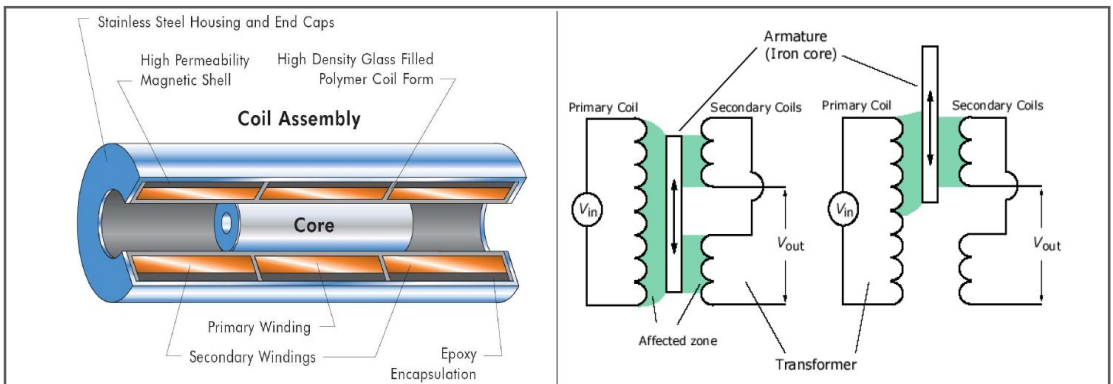
### 3. 밸브개도 검출기(LVDT)

#### 가. LVDT 기능

밸브 제어에 유량형 서보밸브를 사용하는 경우 밸브 개도 검출에는 선형 가변 차동 변압기(LVDT : Linear variable Differential Transformer)가 사용되며 차동 코일을 이용하여 증기밸브의 위치를 측정하고 밸브위치정보를 Servo Amplifier로 보내준다.

#### 나. LVDT 구조와 동작

LVDT는 그림 3.4과 같이 원통의 내부에 1차 코일 한 개와 2차 코일 두 개가 대칭으로 배치되어 있다. LVDT는 Electro-mechanical device로서 분리개체로 자유로이 이동하는 코어의 변위에 비례하여 전기적 출력이 생성되는 장치이다. 1차 코일을 감은 원통형의 코일보빈에 두 개의 2차 코일을 대칭으로 감은 구조이며, 코일 속으로 코어를 삽입하면 1차와 2차 코일들을 연계하는 자력선의 유도가 생긴다. 1차 코일이 외부(RVP)의 AC 소스에 의해 자화되면 코어를 통하여 두 개의 2차 코일에 전압이 유도된다. 2차 코일을 서로 감긴 방향이 반대가 되도록 접속하면 출력전압은 두 2차 전압의 차가 되며, 코어가 중앙(Null 위치)에 위치할 때 두 전압은 상쇄되어 '0'이 된다. Null 위치로부터 전압이 증가하는 코일방향으로 코어를 이동시키면 유도전압은 증가하고, 그 반대의 코일로 이동시키면 감소한다. 이러한 동작으로 코어의 위치변화와 함께 직선적으로 변하는 편차전압의 출력이 생성된다. 코어가 Null의 한쪽에서 다른 편으로 이동하는 찰나에 출력전압의 위상은 급격하게 180° 반전된다.[5],[8]



- Stroke : 약 400 mm(@ Core 길이는 LVDT 전체길이의 1/2)
- 1차 Coil : RVP Module 에서 약 1 kHz, 약 6.2 V 교류전압 인가
- 2차 Coil : Core 위치에 따른 전압인가
- Core 인출시 : 약 0.7 VAC , Core 삽입시 : 약 5.5 VAC

그림 3.7 LVDT 내부 구조

## 제 2 절 제어루프 구성품 고장사례 분석

'06년 1월부터 현재까지 터빈정지밸브 제어루프 구성기기별 고장 발생현황을 분석한 결과 총 17건 중 RVP 고장이 8건으로 47%를 점유하여 가장 높게 나타났으며 4회의 출력 감소가 발생했다.

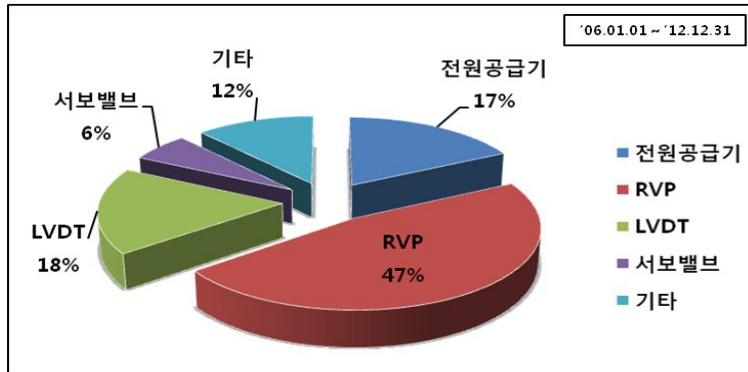


그림 3.8 제어 구성품 고장 발생현황

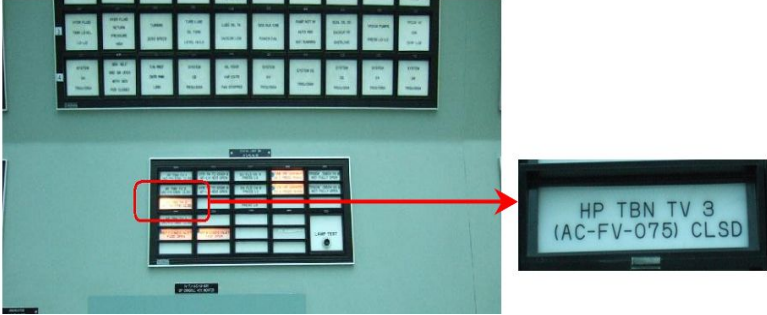
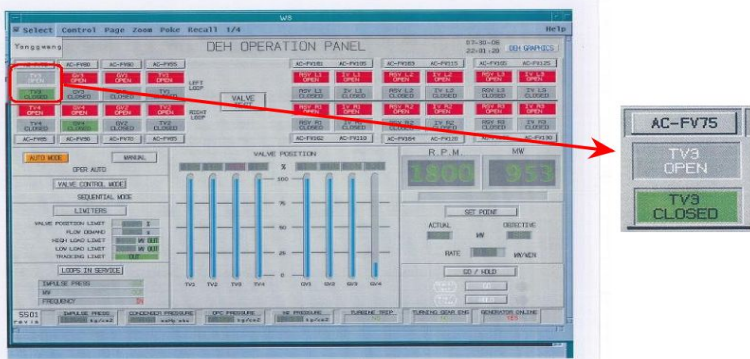
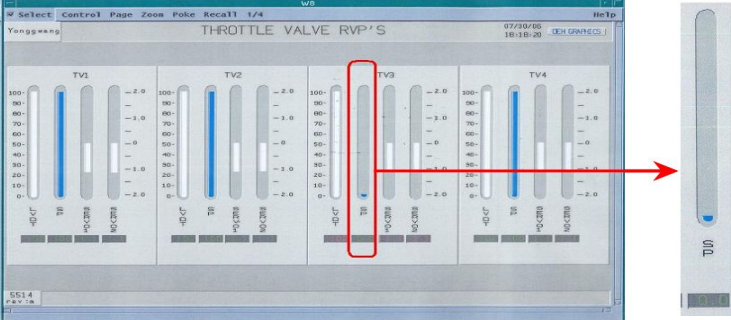
### 1. 밸브위치제어 모듈(RVP) 고장 정비 #1

#### 가. 개요

'06. 7. 30(일) 17:58 영광1호기에서 100% 전출력으로 운전 중 고압터빈 정지밸브 #3 비정상적 닫힘 현상이 발생하여 원자로, 발전기 출력이 각각 1.3%, 20 MWe 자동 감소되었고 정비 완료 후 정상출력으로 자동 회복되었다.

#### 나. 사건 내용

일시	사건 내용
17:58	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ "TURB STOP VALVE CLOSE RT ALERT" 경보 발생(JP006)</li> <li>❑ "HP TBN TV 3 CLOSED" 상태 지시등 점등(JP009)</li> <li>❑ "DEH Operation PNL"에 TV 3 CLOSE 지시 (DEH CRT)</li> </ul> <div style="text-align: center;"> </div> <p style="text-align: center;">[JP006 경보 발생 사진]</p>

일시	사건 내용
	 <p data-bbox="644 564 951 595">[JP009 상태등 지시상태]</p>  <p data-bbox="532 980 1061 1011">[ DHE CRT에 TV 3 CLOSE 상태 사진 ]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="339 1021 1100 1097">❑ 원자로 및 발전기 출력 각각 1.3%, 20 MWe 자동 감소 확인 제어봉 자동 삽입됨 (D-Bank 231 Step → 211 Setp)</li> </ul>
17:59	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="339 1113 1243 1189">❑ 현장 상태 확인 결과 TV 3이 실제 닫힘 확인 및 제어유 누설 점검 실시 (결과 : 제어유 누설 없음)</li> </ul>
18:05	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="339 1211 872 1242">❑ 계측제어팀 및 기계팀 담당자 점검 착수</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="339 1256 1110 1373">❑ 계측제어팀 점검 결과 TV 3의 RVP Module 고장으로 판명 <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="351 1295 1011 1373">☞ TV 3의 RVP 설정치가 100 → 0%로 변동됨 확인 (RVP Module 고장 → 밸브 비정상 닫힘 신호 발생)</li> </ul> </li> </ul>
19:00	


일시	사건 내용
20:28	<p>❑ TV 3 제어유 공급 차단밸브 수동 Close 실시 (RVP Module 교체 관련)</p>  <p>[TV#3 제어유 공급밸브 차단]</p> <p>❑ RVP Module 교체 시 원치 않는 밸브 작동 방지를 위하여 제어유 공급밸브 차단 실시</p>
23:10	❑ RVP Module 신품으로 교체 완료
23:16	❑ TV 3 제어유 공급 차단밸브 서서히 Open 시도
23:17	<p>❑ TV 3 Full Open 완료</p> <p>제어봉 수동 인출 (D-Bank 211 Step → 231 Setp)</p> <p>원자로 및 발전기 출력 자동 복구됨 (100%, 973 MWe)</p>

그림 3.9 TV # 3 닫힘 관련 사건 개요

#### 다. 원인 분석

표 3.3 TV #3 개도변화에 따른 운전변수 분석

운전 변수	구분	단 위	TV 3 개도변화에 따른 운전변수			변화량 (② - ①)
			TV 3 Open ①	TV 3 Close ②	TV 3 Reopen	
			7/30 정상	7/30 17:58	23:17	
발전기 출력	-	MWe	973	953	973	- 20
원자로 출력	-	%	100	98.7	100	- 1.3
터빈 증동단 압력	PT447	kg/cm <sup>2</sup>	45.4	44.9	45.4	- 0.5
증기발생기 수위	A	%	49	49	50	-
	B		50	51	49	
	C		49	50	50	

운전 변수	구분	단 위	TV 3 개도변화에 따른 운전변수			변화량 (② - ①)
			TV 3 Open ①	TV 3 Close ②	TV 3 Reopen	
			7/30 정상	7/30 17:58	23:17	
증기발생기 급수유량	A	Mkg/hr	1.81	1.76	1.81	- 0.5
	B		1.84	1.79	1.85	
	C		1.85	1.80	1.85	
증기발생기 증기유량	A	Mkg/hr	1.91	1.85	1.91	- 0.6
	B		1.92	1.86	1.92	
	C		1.90	1.84	1.91	
GV #4 개도	-	%	12.1	12.1	12.1	-
제어봉	D Bank	Step	231	211	231	- 20

- TV 3이 Close됨에 따라 증기발생기 증기유량이 감소되었고 이에 따라 원자로 출력은 98.7%까지 자동 감소
- 동시에 터빈 증동단 압력이 감소하고 Terror(Mid Tav<sub>g</sub> - Tref) 편차가 발생하여 제어봉 (D-Bank)이 231 에서 211 step까지 자동 삽입
- GV 제어모드는 “MW OUT” 상태였으므로 발전기 출력변화에 따른 GV의 개도 불변 (정상 운전시 “MW OUT” 운전 중)
- 발전소 이용을 향상을 위하여 GV 개도조절을 통한 출력증발을 고려하였으나 정비 완료 후 TV 3 Reopen시 원자로의 과출력(100% 초과)이 우려되어 감소된 출력으로 유지하였음.

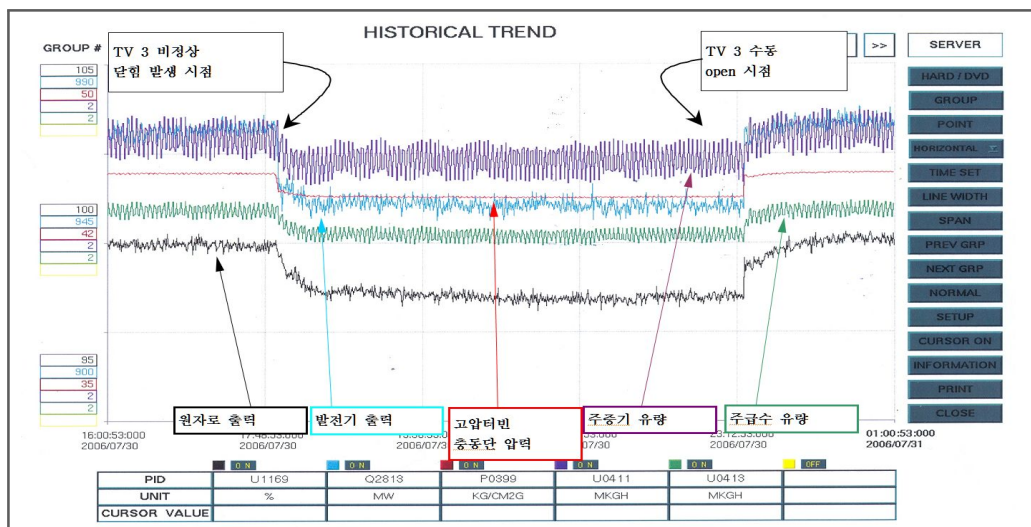


그림 3.10 TV 3 개도변화에 따른 운전변수

## 2. 밸브위치제어 모듈(RVP) 고장 정비 #2

### 가. 개요

'10. 8. 7(토) 16:20 영광 2호기에서 100% 전출력으로 운전 중 고압터빈 정지 밸브 #1 (AC-TV55)의 밸브위치제어 모듈(RVP) 이상으로 밸브가 닫히면서 발전기 출력이 약 20MWe 자동 감소되었다.

### 나. 사건 내용

'10. 8. 7(토)	
○ 06:17:44	터빈제어 운전원 콘솔에 TV#1 비정상 경고 발생
○ 06:20:15	TBN STOP VV Closed RX TRIP Alert(JP006B-53) 경고 발생(현장 TV#1 실제 닫힘 확인) 발전기 출력 약 20MWe 감소 : 976 → 956 MWe
○ 09:00 ~ 10:40	작업계획서 작성 및 승인
○ 10:40 ~ 11:06	고장 RVP Module 교체
○ 11:06 ~ 11:07	고압터빈정지밸브(TV#1) Full Open 출력정상 복구 확인 : 956 → 976 MWe

그림 3.11 TV # 1 닫힘 관련 사건 개요

### 다. 원인 분석

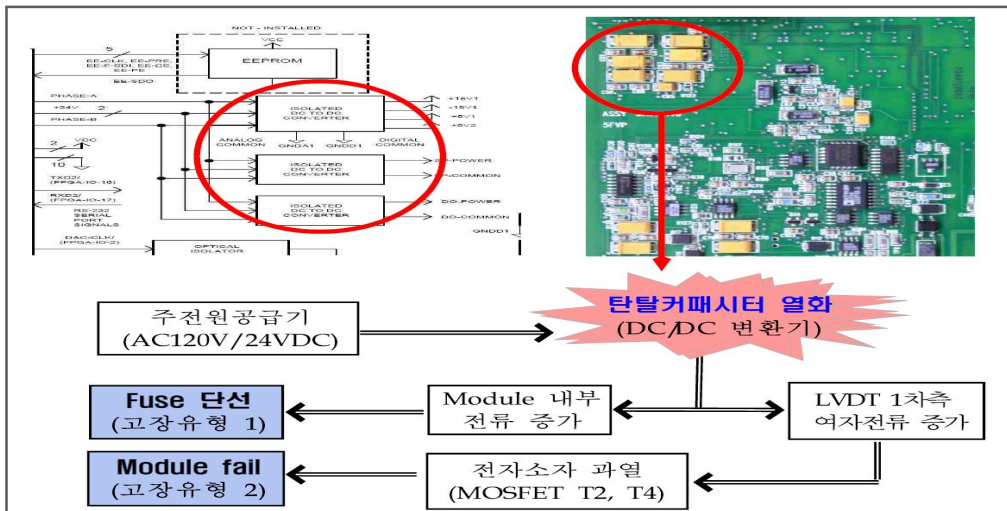


그림 3.12 RVP 고장 프로세스도

- 해당 RVP 모듈에 대한 고장원인 분석 결과 모듈 전원부(DC/DC 변환기) 탄탈커패시터 열화에 의한 고장발생 → 탄탈커패시터가 열화에 의해 단락되어 모듈 내부전류 증가로 전자소자 과열 및 회로 보호용 Fuse 단선

- RVP 내부고장이 발생으로 서보밸브 제어신호 상실 → 서보밸브 구동력 상실로 TV#1 실린더로 공급되던 제어유가 배유되어 밸브 닫힘 발생 → 고압터빈으로 유입되는 증기유량이 감소되어 발전기 출력 감소

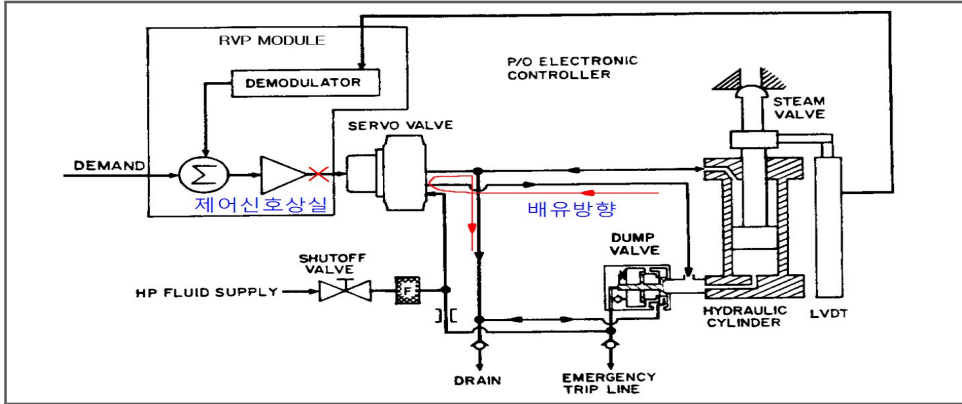


그림 3.13 서보밸브 제어신호 상실시 제어유 유로

## 라. 후속 조치

### (1) 국내·외 발전소 RVP 모듈 고장사례 분석

- RVP 모듈은 세계적으로 8개 원자력발전소에서 200 여개가 설치되어 사용 중이며 5개 발전소에서 설비고장/정비 사례가 보고됨

표 3.4 RVP 모듈 고장/정비사례[공급사(W.H)사 제공]

	발전소	고장/정비 사례	비고
1	Station A	6 건(2008~2009)	유사사례
2	Station B	1 건(2009)	
3	Station C	9 건(2006 ~ 2010)	영광 1,2호기
4	Station D	Rev. 0L로 upgrade(2009)	
5	Station E	Rev. 0L로 upgrade(2009)	

표 3.5 RVP 모듈 주요 고장 발생원인

<b>LED</b>	초기 LED 공급업체인 Chicaco Miniature 사 제품에서는 문제가 없었으나 대체 공급업체인 Kingbright사 제품에서 납땜 문제발생(※ LED lead 도금 불량 및 휨 현상 발생)
<b>전원부 Capacitor</b>	RVP 모듈 내부 DC/DC 변환기에 사용되는 탄탈 콘덴서 열화에 의해 Module 고장 발생됨 - 대상 콘덴서 : C4, C7, C80, C88, C96

(2) RVP 모듈 전량 교체

- 영광1, 2호기에 설치되어 사용중인 RVP Rev. No 28(Firmware 0K) 버전을 Rev. No 29(Firmware 0L)로 교체 시행

※ Rev. No 29 : LED 및 capacitor 문제 조치완료

표 3.6 RVP 모듈 개선 전·후 비교

Version	특징
Rev. No 28 (Rev. 0K)	○ 전원부(DC/DC 변환) <b>탄탈커패시터</b> 사용
Rev. No 29 (Rev. 0L)	○ 전원부(DC/DC 변환) <b>세라믹커패시터</b> 사용 ○ Firmware upgrade ▪ Back-up RVP 교체 시 발생하는 밸브 움직임 방지 기능 추가 ▪ Main/Back-up RVP 동시교정 가능

### 3. 밸브개도 검출기(LVDT) 고장 정비

#### 가. 개요

'11. 4. 7(목) 10:20 영광 2호기 고압터빈 조절밸브 GV#3 LVDT-2 위치신호 편차 (@ 6.8 %) 경보가 발생되었으나, LVDT-1 제어상태로 Loop 전환은 발생하지 않고 밸브는 100 % 열림 상태를 유지하였다.

⇒ 동일사례 : '11. 2. 27(일) 13:06 영광 2호기 GV#3 밸브위치신호 편차발생(@ 7.1 %), LVDT #2 → LVDT #1로 전환(@ 신호선 노이즈 유입 추정)

'11. 4. 8(금) 10:00 현장점검 결과 LVDT-2 신호선과 Lug(@ 단자 13번) 연결 상태가 부적합하여 러그교체 후 밸브 개도가 정상적으로 지시되었다.

- RVP(R-line Valve Positioner) Module 고장
- LVDT 고장
- Servo 밸브 구동 Coil 고장
- 개도 요구신호와 LVDT 출력신호의 편차가 5 % 초과한 상태에서 LVDT간 편차가 1.5% 이상 초과시

표 3.7 고압터빈 조절밸브 제어루프 전환조건



## 나. 사건 내용

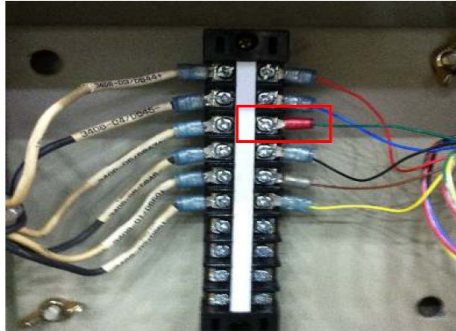

일시	사건 내용
'11.04.07 10:20	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ GV3-POS-DEV 경보 발생(@ DEH)</li> <li>❑ GV RVP 제어값 Trend 확인 : LVDT-2 93.2 % 감소</li> <li>❑ GV#3 LVDT-1 정상 제어확인 : 100 % 정상 열림상태 유지</li> </ul>
10:50	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ 계측제어팀 DEH 신호값 점검</li> <li>- DEH GV#3 LVDT-2 신호값 측정 : 정상</li> </ul>
10:57	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ 현장 단자함 신호선 연결상태 점검</li> <li>- 신호선과 단자 Rug 확인위해 손으로 접촉시 LVDT-2 값 Hunting</li> <li>- 신호선과 단자 Rug 접촉불량 추정</li> </ul>
11:00	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ 현장 단자대 조임(@ 드라이버) 후 LVDT-2 신호값 안정유지</li> </ul>
'11.04.08 10:00	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ GV#3 LVDT-2 신호선 Lug 연결상태 확인(@ 2312-WP-AC-CI-0008)</li> <li>- 신호선 총 12개를 차례로 흔들면서 LVDT 값 Hunting 유무 확인</li> </ul>
10:10	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ LVDT-2 Secondary 1-1(@ 단자 13번) 연결상태 불량 확인</li> <li>- 신호선을 흔들었을 때 LVDT-2 21 % 지시 고착</li> </ul>
10:30	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ LVDT-2 Secondary 1-1(@ 단자 13번) Lug 교체</li> <li>- LVDT-2 지시값 100.3 % 정상 지시 : Trend 주시중</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>

그림 3.14 GV # 3 위치지시 편차발생 관련 사건 개요

## 다. 원인 분석

- 진동 및 충격에 의해 단자 연결부위의 풀림현상이 발생되어 신호선 연결부 접촉저항이 증가하여, 출력전압이 감소하게 되고 실제 개도와 다른 신호가 RVP 모듈로 전달

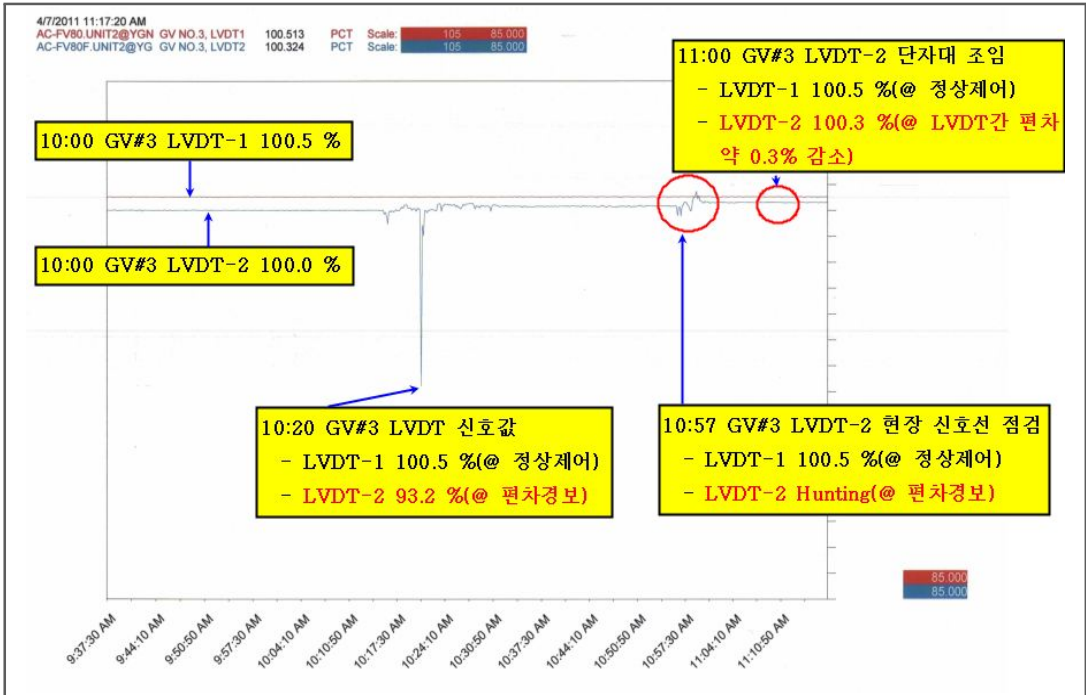


그림 3.15 GV #3 위치지시값 추이

### 제 3 절 제어루프 이중화 시뮬레이션

#### 1. 제어루프 이중화 방안

제2절 제어루프 구성품 정비사례 분석 결과에서 나타난 바와 같이 고압터빈 정비 밸브 제어루프가 단일 제어루프로 구성되어 있어 정상 운전 중 개별 제어기기의 고장이 발생되면 최악의 경우 신호처리 프로세스의 정지로 터빈정지밸브가 닫히게 되어 발전소 과도상태 및 발전 정지가 유발될 수 있다. 따라서 설비신뢰성 확보를 위해 시스템 측면에서 구현할 수 있는 방법은 제어루프를 이중화하여 시스템을 구축하는 것이다. 이중화는 RVP 이중화, 서보밸브 이중화, LVDT 이중화 등으로 나눌 수 있는데, 이와 같이 이중화가 동시에 적용되었을 때 단일 제어기기 고장 시에도 제어능력을 유지할 수 있는 내성이(Fault tolerance) 있는 시스템이라고 할 수 있을 것이다. 이를 위해 개선 되어야할 사항은 다음과 같다.

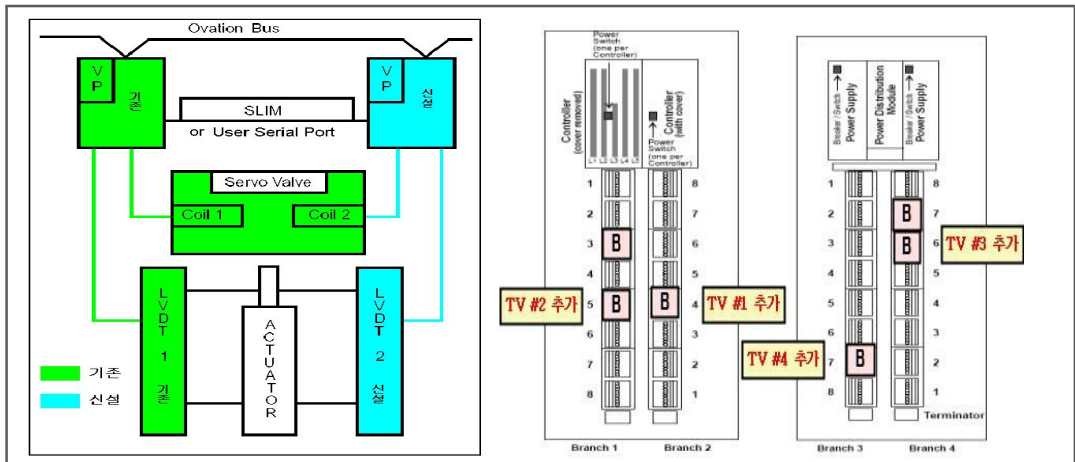


그림 3.16 이중화 제어루프 개략도

#### 가. 계측기 신설

터빈정지밸브(TV) 제어루프 이중화를 위하여 RVP 모듈을 신설하고 위치지시용 리미트 스위치 구동 Bar를 이용하여 Actuator에 밸브개도 검출기(LVDT)를 추가 설치하여야 한다.

#### 나. 서보밸브 결선방법 변경

서보밸브는 2개의 구동 Coil을 내장하고 있으며 그 중 1개 Coil만 건전하면 밸브 제어 가능하므로 2개의 Coil을 기존 RVP Module 출력단 및 신설 RVP 모듈 출력단에 각각 연결하여 이중화 제어루프를 구성하여야 한다.

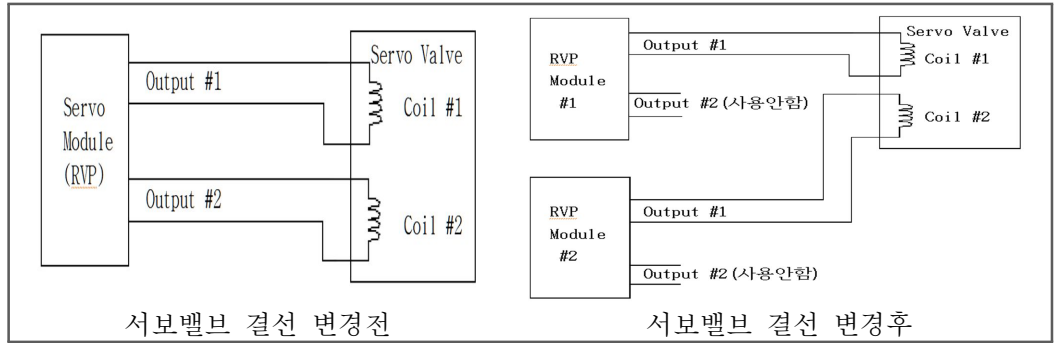


그림 3.17 서보밸브 결선 변경전 · 후

#### 다. Limit Switch 제거

현 TV 위치지시용 Limit Switch를 제거하고 이중화 LVDT 신호를 이용하여 밸브 위치지시 기능을 구현하고 원자로 정지신호발생용 Limit Switch는 현상태를 유지하도록 한다.

#### 라. 제어로직 및 그래픽 변경

기존 단일제어방식의 터빈정지밸브(TV) 제어알고리즘 및 그래픽을 수정하여 제어 루프 이중화가 가능하도록 한다.

## 2. 시뮬레이션 및 결과 분석

### 가. 시뮬레이션 수행

현장시험을 위하여 고압터빈정지밸브(TV#1)의 LVDT와 RVP 모듈을 그림 3.12와 동일하게 이중화 루프로 구성하고, Main 모드의 RVP-A(Primary)가 제어 기능을 담당하며, Backup 모드의 RVP-B(Secondary)는 후비제어상태로 설정하였다. 또한, LVDT Fail, RVP 모듈 Fail, Servo Coil 고장, Demand 신호와 Primary LVDT 개도신호 편차가 5%를 초과한 상태에서 이중화된 LVDT 간의 편차가 1.5% 이상 초과 할 경우 자동으로 루프전환이 이루어지도록 알고리즘을 구현하였다. 시험은 TV #1의 설정값을 30%로 입력하여 개방 시킨 후 제어루프 구성기기 (서보 코일, LVDT 코일, RVP)별 고장시험 수행을 수행하여 TV #1의 개도가 30%를 유지 하는지 아래의 운전변수를 확인하는 순서로 진행하였다.

- Demand TV1(DEH\_GV1SPONF), 0 to 100%
- Position LVDT-1(AC-FV55) / LVDT-2(AC-FV55F), 0 to 100%
- Moog coil-1(AC-FV55A) / Moog coil-2(AC-FV55B), -2 to 2 V

(1) 후비 RVP-B 고장 시험

그림 3.14는 후비 제어모듈의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 후비 RVP-B 모듈을 인출하였을 때의 결과를 보여고 있다. TV #1의 위치가 30%를 유지하고 RVP-A 모듈에 의해 제어되고 있음을 확인하였지만 인출모듈 재삽입시에 약 0.5% 범위의 개도변화가 발생 된다는 것도 확인할 수 있었다.

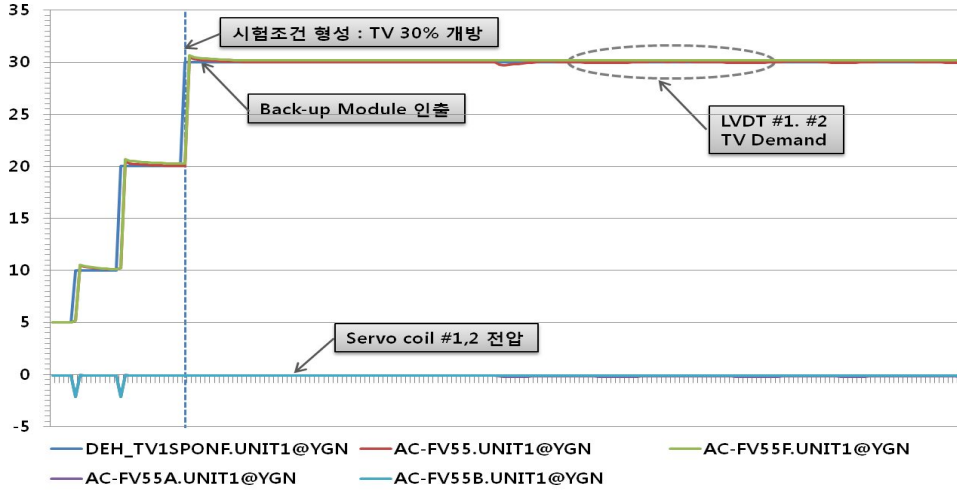


그림 3.18 후비 RVP-B 모듈 고장 시험결과

(2) 후비 LVDT Secondary Coil-1 고장 시험

그림 3.15는 후비 LVDT의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 후비 LVDT Secondary Coil-1을 단락시켰을 때의 결과를 보여주고 있다. TV #1의 위치가 30%를 유지하고 RVP-A 모듈에 의해 제어되고 있음을 확인하였다.

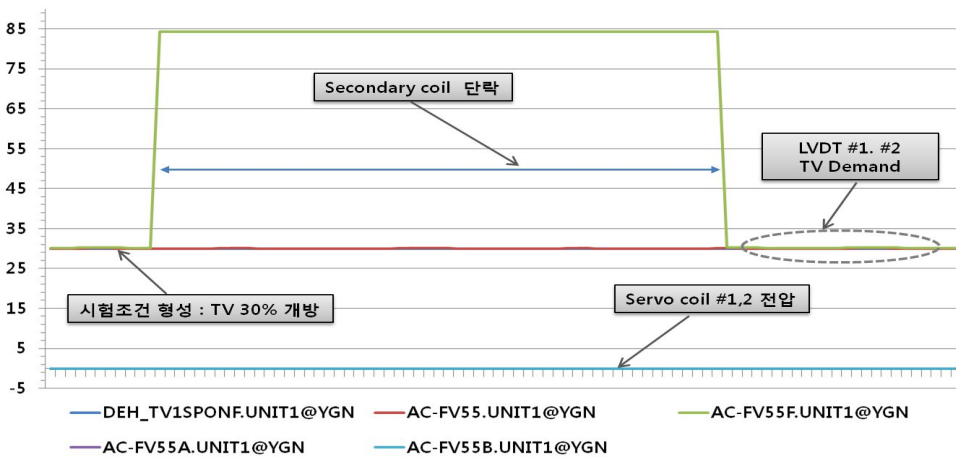


그림 3.19 후비 LVDT Secondary Coil-1 고장 시험 결과

(3) 후비 LVDT Secondary Coil-2 고장 시험

그림 3.16는 후비 LVDT의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 후비 LVDT Secondary Coil-2를 단락시켰을 때의 결과를 보여주고 있다. TV #1의 위치가 30%를 유지하고 RVP-A 모듈에 의해 제어되고 있음을 확인하였다.

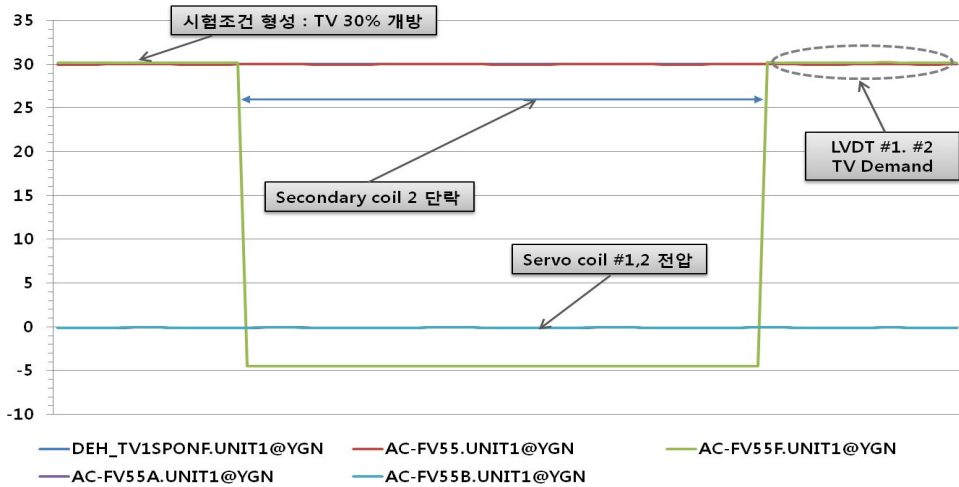


그림 3.20 후비 LVDT Secondary Coil-2 고장 시험 결과

4) 후비 LVDT Primary Coil 고장 시험

그림 3.17는 후비 LVDT의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 후비 LVDT Primary Coil을 단락시켰을 때의 결과를 보여주고 있다. TV #1의 위치가 30%를 유지하고 RVP-A 모듈에 의해 제어되고 있음을 확인하였다.

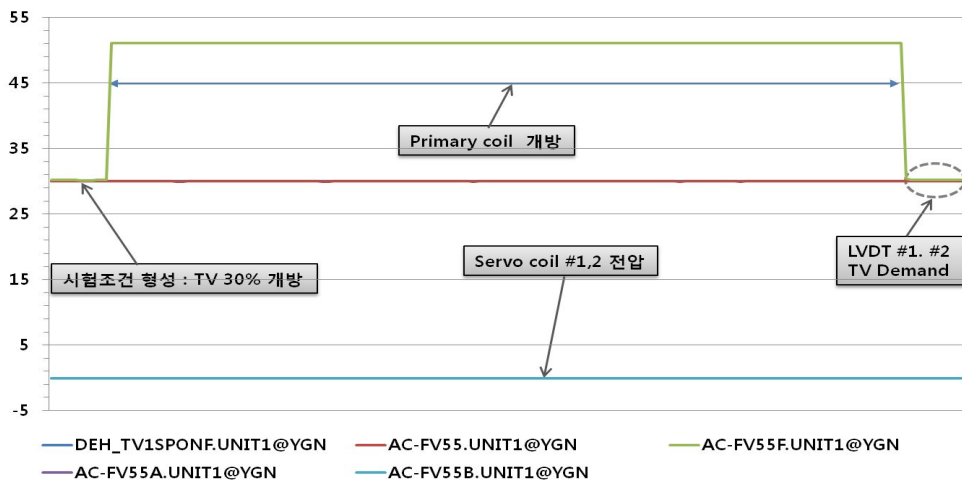


그림 3.21 후비 LVDT Primary Coil 고장 시험 결과

(5) 후비 Servo Coil-2 개방 시험

그림 3.18은 후비 서보밸브의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 후비 Servo Coil-2를 개방하였을 때의 결과를 보여주고 있다. Servo Coil-2의 전압이 약간 상승하였지만 TV #1의 위치가 30%를 유지하고 RVP-A 모듈에 의해 제어되고 있음을 확인하였다.

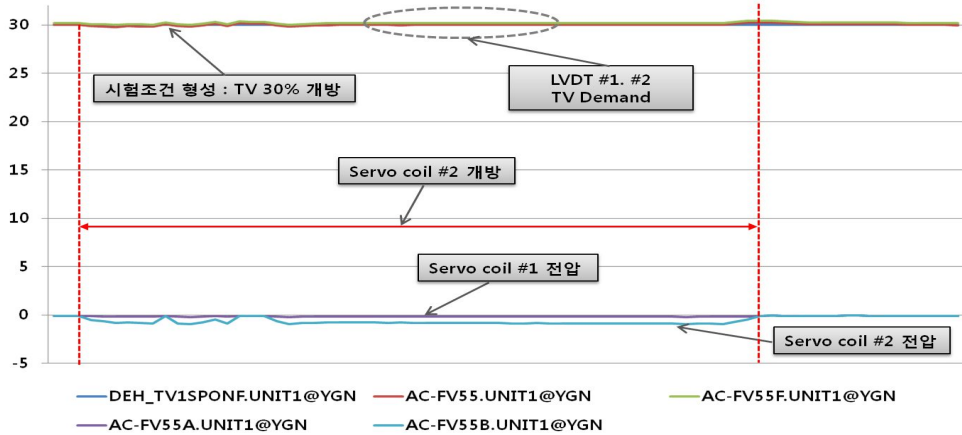


그림 3.22 후비 Servo Coil-2 개방 시험 결과

(6) 후비 Servo Coil-2 단락 시험

그림 3.19는 후비 서보밸브의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 후비 Servo Coil-2를 단락시켰을 때의 결과를 보여주고 있다. Servo Coil-2의 전압이 약간 감소하였지만 TV #1의 위치가 30%를 유지하고 RVP-A 모듈에 의해 제어되고 있음을 확인하였다.

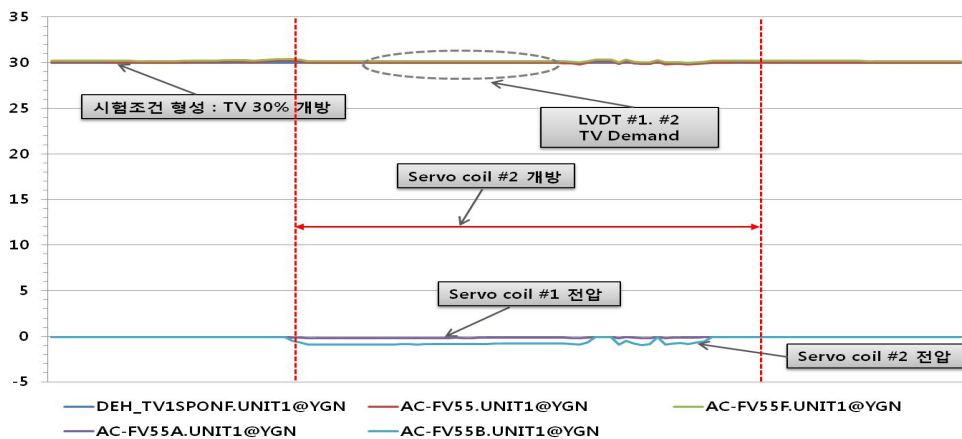


그림 3.23 후비 Servo Coil-2 단락 시험 결과

(7) 후비 RVP-B 모듈의 Serial Link 고장 시험

그림 3.20은 Serial Link의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 후비 Serial Link 신호선을 제거하였을 때의 결과를 보여고 있다. TV #1의 위치가 30%를 유지하고 RVP-A 모듈에 의해 제어되고 있음을 확인하였다.

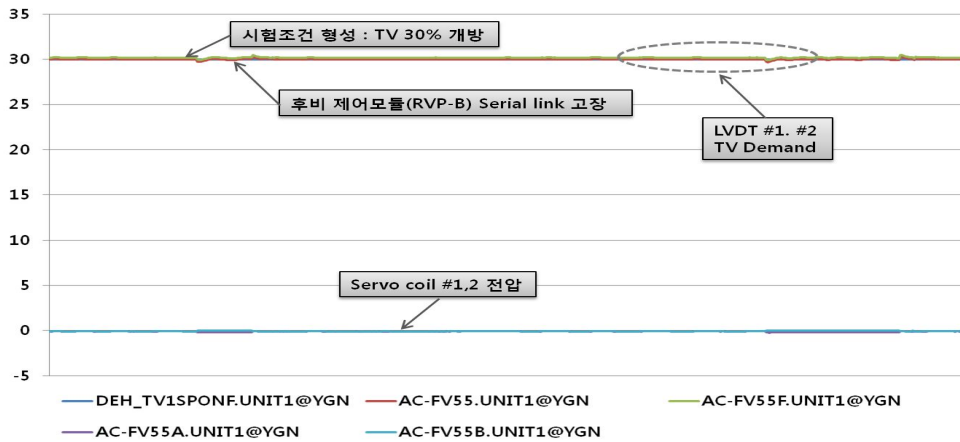


그림 3.24 후비 RVP-B 모듈의 Serial Link 고장 시험 결과

(8) 제어 RVP-A 모듈 고장 시험

그림 3.21은 제어중인 모듈의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 제어 RVP-A 모듈을 인출하였을 때의 결과를 보여주고 있다. TV #1의 위치가 30%를 유지하고 제어권이 RVP-B로 전환되었음을 확인하였고 인출모듈 재삽입 시 약 0.5% 범위의 개도변화가 발생된다는 것도 확인할 수 있었다.

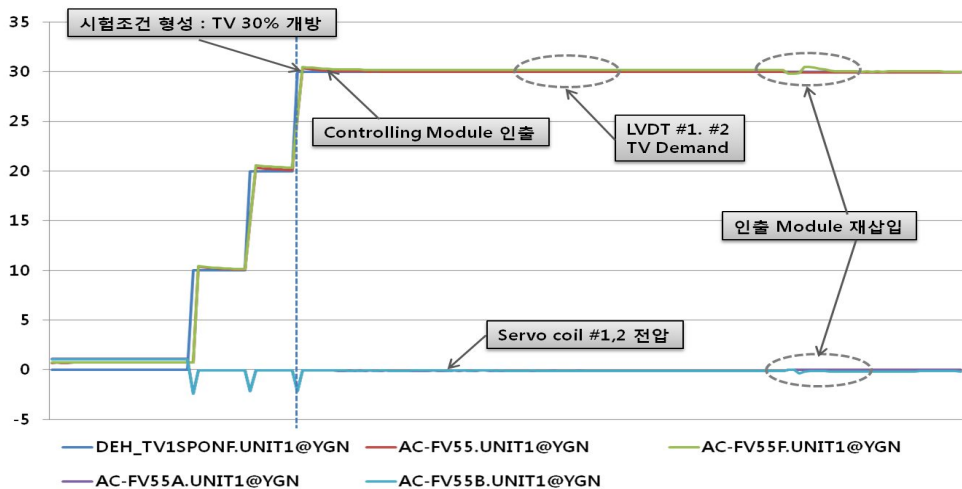


그림 3.25 제어 RVP-A 모듈 고장 시험결과



(9) 제어 LVDT Secondary Coil-1 고장 시험

그림 3.22는 제어 LVDT의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 제어 LVDT Secondary Coil-1을 단락시켰을 때의 결과를 보여주고 있다. TV #1의 위치가 30%를 유지하고 제어권이 RVP-B로 전환되었음을 확인하였다.

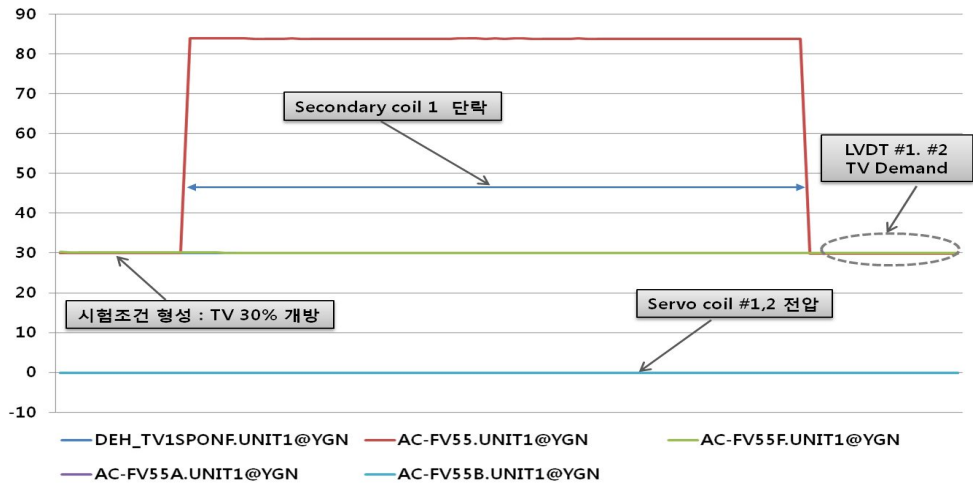


그림 3.26 제어 LVDT Secondary Coil-1 고장 시험 결과

10) 제어 LVDT Secondary Coil-2 고장 시험

그림 3.23은 제어 LVDT의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 제어 LVDT Secondary Coil-2를 단락시켰을 때의 결과를 보여주고 있다. TV #1의 위치가 30%를 유지하고 제어권이 RVP-B로 전환되었음을 확인하였다.

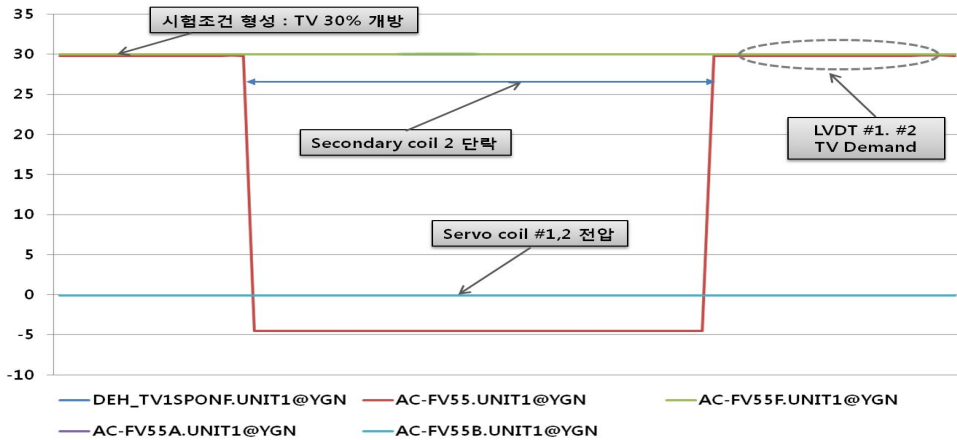


그림 3.27 제어 LVDT Secondary Coil-2 고장 시험 결과

11) 제어 LVDT Primary Coil 고장 시험

그림 3.24는 제어 LVDT의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 제어 LVDT Primary Coil을 단락시켰을 때의 결과를 보여고 있다. TV #1의 위치가 30%를 유지하고 제어권이 RVP-B로 전환되었음을 확인하였다.

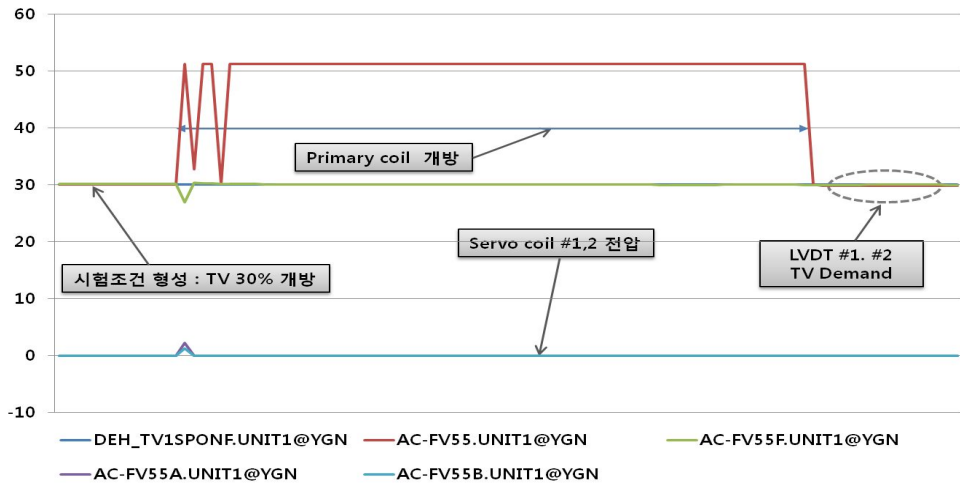


그림 3.28 제어 LVDT Primary Coil 고장 시험 결과

12) 제어 Servo Coil-1 개방 시험

그림 3.25는 제어중인 서보밸브의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 제어 Servo Coil-1을 개방하였을 때의 결과를 보여고 있다. Servo Coil-1의 전압이 약간 상승하였지만 TV #1의 위치가 30%를 유지하고 제어권이 RVP-B로 전환되었음을 확인하였다.

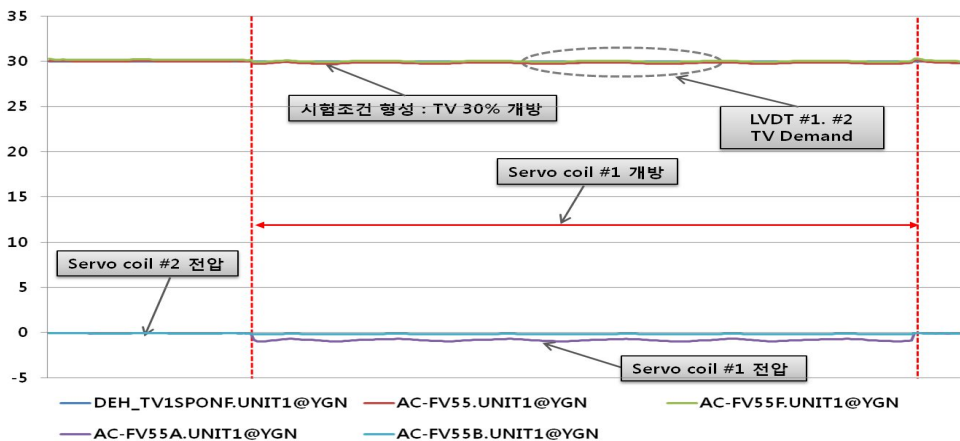


그림 3.29 제어 Servo Coil-2 개방 시험 결과

### 13) 제어 Servo Coil-1 단락 시험

그림 3.26은 제어중인 서보밸브의 고장이 밸브제어에 미치는 영향을 시험하기 위해 제어 Servo Coil-1을 단락시켰을 때의 결과를 보여고 있다. Servo Coil-1의 전압이 약간 상승하였지만 TV #1의 위치가 30%를 유지하고 제어권이 RVP-B로 전환되었음을 확인하였다.

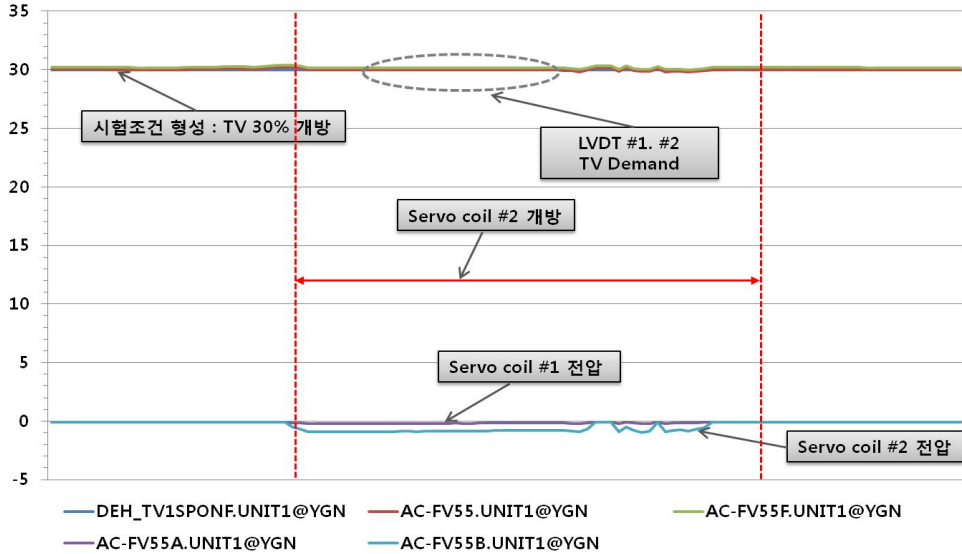


그림 3.30 제어 Servo Coil-2 단락 시험 결과

## 나. 결과분석

이중화 제어루프의 제어특성을 검증하기 위해 영광1,2호기의 터빈제어시뮬레이터 (TCAMS: Turbine Control Algorithm Maintenance System) 및 터빈 현장에서 그림 3.10과 같이 제어루프를 구성하고 발전소와 동일한 운전조건으로 설정하여 Primary/Secondary 위치제어모듈 개별 고장시험, 서보밸브 코일 개방/단락시험, LVDT Secondary Coil-1/2 고장 시험, Serial link 고장시험 등의 종합 고장 전환(Fail-Over)시험을 수행하였다. 모의 시험결과 제어루프 개별 구성기기 고장 시 Primary/Secondary간 제어권 전환이 원활하게 이루어져 밸브 개도가 일정하게 유지됨을 확인할 수 있었다.

표 3.8 모의시험 결과 분석

시험 항목	1차		2차	
	측정시간	변화상태	측정시간	변화상태
(1)	9:34:34 } 9:44:33	개도변화 없음	13:10:00 } 13:11:20	개도변화 없음
(2)	9:48:53 } 9:50:24	LVDT #2 (30% → 80% → 30%)	13:11:45 } 13:12:22	LVDT #2 (30% → 80% → 30%)
(3)	9:51:07 } 9:52:47	LVDT #2 (30% → -4.5% → 30%)	13:16:10 } 13:20:00	LVDT #2 (30% → -4.5% → 30%)
(4)	9:57:07 } 9:59:59	LVDT #2 (30% → 51% → 30%)	13:20:10 } 13:20:46	LVDT #2 (30% → 51% → 30%)
(5)	10:05:26 } 10:07:07	서보코일 #2 전압변화 (-0.1V → -0.937V)	13:21:25 } 13:22:51	서보코일 #2 전압변화 (-0.097V → -1.197V)
(6)	10:12:02 } 10:13:29	서보코일 #2 전압변화 (-0.1V → -0.008V)	13:23:10 } 13:24:32	서보코일 #2 전압변화 (-0.1V → -0.005V)
(7)	10:14:16 } 10:17:52	개도변화 없음	13:25:42 } 13:26:51	개도변화 없음
(8)	10:40:24 } 10:44:49	개도변화 없음	13:27:00 } 13:27:34	개도변화 없음
(9)	10:44:55 } 10:50:59	LVDT #1 (30% → 84% → 30%)	13:28:15 } 13:30:15	LVDT #1 (30% → 84% → 30%)
(10)	10:57:01 } 10:58:07	LVDT #1 (30% → -4.5% → 30%)	13:46:12 } 13:47:18	LVDT #1 (30% → -4.5% → 30%)
(11)	11:01:30 } 11:03:10	LVDT #1 (30% → 51% → 30%)	13:48:00 } 13:49:52	LVDT #1 (30% → 51% → 30%)
(12)	11:05:37 } 11:10:00	서보코일 #1 전압변화 (-0.1V → -0.98V)	13:51:56 } 13:54:43	서보코일 #1 전압변화 (-0.1V → -1.464V)
(13)	11:10:20 } 11:14:56	서보코일 #1 전압변화 (-0.1V → -0.017V)	13:55:17 } 13:17:09	서보코일 #1 전압변화 (-0.1V → -0.013V)

## 제 4절 제어루프 개선 예상효과 분석

고압터빈 정지밸브 이중화 설비개선을 위해 시공 및 제작비용으로 약 4억 2천만원이 투입될 것으로 예상되고 설비 개선 후 발전 손실 및 정비비용 절감 등으로 약 36억 4천만원이 절감되어 투입비용대비 약 32억 2천만원의 비용절감 효과가 발생할 것으로 기대된다. 무형효과로는 설비신뢰도 향상으로 발전소 무고장 안전운전 및 대외신뢰도 향상에 기여할 것으로 예상된다.

표 3.10 제어루프 이중화 효과 분석

- 터빈정지밸브 제어루프 이중화로 출력감발 예방효과 : 약 36.4억원

$$[\text{약 } 2.52\text{억원 (①)} + \text{약 } 0.08\text{억원 (②)}] \times 14\text{년} = \text{약 } 36.4\text{억원}$$

※ 계산식 : [발전손실 + 정비비용] × 잔여수명

- 터빈정지밸브 제어루프 구성기기 고장으로 인한 발전손실 : 연간 약 2.52억원

$$1.33\text{회} \times 20,000 \text{ kWh} \times 11\text{시간/회} \times 43.07\text{원/kWh} \times 2\text{호기} = \text{약 } 2.52\text{억원} - \text{①}$$

※ 계산식 : 감발횟수 × 손실량 × 손실시간 × 판매단가 × 호기

※ 산출근거

- 감발횟수 : '06~'12년도 터빈밸브 제어루프 구성기기 고장 총 8회 발생
- 손실시간 : 11시간/회('10년도 영광2호기 RVP 고장으로 인한 출력감발 기준)
- 판매단가 : 43.07원/kWh (원자력판매단가 기준)

- 터빈정지밸브 제어루프 구성기기 고장으로 인한 정비비용 : 연간 약 0.08억원

$$360,629\text{원} \times 6 \text{명} \times 1.375\text{MD} \times 1.33\text{회/년} \times 2\text{호기} = 7,914,003\text{원} - \text{②}$$

※ 계산식 : 고급기술자인건비 × 인원 × 단축시간 × 정비횟수 × 호기

※ 산출근거

- 인건비 : 360,629원(지경부 고시 제2011-77, 엔지니어링사업대가의 기준 적용)
- 투입인원 : 6명(고장정비 수행 인원)

## 제4장 결 론

지금까지 영광 1,2호기 고압터빈정지밸브(TV) 제어기기 고장 발생현황 및 유형을 분석하고 제어루프를 기존의 단일제어 루프에서 이중화 제어루프로 개선하기 위해 가장 중요한 밸브 제어특성시험을 수행하였다.

고압터빈 정지밸브(TV) 제어루프 이중화를 위하여 밸브 제어모듈(RVP), 서보밸브(Servo valve), 밸브개도검출기(LVDT)를 추가 구성하고 LVDT Fail, RVP 모듈 Fail, Servo Coil 개방/단락 등 단일기기 고장 발생 시 신속하게 제어 루프전환이 이루어질 수 있도록 제어로직을 변경하여 모의시험을 수행한 결과 양호한 밸브 제어특성을 얻을 수 있었다.

또한 고압터빈 정지밸브(TV) 제어루프 개선 시 경제적 효과를 분석해 본 결과 영광 1, 2호기 수명기간동안 추가적인 투자비용 없이 지속적으로 동일한 효과가 발생될 것이며 투입비용 대비 약 32억원의 비용절감 효과가 있을 것으로 분석되었다. 또한 제어기기간 유기적인 기능 진단방식이 적용되어 정비효율성이 현저하게 향상될 것으로 예상된다.

제어시스템이 적절한 제어동작을 수행하기 위해서는 최종 말단부인 작동부가 신속하게 응답해야 한다. 고장이 발생하여도 정상운전을 계속할 수 있도록 제어시스템 다중화가 매우 중요하게 대두되고 있고 원자력, 화력발전의 제어 시스템은 2중화 또는 삼중화 개념을 채용하고 있으며 이에 따라 증기밸브 제어도 다중화 되는 추세이다. 이에 본 연구결과를 바탕으로 영광1,2호기 고압터빈정지밸브(TV) 제어 시스템을 기존의 단일 제어방식에서 이중화 제어 방식으로 개선한다면 밸브 제어구성품 고장에 의한 출력감소 현상이 획기적으로 줄어들 것으로 예상되고 터빈제어 설비(DEH)의 신뢰성이 대폭 향상될 것이다

## 참고문헌

- [1] 조영인, “원자력발전소 터빈제어계통 소개” 월성원자력본부 훈련센터, pp 1~3, 2005.
- [2] 정창기, “국내 발전소에서의 삼중화 터빈 제어시스템 적용사례” 전력연구원, pp 1~3, 2006.
- [3] “Mark-VI System 일반“ 당진화력, pp 2~7.
- [4] 김광덕, “영광 1발전소 고압터빈 운전” 영광원자력본부 영광훈련센터, pp 14~22 2007.
- [5] 이용선, “터빈제어계통” 영광원자력본부 영광훈련센터, pp 1~17, 2005
- [6] “Ovation Operator Station User’s Guide”, WestingHouse, pp 2~22, 2008.
- [7] “Ovation I/O Referance Manual” WestingHouse, pp 456~509, 2007.
- [8] 류호성, “영광 1,2호기 터빈 보호 계통” 영광1발 계측제어팀, pp 1~17, 2007.
- [9] 박상규, “신고리 3,4호기 Ovation System” 시운전교육자료, pp 3~17, 2012.
- [10] “Yeonggwang DEH MOD III Document & Drawing Volume 1, 2”, WestingHouse.
- [11] “Turbine-Generator Instruction Book Volume 22”, WestingHouse.
- [12] “Yeonggwang Nuclear Power Plant #1,2 Operation Procedure” : Normal Operation Procedure No 411
- [13] 한수원(주) 원자력 교육원 교재 기계-33 터빈
- [14] KOINS(Korea Hydro&Nuclear Power Plant Nuclear Information System) : 한수원(주) 원자력 기술정보 시스템
- [15] KOREA NUCLEAR UNITS 7&8 STATION MANUAL
- [16] Steam Valves And Steam Piping Systems(TBN Manual VOL. 9)
- [17] Theory of Operation(TBN Manual VOL. 5)

## 감사의 글

바로 어제, 대학원 1학기를 시작했던 것 같은데 감사의 글을 쓰려고 하니 설레임과 아쉬움이 가슴에 가득히 차 오릅니다.

직장과 학업을 병행하는 일이 결코 쉽지만은 않았지만 저에게 애정을 쏟아 주시는 많은 분들의 도움으로 인해 이렇게 무사히 졸업을 할 수 있었습니다. 이 좁은 지면을 통해 일일이 감사의 뜻을 전하지는 못하지만 그 분들의 도움이 아니었다면 힘들었을 것입니다. 모든 과정을 마치고 논문의 마지막을 감사의 글로 남기려고 하니 항상 도움만 받고 베풀지 못한 제 자신이 한없이 부끄러워집니다.

대학원 과정 가운데 제자에 대한 교수님들의 깊은 애정을 느낄 수 있었고 연구자로서의 태도와 학습방법을 배울 수 있었습니다. 특히 지도교수님이신 나만균 교수님의 열정적인 지도는 저를 많이 겸손하게 해주었고 과학적 근거를 통한 연구과정의 지도는 저를 성장시키는데 큰 동력이 되었습니다. 지도 교수님께 깊은 감사의 마음을 드립니다.

다음으로 논문 심사과정에서 세심하며 명철한 제안과 배려로 더욱 깊은 사고를 할 수 있도록 도와주신 송종순 교수님과 정운관 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 평소 학교생활을 통하여 변함없는 애정과 관심으로 격려해 주신 김진원 교수님, 이경진 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

더불어 대학원 생활과 직장생활을 병행 할 수 있도록 도와주신 직장 선배님들께도 감사의 말씀을 드립니다. 류호성 차장님과 주동식 차장님, 김홍진 차장님은 많은 것이 부족한 제가 대학원에 진학할 수 있게 큰 용기와 자신감을 주셨습니다. 아울러 이름을 일일이 거론하지 못한 많은 소중한 인연 분께도 감사한 마음이 많습니다.

마지막으로 제 평생의 후원자이자 언제나 사랑으로 저를 보살펴주시고 믿어주시는 부모님과 사랑하는 동생에게도 감사의 마음과 진심 어린 사랑의 마음을 전합니다.

2013년 5월

여 현 우



# 저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20117293	과 정	석사
성 명	한글 : 여 현 우    한문 : 呂 賢 祐    영문 : YEO HYUNWOO				
주 소	전남 영광군 홍농읍 상하리 한수원 사택 18-204호				
연락처	E-mail : yeopo@khnp.co.kr				
논문제목	영광 1,2호기 고압터빈정지밸브(TV) 제어루프 이중화 연구				
	<b>A study on Duplexing of the HP TBN Throttle Valve Control System in Yeonggwang Unit #1, 2</b>				

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(    )

2013년 5월

저작자:    여 현 우    (인)

## 조선대학교 총장 귀하