



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](#)

2010년 8월
석사학위논문

영광원자력 1,2호기 DEH
Controller 제어특성 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

최진오

영광원자력 1,2호기 DEH
Controller 제어특성 연구

A Study on the control characteristics of DEH Controller in
Yonggwang NPP #1,2

2010년 8월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

최진오

영광원자력1,2호기 DEH
Controller 제어특성 연구

지도교수 김 승 평

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2010년 4월

조선대학교 대학원

원자력공학과

최 진 오

최진오의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 승 평 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

2010년 5월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차	ii
그림 목차	iii
ABSTRACT	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 영광 1,2호기 터빈 제어	2
제 1 절 조속기(Governor)	2
1. 조속기 개요	2
2. 조속기 종류	3
제 2 절 터빈의 물리적 구조에 관한 고찰	5
1. 터빈의 물리적 구조	5
2. 터빈 노즐	7
3. 터빈 날개의 목적과 분류	10
제 3 절 영광 1,2호기 DEH 제어 계통 고찰	15
1. 계통 기능	15
2. MOD III Level 제어기	16
3. DEH 운전방식	20
4. 터빈 밸브 제어	22
제 4 절 DEH 설비 고장 사례	32
1. 국내 사례(영광 1,2호기)	32
1. 해외 사례	32
제 3 장 터빈 속도제어 시뮬레이션	37
제 1 절 터빈 기동 중 원치 않는 터빈속도 상승 사례	37
1. 경험사례 개요	37
2. 주요 내용	37
제 2 절 터빈속도 상승 원인 분석	39
1. TV 개방 원인	39
2. 제어 도면	41
제 3 절 시뮬레이션 결과	44
1. 시뮬레이션 개요	44

2. 시뮬레이션 진행 방법 및 결과	44
3. 시뮬레이션 분석	46
제 4 장 결론	48
참고문헌	49

표 목 차

표 2.3.1	WESTINGHOUSE 제어기 변천사	16
표 2.4.1	국내 DEH 고장 사례	31
표 2.4.2	해외 DEH 고장 사례	32
표 3.2.1	TV 특성곡선 데이터	40

그림 목차

그림 2.1.1	조속기 장치	2
그림 2.1.2	Fly-Ball 조속기	3
그림 2.1.3	기계유압식 서보 모터	3
그림 2.1.4	전자식 조속기	4
그림 2.2.1	터빈 싸이클	6
그림 2.2.2	고압터빈 증기흐름	7
그림 2.2.3	노즐 구성이론	8
그림 2.2.4	노즐에서의 유량 특성치 변화	9
그림 2.2.5	압력비에 따른 질량유동률	10
그림 2.2.6	충동터빈 날개	11
그림 2.2.7	충동날개 속도 벡터선도	12
그림 2.2.8	반동터빈 날개	13
그림 2.2.9	회전반동날개 속도 벡터선도	13
그림 2.3.1	DEH 배치도	19
그림 2.3.2	기본적인 제어 Loop	21
그림 2.3.3	GV 구조도	21
그림 2.3.4	GV 제어 구조도	22
그림 2.3.5	TV 구조도	25
그림 2.3.6	TV 제어 구조도	26
그림 2.3.7	IV 제어 구조도	27
그림 2.3.8	RSV 제어 구조도	28
그림 2.3.9	LVDT 외관	29
그림 2.3.6	LVDT 차동코일	29

그림 2.3.11	증기밸브와 증기배관	30
그림 2.3.12	고압타빈으로의 증기흐름	30
그림 3.1.1	GV, TV 및 터빈 속도 트랜드	37
그림 3.2.1	DEH 제어로직 1	40
그림 3.2.2	DEH 제어로직 2	41
그림 3.2.3	DEH 제어로직 3	42
그림 3.3.1	DEH 제어패널	43
그림 3.3.2	모의제어반 시뮬레이션 결과	44
그림 3.3.3	TCAMS 시뮬레이션 결과	44
그림 3.3.4	터빈 발전기 레이아웃	45
그림 3.3.5	터빈 과속도 가능성 시뮬레이션	46

ABSTRACT

A Study on the control characteristics of DEH Controller in Yonggwang NPP#1,2

By Choi, Jin Oh

Adviser : Prof. Kim, Soong Pyoung, 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. DEH control system controls TV(Throttle Valve), GV (Governor Valve), IV(Intercept Valve) and RV (Reheat Stop Valve) with the Digital Computer. That is, it controls the amount of steam supplied to the turbine and thus the rotational number of turbine and the output of the generator.

In Yonggwang Nuclear Power Unit 1 and 2, the computer named W2500 supplied by Westinghouse was used in MOD II Model the DEH controller, which was replaced in 2002 by MOD III Model using the ovation system, a distribution controlling facility of Westinghouse. With this replacement by a new system, it became necessary to study the possible problems during the operation with the reduced speed after raising the turbine speed. When this study is applied to the real plant, we can expect that it will contribute to the more reliable operation of the nuclear 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, 디지털 전자유압)제어 계통이다.

DEH 제어 계통은 Digital Computer에 의하여 TV(Throttle Valve), GV(Governor Valve), IV(Intercept Valve), RV(Reheat Stop Valve)를 제어하며 곧 터빈에 공급하는 증기의 양을 조절하여 터빈의 회전수와 발전기 출력을 제어한다.

영광원자력 1,2호기는 초기에 Westinghouse사에서 공급한 W2500 컴퓨터를 사용한 DEH 제어설비인 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 시스템에서 발전정지 등 여러 문제점들이 확인되고 있는 추세이다. 본 연구는 실제 발생한 사건중의 하나인 영광원자력 발전소 1호기에서 터빈 기동 중 원치 않는 터빈 속도 상승사례를 중심으로 연구되었고 영광훈련센터 Simulator 및 영광1발전소의 DEH 시뮬레이션 장비 TCAMS(Turbine Control Algorithm Maintenance System)에 의해 검증되었다. 새로운 시스템으로의 교체에 따라 발생한 문제점을 연구하고 이를 실제 발전소에 적용하여 재발하지 않도록 함으로써 더욱 신뢰성 있는 원자력 발전소 운전에 기여하고자 본 연구를 시작하게 되었다.

제 2 장 영광 1,2호기 터빈제어

제 1 절 조속기(Governor)

1. 조속기 개요

기관이나 원동기의 회전속도를 하중에 관계없이 일정 범위 내에서 자동적으로 유지시켜주는 장치로써 일반적으로 연료 공급비율을 변화시켜 기관의 속도를 조절한다. 모든 조속기는 원심력에 의해 작동되며, 구동축 주위를 도는 2개의 추로 이루어져 있는데 이 추들은 대개 용수철을 이용한 제어력에 의해 밖으로 튀어나가지 않도록 되어 있다. 속도가 증가하면 제어력보다 커지므로 추가 밖으로 움직이며, 이 추의 움직임이 발동기에 작동 유체나 연료를 공급하는 밸브로 전달된다. 그림은 제임스 와트가 증기기관을 제어하기 위해 발명한 비구(飛球) 조속기이다. 회전축은 수직축과 연결된 팔에 붙어 있는 공이고, 제어력은 이 공의 무게로 이루어진다. 기관에 대한 하중이 줄어들면 속도는 증가한다. 그러면 공 M은 밖으로 움직여서 부재 C가 수직축에서 위로 미끄러짐으로써 기관으로 들어가는 증기를 줄여 속도를 줄인다. 하중이 증가하면 이 조속기는 반대로 작용한다. 오늘날 조속기는 내연기관으로 유입되는 가솔린 흐름을 조절하고, 여러 가지 터빈에서는 증기·물·가스 등의 흐름을 조절한다.

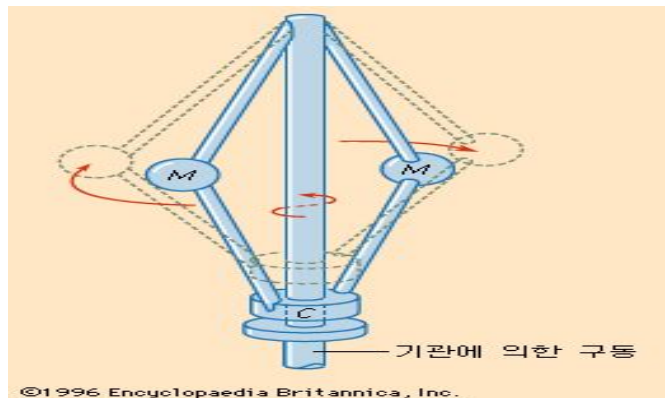


그림 2.1.1 조속기 장치

2. 조속기 종류

가. 기계식 조속기

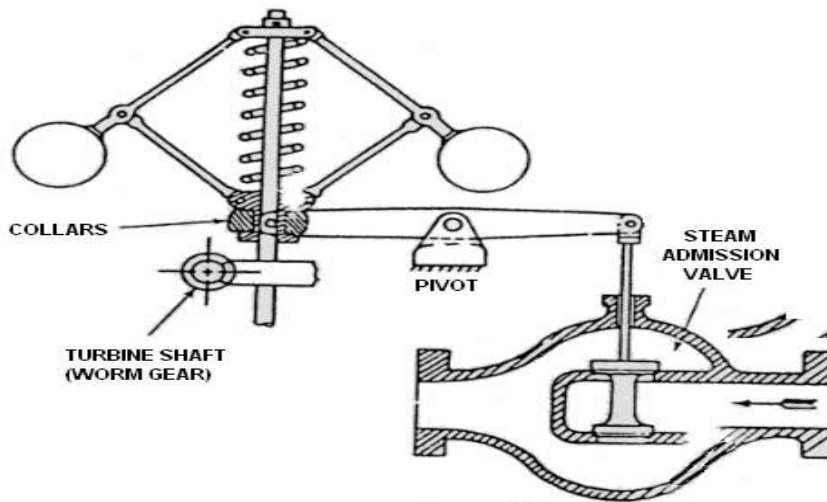


그림 2.1.2 Fly-Ball 조속기

나. 전자식 조속기(Electro-Hydraulic Governor)

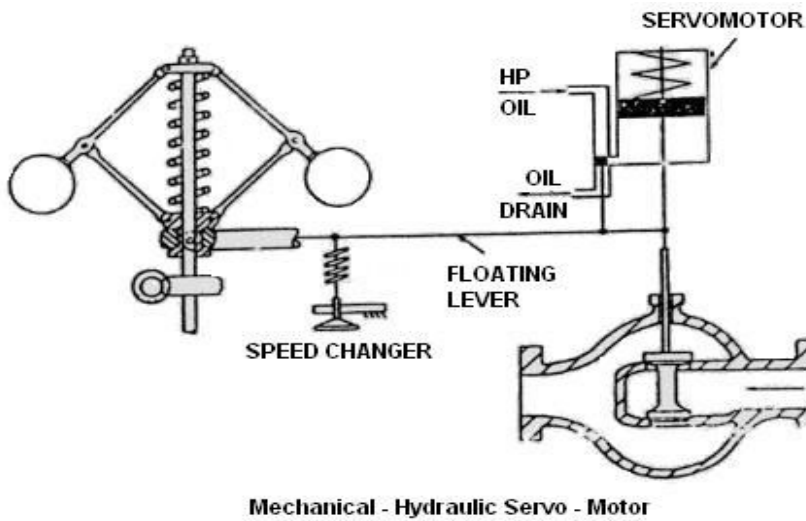


그림 2.1.3 기계-유압식 서보 모터

다. Digital Electro Hydraulic Controller

전자식 조속기의 아날로그 제어부 대신 컴퓨터를 사용한 디지털 제어방식으로써 신뢰성 향상, MMI 기능 강화, 다중화 등의 특성을 가진다.

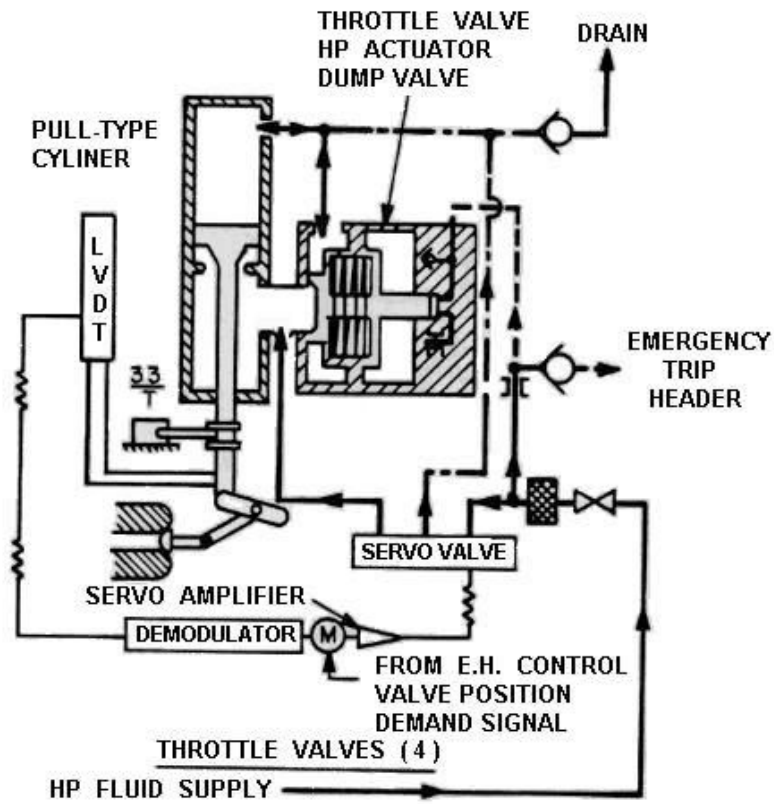


그림 2.1.4 전자식 조속기

제 2 절 터빈의 물리적 구조에 관한 고찰

1. 터빈의 물리적 구조

가. 구성 : 고압터빈 1개, 저압터빈 3개

나. 증기 흐름

S/G에서 생산된 포화증기(929 psi, 535°F)는 증기의 흐름을 균일하게 하기 위하여 공통 모관(STM HDR)에 모여 4개의 정지밸브와 4개의 제어밸브를 통해 2개의 증기실(STM CHEST)로 유입되며, 4개의 입구는 4개의 NOZZLE CHAMBER로 증기를 유도한다. NOZZLE CHAMBER를 지난 증기는 CONTROL-STAGE BLADING을 거쳐 터빈 BLADE로 유입되어 터빈을 회전시킨 후 EXHAUST Cavities를 거쳐 배기된다.

1) 터빈 2/3단 추기(GOVERNOR END, 16")

- 온도/압력 : 445 psig, 457°F
- 사용처 : HP HTR #7, MSR STM REHEATER #1

2) 터빈 4/5단 추기(GOVERNOR END, 18")

- 온도/압력 : 306 psig, 421°F
- 사용처 : HP HTR #6

3) 터빈 배기

- 온도/압력 : 146 psig, 356°F
- MSR로 유입되어 습분 제거 및 재가열을 통하여 3개의 저압 터빈으로 유입되어 터빈을 회전시킨다.

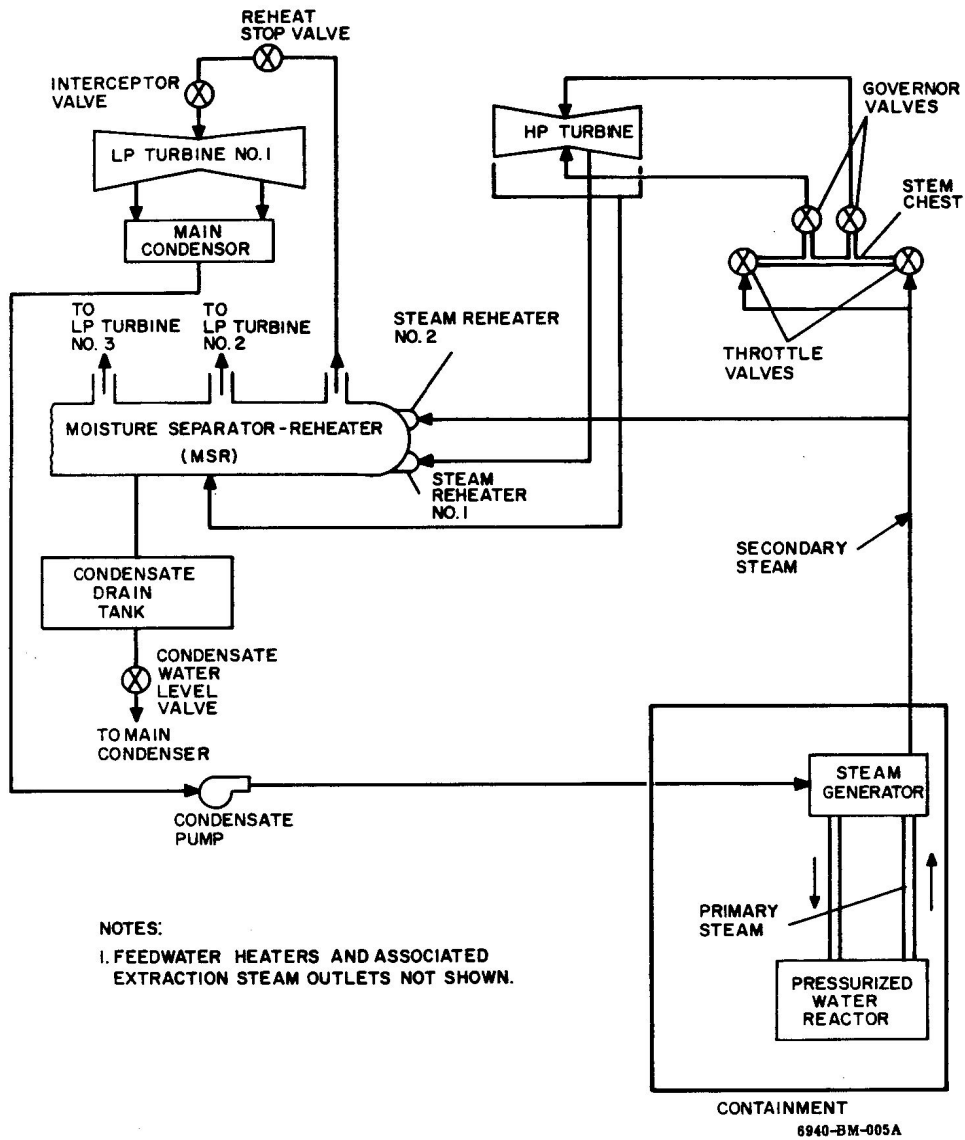


그림 2.2.1 터빈 싸이클

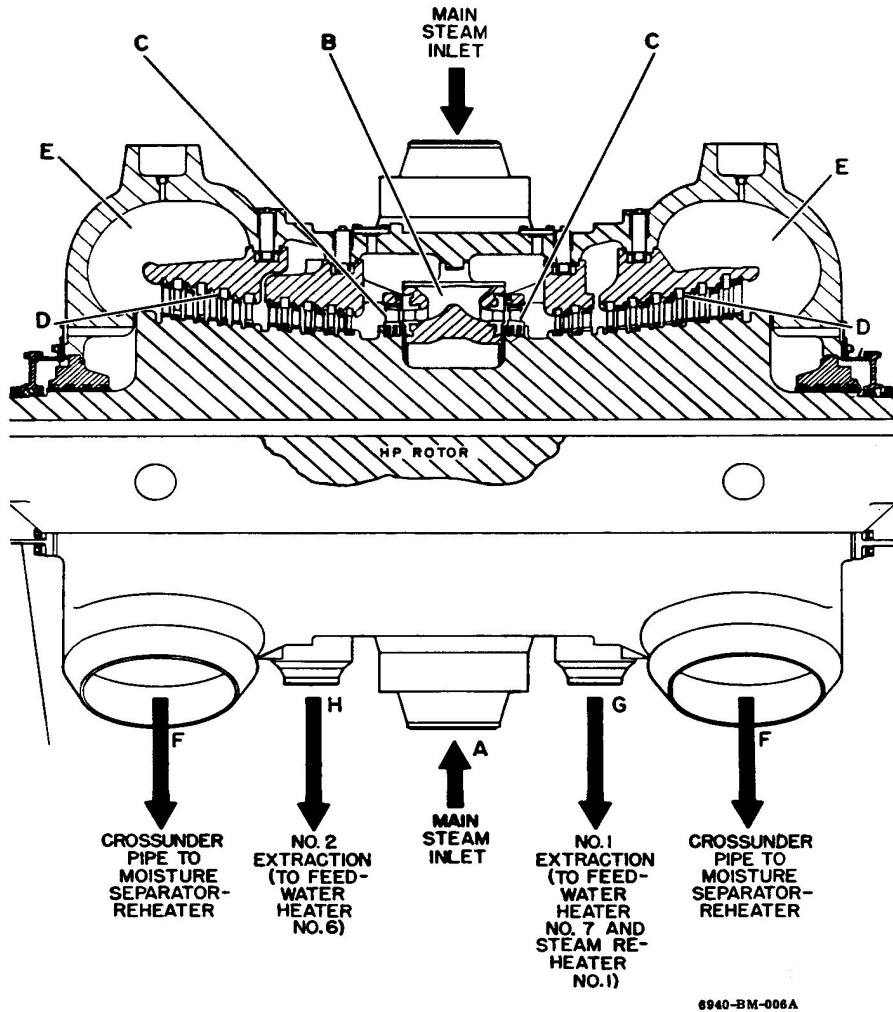


그림 2.2.2 고압터빈 증기흐름

2. 터빈 노즐

유체가 갖고 있는 엔탈피를 운동에너지로 바꿀 수 있도록 하는 장치로서, 터빈의 고정날개가 역할을 수행한다.(축소노즐)

그림 a에서 증기는 실린더벽과 피스톤에 균일하게 압력을 가한다. 피스톤이 움직임에 따라 증기는 내부에너지 일부를 사용하여 일을 한다. 압력이 떨어짐에 따라 증기는 냉각된다

그림 b에서 STM CHEST나 NOZZLE Box내의 증기는 모든벽에 균일하게 압력을 가한다. 그러나 증기는 NOZZLE을 거쳐 고속분출하게 된다. 노즐 반대편 벽에 가해지는

반동압력 P_R 은 분출되는 증기로 인하여 Balance가 이루어지지 않는다. 만일 Box가 고정되어 있으면 증기는 최대절대속도로 분출되어 통로전체에 걸쳐 압력 P_1 이 작용한다. 만일 Box가 움직이면 P_R 은 분출흐름에 반대되는 방향으로 일을 하므로 절대 분출속도는 대단히 느리게 된다.

증기출구압력이 Box 압력의 53% 이상일때는 노즐은 Converging Cross Section만이 필요로 하고, 53% 이하일때는 그림 c에서와 같이 Diverging Section이 필요하게 된다.

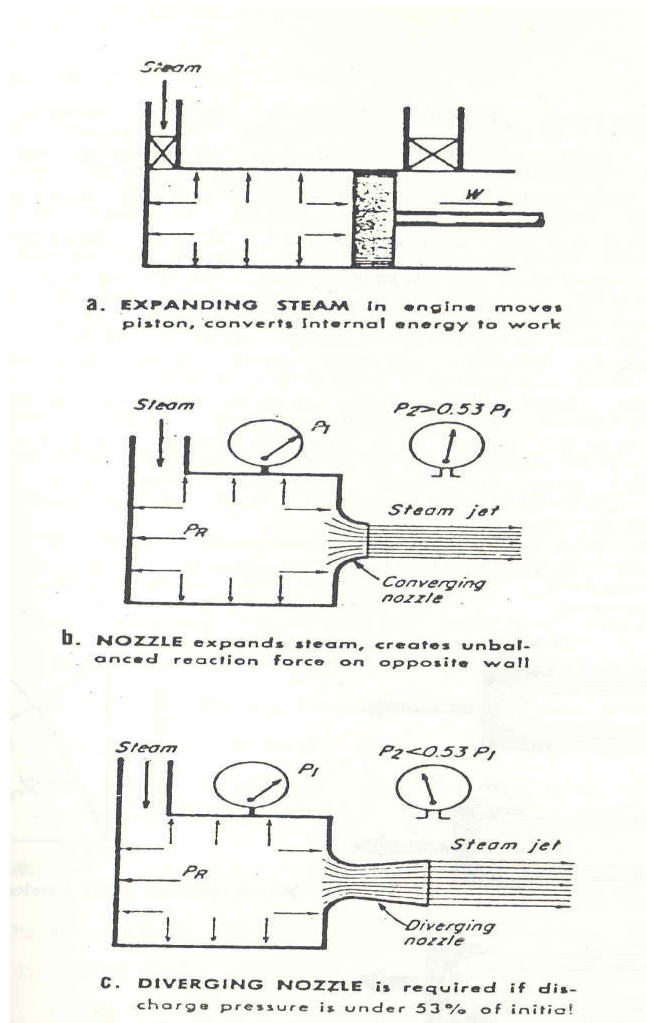


그림 2.2.3 노즐 구성이론

○ 축소노즐에서의 아음속(Subsonic) 흐름

터빈 축을 회전시킬 만큼 충분한 토크가 되기 위해서는 터빈날개에 충돌하는 증기의 속도가 매우 커야 한다. 노즐에서는 증기의 엔탈피가 운동에너지로 변환된다. 운동에너지의 증가는 증기의 운동량과 속도의 증가(Momentum = mV)로 나타난다.

노즐을 통해 등엔트로피 과정으로 흐르는 유체의 특성치 변화는 유로의 단면적 변화가 가장 중요한 원인이 된다. 그러나 노즐 입구와 노즐 출구의 압력차는 유체를 흐를 수 있도록 만들며 그 크기는 노즐내에서 얻을 수 있는 속도에 영향을 미친다.

속도가 0인 유체나 아음속인 유체는 압력차에 따라 움직이게 될 것이다 만일, 압력차가 존재하지 않으면 증기유동은 일어나지 않을 것이다, 직관에서는 압력차가 크면 클수록 증기의 속도와 유동률은 더욱 커진다. 그러나 노즐에서는 압축성 유체의 압력 변화에 영향을 미치는 노즐 형상에 따라 노즐에서의 압력효과가 상쇄된다.

축소노즐에서 아음속 유체의 유동률 변화는 배압이 입구압력과 같다면 노즐을 통한 흐름은 일어나지 않을 것이나, 배압이 입구압력보다 약간 적어지면 흐름이 일어나기 시작하며, 증기는 약간의 질량유동률을 얻으며 유속의 증가를 가진다. 압력이 감소여 유체가 음속에 도달될때 증기의 질량 유동률은 최대가 된다.(Choked flow)

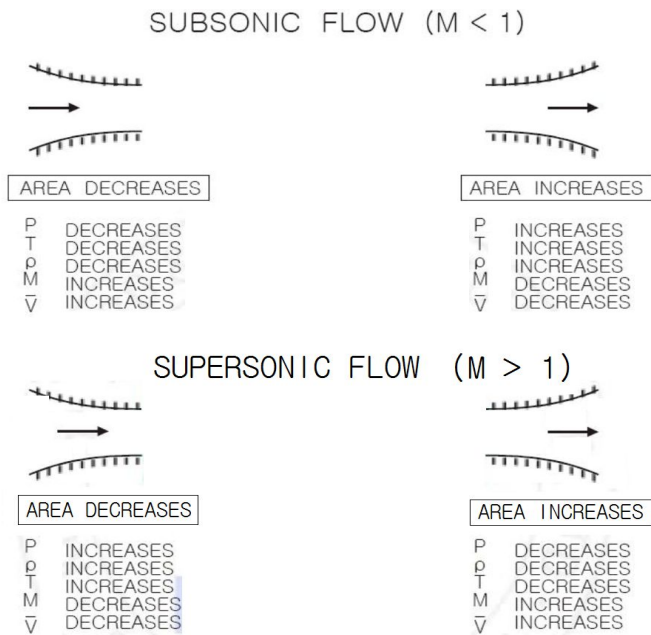
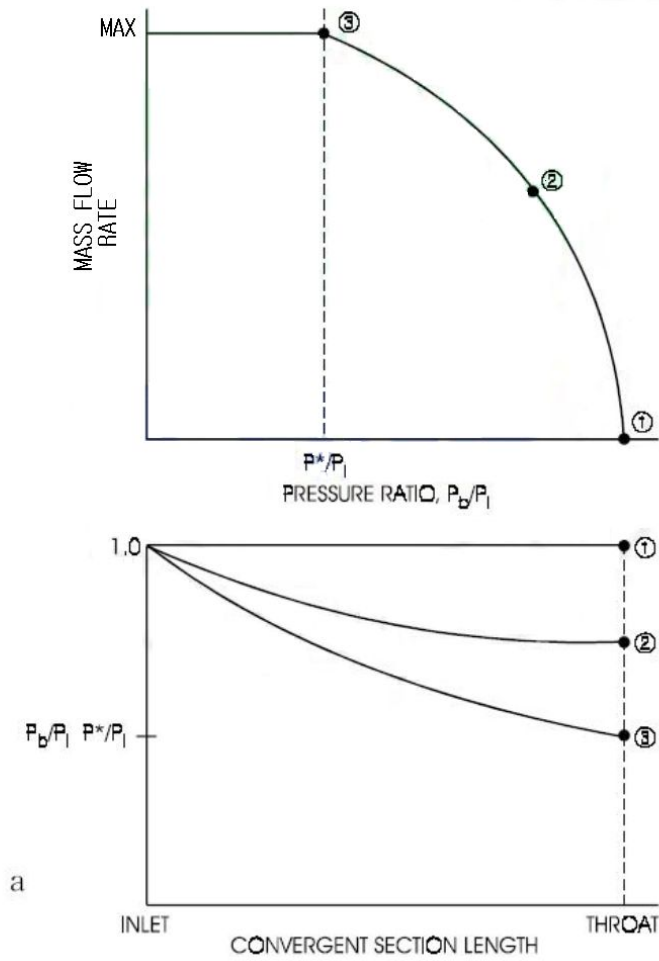


그림 2.2.4 노즐에서의 유량 특성치 변화



3. 터빈 날개의 목적과 분류

노즐을 통해 고압터빈의 증기실로부터 첫째 단 터빈 날개로 흐르는 증기는 상당한 압력의 감소와 상당한 속도의 증가를 겪게 된다. 고속의 증기가 터빈의 회전날개를 때릴 때, 증기의 운동에너지가 터빈축의 일로 전환된다. 증기가 행한 일(W)은 날개가 움직인 거리(ΔX)와 날개의 운동방향으로 증기가 만들어낸 힘(F_x)의 곱과 같다. ($W = F_x \Delta X$) 증동날개는 증기의 운동량을 날개에 전달시킴으로써 힘이 생기도록

하고, 반동날개는 증기의 가속과 팽창에 의한 반동력과 터빈 날개로의 운동량 전달에 의한 충동력이 생기도록 설계되어 있다. 실제일은 터빈 회전날개에만 행하여지나 고정날개는 증기 흐름을 최대로 하고 적절한 방향을 유지하는데 필요하다.

가. 충동날개(Impulse Blade)

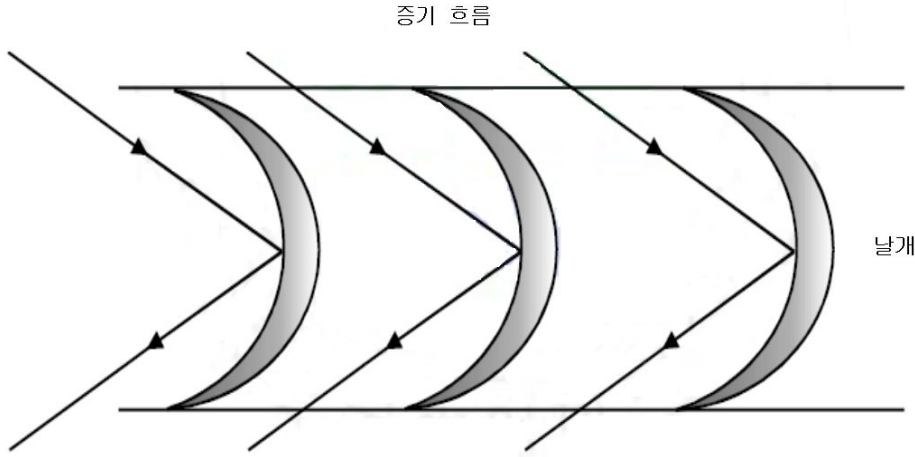


그림 2.2.6 충동터빈 날개

충돌날개는 증기가 운동량을 날개에 전달함으로써 힘이 생기도록 설계되어 있다. 운동량은 물체의 질량과 그 속도의 곱으로 정의되며, 질량이 일정하다고 보면 물체의 운동량의 변화는 질량과 속도변화의 곱이 된다.

$$\text{Momentum 변화} = m\Delta V \text{ ----- ①}$$

$$F = m \frac{\Delta V}{\Delta t} \text{ ----- ②}$$

뉴턴 제 2법칙에 의해 증기의 충격량은 증기가 날개에 전달한 운동량과 같다

$$(\text{충격량}) F \Delta t = m \Delta V$$

증기가 날개에 행한 일은 날개가 움직인 거리(ΔX)와 같은 방향으로의 증기에 의해 생성된 힘(F_x)과의 곱과 같다.

$$W = F_x \Delta X$$

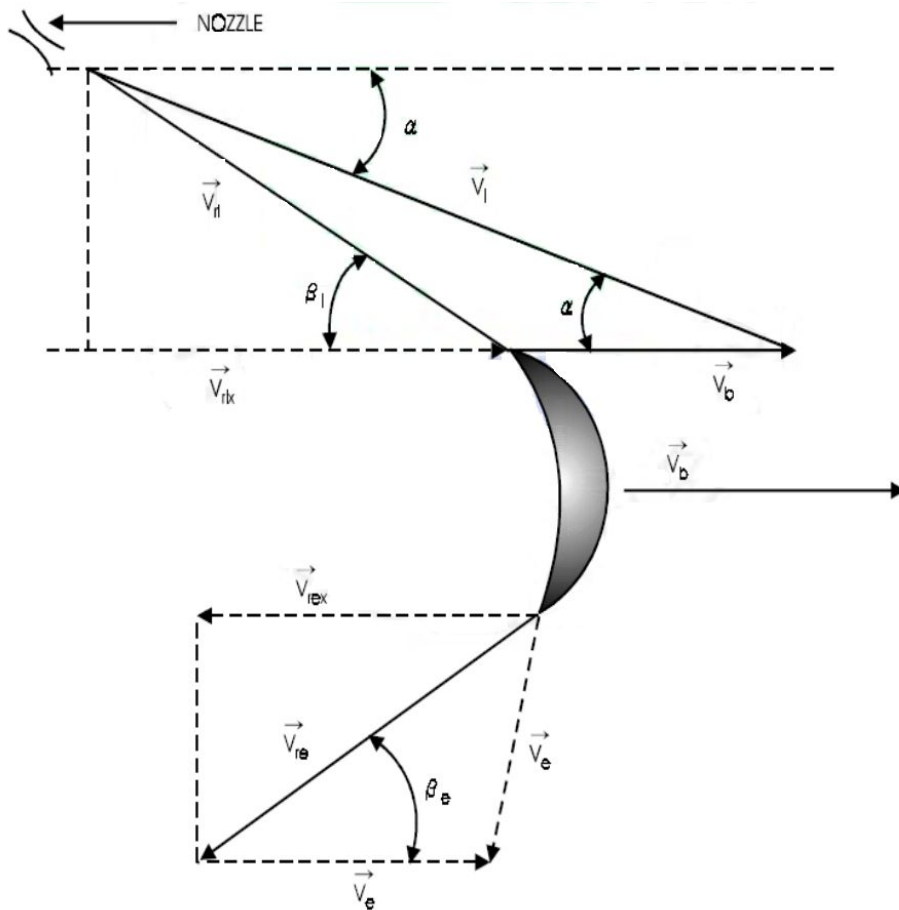


그림 2.2.7 증동날개 속도 벡터선도

증기의 흐름이 일정하다고 가정할 때, 속도가 크다는 것을 운동량 전달이 많음을 의미한다. 또, 운동량의 감소가 크다는 것은 운동에너지의 감소가 크다는 것을 의미한다. 증기가 잃어버린 운동량은 회전날개가 얻는다.

나. 반동 터빈 날개(Reaction Turbine Blade)

반동 터빈 날개는 증기의 속도를 증가 시킴과 동시에 터빈축에 힘을 전달하도록 설계되어 있다. 반동날개는 축소노즐과 같은 모양을 하고 있으며 증기의 엔탈피 감소에 의해서 증기의 속도가 증가된다. 증기의 상태량들은 반동날개의 단면적 변화에 따라 영향을 받기 때문에 증기는 회전날개에 3가지 종류의 힘을 작용 시킨다

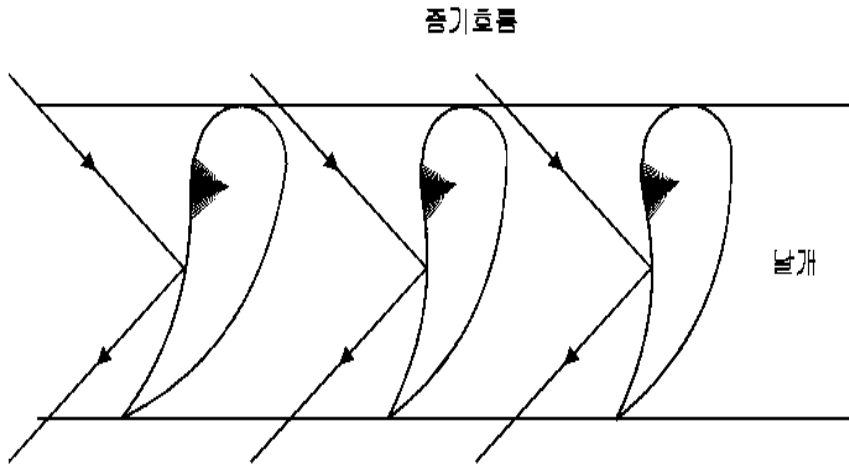


그림 2.2.8 반동터빈 날개

- 노즐 모양의 날개에서 증기의 가속 및 팽창에 대한 반동력
- 증기의 방향 변화에 대한 반동력
- 증기가 날개를 때려 날개로 운동량을 전달함으로써 발생하는 충격력

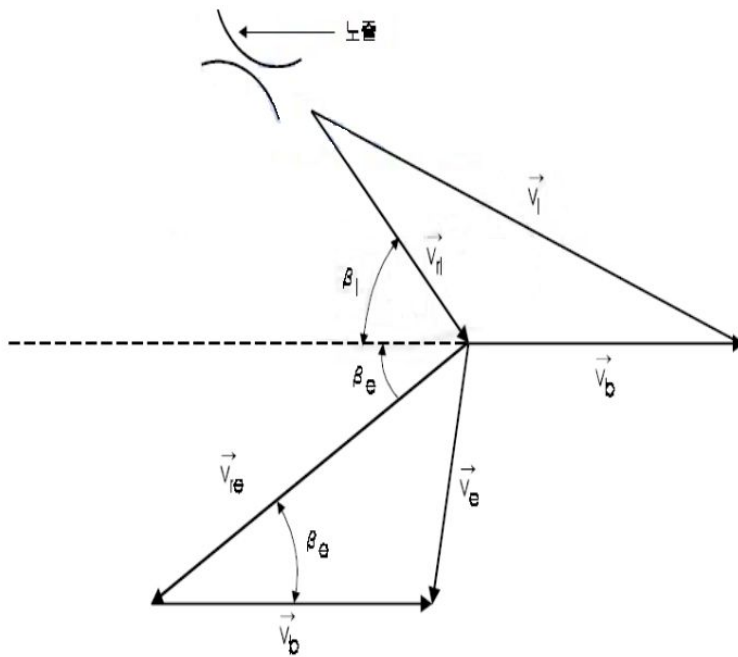


그림 2.2.9 회전반동날개 속도 벡터선도

고정 반동날개를 지나는 동안 증기는 압력이 감소되고 속도가 증가되나 날개에 행한 일은 전혀 없다. 증기가 회전 반동 날개를 지날때는 압력의 감소와 속도의 증가가 일어나고 동시에 날개에 미치는 반동력과 충격력에 의해 일을 하게 된다. 증기가 회전날개에 에너지를 전달함으로써 절대속도의 크기가 감소된다. 즉 회전날개에서는 증기의 상대속도(노즐에 작용하는)가 증가한다.

제 3 절 영광 1,2호기 DEH 제어 계통 고찰

1. 계통 기능

Digital Electro-Hydraulic(DEH) 제어계통은 Digital Computer에 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.

- 계통병입 전 : 터빈의 속도(Speed) 제어
- 계통병입 후 : 부하(load)를 조절
- 터빈을 과속도로부터 보호하며, 비정상 상태 시 정지(Trip)시키는 기능을 갖는다.

가. 제어기 개요

- Westinghouse 제작
- OVATION PHASE II(Hardware)
- 1996년 개발
- MOD III LEVEL(Software)

나. 변천사

- DEH MOD - I
P2000, 16 BIT, NO TYPER,
NO CRT, ATS(Automatic Turbine Start-up)
- DEH MOD - II (영광 #1,2 교체전 설비)
W2500, 16 Bit, Typer, CRT,
ATC(Automatic Turbine Control)
- DEH MOD - III
Microprocessor 채용, Network, MMI 기능 강화

표 2.3.1 WESTINGHOUSE 제어기 변천사

	W2500	WDPF I	WDPF II	WDPF II UPDATE	WDPF II UPDATE	OVATION PHASE I	OVATION PHASE II
개발연도	1970	1981	1989	1990	1992	1995	1996
USER INTERFACE			CLASSIC	WE Station (SUN)	WE Station (SUN)	SUN	SUN
CONTROLLER			386	386	486	PENTIUM	PENTIUM
I/O			Q-LINE	Q-LINE	Q-LINE	Q-LINE	OVATION I/O
HIGHWAY			Westnet II	Westnet II	Westnet II	Westnet II (FDDI)	Westnet II (FDDI)

2. MOD III Level 제어기

가. 중요한 특징 : MSR 및 ETS 를 통합

- Graphic User Interface 사용
- Network 기능 강화
- Full Digital 제어
- Redundant 방식 채용

나. Hardware 구성 (5 Cabinets)

- #1 Cabinet ; ATC/MSR/RSM Controller
ETS controller, Relay Panel
- #2 Cabinet ; OAC/OPC Controller
Power Distribution Panel
MW transducer
- #3 Cabinet ; Termination panel
- #4 Cabinet ; Termination panel (PTS Cabinet)
- #5 Cabinet ; Engineering Console (RTC Cabinet)

다. MMI(Man-Machine Interface)

1) DROP 200

- Engineering Console
 - SUN ULTRA 10
 - 18 " Single LCD
 - Magnetic Tape, External HDD
 - Solaris 2.6 환경
- Database 및 Control configuration
- 프로그램 작성 및 수정
- 그래픽 작성 및 수정
- Operator Station 기능
- Data Link 설정
- 다른 Drop 에 Software 및 data loading
- On line Document
- Report 및 Historical data configuration

2) DROP 160

- HSR(Historical Data Storage & Retrieval) Console
 - SUN ULTRA 10
 - Solaris 2.6 환경
 - 18 " Dual LCD
 - Optical Disk Driver
 - External HDD(Multi-pack) : 2 년분 Data 저장
- Trend & Display
- Operator 기능 중 Control 기능은 차단됨(등급부여)

3) DROP 210

- Operator Station #1
 - SUN ULTRA 5
 - Solaris 2.6 환경
 - 15 " Dual LCD
 - Alarm Printer

4) DROP 211

- Operator Station #2
 - SUN ULTRA 5
 - Solaris 2.6 환경
 - 18 " Single LCD
 - Wave Server

라. NETWORK

1) 특징

- 100 megabits/second communications
- Fiber optic & copper media
- Supports 1000 network device nodes
- Dual-ring
- 200K real-time points/second
- Up to 200 km per redundant ring
- Maximum linear distance 50 km per redundant ring
- High bandwidth utilization
- Timed token access method
- Supports synchronous & asynchronous transmission
- Industry standard components

2) 구성

- CONCENTRATOR
- FDDI
- CDDI
- Ethernet
 - Color copier
 - Laser printer

3) WAVE (Web Access View Enabler)

- 사내 LAN 망 이용
- 원격 감시 및 진단기능
- 운전용 그래픽 감시
- Point Information 및 Trend 기능, 운전조작은 불가능

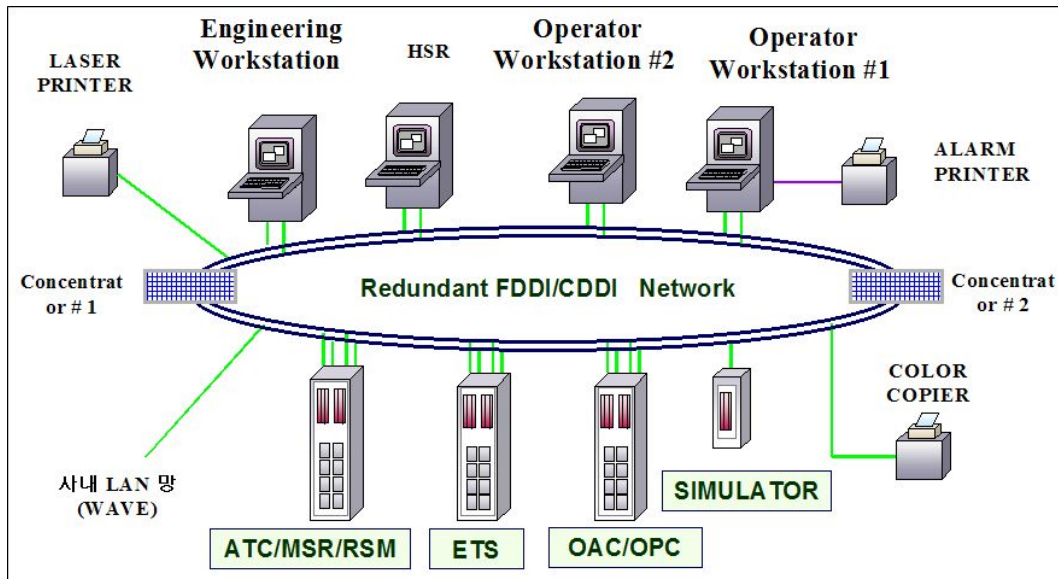


그림 2.3.1 DEH 배치도

3. DEH 운전방식

가. 수동운전(Manual Mode)

- 운전원 조작 Manual Graphic 사용
- ▲, ▼ 버튼을 사용하여 TV와 GV 제어, 실제적인 제어는 DEH Controller 가 수행
- 수동운전시 TV 및 GV 동작 속도(Full Valve Stroke)
 - ☞ Normal : 180초, Fast : 45초, Rapid : 30초(GV 닫힘시만 적용)

나. 자동운전(Oper Auto Mode)

ATC 프로그램에 기초를 두고 있으며, 다음 사항은 운전원이 결정하고 이에 따른 자동운전을 DEH Controller가 수행한다.

- Final Speed
- Final Load
- Change Rate
- Hi/Lo Limit

다. 전자동 운전(ATC : Automatic Turbine Control)

- DEH에 내장된 ATC 프로그램이 터빈의 기동에서 정격 출력운전까지를 자동으로 제어
- ATC 조건 불만족시 Operator Auto Mode로 전환됨.

마. 출력 궤환회로(MW Feedback)

출력 궤환은 현재출력에 대한 GV(Governor Valve)개도를 정확하게 보상하기 위하여 사용된다. DEH는 출력 궤환을 선택(In)하거나 제거(Out)할 때 GV의 개도를 일정하게 유지하여 출력변동을 방지한다. 출력 궤환이 선택되면 지시치와 요구치가 터빈 운전조건에 맞추어 자동적으로 조절된다. 또 출력 궤환이 제거되면 지시치와 요구치는 자동적으로 GV 개도 곡선에 맞추어 조절된다.

출력 궤환이 자동적으로 제거(Out) 되는 경우는 다음과 같다.

- 발전기 차단기 개방
- 발전기 출력 전송기 오동작
- 밸브 개도 제한치 초과
- 수동운전

바. HP 터빈 1단 압력 궤환(First Stage Pr. Feedback)

고압터빈 1단 압력 궤환은 현재출력에 대한 GV 개도의 직선성(정확성)을 개선하기 위하여 사용된다. 출력 궤환이 주로 계통의 출력변화에 따른 속응성이 있다고 한다면 압력 궤환은 원자로측의 출력변화에 따른 속응성이 있다고 말할 수 있다.

충돌실 압력 궤환이 자동적으로 제거(Out) 되는 경우는 다음과 같다.

- 발전기 차단기 개방
- 충돌실 압력 전송기 오동작
- 밸브 개도 제한치 초과
- 수동운전

4. 터빈 밸브 제어

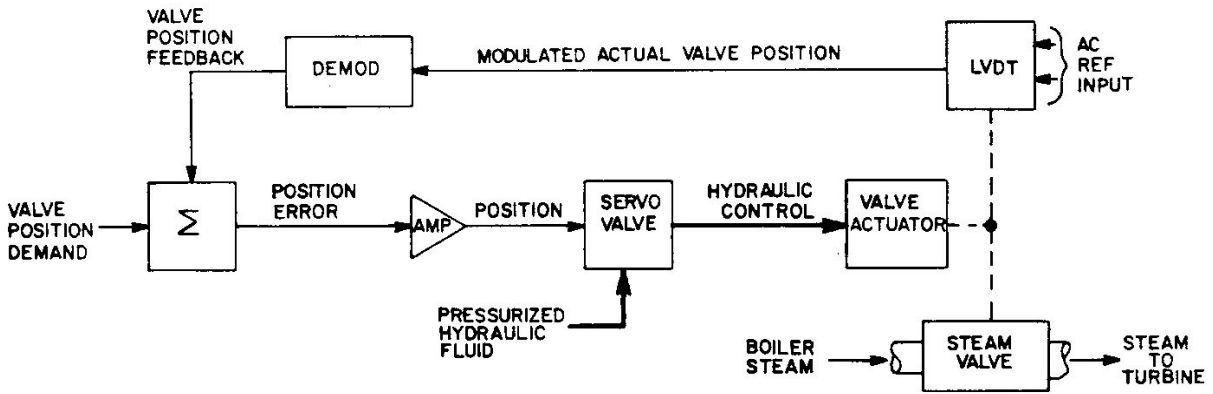


그림 2.3.2 기본적인 제어 Loop

가. GV(Governor Valve)제어 : 4개

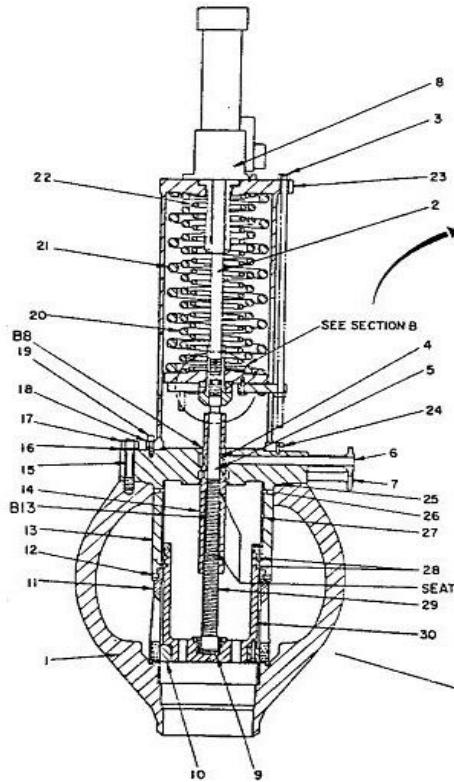


그림 2.3.3 GV 구조도

- 1) Servo Loop에 의해 제어
- 2) GV 전체 스트로크(Stroke) : 14 In(35.56 cm)
- 3) GV LVDT 총 스트로크(Stroke) : ± 10 In(25.4 cm)
- 4) GV 제어 입력 요소
 - Turbine Speed
 - 발전기 유효전력(MW)
 - HP Turbine 첫째단(Impulse) 압력
- 5) GV Control Logic

아래의 경우 DEH 는 GV Control 상태로 간주한다.

 - ATC 모드가 아니고, GV가 완전 Open 상태이며, Oper Auto 이고, TV/GV Transfer가 선택 되었을 경우
 - ATC 모드이고, TV → GV 전환이 ATC에 의해 될 때
 - TV가 90% 이상 열렸을 때

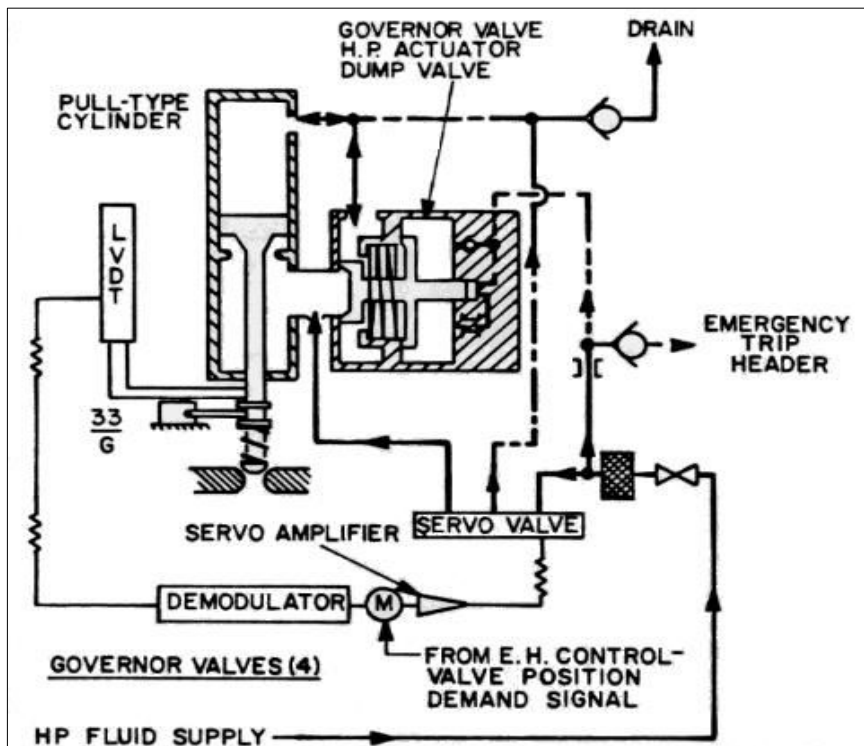


그림 2.3.4 GV 제어 구조도

6) GV 제어 메카니즘

- OPC 및 AST Header 가압 → Dump Valve 닫힘 → GV 열릴 조건 제공
- DEH → Servo → Cylinder 가압 → GV Open

7) GV 제어 방식

- GV 제어방식에는 Single 방식(Full Arc Admission)과 Sequential 방식(Partial Arc Admission)이 있음.
- Single 밸브방식
 - 밸브위치 요구 신호가 GV 4개에 동시에 전달되어 4개의 GV가 함께 동작되도록 하는 운전방식
 - 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.
- 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 감소시킴으로서 출력변동을 최소화시키게 한다. 계산된 각각의 밸브 그룹의 위치요구 신호는 분리된 단독 신호로서 GV에 공급하게 된다.
 - 저출력에서 Throttle Loss(밸브가 너무 적게 열려 있을 때 주증기 유량은 밸브를 통과하면서 분산되어 고압터빈 충동단에 충분한 일을 제공하지 못하는 것) 감소로 가능한 한 최상의 운전효율을 갖도록 함

8) 밸브 제어 형태의 전환(Single ⇔ Sequential Change)

- DEH는 터빈-발전기의 다양한 운전상황에 따라 'Single' 또는 'Sequential' 형태를 선택하여 보다 효율적인 터빈 운전을 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 전환시간 : 500 초
- 밸브 제어 형태의 전환은 터빈-발전기 출력 10~90% 사이에서, 'MW IN' 및 'IMPULSE PRESS OUT' 상태에서 실시해야 한다.
- Sequential 밸브 제어 상태에서 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 절체되면 Sequential 제어 신호는 현 상태에서 그대로 유지한다.
- 밸브 제어 모드 전환 도중 '터빈 런백 신호'가 발생되면 정상적으로 런백 동작됨.
- Sequential 모드에서 Single모드로 자동 전환되는 경우
 - Valve Contingency 발생
 - 터빈 정지

9) 밸브의 우발적 동작(Valve Contingency)

DEH에서 발생된 밸브 위치 요구 신호와 각 서보 증폭기로 변환되는 현장밸브 위치신호(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 작동기가 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.

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

- GV 및 TV의 Demand 값 과 실제 개도가 10% 이상 차이가 날 때 발생
- TV : 경보만 발생
- GV
 - 1개 발생 : 밸브 제어 Single Mode로 전환됨
 - 2개 이상 발생 : DEH 제어 수동모드로 전환됨
- 감시방법 : Governor Valve RVP'S(5513)과, Throttle Valve RVP'S(5514)에서 가능.

나. TV(Throttle Valve)제어 : 4개

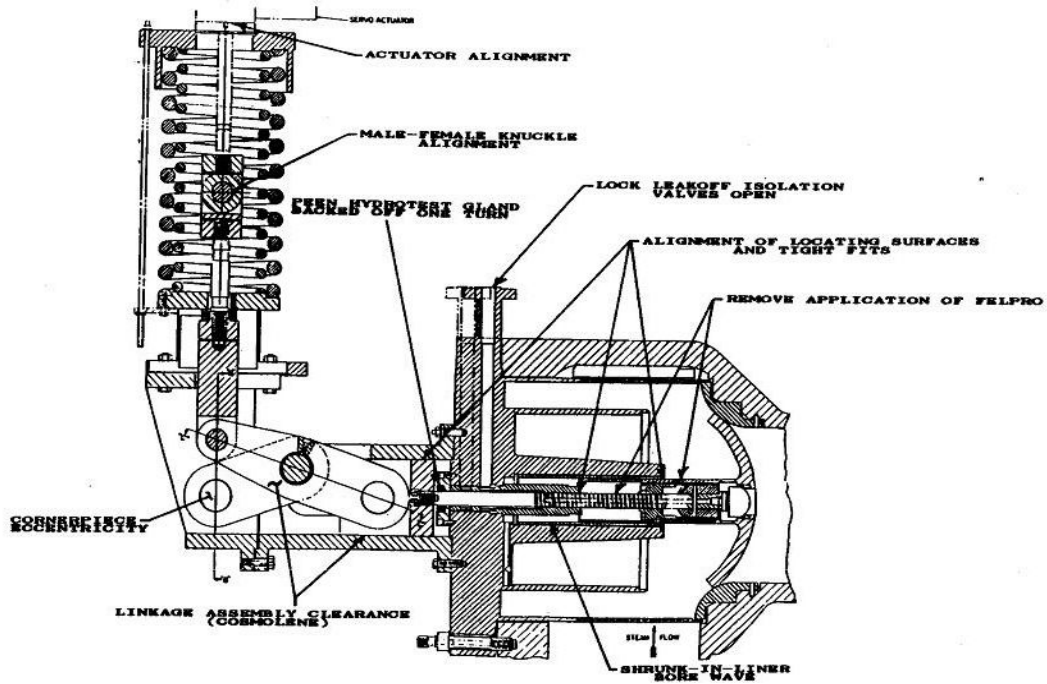


그림 2.3.5 TV 구조도

- 1) 이중구조(Pilot Valve), Servo Loop에 의해 제어
- 2) TV 전체 스트로크(Stroke) : 15.376 In(39.06 cm)
- 3) TV LVDT 총 스트로크(Stroke) : ± 10 In(25.4 cm)
- 4) TV 제어 메카니즘
 - AST Header 가압 → Dump Valve 닫힘 → TV 열릴 조건 제공
 - DEH → Servo → Cylinder 가압 → TV Open
- 5) TV 연동 신호 : 한번 TV가 90%를 초과하여 열릴 경우에는 터빈 정지나 밸브 시험 신호가 동작되지 않는 한 닫히지 않음
- 6) GV Control 아니고 TBN Latch시 TV Control임

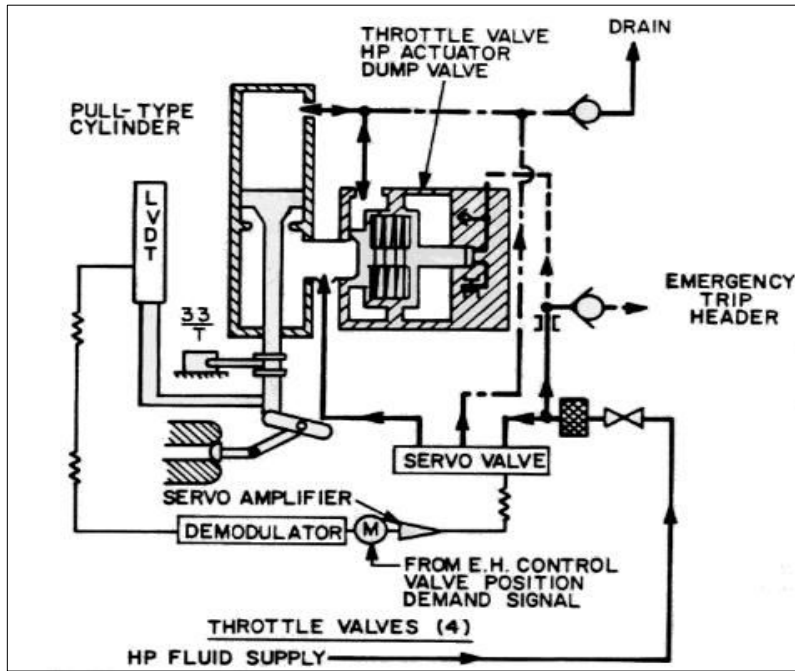


그림 2.3.6 TV 제어 구조도

다. 밸브 전환(TV / GV Transfer)

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 제어가 시작된다. 90%까지 열린 TV는 그 이후 완전 열림 위치까지 서서히 개방되고, 그 이후의 속도 및 부하제어 운전시 TV는 항상 완전 열림 상태를 유지한다.

라. IV(Interceptor Valve)/RSV(Reheat Stop Valve)제어 : 각 6개

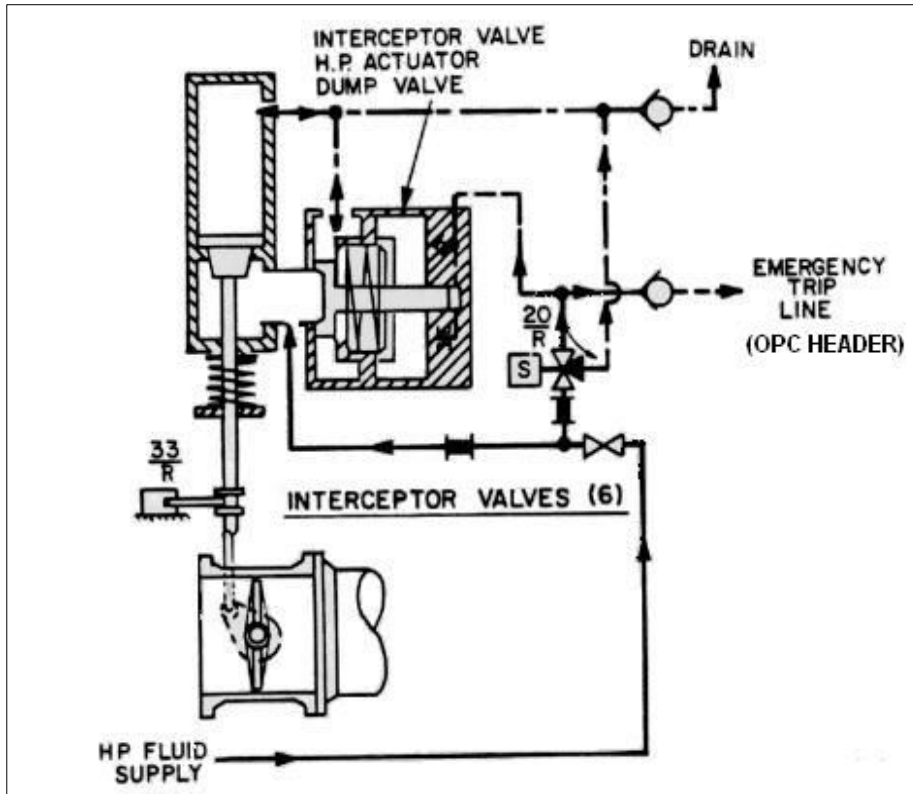


그림 2.3.7 IV 제어 구조도

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

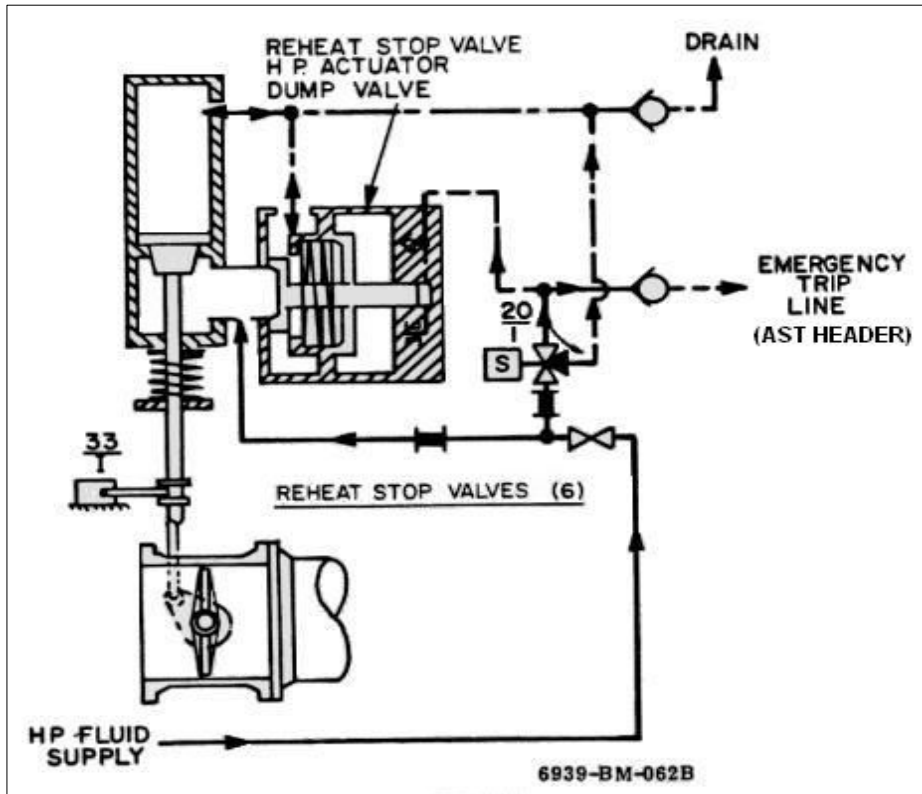


그림 2.3.8 RSV 제어 구조도

마. LVDT(Linear Variable Differential Transformer)

- 1) 차동코일 이용하여 증기밸브의 위치를 측정하여 Servo Amplifier로 보내준다.
- 2) Stroke : 약 400 mm
- 3) 원리 : 차동코일 이용
- 4) 1차 Coil : RVP Module 에서 약 1 kHz, 약 6.2 V 교류전압 인가
- 5) 2차 Coil : Core 위치에 따른 전압인가
- 6) Core 인출시 : 약 0.7 VAC
- 7) Core 삽입시 : 약 5.5 VAC
- 8) Core 길이는 LVDT 전행정 1/2 임.

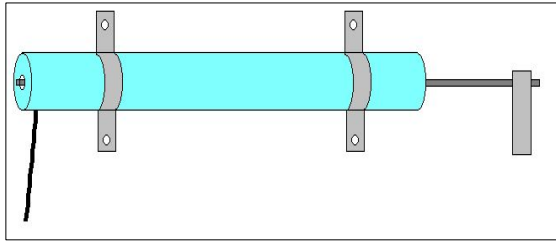


그림 2.3.9 LVDT 외관

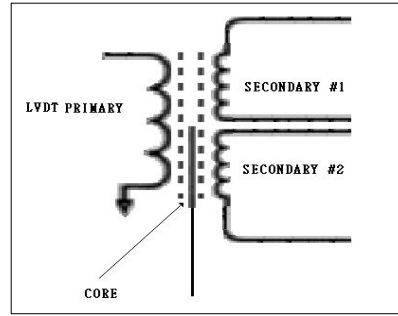


그림 2.3.10 LVDT 차동코일

사. Limit Switch & Link

1) Stroke

- TV : 약 390 mm
- GV : 약 360 mm

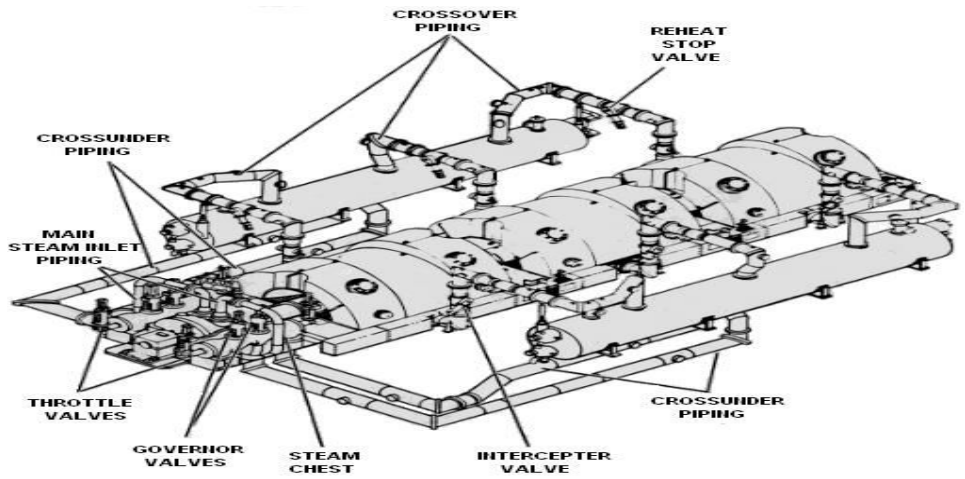
2) 회전형 Link Assembly를 사용

마. Steam Chest

1) GV 와 TV 사이의 공간

2) Lefthand : TV1, TV3, GV1, GV3 이 공유

3) Right Hand : TV2, TV4, GV2, GV4 가 공유



Steam Valves and Steam Piping Systems
Major Component Locations

그림 2.3.11 증기밸브와 증기배관

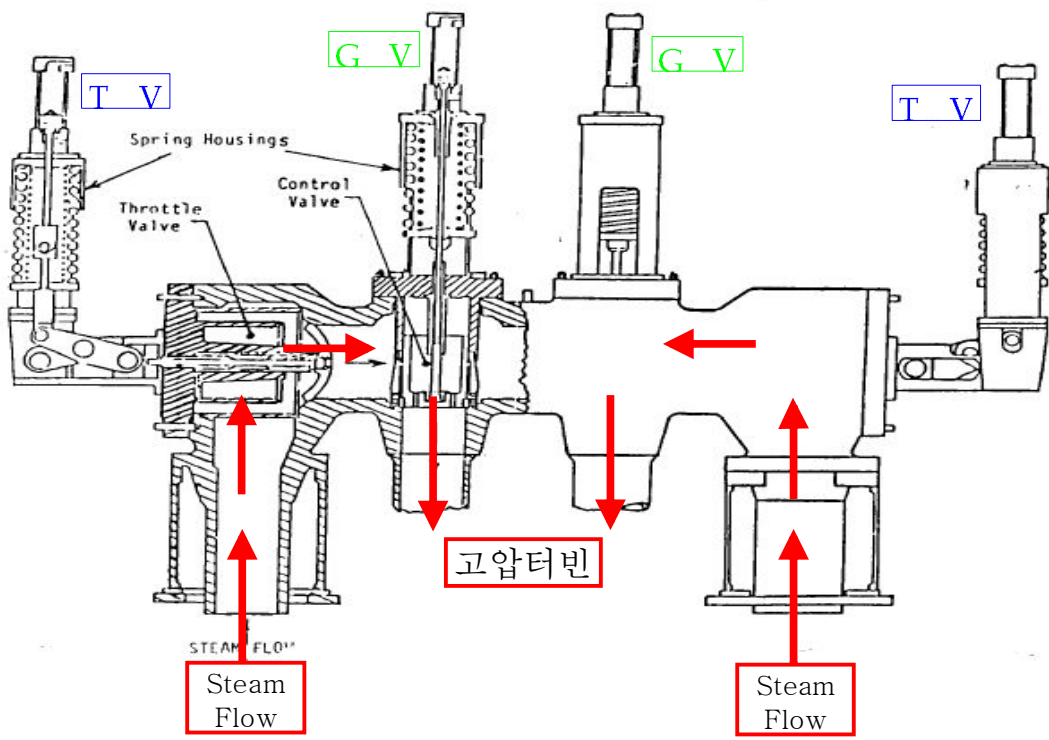


그림 2.3.12 고압터빈으로의 증기흐름

제 4 절 DEH 설비 고장 사례

1. 국내 사례(영광1,2호기)

표 2.4.1 국내 DEH 고장 사례

제 목	발 생 일	호기	비 고
OPC 카드 오신호에 의한 발전정지	1987. 6.16	2	Rx Trip
DEH 불량으로 STM Line Low Pr SI 발생	1987. 7. 8	1	SI
GV #2 Hunting 관련 LVDT 점검	1987.10. 6	1	
DEH PNL Control Speed Ch. Monitor 점등	1988.11.12	1	
DEH PNL 'B' TV/GV Transfer 이중 지시	1989. 7.25	1	
GV 오동작에 의한 STM Line Low Pr SI	1989.10.25	1	SI
GV #4 Stem과 Limit S/W Linkage 연결 Bolt 이탈	1989.12.30	1	
GV #2 개도 주기적 Hunting	1990. 2. 9	1	
DEH 제어전원 상실로 Manual 전환	1992. 1.30	1	출력감소
터빈 과속도 오신호에 의한 원자로 정지	1992. 4.29	1	Rx Trip
GV #4 진동관련 Single Mode 운전	1992. 5.24	2	출력감발
Oper PNL Emer Trip Sys의 Trip "AS #2" 점등	1994.12.23	1	
터빈 조속기 제어회로 오동작에 의한 발전정지	1995. 7.13	1	SI
DEH Auto → Manual로 자동 절체	1996. 6.27	2	
GV 순간 닫힘 및 밸브 제어 Mode 전환	1997. 5.19	2	
GV #4 Fail Open	1997. 9.24	2	
GV #2 시험중 S/G B 유량 편차 및 수위 증가	1997. 9.25	1	
DEH PNL의 TBN Manual Mode 전환	1997.12.17	1	4MW감소
DEH PNL의 Control Speed Ch. Monitor 점등	1997.12.20	1	2MW감소
고압터빈 TV3 비정상 닫힘 발생	2006.07.30	1	20MW감소
DEH 전원 공급기 교체작업 중 발전정지	2007.06.21	2	TBN Trip
DEH GV #3 위치제어모듈 기능상실	2007.08.14	2	

2. 해외 사례

표 2.4.2 해외 DEH 고장 사례

국가	발행기관	내 용	비고
미국	INPO	'05.06.15, Columbia : 100% 출력운전 중 디지털 터빈전자유압제어(DEH)계통 고장으로 터빈 쓰로틀 밸브가 닫히고 원자로가 자동 정지됨. 원인은 DEH 계통 카드의 단일 고장 대응에 대한 설계미흡 때문이었음.	
미국	INPO	'92.05.16, Waterford 3 : 주터빈 조속기 밸브가 비정상적으로 작동하여 운전원이 원자로 출력을 감발시키고 터빈을 트립시킴. 원인은 DEH 계통 디지털/아나로그 커플러 카드 고장 때문이었으며, 부품인 다이오드가 캐비닛 내부온도 상승으로 간헐적 고장을 일으킨 것으로 밝혀졌음.	
미국	INPO	'09.08.05, Columbia Gen Sta : 디지털 전자유압 터빈 쓰로틀압력 전송기가 과도현상에 대해 너무 낮게 설정됨에 따라 비분리모션 고장으로 인한 주터빈 정지시 밸브가 열렸지만, 과도상태가 지난후 다시 닫히지 않았음. 원인은 설계결함이었으며, 제어로직 변경 등 후속조치 수행.	
스페인	WANO	'91.05.15, Almaraz 2 : 터빈 유압제어계통 카드결함으로 인한 예기치 않은 증기 고 유량 및 원자로 불시정지 발생	
대만	WANO	'95.09.16 : 전출력운전 중 터빈 Digital Control System의 전원 Fuse 용단에 의한 Throttle 제어밸브 긴급 닫힘 동작에 의한 주 터빈 정지 발생	

슬로베니아	WANO	'87.02.17, Krsko : 터빈 디지털전자유압 제어계통(DEH)의 전기적 잡음(Noise)유입으로 인한 부하손실 신호 발생 및 원자로 불시정지 발생
미국	INPO	'02.07.13, Harris : 터빈밸브 시험을 위한 출력감발 중 터빈 디지털전자유압제어계통(DEH, Westinghouse Model VFC-SC, P/N:671A661G01)의 VIDAR(전압/주파수 변환 유닛) 고장으로 발생한 수동원자로 정지 사례
미국	INPO	'01.04.03, Braidwood 1 : 2001.4.3일 Braidwood 1호기의 PARC 7300 card 고장으로 DEH computer에 잘못된 피드백 신호를 보내어 배전반엔 서는 Governor valve # 1 이 100% 닫혔음에도 불구하고 배전반에는 open된 것으로 나타남.
미국	INPO	'06.10.31, Columbia : 원자로출력이 30% 이상일 경우 터빈 쓰로틀밸브가 95% 미만 개방됨에 따라 터빈 고압으로 인해 정지됨. 쓰로틀 밸브의 닫힘은 디지털 입력카드의 고장으로 인한 것이었음. 손상카드교체함.
대만	WANO	'98.04.06, Chinshan 1 : 터빈 디지털 전자유압계통 디지털 입력카드(QSE)의 Runback 오신호에 의한 원자로 불시정지
대만	WANO	'95.09.12, Chinshan 1 : 조속기 밸브 #4 구동 본체에 설치된 제어신호 케이블 접속상자가 진동에 의해 스톱드가 마모 분리되어 떨어져 내부 제어신호 라인이 단락되고 조속기 밸브가 닫혀 원자로 정지됨
미국	INPO	'98.03.17, Palisades : 정상운전중 출력이 떨어지는 것을 중앙제어실 운전원이 발견함. 주증기 차단밸브가 완전 개방에서 80%개방으로 닫힘. 터빈수동조절로 전환하여 출력을 정상화 시킴.

미국	INPO	'03.08.28, Byron 1호기 : 계획된 발전소 출력 감발 과정에서 주터빈 #4 거버너 밸브가 초당 1인치까지 진동(Oscillate)함. 원인은 터빈제어 계통 밸브위치 제한 전송기 전선의 피복외 노출로 발생한 오신호 때문인 것으로 조사됨.	
미국	INPO	'04.11.18, Braidwood 1 : #3 주터빈제어밸브의 Linear Variable Differential Transformer Core Rod의 밸브시스템 연결 부위가 부러져 Digital Electro-Hydraulic Control(DEHC)에서 거짓 정보가 밸브에 주어지지 않음. Core Rod를 교체하여 밸브를 열음. Core Rod 손상 원인은 #3 제어밸브 스프링 캔/구동기 멩치의 운전중 진동에 의한 피로균열손상 때문임.	
미국	INPO	'00.03.14, Arkansas 1 : 터빈 전자유압제어계통(EHC)의 밸브위치제한기(Valve Position Limit : VPL) Pushbutton 접점고착으로 인해 Governor밸브가 급격히 닫히고 주증기 안전밸브가 열리기 시작하여 원자로를 수동정지 시킴.	
미국	INPO	'06.01.24, St. Lucie 2 : 20%출력에서 터빈 조속기밸브 수리중 예상치 못한 발전기출력 감발(80Mw)에 딸 원자로 출력 4% 감발. 즉시 수리 중지 및 출력감발원인 조사. 원인은 절차없는 작업 수행, 사전설명 부재 및 운전원과 정비원 간 의사소통 부적절등이었으며, 훈련, 단어의 의미 정의, 작업공정 공식화등 후속조치 수행.	
미국	INPO	'05.10.10, Byron 2 : 2005년 10월 10일 복수기/복수 부스터펌프 정지후 터빈복귀 시도는 비효율적이었으며 결국 증기발생기 저수위로 원자로 정지됨. 터빈 출력감발은 앞서 정의된 출력 자동감발 설정치와 실제 작동치와 비교한 회로 응답의 부분적인 우연한 삭제에 의한 소프트웨어의 운전불능으로 인한 것임. 자동출력감발을 착수한 운전원은 근거가 확실한 절차없이 절차의 결함이 내재된 불확실한 수행을 함.	

미국	INPO	'04.04.16, Joseph M. Farley 2 : DEH 컴퓨터로 2/3 자동정지 오일 압력 스위치 저압 신호가 오입력됨. 이로 인해 거버너 밸브가 닫히면서 주터빈이 수동으로 트립되고 부하 탈락으로 원자로 출력이 감소됨. 조사결과 오일 압력 스위치 단자 박스 배선의 이완으로 인한 오신호 발생이 원인으로 밝혀짐.	
----	------	--	--

제 3 장 터빈 속도제어 시뮬레이션

제 1 절 터빈 기동 중 원치 않는 터빈속도 상승 사례

1. 경험사례 개요

가. 정보 출처 : WANO Report No. MER TYO 09-127

(Unwanted Turbine Speed Rise during Turbine Startup)

나. 경험호기 : 영광 1호기

다. 발생일시 : 2009. 04. 11 (토) 08:15

라. 발전소 상태 : 원자로 출력 15 %, 터빈발전기 출력 0 MWe

마. 사건 내용

- 1) 제18차 계획예방정비를 마치고, 계통 시험병입을 위해 터빈기동 중 ETG 기어측에서 이상음이 발생하여 현장으로부터 터빈 감속을 요청 받음
- 2) 터빈을 감속하던 중 GV VPL 하향 조작으로 인해 터빈속도가 “122 → 540 rpm”까지 급상승하여 긴급히 터빈을 정지한 사례임

2. 주요 내용

가. 2009. 4. 11 08:00 터빈기동 후 약 250rpm 도달 시 터닝기어 부근에서 이음이 발생하는 것이 확인 되어 8시 15분경 터빈 승속을 중지함

나. 이음 발생원인을 점검하기 위해 운전원은 터빈 속도를 0 rpm 으로 감소시키는 운전조작 수행함

* DEH 속도 설정치는 0rpm 에 도달했으며 TV는 완전히 닫힌 상태였고, 실제 터빈 속도는 감속이 진행중이었음(터빈 감속은 관성에 의해 이루어지기 때문에 0rpm 까지는 감속시간이 필요함)

다. 122rpm에 도달했을 때 운전원은 터빈 감속을 빨리 진행 시키려고 동시에 터빈정지시 GV에서 발생하는 충격을 최소화하기 위해 GV를 닫기로 결정함 (TV 내부 누설로 인해 터빈 감속이 원활하지 않은 것으로 판단함)

라. 운전원이 VPL limiter 버튼을 조작하여 Valve position limit를 감소시켜 GV를 닫기 시작함

마. VPL limiter가 120%에서 100% 이하로 감소되자 GV는 닫히기 시작했음

이때 TV 가 약 11% 정도 개방 되었고, 터빈 속도는 상승하기 시작했음. 속도상승을 방지하기 위해 운전요원은 터빈을 수동 정지시킴

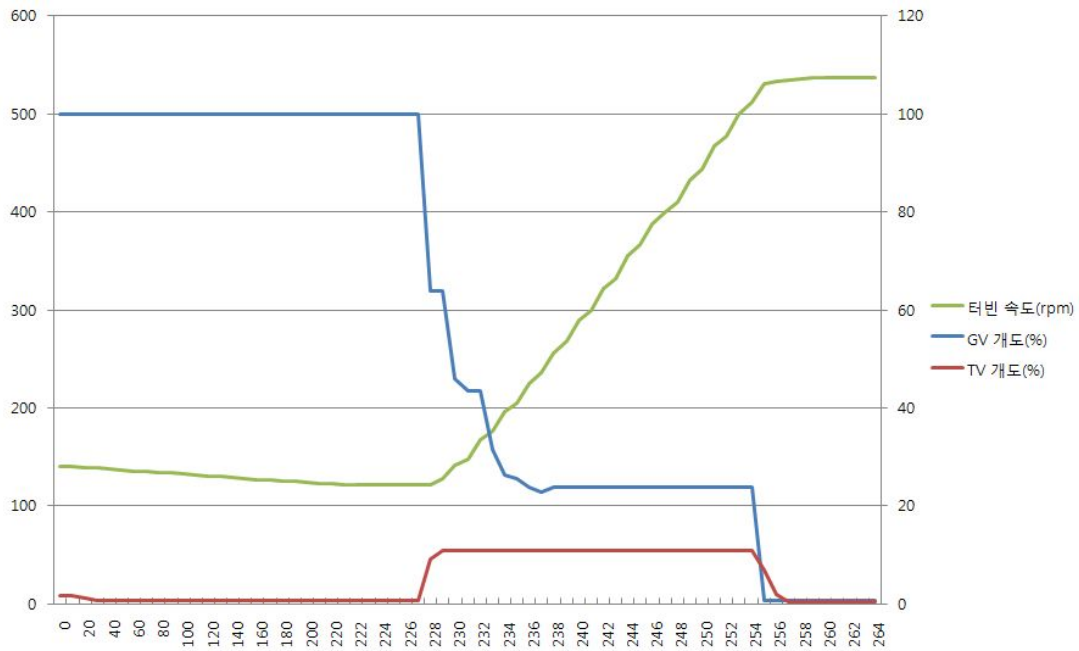


그림 3.1.1 GV, TV 및 터빈 속도 트렌드

제 2 절 터빈속도 상승 원인 분석

1. TV 개방 원인

가. VPL limiter가 100% 이하로 감소되자 DEHDM338(Valve Position Limiting Is Limiting) Flag가 set 됨. 이때 DEHDM033(Track Target)이 set 됨

나. Track Target 이 set 되는 순간 DEH 속도 설정치가 터빈의 실제 속도인 122 rpm 으로 변경됨

○ Track Target : DEH 설정치를 실제값과 일치시키는 기능이며, 과도현상 발생 시 계통에 미치는 영향을 최소화하기 위한 기능

○ Track Target set 조건

- TBN Trip
- TBN Latch
- 계통병입
- 운전 Mode 변환 (Manual, Operator Auto, ATC)
- **Valve Position limiting**
- IMP IN/OUT
- MW IN/OUT

다. DEH 속도 설정치 증가에 따라 TV 속도제어를 위한 PID 제어기의 출력이 약 39% 로 상승 됨

○ 122rpm 은 4.88% 속도편차(전체 속도범위 : 2500rpm)에 해당됨

$$4.88\% = \left(\frac{122}{2500} \right) \times 100$$

○ 순간적인 속도 설정치 변화에 의해 PID 제어기 출력값이 39%로 상승됨

* PID 제어기 Gain : 6 , Reset time : 5 초

$$39\% = 4.88 \times 6 + \alpha \text{ (Reset 상수에 의한 출력변화)}$$

○ PID 제어기의 39% 출력신호는 TV 특성곡선에 입력으로 제공되며, 약 11%의 TV demand 출력신호를 발생시켜 TV를 개방시킴

표 3.2.1 TV 특성곡선 데이터

입력(%)	출력(%)	비 고
0	0	39% 입력은 10.6% 출력에 해당
60	16.4	
100	100	

* 상기 제어 특성은 영광1,2호기 DEH 제어도면을 통하여 확인되었고 모의 제어반 시뮬레이션에 의해 검증되었음

제 3 절 시뮬레이션 결과

1. 시뮬레이션 개요

터빈 기동 중 원치 않는 터빈 속도 상승에 관한 시뮬레이션은 제2절에서 분석한 터빈 속도 상승원인 분석을 바탕으로 시뮬레이션 하였다.

본 사례의 시뮬레이션이 가능한 설비는 영광훈련센터의 모의제어반과 영광 1발전소의 TCAMS(Turbine Control Algorithm Maintenance System)가 있다. 각 설비의 목적과 특성이 약간 다르지만 시뮬레이션 결과의 완성도를 높이기 위해서 2가지 설비를 모두 사용하였다.

- 영광훈련센터 모의제어반 용도 : 발전소 주제어실 원전조종사들의 재교육 훈련
- TCAMS 용도 : DEH 계통의 소프트웨어 검증 및 모의시험

2. 시뮬레이션 진행 방법 및 결과

가. 시뮬레이션 진행 방법

- 1) OBJECTIVE 520으로 입력하여 터빈 속도 250 rpm 까지 증속 HOLD
- 2) OBJECTIVE를 '0'으로 조정하여 터빈 감속
- 3) 터빈 속도 120 rpm에서 GV VPL을 이용하여 GV Close 시도

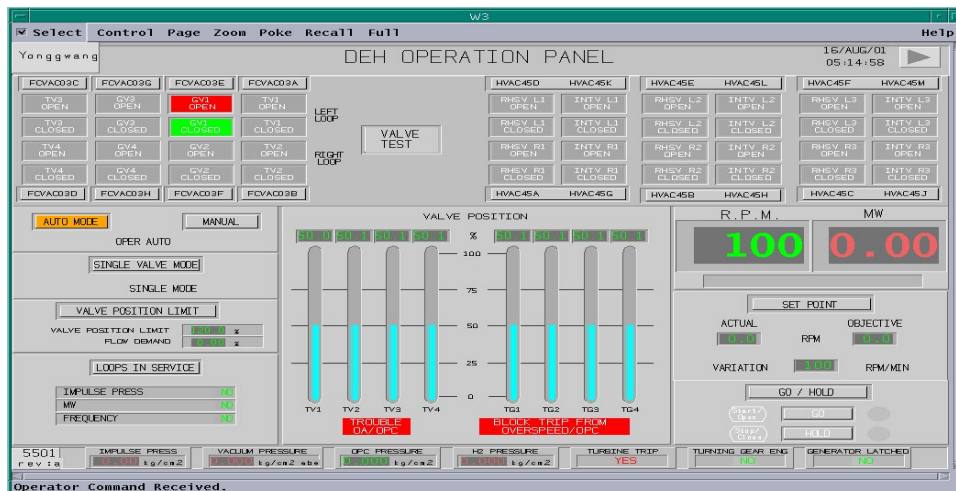


그림 3.3.1 DEH 제어패널

나. 영광훈련센터 모의제어반 시뮬레이션 결과

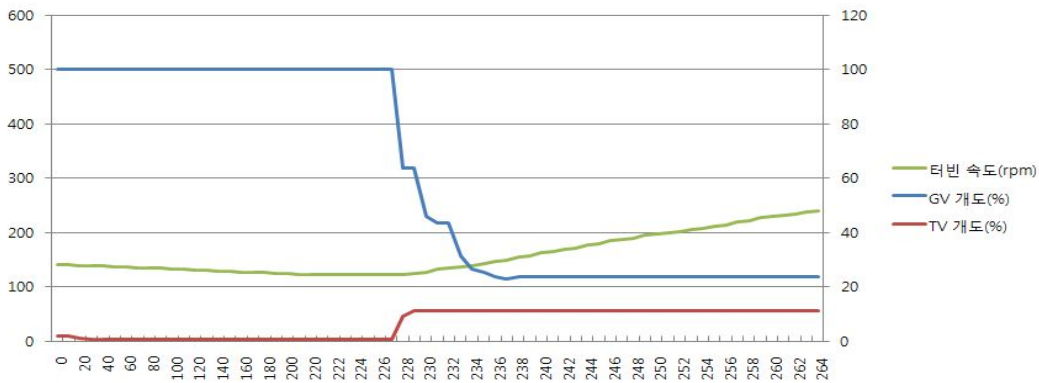


그림 3.3.2 모의제어반 시뮬레이션 결과

	GV Close시 터빈 속도 (rpm)	TV 개방 개도(%)	터빈 속도 상승률 (rpm/min)
시뮬레이션 결과	119	11.1	150

다. TCAMS 시뮬레이션 결과

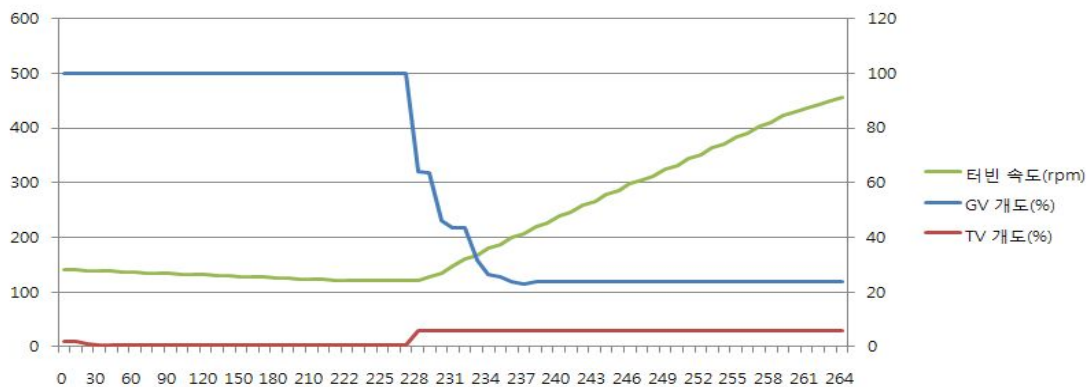


그림 3.3.3 TCAMS 시뮬레이션 결과

	GV Close시 터빈 속도 (rpm)	TV 개방 개도(%)	터빈 속도 상승률 (rpm/min)
시뮬레이션 결과	120	6	393

3. 시뮬레이션 분석

가. 시뮬레이션 결과 분석

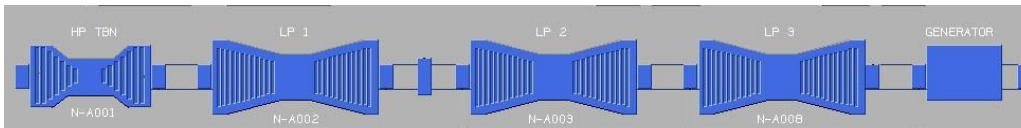
항목 데이터 종류	GV Close시 터빈 속도 (rpm)	TV 개방 개도(%)	터빈 속도 상승률 (rpm/min)
모의제어반	119	11.1	150
TCAMS	120	6	393
실제 Data	122	11.0	412

- 1) 모의제어반에서의 TV 개방 개도는 실제 Data와 똑같이 나타났으나 TCAMS에서의 TV는 약 6%밖에 열리지 않았다. TCAMS에서의 TV의 개방이 6%밖에 열리지 않았던 이유는 TCAMS는 실제의 터빈이나 시뮬레이터처럼 관성이 적용되지 않아서 Actual Speed와 Target Speed와의 편차가 적게 발생하였기 때문이다. TCAMS의 주 용도는 DEH 소프트웨어 검증이므로 관성이 적용되지 않았으므로 당연할 결과라 할 수 있겠다.
- 2) 반면에 터빈 속도 상승률에 있어서는 TCAMS에서의 결과가 실제 Data와 비교하여 가까운 결과가 나타났다. 반면에 모의제어반에서의 속도 상승률은 실제 Data와는 많은 차이가 있었다. 향후 모의제어반에서의 속도 상승률을 실제 데이터를 기반으로 하여 프로그램에 반영한다면 더욱 신뢰성 있는 설비가 될 것으로 판단된다.

나. 터빈속도 상승이 미치는 영향

1) 터빈 진동 상승 유발그림

터빈증속을 위한 증기공급은 고압터빈의 스팀 체스트를 통하여 공급되는데 갑작스런 터빈 속도의 증가는 터빈 축의 불평형을 유발할 수 있고 이로 인해 LP TBN 3축(발전기와 가까운 방향)의 진동이 높게 상승할 여지가 있다.



3.3.4 터빈 발전기 레이아웃

2) 증기발생기 수위 불안정 가능성

TV의 순간적인 개방으로 인해 증기발생기에서 터빈으로 공급되는 증기의 양의 갑자기 증가하게 되면 증기발생기의 Swelling 현상 발생으로 수위 불안정 현상이 발생 할 수 있다.

3) 터빈 과속도 정지 발생 가능성

높은 터빈속도에서는 Actual Speed와 Target Speed와의 편차가 더욱 크게 발생하므로 같은 상황으로 운전할 경우 TV는 더욱 많이 열리게 되고 이로 인해 터빈은 1분 이내에 과속도 정지 설정치 까지 도달 할 것이다. 아래의 시뮬레이션은 1700 rpm 부근에서 GV를 Close 할 경우(Actual Speed와 Target Speed의 편차가 최대로 발생했다고 가정) 약 40초 안에 터빈 과속도 정지 설정치(1980 rpm)까지 도달하는 것으로 나타났다.

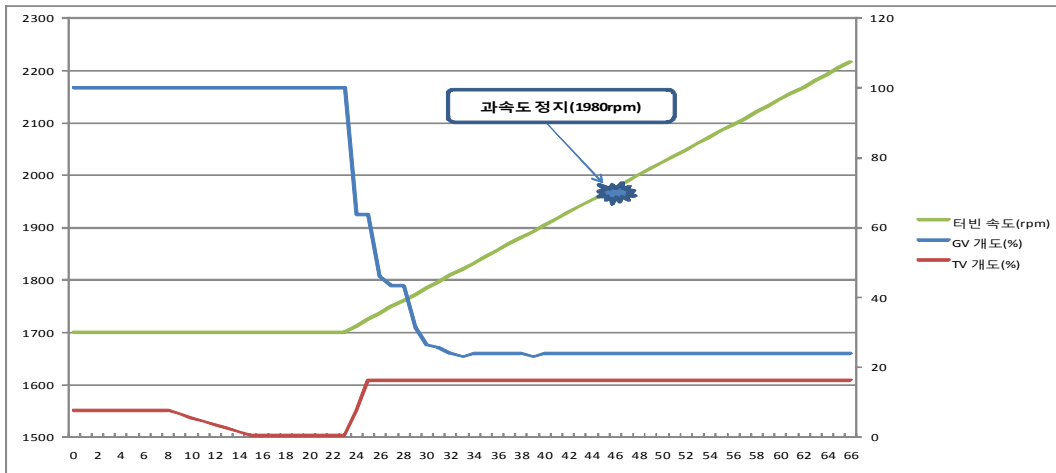


그림 3.3.5 터빈 과속도 가능성 시뮬레이션

	GV Close시 터빈 속도 (rpm)	TV 개방 개도(%)	터빈 속도 상승률 (rpm/min)
시뮬레이션 결과	1720	16.4	600

제 4 장 결 론

지금까지 영광 원자력 발전소 1,2호기의 DEH Controller의 제어특성 중 터빈 기동 시 터빈 속도제어에 관하여 시뮬레이션을 통해 검증하였고, 이러한 시뮬레이션 결과가 실제 발전소 운전에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

2002년에 도입한 Westinghouse사의 분산 제어설비인 Ovation System을 사용한 DEH MOD III Model은 아주 우수한 조속기 제어 계통이지만 디지털화됨에 따른 문제점들이 국내, 외에서 발생 되었다. 또한 인간에 의해 제어되는 실제의 발전소 운전은 여러 경우의 운전방법을 내포하고 있고 이 모든 경우의 운전방법을 시스템 설계 시 완벽히 고려될 수 없을 것이다.

본 연구에 의하면 터빈 기동 중 터빈 속도제어시의 DEH 운전은 매우 주의 깊게 운전되어야 하며 검증된 운전방법 이외의 운전은 절대적으로 금지 되어야 한다. 예기치 않은 TV의 급격한 개방은 과도한 스팀 공급으로 다음과 같은 문제점을 유발 시킬 수 있기 때문이다.

- TV의 급격한 개방으로 인한 발생가능 문제점
 - Turbine 진동 상승, 증기발생기 수위 불안정 발생, Turbine Overspeed Trip

본 연구에서 얻은 결과를 토대로 하여 실제 발전소(영광1,2호기)에서 재발방지를 위해 다음과 같이 적용하였다.

- 적용분야 : 터빈 운전에 관한 절차서(정상 411)의 주의사항
- 적용내용 : 터빈 Rolling 도중 이상상태 발생 시 터빈을 트립시켜야 하며 부득이하게 터빈속도를 감소해야 할 경우 GV를 수동으로 닫지 말아야 한다.

이러한 연구결과를 실제 발전소 적용함으로써 DEH 제어계통의 안정성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다. 향후 DEH의 업그레이드 된 소프트웨어 설계 시 본 연구결과를 반영하여 물리적인 방벽을 설계하는 것도 고려해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Yonggwang DEH MOD III Document & Drawing Volume 1
- [2] Yonggwang DEH MOD III Document & Drawing Volume 2
- [3] OVATION Operator Station User's Guide
- [4] Westinghouse Turbine-Generator Instruction Book Volume 22
- [5] Yonggwang Nuclear Power Plant #1,2 Operation Procedure : Normal Operation Procedure No 411
- [6] WANO Report MER TYO 09-127 : Unwanted Turbine Speed Rise during Turbine Startup(11 April, 2009, Yonggwang Unit 1, KHNP)
- [7] 한수원(주) 원자력 교육원 교재 기계-33 터빈
- [8] KOINS(Korea Hydro&Nuclear Power Plant Nuclear Information System) : 한수원(주) 원자력 기술정보 시스템
- [9] 영광원자력본부 영광훈련센터 교재-HP Turbine Operation
- [10] 영광원자력본부 영광훈련센터 교재 DEH Control & Turbine Supervisory System
- [11] 한수원(주) 원자력 교육원 교재 계통설비-6 증기발생 설비
- [12] 영광원자력 제1발전소 운전 영향 중요 정비 사례집
- [13] KOREA NUCLEAR UNITS 7&8 STATION MANUAL
- [14] 영광원자력 제1발전소 발전실무편람
- [15] Steam Valves And Steam Piping Systems(TBN Manual VOL. 9)
- [16] Theory of Operation(TBN Manual VOL. 5)

감사의 글

원자력발전소에서 15년 동안 근무했지만 보다 나은 원자력의 성장과 발전을 위한 저의 지식은 항상 부족하기만 했습니다. 때론 제 자신의 발자취가 부끄럽고, 항상 지나온 길에 부족함을 느끼고, 그래서 계속 공부해야 했던 제게 있어 석사학위과정의 길은 학문의 길이기도 했지만 제 마음을 가다듬는 인격수양의 길이기도 했던 것 같습니다. 지금의 순간은 훌륭한 교수님들의 애정 어린 지도와 같이 공부했던 회사 선배님들의 아낌없는 조언과 헌신적인 도움이 없었다면 가능하지 못했을 거라 생각이 듭니다. 늦은 저녁 강의실 불을 환하게 켜놓고 같이 공부하며 격려하고, 때론 과제 해결을 위해 토론하고, 고민하며 지냈던 지난 시간들은 모두가 저에게겐 한순간도 잊지 못할 소중한 순간들입니다.

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.

본 논문을 지도해 주시고 한량없는 열정과 자상함으로 끝까지 이끌어 주신 김승평 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀 올립니다.

논문 심사과정과 평소 학교생활을 통하여 변함없는 애정과 관심으로 격려해 주신 정운관 교수님, 송종순 교수님, 나만균 교수님, 이경진 교수님 그리고 밤낮으로 학과 일에 온갖 정열을 바치시는 학과장 김진원 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

오늘의 결실이 있기까지 물심양면으로 아낌없는 지원을 해준 아내에게도 본 지면을 통해 감사의 마음을 전해 드립니다.

2010년 4월

최진오

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20087494	과 정	석사
성 명	한글 : 최 진 오 한문 : 崔 診 奭 영문 : CHOI JINOOH				
주 소	전남 영광군 흥농읍 상하리 한수원 사택 31-105호				
연락처	E-mail : jeeen@khnp.co.kr				
논문제목	영광원자력 1,2호기 DEH Controller 제어특성 연구				
	A Study on the control characteristics of DEH Controller in NPP #1,2				

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()

2010년 4월

저작자: 최 진 오 (인)

조선대학교 총장 귀하