

계통기초-2

원자력계통기초Ⅱ (표준형)

원자력교육원

한국수력원자력(주)
원자력교육원

알 릫

@ 한국수력원자력(주) 원자력교육원 2004

본 교재의 저작권은 전적으로 한국수력원자력(주) 원자력교육원에
있으므로 어떠한 경우라도 저작권자의 서면 승인 없이 복제하여
배포 할 수 없으며 상업적 용도로 사용할 수 없습니다.

원자력교육원

총 목 차

제1장 2차계통 개요	4
제2장 터빈 계통	27
제3장 발전소 전력설비	191

원자력교육원

제1장 2차계통 개요

제1절 2차계통개요	5
------------------	---

원자력교육원

제1절 2차계통개요

[학습목표]

1. 2차 에너지변환을 위한 구성계통을 이해한다.
2. 2차 에너지변환 계통의 기능과 주요구성기기를 이해한다.
3. 터빈을 보조해주는 계통의 종류와 그 기능을 이해한다.
4. 발전기를 보조해주는 계통의 종류와 그 기능을 이해한다.
5. 기타 2차 측을 보조해주는 계통의 종류와 그 기능을 이해한다.

1. 2차계통개요

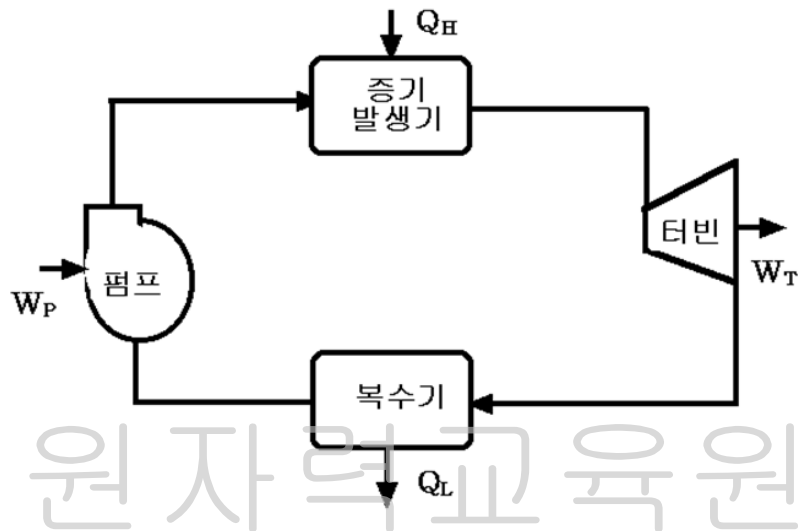
원자력발전소는 핵연료에서 열에너지를 흡수하여 전달하는 순서에 따라 1차계통, 2차계통 및 3차계통으로 구분하여 부른다. 1차계통은 첫 번째 열에너지를 전달받는 계통을 말하며 원자로냉각재계통을 가리킨다. 2차계통은 원자로냉각재계통에서 열을 전달 받아 처리하는 사이클을 말하고 3차계통은 2차계통의 한 구성기기인 복수기에서 열을 전달받아 무한한 에너지 흡수원(Sink)인 바다로 방출하는 사이클을 말한다. 그러나 통상적으로 발전소에서는 방사선이 나올 수 있는 영역을 1차계통이라 하고, 방사선이 나오지 않는 지역의 설비를 2차계통이라 부른다. 이것은 발전소계통을 나타내는 계통도면을 1차계통과 2차계통으로 구분하여 책자로 구성하여 사용하고 있기 때문이다.

2차계통의 목적은 원자로냉각재계통으로부터 열에너지를 전달받아 역학적에너지인 운동에너지로 변환하는 것이다. 열에너지는 분자의 운동에너지이며 이것은 일정한 운동의 방향성이 없는 무질서한 에너지 형태이다. 이 무질서한 에너지를 일정한 방향으로 움직이는 에너지로 바꾸어 놓은 것이 역학적에너지이다. 운동의 방향성을 갖도록 하기 위해서는 물분자가 움직이는 거리가 커야한다. 액체상태인 물은 분자가 움직이는 거리가 짧기 때문에 이것을 분자가 움직이는 거리가 큰 기체상태로 바꾸어주어야 운동의 방향성을 갖는 역학적에너지로 변환할 수 있다. 따라서 2차계통은 원자로냉각재계통에서 열에너지를 전달받아 와서 물을 증기로 바꾸고, 이 증기가 가지고 있는 열에너지를 일정한 방향으로 운동하는 에너지로 바꾸고, 다시 원자로냉각재계통에서 열에

너지를 잘 전달 받아올 수 있도록 물로 바꾸는 것으로 구성된다.

2차계통에서는 열에너지를 역학적에너지로 변환하는 주 사이클에 있는 주요기기와 그 기능을 이해하고 열에너지를 역학적에너지로 변환하는 주 기기인 터빈을 보조해주는 계통인 터빈보조계통의 종류와 역학적에너지를 전기에너지로 변환하는 발전기를 보조해주는 발전기보조계통 그리고 기타 보조계통에 대하여 개략적으로 살펴본다.

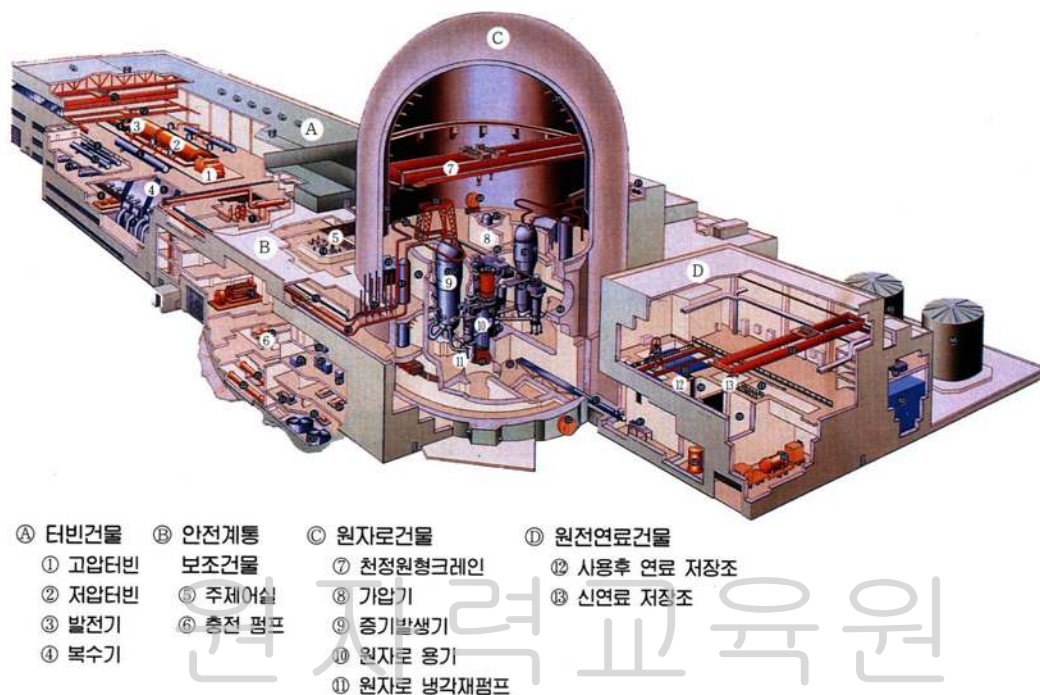
2. 2차 에너지변환 계통



[그림 1-1] 랭킨사이클의 구성기기

열에너지를 운동에너지로 변환하기 위하여 우리는 랭킨사이클을 사용한다. 랭킨사이클은 2개의 등온열전달과정과 2개의 가역단열과정으로 사이클이 구성된다. [그림 1-1]에서 보는 바와 같이 온도가 일정한 상태에서 열을 전달받는 증기발생기, 주변으로의 열전달이 없으면서 증기가 가지고 있는 열에너지를 운동에너지로 변환시키는 터빈, 더 이상 운동에너지로 변환할 수 있는 에너지를 가지고 있지 않은 증기를 등온상태에서 물로 응축시키는 복수기 그리고 물을 다시 가압하여 열에너지를 받아 올 증기발생기로 물을 보내는 펌프로 구성된다. 랭킨사이클 외에 열에너지를 운동에너지로 변환하는데 사용되는 사이클은 가스 냉각로에서 사용되는 브레이튼 사이클이 있다. 이것은 열전달매체인 유체를 기상에서 액상으로 다시 액상에서 기상으로 변환시키는 과정

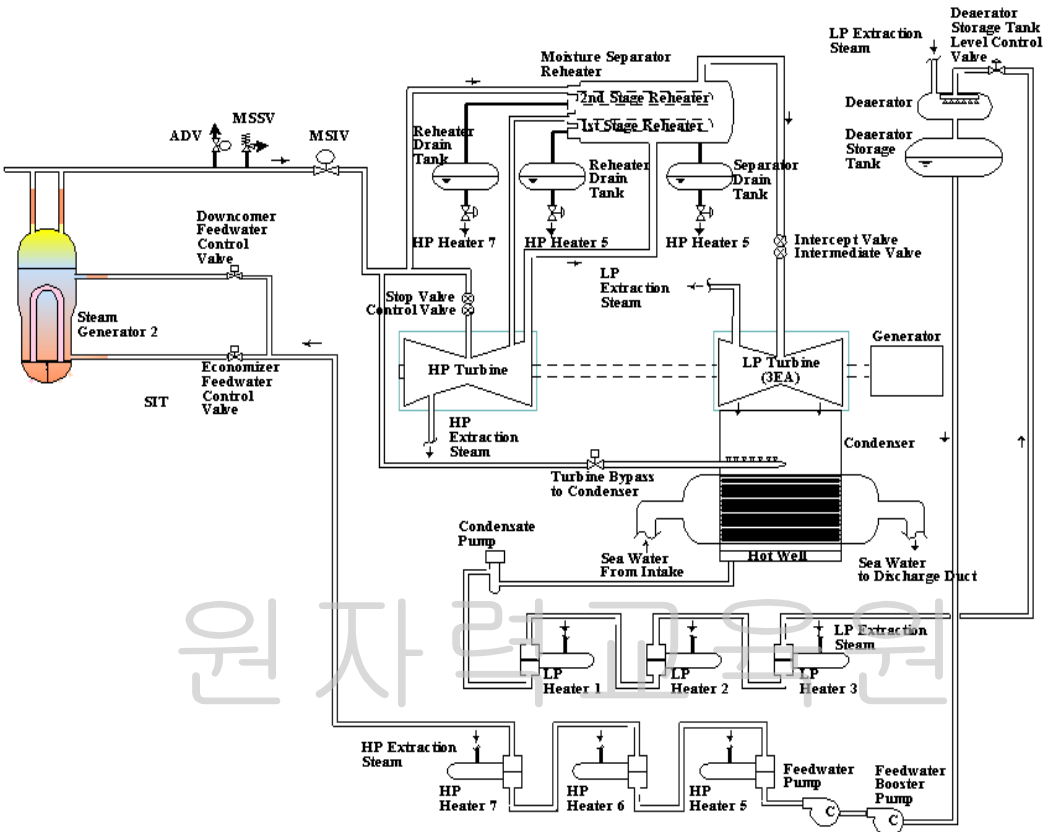
이 없고 전 사이클이 기상상태에서 작동한다. 따라서 이것은 랭킨사이클에서와 같은 기상에서 액상으로 변환하는 과정에서 대량의 응축열을 방출하는 에너지 손실과정이 없기 때문에 발전소 열효율은 높지만 전 사이클이 기체상태에서 작동하므로 발전소 전체 체적이 커져 발전소를 대용량으로 할 수 없는 단점이 있다.



[그림 1-2] 발전소 주요기기 배치도

[그림 1-2]는 발전소 전체배치도를 보여주고 있다. 이 그림에서 2차 에너지 변환 사이클의 설비를 보면 원자로냉각재계통으로부터 열에너지를 받아오는 증기발생기(9번)가 원자로건물 내에 있다. 여기서 받은 열에너지를 열에너지 전달매체인 증기에 실어 주증기배관을 통해 1번 고압터빈으로 보낸다. 증기가 가지고 있는 열에너지의 일부를 고압터빈에서 터빈의 운동에너지로 변환하고 저압터빈의 양 옆에 있는 습분분리재열기로 들어가서 고압터빈에서 열에너지를 전달함에 따라 생긴 습분을 제거하고 난 뒤 다시 가열하여 저압터빈으로 보낸다. 증기가 가지고 있는 가능한 모든 에너지를 저압터빈에서 운동에너지로 변환하고 더 이상 저압터빈에 에너지를 전달할 수 없게 되

면 4번 복수기로 들어가 튜브를 통해 바닷물과 만나 물로 응축된다. 응축된 물은 다시 급수가열기를 통해 점진적으로 가열된 후 증기발생기로 공급되어 2차 에너지변환 사이클을 완성하게 된다. 지금부터 2차 에너지변환 사이클에 있는 주요기기들을 개략적으로 살펴보자.

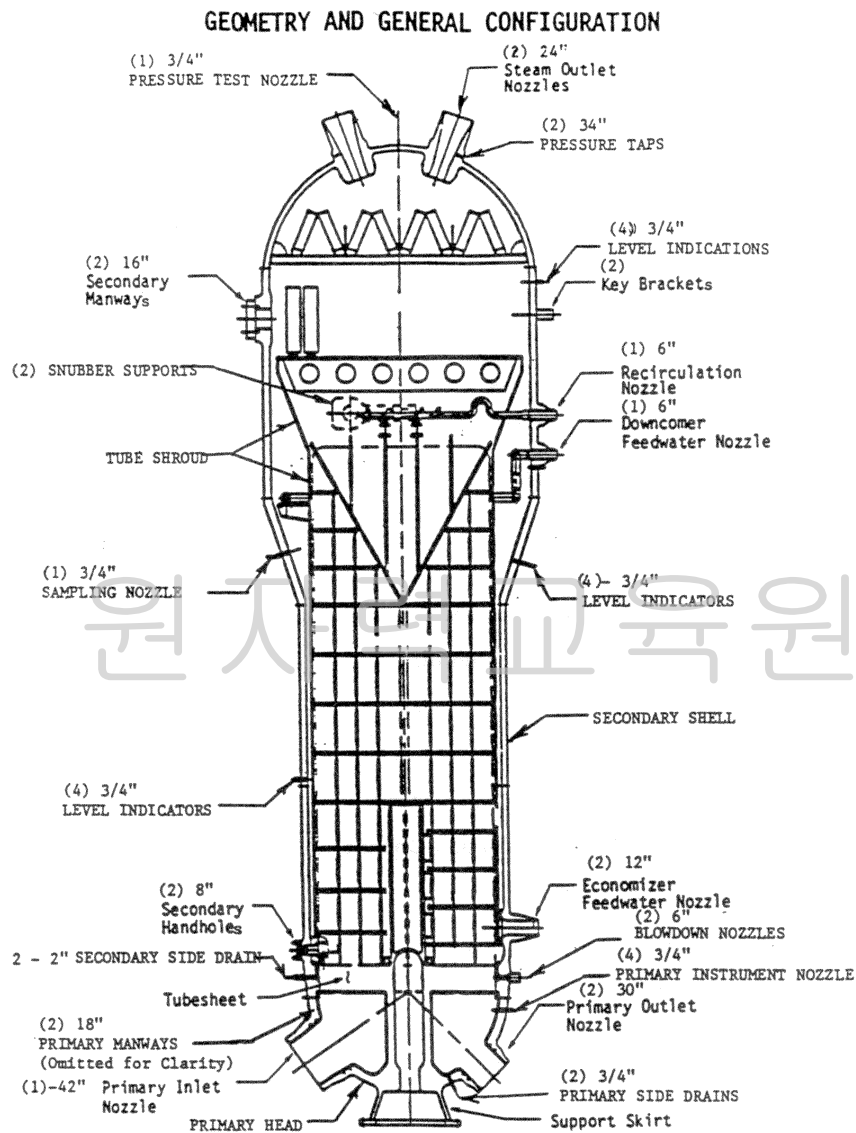


[그림 1-3] 2차 주 에너지변환계통 요약도

가. 증기발생기

2차측에서 보면 증기발생기는 원자로냉각재로부터 열에너지를 전달받아 와야 하는 열교환기이다. 열에너지를 받아오면서 물의 형태로 열에너지를 받으면 이 열에너지를 운동에너지로 바꿀 수 없으므로 증기의 형태로 열에너지를 전달받아 와야 하므로 증기를 생성하는 기능을 가져야 된다. 증기를 생성하고 난 뒤에 그 증기를 다시 가열

하지 않으면 증기 속에 많은 습분이 포함되어 있게 되고 이 습분은 상대적으로 큰 질
 량에 의해 터빈을 손상시키므로 증기를 다시 가열해 주던지 습분을 제거해주던지 해
 야 한다. 우리는 재 가열해 주는 대신에 습분을 제거하는 재순환방식의 증기발생기를
 사용한다.



[그림 1-4] 증기발생기 구조

우리가 사용하는 증기발생기는 [그림 1-4]에서 보는 바와 같이 수직 U-tube형 열교환기로서 튜브안쪽(Tube Side)에는 원자로냉각재가 흐르고 튜브바깥쪽(Shell Side)에는 2차 계통수가 흐르면서 열교환이 이루어지도록 되어 있다. 한국표준형원전의 증기발생기는 최대 출력을 얻기 위하여 예열기(Economizer)를 가지고 있다.

나. 주증기계통

(1) 개요

계통이란 우리가 알고자 하는 영역을 말하는데 주증기계통이란 주증기가 있는 영역을 말한다. 이것은 증기발생기의 출구노즐에서부터 터빈밸브전단까지 주증기가 들어 있는 영역을 말한다. 주증기계통이 해야 하는 역할은 증기발생기에서 받은 열에너지를 손실을 최소화하면서 터빈발전기계통과 보조계통으로 전달하는 것이다. 에너지를 전달하는 중에 배관이 파손되지 않아야 하고 원자로냉각재로부터 과도하게 열에너지를 빼앗아 오지 말아야 한다. 이 역할을 수행하기 위하여 주증기계통에는 주증기배관, 주증기격리밸브, 주증기안전밸브, 주증기대기방출밸브, 터빈우회밸브 등이 설치되어 있다.

(2) 주증기계통 구성기기 및 그 기능

(가) 주증기배관

주증기배관은 정격부하에서 2대의 증기발생기로부터 5.77×10^6 kg/hr (12.72×10^6 lb/hr)의 증기를 고압터빈으로 이송한다.

각 주증기배관에는 4개의 스프링작동 안전밸브, 1개의 주증기 대기방출밸브와 1개의 주증기 격리밸브가 설치되어 있다. 이 밸브들은 모두 격납건물 밖에 위치하며 가능한 격납건물 벽 가까이에 설치된다.

(나) 주증기격리밸브(MSIV)

각 주증기 배관에는 1개의 급속차단 주증기격리밸브가 설치되어 있다. 각 밸브는 주증기배관 파단사고 시 원자로냉각재의 과도한 냉각을 방지하기 위해 5초 이내에 주증기를 차단하도록 되어 있다.

(다) 주증기 대기방출밸브(ADV)

원자로냉각재계통에서 받은 열에너지를 터빈으로도 보낼 수 없고 복수기로도

버릴 수 없는 상황에서 대기로 열에너지를 버리기 위해 주증기배관마다 하나씩 설치되어 있다.

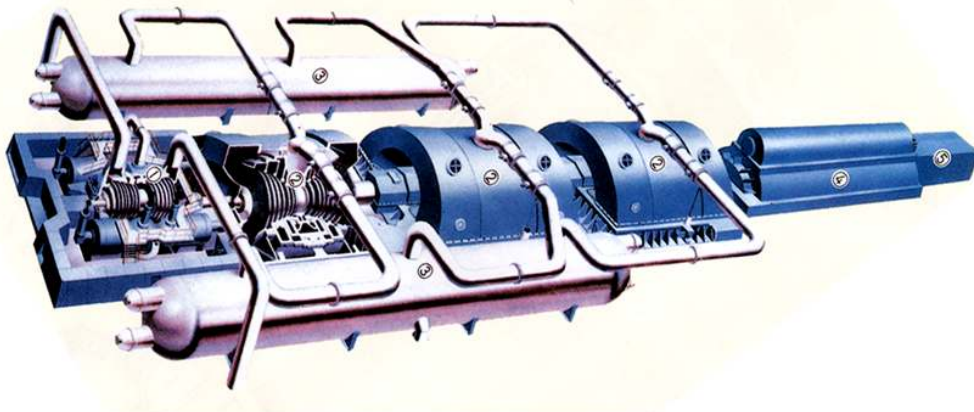
(라) 주증기안전밸브(MSSV)

주증기배관 내에는 많은 열에너지를 보유하고 있고 주증기배관이 수용할 수 있는 에너지 한계를 초과하면 주증기배관의 파단이 발생하고 열에너지가 통제 없이 방출되는 상황이 발생할 수 있다. 이것은 주변기기와 사람을 상하게 할 수 있으므로 배관이 견딜 수 있는 한계를 초과하기 전에 밸브를 열어 과도한 에너지를 대기로 방출하기 위해 설치되어 있다. 주증기안전밸브는 주증기배관당 4대가 설치되어 있고 스프링의 힘으로 밸브를 막고 있으며 계통압력이 스프링이 누르고 있는 힘과 같아지면 개방되는 구조로 되어 있다.

(마) 터빈우회밸브

원자로냉각재계통으로부터 받은 열에너지를 터빈이 수용할 수 없을 때 받은 에너지를 버리기 위해 터빈우회밸브가 설치되어 있다. 총 8개의 터빈우회밸브로 구성되어 있으며 터빈발전기 정지 후 정격 주증기 유량의 55%를 방출할 수 있는 용량을 갖고 있다. 복수기로는 40%를 방출할 수 있고 대기로는 15%를 방출할 수 있다.

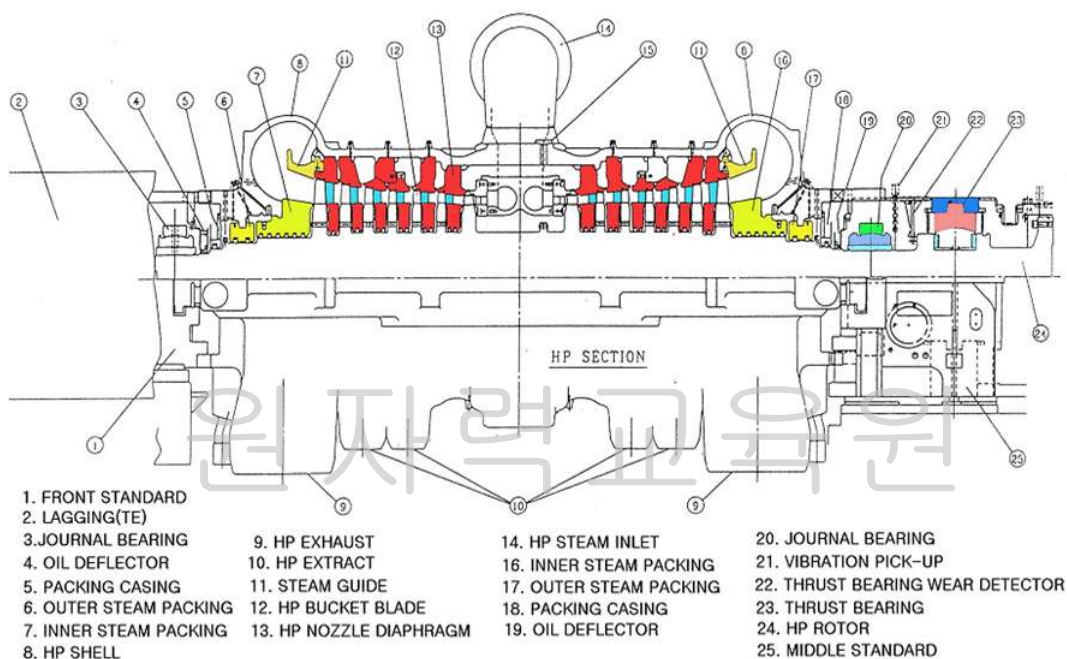
다. 터빈발전기계통



[그림 1-5] 터빈발전기 개략도

터빈은 증기가 가지고 있는 열에너지를 증기의 운동에너지로 바꾸고 증기의 운동에너지를 터빈의 운동에너지로 변환하는 구조로 되어 있다. 터빈의 운동에너지는 같은 축으로 연결되어 있는 발전기의 회전자를 돌린다. 발전기의 회전자는 전자석으로 이루어져 있고 회전자가 회전하면 자속이 회전자와 함께 회전하게 되고 바깥에 있는 고정자 코일이 회전하는 자속을 끊게 됨으로 터빈의 운동에너지가 전기에너지로 바뀌게 된다. 터빈발전기계통은 1대의 고압터빈, 3대의 저압터빈, 2대의 습분분리재열기(MSR), 1대의 발전기 및 여자로 구성되어 있다.

(1) 고압터빈



[그림 1-6] 고압터빈 단면도

고압터빈은 7단으로 이루어져 있고 증기가 가지고 있는 열에너지를 운동에너지로 바꾸는 장치인 고정날개(노즐)와 증기의 운동에너지를 회수하는 회전날개로 구성되어 있다.

(2) 습분분리재열기

에너지변환효율을 좋게 하기 위하여 우리는 재열사이클을 사용한다. 이것은 열

에너지를 고압터빈에서 한번에 운동에너지로 전부 변환하기 않고, 고압터빈에서 한번 변환하고 난 뒤 증기를 다시 가열하여 저압터빈에서 열에너지를 운동에너지로 완전히 변환한다. 이것은 다시 가열할 때 이미 증기가 되어 있는 것을 가열하기 때문에 물을 증기로 만들 때 필요한 증발잠열이 필요 없어 효율이 좋아지게 한다. 또한 증기를 재가열하기 전에 이미 습분이 된 증기를 제거하는 장치를 거치게 함으로서 습분을 제거한다.

라. 복수계통

(1) 기능

복수계통은 증기가 가지고 있는 열에너지를 터빈에서 최대한 운동에너지로 회수하고 난 후 다시 증기발생기에서 열에너지를 잘 받아오도록 하기 위하여 증기를 물로 응축하고 일부의 물을 정화처리 한 후 급수계통으로 보내주는 것이다.

(2) 구성기기 및 그 기능

복수계통의 기능을 수행하기 위하여 복수기와 복수탈염설비 및 복수펌프가 있어야 한다.

저압터빈에서 열에너지를 전달하고 난 증기는 밀도가 낮고 압력이 거의 절대진공에 가깝게 낮다. 낮은 밀도의 증기는 증기발생기에서 열에너지를 잘 전달 받을 수 없다. 또한 증기발생기 지역은 고압이므로 낮은 압력의 증기를 압축해서 압력을 높일 수 없기 때문에 증기의 형태로 증기발생기로 보낼 수 없다. 압력을 가하면 물로 응축되기 때문에 낮은 열 흡수원인 해수에 열을 전달해주고 물로 응축시킨 후 펌프로 가압하여 증기발생기에 열에너지를 받아오도록 보낸다. 따라서 복수기는 증기를 물로 응축시키는 역할을 하고 복수펌프는 응축된 물을 급수계통으로 보내는 역할을 한다.

2차 에너지 변환 사이클에 있는 물은 운전시간이 지남에 따라 불순물이 축적될 것이다. 따라서 2차 계통수를 연속적으로 정화처리 해주어야 한다. 계통수를 정화시키는 이온교환수지는 플라스틱성분이므로 열에 취약하다. 따라서 2차 에너지변환 사이클에서 온도가 가장 낮은 지역이 복수계통이므로 여기에 계통수 정화설비가 갖추어져 있고 이것이 복수탈염설비이다. 이 복수탈염설비는 2차계통수를 정화하는 기능을 갖는다.

마. 급수계통

(1) 기능

급수계통은 복수계통으로부터 2차 냉각수를 전달받아 열에너지로 증기를 만드는 곳인 증기발생기로 고온고압의 2차계통수를 보내는 것이다. 증기발생기로 급수를 보낼 때 증기를 만들어야 하는 증기발생기의 효율을 높이기 위하여 온도를 높여 증기발생기로 보내야 하고, 발전소 출력에 따라 증기발생기로 급수량을 조절할 수 있어야 하며 2차배관 파단사고시에 원자로냉각재가 과도하게 냉각되지 않도록 급수를 차단할 수 있어야 한다. 또한 증기발생기 지역은 압력이 높은 지역이고 급수를 가열하면 급수가 증발하므로 급수의 압력을 올리는 장치가 있어야 급수계통의 기능을 할 수 있다. 이 급수계통의 기능을 달성하기 위해서는 급수가열기, 급수펌프, 주급수조절밸브, 주급수차단밸브가 필요하다.

(2) 구성기기

(가) 급수가열기

증기를 생성하는 증기발생기의 효율을 높이기 위하여 2차계통수가 증기발생기로 들어가기 전에 가능한 한 온도를 높여야 한다. 이를 위해 1단에서 7단으로 이루어진 급수가열기가 점진적으로 온도를 올려 증기발생기에 급수를 공급한다. 급수의 가열원은 고압터빈과 저압터빈의 추기증기이며 저압터빈에서 추기증기를 받아 가열하는 급수가열기를 저압급수가열기라 하고, 고압터빈에서 추기증기를 받아 가열하는 급수가열기를 고압급수가열기라 한다. 이 중에서 4번 급수가열기는 탈기기로 하며 다른 급수가열기와는 달리 증기와 급수를 직접 혼합하는 직접접촉식 열교환기이다.

(나) 급수펌프

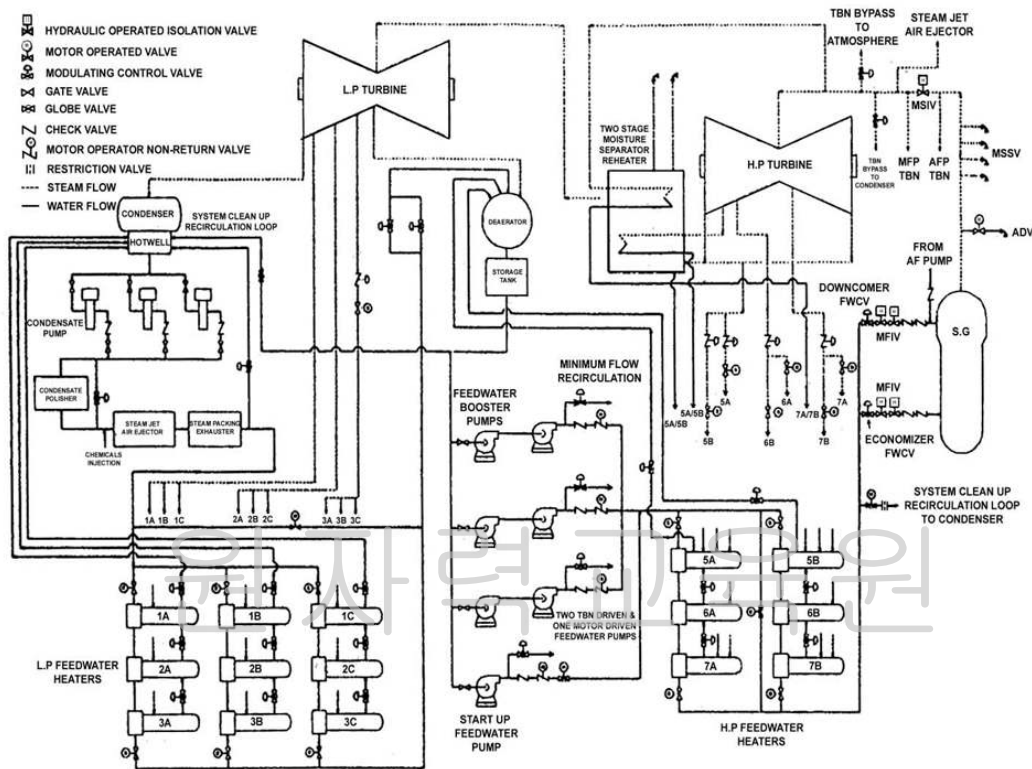
급수를 계속 가열하면 증발하게 되는데 이것을 방지하기 위하여 급수의 압력을 올려주고 고압지역인 증기발생기로 급수를 보내기 위해 급수펌프가 사용된다. 급수펌프에는 급수승압펌프와 주급수펌프로 구성되어 있다.

(다) 주급수조절밸브

열출력에 따라 필요한 열전달매체의량이 변하고 이를 위해 주급수조절밸브가 설치되어 있어 출력에 따라 급수유량을 조절하도록 되어 있다.

(라) 주급수차단밸브

주증기격리밸브 전단에서 주증기배관파단사고가 발생하고 주급수가 계속공급이 되면 원자로냉각재가 과도하게 냉각되고 마이너스(-)인 감속재온도계수에 의해 원자로출력이 증가하는 사고를 방지하기 위하여 주증기배관파단사고시에 급수를 급속히 차단할 수 있도록 주급수차단밸브가 설치되어 있다.



[그림 1-7] 2차계통 요약도

여기까지 2차에너지변환 계통의 각 구성기기와 그 기능을 살펴보았다. [그림 1-7] 2차계통 요약도로 계통수의 흐름과 주요기기를 복습해보자.

3. 터빈보조계통

열에너지를 운동에너지로 변환하는 핵심기기가 터빈이다. 열에너지를 운동에너지로

변환하는 것을 효과적으로 하도록 하기 위하여 몇 가지 보조계통이 있다. 이들 보조계통의 기능과 그 기능을 달성하기 위한 구성기기에 대해 살펴보자.

가. 터빈제어유계통

(1) 개요

터빈제어유계통의 목적은 터빈밸브를 제어할 수 있는 구동력을 제공하는 것이다. 터빈에서는 부하에 따라 열에너지가 운동에너지로 변환되는 양을 조절해야하는데 이것을 터빈밸브가 해준다. 발전소에 있는 대부분의 자동조절밸브의 구동력은 압축공기가 제공하지만 이 터빈밸브는 크기 때문에 압축공기로 구동할 수 없고 유압설비로 구동을 해야 한다. 이 터빈밸브를 자동으로 구동할 수 있는 유압을 제공하는 것이 터빈제어유계통이다. 이 목적을 달성하기 위하여 몇 가지의 설비를 구성해야 하는데 몇 가지의 설비를 구성함에 따라 계통이 수행해야하는 기능이 정의된다.

터빈제어유계통이 갖은 기능은 고압 및 저압 증기밸브 (MSV, CV, CIV)를 정밀하게 제어하여 터빈속도와 출력을 제어하고 터빈보호신호발생시 터빈을 트립시키는 것이다. 터빈트립(터빈밸브 닫힘) 기능을 갖는 이유는 터빈보호신호발생시 유압유를 배유할 수 있는 비상트립시스템을 유압계통에 구성기기로 구성되어 있기 때문이다.

(2) 구성기기

터빈제어유계통의 목적을 달성하기 위한 구성기기는 다음과 같다.

- 유압을 만들어 내는 HPU(Hydraulic Power Unit)
 - 제어유 저장탱크 및 부속 설비
 - 제어유 공급 설비
 - 제어유 이송 및 여과 설비
- HPU에서 각 제어장치에 연결되는 배관
- 터빈밸브의 Control Package
 - Shut off 밸브, 서보밸브 및 실린더로 구성
- 보호 장치
 - 기계적 정지 계통
 - 조속기(Mark-V)로부터의 보호 신호

나. 터빈 윤활유 계통

(1) 개요

터빈은 증기가 가지고 있는 열에너지를 운동에너지로 바꾸는 장치이다. 운동에너지로 바뀐 것이 터빈이 돌아가는 것으로 나타나는데 터빈이 회전하도록 하기 위해서는 축을 지지해주어야 한다. 축을 지지하는 부분에서는 회전하는 축과 고정되어 있는 베어링 사이에 마찰이 발생한다. 마찰은 운동에너지가 다시 열에너지로 바뀌는 것이므로 이것을 최소화시켜주어야 한다. 따라서 터빈윤활유계통의 목적은 터빈베어링에서의 마찰을 최소화하는 것이다. 그리고 마찰에 의해 열에너지로 변환된 마찰열을 제거해주어야 한다.

(2) 계통구성

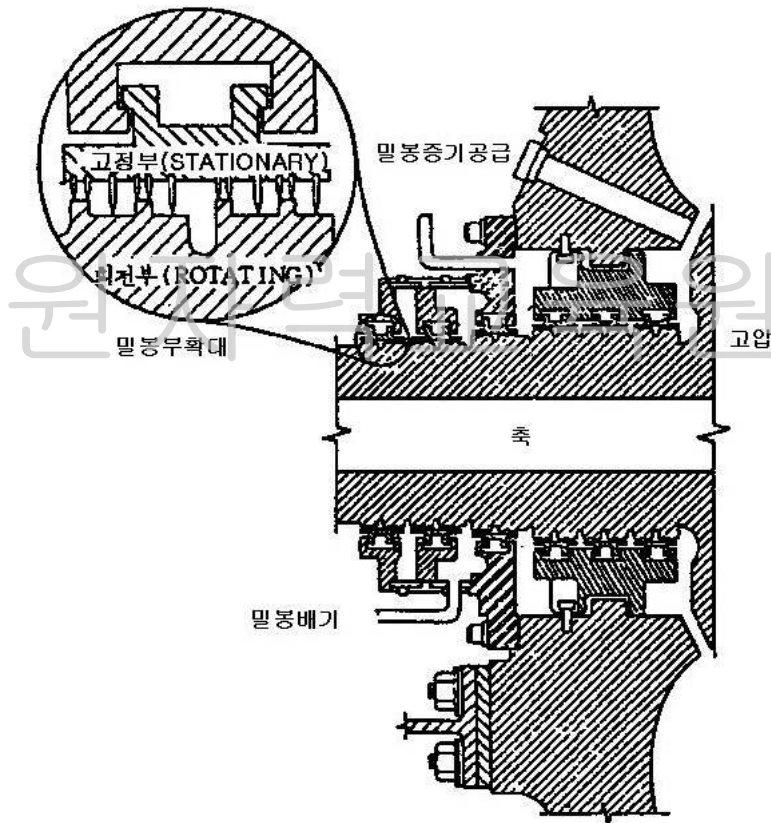
터빈윤활유계통의 기능인 마찰을 최소화하고 마찰열을 제거해주기 위해 필요한 설비는 우선 윤활유를 저장하는 탱크가 있어야 하고, 베어링에 윤활유를 공급해줄 수 있는 펌프가 있어야 하고, 윤활유저장탱크에서 베어링까지 연결해줄 배관이 있어야 하고 그리고 마찰열을 제거해줄 열교환기가 있어야 한다. 실제로 이런 목적을 달성하기 위한 구성기기는 다음과 같다.

- (가) 윤활유탱크(L.O Tank)
- (나) 주윤활유펌프(MSOP)
- (다) 터닝기어윤활유펌프(TGOP)
- (라) 주윤활유입구펌프(MSP)
- (마) 비상베어링윤활유펌프(EBOP)
- (바) 윤활유냉각기
- (사) 윤활유탱크 증기추출기(Vapor Extractor)
- (아) 윤활유 승압펌프(Booster Pump)
- (자) 윤활유 터빈(Oil Turbine)

다. 터빈 밀봉증기 계통

터빈을 돌리기 위해 터빈에 증기를 공급하면 터빈케이싱과 터빈 축 사이에 틈으

로 공급증기가 누설하게 되는데 이 증기가 누설되는 것을 차단해주어야 한다. 터빈 축과 케이싱 사이에 [그림 1-8]과 같은 무수히 많은 톱니 모양의 축소 확대단면을 가진 래비린스 밀봉부를 만들어 놓으면 고압 측의 증기가 흘러가면서 단면축소부에서 증기가 가지는 압력에너지가 속도에너지로 바뀌고, 단면이 확대되는 곳으로 나오면 속도가 떨어지고 압력이 복구되는데 이 압력이 완전히 복구되지 못하고 처음에 비해 조금 떨어지게 된다. 이것이 누적되어 압력이 점점 떨어지는데 적정지점에서 대기압에 해당되는 포화온도보다 낮은 응축기와 연결해 놓으면 그 지역이 진공이 형성되어 누설증기가 그 진공으로 흘러가게 된다. 또한 그 지역이 대기압보다 낮으므로 바깥의 공기가 밀봉부 쪽으로 빨려 들어와 진공 쪽으로 흐르게 되므로 계통증기의 밀봉이 이루어지게 된다.



[그림 1-8] 터빈 축 밀봉부

라. 저압터빈배기후드분무계통

터빈을 기동할 때 무부하 상태나 저출력에서는 고압터빈으로 들어간 증기가 터빈을 돌려 터빈이 1,800rpm으로 돌게 되고 에너지를 다 잃은 증기는 습분분리재열기를 거쳐 저압터빈으로 들어가게 된다. 이때 습분분리재열기는 운전이 되지 않기 때문에 계통증기가 재열기에서 열에너지를 받지 못하고 저압터빈으로 들어가게 된다. 저압터빈으로 들어간 증기분자는 터빈에 줄 에너지가 없기 때문에 흘러가지 못하고 정체되어 있게 되고 1,800rpm으로 회전하고 있는 터빈이 오히려 이 증기분자에 충격을 주어 결국 증기의 온도가 올라가고 터빈의 온도가 상승하게 된다. 터빈의 온도가 상승하면 열팽창에 의해 미소 간격으로 배치되어 있는 제일 큰 저압터빈 끝단의 날개가 손상될 수 있다. 이것을 방지하기 위해 저압터빈배기후드에 냉각수를 살수하여 터빈날개의 온도상승을 방지하기 위한 저압터빈배기후드 살수계통이 터빈을 보조해주는 계통으로 설치되어 있다.

마. 복수기 공기추출계통

저압터빈에서 열에너지를 전달하고 난 증기는 복수기로 들어가 물로 응축된다. 증기가 가지고 있는 열에너지를 최대한 회수하기 위해 복수기를 거의 절대 진공에 가깝게 유지하는데 이 때문에 계통의 연결부에서 대기의 공기가 복수기로 빨려들어 가거나 계통수 중의 불응축성가스가 복수기에 축적되게 된다. 복수기에 불응축성 가스가 축적되어 있으면 불응축성가스가 복수기 튜브 주변을 감싸게 되고 결국 유입되는 증기가 튜브와 만나는 것을 어렵게 하여 증기가 물로 응축되지 못하게 한다. 따라서 복수기는 불응축성가스가 거의 없는 상태로 유지해야 한다. 계획예방정비를 완료하고 처음 복수기의 진공을 걸때는 진공펌프를 이용하여 불응축성 가스를 제거하고 이후는 복수기 공기추출기를 운전하여 제거한다. 복수기공기추출기인 Air Ejector는 23kg/cm²의 주증기를 축소확대노즐에 분사하면 축소확대노즐 끝단에서 증기의 열에너지가 증기의 속도에너지로 바뀌어 초음속이 되고 대신 압력이 거의 없는 절대 진공의 상태가 된다. 여기를 복수기와 연결하여 복수기 속의 불응축성가스를 연속적으로 제거한다.

4. 발전기보조계통

발전기는 터빈이 만들어 놓은 운동에너지를 전기에너지로 바꾸는 장치이다. 운동에너지를 전기에너지로 바꾸는 것은 단순하며 고정자인 코일이 회전하고 있는 자속을 끊으면 코일에 전기에너지가 생성된다. 이 과정에서 손실에너지가 열에너지로 변하게 되어 발전기의 온도를 높이게 된다. 발전기보조계통은 이 열에너지를 제거해주는 것과 관련된 계통으로 구성되어 있다. 발전기보조계통은 회전자를 냉각해주는 발전기 가스 제어계통, 가스가 누설되지 못하도록 하는 발전기 수소밀봉계통, 고정자를 냉각해주는 고정자냉각수계통을 구성되어 있다.

가. 발전기 가스 제어 계통

열을 제거하는 냉각매체로 열 수용능력이 큰 매체인 물을 사용하는 것이 가장 좋으나 발전기 회전자와 같이 고속으로 회전하고 있는 기기에서는 물을 냉각매체로 사용할 경우 물의 유체마찰에 의한 열이 더 많이 발생하므로 냉각 매체로 사용할 수 없다. 따라서 밀도가 낮은 기체로 냉각을 해야 한다. 기체 중에서 열전도도가 가장 큰 수소도 낮은 밀도로 열전달이 잘 이루어지지 않으므로 열전달효율을 높이기 위해 약 4.2kg/cm^2 정도의 압력을 걸어 냉각매체로 사용한다.

수소는 공기에 비해 분자운동이 빠르기 때문에 열전달능력이 좋고 또 냉각하는 중에 풍손이 적어서 열 제거에 효율적이며 산소와는 달리 건조상태를 유지할 수 있고 오염이 잘되지 않아 양호한 절연상태를 유지할 수 있는 이점이 있다.

그러나 수소의 순도가 41~74.2%에서는 산소와 혼합되면 폭발할 위험이 있으므로 취급에 주의를 요하며 97% 이상의 순도를 유지해야 한다.

나. 발전기수소밀봉계통

발전기 내부의 회전자를 냉각하기 위해 압축된 수소가스를 사용함으로써 인해 이 높은 압력의 수소가 누설되는 문제가 발생한다. 이 수소누설은 발전기 케이싱과 축 사이에 밀봉유를 주입하여 방지할 수 있다.

밀봉장치는 발전기의 양쪽 끝부분 End Shield에 용접되어 있다. 밀봉유 공급계통으로부터 공급 받은 진공 측 밀봉유는 밀봉장치내의 밀봉유 공급 홈을 지나 스프링을 통해 각 밀봉장치의 밀봉링 사이로 주입되어 밀봉링과 회전자 사이의 유막을 형성

하여 양쪽 End Shield로 수소가 누설되는 것을 방지한다.

밀봉 링의 내경은 발전기 축의 직경 보다 2~3mm크며 각 링의 Segment는 Garter Spring에 의해 원주 방향으로 지지된다.

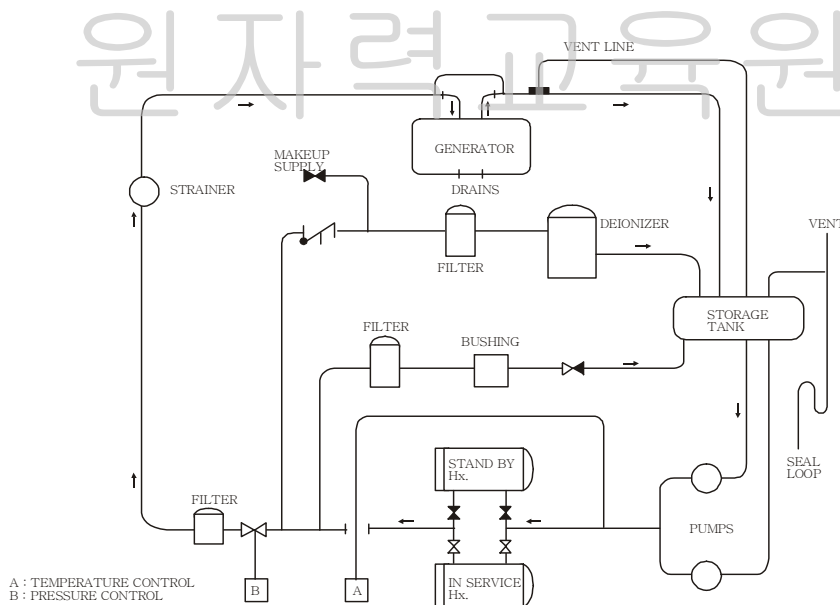
밀봉링을 통과한 밀봉유는 공기 측과 수소 측으로 분리되어 수소 측은 H_2 Detraining Tank로 배유되고, 공기 측은 Aux. Detraining Section을 통해 Bearing Oil과 혼합되어 배유된다.

다. 발전기 고정자 냉각수 계통

고정자에서 발생한 열은 양호한 열 흡수매체인 물을 사용하여 제거할 수 있다. 고정자 코일 속으로 구멍을 뚫어 냉각수를 흘림으로서 고정자코일을 냉각할 수 있는데 이것이 고정자냉각수계통이다.

고정자냉각수계통은 발전기 고정자 권선에서 발생하는 열을 효과적으로 제거하기 위해 순수를 유량과 온도를 자동으로 조절하여 순환시키는 폐회로 냉각계통이다.

[그림 1-9]에서 보는바와 같이 저장탱크, 2대의 펌프, 2대의 열교환기 및 여과기 등으로 구성되어 있고, 보조 우회유로로는 이온교환수지를 통하는 탈염 유로와 고압 부싱 냉각유로로 구성되어 있다.

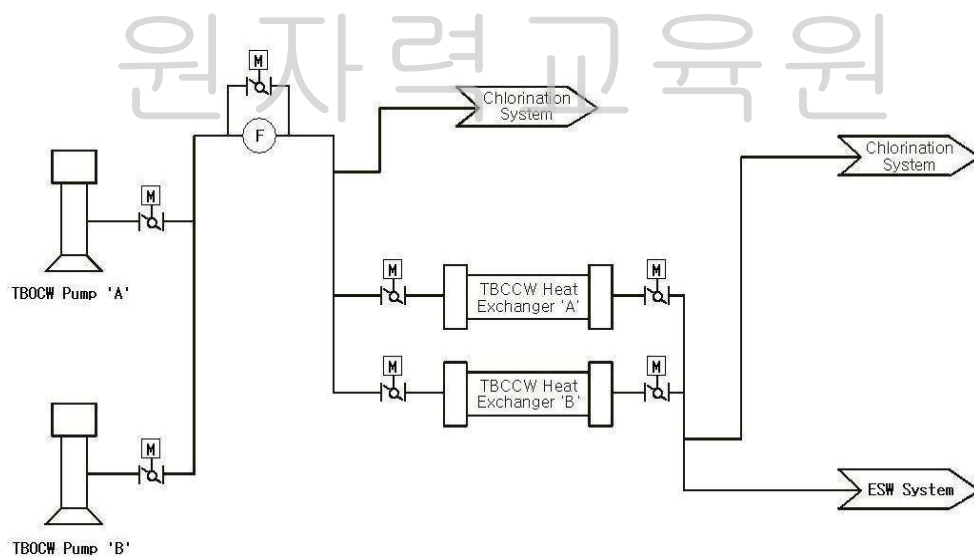


[그림 1-9] 고정자냉각수계통 요약도

터빈에서 열에너지를 운동에너지로 변환하고 발전기에서 운동에너지를 전기에너지로 변환하기 위해 많은 회전기기 등이 운전이 된다. 이들 회전기기들은 열전달매체를 이동시키기 위한 펌프와 같은 회전기기들이다. 이 회전기기들은 회전부위에서 마찰을 최소화하기 위해 윤활을 하지만 마찰을 아주 없앨 수 없기 때문에 일부의 마찰에 의해 열이 발생하고 이 열을 제거해주지 않으면 기기에 축적된다. 기기에 열에너지가 축적되면 기기의 운전상태가 달라서 제 기능을 할 수 없게 된다. 움직이는 기기의 마찰손실열을 제거해주는 장치가 2차기기 냉각수계통이다. 2차기기 냉각수계통은 열에너지를 잘 수용할 수 있는 물을 회전기기에 보내 마찰열을 제거하도록 되어 있다. 2차기기 냉각수가 공급되는 설비는 [그림 1-10] 2차기기 냉각수계통 요약도에 나타나 있다.

나. 2차기기 냉각해수계통

2차기기 냉각수계통이 마찰열을 흡수하면 이 계통의 에너지가 증가하여 온도가 상승하므로 이 2차기기 냉각수계통도 열을 무한히 수용할 수 있는 바다로 수거한 열을 전달해야 한다. 이를 위해 바닷물과 열교환을 통해 2차기기 냉각수계통의 열을 제거하는데 바닷물을 펴서 열교환기를 통해 2차기기 냉각수가 받을 열을 수거하여 무한한 열 수용원인 바다로 보내는 것이 2차기기 냉각해수계통이다.

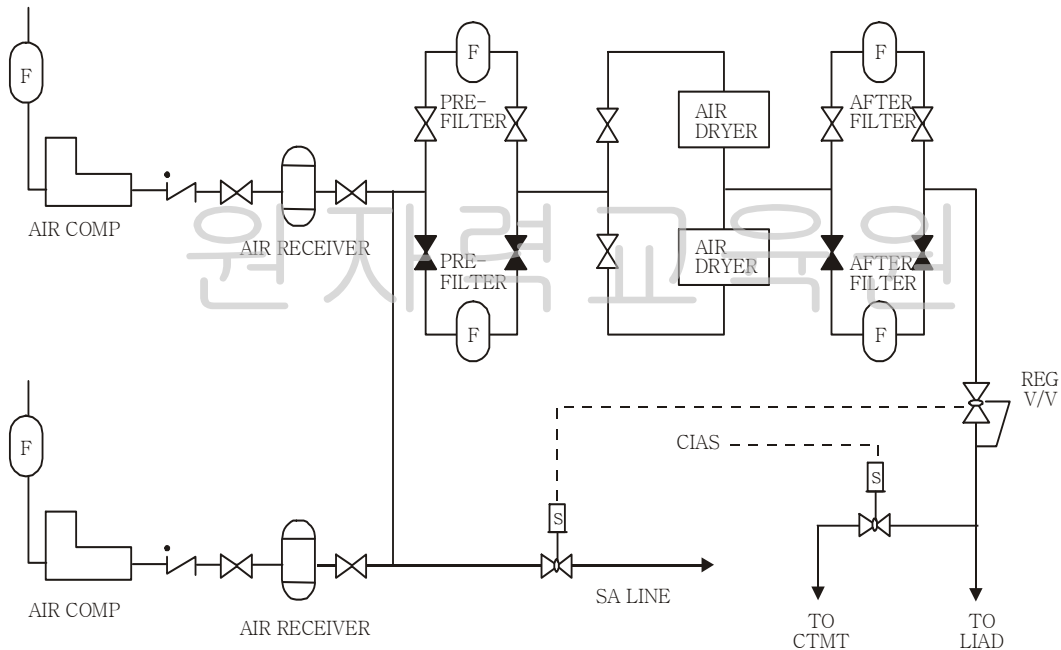


[그림 1-11] 2차 기기냉각 해수계통 요약도

다. 압축공기계통

원자력발전소는 많은 설비가 자동으로 운전되어야 하는데 이 중에서 에너지 전달매체인 물의 유량을 자동으로 제어하기 위한 밸브와 같은 설비는 자동제어기와 밸브 자동제어 구동원이 필요하다. 이 구동원으로 압축공기를 사용한다. 또한 발전소에서는 많은 정비작업이 이루어지고 많은 정비작업공구들이 압축공기에 의해 작동되므로 작업용압축공기가 필요하다. 이를 위해 모터구동 공기압축기로 공기를 압축하여 발전소의 전 설비지역으로 압축된 공기를 공급한다.

여기서 제어용 압축공기는 공기 중에 습분이 없어야하고 찌꺼기 같은 것이 없어야 하며 오일도 포함되어 있지 않아야 한다. 이런 것들은 자동동작기기를 손상시키거나 오작동 시키기 때문이다. 작업용 압축공기는 압축공기가 필요한 압력만 유지하면 된다.



[그림 1-12] 소내 및 계기용 압축공기계통 요약도

[그림 1-12]에서 계기용압축공기와 작업용압축공기 계통의 계통구성설비를 보여주고 있다.

라. 보조증기계통

발전소에서는 몇 가지의 보조 가열원이 필요하다. 겨울철에 에너지변환계통의 열 손실을 방지하기 위하여 난방용 증기가 필요하고 각종 폐기물을 증발처리하기 위해 가열원이 필요하다. 그리고 1차측에 작업을 하고 난 뒤에 샤워를 하기 위한 온수가 필요한데 이들을 위한 가열원으로 보조증기가 사용된다.

마. 순환수 계통

순환수계통은 보조계통이 아니라 3차 냉각계통이다. 복수기에서 증기가 물로 응축될 때 많은 응축열을 방출하는데 이 응축열을 수거하여 무한히 큰 열 수용원인 바다로 보내기 위해 바닷물을 순환시키는 계통이 순환수계통이다.

순환수계통은 물이 흘러갈 수 있도록 차압을 형성시켜주는 순환수펌프, 바닷물이 흘러갈 길을 안내해 주는 배관, 유량을 조절할 밸브와 계기로 구성되어 있다. 복수기에서 증기의 응축열전달효율을 높이기 위해 복수기수실 공기제거계통이 보조계통으로 있다. 또한 복수기 튜브에 해양생물이나 불순물이 부착되어 열교환 효율을 떨어뜨리는 것을 방지하기 위하여 복수기튜브세척계통이 보조계통으로 설치되어 있다.

순환수펌프가 취수구조물에서 해수를 취수하며 복수기로 보내고 복수기를 통과한 해수는 복수기와 연결된 배출도관을 통하여 바다로 방출된다. 겨울에는 해수온도가 낮기 때문에 적은 냉각수로도 많은 열을 흡수할 수 있으므로 펌프 운전대수를 줄여 전력소모를 줄일 수 있다. 한 호기당 16 2/3% 용량의 순환수펌프 6대가 설치되어 있고 펌프의 형식은 전동기구동 수직형 1단 원심펌프이다.

[핵심요약]

1. 2차 에너지변환을 위한 구성계통

- 주증기계통, 터빈발전기계통, 복수계통, 급수계통

2. 주증기계통의 기능 및 주요구성기기

- 기능 : 증기발생기에서 받은 열에너지를 터빈으로 전달
 - 주요구성기기 : 증기발생기, 증기발생기 압력방출밸브, 주증기안전밸브, 주증기리밸브

3. 터빈발전기계통의 기능 및 구성기기

- 기능 : 열에너지를 운동에너지/전기에너지로 변환
- 주요구성기기 : 고압터빈, 저압터빈, 습분분리재열기, 발전기, 여자기

4. 복수계통의 기능 및 주요기기

- 기능 : 저압터빈배출증기를 물로 응축 및 급수계통으로 이송, 2차계통수 정화
- 구성기기 : 복수기, 복수펌프, 복수탈염설비

5. 급수계통

- 기능 : 가열 가압된 급수를 증기발생기에 조절 공급
 - 구성기기 : 급수가열기, 주급수승압펌프, 주급수펌프, 주급수조절밸브, 주급수격리밸브

6. 터빈보조계통

- 터빈베어링에서의 마찰을 최소화하는 터빈윤활유계통, 터빈밸브에 구동원을 제공하는 터빈제어유계통, 터빈의 축을 밀봉하는 터빈증기밀봉계통, 저출력에서 저압터빈의 배기후드를 냉각하는 저압터빈배기후드분무계통, 복수기의 불응축성 가스를 제거하는 복수기 공기추출계통

7. 발전기보조계통

- 회전자를 냉각하는 발전기가스제어계통, 발전기의 수소가스를 밀봉하는 발전기 수소밀봉계통, 발전기의 고정자를 냉각하는 발전기 고정자냉각수계통

8. 기타보조계통

- 2차측 기기의 마찰열을 제거하는 2차기기 냉각수계통, 2차기기 냉각수의 열을 제거하는 2차기기 냉각해수계통, 발전소자동제어용 압축공기를 공급하는 압축공기계통, 보조증기계통, 3차냉각계통인 순환수계통

제2장 터빈 계통

제1절 증기발생기	28
제2절 증기발생기 수위제어계통	53
제3절 증기발생기 취출수계통	76
제4절 증기 및 터빈계통	86
제5절 터빈제어계통 (Mark-V) 일반	113
제6절 터빈증기우회 제어계통	131
제7절 복수 및 주급수계통	143
제8절 터빈보조계통	172

제1절 증기발생기

[학습목표]

1. 증기발생기의 기능을 설명할 수 있다.
2. 증기발생기의 설계기준을 설명할 수 있다.
3. 증기발생기의 유로를 설명할 수 있다.
4. 증기발생기의 기본 구조 및 주요 구성기기를 설명할 수 있다.
5. 증기발생기의 수위 계측설비를 설명할 수 있다.

1. 개 요

증기발생기는 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System)으로 부터 열을 전달받아 포화증기를 생산하는 기기로서, 발생한 포화증기는 터빈발전기로 공급되어 터빈을 구동시키며, 또한 원자로냉각재계통과 2차 계통 사이의 경계부를 형성한다.

이때 증기의 생산을 위해 고온, 고압의 2차 급수가 증기발생기의 U-튜브의 외부로 공급되는데, 고온, 고압의 원자로냉각재는 증기발생기 하부의 1차측 헤드(Primary Head)로 유입되어 U-형태의 튜브 내부를 통해 흐르면서 U-튜브 외부로 유입되는 2차측의 물을 가열한다. 증기발생기를 떠난 원자로냉각재는 원자로냉각재펌프에 의해 원자로 내로 되돌아 와서 재가열된다.

증기발생기는 전출력 운전(Full Power Operation)중에 증기발생기 상부 몸통(Shell)에 설치된 2단의 습분분리장치인 증기분리기(Steam Separator)와 증기건조기(Steam Dryer)에 의해 습분 함유량을 0.25%로 제한한다.

2. 설계기준

증기발생기에 2차측 급수의 온도가 450°F(232.2°C)로 공급시 1070psia(75.2kg/cm²a) 압력 상태에서, 두 대의 증기발생기에서는 12.72×10^6 lb/hr(5.77×10^6 kg/hr)의 포화증기를 생산하며, 이 때 1차측에서 2차측으로 열전달은 2,825MWt의 출력으로 설계

되어 있다.

증기발생기는 정상 전출력 운전중 증기발생기 몸통(Shell)에 설치된 증기분리기 및 증기진조기에 의해 증기중 습분 함유량을 0.25%로 제한한다. [표 2-1]는 증기발생기의 설계 변수들이다.

증기발생기는 튜브를 포함해 원자로냉각재계통의 과도조건을 만족하도록 설계되어 싸이클 수에 대한 ASME Code Sec. III의 허용응력 한계를 넘지 않도록 하고 있다.

모든 과도조건은 지원계통 설계능력을 고려하여 운전조건을 보수적으로 가정하여 수립되었다.

증기발생기는 임계 진동주파수가 정상운전중 및 비정상 조건중에 예측되는 범주에서 충분히 벗어나 있다는 것을 보장하도록 설계되었다. 튜브 및 튜브 지지물은 2차측 유동에서 기인하는 진동과 원자로냉각재펌프에서 기인하는 진동을 고려하여 설계 및 제작된다. 또한 2개의 급수노즐중 어느 하나가 파단되는 경우에도 견딜 수 있도록 설계된다. 두 사고를 동시에 발생하는 것으로는 고려하지 않는다.

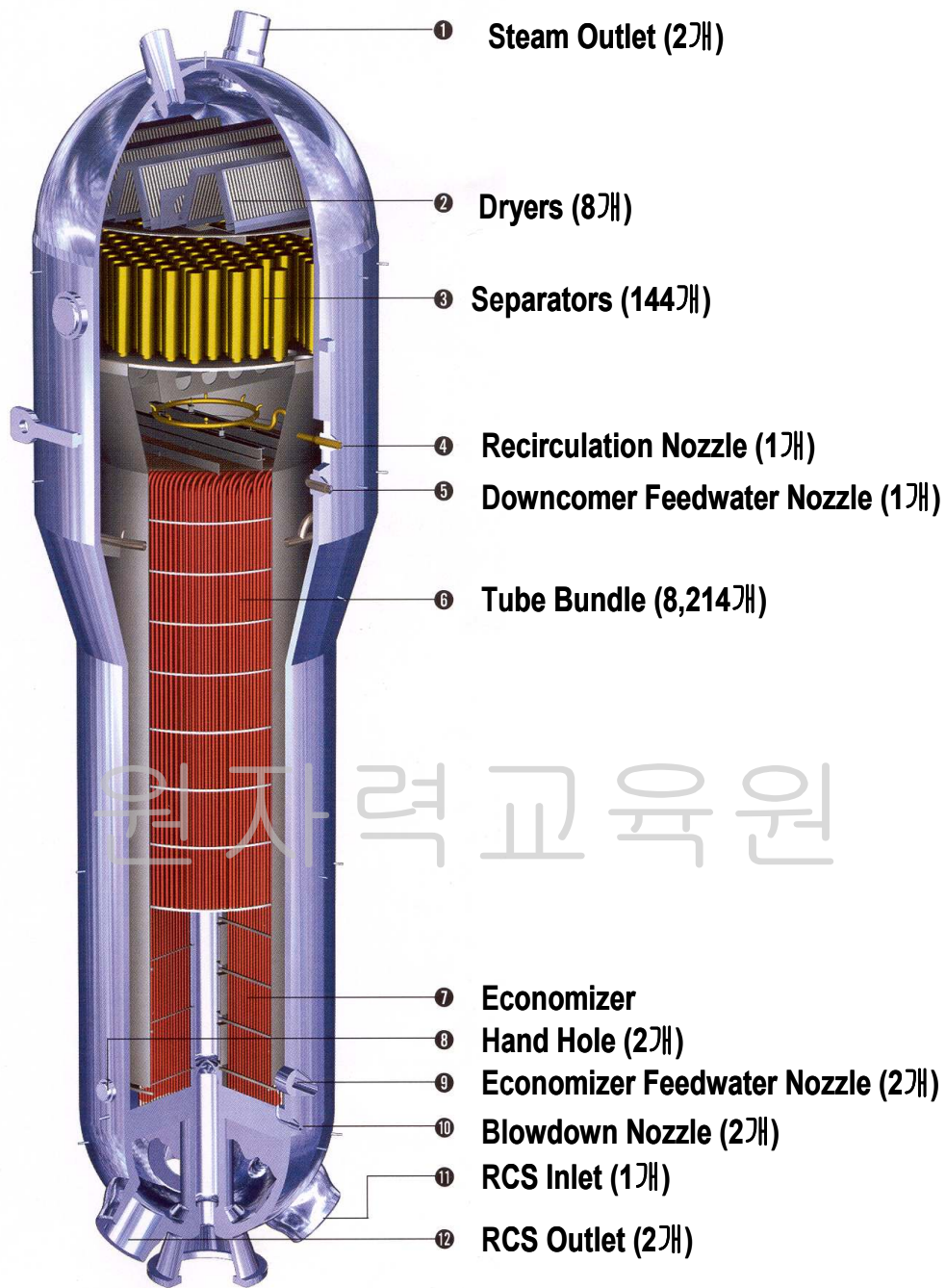
증기발생기 튜브는 외경 3/4inch(19.1mm)의 Ni-Cr-Fe 합금으로 제작되어 있다. 증기발생기 튜브의 파열사고란 원자로냉각재계통 및 주증기계통 사이의 분리벽이 파괴되었음을 의미한다. 증기발생기 튜브의 누설은 원자로냉각재가 주증기계통으로 흘러들어가는 것을 의미하므로 이 방벽의 건전성은 방사선의 안전성 측면에서 중요하다.

즉, 원자로냉각재에 포함되어 있는 방사성물질은 관련 증기발생기의 2차측 계통수와 혼합될 것이다. 이 방사성 물질은 증기에 섞여 터빈으로 이동한 후 복수기로 옮겨가거나 터빈우회계통을 통하여 직접 복수기로 이송된다. 복수기 내에서 불응축성의 방사성 기체는 복수기진공계통을 통하여 제거되고 대기 방출관에서의 기체 방사능 농도가 허용제한치에 도달하면 대기방출밸브가 자동으로 닫히고 방사성 기체는 격납건물 정상 배수조 영역으로 방출된다.

원자력발전소의 증기발생기 운전경험에서 볼 때 튜브의 완전파단 가능성은 거의 없다. 양단 파단사고는 본 설계하의 증기발생기에서는 한 번도 발생하지 않았다. 발생 가능성이 더 높은 파손 형태는 작은 관통부위를 생성하는 것으로, 여기서는 핀홀(Pinhole) 혹은 튜브의 작은 균열이나 튜브와 튜브시트 사이의 밀봉 용접부에서의 균열 발생이 포함된다.

〈표 2-1〉 증기발생기의 설계변수

설 계 변 수		값
공 통	증기발생기 수	2
	열전달율 (0.2% 취출시/SG)	4,824×106(1,215.6×10 ⁶) BTU/hr(kcal/hr)
1 차 측	설계압력/온도	2,500/650(175.8/343.3) psia/°F (kg/cm ² a/°C)
	냉각재 입구온도	621.2(327.3) °F (°C)
	냉각재 출구온도	564.5(295.8) °F (°C)
	냉각재 유량/SG	60.75×106(27.56×10 ⁶) lb/hr(kg/hr)
	냉각재 체적/SG	1834(51.9) ft ³ (m ³)
	튜브 크기(외경)	0.75(19.1) in(mm)
	튜브 두께(공칭)	0.042(1.07) in(mm)
2 차 측	설계압력/온도	1,270/575(89.3/301.7) psia/°F (kg/cm ² a/°C)
	증기압력(증기노즐끝에서)	1,070(75.2) psia(kg/cm ² a)
	각 노즐별 증기유량 (0.25% 습분하에서)	3.180×10 ⁶ (1.442×10 ⁶) lb/hr(kg/hr)
	급수온도(전출력에서)	450(232.2) °F (°C)
	1차측 입구노즐(수/내경)	1/42(1,066.8) in(mm)
	1차측 출구노즐(수/내경)	2/30(762) in(mm)
	증기노즐(수/내경)	2/24.125(612.775) in(mm)
	급수예열기 급수노즐 (수/크기/스케줄)	2/12/80 in
	하향유로 급수노즐 (수/크기/스케줄)	1/6/80 in
	평균 열전달계수(설계치)	602.25(2941) Btu/hr/ft ² /°F(kcal/hr/m ² /°C)



[그림 2-1] 증기발생기 구조

3. 기기설명

[그림 2-1]은 증기발생기의 내부 구조를 나타낸다. 증기발생기의 1차측 헤드(Primary Head)에는 수직 분리판(Primary Head Divider Plate)이 설치되어 입구 및 출구공간(Inlet & Outlet Plenum)을 분리한다. 원자로냉각재는 원자로 용기의 고온관으로 부터 증기발생기 1차측 헤드(Primary Head)에 설치된 입구 노즐로 유입되고 입구공간을 거쳐 U-튜브를 통과하게 되는 데, U-튜브에서 원자로냉각재의 열이 2차측 급수(Feedwater)로 전달되며, 튜브를 거쳐 나온 원자로냉각재는 2개의 증기발생기 출구노즐을 거쳐 원자로냉각재펌프에 의해 원자로 용기로 보내진다.

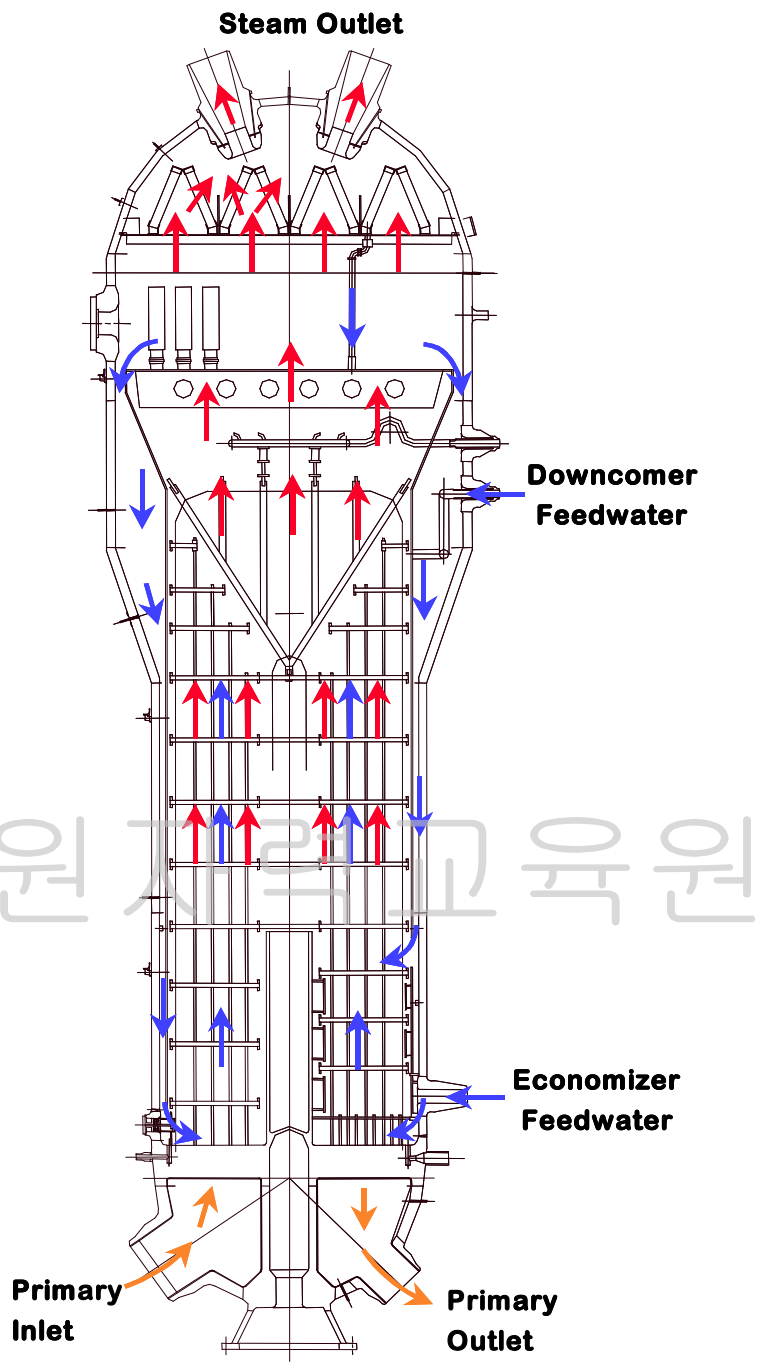
증기발생기의 셸(Shell) 측은 하부에는 급수예열기(Economizer)가 설치되어 있어 급수예열기 영역과 증발 영역으로 구분된다.

2차측 급수는 증기발생기 상부로 공급되는 하향유로 급수(Downcomer Feedwater)와 하부측의 급수예열기측으로 공급되는 예열 급수(Economizer Feedwater)로 나누어 진다.

상부의 하향유로 급수노즐로 공급되는 하향유로 급수는 증기발생기의 셸(Shell) 내측과 슈라우드(Shroud) 외측이 형성하는 하향유로를 통해 아래로 흐름이 형성되어 급수예열기의 상단의 증발 영역에서 예열 급수와 혼합되고, 이 증발 영역에서 급수는 포화상태로 비등하면서 습분을 동반한 상태로 되었다가 증기발생기 상부로 올라가면서 상부측에 설치된 습분분리기를 통과하면서 99.75% 이상의 건포화증기로 변환되어 터빈에 공급된다.

급수예열기(Economizer)가 설치된 증기발생기는 여러 면에서 이전의 재순환(Recirculating)형 증기발생기와 유사하다. 근본적인 차이점은 급수를 하향유로를 흐르는 재순환 유량(Recirculation Flow)와 혼합시키기 위해 단순히 급수링(Feeding)을 통해 분사하는 것 외에 급수의 일부를 증기발생기내의 별도의 부분 즉, 급수예열기 측으로 공급한다는 것이다.

증기발생기 튜브의 저온관(혹은 출구 전열관) 다발로 이루어진 반원통형 부분은 수직 분리판(Economizer Divider Plate)에 의해 전열관의 증발영역과 분리되며 이 부분을 급수예열기라고 하는데, 급수는 직접 이 부위로 들어가서 증발영역으로 나가기 전에 예열된다. 반대편의 고온관측 반원통 부분은 관판(Tubesheet)의 상단까지 하향유로를 형성한다.



[그림 2-2] 증기발생기 내부 유체유동 경로

수직으로 세워져 있는 튜브의 열전달면에서 생성된 증기-습분 혼합물은 증기분리기에서 원심운동에 의하여 증기와 습분입자로 분리된다. 습분은 증기분리기 몸체의 미세한 구멍을 통해 빠져나와 하향유로를 통해 재순환하게 된다. 증기는 주름잡힌 관형의 증기건조기를 통과함으로써 최종 건도를 유지하게 된다. 증기발생기에서의 내부 유체흐름은 [그림 2-2]에 나타나 있다.

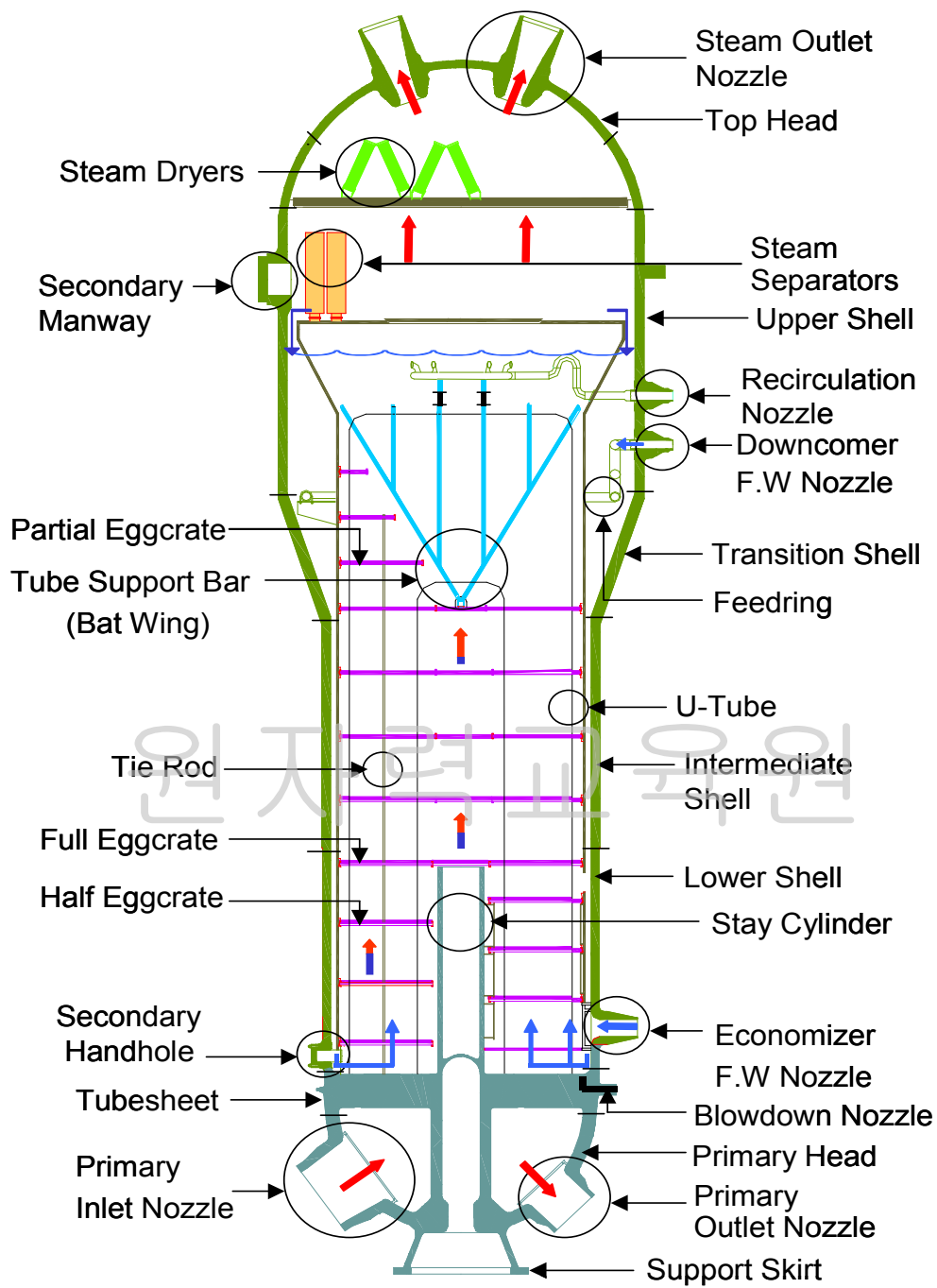
4. 주요 구성 기기

국내 원자력 발전소에 사용되고 있는 증기발생기는 수직형 자연순환식으로서 [그림 2-3]과 같이 원통형의 상, 하부 셸(Upper & Lower Shell)과 하부의 관판(Tubesheet), 그리고 채널 헤드(Channel Head)로 구성되어 있다.

증기발생기의 1차측 경계는 관다발(Tube Bundle), 관판(Tubesheet), 1차측 헤드(Primary Head)로 구성된다.

증기발생기의 2차측 구성품으로는 증기발생기의 셸(Shell)이 있고, 셸 내부에는 관지지판(Tube Support Plate) 및 슈라우드(Shroud), 관지지대(Tube Support Bar) 그리고 하부 셸측의 급수예열기, 상부 셸측의 2단의 습분분리장치, 유량제한기 등으로 나눌 수 있다.

원자력교육원



[그림 2-3] 증기발생기 세부 구조

가. 관다발(Tube Bundle)

U-튜브의 재질은 Inconel-600(Ni-Cr-Fe 합금)이며, 외경이 3/4inch(19.05mm)이고 두께가 0.042inch(1.07mm)인 8,214개의 튜브가 균일한 삼각배열의 형태로 설치되어 관다발(Tube Bundle)을 형성하고, 각 U-튜브들은 관판(Tubesheet)에 폭발식 확관(Explosive Expansion) 방식으로 설치되며, 관판 하부의 튜브 끝단은 밀봉 용접(Seal Welding)되어 있다. 또한 Inconel-600 튜브는 고온 열처리(HTMA, High Temperature Mill Annealing)과정으로 처리되었다.

증기발생기의 튜브 수량은 관막음의 필요성을 고려하여 8%의 관막음 여유를 포함한다.

U-튜브는 수직방향으로 일정한 간격으로 설치된 Eggcrate 형태의 관지지판(Tube Support Plate)에 의해 지지되고, 튜브 상부에는 관지지대(Tube Support Bar)가 설치되어 유체 흐름에 의한 진동을 억제한다.

나. 관판(Tubesheet)

관판은 관다발(Tube Bundle)과 함께 1차측과 2차측의 경계가 되는 부분으로서, 546mm 두께의 저탄소 합금강으로 제작되고, 1차측 냉각재와 접촉되는 부위는 최소 5mm두께의 Inconel-600으로 용접 피복되어 1차측 헤드(Primary Head)와 하부 셸(Lower Shell) 사이에 용접 설치된다.

다. 1차측 헤드(Primary Head)

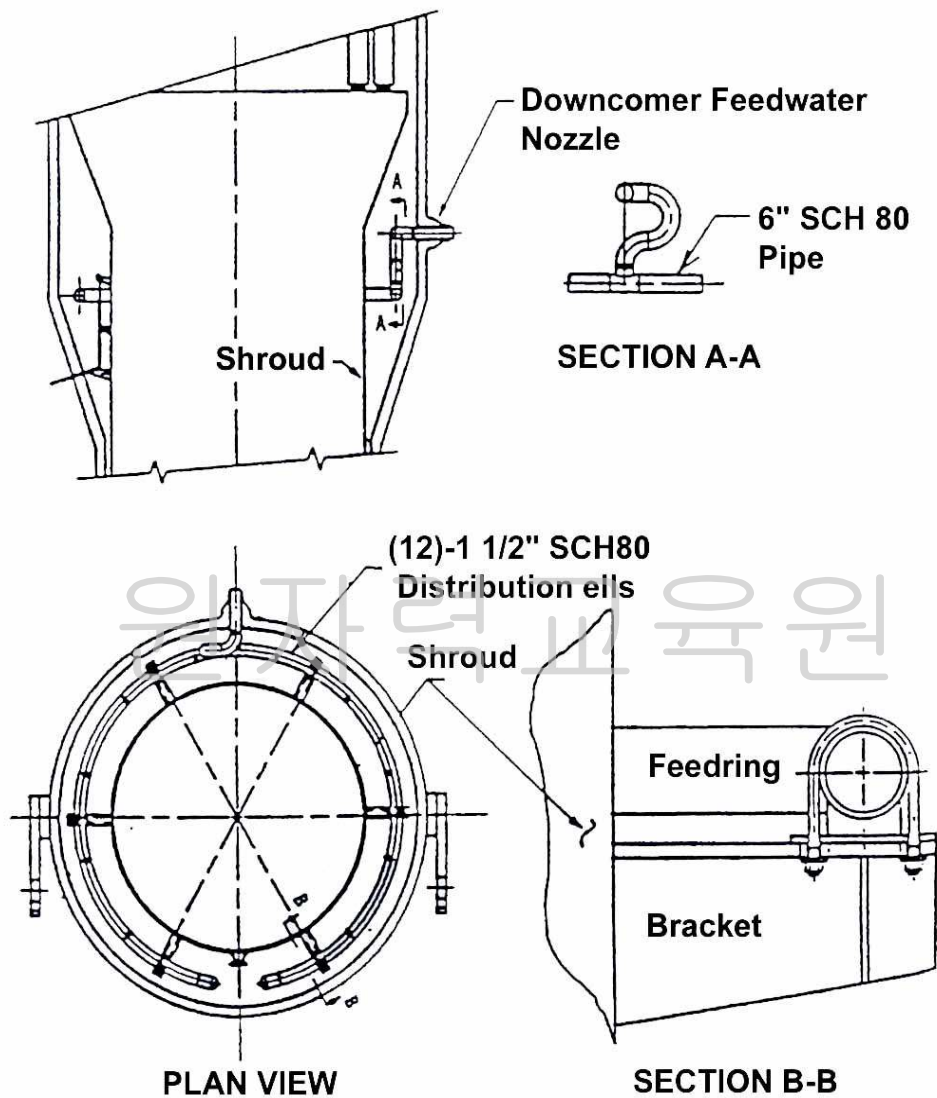
증기발생기의 1차측 헤드는 탄소강으로 주조 제작되어 내부 표면이 Inconel-600으로 피복된 반구형의 수실부분으로서 1개의 원자로냉각재 입구노즐(42", 1066.8mm)과 2개의 출구노즐(30", 762mm), 그리고 4개의 1차측 계측기 노즐 및 2개의 1차측 배수 노즐이 용접되어 있다.

라. 셸(Shell)

증기발생기의 2차측 셸(Shell)은 돔(Dome)형태의 상부 헤드(Top Head 혹은 Secondary Head)와 상부 셸(Upper Shell), 원추형 셸(Transition Shell), 하부 셸(Lower Shell)로 나누어진다. 하향유로 급수는 [그림 2-4]와 같이 상부 셸에 설치된 하향유로

급수노즐(Downcomer Feedwater Nozzle)을 통해 증기발생기 쉘내로 들어와 급수링(Feeding)을 거쳐 쉘내의 하향유로(Downcomer)측으로 공급된다.

증기발생기의 급수노즐(Feedwater Nozzle)에서 증기출구 노즐(Steam Outlet Nozzle)간의 압력강하는 급수예열기(Economizer)를 포함하여 약 40psi(2.81kg/cm²)이다.

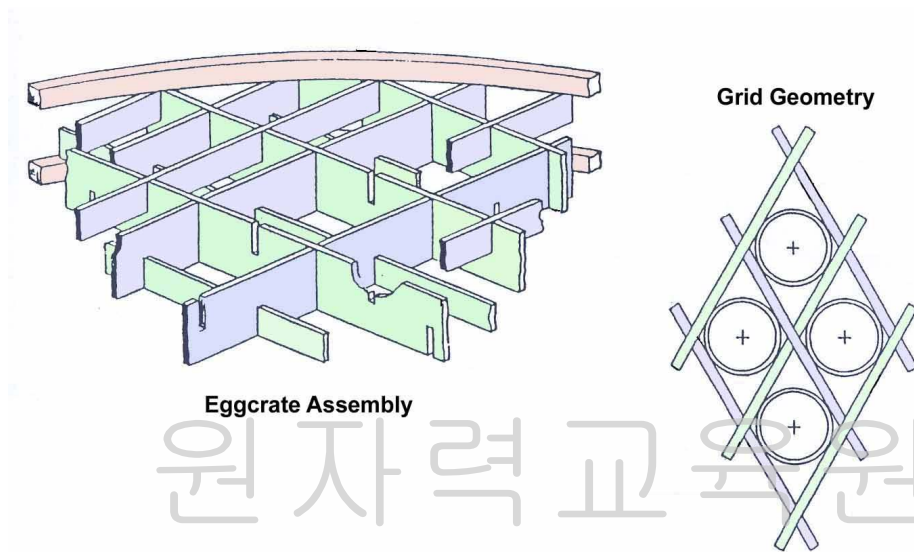


[그림 2-4] 급수링(Feeding) 설치 구조

마. 관지지판(Tube Support Plate) 및 슈라우드(Shroud)

[그림 2-5]와 같이 Eggcrate 형태를 가진 관지지판은 물/증기 흐름에 의한 진동으로부터 관다발을 지지한다.

11개층의 관지지판들은 Partial Eggcrate, Full Eggcrate, Half Eggcrate의 세가지 형태가 설치되는 데, 관다발의 U-자형 부위에는 3개층의 Partial Eggcrate가 설치되고, 중간 부위에는 Full Eggcrate가 5개층으로 설치되며, 급수예열기가 위치한 하부 셀 부위에는 고온관과 저온관측에 어긋난 높이로 각 3개층의 Half Eggcrate가 설치된다.



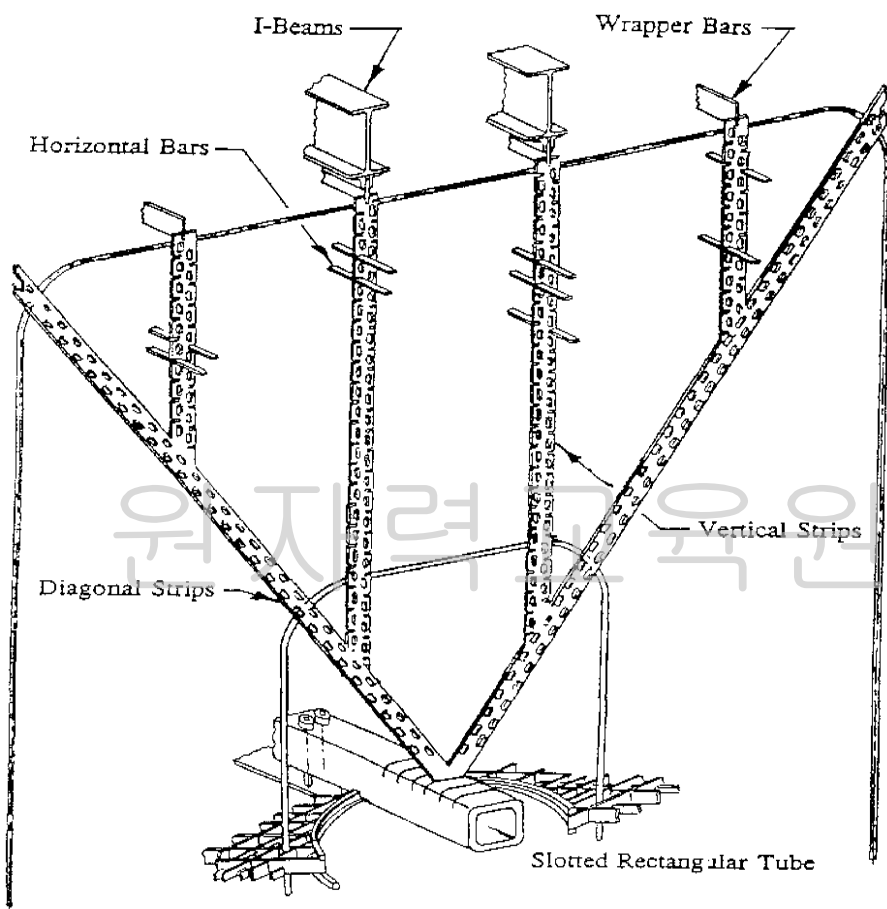
[그림 2-5] Eggcrate형 관지지판

각 관지지판들은 수개의 수직 연결봉(Tie Rod)들에 의해 연결되고, 또한 관지지판의 가장자리에는 슈라우드(Shroud)가 설치되어 관다발을 통한 급수의 상향이동, 슈라우드와 외측 셀(Shell)사이의 재순환 경로 및 하향유로(Downcomer)의 경로를 제공한다.

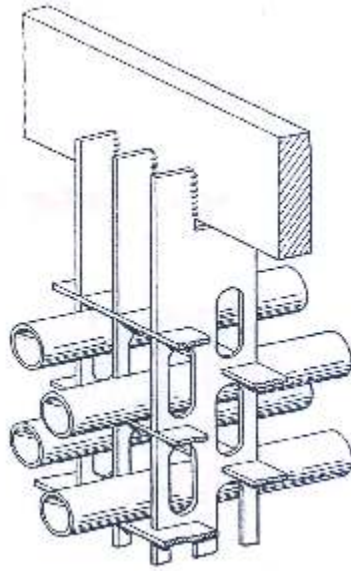
관지지판 및 슈라우드(Shroud)의 재질은 스테인레스 강판이다. 관 지지 구조물의 설계와 2차측 냉각수 화학성분에 대한 적절한 조절이 함께 고려된 이 재질은 피팅(Pitting)과 덴팅(Denting)에 의한 튜브 손상을 최소화할 수 있다.

바. 관지지 대(Tube Support Bar-bat Wing)

관다발 상부의 U-bend 측에는 [그림 2-6]과 같이 관 지지대(Tube Support Bar-bat Wing)가 설치되어 유체흐름에 의한 진동으로 발생하는 튜브의 유체유동 마모를 방지하는 진동방지대의 역할을 하도록 설계되었다. [그림 2-7]은 관 지지대에서 I-Beam 하부의 Wrapper Bar에 Vertical Strip이 설치된 모습이다.



[그림 2-6] 상부 관지지대(Tube Support Bar)



[그림 2-7] Support Bar 세부 구조

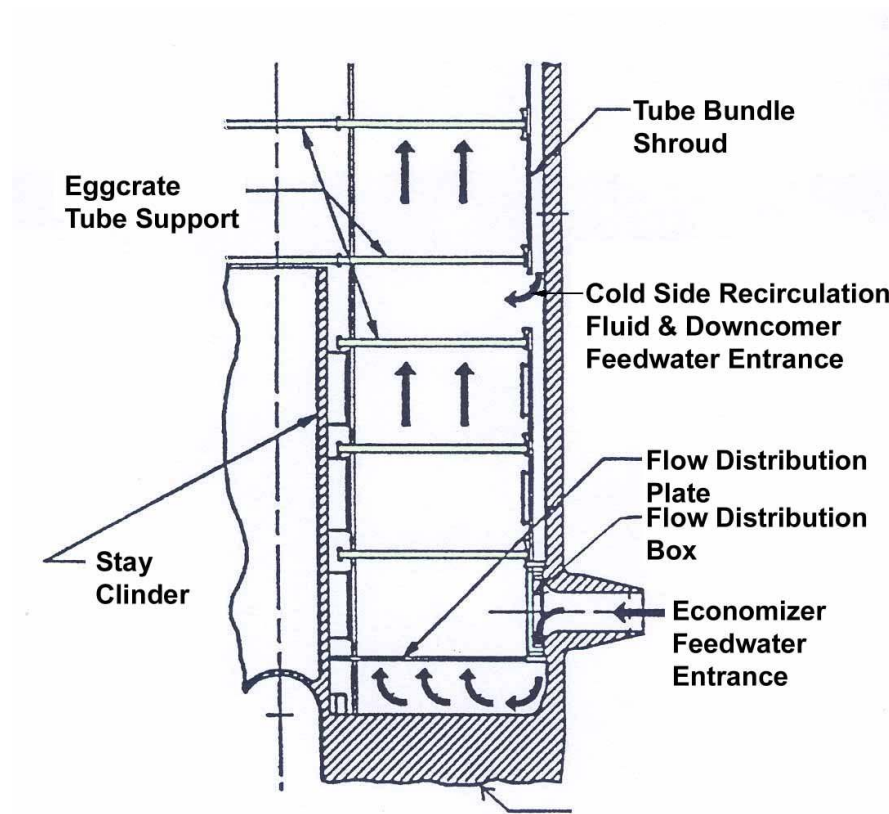
사. 급수예열기(Economizer)

급수예열기는 증기발생기 하부 셀측에서 U-튜브의 저온관측에 설치되어 1차측 냉각재의 변화없이 증기발생기의 열효율을 향상시키는 목적으로 설치되어 있다. 즉, 가열면의 증가없이 증기발생기를 고압으로 운전할 수 있도록 하고 있다.

기존의 증기발생기와 차이점은 급수가 두 군데로 유입되는데, 한 유로는 기존의 증기발생기와 동일하게 상부 셀 부위에서 급수링을 통하여 하향유로(Downcomer)로 유입되고, 다른 유로는 급수예열기 하단부의 2개의 노즐을 통해 공급된다.

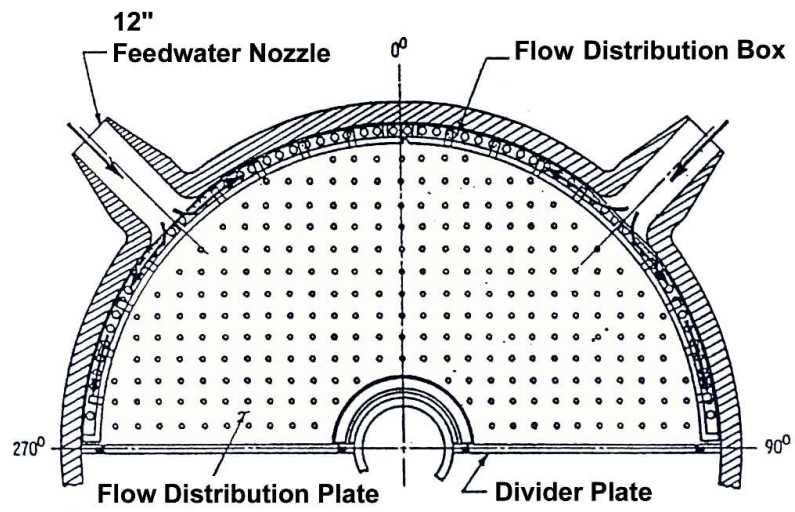
급수예열기에 유입되는 급수는 [그림 2-8]과 같이 급수예열기 하단부의 저온관 관다발측의 2개의 노즐로 유입되어 유량 분배실(Flow Distribution Box)을 통과하고, 유량 분배판(Flow Distribution Plate)을 거쳐 급수예열기 영역을 통과하면서 예열되어 증발 영역으로 유입된다. [그림 2-9]는 유량 분배실의 형상이다.

급수예열기 영역과 증발 영역은 수직 분리판(Economizer Divider Plate)에 의해 분리되며, 이 수직 분리판은 증기발생기 동체 및 증기발생기 내부 중앙에 설치된 원통 지지물(Stay Cylinder)에 의해 고정된다.

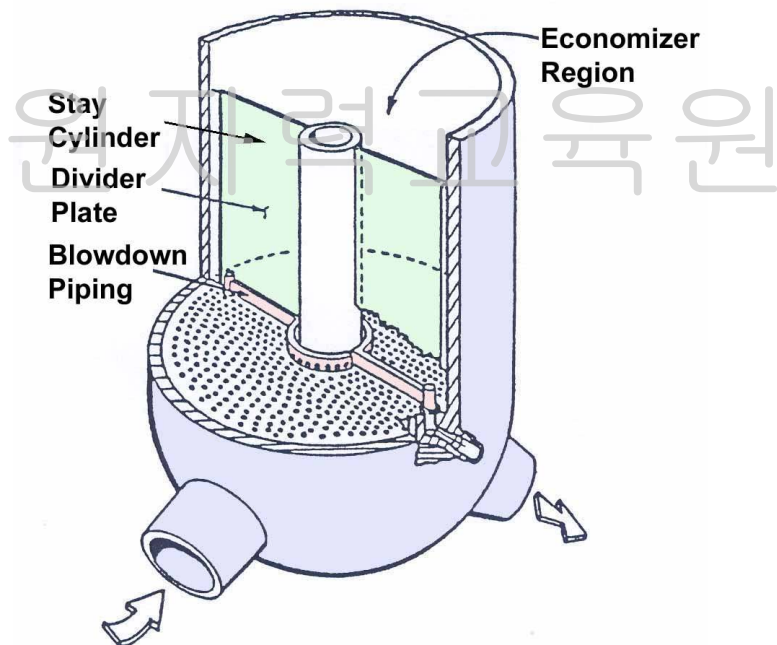


[그림 2-8] 급수예열기(Econormizer) 내부 구조

급수예열기 영역은 운전과도 조건, 발전소기동 및 대기운전 조건, 그리고 주급수 상실 및 급수관 파단과 같은 사고 조건을 충분히 고려하여 설계된다. 각 부품에 대한 구조설계는 ASME Code Section III, 부록 G의 설계규칙과 적절한 하중 분류법에 따라 다양한 조건에서 열하중 및 압력하중을 견딜 수 있도록 되어 있다. 급수예열기 영역은 급수관 파단시 취출(Blowdown)에 의하여 발생하는 일차응력을 고려하여 설계된다.

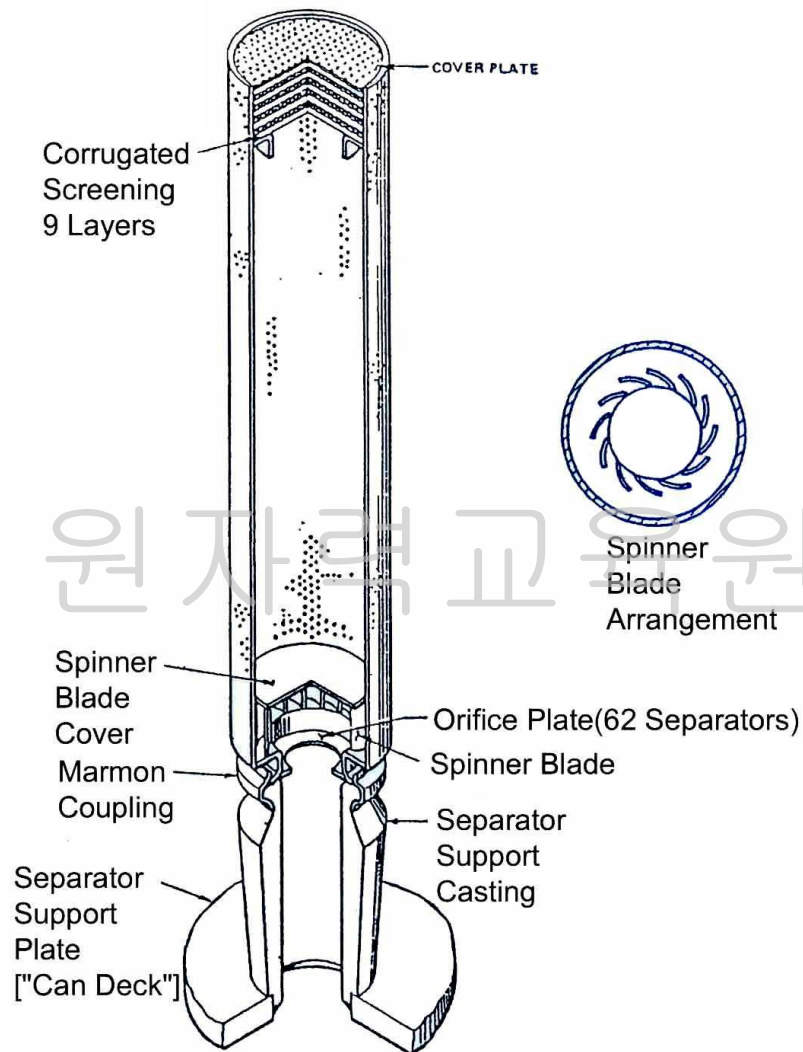


[그림 2-9] 유량 분배실(Flow Distribution Box)



[그림 2-10] 관판(Tubesheet) 상부 구조

2차측의 증발영역에서 급수예열기 영역을 분리하는 수직 분리판(Economizer Divider Plate)은 [그림 2-10]과 같이 용기 쉘과 튜브시트의 중심에 용접되어 있는 원통 지지물(Stay Cylinder)로 지지된다. 원통 지지물(Stay Cylinder)은 그다지 무게가 있는 것은 아니지만 수실의 1차측 원통 지지물에서 연장되어 급수예열기 높이까지 뻗어져 있다.



[그림 2-11] 증기분리기(Steam Separator)

아. 습분분리장치

관다발에서 생성된 증기는 2단계의 습분분리장치를 통과하면서 거의 완전한 건 증기가 된다.

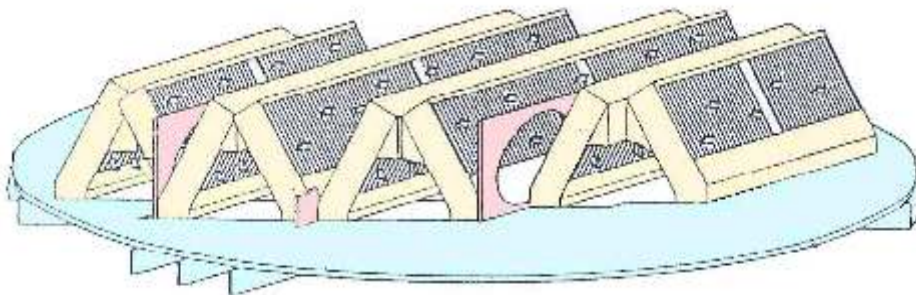
(1) 증기분리기(Steam Separator)

증기분리기는 1단계 습분분리장치로서 [그림 2-11]과 같이 12개의 소용돌이 날개(Spinner Blade)가 설치된 원통형의 습분분리기로서 관다발 상부에 위치한 슈라우드(Shroud)의 상부 덮개에 144개가 설치된다.

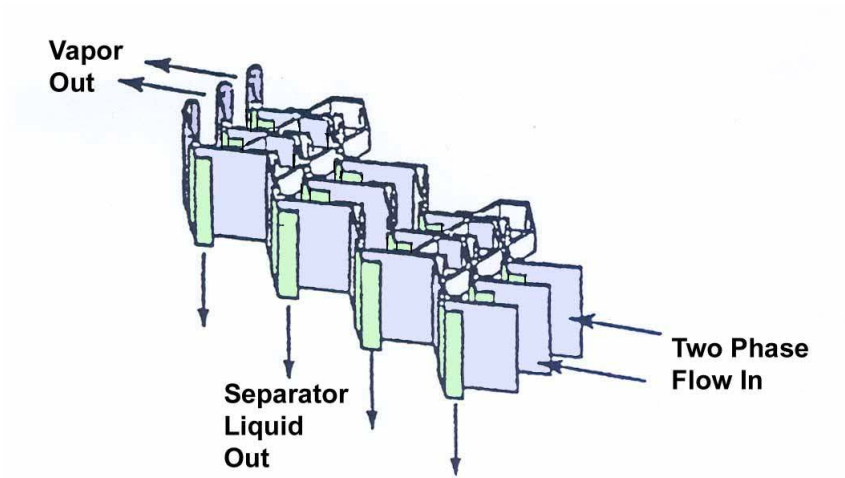
증기분리기의 상단에는 9개층의 오리피스 Mesh Wire가 설치되어 분리된 물방울의 유출을 억제시키며, 분리된 습분은 하향유로(Downcomer)측으로 유입되어 재순환수로서 재열영역으로 보내진다.

(2) 증기건조기(Steam Dryer)

증기건조기는 2단계 습분분리장치로서 증기분리기 집합체의 상부에 설치되며, [그림 2-12]와 같이 8개의 증기건조기로 구성된다. 이것은 유입되는 물, 증기 혼합물로부터 습분을 제거하는 고용량 베인(High Capacity Vane)의 집합체<[그림 2-13]참고>로 구성된다. 증기건조기를 통과한 증기는 건도 99.75% 이상의 건포화증기가 되며, 습분분리기에서 제거된 물은 배수관(26개, 2.5")을 통해 슈라우드(Shroud)의 덮개로 흘러서 하향유로(Downcomer)로 유입되어 다시 급수와 혼합된다.



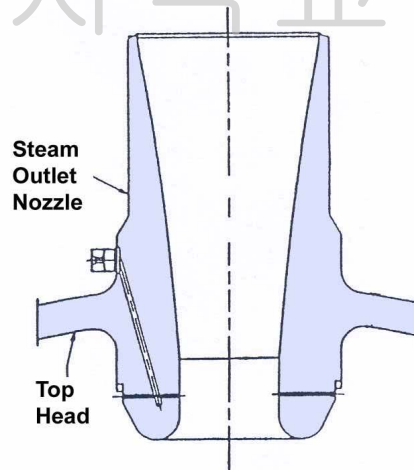
[그림 2-12] 증기건조기(Steam Dryer)



[그림 2-13] 증기건조기 베인(Vane) 형태

자. 유량 제한기

증기발생기 출구노즐에는 [그림 2-14]와 같은 벤츄리 노즐 형태인 유량 제한기가 설치되어, 주증기관 과열사고시 증기 유로 면적의 70%를 감소시키는 기능을 수행하여 격납용기 내 최고 압력, 온도를 제한한다.



[그림 2-14] 증기발생기 출구 노즐

이 유량제한기에서는 유동단면적의 감소에 따라 유량률은 줄어 들고 유속은 음속 이하로 제한된다.

이 유량제한기를 설치함으로써 얻어지는 보호측면의 이점이 몇 가지 있다. 격납 건물 압력의 갑작스런 증가를 방지하며, 원자로냉각재로부터 열제거율을 허용범위 안에 둘 수 있고, 주증기관에서의 추력을 줄인다. 그리고 중요한 것으로는 증기발생기 내부구조물(특히 관판과 튜브)에 미치는 응력을 제한한다.

이 유량제한기는 정상운전중 이 제한기를 통과할 때 발생하는 압력 손실을 최소화하도록 설계된다.

구조적 적합성을 보장하기 위해 유량제한기 설계에 대해 충분히 분석하였다. 설계유량 3.50×10^6 lb/hr(1.59×10^6 kg/hr)이 흐를 때 유량제한기를 통한 압력 감소량은 유량제한기에서 약 5psi(0.35kg/cm^2)이며 증기발생기 증기 돔 영역에서 유량제한기의 출구노즐까지는 약 6psi(0.42kg/cm^2)이다. 유량제한기의 구조, 재질 및 제작은 ASME Code Section III, Class 1을 따른다.

차. 증기발생기 취출수계통(Blowdown System)

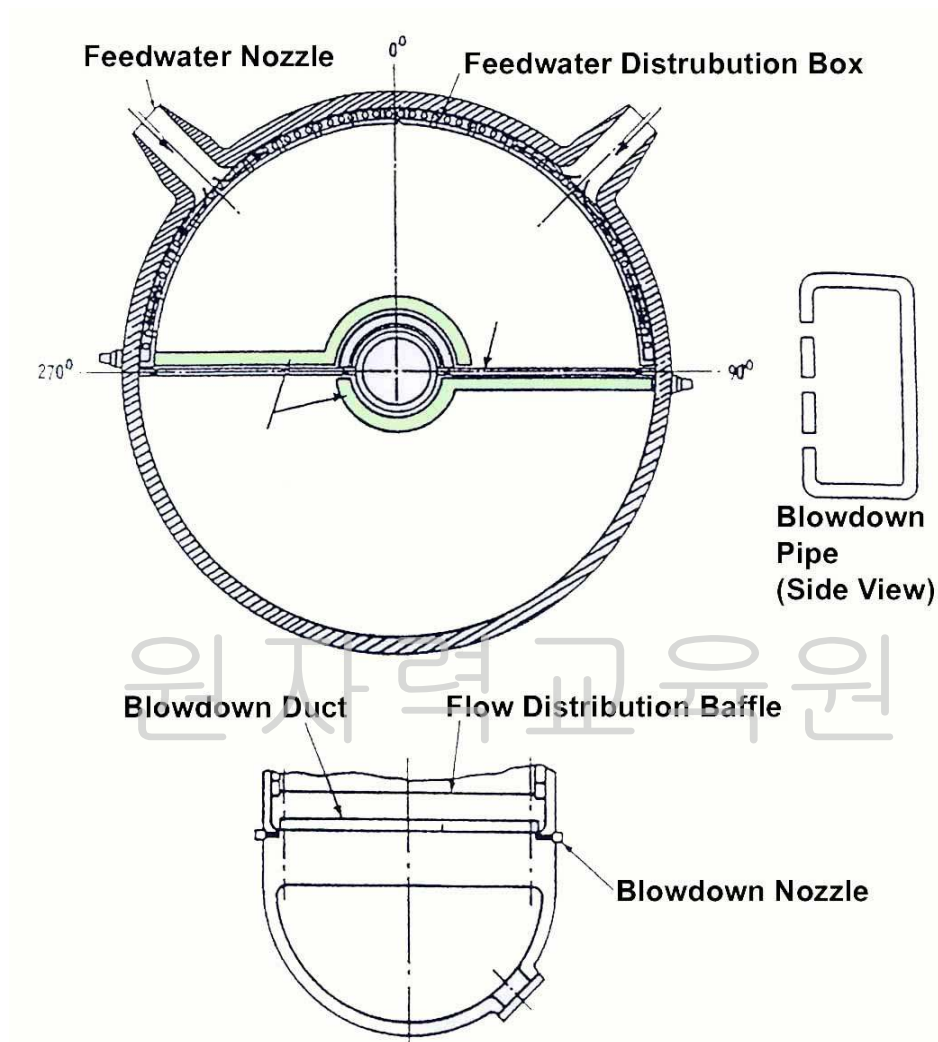
증기발생기의 관판 상부에는 [그림 2-15]와 같이 취출배관(Blowdown Piping 혹은 Blowdown Duct)이 고온관측과 저온관측 사이의 경계선에 설치되고, 증기발생기 셸 내의 불순물과 부식생성물들이 취출배관을 통해 배출되도록 하며, 증기발생기 셸측에는 2개의 취출노즐(Blowdown Nozzle)이 설치되어 증기발생기 취출수계통과 연결된다. 이 계통은 증기발생기 수질 개선을 하는 계통으로서 증기발생기 셸 내부에 존재하는 용해성, 비용해성 불순물 및 부식생성물을 제거하는 기능을 수행한다.

정상 전출력 운전시 각 증기발생기의 취출수 유량은 12,720lb/hr로 전체 증기유량의 0.2%에 해당하며, 최대 연속 취출수 유량은 63,600lb/hr로 전체 증기유량의 1%에 해당된다.

※ Combustion Engineering사 권고 사항

- 연속 취출 : 정상운전시 설계 주증기 유량의 0.2%(약 47gpm)
- 비 정상운전 : 정상운전시 설계 주증기 유량의 1.0%(약 230gpm)

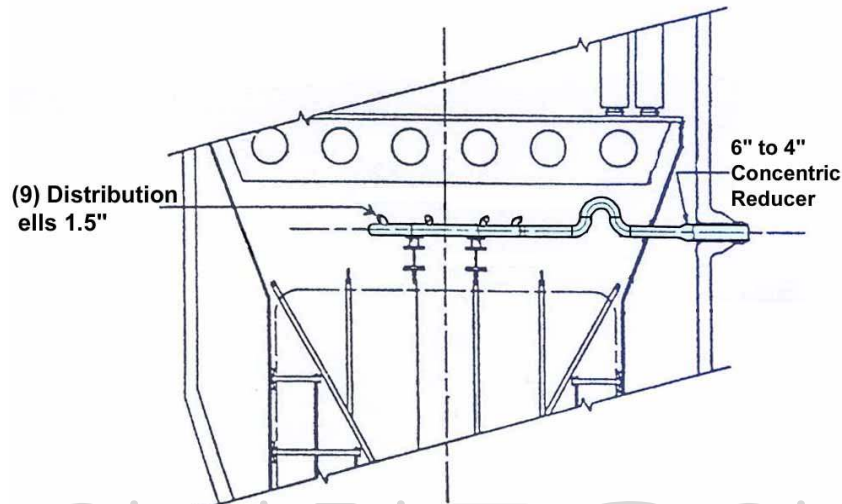
증기발생기 관판(Tubesheet)의 윗 부분에 설치된 2개의 2차측 핸드홀(Secondary Handhole)은 증기발생기 셸 내부 검사가 필요할 때 발전소 수명기간 동안에 관판 상부에 쌓여있는 슬러지들을 제거하기 위해 사용된다.



[그림 2-15] 증기발생기 취출수(Blowdown) 계통

카. 재순환 노즐(Recirculation Nozzle) 및 스파저 링(Sparger Ring)

[그림 2-16]과 같이 상부 셀측의 증기분리기 하부에 설치된 재순환 노즐 및 스파저 링은 취출수계통에 연결되어 증기발생기의 습식보관 상태시 화학 및 수위 제어를 한다.

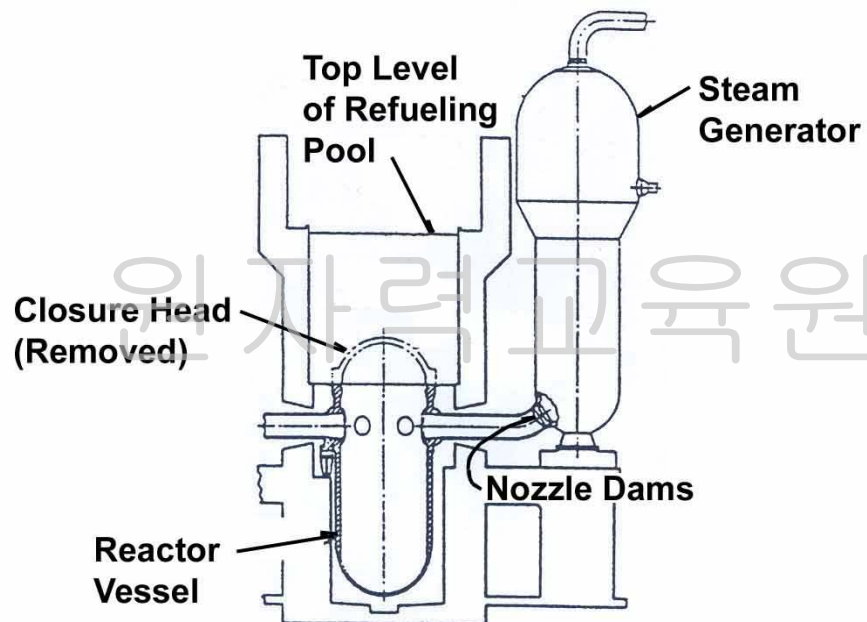
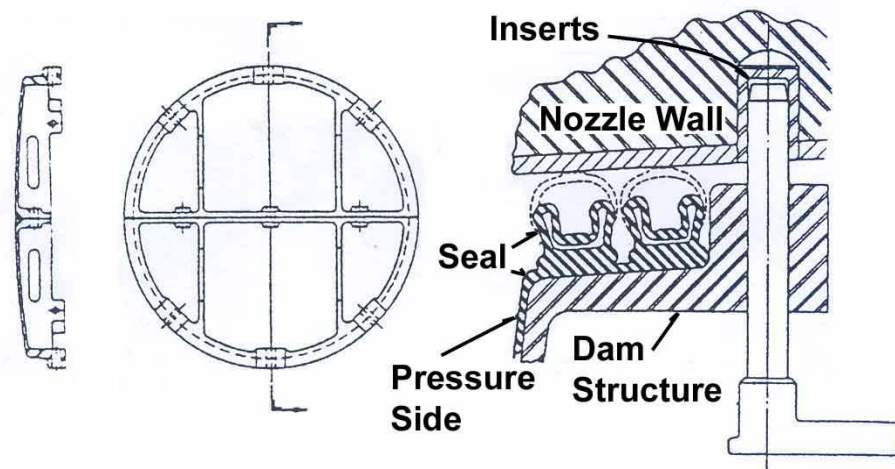


[그림 2-16] 재순환 노즐 및 스파저 링

타. 노즐댐(Nozzle Dam)

[그림 2-17]과 같이 노즐댐은 원자로 용기측의 연료 재장전 작업이나 정비작업시, 1차측 헤드(Primary Head)를 원자로 수조(Reactor Cavity)로부터 임시로 격리시켜 연료 재장전수가 1차측 헤드로 유입되는 것을 차단함으로써 작업자가 1차측 헤드로의 접근을 가능하도록 하는 설비이다.

증기발생기의 고온관(Hot Leg)측은 1개의 입구노즐(42")이 설치되고 저온관(Cold Leg)측은 2개의 출구노즐(30")이 설치되는데, 노즐댐은 이 입구노즐과 출구노즐에 설치된다.



[그림 2-17] 노즐댐(Nozzle Dam)

5. 계측설비

- 보호 동작은 4개의 독립적인 채널에 의해 발생
- 발전소 보호계통(PPS)의 동작은 2/4 만족시 발생
- 제어 동작은 2개의 독립적인 채널에 의해 발생
- 제어 계기는 같은 노즐에서 감지하거나 같은 변수를 지시하더라도 보호 채널과는 분리
- 보호를 위한 계측 채널 : 안전관련 UPS 전원 공급
- 제어를 위한 계측 채널 : 비안전관련 UPS 전원 공급

가. Wide Range Protection Channel(4개)

- 계측 범위 : 400인치
- 주제어실 : 0 ~ 100%로 지시
- 2채널 모두 원격 비상정지 패널에도 지시됨
- A 채널은 주제어실에 기록됨
- 정상운전시 수위 : 79%
- 측정된 신호는 발전소보호계통으로 전송됨
 - 23.5 % : 보조급수 작동신호(AFAS)
 - 42.9 % : SG 저수위 원자로 정지

나. Narrow Range Protection Channel(4개)

- 계측 범위 : 150인치
- 고수위 측정탭은 광역 계측기와 공유
- 주제어실 : 0 ~ 100%로 지시
- 정상운전시 수위 : 44%
- 발전소 보호계통으로 신호 전송
 - 주증기 차단신호(MSIS) & SG 고수위 원자로정지 : 93%

다. Narrow Range Level Control Channel(2개)

- 계측된 신호는 주급수 제어 신호 및 컴퓨터 입력 신호로 사용

- 모든 제어 채널은 주제어실에 지시되고 기록됨
- 지시는 Plant Monitoring System(PMS)을 통해 공급됨

라. Steam Pressure Protection Channel (4개)

- 측정 범위 : 0 ~ 1,524psia
- 정상운전시 압력 : 1,070psia
- 모든 채널이 증기드럼의 압력을 주제어실에 지시
- 모든 채널은 Plant Protection System(PPS)에 정보를 제공함
- 보호신호 : 주증기 차단신호 및 원자로정지 : 885.5psia

원자력교육원

[핵심요약]

1. 증기발생기 기능

- 원자로냉각재계통으로부터 열을 전달받아 터빈 구동을 위한 포화증기 생산
- 원자로냉각재계통과 2차계통 사이의 경계부 형성

2. 증기발생기 설계기준

- U-Tube를 포함하여 원자로냉각재계통의 과도조건을 만족하도록 설계

3. 증기발생기 유로

- 1차 계통수 : 입구 노즐 → 입구 공간 → U-Tube → 출구 공간 → 출구 노즐
- 2차 계통수
 - 하향유로 급수노즐 → 급수링 → 하향유로 → 증발영역(또는 관판 상단)
 - 급수예열기 급수노즐 → 유량분배실 → 유량분배판 → 급수예열기 → 증발영역
- 증기 : 증발영역 → 증기분리기 → 증기건조기 → 주증기 출구 노즐

4. 증기발생기 기본 구조 및 주요 구성기기

- 관다발 : U-Tube형, Inconel-600HTMA, 3각배열, 폭발식 확관 후 밀봉용접
- 관판 : 관다발과 함께 1차측과 2차측 경계
- 관지지판 : Eggcrate 형태, 물/증기 흐름에 의한 진동으로부터 관다발 지지
- 슈라우드 : 관지지판 지지, 급수 하향/상향 이동 및 습분 재순환 유로 제공
- 관지지대 : 유체유동에 의한 U-Bend 부위 마모 방지
- 급수예열기 : U-Tube 저온관측 설치 및 증기발생기 열효율 향상
- 증기분리기 : 소용돌이 날개 형식의 1단계 습분분리장치
- 증기건조기 : 고용량 베인 형식의 2단계 습분분리장치
- 유량제한기 : 주증기관 파열사고 시 격납용기 내 최고 압력 및 온도 제한
- 취출수배관 : 증기발생기 내 불순물 및 부식생성물 배출
- 재순환노즐 및 분사링 : 증기발생기 습식보관 상태 시 화학 및 수위 제어
- 노즐댐 : 연료 재장전수의 1차측 헤드로 유입 차단

5. 증기발생기 수위 계측설비

- 광역수위 : 4개 보호채널, 계측범위 400인치, 정상운전 시 수위 79% 유지
- 협역수위 : 4개 보호채널, 계측범위 150인치, 정상운전 시 수위 44% 유지

제2절 증기발생기 수위제어계통

[학습목표]

1. 증기발생기수위제어계통의 설계기준을 설명할 수 있다.
2. 증기발생기수위제어계통의 운전에 대하여 설명할 수 있다.
3. 증기발생기수위제어계통의 구성기기를 설명할 수 있다.

1. 개 요

증기발생기 수위제어계통은 급수유량을 조절하여 증기발생기 수위를 목표치에 유지하기 위한 계통이다. 원자로 고출력(15% 이상)에서는 3요소 제어방법으로 증기유량, 급수유량, 증기발생기 수위신호가 이용되고, 원자로 저출력(15% 이하)에서는 단일 요소 제어방법으로 증기발생기 수위신호만 이용된다. 증기발생기 수위제어계통은 다운 콤팩트 밸브와 이코노마이저 밸브의 개도와 급수펌프의 속도를 조절함으로써 증기발생기의 수위를 제어한다.

2. 설계 기준

가. 증기발생기 수위제어계통은 다음과 같은 발전소 상태에서도 증기발생기 수위를 정상운전 범위 이내로 유지하기 위해 급수를 자동제어한다.

- 5~15% 범위의 핵증기공급계통 출력에서 분당 $\pm 1\%$ 의 터빈부하 경사변화 및 15~100% 범위의 핵증기공급계통 출력에서 분당 $\pm 5\%$ 의 터빈부하 경사변화
- 5~15% 범위의 핵증기공급계통 출력에서 $\pm 1\%$ 의 터빈부하 단계변화 및 15~100% 범위의 핵증기공급계통 출력에서 $\pm 10\%$ 의 터빈부하 단계변화
- 증기우회제어계통 및 원자로출력급감발계통의 허용용량 범위내의 부하감발
- 부하 추종운전(100-50-100%)
- 원자로 정지
- 급수펌프 2대 운전중 1대 불시 정지

- 증기발생기 고수위
- 나. 안전성분석 가정조건으로 급수펌프 3대중 1대는 여유분으로서 예비상태로 유지시켜야 하며 여유분 급수펌프는 필요시 수동 기동하도록 되어 있다.
- 다. 원자로 고출력(15~100%)에서 증기발생기수위 자동제어 3요소는 증기유량, 급수유량 및 증기발생기 수위이며, 원자로 저출력(5~15%)에서 증기발생기 수위 자동제어는 단일요소 입력제어로서 증기발생기 수위를 이용한다.
- 라. 원자로 제어계통의 원자로 출력 및 냉각재 평균온도신호가 증기발생기 수위제어계통에 이용된다.
- 원자로 정지 후 급수제어는 원자로 제어계통의 원자로 출력 및 냉각재 평균온도 신호가 이용된다.
- 증기발생기수위 자동제어시 원자로 고/저출력의 구분 기준은 원자로 제어계통에서 제공된 원자로 출력신호가 이용된다.
- 마. 제어봉구동장치 제어계통은 원자로 정지신호를 증기발생기 수위제어계통에 제공한다.
- 바. 급수제어는 급수제어밸브 개도와 급수펌프 속도를 이용하며, 급수펌프 속도 제어의 입력신호는 다음과 같다.
 - 증기발생기 이코노마이저 밸브개도 요구신호
 - 증기발생기 다운콤파 밸브개도 요구신호
 - 급수펌프 속도설정치 요구신호
- 사. 증기발생기 수위, 증기유량 및 급수유량신호는 주제어실과 발전소 자료수집 계통에 제공된다.
- 아. 증기발생기 수위제어계통은 발전소 경보계통과 발전소 자료수집계통에 다음과 같은 경보신호를 제공한다.
 - 증기발생기 고수위 우선신호(SG High Level Override)
 - 증기발생기 수위 고/저 신호
 - 증기발생기 수위 편차신호

- 주급수제어계통 시험 중 신호(FWCS In Test)
- 원자로정지 우선신호(Reactor Trip Override)

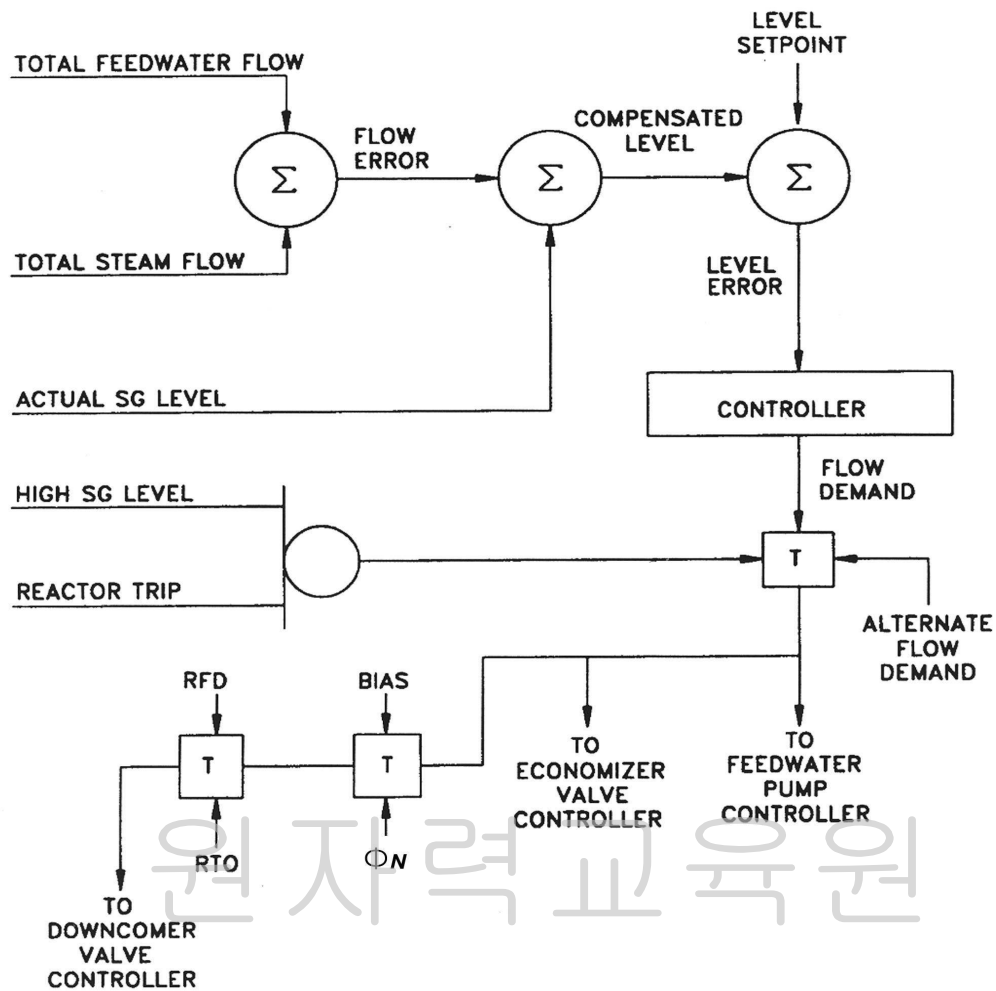
자. 증기발생기 수위제어계통은 증기유량 신호와 원자로정지(제어봉 낙하)신호를 증기우회제어계통에 공급한다.

차. 증기발생기 수위제어계통은 주 자동/수동 제어기와 개별 자동/수동 제어를 이용하여 제어하고, 원자로출력 5% 이하에서는 급수우회제어밸브의 수동제어를 통하여 증기발생기 수위를 조절한다.

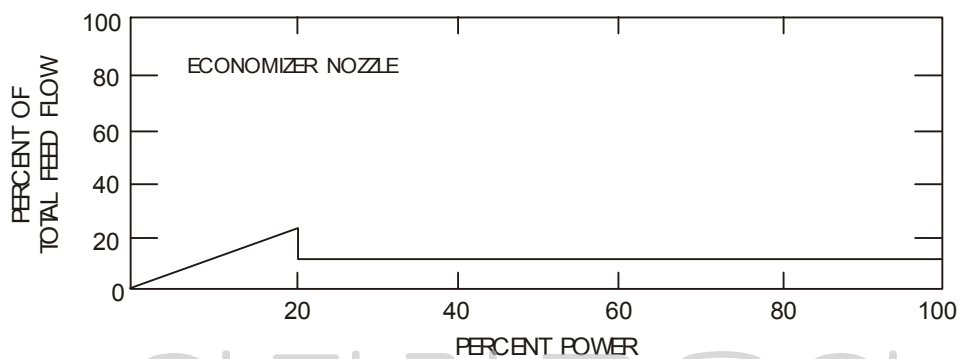
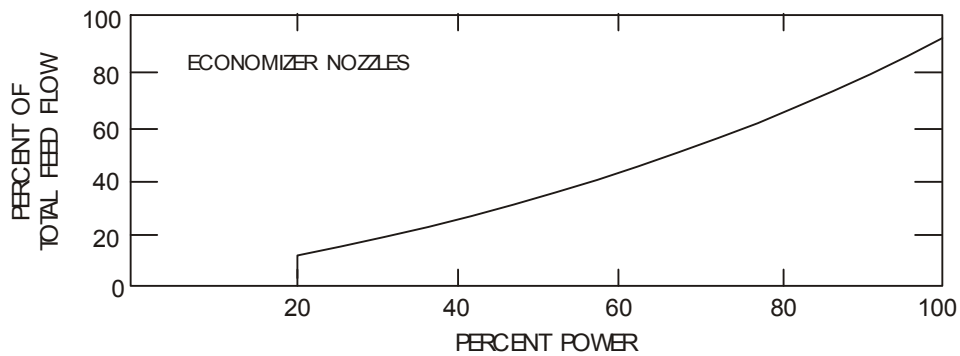
3. 계통 설명

증기발생기 수위제어계통은 각각의 증기발생기에 유입되는 급수유량을 조절하여 증기발생기 수위가 목표치를 유지하도록 제어한다.

[그림 2-18]에 표시된 기능선도는 증기발생기 수위제어계통에 사용되는 개략적인 프로그램과 제어 모듈들을 나타낸다. 원자로 저출력(15% 이하)에서는 유량 요구신호를 증기발생기 다운콤마 밸브 프로그램으로 보내어 요구되는 급수유량에 해당하는 다운콤마 밸브 열림 요구신호를 발생시킨다. 저출력 제어모드에서 이코노마이저 밸브는 닫혀있고 급수펌프 속도설정은 최저값(3400rpm)을 유지한다.

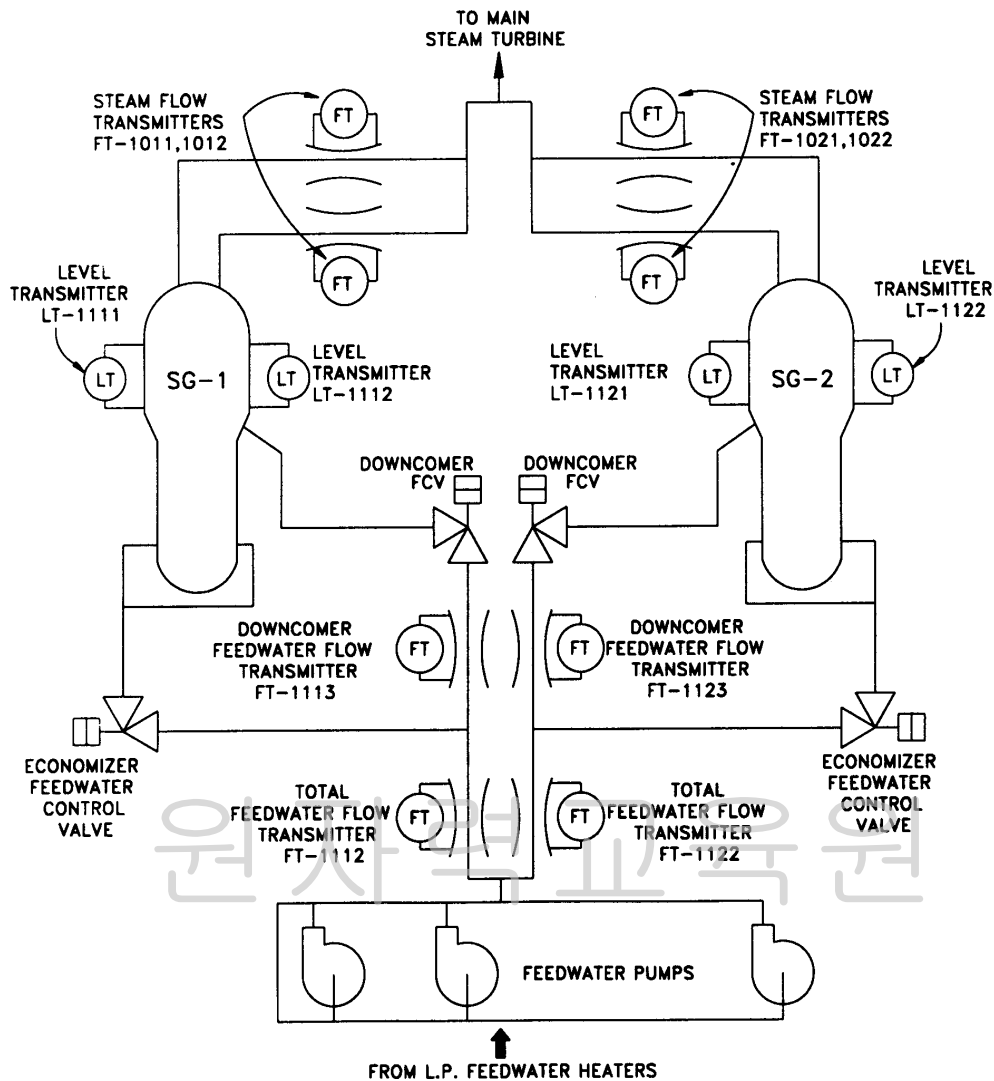


[그림 2-18] 증기발생기 수위제어 기능선도



(그림 2-19) 급수유량 프로그램

원자로 고출력(20% 이상) 상태에서 증기발생기 다운콤파 밸브는 바이어스 신호를 받는다. 이 바이어스 신호는 정격 급수유량의 10%를 공급할 수 있도록 다운콤파 밸브를 개방시킨다. 나머지 급수유량은 증기발생기 이코노마이저 밸브에 의하여 조절된다. 증기발생기 수위신호는 급수 유량신호와 증기 유량신호의 편차에 의해 보상되고 수위 설정치와 비교되며 편차신호는 비례적분제어기로 보내진다. 비례적분제어기를 통과한 급수유량 요구신호는 필요시 운전원이 수동으로 제어하기 위한 주 자동/수동 제어를 거쳐 증기발생기 다운콤파와 이코노마이저 밸브 제어 프로그램에 보내진다. 그리고 다운콤파 및 이코노마이저 밸브의 개별 자동/수동 제어를 거쳐 밸브에 제어신호를 보낸다. 또한 이 출력신호는 급수펌프 제어프로그램으로 보내지고 급수펌프 제어프로그램은 펌프 속도 설정치 신호를 발생시킨다.



[그림 2-20] 증기발생기 수위제어계통 현장기기

가. 주요 제어모드

증기발생기 수위제어계통의 제어 입력신호는 원자로 출력에 의해 결정된다. 원자로 저출력(15% 이하) 상태에서 증기발생기 수위제어는 증기발생기 수위에 의해서만 제어되는 단일요소 제어계통으로 구성되고, 원자로 고출력(15% 이상) 상태에서는 증

기발생기 수위, 급수유량 및 증기유량에 의해서 제어되는 3요소 제어계통으로 구성된다.

(1) 저출력 수위제어 모드

원자로 저출력(15% 이하) 상태에서는 단일요소 급수제어 방법으로 급수 유량제어에 증기발생기 수위만 이용되며, 증기발생기 수위신호는 제어계통의 안정성을 향상시키기 위하여 동적으로 보상된다. 보상회로는 리드/래그(Lead/Lag) 제어기가 사용되는데, 빠르게 변화하는 입력신호를 보다 크게 증폭시키며, 변화가 없는 일정한 입력신호에 대해서는 입력과 출력 신호의 크기가 같다. 즉 이득은 1이다. 리드/래그 제어기의 시정수(Time Constant)와 이득(Gain)은 원자로 출력에 따라 가변된다.

리드/래그 제어기의 출력신호는 수위설정치와 조합되어 비례적분 제어기에 의해 제어된다. 비례적분 제어기의 양(음)의 입력신호는 출력신호를 증가(감소)시키고, 증기발생기 실제수위와 수위설정치가 같은 영(Zero)의 입력신호 시 비례적분 제어기 출력은 일정한 값을 유지한다.

(2) 고출력 수위제어 모드

원자로 고출력(15% 이상) 상태에서 증기발생기 수위제어는 3요소 제어방법으로 급수유량 요구신호를 발생시키기 위해서 증기발생기 수위신호, 급수유량신호 및 증기유량신호에 동적보상을 한다. 고출력 수위제어 모드에서 증기발생기 수위제어 출력신호는 급수펌프속도, 다운콤파 밸브 개도 및 이코노마이저 밸브 개도를 제어하여 증기발생기 수위가 설정치와 일치하도록 한다.

(가) 수위보상

증기발생기 수위신호는 계통 안정성을 향상시키기 위하여 동적으로 보상한다. 보상방법은 저출력 제어모드에서와 마찬가지로 리드/래그 제어기를 사용하며 리드/래그 제어기의 시정수와 이득은 원자로 출력에 따라 가변된다.

이 제어기는 천천히 변화하는 입력보다 빠르게 변하는 입력을 보다 크게 증폭시키며 변화하지 않는 안정상태의 입력 신호는 동일한 크기의 출력신호를 나타낸다. 따라서 빠르게 변하는 증기발생기 수위신호에 대하여 이코노마이저 밸브와 급수펌프 속도제어가 천천히 변하는 수위신호보다 훨씬 민감하게 이루어진다. 빠르게 변하는 증

기발생기 수위신호에 대하여 보다 크게 증폭시키는 기능은 증기발생기 수위제어 안정성을 증가시킨다.

(나) 유량편차 보상

유량편차는 증기유량과 급수유량의 차로써 정의되며 미분지연회로(High Path Filter)에 의해 동적으로 보상된다. 이 보상회로는 유량편차에 민감하고 변하지 않는 안정된 입력신호에 대하여 이득은 영이다. 즉 일정한 유량편차에 대한 출력신호는 영으로 수위제어에 영향을 미치지 않는다.

(다) 합편차 보상

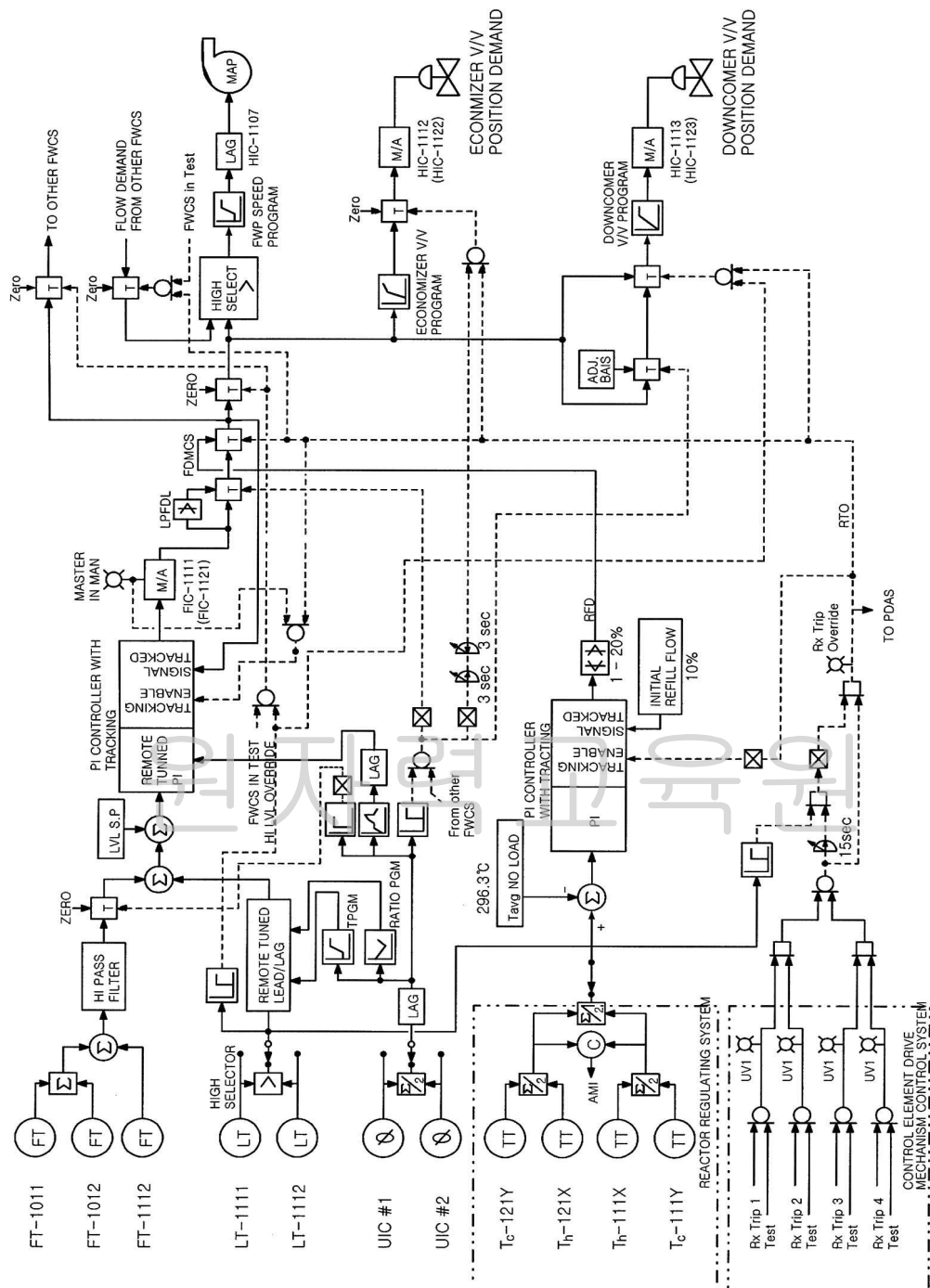
합편차 신호(SES)는 보상된 유량편차 신호(CES), 보상된 수위신호(CLS) 및 수위설정치 신호(LSP)의 합으로 표시되며, 이 합편차 신호는 비례적분제어기에 의해서 동적으로 보상된다. 이 제어기의 출력신호를 유량 요구신호라고 한다. 합편차 신호가 영일 때 비례적분제어기의 출력신호는 일정하다. 합편차 신호가 정(음)방향 일 때 출력신호는 최대(최소)를 향해 증가(감소)한다.

(3) 원자로정지 후 제어모드

원자로정지후 급수유량은 무부하 냉각재 평균온도에 해당하는 값으로 자동 감소된다. 이 신호는 냉각재 평균온도 신호와 무부하 냉각재 평균온도 설정치 신호의 합으로 이루어지며 비례적분제어기를 통하여 원자로정지후 유량요구신호가 된다. 양(음)의 입력신호는 출력신호가 최대(최소)를 향해 증가(감소)하도록 동작된다.

나. 증기발생기 수위제어 프로그램

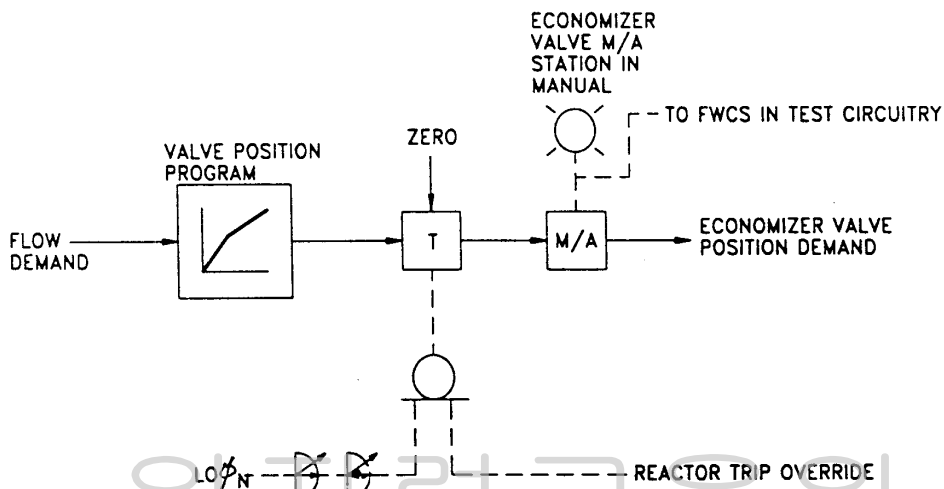
증기발생기 수위제어 프로그램은 증기발생기 이코노마이저 밸브개도 제어프로그램, 다운콤마 밸브개도 제어프로그램, 급수펌프 속도설정치 제어프로그램이 있다.



[그림 2-21] 증기발생기 수위제어계통 신호 흐름도

(1) 이코노마이저 밸브개도 제어프로그램

증기발생기 수위제어계통은 원자로 저출력(20% 이하) 상태에서는 이코노마이저 밸브를 닫고 다운콤마 밸브가 급수유량을 제어한다. 원자로 출력이 20% 이상으로 증가하면 이코노마이저 밸브가 급수유량을 담당하고 다운콤마 밸브는 정격의 10% 급수유량을 공급할 수 있도록 바이어스 신호를 받는다. 급수 고유량 운전시에는 급수유량 제어의 주된 역할은 급수펌프의 속도제어를 통해 수행된다.



[그림 2-22] 이코노마이저 밸브제어 프로그램

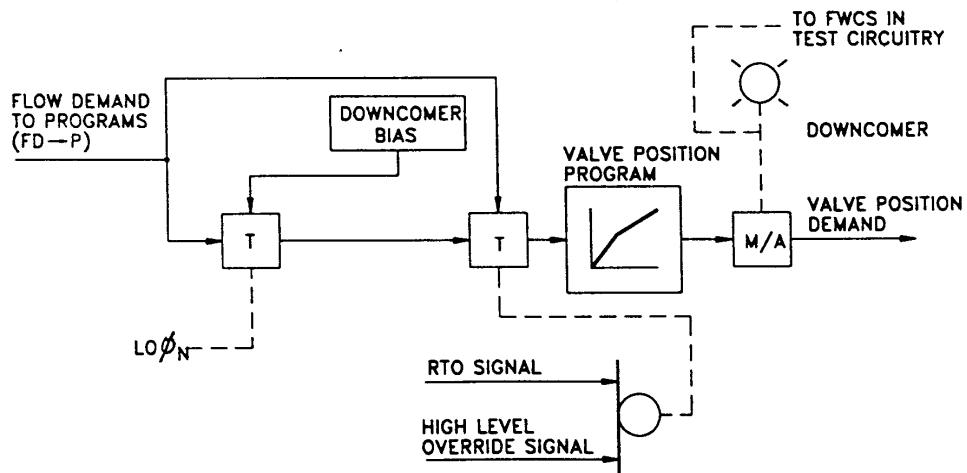
(2) 다운콤마 밸브개도제어 프로그램

증기발생기 다운콤마 밸브개도제어 프로그램은 원자로 고출력(20%이상) 상태에 서 바이어스 신호를 받아 전출력 유량의 10% 급수를 일정하게 공급한다.

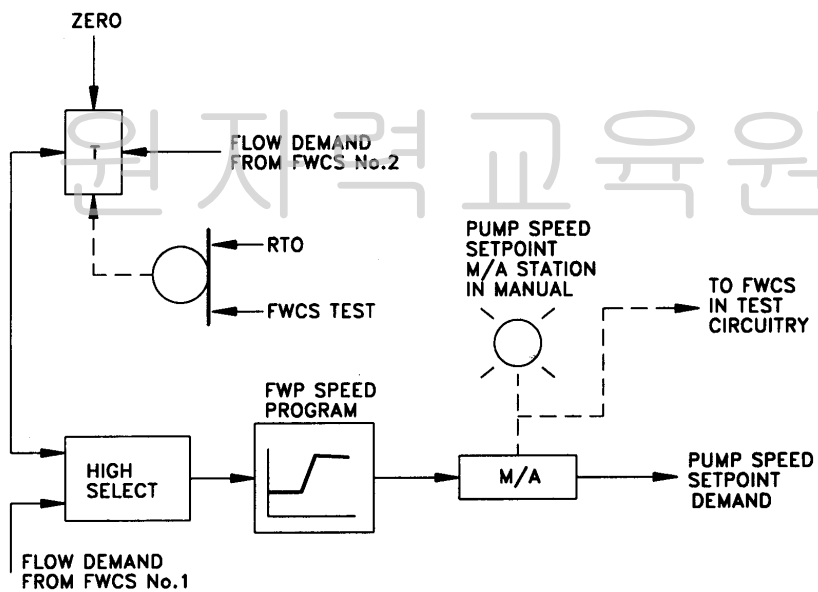
이 제어 프로그램은 증기가 다운콤마로 순환하는 것을 경감시키기 위해 필요하 며 결과적으로 증기발생기 순환비율과 안정성을 향상시킨다.

(3) 급수펌프 속도제어 프로그램

급수펌프 저유량 운전(0~20% 유량요구신호) 시 급수펌프 속도제어 프로그램은 미리 설정된 최저 속도신호를 발생한다. 이 최저 속도신호는 펌프 속도제한치 및 다운 콤마 수위제어 최저유량을 고려하여 설정되었다.



[그림 2-23] 다운콤마 밸브제어 프로그램



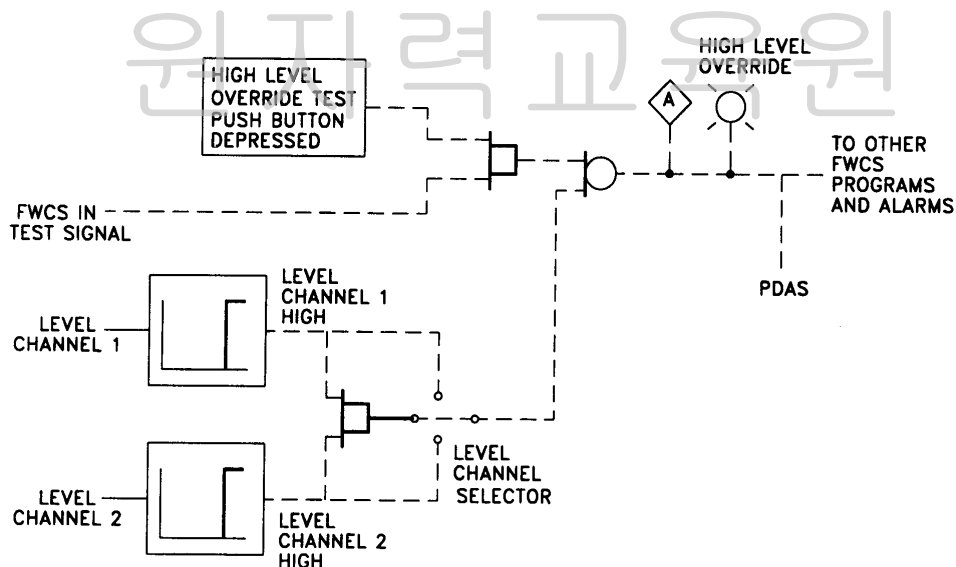
[그림 2-24] 주급수펌프 속도제어 프로그램

높은 신호 선택회로는 급수펌프 속도설정치를 받기 위하여 2개의 유량요구 신호중에서 큰 신호를 선택한다. 만일 원자로 정지 우선 신호가 발생되었거나 증기발생기 수위제어계통이 시험중 일 때는 관련된 증기발생기 수위제어계통으로부터 영(Zero)의 유량 요구신호가 높은 신호 선택회로로 전달되어 다른 증기발생기 수위제어계통으로부터 발생하는 유량 요구신호가 급수펌프 속도설정치 신호를 발생시키는데 사용된다. 급수펌프 속도설정치 요구신호는 급수펌프속도 제어 프로그램에서 발생된다. 이 신호는 수동/자동 제어기에 의해 급수펌프 속도제어계통으로 전달된다. 급수펌프 속도 설정치 요구신호는 필요시 수동/자동 제어기에서 운전원에 의해서 수동으로 발생될 수 있다.

4. 경보 및 하드웨어 관련신호

가. 고수위 우선신호

고수위 우선신호는 증기발생기 수위가 높을 경우 급수 요구신호를 차단하고 그 신호를 '0'이 되게 한다. 그 결과 증기발생기에 급수 유량이 감소하게 되고 터빈에 습분동반을 방지하도록 증기발생기 수위를 감소시킨다.



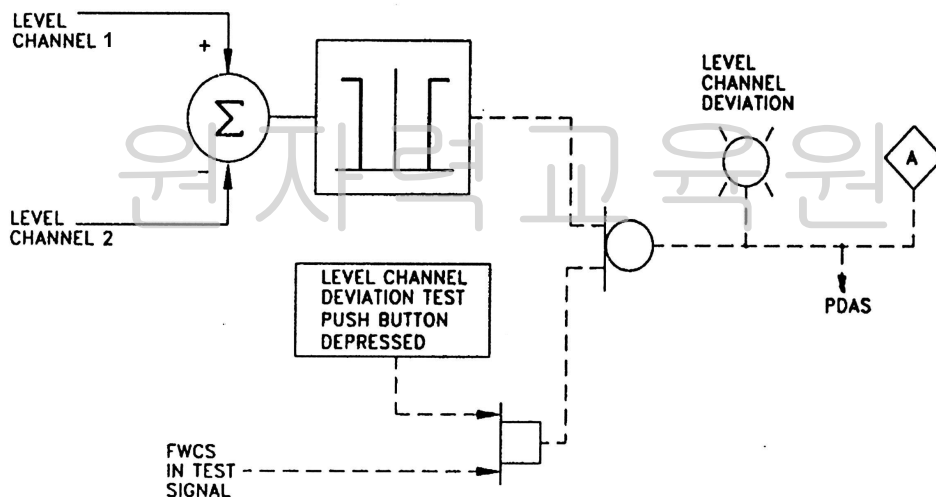
[그림 2-25] 고수위 우선신호 발생

채널 1 또는 채널2 중 한 개의 채널이 선택되었을 때 고수위 우선신호(HLO)는 선택된 채널에만 의존하고 채널 선택스위치가 “Both” 위치에 선택되었을 때 고수위 우선신호를 발생하기 위해서는 2개의 채널에 고수위 신호가 필요하다. 고수위 우선신호는 증기발생기 수위가 고수위 우선신호 설정치 이하로 감소되면 자동으로 해제된다. 고수위 우선신호 시험 누름버튼은 “급수 제어계통 시험중” 신호가 발생되어 있을 때 (급수 제어계통이 시험중일 때) 고수위 우선신호를 발생시킬 수 있다.

나. 수위채널 편차 경보

수위채널 1과 수위채널 2 사이의 신호의 절대값이 설정치 보다 클 경우에 수위 채널 편차경보가 발생한다. 이 경보의 목적은 운전원이 즉시 적절한 조치를 취할 수 있도록 가능한 한 빨리 수위채널 고장을 알리기 위한 것이다.

이 회로의 기능은 증기발생기수위 제어계통의 시험 시 수위채널 편차 시험 누름 단추를 누름으로서 시험할 수 있다.



[그림 2-26] 수위채널 편차 경보 발생

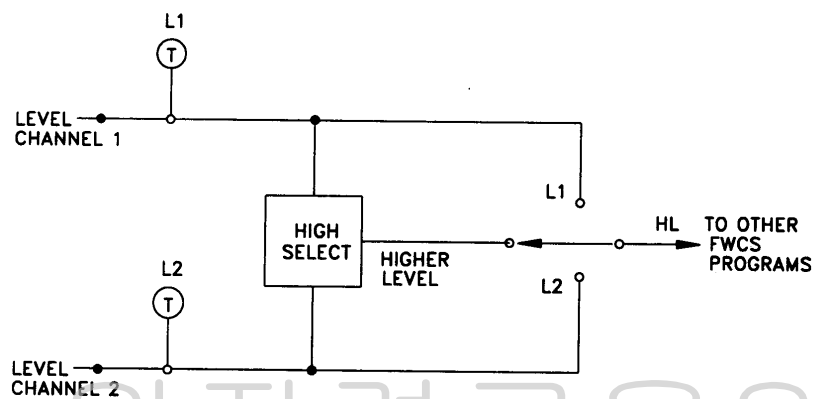
다. 높은 수위채널 선택

높은 수위채널 선택회로는 2개의 수위채널 입력중 큰 신호에 비례하는 출력을 발생한다. 높은 수위채널 신호는 원자로정지 우선신호, 고/저 수위 경보신호 그리고

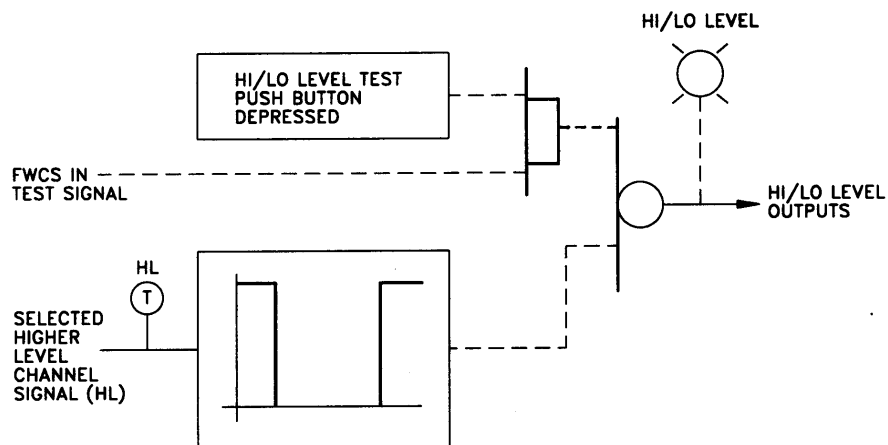
주 제어기에 보상된 수위편차 신호를 결정하는데 사용된다. 선택 스위치는 L1 혹은 L2 선택, 또는 두 신호 중에서 높은 신호 선택을 가능하게 한다.

라. 고/저 수위 경보

고/저 수위 스위치는 수위채널 선택 스위치로부터 선택된 높은 수위신호 출력을 받는다. 이 신호는 2개의 설정치(하나는 저수위, 다른 하나는 고수위)와 비교된다. 수위신호가 고수위 설정치를 초과하거나 저수위 설정치 이하로 감소하였을 때 경보가 발생된다. 경보의 기능은 급수 제어계통이 시험 시 고/저 수위 누름단추를 이용하여 시험할 수 있다.



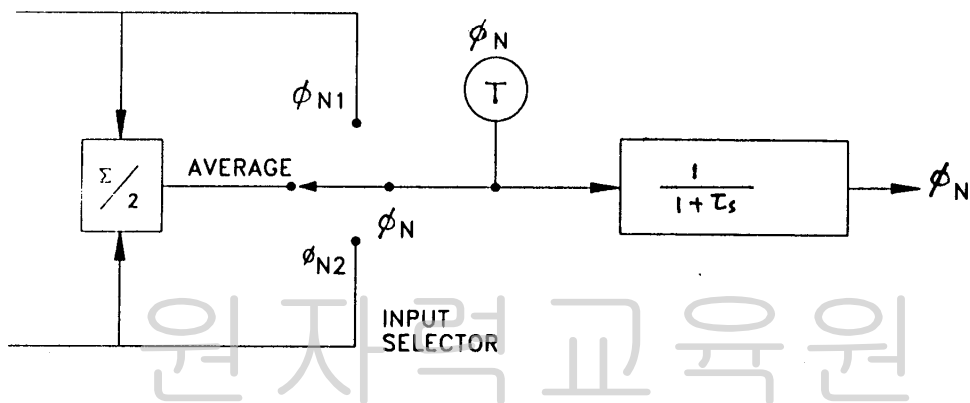
[그림 2-27] 높은 수위채널 선택



[그림 2-28] 고/저 수위 경보 발생

마. 원자로출력 입력

증기발생기 수위제어계통은 2개의 원자로 출력신호(ϕ_{N1} , ϕ_{N2})를 원자로 제어계통으로부터 받는다. ϕ_N 은 입력 선택스위치 ϕ_{N1} , ϕ_{N2} 또는 두 신호의 평균값을 선택할 수 있도록 한다. 선택된 신호는 지연 보상회로를 통과하여 보상된 원자로 출력신호(ϕ_N)로 표시된다. 이 지연기능은 입력신호를 완화시키는 기능을 한다. 정상운전 상태에서 이 스위치는 “평균” 위치에 있다. 이 신호는 증기발생기수위 제어계통을 저출력 수위 제어모드부터 고출력 수위 제어모드로 또는 그 반대로 교체시키기 위하여 사용된다. 또한 원자로 출력신호는 증기발생기수위 제어계통 내의 특정 설정치를 조정하기 위하여 사용된다.



[그림 2-29] 급수계통의 원자로출력 보상

바. 원자로 정지우선

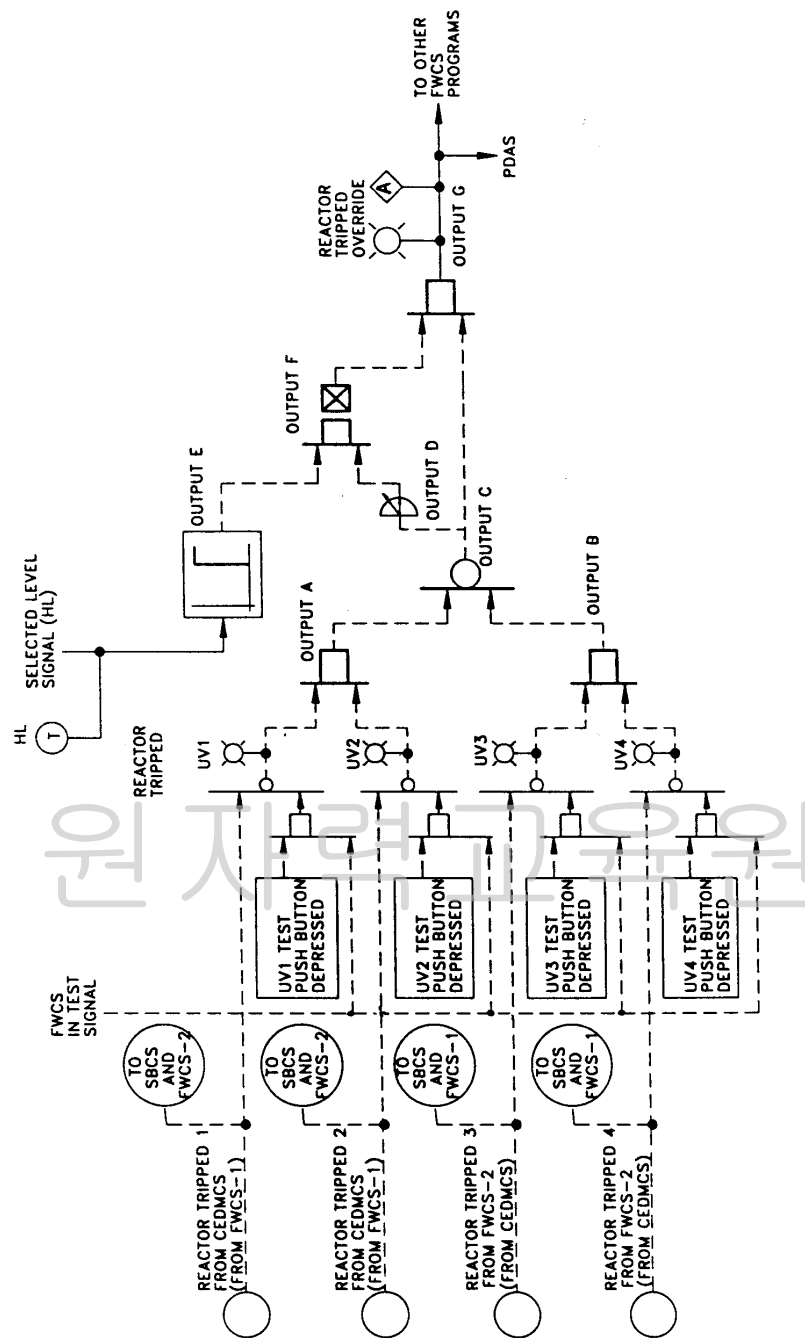
원자로정지 우선(RTO) 신호는 선택적 2/4 논리회로에 의해서 4개의 원자로 정지신호(UV1, UV2, UV3, UV4)와 선택된 고수위(HL)신호로부터 발생된다. 이 신호가 발생되었을 때 원자로정지 우선 신호는 급수펌프와 유량제어밸브에 유량요구신호를 차단시키고 증기발생기 수위는 재충수 유량요구 신호(RFD)에 의해서 제어된다.

원자로 정지 우선신호는 원자로가 정지된 것을 표시하는 UV1과 UV2 또는 UV3 과 UV4가 비여자되고 선택된 증기발생기 수위가 설정치 이하이면 발생된다. 원자로정지 우선신호는 원자로 정지신호가 제거되거나 선택된 고수위 신호가 설정치 이상으로

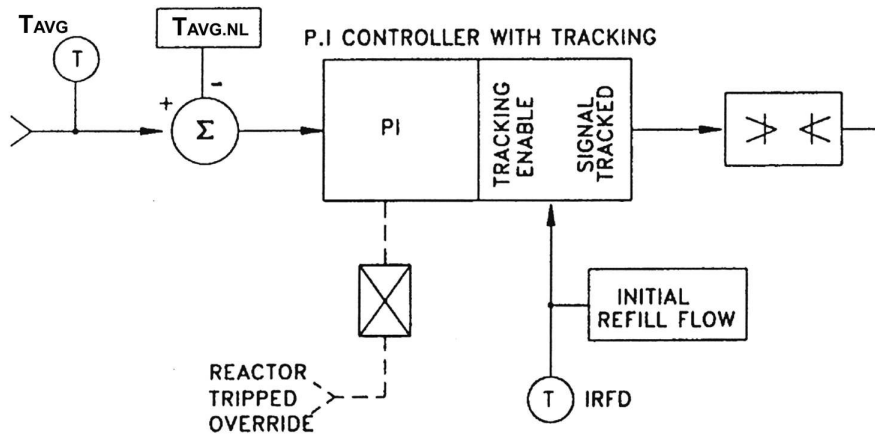
증가되면 복귀된다. 원자로정지 신호는 원자로정지 후 고수위 신호가 설정치 이하로 떨어지지 않으면 계속 정지”(OFF) 상태를 유지시킨다. 원자로 정지후 재충수 유량요구(RFD) 설정은 급수유량이 적정값을 유지하여 급수유량 급감 및 고 냉각을 방지하기 위한 것이다.

재충수 유량요구신호는 냉각재 평균온도와 무부하 냉각재 평균온도 설정신호와의 차에 의해 발생된다. 유량요구신호는 최초 재충수 유량요구에서 시작되며 그 후 냉각재 평균온도와 무부하 냉각재 평균온도의 편차에 대한 비례적분 동작에 의해 변화된다. 정방향 입력신호는 출력신호를 최대값 방향으로 변화시키도록 적분되고 부방향 입력신호는 최소값 방향으로 출력신호를 변화시키도록 적분된다.

원자력교육원



[그림 2-30] 원자로정지 우선신호 발생



[그림 2-31] 원자로정지 후 급수제어

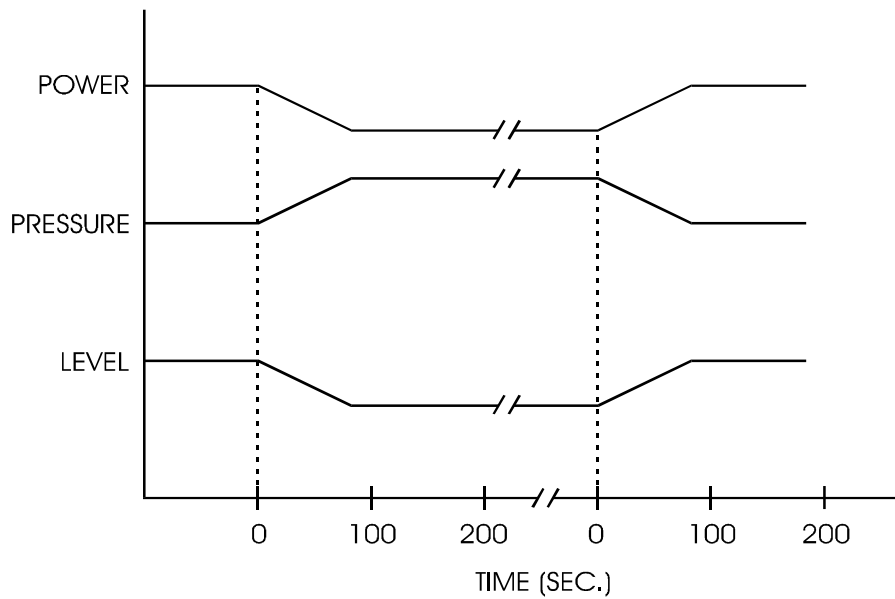
5. 증기발생기 수축과 팽창

증기발생기 수축과 팽창은 증기 요구량 변화에 따라 발생하는 것으로 첫 번째로 생각할 수 있는 영향은 “압력 효과” 또는 “기포효과(Bubble Effect)”이다.

증기발생기는 포화계통이기 때문에 부하감소에 따라 증기발생기의 압력이 증가한다. 이 영향은 [그림 2-32]에 잘 나타나 있다. 이 그림에서는 급수 유량과 증기 유량이 과도상태에서 동일하다고 가정한 것이며 증기발생기에 있는 물과 증기의 질량은 과도 상태 동안에 서서히 변한다.

터빈출력 감발 시는 증기발생기내의 압력이 증가하며 증기압력 증가에 따라 증기는 좀 더 조밀해지고 따라서 증기발생기 관다발과 증기 상승지역(Riser Area)에서는 더 작은 증기체적을 차지하게 된다. 이로 인해 하향 통로(Down comer)에 있는 물은 급속히 증기 기포가 차지하고 있는 관다발 지역으로 밀려 들어 가서 결국 증기발생기 수위가 감소(수축)되는 과도 현상이 발생한다.

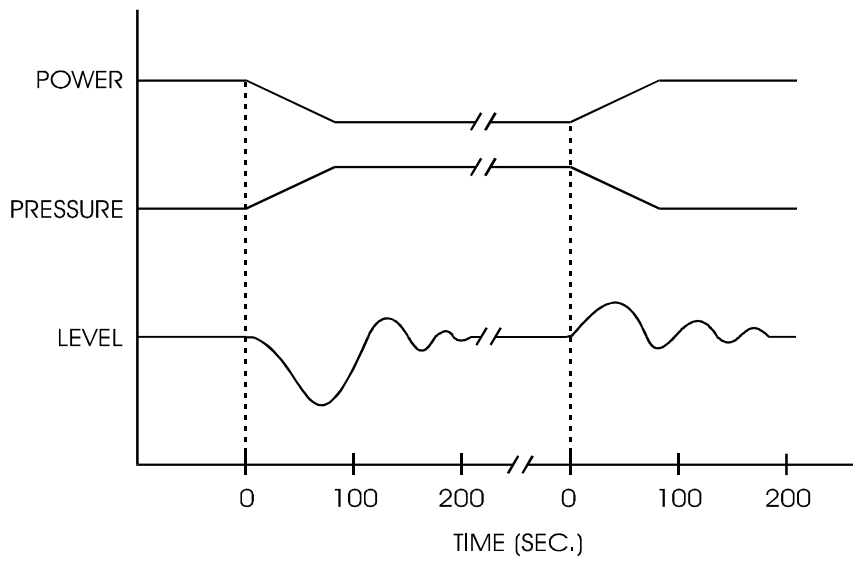
출력 증가 시는 이와 반대로 증기 압력 감소에 따라 관다발과 증기 상승지역에서 많은 증기가 발생하여 관다발 지역의 물을 하향 통로 쪽으로 밀어내므로 증기발생기 수위가 증가(팽창)하는 과도현상이 발생하게된다.



[그림 2-32] 증기발생기 수축과 팽창(압력효과)

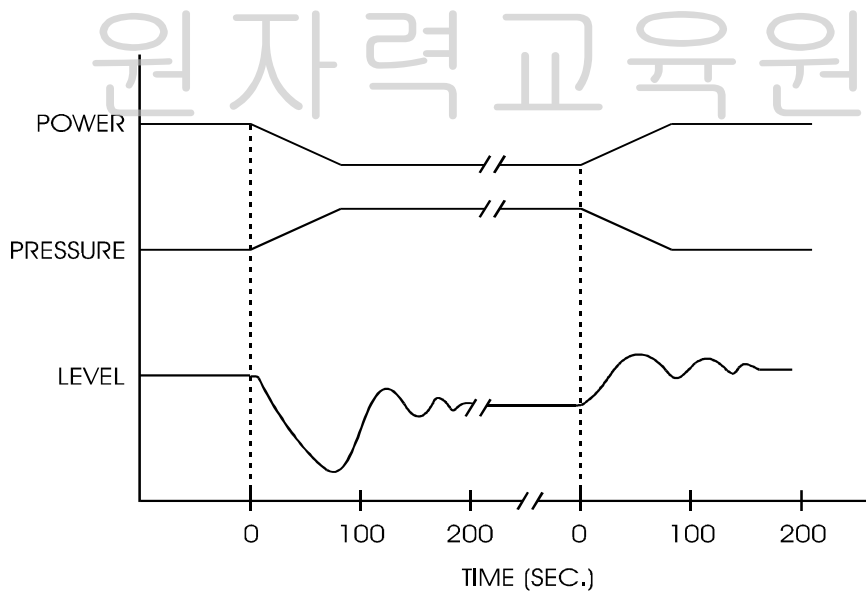
증기발생기 수위변동을 설명하기 위해 “운동량의 효과”라는 또 다른 물리적 효과를 사용한다. 이 영향은 [그림 2-33]에 잘 나타나 있다. 증기발생기내에서 많은 양의 물이 일정하게 재 순환하고 있다. 이 재 순환되는 물은 하향 통로에 떨어져 판다발 지역으로 유입되고 습분 분리기를 통하여 다시 위로 올라간다.

증기로부터 제거된 모든 물은 하향 통로로 되돌아와서 재 순환된다. 이 순환되는 물은 유량 상실에 반해서 큰 운동량을 갖게된다. 증기가 발생되고 이송되어 나가는 양이 갑자기 줄어들 때, 즉 출력이 감소하였을 때 하향통로의 수위는 초기에는 감소하고 다음에는 요동하기 시작한다. 이것은 초기에 재 순환되는 물의 운동량 때문이며 점차 줄어들어서 결국 요동이 감소하게 된다.



[그림 2-33] 증기발생기 수축과 팽창(운동량의 효과)

위에서 설명한 운동량과 압력 효과들이 복합적으로 작용할 때 그 결과는 실제 증기 발생기의 반응이 과도상태로 되는 방법에 매우 근접하게 된다. 이러한 복합적 효과는 [그림 2-34]에 잘 나타나 있다.



[그림 2-34] 증기발생기 수축과 팽창(복합효과)

출력이 감소하면 증기발생기 수위는 처음에 급격히 감소하는 것을 볼 수 있으며 점차 요동을 하다가 결국 어떤 새로운 위치, 즉 약간 낮은 수위에서 안정된다. 출력이 증가하는 동안에는 증기발생기 수위가 증가하는 것을 볼 수 있으며 점차 요동을 치다가 결국 어떤 새로운 위치 즉 약간 높은 수위에서 안정된다. 그러나 실제 운전중에는 장기간 수위의 차이가 유지되는 것은 아니며 곧 증기발생기 자동 수위제어계통에 의해 수위가 정상 수위로 변하게 된다.

6. 계통 운전

가. 정상운전

다음은 부하변화에 대한 증기발생기 수위제어계통 응답의 실례로서 터빈부하 20% 이상, 모든 수동/자동 제어기 자동 위치, 급수펌프 속도제어 자동 위치 및 증기발생기수위는 설정치와 동일한 상태에서 증기유량이 증가했다고 가정한다.

증가된 증기유량은 미분지연회로에 의해서 감지되어 보상된 정방향 유량편차 신호를 발생하고, 출력증가는 초기에 팽창현상에 의해 수위를 증가시킨다. 합편차 신호는 수위편차(수위설정치-보상된 수위신호) 더하기 보상된 정방향 유량편차 신호값이다. 리드/래그와 미분지연 회로에 시정수를 적절히 선택하면 이상 상태가 시작될 때는 보상된 유량편차 신호가 우세하게 되고 이상 상태가 진행됨에 따라 수위편차 신호로 복귀된다. 결과적으로 유량요구 신호인 합편차 신호는 증가하게 되고 다운콤마 밸브 위치 요구신호는 펌프속도 설정치와 함께 증가하게 되어 급수유량은 증가된 증기유량과 일치하게 된다.

원자로 저출력(5% 이하) 운전중에는 바이패스 밸브들이 증기발생기 수위를 제어하는데 사용된다. 전동기로 구동되는 이 밸브들은 수동으로 제어된다. 이들 밸브(6인치)들은 정상운전 중에 닫혀있고 주제어실에서 수동으로 제어 (Jog Open) 할 수 있으며, 다운콤마 입구배관이 8인치로 크기 때문에 저출력시 적은 양의 급수를 공급하는데 이용된다.

나. 비정상 운전

(1) 부하감발

부하감발시 증기발생기 수위는 수축현상에 의해 수위는 갑자기 감소하게 되어 큰 정방향 수위편차가 발생한다. 증기유량의 갑작스런 감소에 의해 부방향 유량편차가 발생하나 큰 정방향 수위 편차신호에 의해 정방향 합편차 신호를 발생한다. 이것은 큰 유량 요구신호를 발생하며 펌프속도와 밸브 개도를 증가시켜 급수유량을 증가시킨다. 그러나 과도상태가 진행됨에 따라 보상된 유량 편차신호는 감소되고 증가된 수위에 의해 수위편차신호는 부방향 값이 발생되어, 밸브 개도와 펌프속도를 제어하여 증기발생기 수위를 설정치로 유지시킨다.

(2) 증기발생기 고수위

증기발생기 수위제어계통은 증기발생기 고수위에 의해서 터빈에 습분이 동반되는 것을 방지할 수 있도록 설계되어 있다. 이것은 고수위경보 발생시에 급수제어 밸브를 닫음으로써 이루어진다. 정상운전 상태에서 증기발생기 수위가 높다고 가정하면 증기발생기 수위제어계통에 고수위 우선 모드가 발생된다.

고수위 우선 모드에서 증기발생기 수위제어계통은 2가지 기능을 수행한다.

첫째, 증기발생기 수위제어계통은 밸브의 구동시간과 밸브개방 위치에 의해서 결정되는 시간 내에 급수예열기의 다운콤마 급수제어 밸브를 폐쇄시킨다.

둘째, 급수펌프 제어계통은 다른 건전한 증기발생기 수위제어계통의 유량요구 신호에 따라서 급수펌프 속도설정치 신호를 발생한다.

위에서 설명한 동작은 증기발생기 급수유량을 감소시켜 증기발생기 수위를 감소시킨다. 증기발생기 수위제어계통은 증기발생기 수위가 고수위 우선 작동 수위 이하로 떨어지면 자동제어로 복귀된다.

(3) 원자로 정지

증기발생기 수위제어계통은 원자로 정지후 냉각재계통을 과냉각시키지 않도록 설계되어 있다. 이것은 원자로 정지후 급수유량을 제한함으로써 이루어진다.

원자로 정지 시 증기발생기 수위는 큰 폭으로 감소된다. 증기발생기 수위제어계통의 원자로정지 우선 작동은 원자로 정지 후 급수유량을 감소시킨다. 감소된 급수유량은 붕괴열 제거에 충분하여 냉각재 계통에 과냉각을 방지하는데 도움을 준다.

[핵심요약]

1. 증기발생기 수위제어계통은 급수유량을 조절하여 증기발생기 수위를 목표치에 유지하기 위한 계통이다. 증기발생기 수위제어계통은 다운콤마밸브 및 이코노마이저밸브의 개도와 급수펌프의 속도를 조절함으로써 증기발생기의 수위를 제어한다.
2. 원자로출력에 따른 증기발생기 수위제어계통 입력신호, 제어기기, 제어 파라미터는 다음과 같다.

Operation Mode		Input	Controlling Components	Controlled Parameter
Normal	0~5% 출력	수동 제어 신호	Feedwater Bypass Control Valve	SG Level
	5~15% 출력	수 위	Downcomer Feedwater Control Valve	
	15~20% 출력	• 수위 • 급수 유량 • 증기 유량	• Economizer Feedwater Control Valve • Feedwater Pump Speed	
	20~100% 출력			
Post Trip		Tavg	Downcomer Feedwater Control Valve	Reactor Coolant Tavg

제3절 증기발생기 취출수계통

[학습목표]

1. 증기발생기 취출수계통의 기능을 설명할 수 있다.
2. 증기발생기 취출수계통의 설계기준을 설명할 수 있다.
3. 증기발생기 취출수계통의 주요 구성기기를 설명할 수 있다.
4. 증기발생기 취출수계통의 운전에 대하여 설명할 수 있다.

1. 개 요

증기발생기 취출수계통은 급수계통의 화학약품 주입설비 및 복수탈염계통과 연계하여 급수의 화학적 성분을 조절하고 불순물을 제거하는데 사용된다. 본 계통은 플래시탱크를 사용함으로써 탱크내 증기를 고압가열기로 이송하고, 응축수의 열을 복수계통으로 전달함으로써 취출수의 열을 재생할 수 있도록 설계되어 있다. 증기발생기 수질개선을 하는 계통으로서 증기발생기에서 발생하는 용해성, 비용해성 불순물 및 부식생성물을 제거하는 기능을 수행한다. 정상 전출력 운전시 각 증기발생기의 취출수유량은 12,720lb/hr로 전체 증기유량의 0.2%에 해당하며, 최대 연속취출수유량은 63,600lb/hr로 전체 증기유량의 1%에 해당된다.

2. 설계기준

발전소의 모든 운전모드 동안 자동으로 폐쇄 가능한 격납건물 격리밸브를 포함하여 증기발생기 취출지점에서 주증기격리밸브실까지의 모든 계통 배관, 밸브 및 증기발생기 셸측 압력경계는 안전성 관련 및 품질등급 B로 설계되며, 그 밖의 배관, 밸브, 열교환기, 탱크, 여과기, 탈염기 및 기타 설비는 비안전성 관련 및 품질등급 D로 설계되어야 한다.

증기발생기 취출수계통은 배출수의 화학적 순도를 2차측 수질 제한치 이내로 유지할 수 있도록 설계하여야 한다. 증기발생기 2차측 수질요건을 유지하기 위해서 발전소

정상운전중에 각각의 증기발생기로부터 연속취출운전을 한다. 복수기 누수 사고시 취출유량을 증가시켜 2차측 급수내에 용해된 나트륨의 농도를 감소시킨다.

증기발생기 취출수계통은 연속취출운전시 각 증기발생기에서 63,600lb/hr의 유량을 취출하여 처리할 수 있으며, 2대의 증기발생기에서 총 127,200lb/hr의 유량을 처리할 수 있는 용량을 가진다. 계통 용량은 1대의 증기발생기에서 63,600lb/hr의 연속취출운전 및 다른 1대의 증기발생기에서 최대 1,062,120lb/hr의 고유량취출운전을 동시에 할 수 있도록 설계되어야 한다.

계통 배관은 포화증기 및 이상유체의 처리에 적합한 재질로 제작되어야 한다. 계통의 모든 용기 및 탱크는 ASME Code Section VIII의 요건에 따라 제작되어야 한다. 안전성관련 계통 배관은 ASME Code Section III, Class 2의 요건에 따라 제작되며 그 외의 배관은 ASME B 31.1의 요건에 따라 제작되어야 한다. 증기발생기 취출수계통의 열교환기는 TEMA Code에 따라 제작되어야 한다.

증기발생기 취출수계통은 설계기준 핵연료 손상과 동시에 증기발생기의 1차측에서 2차측으로의 설계기준 전열관 파단 누설이 발생했을 때, 증기발생기 2차측 용수의 방사능 준위를 90% 수준까지 낮출 수 있도록 설계한다.

1차측으로부터 2차측으로의 증기발생기 튜브 파열사고시, 손상이 안된 증기발생기는 정상운전 범주로 취출량을 유지하며, 반면에 손상된 증기발생기는 2차측 방사능준위를 운영기술지침서 제한치 이하로 유지하기 위해 취출량을 증가시키도록 설계해야 한다.

주기적인 고유량취출운전으로 증기발생기 관관에 축적된 슬러지를 제거함으로써 2차측 수질을 좀 더 높이도록 한다. 본 계통은 취출수 열에너지의 일부를 재생시켜 그것을 2차측계통으로 환원시킬 수 있도록 설계되어야 한다. 증기발생기 취출수계통은 또한 증기발생기 습식 및 건식 휴관(Layup)시 증기발생기의 재순환, 정화, 배수, 재충전, 질소공급, 화학첨가제 추가 및 혼합 등을 할 수 있게 설계하여야 한다.

3. 구성기기

본 계통은 취출수계통과 습식휴관계통 등 2개의 부계통으로 되어 있다. 취출수계통은 다시 2개의 연속취출 트레인과 1개의 고유량취출 트레인으로 나누어져 있다. 이들

3개의 트레인(Train)은 여과기 및 탈염기들을 상호 공유한다. 습식휴관계통은 증기발생기당 1개씩 총 2개의 재순환 트레인(Train)으로 구성되어 있다. 습식휴관계통은 취출수(Extraction Water)계통의 여과기 및 탈염기를 공통으로 이용한다.

가. 증기발생기 취출수 재생열교환기

증기발생기 취출수 재생열교환기는 쉘-튜브형 열교환기이다. 증기발생기로부터의 고온의 취출수는 쉘측으로 흐르고, 복수탈염기 후단부로부터 오는 복수는 취출수의 튜브측으로 흘러 열에너지를 회수 재생하도록 되어있다. 취출수 온도는 복수의 유량을 조절함으로써 제어된다.

나. 증기발생기 취출수 비재생열교환기

증기발생기 취출수 비재생열교환기는 쉘-튜브형 열교환기이며, 쉘측으로 흐르는 냉각수원으로 1차 기기냉각수계통이 공급된다. 동 열교환기는 방사화학처리를 위해 취출수 온도를 낮추는 역할을 한다.

다. 플래시탱크

플래시탱크는 1대의 고유량취출수 플래시탱크와 2대의 연속취출수 플래시탱크가 있다. 고유량취출수 플래시탱크는 고유량취출수를 수집하여 증기발생기 취출수 비재생열교환기로 이송시킨다. 연속취출수 플래시탱크는 연속저유량 취출수를 수집하여 증기발생기 취출수 재생열교환기로 보낸다. 플래시탱크들은 수위, 입력과 온도를 측정할 수 있는 계측기를 갖춘 수직 압력용기이다. 탱크 압력은 배기밸브로서 조절된다. 플래시탱크는 취출수용 노즐, 배기압력 방출용 노즐, 배수용 노즐 및 계측기 연결노즐이 설치되어 있다.

라. 고유량취출수 이송펌프

원심형 고유량취출수 이송펌프는 연속취출수와 혼합하기 위해서 고유량취출수 플래시탱크로부터 증기발생기 취출수 비재생열교환기까지 고유량취출수를 이송한다.

마. 습식휴관 재순환 펌프

원심형 습식휴관 재순환펌프는 증기발생기 2차측 용수를 여과하고 정화시키기 위해 재순환시킨다.

바. 여과기

여과기는 2가지 유형으로, 하나는 탈염기가 막히지 않도록 입자들을 제거하는 탈염기 전단여과기와 다른 하나는 복수계통으로 빠져나가는 수지입자를 여과하기 위해 탈염기 후단부에 설치된 후단여과기 이다.

사. 탈염기

증기발생기 취출수를 복수계통으로 이송시킬 수 있는 수질로 정화하기 위해 2대의 혼상이온 탈염기가 관련배관, 밸브, 계측 및 제어장치와 함께 설치되는데 1대의 혼상이온 탈염기가 가동되면 다른 탈염기는 대기상태에 있게 된다.

- 구성기기 사양

- 고유량취출탱크
 - 탱크 수 : 1대/호기
 - 내경/높이 : 14/16.2ft
 - 설계 압력/온도 : 250psig/410°F
 - 운전 압력/온도 : 185.3psig/385°F
 - 용량 : 14,000gal
- 연속취출탱크
 - 탱크 수 : 2대/호기
 - 내경/높이 : 38/102in
 - 설계 압력/온도 : 250psig/410°F
 - 용량 : 460gal
- 고유량취출수 이송펌프
 - 펌프 수 : 1대/호기
 - 설계유량 : 200gpm
 - 설계 압력/온도 : 250psig/200°F
 - 출구수두 : 240ft
 - 형식 : 수평/원심식

- 전단여과기
 - 여과기 수 : 2대/호기
 - 외경/높이 : 14in/63in
 - 설계유량 : 300gpm
 - 설계 압력/온도 : 250psig/200°F
 - 운전 압력/온도 : 150psig/130°F
 - 효율 : 5 μ m 이상 입자 98% 제거
- 후단여과기
 - 여과기 수 : 1대/호기
 - 외경/높이 : 14in/63in
 - 설계 유량 : 600gpm
 - 설계 압력/온도 : 250psig/200°F
 - 운전 압력/온도 : 150psig/130°F
 - 효율 : 25 μ m 이상 입자 98% 제거
- 혼상이온 탈염기
 - 외경/높이 : 5.5ft/16.3ft
 - 탈염기 수 : 100% $\times$ 2대/호기
 - 설계 압력/온도 : 250psig/250°F
 - 운전 압력/온도 : 170psig/150°F
 - 이온 교환수지 용량 : 120ft³ (33% Anion, 67% Cation)
- 재생열교환기
 - 열교환기 수 : 50% $\times$ 2대/호기
 - 형식 : 동체 및 U-Tube 형식
 - 동체측
 - 유체 : 증기발생기 취출수
 - 유량 : 최대 56,076lb/hr

- 입구/출구 온도 : 388/130°F
- 설계 압력/온도 : 250psig/410°F
- 재질 : 탄소강
- 튜브측
 - 유체 : 복수
 - 유량 : 104,000lb/hr
 - 입구/출구 온도 : 120/261.5°F
 - 설계 압력/온도 : 700psig/410°F
 - 재질 : 스테인레스강 Type 304
- 운전압력 : 650psig
- 비재생열교환기
 - 열교환기 수 : 1대/호기
 - 형식 : 동체 및 U-Tube 형식
 - 동체측
 - 유체 : 기기냉각수
 - 유량 : 2,500gpm
 - 입구/출구 온도 : 110/138°F
 - 설계 압력/온도 : 150psig/250°F
 - 재질 : 탄소강
 - 튜브측
 - 유체 : 취출수, 습식보관 재순환수
 - 유량 : 600gpm
 - 입구/출구 온도 : 250/130°F
 - 설계 압력/온도 : 250psig/410°F
 - 재질 : 스테인레스강 Type 304
- 습식휴관 재순환펌프
 - 펌프 수 : 2대/호기

- 설계유량 : 300gpm
- 설계 온도/압력 : 250°F/250psig
- 형식 : 수평, 원심형
- 출구수두 : 280ft

4. 계통운전

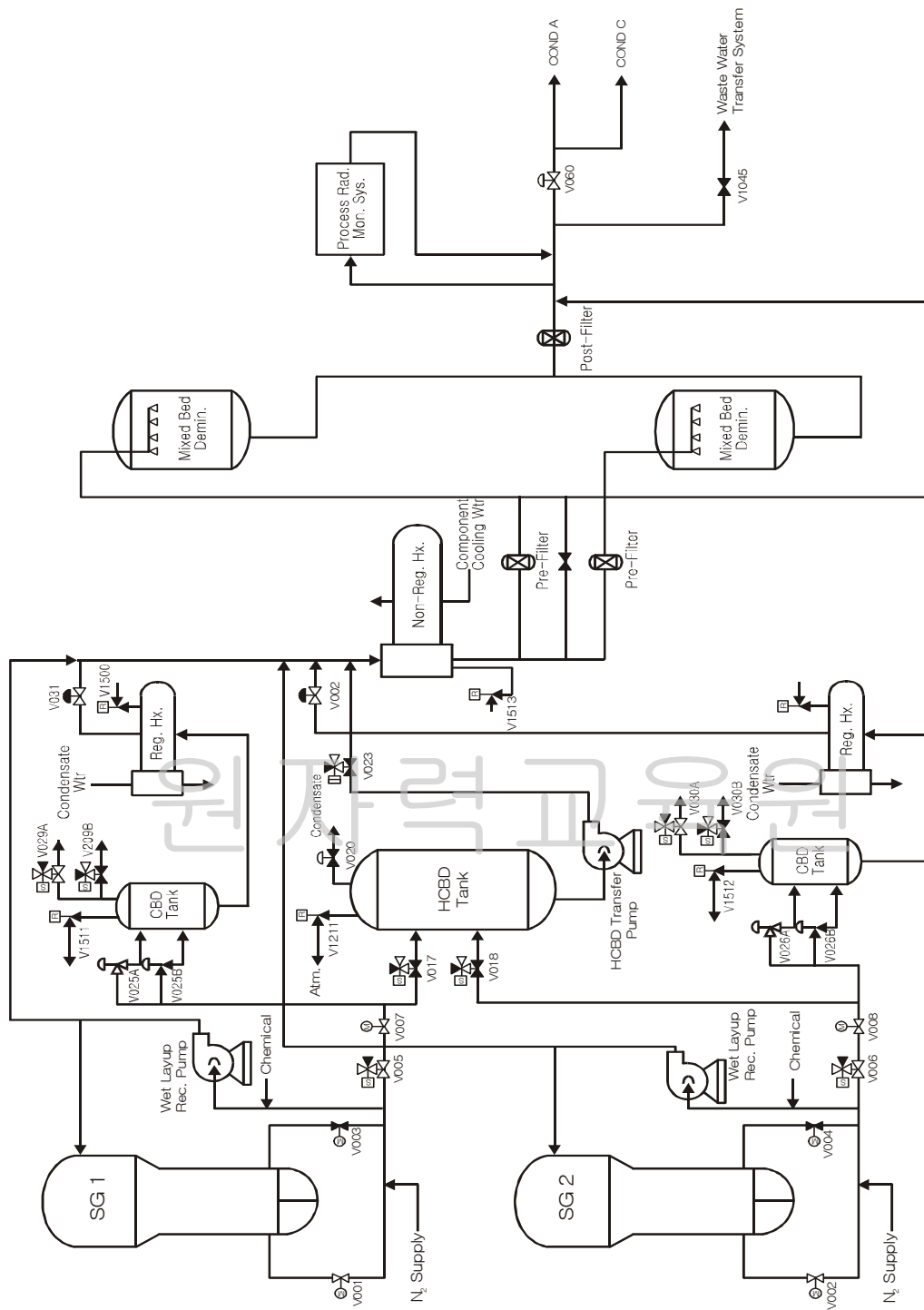
발전소 정상운전 동안 연속취출수유량은 각 증기발생기에 대해 12,700lb/hr, 총 25,400lb/hr이 유지된다. 그러나, 증기발생기 수질이 지침 요건을 초과할 때는 연속취출수유량을 각 증기발생기로부터 63,600lb/hr, 총 127,200lb/hr으로 증가시킬 수 있다. 고유량취출운전은 증기발생기 관판에 축적된 찌꺼기를 제거하기 위하여 각 증기발생기로부터 최대 1,062,120lb/hr의 유량을 추출하며, 일주일에 한번 또는 필요시 운전된다. 비정상 취출은 고유량취출을 수반하며 증기발생기 수질이 수화학지침에 도달할 때까지 계속된다. 연속취출은 연속취출수 플래시탱크에 수집되며 탱크의 압력은 탱크배기관에 설치된 압력조절밸브에 의하여 200psig로 일정하게 유지된다. 탱크의 수위는 재생열교환기 후단에 위치한 수위조절밸브에 의해 일정하게 유지된다. 연속취출수 플래시탱크에서 발생된 증기는 고압급수가열기(5A, 5B)로 배기시켜 열을 재생한다. 탱크 내에 응축된 취출수는 재생열교환기를 통과하면서 튜브를 통해 흐르는 복수계통에 열을 전달하고 가열된 복수는 탈기기로 보내진다. 재생열교환기를 통해 흐르는 취출수의 온도는 복수계통에 설치된 조절밸브에 의해 복수계통의 유량을 조절함으로써 일정하게(130°F, 54°C) 유지된다. 재생열교환기를 통과한 취출수는 비재생열교환기를 거치며, 셀측으로 흐르는 기기냉각수에 의해 추가로 냉각되나 별도의 온도제어 설비는 없다. 냉각된 취출수는 여과기 및 탈염기를 거쳐 복수기(A 또는 C)로 이송된다. 2분 동안 유지되는 고유량취출수는 고유량취출수탱크에 수집되며 탱크의 압력은 탱크배기관에 설치된 압력조절밸브에 의해 185.3psig로 일정하게 유지된다. 고유량취출수유량은 유량조절밸브에 의해 조절된다. 고유량취출 후 고유량취출수탱크는 5psig까지 감압시킨 후에 고유량취출수 이송펌프로써 취출수를 비재생열교환기로 이송한다. 발전소를 장기간 운전정지시 증기발생기는 습식휴관 상태로 유지되며, 습식휴관 운전이 끝나면

증기발생기의 수위가 적정수위에 도달할 때까지 또는 요구되는 수질이 만족될 때까지 중력, 또는 습식흡관 채순환펌프에 의해 폐수처리계통으로 배수시키도록 되어 있다. 증기발생기 재충수는 급수계통을 이용하며, 급수계통이 사용될 수 없을 때에는 보조 급수계통이 사용될 수 있다. 발전소 운전 정지기간이 단기간일 때는 질소기체를 이용하여 증기발생기를 건식흡관 상태로 유지시킨다. 증기발생기 취출수계통은 설계기준 핵연료 손상과 동시에 증기발생기 1차측에서 2차측으로의 설계기준 전열관 파단누설이 발생했을 때, 취출수의 방사능 준위를 90% 수준까지 감소시킬 수 있도록 설계되어 있다.

복수기 세관 누설과 동시에 여과기나 탈염기의 하단부에서 고염소 농도가 감지되는 사고시 취출수를 폐수처리계통으로 방출할 수 있다.

〈표 2-2〉 증기발생기 2차측 수질조건(정상운전)

변 수	정상제한치
pH(철/구리계통)	8.5 ~ 9.2
양이온 전도도($\mu\text{mho}/\text{cm}$)	≤ 0.8
실리카(ppb)	< 300
염소(ppb)	≤ 20
나트륨(ppb)	≤ 20
황산염(ppb)	≤ 20



[그림 2-35] 증기발생기 취출수계통 개략도

[핵심요약]

1. 증기발생기 취출수계통 기능

- 증기발생기에서 발생하는 불순물 및 부식생성물 제거를 통한 수질 개선
- 화학약품 주입설비 및 복수탈염설비와 연계하여 급수의 화학적 성분 조절
- 증기발생기 취출수로부터 열을 재생 : 고압급수가열기 및 복수계통으로 전달

2. 증기발생기 취출수계통 설계기준

- 취출수의 화학적 순도를 2차측 수질 조건 이내로 유지하기 위한 연속 취출운전
- 관판에 축적된 슬러지 제거로 2차측 수질 개선을 위한 고유량 취출운전

3. 증기발생기 취출수계통 주요 구성기기

- 연속 취출 플래시 탱크, 고유량 취출 플래시 탱크 및 고유량 취출수 이송펌프
- 습식휴관 재순환펌프, 재생 열교환기 및 비재생 열교환기
- 전단 여과기, 후단 여과기, 혼상 이온 탈염기 및 방사선 감시기

4. 증기발생기 취출수계통 운전

- 정상운전 시
 - 각 증기발생기로부터 전체 증기유량의 0.2%(12,720lb/hr)를 복수기로 연속 취출운전
 - 2차측 수질 조건 초과 시 각 증기발생기로부터 전체 증기유량의 1%(63,600 lb/hr)를 복수기로 연속 취출운전
- 비정상운전 시
 - 복수기 Tube 누설 등으로 인한 고염소 농도 감지 시 폐수처리계통으로 방출
- 발전소 기동 또는 정지 시
 - 증기발생기 수질 만족 시까지 중력 또는 습식휴관 재순환펌프를 이용하여 폐수처리계통으로 배수

제4절 증기 및 터빈계통

[학습목표]

1. 증기 및 터빈계통의 기능을 설명할 수 있다.
2. 증기 및 터빈계통의 설계기준을 설명할 수 있다.
3. 증기 및 터빈계통의 주요 구성기기를 설명할 수 있다.
4. 주증기 공급처 및 터빈계통 공급경로를 설명할 수 있다.
5. 증기 및 터빈계통의 운전에 대하여 설명할 수 있다.

1. 개 요

주증기계통은 증기발생기에서 생성된 증기를 터빈·발전기계통과 보조계통으로 전달한다. 이 계통은 주증기 배관, 주증기 대기 방출밸브, 주증기 안전밸브, 주증기 격리밸브, 주증기 격리우회밸브 등으로 구성되어 있다.

터빈은 증기발생기에서 공급되는 고온 및 고압의 증기를 팽창시켜 기계적 에너지로 변환하는 장치이며, 그 에너지로 터빈을 회전시켜 전기를 만든다. 터빈에서의 에너지 변화는 증기가 가지고 있는 열에너지가 운동에너지, 즉 기계적 에너지로 변화되는데, 증기가 터빈을 통과하여 지나갈 때 증기의 압력은 떨어지고 체적과 속도는 증가하게 된다. 이 고속의 증기는 많은 양의 운동에너지를 갖게 되며 터빈 회전자(Rotor)에 붙어 있는 날개들에 에너지를 전달하여 기계적 에너지(회전력)로 변환된다. 터빈날개는 증기의 열에너지를 기계적인 운동으로 바꿀 수 있는 형태로 만들어져 있다.

2. 주증기계통

가. 설계기준

(1) 안전설계기준

증기발생기 출구에서 주증기 격리밸브실 관통 앵커를 포함하는 주증기계통 부분은 안전관련설비이며 다음의 요건을 만족하도록 설계되었다.

- (가) 주증기계통의 안전성 관련 부분은 지진, 태풍, 홍수 및 외부 비산물과 같은 자연 현상의 영향에서 보호되어야 한다.
- (나) 주증기계통의 안전성관련 부분은 안전정지지진(SSE : Safe Shutdown Earthquake) 동안 및 그 후에도 기능을 유지하도록 설계되고, 화재, 내부 비산물 또는 배관 파단의 가상 위험 발생 후에도 소기의 기능을 수행하도록 설계되어야 한다.
- (다) 소외전원 상실과 동시에 단일 능동기기 고장 상황 하에서도 계통 안전성 기능이 수행될 수 있어야 한다.
- (라) 주증기계통은 증기발생기의 2차측을 격리시켜 누설 또는 오동작에 대처하고 계통의 비 안전성관련 부분을 격리하는 기능을 제공하여야 한다.
- (마) 주증기계통은 발전소의 비정상조건 후 발전소 냉각의 초기단계 기간에 원자로냉각재계통에서 생산된 열을 제거할 수 있는 수단을 제공하여야 한다.
- (바) 주증기배관 파단시 유량을 제한하기 위하여 유량제한기가 증기발생기 출구 노즐에 설치되어야 한다.
- (사) 주증기계통은 각 증기발생기의 2개 증기 배관 중 1개 배관에서 보조급수펌프의 터빈으로 증기를 공급하여야 한다.

(2) 출력설계기준

주증기계통은 주증기관 예열에서부터 정격 출력상태까지 변하는 유량과 압력 범위 내에서 증기발생기에서 터빈·발전기까지 증기를 전달하도록 설계되어야 한다.

이 계통은 발전소 단계별 부하감발 및 발전소를 기동하는 동안 열을 제거하는 수단을 제공하여야 한다. 또한 다음 기기에 증기를 공급하여야 한다.

- (가) 터빈발전기계통 습분분리 및 재열기의 2단 재열기
- (나) 주급수펌프 터빈
- (다) 보조급수펌프 터빈
- (라) 증기식 공기추출기
- (마) 터빈축밀봉계통
- (바) 터빈우회증기계통

(사) 보조증기계통

(아) 공정시료채취계통

나. 계통설명

(1) 주증기 배관

주증기 배관은 총 정격부하 증기유량 $12.72 \times 10^6 \text{lb/hr}$ ($5.77 \times 10^6 \text{kg/hr}$)를 2대의 증기발생기로부터 고압터빈으로 이송한다. 증기발생기에 연결된 각 주증기 배관은 격납건물 벽에 고정되어 있고 열팽창을 고려하여 격납건물 안팎에서 충분한 유연성을 갖는다. 주증기 배관의 증기발생기 취부 설계는 증기발생기의 운전중이나 정지시 노즐의 허용부하 모멘트와 응력을 고려하여 설계된다. 모든 배관 및 지지대의 설계는 정상운전, 과도현상 또는 배관 파단에 의한 모든 정적, 동적부하, 응력 및 모멘트를 고려하여 설계된다.

각 주증기배관은 4개의 스프링작동 안전밸브, 1개의 주증기 대기방출밸브와 1개의 주증기 격리밸브를 포함한다. 이 밸브들은 모두 격납건물 밖에 위치하며 가능한 격납건물벽에 가까이 설치된다. 터빈우회증기 분기관 연결부는 주증기 격리밸브와 터빈발전기 정지밸브 사이의 주증기 모관에 위치한다. 또한 증기발생기에 질소를 가압하기 위한 연결부가 제공된다.

증기발생기에서 나오는 증기의 건도를 측정하기 위하여 시료채취연결부가 증기발생기 출구노즐 후단에 제공된다. 주증기 배관은 습분분리 및 재열기, 터빈증기밀봉계통, 주급수펌프 터빈, 보조급수펌프 터빈 및 터빈우회증기계통에 증기를 공급한다.

각 주증기 배관의 낮은 부분에 배수배관이 연결되어 있으며 적절한 배수를 돕기 위해 경사져 있다. 드립포트와 수위 제어설비가 주증기 배관의 낮은 부분에서 연속적인 배수를 위해 배수배관에 설치되어 있다. 터빈우회증기 분기관의 주증기 배관 낮은 부위에 연속적인 배수를 위해 오리피스가 설치되어 있다.

(2) 주증기 격리밸브

각 주증기 배관에는 1개의 주증기 격리밸브가 설치되어 있다. 각 밸브는 파단된 주증기배관의 최대 증기유량에 대응하여 5초 이내의 작동시간을 가지며 주증기 격리밸브 상하류에 있는 주증기 배관 또는 관련기기 파단사고시 자동적으로 작동한다. 주

증기 격리밸브는 주증기관 파단사고시에 단일 능동기기 사고를 가정하여 1대 이상의 증기발생기에서 취출되는 것을 방지한다. 밸브는 전원상실시 닫히도록 설계되어 있다. 주증기 격리신호가 발생하면 주증기 격리밸브는 닫힌다. 밸브는 발전소 조건 및 발전소 운전절차에 따라 주증기 격리신호를 제거한 후에 주제어실에서 운전원이 수동으로 열 수 있다. 각 밸브는 밸브를 폐쇄하는 다중기능을 제공하기 위해 공간적으로 격리되고 전기적으로 독립된 다중 유압회로를 가지며 안전관련 기능을 수행한다.

주증기 격리밸브는 격납건물 외부에 있는 직관에 설치된다.

(3) 유량제한기

증기발생기 유량제한기는 증기발생기 증기 출구노즐의 일부분이다.

(4) 주증기안전밸브

4개의 스프링 작동 주증기안전밸브는 각 주증기관의 주증기격리밸브 전단 격납건물 외부에 설치된다. 이 밸브들의 전체 방출용량은 주증기관에 동일하게 나누어져 있고 발전소 최대 증기유량과 동일한 증기유량을 통과시키기에 충분하다. 주증기관의 설계압력과 온도는 증기발생기 2차측 설계조건과 일치하는 1,270psia(89.3kg/cm²a) 및 575°F(302°C)이다.

(5) 주증기 대기방출 밸브

주증기 격리밸브가 닫혀 있거나 주복수기가 이용 불가능할 때 증기발생기를 냉각시키기 위해 주증기관마다 대기방출밸브가 하나씩 제공된다. 각 대기방출밸브는 노심 붕괴열을 제거하여 고온대기상태에서 발전소를 유지하거나 인가된 원자로의 냉각수를 유지하기에 충분한 양의 증기를 방출할 수 있도록 크기가 정해진다.

주증기 대기방출밸브는 주제어실 또는 원격정지 제어반에서 수동으로 조절이 가능하다. 또한 수동구동기가 현장에 제공된다. 주증기안전밸브에 의해 증기발생기가 보호되므로 대기방출밸브는 과압방지를 위한 운전이 요구되지 않는다.

(6) 터빈우회밸브

총 8개의 터빈우회밸브는 외부전원상실이나 터빈·발전기 정지시 정격 주증기 유량의 55%를 수용할 수 있는 용량을 갖고 있다. 이 중에서 정격 주증기유량의 40%는 복수기로 우회되고 15%는 대기로 방출된다. 이 용량은 원자로출력 급감발계통과

연계되어 원자로정지, 원자로냉각재계통 및 주증기안전밸브가 열리지 않고 발전기 단계부하 감발을 허용하여 발전소 소내 부하 출력까지 발전소 출력을 감발할 수 있는 용량이다.

(7) 계통운전

발전소를 기동할 때 진공펌프로 복수기의 진공을 형성한다.

주증기가 주증기모관에서 주급수펌프의 터빈으로 공급된다. 발전소가 대략 40% 이상의 부하에서 운전될 때 주급수펌프 터빈 증기는 습분분리 및 재열기 출구에서 공급된다. 저출력으로 운전할 때는 주증기가 주증기모관을 거쳐 터빈축밀봉계통에 밀봉 증기를 공급한다. 이 터빈축밀봉계통은 복수기로 유입되는 공기를 차단한다.

발전소 효율을 향상시키기 위해 고압터빈에서 추가한 증기로 습분분리 및 재열기의 1단재열을 하고 주증기로 2단재열을 한다.

주증기계통으로 방사능이 누설되면 복수기 공기제거 배기관에 설치된 방사선 감시기와 증기발생기 취출 방사선 감시기에 의해 검출된다.

3. 터빈 계통

가. 개요

한국표준형 터빈은 복류형(Double Flow)으로 한 대의 고압(HP) 터빈과 3대의 저압(LP) 터빈이 직렬로 설치(Tandem Compound)되며, 습분분리 및 재열기(MSR)는 터빈과 병렬로 설치되어 있다. 고압터빈과 저압터빈은 모두 순수한 충동(Impulse) 터빈은 아니지만, 반동도가 5%로 적기 때문에 충동 터빈이라 해도 무방하다.

증기발생기에서 발생한 고압의 증기는 고압정지밸브(MSV)와 제어밸브(CV)를 통하여 고압터빈의 중앙 부분으로 유입된다. 고압터빈 중앙 부분(HP Section)에 들어온 증기는 노즐 박스(Nozzle Box)에 의하여 서로 상반된 2개의 방향(터빈측 - TE : TBN End, 발전기측 - GE : Generator End)으로 분리되어 각각 7단(Stage)의 회전익(Bucket)에 속도 에너지를 전달한다.

온도와 압력이 감소한 고압터빈 배출증기는 습분분리 및 재열기로 보내져서 습분분리기를 거치며 습분이 제거되고, 고압터빈 3단 추기 및 주증기에 의해 재 가열되어 과열증기가 된다. 이 과열증기는 6개의 저압터빈 정지 및 조절 밸브(Combined Intermediate Valve : CIV)를 거쳐 3개의 저압터빈 증양부분(LP Section)으로 유입된다.

저압터빈 증양 부분에 유입된 증기는 고정익(Diaphragm)에 의해 양분되어 각각 TE, GE 방향으로 각각 7단의 회전익을 경유하면서 저압터빈 회전자를 회전시킨 후 복수기로 하향 배출된다.

점검 및 정비를 위하여 증기통로에 접근할 수 있도록 모든 셸(Shell)과 후드(Hood)의 수평면 연결부는 볼트로 체결되어 있으며 이 연결부는 증기가 새지 않도록 하기 위해서 정밀 기계 가공된 금속면 대 금속면 접촉(Metal to Metal Contact)으로 되어 있다. 또한, 모든 증기관 및 고압터빈, 습분분리 및 재열기 등 고온부는 열 손실을 막기 위해 보온재가 설치되어 있다.

나. 고압터빈

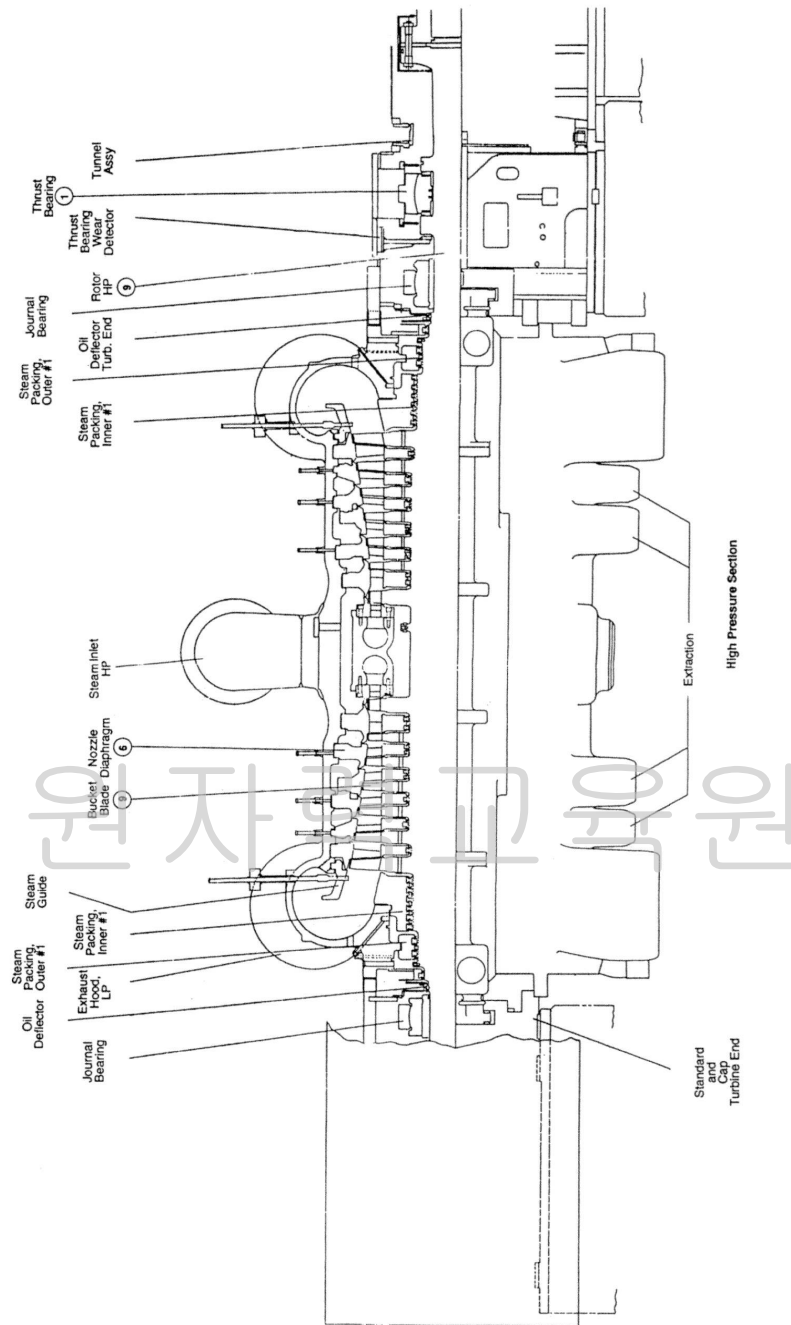
(1) 고압터빈 케이싱

(가) 기능

- 1) 내부에 회전자의 회전 공간을 제공한다.
- 2) 다이어프램, 노즐 박스, 패킹 케이싱을 지지한다.
- 3) 수평 방향이 금속 대 금속 접합이며 볼트로 체결되어 내부의 기밀을 유지한다.
- 4) 운전조건의 변화에 따라 열팽창, 수축을 할 수 있도록 되어 있다.
- 5) 추기배관을 통하여 습분분리와 재열기 및 고압 급수가열기에 가열증기를 공급한다.

(나) 구성

- 1) 상부 케이싱
- 2) 하부 케이싱



[그림 2-37] 고압터빈 구조

- 3) 다이어프램(Diaphragm) : 7단 × 2 Flow
- 4) 노즐 박스(Nozzle Box)
- 5) 축밀봉 장치(Packing Casing)
- 6) 추기 연결점
 - 가) 3단 : 습분분리 및 재열기 1단 재열기 / 고압 급수가열기 #7
 - 나) 5단 : 고압 급수가열기 #6
 - 다) 7단 : 고압 급수가열기 #5
- 7) 배수 연결점
 - (다) 구조 및 특징

상반부(Upper Half Casing)와 하반부(Lower Half Casing) 두 부분으로 나뉘어져 주조한 후 기계 가공하는 방법으로 제작되었으며, 수평면은 정밀 기계 가공된 금속 대 금속 접촉(Metal to Metal Contact)이며 가열 체결 볼트(Heating Bolt)로 체결하여 증기의 누설을 방지한다. 재질은 탄소강에 0.2%정도의 구리(Cu)를 첨가한 것으로 이를 Copper Bearing Carbon Steel이라 한다.

중앙 부분에는 노즐 박스가 용접으로 부착되어 있어 고압 정지밸브와 조절밸브를 거쳐 유입된 증기를 TE측과 GE측으로 나누어 축 방향으로 유도한다. 노즐 박스는 4조각으로 되어 있으며 4개의 조절 밸브를 통해 유입된 증기는 각각의 해당 구역으로만 유입될 수 있게 되어 있다. 이 증기는 다시 TE측과 GE측으로 각각 7단 씩 배열된 다이어프램에 의해 회전자에 부착된 회전익에 적절한 회전력을 얻을 수 있도록 유도된다.

고압터빈 케이싱의 TE측과 GE측 양쪽 끝에는 축과 케이싱 사이의 틈새에 증기누설을 방지하기 위하여 패킹링(Packing Ring)이 설치되어 있다. 이 패킹은 교축 작용을 이용하여 밀봉하는 미로형이다.

3, 5, 7단 출구에는 추기 연결점이 설치되어 있다. 추기의 목적은 열효율 향상시키고 터빈의 크기를 작게 만들기 위한 것이다.

고압터빈에 공급되는 증기는 습증기이므로 케이싱 내부에 응축수가 많이 생기게 된다. 이를 적절히 배수하기 위하여 하부 케이싱에는 배수공이 만들어져 있다.

한편, 다이어프램은 터빈 내로 유입된 증기의 속도를 증가시키고 증기의 흐름 방향을 안내하여 회전익을 충동, 회전자가 적절히 회전하도록 한다. 각 단별 증기의 누설을 방지하기 위하여 내륜에 패킹링이 부착되어 있다. 이 터빈은 충동터빈(Impulse Turbine)에 가까우므로 각 단별 압력강하가 대부분 고정익(95%)에서 일어나고 회전익에서의 압력 강하는 5% 정도이다. 구조는 상반부와 하반부 두 조각으로 구성되며 수평 연결부는 볼트로 체결된다. 각 반부(Half)의 구조는 외륜 - 고정날개(Partition) - 내륜으로 구성되어 있으며 내륜과 외륜 사이에 고정날개를 용접으로 부착한 후 기계 가공으로 마무리하여 제작된다.

(2) 고압터빈 회전자(HP TBN Rotor)

(가) 기능

회전익을 장착하고 있으며 다이어프램에 의해 유도된 증기로 회전운동을 한다.

(나) 구성

- 1) 회전축 : 중공축(Bored Shaft)
- 2) 회전익(Bucket 또는 Moving Blade)
- 3) 추력 방지 베어링 칼러(Thrust Collar)
- 4) #1, #2 베어링의 저어널(Journal)
- 5) 제어용 회전자 집합체(Control Rotor Assembly)

(다) 특징 및 구조 설명

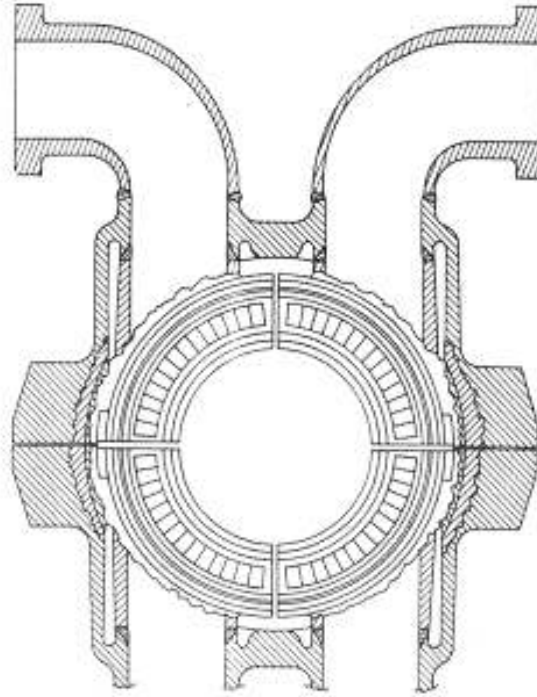
울진 3,4호기 고압터빈 회전자는 축과 휠(Wheel)이 일체형이며, 축 중심에 직경 6 inch의 구멍이 뚫여 있는 중공축이다. 단조작업을 통하여 제작되며 일체형(Mono Block형) 중공(Bored) 회전자라 한다. 이러한 회전자는 견고하고 수명이 길다는 장점이 있다. 이 회전자는 터빈쪽 끝(TE)은 앞쪽 스탠더드(Front Standard), 발전기쪽 끝(GE)은 중간 스탠더드(Middle Standard)에 있는 두 개의 저어널 베어링에 의해 양단이 지지되며 터빈쪽 끝은 제어용 회전자 집합체와 볼트로 체결되며 발전기쪽 끝은 저압터빈 'A'의 회전자와 연결(Coupling)되며 이 연결 부위도 일체형이다. 회전자의 축 방향 움직임을 방지하기 위한 쓰러스트 칼러(Thrust Collar)가 발전기쪽 끝의 베어링 저어널 뒤에 있다.

회전익은 축과 일체형으로 제작된 휠에 요철형(Dove Tail) 홈에 의하여 원주 방향으로 터빈쪽 끝과 발전기쪽 끝으로 각각 7단 씩 조립되며 끝 부위는 슈라우드 밴드(Shroud Band)로 묶여져 있고 테논(Tennon)부위가 리벳팅(Hand Rivetting)되어 있다.

〈표 2-3〉 고압터빈 회전익 및 고정익 수량

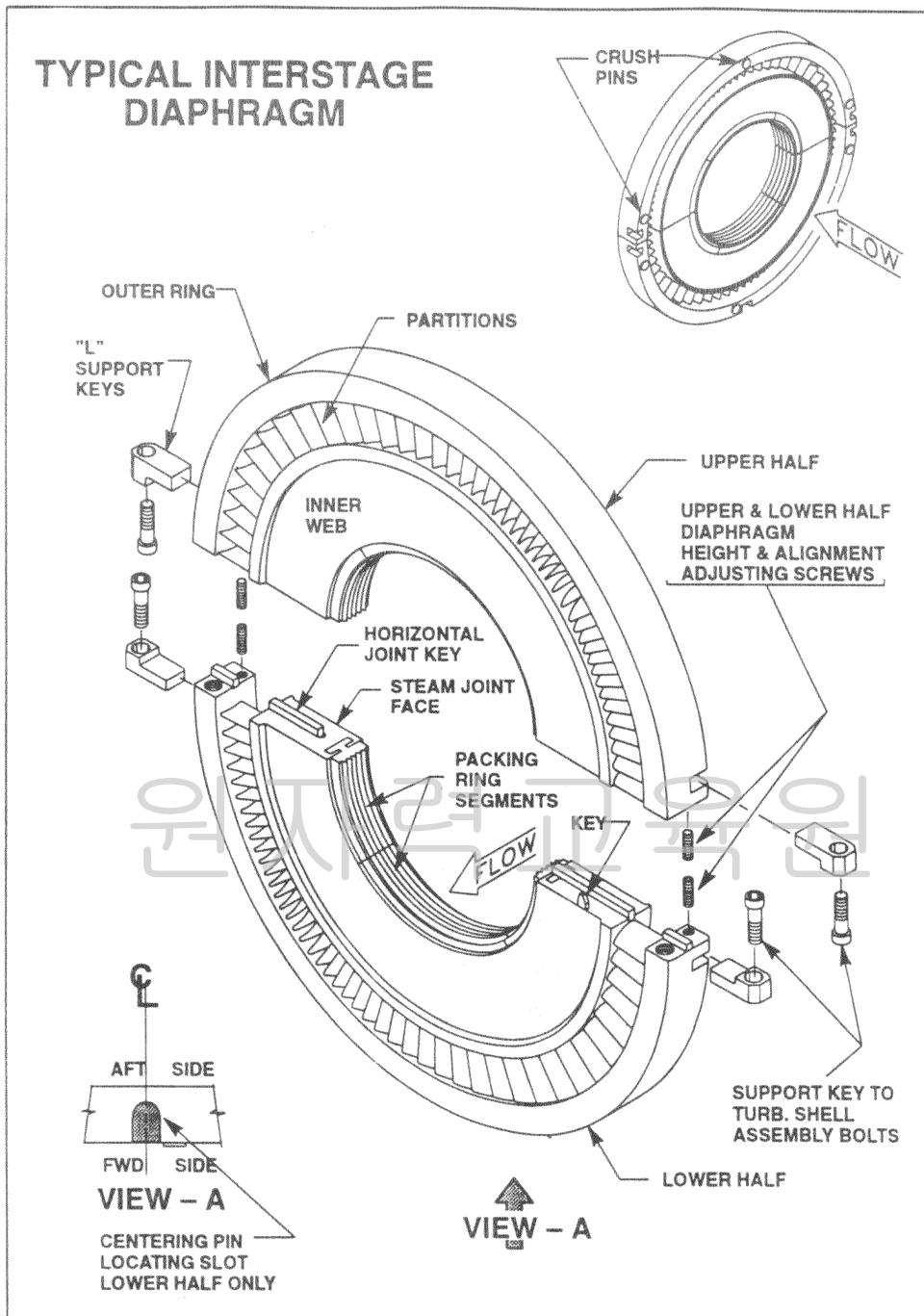
단 번호	1	2	3	4	5	6	7
회전익 수	82	110	110	110	96	90	76
고정익 수	268	142	126	128	162	142	156
회 전 익 뿌리 형태	모두 Dove Tail 형태						

원자력교육원

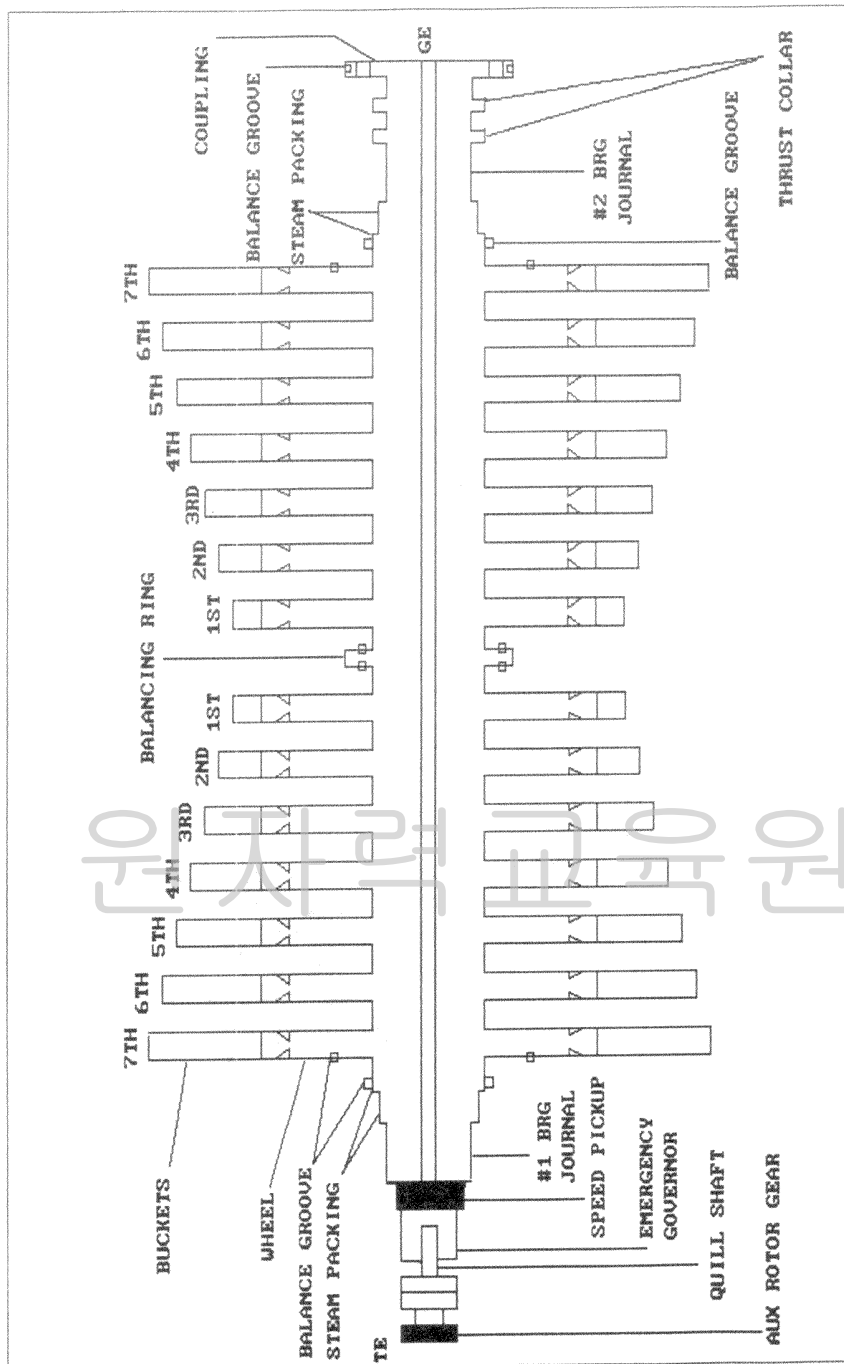


[그림 2-39] 노즐 박스

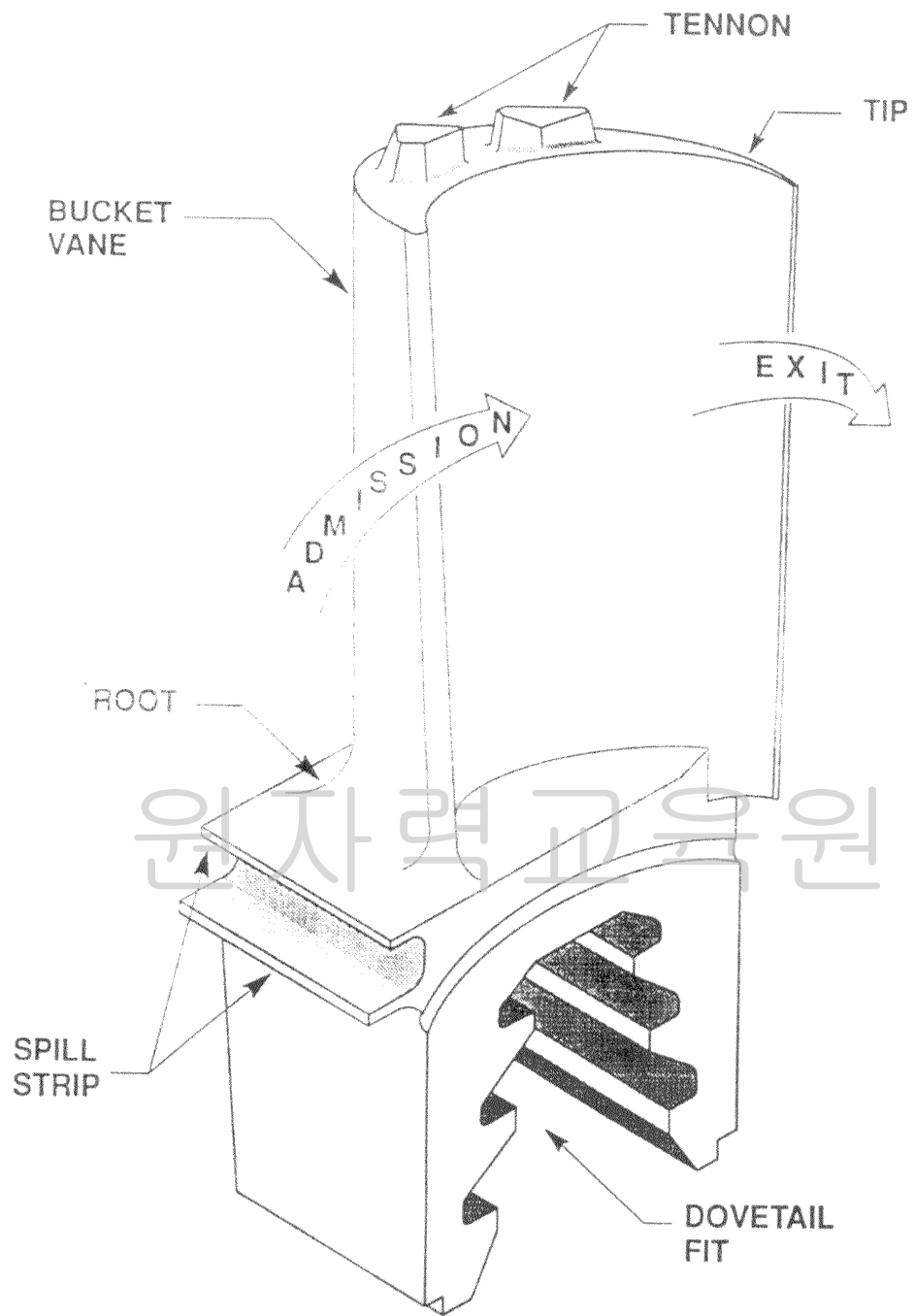
원자력교육원



[그림 2-41] 전형적인 다이어프램



[그림 2-42] 고압터빈 회전자



[그림 2-43] 도브테일형 버켓

다. 저압터빈

(1) 저압터빈 케이싱(또는 내부 케이싱)

(가) 기능

- 1) 저압터빈 다이어프램을 지지한다.
- 2) 저압터빈 회전자의 회전 공간을 제공한다.
- 3) 추기배관 연결점이 있으며 이 추기를 이용하여 급수를 예열함으로써 열효율을 향상시킨다.

(나) 구성

- 1) 케이싱
- 2) 다이어프램
- 3) 살수링
- 4) 배수 장치
- 5) 추기 연결점

가) 저압터빈 2단 추기 : 탈기기

나) 저압터빈 3단 추기 : 저압 급수가열기 #8

다) 저압터빈 4단 추기 : 저압 급수가열기 #2

라) 저압터빈 6단 추기 : 저압 급수가열기 #1

(다) 구조 및 특징

1) 저압터빈 케이싱

일반적인 기능은 고압터빈 케이싱과 비슷하나 제관으로 제작한 후 기계 가공으로 마무리 되어 있으며 재질은 저합금강(Low Alloy Steel)이라는 점이 다르다. 또한 구조면에서도 고압터빈 케이싱이 앞쪽 스탠다드(Front Standard)와 중간 스탠다드(Middle Standard)에 의해 지지되는데 반해 저압터빈 케이싱은 저압터빈 후드에 안착된다. 케이싱의 터빈측(TE) 및 발전기측(GE) 등 양쪽 끝은 곧바로 복수기와 통하게 되어 있다. 또한 케이싱의 양쪽 끝 부분을 후드 살수 링이 원주방향으로 감고 있다.

2) 다이아프램

기능이나 구조는 고압터빈 다이아프램과 비슷하며 각 단별 고정익 수는 [표 2-4]와 같다

(2) 저압터빈 회전자

(가) 기능

습분분리 및 재열기(MSR)에서 습분이 제거되고 2개 단의 재열기에서 재열된 과열증기의 열에너지를 기계적 에너지로 변환하는 장치이며 회전익을 장착하여 다이아프램에 의해 유도된 증기에 의해 회전 운동을 한다.

(나) 구성

- 1) 회전축 : 실축(Unbored Shaft)
- 2) 휠(Wheel) : 7단 $\times$ 2 Flow $\times$ 3 TBN
- 3) 회전익(Bucket 또는 Moving Blade)
- 4) 2개의 베어링 저어널(LP A : #8, #4 / LP B : #5, #6 / LP C : #7, #3)

(다) 구조 및 특징

고압터빈 회전자와 비슷한 기능을 갖고 있으나 구조면에서는 약간 차이가 있다. 회전축은 축방향으로 구멍이 없는 실축이며 2개의 저어널 베어링에 의해 양단이 지지된다.

회전익은 축에 열박음된 휠(Wheel)의 림(Rim)에 가공된 요철형(Dove tail) 홈에 의하여 원주방향으로 터빈쪽 끝과 발전기쪽 끝으로 각각 5 단씩 조립되며 끝 부위는 슈라우드 밴드(Shroud Band)로 묶여지고 테논(Tennon)부위가 리베팅(Hand Rivetting)되어 있다. 그리고 6단과 7단은 Pinned Finger Type으로 휠의 림에 조립되어 있다.

〈표 2-4〉 저압터빈 회전익 및 고정익 수량

단 번호	1	2	3	4	5	6	7
회전익 수	148	293	256	165	120	132	130
고정익 수	300	214	172	120	100	112	72
회전익 뿌리 형태	모두 Dove Tail 형태					Pinned Finger 형태	

(3) 저압터빈 배기 후드

(가) 기능

- 1) 저압터빈 케이싱을 내장하고 지지한다.
- 2) 정상운전 중 진공을 유지한다.
- 3) 과압방지 파열판(Relief Diaphragm 또는 Rupture Disc)을 장착하여 내부 압력 증가로 인한 저압터빈과 복수기의 파손을 방지한다.
- 4) 후드 살수링을 장착하여 과열에 의한 저압터빈 회전익의 손상을 방지한다.
- 5) 저압터빈 베어링 지지(#3 ~ 8 베어링)
- 6) 저압터빈 그랜드 밀봉박스 지지

(나) 구성

- 1) 상반부 배기 후드
 - 과압방지 파열판(Atmospheric Relief Diaphragm) : 4개 × 3 LP TBN = 12개
- 2) 하반부 배기 후드

가) 증기공급 배관 통로(Cross Around Pipe 통로)

나) 추기 배관 통로

(다) 구조 및 특징

상·하반부는 각각 3 조각씩, 총 6 조각으로 되어 있으며 철판으로 제작하여 현장에서 각 조각을 볼트로 체결하여 조립한다. 하반부는 케이싱을 안착할수 있도록 되어 있으며 하반부의 스커트(Skirt) 부분은 복수기 목(Neck)과 연결되며 후드 내부에는 복수기와 통하므로 진공이 형성된다. 습분분리 및 재열기로부터의 증기배관은 하반

부 배기 후드의 중앙을 통과하여 케이싱으로 연결된다. 또한 하반부 중앙부분의 양 측면에는 지지장치(Anchor Post)가 1개씩 설치되어 축방향 움직임을 방지하며, 안내 브라켓(Guide Bracket)이라 부르는 지지장치는 터빈측(TE)과 발전기(GE)측에 1개씩 설치되어 배기 후드가 양옆으로 움직이는 것을 방지한다. 이들 장치는 배기 후드의 열팽창 기준점 역할도 겸한다.

과압방지 파열판(Atmospheric Relief Diaphragm)은 후드 상반부에 설치된다. 터빈운전 중 순환수가 상실되어 저압터빈 내부의 압력이 상승하면 저압터빈 후드, 케이싱, 저압터빈 최종단 동익 등이 파손될 수 있다. 이를 방지하기 위해 과압방지 파열판을 설치하여 압력이 약 5psig에서 파열되도록 하여 그 이상의 압력상승을 방지한다.

(4) 저압터빈 배기후드 살수계통

(가) 개요

터빈 무부하 또는 경부하시 저압터빈 최종단 회전익을 통과하는 증기의 양이 불충분하기 때문에 일부 증기는 정체 현상을 일으킨다. 이 경우 저압터빈 회전익이 증기를 때리게 되고(에너지 전달 방향이 반대가 됨), 이로 인해 증기 및 회전익의 온도가 상승하게 된다. 이때 온도상승을 적절히 억제하지 못하면 저압터빈 동익이 손상될 수 있다.

이러한 현상을 방지하기 위하여 저압터빈 후드 주위에 냉각수를 분사하는 장치를 설치하고 있으며, 이것이 저압터빈 배기후드 살수계통이다.

(나) 계통 구성 설비 및 특징

- 1) 분사수 공급 : 복수펌프로부터 압력 43kg/cm², 약 138gpm의 물을 공급받는다.
- 2) 온도 감지기 : 제어용 3개, 경보 및 보호용 9개
 - 온도 조절 : 20psig의 계기용 공기를 공급받아 온도 전송기 저압터빈 배기 후드의 온도가 60°C (140°F)에서는 6psig 그리고 93.3°C (200°F)에서는 15psig의 출력 신호로 배기후드의 온도를 제어한다.
 - 고온경보 및 터빈트립 발생 : 9개의 온도 스위치는 93.3°C (200°F)에서는 배기 후드 고 온도' 경보를 발생시키고, 107.2°C (225°F)에서는 배기후드 고 온도에 의한 터빈정지 신호를 발생시킨다.

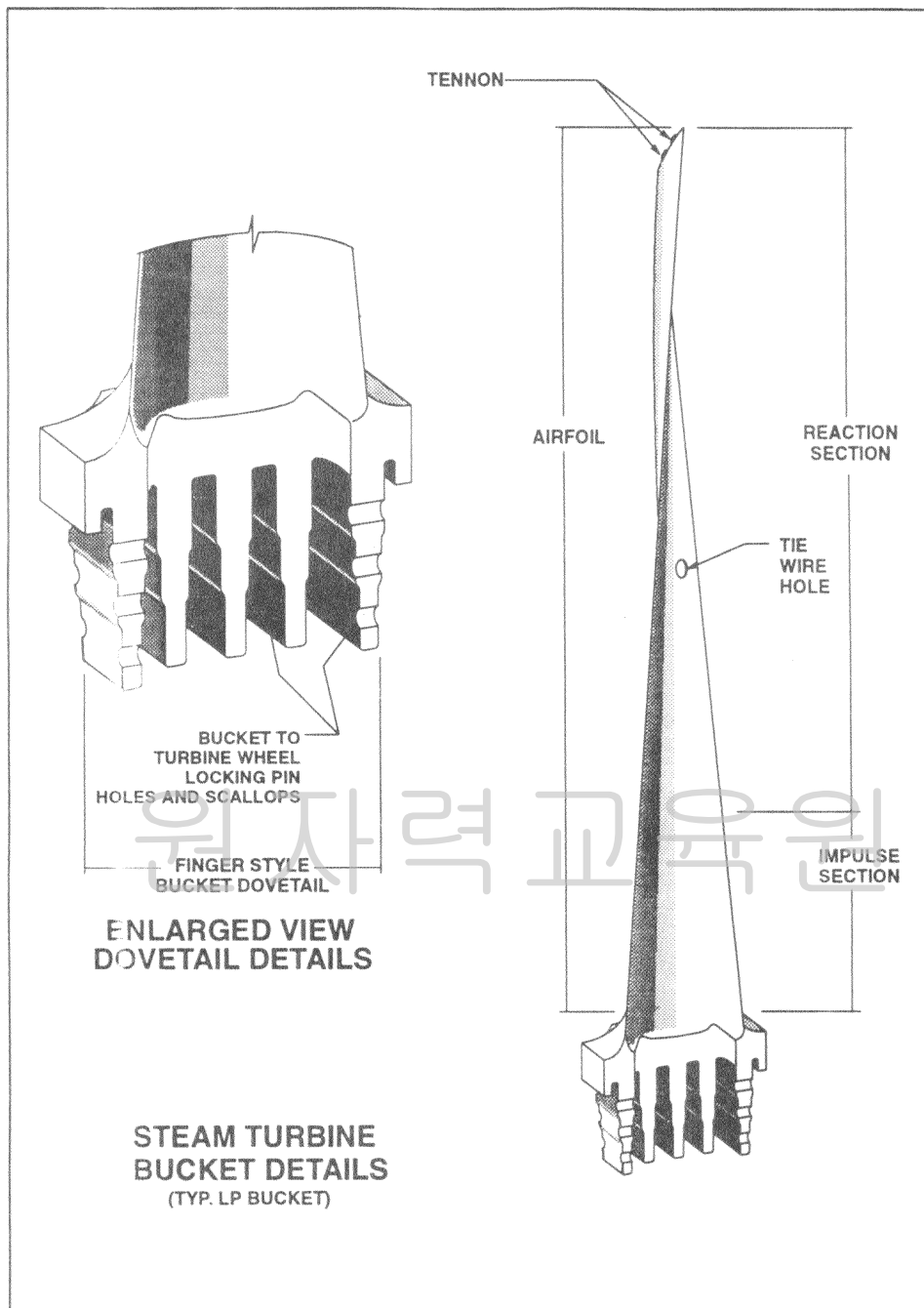
- 3) 공기구동 살수조절밸브(WSV) : 배기후드 온도에 따라 살수량을 조절한다.
온도 전송기로부터의 공기압 신호가 6psig (60℃)인 경우는 밸브를 완전히 닫고, 15psig (93.3℃)인 경우에는 밸브를 완전 개방한다.
- 4) 살수링 및 노즐 : 살수 링 (2개/LP TBN $\times$ 3 = 6개)은 저압터빈 케이싱의 양 끝을 감고 있으며 각각의 살수 링에는 4개의 살수노즐이 설치되어 있다($\therefore$ 살수 노즐수 : 총 24개). 또한, 살수링은 상하 두개로 분리할 수 있으며 설치시 유니온으로 연결한다.
- 5) 우회밸브 : 공기구동 살수조절밸브가 자동운전이 불가능한 경우 수동으로 개방하여 살수를 할수 있다.
- 6) 수동교정 밸브 : 분사노즐 상류측의 압력 설정시 사용

(다) 계통 운전

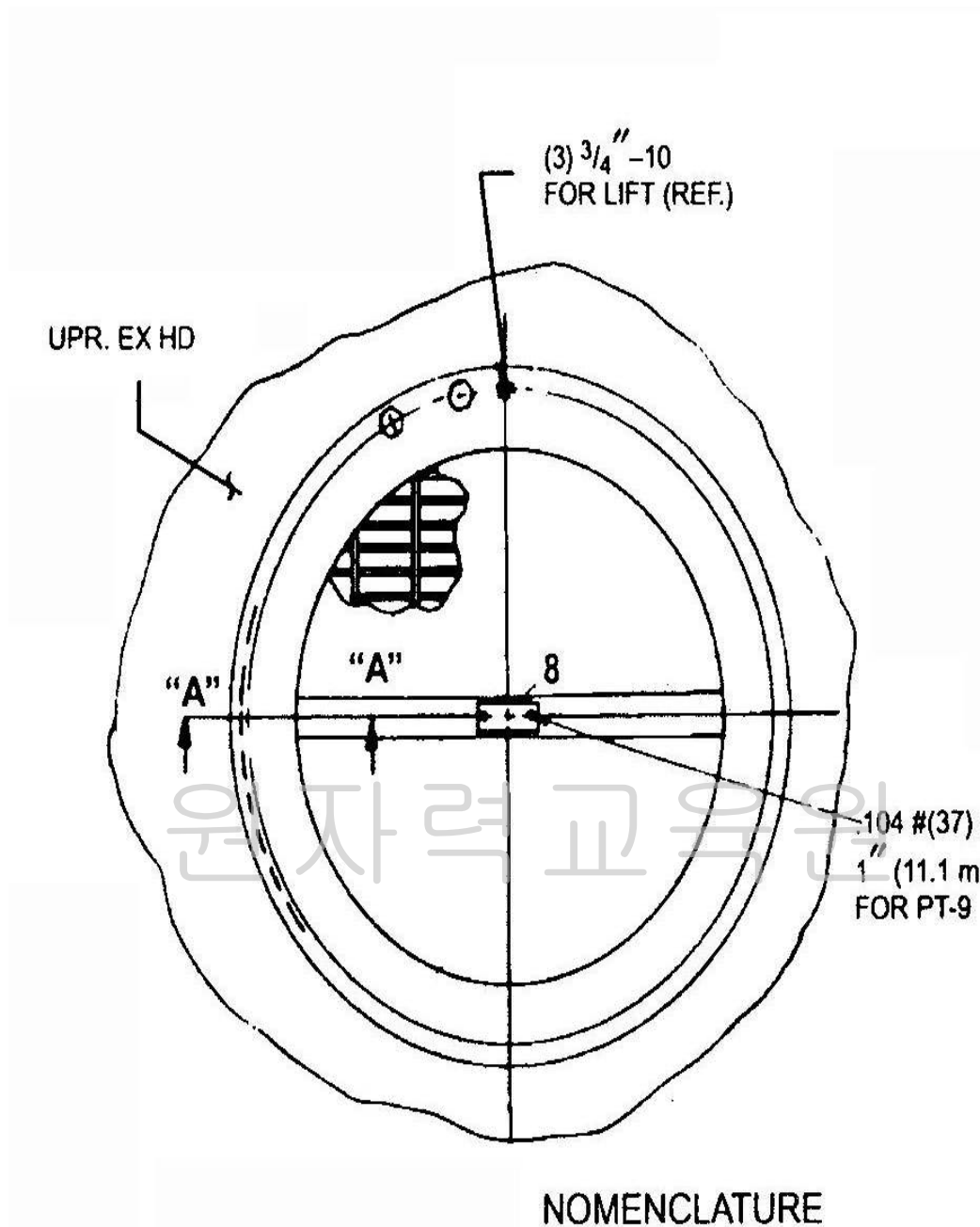
- 1) 계통 설정 : 공기구동 살수조절밸브가 완전히 개방된 상태에서 수동교정 밸브(Manual Calibration Valve)를 조절하여 살수관 압력이 30psig가 되도록 조절한다.
- 2) 운전시 주의사항

살수계통을 장기간 운전하면 저압터빈 동익에 침식이 유발될 수 있으므로 터빈의 무부하 또는 경부하 운전은 가능한 한 짧게 해야 한다. 비록 살수계통이 자동운전 되고 후드 온도가 제한치 이내에 있더라도 터빈출력을 증가하거나 복수기 진공을 증가하여 운전제한 시간을 벗어나야 한다. 만일 후드 온도가 57.2℃ 이상으로 유지되면 빨리 출력을 증가시켜야 한다.

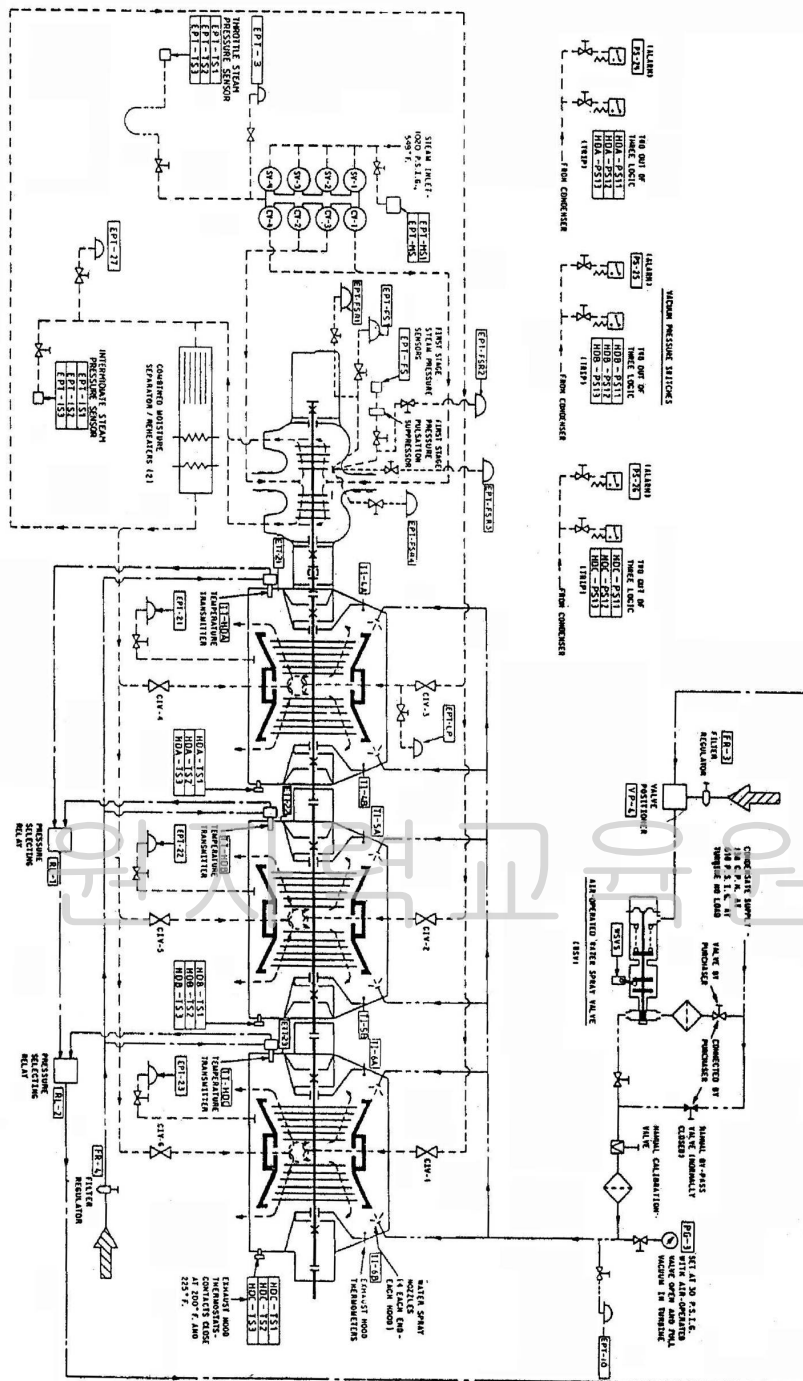
경보 발생은 복수기 압력 상승(진공 상실), 살수계통의 기능 상실, 과도한 감시(Monitoring) 운전 등이 원인이 될 수 있다. 이 경우 출력 또는 터빈속도를 감소시키지 않고 원인을 제거하는 것이 좋다.



[그림 2-45] 핑거형 버켓



[그림 2-46] 대기 방출 다이어프램



[그림 2-47] 터빈과 밸브 배열

[핵심요약]

1. 증기 및 터빈계통 기능

- 주증기계통 : 증기발생기에서 생성된 증기를 터빈계통 및 보조계통으로 공급
- 터빈계통 : 증기의 열에너지를 기계적 회전에너지로 변환하여 발전기로 전달

2. 증기 및 터빈계통 설계기준

- 안전성관련 설비 : 증기발생기 출구 노즐부터 주증기 격리밸브 관통 앵커까지
- 발전소 부하감발 및 기동 시 원자로냉각재계통에서 생성된 열 제거 수단 제공

3. 증기 및 터빈계통 주요 구성기기

- 주증기계통 : 주증기 대기방출밸브, 주증기 안전밸브, 주증기 격리밸브, 주증기 격리 우회밸브, 터빈우회밸브
- 터빈계통
 - 고압터빈 : 케이싱, 다이아프램, 노즐박스, 축밀봉장치, 추기배관, 배수배관, 회전자, 회전축, 회전날개, 추력방지 베어링 및 칼러, #1, #2 저어널 베어링, 제어용 회전자
 - 저압터빈 : 케이싱, 다이아프램, 축밀봉장치, 추기배관, 회전자, 회전축, 회전 날개, #3 ~ #8 저어널 베어링, 배기후드 및 냉각수 살수링
 - 습분분리재열기(MSR), 고압/저압터빈 정지 및 제어밸브, 전동기 구동 터닝기어

4. 주증기 공급처 및 터빈계통 공급경로

- 습분분리재열기 2단 재열기, 주급수펌프 터빈, 보조급수펌프 터빈, 증기식 공기 추출기, 터빈 축밀봉계통, 터빈우회증기계통, 보조증기계통, 공정시료채취계통
- 증기발생기 → 고압터빈 정지밸브(MSV) → 고압터빈 제어밸브(CV) → 습분분리 재열기 → 저압터빈 정지 및 제어밸브(CIV) → 저압터빈 → 주복수기

5. 증기 및 터빈계통 운전

- 주증기 대기방출밸브 : 주증기 격리밸브가 닫혀 있거나 주복수기 이용이 불가능한 경우 증기발생기 내의 증기를 대기로 방출
- 주증기 격리밸브 : 주증기배관 파단사고 시 자동적으로 작동하며 5초 이내에 닫힘
- 터빈우회밸브 : 원자로출력 급감발계통(RPCS)와 연계하여 원자로 정지없이 발전기 단계부하 감발을 허용하여 소내 부하로 떨어뜨리는 능력 제공
- 고압/저압터빈 추기를 습분분리재열기 및 고압/저압 급수가열기에 공급
- 저압터빈 배기후드 고 온도 시 회전날개 손상을 방지하기 위하여 냉각수 분사

제5절 터빈제어계통(Mark-V) 일반

[학습목표]

1. 터빈제어계통의 기능 및 구성기기를 설명할 수 있다.
2. 터빈 비상정지계통의 기능 및 구성기기를 설명할 수 있다.
3. 터빈속도제어 및 부하제어에 대해 설명할 수 있다.
4. 터빈보호신호 종류 및 기능을 설명할 수 있다.
5. 터빈 기동 및 운전절차를 설명할 수 있다.

1. 개요

터빈은 원자로 및 증기발생기로 이루어진 핵증기공급계통(NSSS)에서 생산된 고온 고압의 증기를 이용하여 회전 토크를 발생시켜 발전기를 구동함으로써 전력을 생산하는 설비이다.

주증기계통에서 생산된 증기는 주증기관을 지나 고압정지밸브와 고압제어밸브를 통과한 후 고압터빈으로 유입된다. 고압터빈에서 1차적으로 팽창된 증기는 습분분리재열기(MSR)를 지나면서 증기에 포함된 습분이 제거되고 재가열되어 각 저압터빈 입구 측에 설치된 복합밸브를 통하여 저압터빈으로 유입된다.

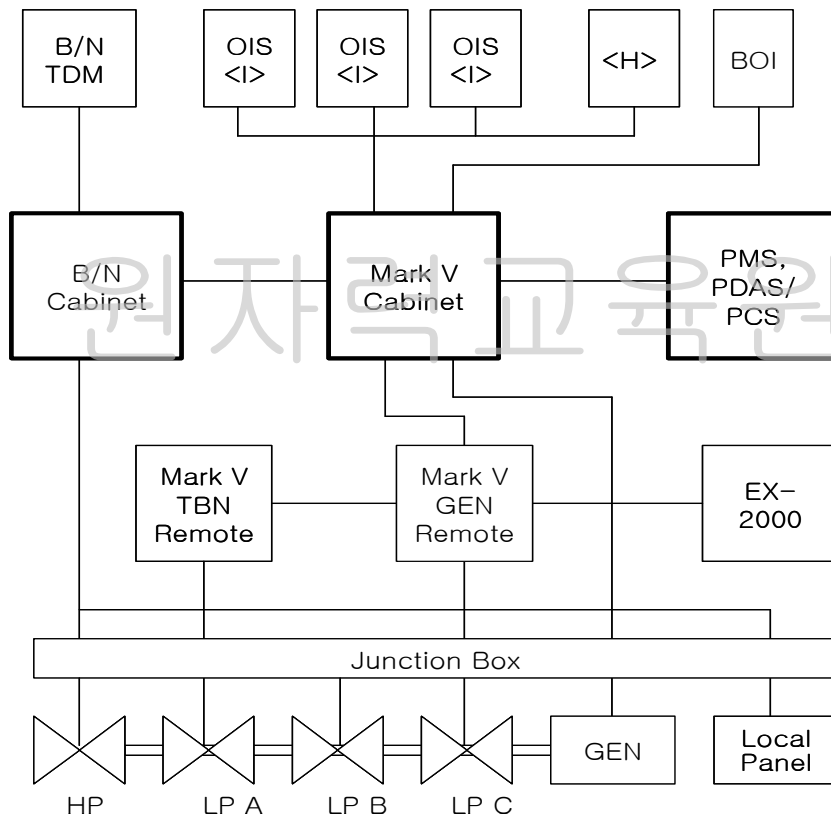
터빈계통에는 고압정지밸브(MSV : Main Stop Valve) 4대, 고압제어밸브(CV : Control Valve) 4대, 저압정지밸브(ISV : Intermediate Stop Valve) 및 저압제어밸브(IV : Intercept Valve)가 한 몸체의 형태로 조합된 복합밸브(CIV : Combined Intercept Valve) 6대가 설치되어 터빈으로 유입되는 증기를 제어하거나 차단하기 위하여 사용된다.

터빈제어계통은 터빈/발전기를 기동하고 정격속도에서 발전기를 계통에 병입시키며, 전력계통의 조건에 따라 적절히 부하를 제어하기 위하여 터빈 입구에 설치된 밸브들의 개도를 제어하는 역할을 한다. 또한, 발전소 운전 중에 발생할 수 있는 터빈 및 보조계통의 이상 상태를 신속히 감지하여 터빈부하를 감발하거나 필요할 경우 터빈/발전기를 정지시키는 보호 동작을 수행한다.

터빈 및 보조계통의 각종 변수들은 터빈제어계통으로 입력되며, 이들 신호는 운전원이 입력하는 제어신호와 조합되어 터빈밸브 제어신호를 만든다. 터빈의 속도·부하의 제어는 터빈밸브를 개폐함으로써 이루어진다.

표준원전에 설치된 터빈제어계통은 미국 GE사에서 설계하고 제작한 마이크로프로세서로 구성된 3중 구조(TMR : Triple Module Redundant)의 디지털 전자제어시스템으로서 고압유체 구동설비와 결합하여 터빈을 감시·제어·보호한다.

터빈제어계통을 이루는 주요 설비는 3중화 제어기인 Mark V 캐비닛과 터빈 및 보조계통의 변수(압력, 온도, 유량 등)를 측정·감시하는 MarkV TGM Turbine Remote 캐비닛, 그리고 발전기 및 보조계통의 변수를 측정, 감시하는 Mark V TGM Generator Remote 캐비닛으로 구성된다.([그림 2-48] 참조)



[그림 2-48] 터빈제어계통 전체 구성 개략도

표준원전의 터빈제어계통인 Mark V는 기본적으로 다음과 같은 제어·보호기능을 제공할 수 있도록 설계되었다.

- 터빈의 전속도 범위 내에서 정해진 몇 단계의 속도 및 가속도 설정치에 따라 터빈의 속도와 가속도를 자동으로 제어한다.
- 0% 출력에서 100% 출력까지 출력 및 출력 증발율을 연속적으로 자동 제어한다.
- 자동제어로 운전되고 있는 터빈/발전기에서 자동제어 조건이 만족되지 않을 경우 또는 운전원의 필요에 따라 반자동(Semi-auto)으로 속도 및 출력을 제어하여 터빈/발전기를 연속 운전한다.
- 터빈의 위험 상태 또는 비정상 상태를 감지하여 운전원에게 알려주고, 운전원이 터빈의 상태에 따라 적절히 운전하도록 한다.
- 전원 공급 장치와 다중의 제어회로를 갖춘 터빈제어 시스템의 운전상태를 감시하며, 터빈밸브 및 제어계통을 적절히 시험할 수 있도록 한다.

2. 터빈 속도 제어의 원리

터빈제어계통은 운전원이 설정한 속도 목표치(Speed Target)에 따라 터빈속도가 제어되도록 증기제어밸브의 개도를 조절한다. 터빈제어계통은 속도 감지기를 통하여 터빈/발전기의 속도를 지속적으로 감시하며, 운전원이 설정한 속도 목표치와의 편차를 실시간으로 계산하고, 속도편차의 해소를 위하여 필요한 만큼 제어밸브의 개도를 제어한다.

증기발생기에서 발생된 고온·고압의 증기 에너지는 터빈을 통과하면서 기계적인 회전 에너지로 변환되고, 발전기에서 전기적인 에너지로 변환된다. 터빈을 통과하는 증기는 터빈의 축에 기계적 토크를 가하게 되는데, 만일 이 기계적 토크와 같은 크기의 반대 토크가 없다면 터빈 축의 회전속도를 계속 증가시키게 될 것이다. 계통에 병입된 발전기는 전기 출력을 생산하면서 터빈에서 발생한 회전 토크에 해당하는 반대 토크를 터빈 축에 가하여 평형을 이루게 된다.

터빈 속도가 일정한 상태에서는 터빈을 통과하는 증기에 의해 발생하는 기계적 토크는 발전기에 의해 발생하는 반대 토크와 정확히 일치한다. 만일 부하가 증가되어 발

전기의 부하 전류가 증가하면 반대 토크가 증가하게 되고, 터빈과 발전기 사이에 회전 토크의 불균형이 발생되면서 터빈 회전속도는 감소하게 된다.

터빈제어계통은 터빈 회전 속도 감소분을 실시간으로 감지하여 터빈 속도를 원상 회복하기 위하여 필요한 기계적 토크에 해당하는 유입증기의 증가를 위해 제어밸브를 얼마간 더 열게 되며, 속도가 목표치에 일치되면 다시 균형 상태를 유지하게 된다.

반대의 경우, 부하가 감소되어 발전기 반대 토크가 감소하는 경우에는 터빈의 기계적 토크가 터빈의 회전 속도를 증가시키고, 증가된 터빈 속도를 속도 제어회로가 검출하여 증기제어밸브를 닫음으로써 다시 균형 상태를 유지한다.

터빈/발전기가 계통에 병입된 상태, 즉 두 대 이상의 발전기가 병렬로 운전되고 있으면 병렬운전 중인 발전기들은 동일한 주파수와 회전속도를 유지한다. 이 때 부하의 증가에 따라 속도가 감소하게 되면 제어 특성상 동일한 기기가 아니기 때문에 어느 한 대의 제어설비가 속도 변화에 대해 상대적으로 빨리 대응할 수가 있다.

이와 같이 전력계통의 부하 변화에 따라 주파수가 변동될 경우, 터빈/발전기가 얼마나 민감하게 동작하는가를 결정하는 것을 속도조정률(또는 Droop)이라 하며, 주파수 변화분에 대한 출력변화분의 비율로서 다음과 같이 결정된다.

$$\text{속도조정률}(\%) = \frac{\frac{N_n - N_1}{N_n}}{\frac{P_n - P_1}{P_n}} \times 100 = \frac{\frac{\Delta F}{F_n}}{\frac{\Delta P}{P_n}} \times 100(\%)$$

N_n, N_1 : 정격 속도, 변화후 속도

$P_n, P_1, \Delta P$: 정격 출력, 변화후 출력, 출력 변화분

$F_n, \Delta F$: 정격 주파수, 주파수 변화분

속도조정률이 크다는 것은 계통 주파수가 크게 변화하더라도 발전기의 출력 변화가 작다는 것을 의미한다. 즉, 속도조정률은 터빈 속도 제어설비의 안정성과 관련되며, 속도조정률이 너무 작으면 터빈 속도제어설비는 난조를 일으킬 수 있고, 반대로 지나치게 크면 주파수 변화에 대한 응답이 느리게 된다.

전력계통의 부하변동 또는 병렬운전 중인 타 발전기의 정지 등으로 전력계통의

주파수가 변동될 경우 계통에 연결된 모든 발전기가 동시에 응답하는 것은 발전소 운전 및 전력계통 운영 측면에서도 바람직하지 않다. 그러므로 발전소 특성상 빠른 출력 변동이 가능한 가스터빈이나 양수발전기는 계통변화에 신속히 응답하고, 대형 화력 및 원자력 발전기는 둔감하게 응답하도록 속도조정률을 정하고 있다. 표준원전의 터빈 제어계통은 7.5~10%의 속도조정률과 $\pm 0.27\text{Hz}$ 의 불감대를 설정하고 있다.

3. 설비 구성 및 기능

가. Mark V 특징

Mark V의 내부 제어회로와 터빈/발전기의 운전변수를 감지하는 전송기, 스위치, 속도 감지기, 밸브 위치감지기 등은 3중화(TMR : Triple Module Redundant)설비로서 1개의 제어회로가 고장 나더라도 터빈은 정지되지 않기 때문에 1개의 제어회로에 대한 운전 중 고장정비가 가능하다.

Mark V는 입력 및 처리되는 신호가 3개이며, 이 중에서 기준신호를 선택(Voting)하여 사용한다. 이 선택 기능은 주 제어기인 <R>, <S>, <T>에서 수행하며, 논리 신호는 2/3, 아날로그 신호는 중간값, 증기제어밸브의 제어를 위한 서보밸브의 전류는 평균값을 선택한다. Mark V는 속도 변동에 따른 터빈의 속도제어(조속기 기능)와 보호·감시 기능을 모두 포함하는 단일 설비로 구성되어 있으며, 각 제어회로가 마이크로프로세서로 구성된 설비로서 일부 보호회로(전기적 과속도, PLU, 터빈정지카드 등)를 제외하고는 대부분의 제어가 소프트웨어 프로그램으로 구성된다. 또한, 운전원 제어설비도 개인용 컴퓨터(PC)를 채택하여 접근성 및 유지 보수가 용이하다.

나. 주요 설비 및 기능

(1) 터빈 제어 캐비닛

(가) 1차 제어기

Mark V의 1차 제어기는 터빈제어·보호용 하드웨어와 소프트웨어를 가지고 있는 독립된 모듈로서 <R>, <S>, <T>의 3개의 제어기로 구성되어 있다. 3개 제어기 중 어느 하나의 고장은 자동적으로 카드범위에서 진단되고 경보 메시지로 나타나며, 정비원은 터빈이 운전 중인 상태에서 해당 제어기 전원을 차단하고, 고장 난 카드를

교체할 수 있다. 다중 감지기는 전체 계통의 고장허용설계(Fault Tolerant Design)를 제공하도록 제어·보호계통에 사용된다.

(나) 공용 입출력 제어기

공용 입출력 제어기는 <C>라 불리며 운전원조작설비(OIS : Operator Interface System)와 통신을 담당하고, 터빈/발전기의 감시용으로 사용되는 수많은 다중 구조의 입출력 신호들을 제어한다. 예를 들면, 열전대는 제어용, 보호용, 그리고 단지 감시용으로 사용될 수 있는데 회전자 열응력 계산을 위한 제어용 열전대는 <R>, <S>, <T> 제어기에 직접 연결되며, 추력 베어링 윤활유 배유 측 온도 측정과 같이 단지 감시용으로 사용되는 것은 <C>에 연결된다.

(다) 출력 부하 불균형 감시회로

터빈과 발전기 사이에 출력의 불균형이 발생할 경우에 보호기능을 수행하기 위하여 <PLU> 설비가 설치되어 있으며, PLU(Power Load Unbalance) 신호가 발생할 경우는 고압제어밸브 및 저압제어밸브가 고속으로 닫히게 된다.

(2) 터빈 감시 캐비닛(Turbine Remote Cabinet)

터빈 및 터빈 보조계통의 운전 상태를 감시하여 Mark-V 본체와 정보를 송수신하는 설비로서, 내부 제어기로서 <S>, <T>, <C> 등을 내장하고 있다.

(3) 발전기 감시 캐비닛(Generator Remote Cabinet)

발전기계통 및 발전기보조계통의 운전 상태를 감시하는 캐비닛 설비로서, 내부 제어기 <S>, <T>, <C> 등을 내장하고 있다.

(4) 터빈 진동감시 캐비닛(Bently Nevada Cabinet)

Bently Nevada사에서 공급한 진동 측정 관련 설비로서 터빈/발전기의 진동, 축 팽창, 차동 팽창, 케이싱 팽창, 추력 베어링 마모, 편심 감시 및 Key Phaser 신호를 검출한다. 터빈/발전기의 진동관련 신호를 수집하고 수집된 자료를 분석하는데 필요한 자료를 제공하기 위하여 설치된 진동감시컴퓨터(DM2000)와 연결되어 있다.

(5) 운전원 조작설비(OIS : Operator Interface System)

<I> 제어기라 불리는 운전원 조작설비는 주제어실에 설치된 486급 PC 3대가 주 설비이며 컬러 모니터, CPD(Cursor Positioning Device), 키보드, 프린터로 구성되어

있고, 터빈 제어 패널과 2개의 통신라인으로 연결된다.

특히, 3대의 컬러 모니터는 터치스크린 기능을 가지고 있어 주요변수 및 그래픽의 표시뿐만 아니라, 운전 모드의 변경, 표시 메뉴의 선택 등을 수행할 수 있다.

(6) 비상 운전원 조작설비(BOI : Backup Operator Interface)

비상용 운전원 조작설비(BOI)는 운전원 조작설비의 기능 상실시 사용하는 비상 조작설비로서 운전원 조작설비와 별도의 통신라인으로 제어 패널에 연결하여 제한된 범위 내에서 비상운전을 할 수 있도록 한다.

(7) 자료 기록용 컴퓨터(Historian<H>)

제어패널로 입력되는 현장 신호와 제어패널 내부에서 생성되는 신호 중 선택된 신호의 이력을 저장하며, 저장된 데이터는 운전원 조작설비에서 다양한 형식으로 출력이 가능하다.

다. 터빈 비상 정지 계통(ETS : Emergency Trip System)

터빈제어유공급계통에서 공급되는 고압의 제어유를 터빈증기밸브에 연속적으로 공급·차단하여 터빈밸브를 개폐함으로써, 터빈을 운전 또는 정지시키는 설비로서 다음과 같은 부속기기로 구성된다.

(1) 기계적 정지 솔레노이드 밸브(MTSV : Mechanical Trip Solenoid Valve)

터빈제어계통에서 터빈정지 신호가 발생되면 터빈증기밸브를 구동하는 고압의 제어유를 배유시켜 터빈증기밸브가 급속히 닫히도록 한다. 솔레노이드 밸브의 코일은 터빈 리셋 시에는 비여자(De-energized)되고, 터빈정지신호가 발생시 여자(Energized)된다.

(2) 수동 정지 장치(Manual Mechanical Trip Handle/Manual Trip Valve)

터빈의 프론트 스탠더드(Front Standard)에 설치되어 있으며, 비상시 현장에서 수동으로 터빈을 정지시킬 경우에 사용한다.

(3) 기계적 과속도 정지 장치(Mechanical Overspeed Trip Device)

터빈 축에 설치되어 있으며 터빈이 과속될 경우 터빈을 정지시킨다.

(4) 전기적 정지 솔레노이드 밸브(ETSV : Electrical Trip Solenoid Valve)

터빈제어계통에서 터빈 정지 신호가 발생되면 터빈증기밸브를 구동하는 고압의 제어유를 배유시켜 밸브가 급속히 닫히도록 한다. 솔레노이드 밸브의 코일은 터빈 리셋 시에는 여자상태, 정지신호 발생시에는 비여자 상태가 된다.

라. 증기 밸브

(1) 고압정지밸브(MSV : Main Stop Valve)

고압터빈으로 유입되는 증기를 차단하는 기능을 하며, #1, 3, 4번은 ON/OFF 동작을 하고, #2번은 일부 구간에 제어 기능이 있어 터빈의 예열 운전 시 사용된다.

(2) 고압제어밸브(CV : Control Valve)

고압터빈으로 유입되는 증기의 양을 조절하여 속도·출력을 제어하는 밸브로서 모두 제어 기능을 수행한다.

(3) 복합밸브(CIV : Combined Intercept Valve)

저압차단밸브(ISV)와 저압제어밸브(IV)가 한 몸체 안에 있는 밸브이다. 저압 차단밸브(ISV : Intercept Stop Valve)는 저압터빈으로 유입되는 증기를 차단할 수 있는 ON/OFF 밸브이다. 저압제어밸브(IV : Intercept Valve)는 저압터빈으로 유입되는 증기 양을 조절하는 밸브로서 #1, 2, 3번은 제어 기능이 있고, #4, 5, 6번은 #1, 2, 3번 밸브의 동작에 따라 ON/OFF 동작을 한다.

(4) 제어 밸브 부속품

- (가) Servo Valve : 고압제어밸브·저압제어밸브에 설치되어 터빈제어계통으로부터 전기적인 제어신호를 받아 유압신호로 변환한다.
- (나) Test Solenoid Valve : 고압정지밸브·저압정지밸브에 설치되어 밸브 개폐 시험 시에 사용한다.
- (다) Fast Acting Solenoid Valve : 터빈증기밸브를 급속으로 닫을 때 사용되며 모든 터빈증기밸브에 설치된다.
- (라) 선형 가변 차동변압기(LVDR : Linear Variable Differential Reactor) : 터빈 증기밸브의 위치를 측정하여 제어패널로 전송하는 위치신호 검출용 센서로

서, 제어밸브에는 3개의 제어기, 즉 R, S, T 용으로 3개씩 설치되고, 정지밸브에는 1개씩 설치된다.

4. 터빈 제어

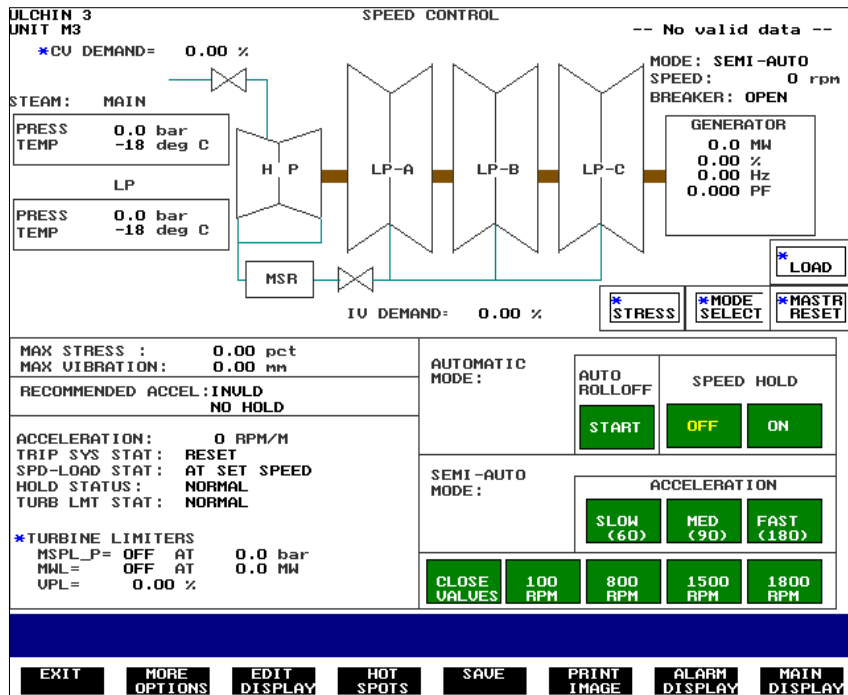
가. 터빈 속도 제어

터빈제어계통은 터빈의 전 속도범위에 걸쳐 정확한 속도제어를 할 수 있다. 터빈 축의 기어 휠(Tooth Wheel) 주위에 설치된 다중 속도 감지기에서 검출된 속도 감지 신호가 3중 구조의 전자회로에 각각 연결되며, 터빈속도 제어회로는 터빈의 기동·운전 중에 속도 및 가속도를 제어한다. 터빈의 속도제어를 위한 최종적인 제어신호는 3개 제어회로의 2/3 논리동작에 의해 결정된다.

속도 제어기능은 속도 편차신호를 만들고 이것을 부하 제어회로에 공급하여 증기 제어밸브를 제어함으로써 수행된다. 속도 편차신호는 속도 목표값(요구속도)과 안정상태의 실제속도를 비교하여 만들어진다.

터빈제어계통(Mark V)에는 기본적으로 Close Valves, 100, 800, 1500, 1800rpm 등의 다섯 가지 속도 목표값이 있으며, 60, 90, 180rpm 등의 세 가지 속도증감률이 있어 필요에 따라 이를 적절하게 선택하여 사용한다.([그림 2-49] 참조)

주파수 변화에 대한 출력 변화량을 결정하는 속도조정률(Speed Droop)은 0%에서 100% 까지 임의로 결정된다. 속도조정률이 10%로 설정되면, 터빈/발전기가 계통 주파수 60Hz로 정상 운전 중에 규정 주파수의 +10%인 66Hz로 변할 경우 제어밸브 유량 기준신호(CVR)가 100%에서 0%로 변하고, 주파수가 -10%인 54Hz가 되면 제어밸브 유량기준신호가 0%에서 100%로 변하게 되는 것을 의미한다.



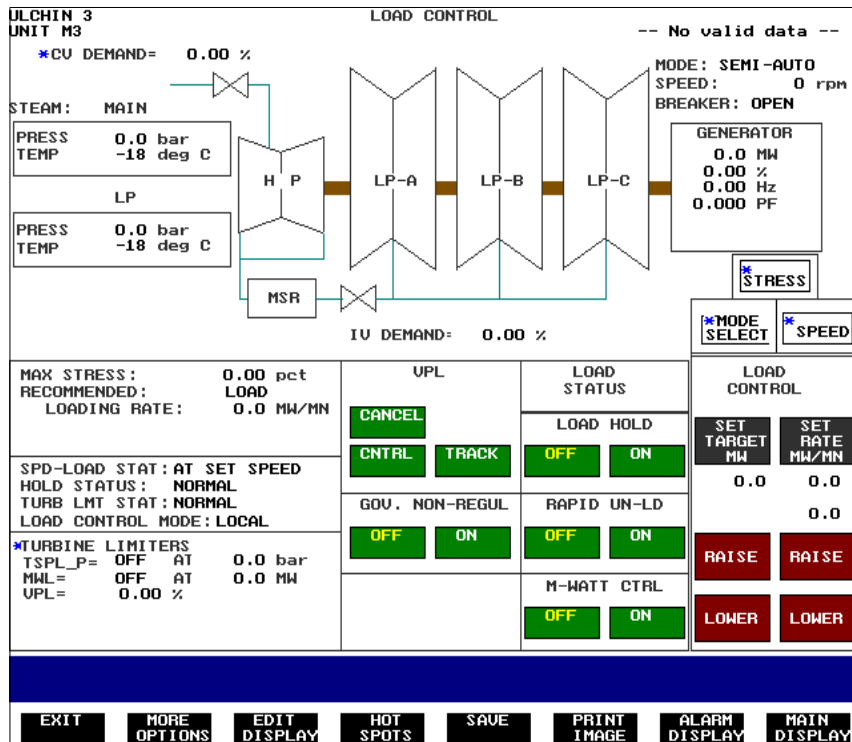
[그림 2-49] Mark V의 속도제어 화면

나. 터빈 부하 제어

부하제어를 위한 부하 목표값은 반자동 모드 및 자동 모드에서 운전원 조작 설비를 이용하여 증감할 수 있으며, 운전원에 의해 기 설정된 값과 출력 목표 상한값(1,162 MWe)에 의하여 제한된다. 또한, 부하감발(Runback/Setback) 회로가 동작하면 출력 기준신호와 부하 목표값도 함께 감소된다.

부하 목표 증감률은 부하 목표값을 변동시키는율을 결정하는 것으로서 출력 운전 시에는 2.5 %/sec, 계통병입을 위한 속도 조절시에는 0.1 %/sec, 계통병입 직후에는 1.2 %/sec, 부하감발회로가 동작할 경우에는 2.2 %/sec로 설정되며, 고정자냉각수 계통 관련 린백 신호가 발생할 경우는 발생 시점의 출력에 따라 증감률이 변화된다.

부하 증감률은 운전원이 자동기동회로(ATS : Automatic Startup System)의 권고값을 참고하여 0 %/min에서 10 %/min 사이에서 설정이 가능하며, 부하기준 신호를 일정한 기울기로 조절하여 부하 기준값(Load Reference)을 산출하는 기능을 한다.



[그림 2-50] Mark V의 부하제어 화면

부하 급감발(Setback) 또는 부하감발(Runback) 신호가 동작할 경우는 2.22 %/sec로, 계통병입 후 역전력 방지 출력까지 출력 증가하는 경우는 +0.833 %/sec로 자동 설정된다. 또한 운전원 조작설비(OIS) 부하 제어화면에서 출력 증감 정지(Load Hold)를 선택한 경우에는 0.0 %/sec가 되어 증발이 불가능하게 된다. ([그림 2-50] 참조)

부하 제어회로에서는 최종신호로서 부하 기준값(Load Reference 혹은 DWR)이 산출되어 유량제어회로의 입력으로 사용된다.

다. 유량제어 및 밸브제어

터빈의 속도·부하 제어는 터빈증기밸브의 개도를 조절하여 터빈에 유입되는 증기유량을 제어함으로써 이루어진다.

고압제어밸브(CV)의 개도 제어를 위해 전자/유압 변환용 3중 코일 서보밸브와

유압 구동부가 사용된다. 각각의 제어밸브에 설치된 서보밸브는 Mark-V의 TMR 제어회로에서 오는 전기적 신호를 받아 제어밸브 구동용 유체의 유량을 제어하고, 유압 구동부에서는 이 유량에 따라 기계적인 힘을 발생시켜서 제어밸브를 개폐한다.

고압제어밸브의 제어를 위한 제어밸브 유량기준값(CVR : CV Flow Reference)은 기본적으로 속도편차값과 부하기준값(DWR)의 합으로 정해지며, 여기에 로터 예열, 고압터빈 1단 압력귀환 허용신호, 주증기 압력제한 비례회로 설정값, 밸브위치 제한신호(VPL : Valve Position Limit) 등과 조합하거나 비교되어 선택된다.

밸브위치 제한신호(VPL)는 증기 유량을 제한하기 위해 밸브를 일정한 열림 상태로 제한하며, 운전 중 전력계통의 주파수 변화에 의해 제어밸브가 갑작스럽게 움직이는 것을 방지하기 위해 사용된다. 각 밸브의 위치는 각 밸브의 구동부에 설치된 LVDR에 의해 검출되어 밸브위치 제어회로의 피드백 신호로 사용된다.

저압제어밸브는 습분분리재열기(MSR)에서 재 가열되어 저압터빈으로 유입되는 증기의 양을 조절하기 위하여 기본적으로 속도편차와 부하목표치에 의해 산출되는 저압제어밸브 유량기준신호(IVR : IV Flow Reference)에 의하여 제어된다. 그러나 저압 제어밸브의 제어신호는 출력부하 불균형(PLU) 또는 저압제어밸브 트리거(IVT) 신호가 발생되면 무효화(Override)된다. 저압조절밸브는 로터 예열 시에는 완전히 닫히게 되지만, 정상운전 중에는 완전 열림 상태를 유지한다.

고압정지밸브(MSV) 4개 중에서 MSV #2 밸브는 주 밸브와 내부의 우회밸브로 구성되어 있으며, 유압제어밸브(서보밸브)를 가지고 있어 제어가 가능하다.

5. 터빈 보호

터빈제어계통은 발전소 운전 중 터빈관련 비정상 신호가 발생할 경우 신속히 터빈/발전기를 정지시켜 터빈/발전기 및 관련 설비의 손상을 방지한다.

터빈정지와 관련된 신호는 터빈제어계통에 3중으로 입력되어 제어기 내에서 선택(Voting) 회로를 거쳐 선택된다. 터빈정지신호가 발생하면 전기적 정지 솔레노이드밸브(ETSV)는 비여자(De-Energize)되고, 기계적 정지 솔레노이드밸브(MTSV)는 여자(Energize)되어 터빈증기밸브들에 공급하던 제어유를 배유시키며, 터빈증기밸브들은

신속히 닫히고 터빈으로 공급되던 증기가 차단되어 터빈은 정지된다.

가. 터빈정지신호 구성

(1) 터빈 베어링 오일 저압력

터빈 베어링 오일펌프 및 오일계통의 이상으로 베어링 오일 압력이 일정 압력 이하가 되면 터빈 로터의 마찰열에 의한 고열로 고진동 및 변형이 발생할 수 있으므로 오일 압력이 0.8 kg/cm^2 이하가 되면 터빈을 정지시킨다.

(2) 주 윤활유 펌프(Main Shaft Oil Pump) 출구 저압력

터빈 회전속도가 1,350 rpm 이상으로 운전 중에 터빈 축에 연결된 오일 펌프의 출구압력이 7 kg/cm^2 이하가 되면 터빈을 정지시킨다.

(3) 터빈밸브 제어유 저압력

터빈에 설치된 증기 정지밸브 및 제어밸브는 터빈밸브 제어유에 의하여 구동된다. 발전소 운전 중 터빈밸브 제어유의 압력이 저하되면 이들 밸브의 제어상태가 불안정하게 되므로 터빈밸브 제어유 압력이 77.3 kg/cm^2 이하가 되면 터빈을 정지시킨다.

(4) 저압터빈 배기 후드 고온도

저압터빈의 배기 불량으로 터빈내부에 증기 흐름이 정체되어 저압터빈 배기후드의 온도가 107°C 이상 상승하면 터빈을 정지시킨다.

(5) 복수기 저진공

터빈 속도가 200rpm 이상에서 복수기 압력이 22.3 "HgVac. 이상이 되면 저압터빈 최종 단 날개의 손상을 방지하기 위하여 터빈을 정지시킨다.

(6) 발전기 고정자 냉각수 저유량, 고온도, 저압력 및 부상 냉각수 저유량

발전기 고정자 및 부싱의 냉각을 위하여 공급되는 냉각수의 유량이 설정치 이하가 되거나 온도가 지나치게 상승하게 되면 터빈 런백신호에 의하여 출력이 감발된다. 그러나 런백신호에 의하여 발전기 출력이 105초 내에 74.2% 이하 또는 195초 내에 19.8% 이하로 감발되지 않으면 터빈정지가 발생한다.

(7) 습분분리재열기(MSR) 고수위

습분분리재열기의 수위가 지나치게 증가할 경우 저압터빈으로 습분이 유입되어

터빈의 회전부에 손상을 유발할 수 있으므로, 수위가 습분분리재열기 중심선에서 +127mm 이상 증가한 상태로 10초 이상 지속되면 터빈정지가 발생한다.

(8) 베어링 고진동

터빈/발전기의 베어링 진동은 Bently Nevada 진동감시설비에 의하여 측정·감시된다. 각각의 베어링에는 진동감지기가 X 및 Y로 2개씩 설치되어 지속적으로 베어링의 진동상태를 감시하고, 베어링의 진동이 설정치 이상이 되면 고진동으로 인한 터빈/발전기의 손상 방지를 위하여 터빈을 정지시키게 된다. 터빈/발전기 고진동에 대한 정지 설정치는 터빈의 회전수에 따라 달라지며, 정격속도 운전 시에는 진동이 0.279μm 이상이 되면 정지신호가 발생된다.

(9) 추력베어링 고마모

터빈 축이 한 쪽 방향으로 지나치게 밀릴 경우 고정익과 회전체의 접촉에 의하여 대형사고가 발생할 수 있으므로 이를 제한하게 되는데, 운전 중 터빈 축이 기준점에서 횡축 방향으로 ±35 mils 이상 움직일 경우 터빈정지신호가 발생된다.

(10) 속도 신호 상실

터빈 제어용으로 사용되는 속도감지기의 불량에 의하여 속도신호가 상실되면 터빈 정지신호를 발생시킨다. 설정치는 제어용 속도신호가 200 rpm 초과하고 보호용 속도신호가 18rpm 이하 또는 제어용속도 신호가 6rpm 이하 시에 보호용 속도신호가 18rpm 이상이 되면 발생한다.

참고로 터빈 속도 센서는 제어용 3개, 보호용 3개 및 예비용이 2개가 설치되어 있다.

(11) 기계적/전기적 터빈 과속도

기계적 과속도 정지장치는 터빈의 프론트 스탠더드(Front Standard) 부분의 터빈 축에 설치되고, 스프링으로 구동되는 원심링으로 구성되며, 터빈 회전속도가 정격의 110% 도달 시 터빈의 비상정지계통(Emergency Trip System)을 직접 작동시킨다.

전기적과속도계통(EOS)은 Mark-V의 <R>, <S>, <T>에 의해서 감시되는 3개의 속도제어용 센서와 독립적으로 3중 구조의 <P> 제어기에 의해 감시되는 3개의 비상 과속도 센서로 구성되어 있다. 3개의 속도신호의 중간 값이 비상 과속도 설정치를

초과하면 터빈정지신호가 발생된다.

전기적 과속도 설정치는 111.5%로 기계적 과속도 설정치보다 약간 위에 설정되어 있어 비상보호 역할을 하고 기계적 과속도 정지계통의 시험을 가능하게 한다.

(12) Customer Trip

Customer Trip 신호에는 원자로 정지와 발전기/주변압기 보호신호에 의한 정지 신호가 있다. 원자로 정지 시에는 터빈으로 유입되는 증기량을 제한하여 1차 측의 냉각을 방지하기 위함이며, 발전기/주변압기 보호신호에 의한 터빈 정지는 부하 탈락에 의한 터빈의 과속을 방지하기 위함이다.

(13) 수동정지

주제어실의 터빈 수동 정지버튼을 누르거나 현장에서 터빈 정지용 Hand Lever를 조작함으로써 터빈의 비상정지가 이루어진다.

나. 출력부하 불균형(PLU : Power Load Unbalance) 보호

출력부하 불균형 장치의 목적은 터빈이 빠르게 가속되어 과속도까지 갈 수 있는 큰 부하감발 조건에서 고압·저압제어밸브를 빠르게 닫기 위한 것으로, 이는 부하상실 사고와 전기계통의 고장 발생을 구분하기 위한 것이다.

PLU 보호동작은 터빈출력이 부하를 최소한 40% 이상 초과하고, 부하가 100%/35msec 이상의 기울기로 상실되면 발생된다. 재열증기압(Reheat Steam Pressure)은 터빈의 출력(Power), 발전기 전류는 부하(Load)를 측정하기 위해 사용된다. PLU 조건이 감지되면 급속동작 솔레노이드밸브(Fast Acting Solenoid Valve)에 의한 고압·저압제어밸브의 닫힘과 함께 부하 기준신호(DWR)는 0"으로 돌아가고 부하목표 기준신호(Target Load Reference)는 2 %/Sec의 기울기를 가지고 무부하 운전점(No Load Value)까지 감소한다. PLU 조건이 순시에 사라지면 부하 목표치는 부하 상실전의 값에 가깝게 유지되고 터빈증기밸브들은 이전의 위치에 가깝게 열린다. PLU 논리는 재열 증기압이 40% 이하로 감소하면 자동적으로 사라진다.

다. 저압제어밸브 Trigger

저압제어밸브 트리거(IV Trigger) 신호는 터빈출력 10% 이상에서 저압제어밸브 기준신호(IVR)와 밸브 위치 측정값과의 편차 중에서 최고값이 10% 이상일 경우에 발

생된다. IVT 신호가 발생하면 저압제어밸브는 급속 닫힘 기능에 따라 빠르게 닫히게 되고, 위치 편차가 사라지면 서보밸브제어에 의하여 정상상태로 복귀한다.

라. 부하감발(Setback/Runback) 회로

터빈출력이 60% 이상인 상태에서 주급수펌프 1대 정지 등에 의하여 원자로출력 급감발(RPCS) 신호가 발생하면, Setback 신호가 발생하여 터빈출력을 600 %/min로 60%까지 감발한다. Setback후 1차 측이 안정되지 않으면 계속해서 Runback 신호가 발생되어 133 %/min 비율로 무부하까지 출력을 감발한다.

또한, 발전기 고정자 전류값이 정격의 19.8% 이상인 상태에서 발전기 고정자 냉각수계통에 비정상 상태가 발생되면 터빈출력을 발전기 고정자 전류값 정격의 19.8% 까지 감발한다. 발전기의 고정자 전류값이 부하 감발 시작 후 105초 경과 시 정격의 74.2% 이상 또는 195초 경과 시 정격의 19.8% 이상일 때는 터빈정지가 발생한다.

6. 터빈 기동 및 운전

가. Mark V 및 TGM 캐비닛 전원 공급

캐비닛 내의 모듈 전원을 켜고 운전원 조작설비와 관련설비, 그리고 Mark V 보조제어반에 정상적으로 전원이 공급되는지 확인한다.

나. 터빈 및 Mark-V Reset

모든 터빈 정지신호가 해소되면 Mark-V의 운전원 조작설비 제어화면에서 “Master Reset”을 실행함으로써 비상정지계통(ETS)이 정상운전 상태로 리셋 된다. 터빈 리셋이 완료되면 저압정지밸브 6개만 열리고 다른 증기밸브들은 닫힌 상태가 된다.

다. 제어 모드 선택

Mark-V를 이용한 터빈 운전 모드는 부하제어(Load Control)방식과 터빈방식이 있다. 부하제어방식은 Local Control, Remote, UMC(Unit Master Control) 모드가 있고, 터빈방식은 자동모드와 반자동모드가 있다. 표준원전에서 Mark-V를 이용한 터빈 제어 시에는 Local 모드 상태에서, TBN 방식을 자동 또는 반자동 모드로 선택하여 사용한다. Remote 모드나 UMC 모드는 터빈을 원격 또는 총괄제어를 위한 것으로 표

준원전에서는 사용하지 않는다.

자동 모드는 ATS(Automatic Turbine Startup)에 의해 터빈 열응력을 계산하여 터빈을 1800 rpm까지 자동으로 속도를 올리고, 계통병입 후에는 부하 설정값과 부하 증발률을 운전원이 설정하면 이것을 상한치로 하여 터빈 열응력이 고려되어 자동으로 출력증발을 한다. 반자동 모드는 운전원이 각종 운전방법 및 설정값을 선택 또는 직접 입력하여 터빈을 제어한다.

라. 로터 및 제어밸브 증기실 예열(Rotor and Chest Prewarming)

로터는 충분한 시간 동안 예열함으로써 취성파괴를 예방할 수 있기 때문에 냉각된 상태에서 기동 시에는 반드시 장시간에 걸쳐 예열을 해야 한다. 로터 예열이 만족스럽게 완료되면 고압정지밸브 #2의 바이패스 밸브를 닫는다.

고압터빈 증공으로의 열 침투(Heat Soaking)시간은 예열 이전의 초기 고압터빈 온도 및 1단 셀의 온도를 목표 값까지 상승시키는데 소요된 시간에 따라 결정된다. 증기실 예열 동안에는 저압정지밸브(ISV)는 열리고 저압제어밸브(IV)는 닫히며, 고압정지밸브 #2의 파이롯트 밸브에 의해 고압터빈이 가압되도록 한다.

마. 터빈 승속

터빈의 정상 기동 및 운전 시에는 Auto 모드로 선택하며, Semi-auto 모드에서는 운전원이 가속률과 가속목표 속도를 선택해야만 가속이 시작된다. 적절한 가속률은 발전소 기동상태에 따라 운전원에 의해 선택되며, 터빈의 냉태, 온태 또는 고온기동에 따라 Slow, Medium, Fast를 이용한다.

바. 계통 병입

Mark V의 발전기 제어패널 계통병입 모드에서 Auto를 선택하면 자동 계통병입이 가능하다. CRT의 Generator Synchronization Display에서 계통병입 과정을 감시하게 되며 자동 모드에서는 터빈이 정격속도에 가까워지면 여자기가 자동으로 기동되고 발전기 단자전압을 정격전압까지 서서히 상승시킨다.

수동으로 계통병입을 하기 위해서는 운전원이 Synchronization 화면의 Synch Mode를 Manual로 선택하고 Speed Match 및 Volt Match를 Manual로 선택하며 계통 전압 및 주파수 보다 약간 높게 조절한다. Synchronization 화면의 Synchroscope가

Fast 방향(시계 방향)으로 서서히 회전하는지 확인하고, Synchroscope가 55분 방향에서 Mark-V의 차단기 투입 또는 주제어실의 계통병입용 핸드스위치를 사용하여 발전기 차단기(GCB)를 투입시켜 발전기를 계통에 병입하게 된다.

사. 출력 증발 및 운전

계통병입 후 출력이 Block Load에 도달하면 Mark V 메뉴에서 부하제어 화면을 선택하여 증발율과 목표값을 설정하고 출력을 증발한다.

원자력교육원

[핵심요약]

1. 터빈제어계통

- 구성기기 : 제어캐비닛, 터빈제어밸브, 비상정지계통
- 터빈정지신호 종류
 - 터빈 베어링 오일 저압력 : 터빈 마찰열 냉각 기능 상실 방지
 - 주윤활유 펌프 출구 저압력 : 터빈 윤활유 압력저하 방지
 - 터빈밸브 제어유 저압력 : 터빈밸브의 불안정한 제어 방지
 - 저압터빈 배기후드 : 터빈 증기 배기불량 방지
 - 복수기 저진공 : 저압터빈 최종 단 날개 손상 방지
 - 발전기 고정자 냉각수 저유량/고온도/저압력, 부싱냉각수 저유량 : 고정자/부싱 냉각기능 저하 방지
 - 습분분리재열기 고수위 : 습분유입으로 인한 터빈 회전부 손상방지
 - 베어링 고진동 : 진동에 의한 터빈 손상 방지
 - 추력베어링 고마모: 고정익과 회전체 접촉 방지
 - 속도신호 상실 : 속도제어용 센서 불량으로 인한 불안정한 제어방지
 - 기계적·전기적 과속도 : 과속에 의한 터빈 손상 방지
 - Customer Trip : 원자로정지와 발전기/주변압기 정지신호 발생시 터빈을 정지
 - 수동정지 : 주제어실 누름버튼/현장 핸드 레버 조작에 의한 터빈정지
- 터빈 증기밸브 종류
 - 고압정지밸브, 고압제어밸브, 저압정지밸브, 저압제어밸브

2. 터빈 비상정지계통

- 터빈밸브로 공급하던 제어유를 신속하게 차단 및 배유시켜 터빈 증기밸브들을 닫음으로써 터빈을 정지시킨다.

3. 터빈 부하속도제어

- 터빈속도제어 : 속도편차신호에 따라 터빈제어밸브를 제어하여 속도조절
- 터빈부하제어 : 부하목표값에 따라 터빈제어밸브를 제어하여 부하조절

[핵심요약]

4. 터빈 기동 및 운전

- 제어 캐비닛 전원공급 상태 확인
- 터빈 리셋 : 터빈정지신호가 사라지고 비상정지계통이 정상으로 복귀
- 제어모드 선택 : 부하제어 모드, 터빈모드 등
- 로터 및 제어밸브 증기실 예열 : 고압정지밸브 #2 사용
- 터빈 승속 : Auto 모드, Semi-auto 모드
- 계통 병입 : Auto 모드, Manual 모드
- 출력 증발 및 운전 :

계통병입 후 출력이 Block Load에 도달하면 부하 목표값과 부하 증발율을 설정하고 출력을 증가시킨다.

원자력교육원

제6절 증기우회 제어계통

[학습목표]

1. 증기우회 제어계통의 구성 및 기능을 설명할 수 있다.
2. 운전제어모드 2가지(조절모드, 급속열림모드)를 설명할 수 있다.

1. 개 요

증기우회 제어계통은 정상운전중 순간적인 터빈 부하감발 또는 터빈정지와 같은 과도현상이 발생하였을 때 사용하는 설비로서 1차측 잉여에너지를 자동으로 제어한다. 이 계통은 원자로출력급감발계통(Reactor Power Cutback System : RPCS, 1차측 출력 제어)과 조화를 이루어 원자로를 정지시키지 않고 1차계통과 2차계통의 에너지 평형상태를 적절히 유지하는 역할을 한다.

터빈출력 15% 이상에서 자동운전 하고 그 이하에서는 운전원이 수동으로 운전을 한다. 원자로 제어계통(Reactor Regulating System : RRS)은 정상운전시 터빈출력의 10% 순간적인 감소 및 분당 5% 연속적인 감소가 발생할 경우 즉시 중성자속을 감소시켜 원자로출력과 원자로냉각재 온도를 정상운전 범위내로 유지할 수 있다. 그러나 이보다 더 큰 출력감소 즉, 터빈측으로 가는 증기의 양이 대량으로 급격히 감소되는 변화가 일어날 경우, 원자로 제어계통만으로는 1차측 과잉출력을 감당할 수 없다. 이때 1차측에 비해 상대적으로 높은 2차측 에너지를 방출시키기 위하여 증기발생기에서 생성된 증기유량의 일부를 복수기(40%)와 대기(15%)로 방출시켜서 2차측(우회증기+터빈증기) 열출력과 1차측 출력(원자로 출력)의 평형을 이루도록 한다.

증기우회 제어계통은 발전소 기동시 1차계통의 온도증가율(가열률)을 적절하게 제어할 수 있는데 이는 증기발생기에 공급되는 급수유량과 동 증기발생기에서 나오는 증기 유량률을 조절하는 것이다. 또한 발전소를 냉각할 경우에도 급수 공급량과 증기의 방출률을 조절하여 1차측 온도 감소율(냉각률)을 제어한다. 증기발생기에서 생성된 증기의 방출률을 조절하는 기기는 공기구동형 밸브를 사용하고 이들 밸브들의 개도를 조절함으로써 가능하다.

2. 설계기준

증기우회 제어계통에서 사용하는 입력신호로는 증기유량, 가압기압력 및 증기압력 신호들이다. 이러한 신호들을 조합·가공하여 제어신호를 만든다. 여기서 만들어진 제어신호는 전류/공기압 변환기를 거쳐 터빈우회 증기량을 조절하는 공기구동형 증기우회 제어밸브를 작동시킨다. 이 계통에 대한 자세한 설계사항은 아래와 같다.

- 가. 증기우회 제어계통의 최대용량은 2차측 터빈출력의 55%에 해당하는 증기유량이며 만약 이 출력을 초과하는 출력 감발시에는 증기우회 제어계통만으로 감당할 수 없으므로 원자로출력급감발계통(RPCS)을 작동시킨다.
- 나. 100% 전출력 운전중 급작스런 터빈정지와 같은 부하감발시에도 원자로 정지와 가압기 및 주증기관에 설치되어 있는 안전밸브를 작동 시키지 않고 발전소 1,2차측 에너지 평형을 이룰 수 있어야 한다.
- 다. 주급수펌프 2대가 동시에 정지되어도 원자로정지와 가압기 및 주증기관에 설치된 안전밸브를 작동시키지 않고 발전소 1,2차측 에너지 평형을 이룰 수 있어야 한다.
- 라. 발전소 기동 및 정지시 원자로냉각재의 온도를 수동으로 적절히 조절할 수 있어야 한다.
- 마. 원자로 정지후, 원자로내 붕괴열로부터 나오는 잔열을 제거하는 역할을 수행하며 가압기 및 주증기관에 설치된 안전밸브를 작동시키지 않고 원자로를 고온대기 상태로 냉각시킬 수 있다.
- 바. 원자로/터빈트립시 증기압력과 냉각재온도는 자동으로 무부하 압력 및 온도로 조절되어 발전소를 고온대기 상태로 안정화시킬 수 있다.
- 사. 증기우회 제어계통은 총 8개의 증기유량 제어밸브로 구성되며, 그 중 6개는 복수기로 가는 증기 제어밸브이고, 나머지 2개는 외부 대기로 가는 증기 제어밸브이다. 이 밸브들은 2개 대기 증기 제어밸브가 나중순서에 열리고 닫히는 순서는 반대로 먼저 닫힌다.

아. 터빈출력 15% 이하에서는 제어봉 자동동작 금지신호(Automatic Motion Inhibit : AMI)를 발생시켜 원자로 제어계통(RRS)에서 오는 제어신호에 따라 제어봉이 자동으로 인출, 삽입되는 것을 금지시킨다.

자. 증기우회 제어계통은 제어봉 자동인출 금지신호(Automatic Withdrawal Prohibit : AWP)를 발생시킨다.

3. 계통설명

가. 계통개요

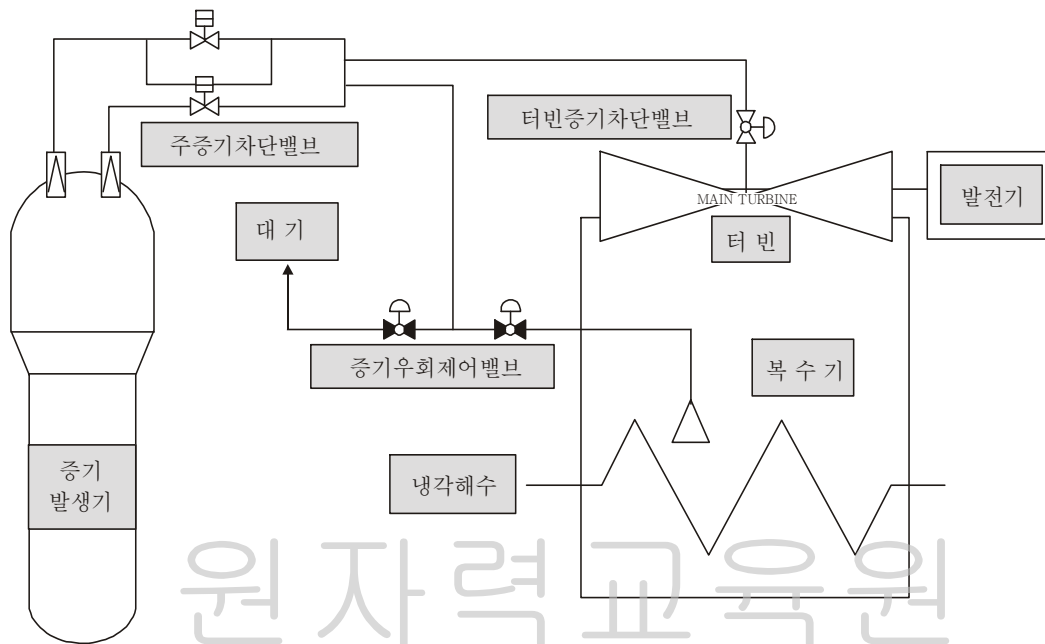
앞에서 증기우회 제어계통에는 8개의 공기 구동형 밸브를 사용하여 터빈에 들어가기 전 증기유량을 방출한다고 설명하였다. 이러한 밸브들은 발전소 계기용 공급계통에서 공급되는 공기압력으로 밸브는 열리고 밸브 몸체에 장착된 스프링의 탄성력에 의하여 닫힌다. 만약, 이 밸브들에게 공급되는 전원이 상실되거나 또는 계기용 공기가 상실되면 동 밸브들은 스프링의 탄성력에 의해 스스로 닫히도록 되어 있는 구조이다. 8개의 밸브들은 모두 증기발생기 출구관에 연결된 주증기관에 설치되어 터빈증기 차단밸브의 전단에서 증기를 우회하도록 설계되어 있다.

증기우회 제어계통의 운전방법에는 2가지 운전제어 모드가 있는데 조절모드(Modulation Mode)와 급속열림 모드(Quick Open Mode)로 구성되어 있으며 이렇게 운전제어 모드를 구분하여 설계하는 것은 2차측 터빈출력 감발의 특성을 감안하여 설계한 것이다.

한편, 증기우회 제어계통에서는 제어봉 자동인출 금지신호(AWP)와 제어봉 자동동작 금지신호(AMI)를 제공한다. 이러한 금지신호들은 증기우회 제어계통이 작동할 때마다 발생되는데 그 이유는 증기유량이 터빈으로 들어가지 않고 복수기 또는 대기로 우회시 제어봉 자동인출과 같은 운전은 오히려 발전소 제어에 방해가 되기 때문에 이를 금지시키는 것이다. 그리고 제어봉 자동동작 금지신호도 터빈정지와 같은 큰 2차 출력감발 시에도 과도한 원자로출력 감발을 방지하고 가능한 높은 원자로출력을 일정하게 유지시키는데 그 이유는 일시적인 고장으로 출력감발후 다시 정상화시 빠른 출력 복구가 가능하도록 하기 위한 것이다.

만약, 터빈 전출력(100%) 감발이 발생하였다면 원자로를 정지시키지 않고 발전소를 안정되게 하기 위해서는 거의 터빈 전출력에 해당하는 대용량 증기를 방출하고 이를 흡수할 수 있는 증기우회계통과 복수기가 필요하다. 이러한 용량요구를 최소화시키기 위해서 원자로출력 급감발계통과 원자로 제어계통이 같이 이용된다.

증기우회 제어계통의 개략도는 [그림 2-51]과 같다.



[그림 2-51] 증기우회 제어계통 개략도

나. 운전제어

증기우회 제어계통은 조절모드와 급속열림모드와 같은 2개의 운전제어 모드를 가지고 있다.

(1) 조절모드(Modulation Mode)

조절모드는 터빈출력 15% 이상에서 증기발생기 압력을 프로그램되어 있는 값으로 자동으로 조절하는데 비교적 작은 출력변화가 일어날 경우에 사용한다. 정상운전시 증기발생기 후단의 증기관헤더에 설치된 증기압력을 계속 감시하다가 출력변화에 따른 헤더 압력신호가 과도하게 증가되면 프로그램된 설정치와 비교한다. 만약, 증기

관의 헤더압력 신호가 프로그램된 설정치의 압력을 초과하는 시점에서부터 설정치와 실제 압력간의 편차 크기에 따라 증기우회 제어밸브의 개도를 조절하고 동 밸브를 통해서 증기발생기에서 나오는 주증기를 복수기 또는 대기로 직접 흘러 보낸다.

단일 부품고장만으로는 증기우회 제어밸브가 열리지 않도록 하기 위해서 동 계통에 독립된 2가지 신호를 사용한다. 2가지 신호로는 증기제어밸브 열림 요구(Demand)신호와 관련 증기우회 제어밸브가 열리는 것을 허용하는 허용(Permissive)신호가 이에 해당한다. 증기우회 제어계통이 작동하려면 요구신호와 허용신호 2개가 동시에 존재하여야만 계통이 작동 가능하고 만약, 2개 신호중 어느 신호든 1개만 발생하면 동작이 안되도록 되어 있는데 이는 고장 또는 비정상 동작이 발생하여도 우발적인 과도현상을 미연에 방지하기 위한 것이다.

조절모드에 사용되는 신호들은 아래와 같다.

(가) 주증기 헤더압력 설정치(SP1, SP2)

주증기 헤더압력 설정치는 현재 발전소가 원하는 출력기준치를 제공하는 것으로 출력에 비례하는 증기유량률 기준으로 프로그램화되어 있다. 이 설정치를 조절하여 특정 위치에 설정한다는 것은 그 압력설정치에 증기발생기의 증기압력을 유지시키고 하는 것이며 이때 증기압력은 터빈출력에 비례하여 변한다. 예로, 터빈출력이 높으면 증기유량이 많을 것이고 출력이 낮으면 상대적으로 증기유량은 적다. 이때 증기발생기와 터빈 사이에 증기유량에 따라 주증기관의 압력변화는 비례적으로 변화하는데 증기유량이 많으면 압력은 감소하고 증기유량이 적으면 이와 반대로 변한다.

헤더압력 설정치 프로그램에서 나온 신호는 합산기(Summer)에서 가압기압력과 합해지는데 이는 냉각재계통에서 생기는 과도상태를 미리 예측하여 빠르게 응답코자 함이다. 즉, 가압기 압력변화에 따라 설정치 프로그램을 올리고, 내리는데 1차측 압력이 1psi 올라가면(내려가면) 설정치는 2.5psi 내려가서(올라가서) 최대 100psi까지 변환될 수 있다.

(나) 밸브 요구신호(Main Control Demand)

주증기관 헤더압력신호, 압력설정치 및 가압기 압력신호는 합산한 후 나오는 출력신호는 주제어기로 들어간다. 여기서 제어기 설정치와 (가)항에서 나온 신호 값과

의 오차신호가 바로 터빈을 우회시켜야 할 증기제어 요구 값인 주제어기 요구신호'가 된다. 이후 밸브요구 프로그램으로 들어간다.

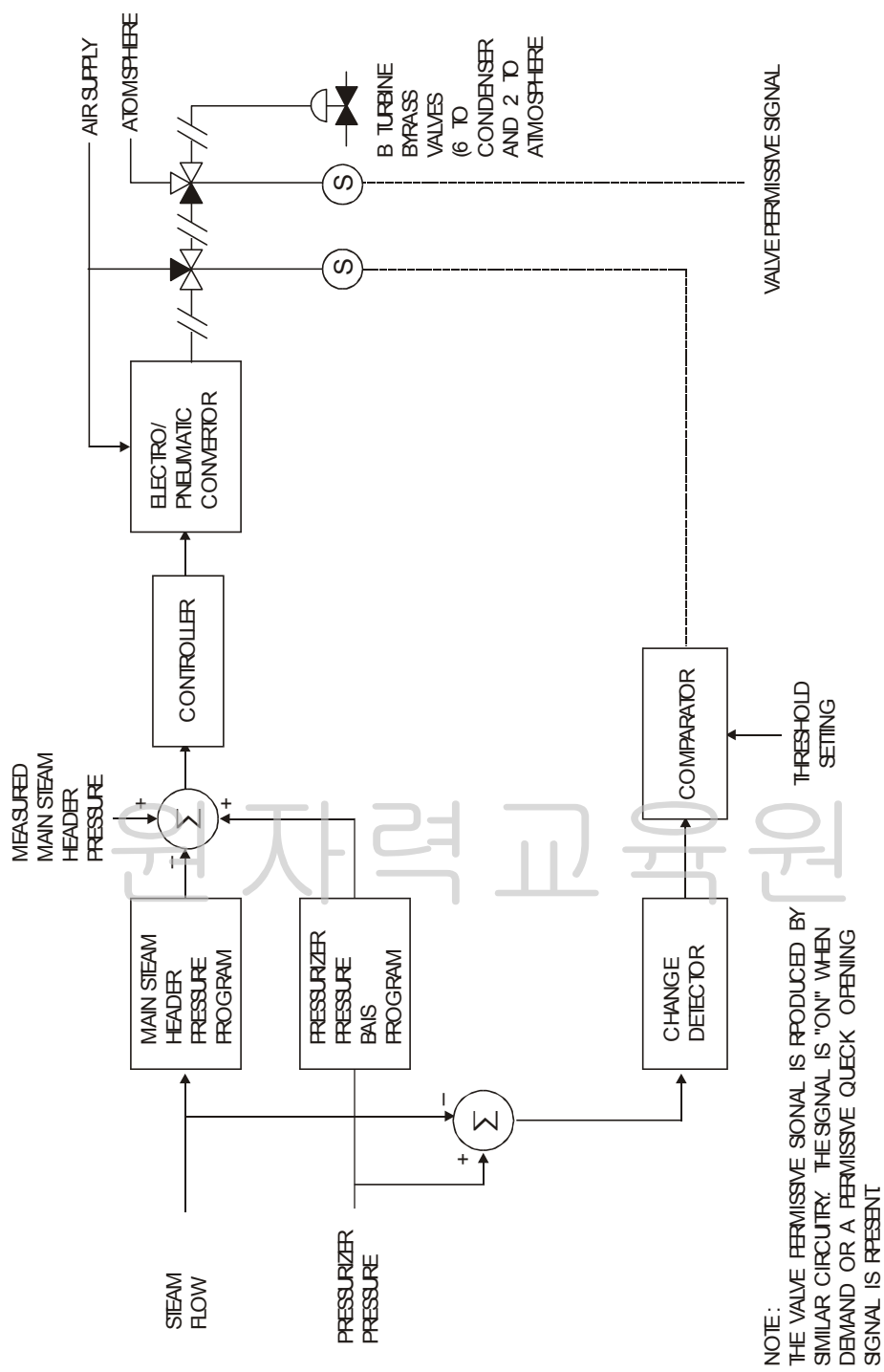
(다) 밸브요구 프로그램 (Valve Demand Program)

주 제어기의 출력신호는 밸브요구 프로그램 입력신호로 들어간다. 여기에는 각기 다른 5개의 밸브 프로그램으로 입력되는데 이것은 증기우회밸브를 요구량에 따라 연속적으로 열리게끔 되어 있어서 밸브 프로그램 1의 출력은 1번 밸브를, 밸브 프로그램 2의 출력은 2번 밸브를, 밸브 프로그램 3의 출력은 3, 4번 밸브를, 밸브 프로그램 4의 출력은 5, 6번 밸브를, 밸브 프로그램 5의 출력은 7, 8번 밸브를 각각 열게끔 되어 있다.

(라) 밸브허용 요구신호

밸브허용 요구신호는 증기우회 제어밸브가 열릴 수 있는 조건이 될 경우에 발생하는 것으로 밸브제어 요구신호와 같이 사용되어지는데 이는 단일부품 고장개념을 고려하여 설계된 것이다. 허용요구신호는 밸브조절 요구신호보다 먼저 발생되고 또한 나중까지 남아있게 되는데 이는 허용신호에 $\Delta P(1.4 \text{ kg/cm}^2)$ 의 입력이 인가되어 설정치가 이 만큼 낮아지는 것이다.

원자력교육원



[그림 2-52] SBCS 블록선도

(2) 급속열림모드(Quick Open Mode)

급속열림(Quick Open) 기능은 조절모드(Modulation Mode)에 비해 상대적으로 큰 출력변화가 일어날 경우에 사용되는데 이것은 1,2차간에 출력차이가 큰 경우 빠른 안정을 하지 않으면 1차측 과잉에너지에 의한 계통온도와 압력으로부터 위험한 결과를 초래할 수 있다. 이를 위해서 조절요구를 우선(Override)시키고 1초 이내에 증기우회 제어밸브를 개방하도록 제어한다.

(가) 급속열림(Quick Open) 요구신호

급속열림(Quick Open) 회로는 X_1, X_2, Y_1, Y_2 의 4가지 요구신호가 있는데 X_1, X_2 는 우회밸브 1~4를 Y_1, Y_2 는 터빈 우회밸브 5~8를 각각 열게끔 되어 있다. 또한 증기발생기 1의 증기유량 회로에서 급속열림(Quick Open) X_2, Y_2 신호가 발생되는데 합산기(Summer)에서 가압기 압력신호와 마주친다. 여기서 가압기압력이 크게 증가하면 급속 열림신호가 증가하고 가압기압력이 크게 감소하면 급속 열림신호가 감소하는 바이어스 신호가 만들어진다.

급속열림 요구신호는 자동인출 금지 논리, 복수기 연동시험 블럭논리, 자동허용 논리와 각 밸브 논리 등으로 제공된다. 실제 신호발생시 밸브 1~4는 급속열림 요구시 동시에 열리게 되고 밸브 5~8은 설정치가 보다 높기 때문에 1~4보다 나중에 열리게끔 되어 있다.

(나) 급속열림(Quick Open) 방지회로

급속열림 신호가 존재하더라도 증기 우회밸브가 열리지 않은 경우는 아래와 같다.

① 원자로가 트립된 직후에 냉각재 평균온도(T_{avg})가 낮을 때이다.

이 경우에는 출력이 낮은 상태에서는 1차측이 열을 충분히 흡수할 수 있는 용량을 갖고 있는데다가 밸브를 빨리 움직일 경우 영출력으로 안정되기가 어려워지기 때문이다.

② 급수펌프가 1대 상실된 직후인데, 그 당시 출력이 75% 이상일 때 증기우회 제어계통이 발생할 경우 현재 급수펌프 정지에 따른 원자로출력 급감발계통이 동작되어 원자로는 물론, 터빈출력까지 감소되었는데 추가로 증기우회 제어계통의 급속

개방시 원자로냉각재가 과냉각될수 있기 때문에 이를 방지하기 위한 것이다.

(3) 복수기 연동신호

복수기가 우회 증기유량을 받을 조건이 되지 않을 경우에 증기우회 제어밸브를 열지 못하게끔 하여 터빈과 복수기를 보호하는데 목적이 있다.

(4) 자동 인출금지(Automatic Withdrawal Prohibit)

증기우회 제어밸브가 자동으로 개방되는 요구조건이 있다는 것은 1차계통의 에너지가 과도하다는 증거이므로 원자로출력을 증가시키지 않기 위해서 자동인출금지 신호(AWP)를 제어봉 구동장치 제어계통(CEDMCS)으로 보내 원자로 제어계통(RRS) 요구신호 응답으로서 제어봉 인출을 차단하여 원자로 출력 상승을 방지해 준다.

(5) 자동 동작금지(Automatic Motion Inhibit)

증기우회 제어계통에는 제어봉 자동 동작금지(AMI)라는 회로가 있어서 발전소를 신뢰성 있게, 운전할 수 있도록 되어 있다. 터빈부하가 제어봉 자동 동작금지(AMI) 허용 설정치보다 떨어졌을때 제어봉 자동제어를 금지하는 어떤 원자로출력준위를 운전원이 설정할 수가 있다.

그러나 원자로 출력이 증기우회제어밸브의 용량보다 더 클 때는 제어봉 동작이 자동으로 차단되는 것을 방지해야 하기 때문에 자동 동작금지 설정치(AMI)는 밸브 용량에 제한을 받는다. 이것이 바로 자동 동작금지 출력인데 수동설정치와 2차계통 용량중 적은 값이 되어 이 출력보다 낮을 때에 자동 동작금지신호가 발생된다. 한편, 자동동작 금지신호는 원자로 제어계통(RRS) 자동운전의 범위인 원자로 출력 15% 미만에서는 항상 발생하게 되어 있다.

자동 동작금지회로의 1차적인 목적은 일시적인 문제로 터빈 트립이 되거나 소내 부하까지 부하 급감발이 되어 빠른 시간 내에 복구될 수 있는 상황에서 원자로출력을 자동적으로 계속 유지하는데 있다. 이런 관점에서 부하감발이 일어날 경우 초기 원자로출력이 자동 동작금지 문턱값보다 낮다면 제어봉의 삽입, 인출이 방지된다.

그렇지 않다면 원자로출력이 자동 동작금지 문턱값보다 적어질때까지 계속 움직이게 되는데 어느 경우이든 터빈 우회밸브가 터빈추종 제어모드로서의 역할을 충분히 하게 된다.

[핵심요약]

1. 기능

- 원자로출력 급감발계통, 원자로 제어계통 등과 함께 1차측 잉여에너지 자동 제거
- 발전소 가열 및 냉각시 원자로냉각재계통의 온도 수동제어수단 제공
- 증기우회 요구신호 발생시 제어봉 자동인출 금지신호(AWP) 발생
- 원자로출력 15% 이하시 제어봉 자동동작 금지신호(AMI) 발생
- 터빈부하가 15% 이하로 감소되고, 증기우회 제어계통이 원자로출력 감당시 제어봉 자동동작 금지신호 발생

2 구성 및 우회용량(증기발생기에서 생성된 증기의 총 55% 우회 가능)

- 복수기측 우회밸브 6개(우회용량 : 40%)
- 대기측 우회밸브 2개(우회용량 : 15%)

3 운전제어모드 2가지

- 조절모드
 - 1차계통에 비교적 작은 과도상태 발생시 1차측에 발생된 잉여에너지 제거
 - 과도상태 크기에 따라 밸브개도 순차 조절
 - 부적절하게 개방되는 단일고장을 방지하기 위하여 요구신호 및 허용신호 사용
- 급속열림모드
 - 1차계통에 비교적 큰 과도상태 발생시 1차측에 발생된 잉여에너지 제거
 - 조절모드 제어범위를 초과한 큰 과도상태 발생시 조절모드에 우선
 - 급속열림모드 용량을 초과하는 부하감소시 원자로출력 급감발계통에 작동 요구신호 발생
 - 요구신호 발생시 1초 이내 밸브 개방
(그룹 X : 1~4번 밸브 개방, 그룹 Y : 5~8번 밸브 개방)

4. 복수기 사용가능 연동신호

- 터빈 및 복수기를 보호하기 위한 연동
- 연동신호 구성 : 복수기 진공도, 순환수펌프 운전대수

제7절 복수 및 주급수계통

[학습목표]

1. 복수계통의 기능 및 구성기기에 대해 설명할 수 있다.
2. 주급수계통의 기능 및 구성기기에 대해 설명할 수 있다.
3. 복수 및 주급수계통의 설계기준에 대해 설명할 수 있다

1. 개 요

복수 및 주급수 계통은 증기를 응축시켜 응축된 물을 수집하고, 이를 가열, 가압하여 증기발생기에 공급한다. 복수 및 주급수 계통은 발전소 기동 및 정상운전시에 증기발생기 내에 적당한 급수량을 유지시킬 수 있다. [그림 2-53]은 2차계통 개략도이다.

가. 설계기준

(1) 안전설계기준

- (가) 주급수관파단사고가 원자로냉각재의 압력경계에 최소한의 영향을 주도록 설계된다.
- (나) 주급수계통은 주급수 공급배관의 파단사고가 원자로 안전정지를 방해하지 않도록 설계된다.
- (다) 주급수 격리밸브를 포함한 격리밸브실 내의 배관에서부터 증기발생기 입구 노즐까지의 배관은 안전정지지진(SSE)의 영향을 견디도록 설계된다.
- (라) 안전성관련 기기 및 배관은 고에너지 및 중에너지 배관 파단, 타격 및 분사 충돌(Jet Impingement)의 영향에 대해 보호되도록 설치, 설계되어야 한다.
- (마) 복수 및 주급수 계통은 태풍, 홍수 및 지진 등과 같은 유해 환경 사고가 계통의 안전기능을 저해하지 않도록 설계되어야 한다.
- (바) 계통에 공급되는 소외전원상실이 원자로의 안전정지를 방해하지 않아야 한다.
- (사) 주급수계통은 수격현상의 발생을 억제하고 그 영향을 감소시키도록 설계되어야 한다.

(2) 출력운전 설계기준

- (가) 복수 및 급수 계통은 증기발생기 배수 혹은 건식휴관 후 재충수를 포함한 모든 운전기간 중에 증기발생기에 요구되는 온도 및 압력으로 급수를 공급하도록 설계된다.
- (나) 추기 배관 및 급수가열기는 터빈으로의 물의 유입 가능성을 최소화하고 추기 계통에 함유된 에너지에 의한 터빈 과속을 제한하도록 설계된다.

2. 복수 계통(CD)

복수계통은 증기싸이클에서 배출되는 증기를 복수기에서 응축시키고, 이를 온수조(Hotwell)에 수집하여 급수계통에 이송하는 기능을 갖는다.

복수계통은 [그림 2-54]와 같이 구성되며, 주요 구성기기는 다음과 같다.

- 주복수기
- 복수 펌프
- 복수 탈염 설비
- 저압 급수가열기
- 탈기기

그리고, 복수기에서 급수계통으로 물을 이송하는 과정에서 아래와 같은 보조기능을 갖는다.

- 복수정화 탈염기에서 복수 정화
- 화학약품 주입으로 복수 수질조건 개선(예 : NH_3 , N_2H_4 주입)
- 저압 급수가열기에서 복수온도 상승
- 터빈증기밀봉계통, 증기분사 공기추출기에서의 배출증기를 냉각
- 저압터빈 배기후드의 온도 조절을 위한 살수기능
- 탈기기에서 축적된 산소와 불응축성 가스제거



가. 주복수기(Main Condenser)

주복수기는 증기싸이클의 열제거원이다. 정상운전 중에 주복수기는 저압터빈 배출증기, 주급수펌프 터빈 배출증기, 증기발생기 취출수 및 터빈우회증기를 응축시킨다. 또한 주복수기는 증기싸이클에서의 기타 배출증기 및 배수에 대한 집합점이다.

주복수기는 단일 압력, 단일 유로, 표면 냉각식으로 3개의 셸로 구성된다. 각 셸은 각 저압터빈의 아래에 위치하며, 셸 내부에서 튜브의 방향은 터빈 발전기의 회전축과 수직한다.

복수기 셸은 양측으로 분할된 수실을 갖는다. 각 셸에는 수실과 연결되는 2개의 관다발이 설치된다. 또한 각 셸의 하부에는 분할판에 의해 길이 방향으로 분리된 2개의 온수조가 있다. 복수펌프는 이 온수조에서 흡입을 취한다. 복수기 셸은 터빈건물 운전층 아래에 위치하며 터빈건물 기초 위에 지지된다.

터빈의 증기 배출부와 복수기 셸의 증기 유입부 사이는 신축 이음관(Expansion Joint)으로 연결되며, 3개의 셸의 증기영역은 압력 평형관으로 연결된다.

각 복수기 셸의 목(Neck) 부분에는 2개의 저압급수가열기가 설치된다. 3개의 셸의 증기영역은 압력 평형관으로 연결된다.

각 복수기에는 온수조의 수위제어 및 복수 시료채취를 위한 배관이 설치된다.

정상운전 중에 저압터빈의 배출증기는 터빈 케이싱의 개구부를 통해 복수기로 직접 하향 유입되어 응축된다.

또한 복수기는 급수가열기 배기 및 배수, 주급수펌프 터빈의 배출증기, 터빈증기 밀봉계통의 배수와 같은 기타 배기 및 배수도 받아들인다.

발전소 정지 후에 초기 냉각기간 중에는 복수기는 터빈우회증기계통을 통해 원자로냉각재계통의 잔열을 제거한다. 터빈우회증기계통을 통해 복수기로 유입되는 주증기 유량은 정격 주증기 유량의 약 40%까지이며 우회증기는 분사 모관(Spray Header)을 통해 복수기 튜브의 상부로 분사된다. 유입된 증기는 터빈 배압이 경보 설정치를 초과하거나 터빈 배출부 온도(Turbine Exhaust Temperature)가 허용치 이상으로 되는 일 없이 처리된다.

우회증기의 압력은 복수기의 분배관(Distribution Manifold)에 유입되기 전에 적

절히 강하되며, 분사관(Spray Pipe)에 의해 증기는 튜브에 직접 충돌되지 않는다.

복수기의 관판(Tubesheet)은 해수의 누설유입을 최소화하도록 설계되어 있으며, 복수기 내부로 해수가 누입되는 경우에도 급수의 화학처리로 수질이 허용치 내에 있으면 복수기를 계속 운전할 수 있다. 따라서 해수의 누설 유입량이 불순물을 제거하고 급수수질을 유지시키는 복수탈염설비의 처리능력 안에 있으면 복수기를 순환수 정격 유량으로 운전할 수 있다.

해수의 누입량이 복수탈염설비의 처리용량을 넘으면 터빈 출력을 적정히 감소시키고 해당 온수조 측에 공급하는 순환수 입출구 밸브와 온수조 격리밸브를 닫아 해당 온수조를 격리시킨다.

복수기 내로 순환수의 누입이 발생하면 각각의 온수조에서 배출되는 응축수의 수질을 감시하여 순환수 누입을 검출하고, 주제어실에 정보를 올리게 된다. 이 정보를 이용하여 누설이 발생한 관다발을 가려낸다.

누설부의 정비를 위해 누설되는 관다발과 관련 수실을 격리하여 순환수의 공급을 차단한 후에 누설되는 튜브를 수리하거나 막는다.

증기발생기의 일차측에서 이차측으로 튜브누설이 있는 경우에는 증기발생기 내에 방사성오염물이 존재하게 된다. 정상운전 중에는 복수기에는 수소가스가 유입되지 않으나 증기발생기 튜브누설이 있을 때는 소량의 수소가스가 복수기로 유입된다.

온수조의 수위는 자동으로 제어되어 보충수 유입 및 복수 유출이 이루어지면서 정상 수위가 유지된다. 온수조가 저수위가 되면 보충수 제어밸브(Makeup Control Valve)가 열려 복수저장탱크로부터 온수조로 복수가 유입되며, 온수조 수위가 정상운전 범위로 상승하면 밸브는 잠긴다. 온수조가 고수위가 되면 복수펌프의 토출측(Steam Packing Exhauster의 하류)에 있는 복수배출 제어밸브(Condensate Rejection Control Valve)가 열려 복수저장탱크로 복수를 배출시킨다. 온수조 수위가 정상운전 범위로 떨어지면 배출이 중지된다.

복수저장탱크로의 복수배출은 복수가 높은 전도도를 나타낼 때 수동으로 정지시킬 수 있다. 이 운전조작으로 복수기 튜브 손상시 오염물을 복수저장탱크로 이송시키는 것을 방지할 수 있다.

터빈 배기에 함유된 누입 공기와 불응축성 개스는 복수기 내부에 모여서 복수기 진공계통을 통해 제거된다.

복수기의 온수조가 파열되어도 복수의 범람은 발전소 안전정지 기능에 저해가 되지 않는다. 일차 및 이차 보조건물로의 접근통로는 터빈건물 기준면에서 충분히 위에 있어 이들 건물로 복수가 유입되지 않는다. 또한 터빈건물 내에는 안전관련 기기들이 없기 때문에 안전관련 기기들이 영향을 받지 않는다.

복수기에는 복수기진공계통이 설치되어 복수기 내부의 불응축성 개스를 지속적으로 제거함으로써 복수기 셀측은 진공이 형성되고 또한 유지된다.

복수기진공계통은 각 33 1/3% 용량의 4대의 기계식 진공펌프(Mechanical Vacuum Pump)와 100% 용량의 1대의 증기분사식 공기추출기(Steam Jet Air Ejector)로 구성된다. 초기 발전소의 기동시에 복수기의 진공을 형성하기 위해서 터빈 발전기는 터닝기어로 회전시키고, 터빈 축밀봉을 형성하며, 그 후 모든 진공펌프가 가동되어 복수기에서 공기를 제거한다. 정상운전 시에는 증기분사식 공기추출기가 복수기 진공을 유지하기 위해 불응축성 개스를 제거한다.

복수기 압력이 5 inchHga로 상승하면 복수기 고압경보가 주제어실에 발생한다. 만일 복수기진공계통이 복수기 압력을 7.5 inHga이하로 유지하지 못하면 터빈은 정지된다.

복수기진공계통은 터빈우회증기계통이 운전되는 경우에도 불응축성 개스를 제거하도록 설계된다. 복수기진공계통의 오동작이나 복수기가 기능 정지된 경우에 원자로 냉각재계통에서의 열제거는 주증기 대기방출밸브(MSADV)에 의해 수행되고, 원자로 냉각재계통의 압력 온도가 허용된다면 정지냉각계통(SCS)에 의해 수행된다.

증기발생기에서 2차측으로 누설을 감시하기 위해 증기분사식 공기추출기와 기계식 진공펌프에 의해 방출되는 습분증기 혼합체와 불응축성 개스는 10 CFR 50 부록 A 일반설계기준 60 및 64 에 따라 제어되고 감시된다. 방출기체가 고방사능시에는 승압펌프(Booster Pump)에 의해 격납건물 정상 배수조로 배출된다.

주복수기의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 형식 : 단일압력, 표면식 열교환기

- 수량 : 3대의 셀, 2대의 수평식 관다발/셀, 2대 온수조/셀
- 용량 : $1.5795 \times 10^9 \text{kcal/hr}$
- 순환수 유량 : $178.8 \times 10^3 \text{m}^3/\text{hr}$
- 순환수 온도상승 : 9°C (순환수 입구온도 21.4°C 기준일 때)
- 복수기 압력 : 38.1mmHg (1.5 inHg)
- 응축 표면적 : $102,193\text{m}^2$
- 순환수 설계압력 : 완전진공
- 재질 : 튜브-티타늄, Shell-탄소강

나. 복수 펌프(Condensate Pump)

복수 펌프는 주복수기 온수조에서 복수를 흡입하여 탈기기로 공급하는 기능을 가진다. 복수 펌프는 전동기 구동, 50% 용량의 수직 원심형 펌프로서 3대가 설치되고, 전후단에는 공통 입출구 모관(Common Suction and Common Discharge Header)이 설치된다.

정상운전시 2대의 펌프가 운전되며, 1대의 복수펌프가 비상정지 시에 대기펌프가 자동으로 기동한다. 복수펌프는 주복수기 온수조에서 복수를 흡입하여 복수탈염계통, 증기분사 공기추출기의 중간 및 후단 냉각기, 터빈증기밀봉계통의 밀봉증기 응축기 및 저압 급수가열기를 거쳐 탈기기 및 탈기기 저장탱크로 복수를 공급한다.

그리고 복수펌프 후단의 복수는 복수펌프나 주급수펌프, 그리고 터빈건물의 각종 밸브들, 복수기 진공파괴 방지관련 장치의 밀봉수로 공급되는 데, 밀봉수는 밀봉역할을 한 후에 밀봉수수집탱크(Gland Seal Water Collection Tank)로 수집되어 수위제어 밸브로 설정된 수위를 유지하면서 주복수기로 회수된다.

복수펌프의 자동정지신호는 다음과 같다.

- 토출밸브가 완전개방되지 않을 때
- 흡입밸브가 완전개방되지 않을 때
- 4개 또는 그 이상의 온수조 수위지시계가 저-저수위를 지시할 때
- 온수조의 토출밸브가 2개미만으로 개방될 때

복수펌프의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 형식 : 수직 원심형, 4단 펌프
- 수량 : 3대
- 정격 유량 : $2,164.5\text{m}^3/\text{hr}$ ($9,530\text{gpm}$)
- 총양정 : 335.28m
- 최소 재순환유량 : $908\text{m}^3/\text{hr}$ (400gpm)
- 정격 속도 : 1,195rpm
- 전동기 용량 : 3,800hp ($2,834\text{kW}$)

다. 복수탈염계통(Condensate Polishing System)

복수탈염계통은 복수로부터 용해성 및 현탁성 불순물을 제거하여 탈염수의 수질을 제한치 이내로 제한한다. 이 계통은 복수계통에서 공급되는 전 복수 유량을 연속적으로 처리할 수 있도록 설계된다. 그러나 이 계통은 전 유량, 부분 유량, 우회 모드에서 운전될 수 있다. 또한 이 계통은 기동시마다 “채순환 세정”모드 운전으로 2차 계통수에서 부식생성물을 제거하도록 설계된다.

복수탈염계통은 탈염계통과 외부수지 재생계통으로 나뉜다. 이 계통은 5개의 병렬구조의 양이온 교환탑과 후단에 5개의 병렬구조의 혼상이온 교환탑으로 구성된다. 1개의 양이온 교환탑과 1개의 혼상이온 교환탑으로 구성되는 각 계열은 전 복수유량의 1/4을 처리하는 용량을 가진다. 나머지 1계열은 예비로 대기상태가 된다.

운전중인 교환탑내 수지의 성능저하시 예비 교환탑은 세정(Flushing) 후에 운전된다. 수지의 성능이 저하된 교환탑은 운전정지 후에 수지를 외부수지재생계통으로 이송하여 재생한다. 수지 혼합 및 저장탱크와 양이온 재생 및 저장탱크에 저장되어 있는 이미 재생된 예비 수지는 빈 교환탑들로 이송되어 예비 상태에 놓이게 된다.

성능 저하된 수지는 재생된 후에 다른 탈염탑 수지가 소모되었을 때 사용되기 위해 수지 혼합 및 저장탱크와 양이온 재생 및 저장탱크로 이송된다.

양이온과 혼상 이온 교환탑에는 각각 별도의 재생탱크가 설치되어 있다. 양이온 교환탑의 재생계통은 2개의 양이온 재생 및 저장탱크로 구성된다.

혼상 탈염탑 재생계통은 수지분리 및 양이온 재생탱크, 음이온 재생탱크, 수지

혼합 및 저장탱크, 중간수지 저장탱크를 포함하는 4개의 용기로 구성된다.

재생 절차는 운전자의 수동조작으로 시작한 후 자동으로 재생된다. 또한 재생 계통은 황산과 가성소다 저장설비, 희석수 공급, 고온수 탱크 그리고 각 탈염탑의 상태뿐만 아니라 재생 공정을 감시하는 제어반을 포함한다.

재생 폐기물은 복수탈염 배수조로 배출되고, 폐수처리를 위하여 화학 폐수 수집조를 거쳐 중합폐수처리장으로 이송된다. 복수 탈염설비 배수조 폐기물의 방사능 수준이 규정치를 넘으면 폐기물은 복수탈염계통의 화학약품저장탱크에서 주입되는 가성소다 또는 황산으로 화학폐수 수집조에서 중화(pH 5.8 ~ 8.6)가 완료된 후 액체방사성 폐기물계통으로 이송된다.

폐기물의 pH는 폐기물이 고체방사성폐기물계통의 농축탱크로 이송되기 전에 액체 방사성폐기물계통의 총 용해성 고형물 탱크, 증발기공급수탱크 및 증발기에서 제어된다.

라. 저압 급수가열기(Low Pressure Feed Water Heater)

저압 급수가열기는 복수의 온도를 증가시키는 기능을 가지며, 3대의 급수가열기가 1계열을 형성하며, 3계열(A, B, C계열)로 구성된다. 각 계열의 최대용량은 50%이며 정상운전 중에는 계열당 33.33%씩 분담하여 운전된다.

1번 및 2번 저압 급수가열기는 주복수기의 목(Neck)안에 설치되며, 3번 저압 급수가열기는 외부에 수평으로 설치된다. 그리고 3번 저압 급수가열기의 후단에 설치되는 탈기기는 4번 저압 급수가열기로도 칭한다.

3계열의 저압 급수가열기의 각 계열은 전후단에 전동기구동 차단밸브가 설치되어 있고, 전 계열을 우회하는 우회 배관이 설치된다. 차단밸브에 의해 한 계열이 폐쇄되면 나머지 2계열이 각각 50%의 복수 유량을 감당한다. 3계열 중에 2계열이 폐쇄되면 저압 급수가열기 우회밸브가 자동 개방되어 나머지 1계열의 저압 급수가열기와 각각 50%의 복수 유량을 담당하게 된다.

3번 저압 급수가열기 셀에서의 배수는 2번과 1번 저압 급수가열기 셀을 거쳐서 주복수기로 보내진다. 또한 각 저압 급수가열기는 주복수기로 직접 배수할 수 있는 비상 배수관을 가지고 있다.

다음은 각 저압 급수가열기의 가열원으로 사용되는 추기 배열상태이다.

먼저 1번 저압 급수가열기에는 저압 터빈 13단에서 배출되는 추기가 공급되는 데, 1A 저압 급수가열기에는 저압 터빈 A의 추기가 8개의 배관으로 공급되고, 1B 저압 급수가열기에는 저압 터빈 B의 추기가 8개의 배관으로 공급되며, 1C 저압 급수가열기에는 저압 터빈 C의 추기가 8개의 배관으로 공급된다.

2번 저압 급수가열기에는 저압 터빈 11단에서 배출되는 추기가 공급되는 데, 2A 저압 급수가열기에는 저압터빈 A의 추기가 4개의 배관으로 공급되고, 2B 저압 급수가열기에는 저압 터빈 B의 추기가 4개의 배관으로 공급되며, 2C 저압 급수가열기에는 저압 터빈 C의 추기가 4개의 배관으로 공급된다.

3번 저압 급수가열기에는 저압 터빈 10단에서 배출되는 추기가 공급되는 데, 3A 저압 급수가열기에는 저압 터빈 A의 추기가 2개의 배관으로 공급되고, 3B 저압 급수가열기에는 저압 터빈 B의 추기가 2개의 배관으로 공급되며, 3C 저압 급수가열기에는 저압 터빈 C의 추기가 2개의 배관으로 공급된다.

주복수기에서 저압 급수가열기와 탈기기를 거친 복수는 급수승압펌프로 보내어진다.

저압 급수가열기들의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 형식 : 수평식 U-튜브형
- 수량 : 3대/계열 × 3계열
- 재질 : 튜브- 스테인레스강, Shell- 탄소강
- 열전달 용량
 - 3번 급수가열기 : 22.33kcal/hr
 - 2번 급수가열기 : 39.87kcal/hr
 - 1번 급수가열기 : 35.63kcal/hr

마. 탈기기(Deaerator)

탈기기는 직접 접촉식 열교환기이며, 저압터빈 9단에서 1개의 배관으로 추기증기를 공급받아 복수를 가열 및 혼합하여, 복수 중에 함유된 용존산소 및 불응축성 개스를 제거함으로써 계통의 부식을 방지하는 역할을 한다. 탈기기는 추기증기 외에 보조

증기계통에서도 가열원을 공급받을 수 있다.

탈기기의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 형 식 : 분사형-트레이형의 결합형태, 수평식 실린더형
- 수 량 : 1대
- 분사밸브 : 266개
- 트 레 이 : 1440개

탈기기에서 가열 및 탈기된 복수는 하부에 설치된 탈기기저장탱크(Deaerator Storage Tank)에 모여 주급수계통으로 공급되며, 탈기기저장탱크는 급수승압펌프 및 기동용급수펌프에 흡입수두를 제공한다.

탈기기저장탱크의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 형 식 : 수평 실린더형
- 수 량 : 2대
- 저장 용량 : 567m³(정상수위이하 기준)

3. 주급수 계통(FW)

주급수계통은 복수계통의 탈기기저장탱크에서 복수를 흡입 받아 고압 급수가열기를 거쳐 증기발생기로 급수를 공급하여, 증기발생기의 수위를 일정하게 유지시키는 역할을 한다.

주급수계통은 [그림 2-55]과 같이 구성되며, 주요 구성기기는 다음과 같다.

- 급수승압펌프
- 주급수펌프
- 기동용급수펌프
- 고압 급수가열기
- 주급수 제어밸브
- 주급수 차단밸브

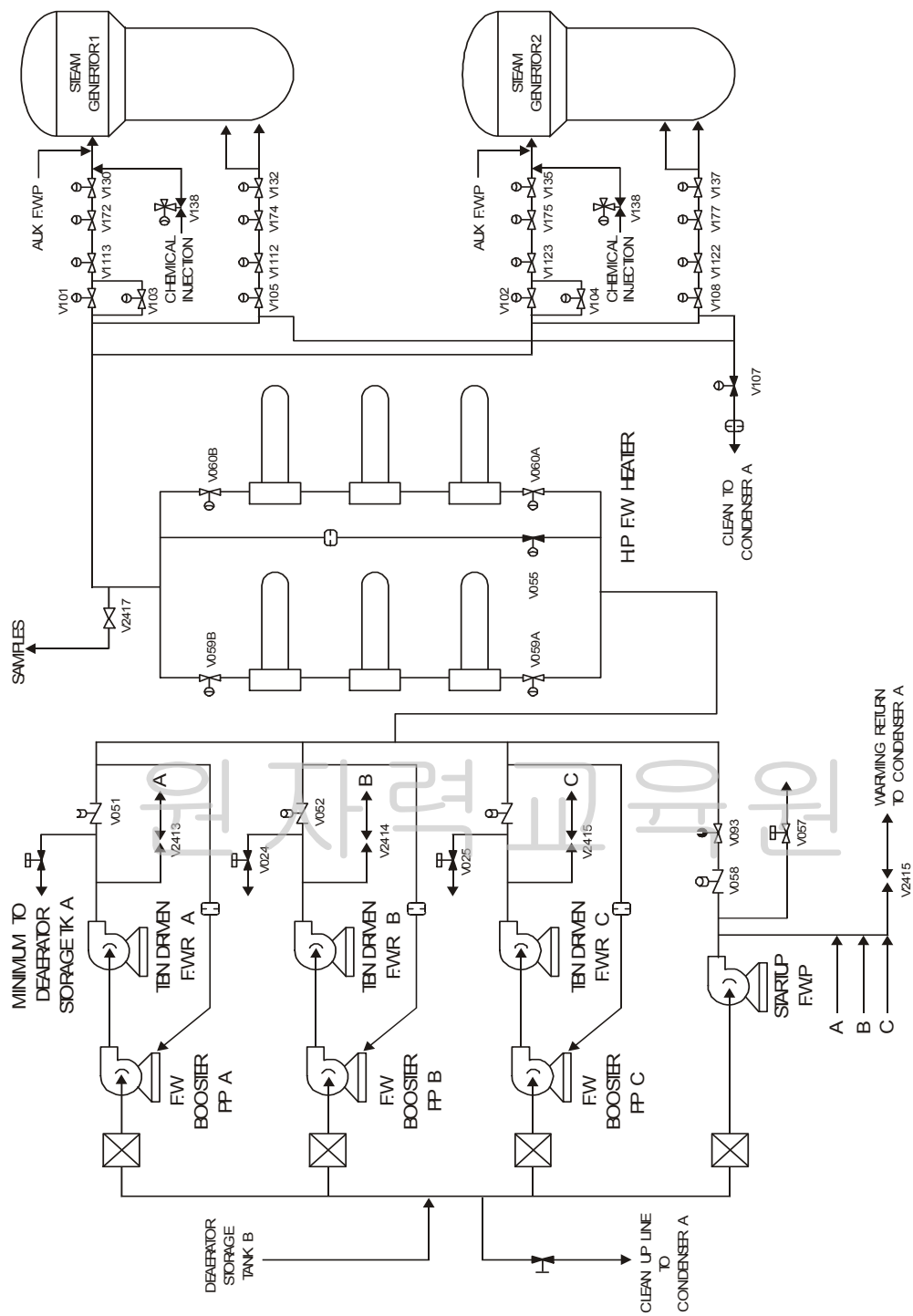
가. 급수승압펌프(Feedwater Booster Pump)

급수승압펌프는 주급수펌프에 유효흡입수두(NPSH)를 제공하는 역할을 하며, 3대가 설치되고, 전동기로 구동된다. 각 펌프는 65%의 용량을 갖고 있으며, 정상운전시 2대의 급수승압펌프가 가동되어 2대의 주급수펌프에 급수를 공급하며, 1대는 후비(Backup)용으로 대기한다.

급수승압펌프는 주제어실에서 기동, 정지운전을 하며, 급수승압펌프의 윤활유 펌프는 현장에서 운전한다.

다음 신호발생시 급수승압펌프는 자동정지 된다.

- 유효흡입수두(NPSH) 저-저
 - 탈기기저장탱크(DST) 수위 저-저
 - 급수승압펌프의 윤활유 펌프 압력 저-저
 - 주증기 차단신호(MSIS)
 - 관련 계열의 주급수펌프 정지
 - 전기 보호 신호
 - 공급 전압 저-저
 - 관련 계열의 주급수펌프 윤활유 압력 저-저
- 급수승압펌프의 주요 설계사양은 다음과 같다.
- 형 식 : 전동구동, 단단, 수평 원심형
 - 정격 유량 : 3,452m³/hr
 - 정격 양정 : 408m(1,340ft)
 - 정격 속도 : 1,787rpm
 - Runout 유량 : 4,409m³/hr(19,400gpm)
 - Runout 수두 : 345m(1,140ft)
 - 최소 유량 : 1,591m³/hr(7,000gpm)



[그림 2-55] 주급수계통

급수승압펌프 전동기의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 형 식 : 수평, 농형 유도 전동기
- 정격 용량 : 7,650hp
- 정격 속도 : 1,787rpm

나. 주급수펌프(Main Feedwater Pump)

주급수펌프는 3단의 고압 급수가열기를 거쳐 증기발생기에 급수를 공급하는 펌프로, 2대의 터빈구동펌프와 1대의 전동기구동펌프로 구성된다. 각 주급수펌프는 65% 용량을 갖고 있으며, 정상운전 중에 2대의 터빈구동주급수펌프가 가동되고, 전동기구동 펌프는 후비용으로 대기한다. 모든 주급수펌프들은 각각 독립적인 변속 제어 설비(Variable Speed Control Unit)를 갖추고 있다.

터빈구동 주급수펌프는 주제어실에서 기동 정지운전을 하며, 윤활유펌프는 현장에서 운전한다. 다음 신호 발생시 주급수펌프는 자동 정지된다.

- 관련 계열의 급수승압펌프의 유효흡입수두 저-저
- 주증기 차단신호(MSIS)
- 터빈 보호를 위한 공급자 정지신호
- 관련 계통의 급수승압펌프 정지
- 주급수펌프 후단의 전동기구동 역류방지밸브에 의한 급수펌프 계열격리
- 주급수펌프 후단의 공통관 압력 고-고(2/3)
- 선택 스위치(HS-003)에 의해 선택되지 않은 펌프

전동기구동 주급수펌프는 주제어실에서 기동 정지운전을 하며, 보조윤활유펌프는 현장에서 운전한다. 전동기구동주급수펌프는 급수제어계통에서 제어신호를 받아 유체 커플링에 의해 속도조절이 이루어진다.

다음 신호 발생시 전동기구동주급수펌프는 자동 정지된다.

- 윤활유 압력 저-저
- 주증기 차단신호(MSIS)
- 관련계열의 급수승압펌프 정지
- 급수펌프 후단의 전동기구동 역류방지밸브에 의한 급수펌프 계열 정지

- 전기보호 신호
- 공급전압 저-저
- 관련계통의 급수증압펌프 유효흡입수두 저-저
- 급수펌프 후단의 공통관 압력 고-고
- 선택스위치(MS-003)에 의해 선택되지 않은 펌프

주급수펌프의 출구에는 전동기구동 역류방지밸브(V051/052/053)가 설치되며, 이 밸브들은 주제어실에서 수동 조작이 가능하고 주급수펌프와 연동되어 펌프 정지에 자동으로 닫힌다.

주급수펌프의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 펌프형식 : 수평 원심형 (2대: 터빈 구동, 1대: 전동기 구동)
- 터빈형식 : 다단, 응축형
- 펌프 정격 유량 : $3,452\text{m}^3/\text{hr}$ (15,200gpm)
- 펌프 정격 양정 : 613m (202ft)
- 펌프 정격 속도 : 4,900rpm
- Runout 유량 : $4,409\text{m}^3/\text{hr}$ (19,400gpm)
- Runout 양정 : 667m (220ft)

주급수 프 전동기의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 형식 : 수평, 농형유도전동기
- 정격 용량 : 14,410hp

전동기구동 주급수펌프의 유체 커플링의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 정격 용량 : 121,026hp
- 정격 입력속도 : 1,787rpm
- 정격 출력속도 : 5,380rpm

다. 주급수펌프 터빈(Turbine)

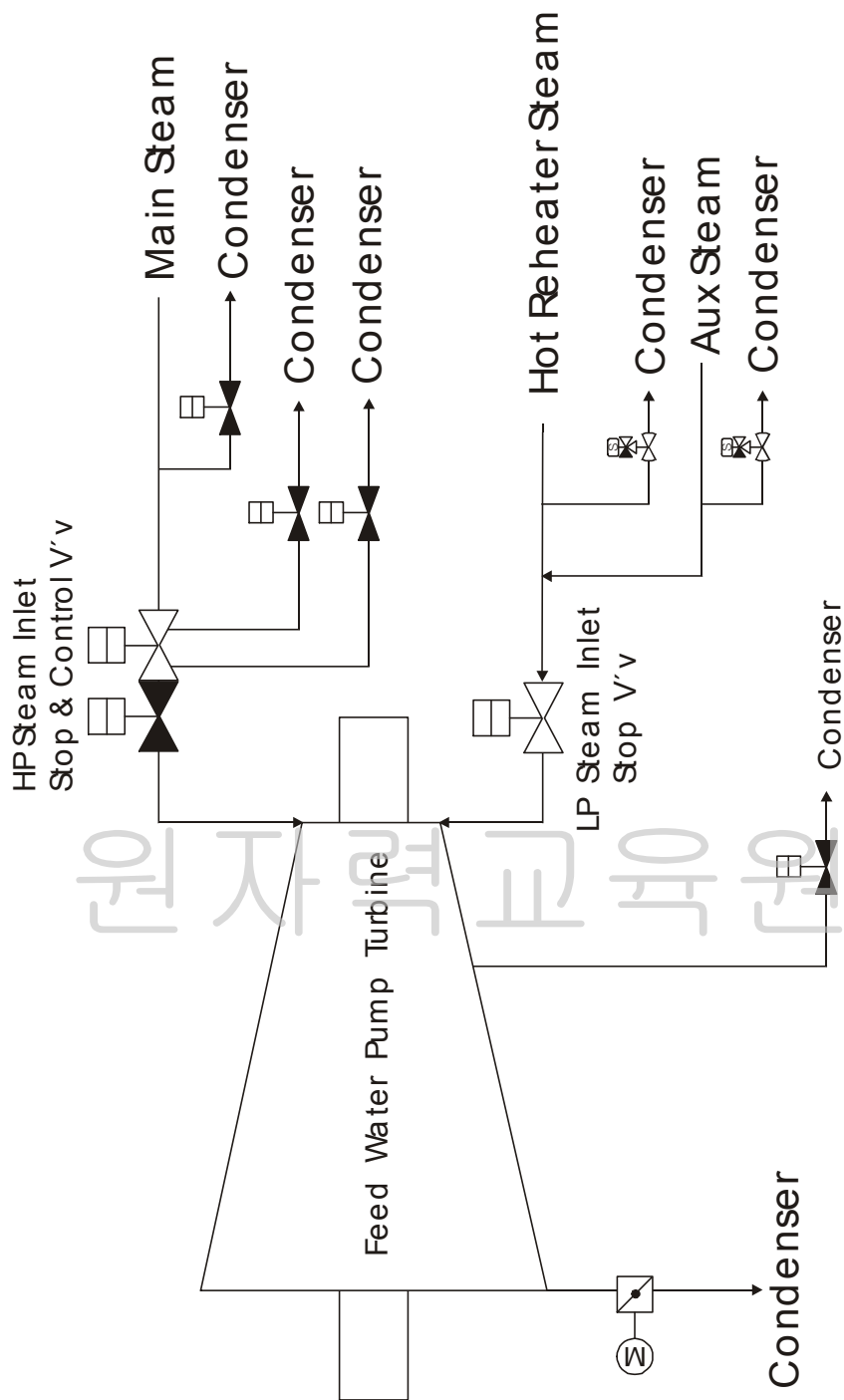
2대의 주급수펌프 터빈은 2대의 각 터빈구동 주급수펌프에 구동력을 제공하며, 이 터빈 구동기는 커플링에 의해 직접 펌프에 연결된다.

주급수펌프 터빈은 [그림 2-56]와 같이 다음에서 구동용 증기를 공급받는다.

- 터빈출력 40% 이상(정상운전) 시에는 습분분리 및 재열기(MSR) 후단의 재열증기(Hot Reheat Steam)사용
- 발전소 기동시 또는 터빈출력 40% 이하의 저출력 운전시에는 주증기(Main Steam) 사용
- 주급수펌프 터빈의 시험시에는 보조증기(Aux. Steam)를 사용

주급수펌프 터빈은 가변속도 운전이 가능하다. 따라서 터빈속도 조절밸브는 급수 제어계통(FWCS)으로 제공되는 펌프속도 설정요구치에 따라 자동제어가 이루어져서 펌프토출 유량의 증가 또는 감소 제어가 된다.

원자력교육원



[그림 2-56] 주급수펌프 터빈계통

터빈의 속도제어는 터빈에 공급되는 증기제어밸브의 제어에 의해 증기유량 변화로 자동제어가 이루어 진다.

주급수펌프 터빈의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 형식 : Dual Inlet, Double flow, 다단 응축형
- 수량 : 2대
- 정격 증기유량(재열증기) : 77,707lb/hr
- 정격 용량 : 8,304 bhp
- Runout 증기유량(주증기) : 11,823lb/hr
- Runout 용량 : 12,087bhp
- 최대 용량 : 14,080bhp

라. 기동용 급수 펌프(Startup Feedwater Pump)

발전소의 기동 및 정지시에는 기동용급수펌프에 의해 증기발생기에 급수가 공급된다. 기동용급수펌프는 전동기구동 펌프이며 1대가 설치되고, 주제어실에서 기동, 정지 운전을 하며, 보조윤활유펌프는 현장에서 운전한다.

각 급수승압펌프, 주급수펌프, 기동용급수펌프의 각 펌프에는 펌프운전시 출구유량이 형성되지 않으면 펌프는 과열과 공동현상 발생으로 손상이 유발될 수 있다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해 펌프 출구에서 탈기기로 최소 유량을 형성하기 위한 공기구동식 제어밸브가 설치되어 있다. 최소 유량 재순환밸브는 펌프 출구 유량을 계속 감시하고 있다가, 출구 유량이 설정된 최소 유량 이하로 감소하면 자동으로 개방된다.

기동용급수펌프의 출구에는 전동기구동 역류방지밸브(V058)가 설치되며, 주제어실에서 수동으로 조작가능하며, 기동용급수펌프와 연동되어 펌프 정지시 자동으로 닫힌다.

다음 신호 발생시 기동용급수펌프는 자동 정지된다.

- 탈기기저장탱크(DST) 수위 저-저(2/2)
- 윤활유 압력 저-저
- 주증기 차단신호(MSIS)
- 흡입 압력 저-저

- 전기 보호 신호
- 공급 전압 저-저

기동용급수펌프의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 형 식 : 수평, 6단, 원심형
- 정격 유량 : $438\text{m}^3/\text{hr}$ ($1,930\text{gpm}$)
- 정격 양정 : 914m ($3,000\text{ft}$)
- 정격 속도 : $3,576\text{rpm}$
- Runout 유량 : $454\text{m}^3/\text{hr}$ ($2,000\text{gpm}$)
- 최소 유량 : $100\text{m}^3/\text{hr}$ (440gpm)

기동용급수펌프 전동기의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 형 식 : 수평, 농형유도전동기
- 정격 용량 : $1,957\text{ hp}$
- 정격 속도 : $3,576\text{ rpm}$

마. 고압 급수가열기(High Pressure Feedwater Heater)

고압 급수가열기는 급수의 온도를 증가시키는 기능을 가지며, 3대의 급수가열기가 1계열을 형성하며, 2계열(A, B계열)로 구성된다. 각 계열의 최대 용량은 75% 이며 정상 운전 중에는 계열당 50%씩 분담하여 운전된다.

2계열의 고압 급수가열기 각 계열은 전·후단에 전동기구동 차단밸브가 설치되어 있고, 전 계열을 우회하는 공통 우회배관이 설치된다. 어떤 한 계열의 고압 급수가열기가 이용불가능시 우회배관을 수동으로 개방하며, 이 때에 나머지 한 계열의 급수가열기가 총 급수 유량의 75%, 우회배관에서 25%의 부하를 담당한다.

다음은 각 고압 급수가열기의 가열원으로 사용되는 추기 배열상태이다.

먼저 5번 고압 급수가열기에는 고압터빈 7단에서 배출되는 추기가 2개의 배관으로 공급되는 데, 이것은 다시 한 배관으로 모여 5A 및 5B 고압 급수가열기로 분배되어 공급된다.

6번 고압 급수가열기에는 고압터빈 5단에서 배출되는 추기가 2개의 배관으로 공급되는 데, 이것은 다시 한 배관으로 모여 5A 및 5B 고압 급수가열기로 분배되어 공

급된다.

7번 고압 급수가열기에는 고압터빈 3단에서 배출되는 추기가 2개의 배관으로 공급되는 데, 이것은 다시 한 배관으로 모여 5A 및 5B 고압 급수가열기로 분배되어 공급된다.

고압 급수가열기의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 형 식 : 수평식 U-튜브형
- 수 량 : 3대/계열 × 2계열
- 정격 유량 : 34,500m³/hr (76,675,243lb/hr)
- 열전달 용량
 - － 7번 급수가열기 : 104.05kcal/hr
 - － 6번 급수가열기 : 91.56kcal/hr
 - － 5번 급수가열기 : 117kcal/hr

바. 증기발생기 급수관

고압 급수가열기를 거친 급수는 2대의 증기발생기로 분배되어 공급되며, 각 증기발생기에 공급되는 급수는 증기발생기 상부의 급수링(Feed Ring)으로 공급되는 하향유로 급수(Downcomer Feedwater) 공급관과 증기발생기 하부의 급수예열기(Economizer)로 공급되는 예열 급수(Economizer Feedwater) 공급관으로 분리된다.

(1) 주급수 제어밸브(MFCV, Main Feedwater Control Valve)

주급수 제어밸브는 증기발생기에 공급되는 급수유량을 제어하여 증기발생기의 수위를 제어하며 필요시 수동제어가 가능하다. 이 밸브는 하향유로 급수 공급관에 설치되는 하향유로 제어밸브(Downcomer Feedwater Control Valve)와 하향유로 우회제어밸브(Downcomer Feedwater Bypass Control Valve)가 각 1대씩 있으며, 예열 급수 공급관에 설치되는 급수예열기 제어밸브(Economizer Feedwater Control Valve)가 각 1대 있다.

하향유로 우회제어밸브(Downcomer Feedwater Bypass Control Valve)는 전동기 구동식으로서 기동시 혹은 5% 이하의 저출력 운전시 수동으로 급수 유량을 제어한다.

하향유로 제어밸브(Downcomer Feedwater Control Valve)는 공기 구동식이며, 전거나 공기 상실시 현재상태를 유지(FAI)하도록 설계되어 있다.

급수예열기 제어밸브(Economizer Feedwater Control Valve)는 공기 구동식이며, 20% 이상의 고출력 운전에 급수 유량을 제어하며, 이 때 각 증기발생기의 하향유로 제어밸브는 개방 상태를 유지한다.

주급수 제어밸브의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 하향유로 제어밸브(V1113/1123)
 - 형 식 : 글로브(Globe) 밸브, 2 대, 6"
 - 구동부 : 피스톤식, 공기구동
- 하향유로 우회제어밸브(V103/104)
 - 형 식 : 글로브(Globe) 밸브, 2 대, 6"
 - 구동부 : 전동기식
- 급수예열기 제어밸브(V1112/1122)
 - 형 식 : 글로브(Globe) 밸브, 2 대, 16"
 - 구동부 : 피스톤식, 공기구동

(2) 주급수 차단밸브(MFIV, Main Feedwater Isolation Valve)

주급수 차단밸브는 하향유로 급수 공급관에 설치되는 하향유로 주급수 차단밸브(Downcomer Feedwater Isolation Valve)가 직렬로 2대 설치되고 그리고 예열 급수 공급관에 급수예열기 주급수 차단밸브(Economizer Feedwater Isolation Valve)가 직렬로 2대 설치된다.

각 밸브들은 유압에 의해서 개방되며, 가스 스프링에 의해 닫혀진다. 전원상실 시에는 유압과 가스 스프링에 의해 고장 닫힘(Fail to Close)이 된다.

각 밸브들은 Class 1E전원에 연결되어 있고, 주증기 차단신호(MSIS)가 발생될 때 5초 이내에 닫혀지도록 설계되어 있으며, 운전중인 급수승압펌프, 주급수펌프, 기동용급수펌프도 자동으로 정지된다.

상부의 주급수 차단밸브들은 발전소 기동시에 사용되며, 주제어실에서 완속닫힘을 위해 완속닫힘 스위치가 있다. 하부의 주급수 차단밸브들은 주제어실에 급속닫힘

스위치가 있다.

주중기 차단신호 발생시 주급수 차단밸브는 5초 이내에 폐쇄되고 운전중인 펌프(주급수펌프, 급수승압펌프, 기동용급수펌프)도 자동으로 정지된다.

주중기 차단신호 발생시 주급수펌프 터빈은 자동 정지된다.

주급수 차단밸브의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 하향유로 주급수 차단밸브(V131/132/133/134)
 - 형 식 : 게이트(Gate)밸브, 4대, 8"
 - 구동부 : 유압구동, 유압으로 열리고 스프링에 의해 닫힘
- 급수예열기 주급수 차단밸브(V121/122/123/124)
 - 형 식 : 게이트(Gate)밸브, 4대, 20"
 - 구동부 : 유압구동, 유압으로 열리고 스프링에 의해 닫힘

(3) 주급수 역류방지밸브(V1036/1037/1040/1043/1044/1047)

각 주급수 차단밸브와 증기발생기 사이에는 주급수 역류방지밸브가 병렬로 설치되어 있다. 이 밸브들은 주급수관 파열사고시 증기발생기로부터의 급수의 방출을 방지하는 역할을 한다. 이 밸브들은 닫힐 때 야기되는 수격현상과 충격압을 최소화하기 위해 제어되어 닫힌다.

원자력교육원

4. 복수 저장 및 이송 계통(CT)

가. 기 능

복수 저장 및 이송 계통은 주급수계통을 사용할 수 없거나 운전 불가능할 때 보조급수계통으로 2차측 수질조건에 적합한 보충수를 공급하는 주 공급원이다. 이 보충수는 고온대기상태 동안에 붕괴열을 제거하여 정지냉각계통이 원자로의 열부하를 담당할 수 있는 온도까지 원자로를 냉각시키는데 사용된다.

또한 본 계통은 사용후연료저장조 및 기기냉각수완충탱크로 공급되는 내진범주 I 보충수의 보조 공급원 역할을 한다.

복수저장탱크는 발전소 기동, 정지, 고온대기 및 정상 출력운전 중에 2차계통 내

에 적정량의 급수를 유지시키는 역할을 한다.

나. 설계기준

- (1) 복수저장 및 이송계통은 보조급수펌프 흡입측에 저장수를 공급한다. 복수 저장탱크 2대는 원자로를 고온대기상태를 유지하면서 정지냉각을 시작할 수 있는 상태로 만들기에 충분한 용량을 갖는다.
- (2) 복수저장탱크는 예상되는 복수계통의 보충수 요구량을 공급할 수 있는 용량도 보유하고 있다. 이와 더불어 복수저장탱크는 사용후연료저장조 및 기 냉각수완충탱크 보충수의 보조 공급원이 된다.
- (3) 복수저장 및 이송계통의 안전성관련 부분은 안전정지지진(SSE) 기간 및 그 후에도 안전관련 기능을 유지한다. 탱크에 연결된 비 내진범주 I 관로의 손상으로 인해 안전성관련 요구 용량의 손실을 초래하지 않도록 되어 있다. 복수저장 및 이송계통은 소외정전을 가정하였을 때에도 기기의 단일 고장에 의해 안전관련 기능이 손상을 입지 않도록 설계된다.
- (4) 복수저장탱크는 보조급수펌프의 주기적 시험에 필요한 유량도 공급한다.
- (5) 복수저장탱크는 보조급수용 요구 용량 외에 재 보충없이 하루 동안에 최대 출력 부하시 예상되는 정상적인 복수보충 요구량을 공급하고 또한 과도운전 상태로 인한 복수 및 주급수 계통 내의 유량 감소분을 공급하기에 충분한 용량을 갖는다. 이 용량은 보조급수를 위한 용량에 추가로 할당된다.
- (6) 복수저장탱크의 수위는 요구 수위 또는 그 이상으로 자동적으로 유지된다.
- (7) 복수저장탱크는 복수기 온수조 수위제어 계통의 작동에 따라 복수를 공급하거나 받아들이는 저장조 역할을 한다.
- (8) 복수저장 및 이송계통은 양질의 수질을 요구하는 복수계통, 주급수계통, 보조급수계통, 화학약품 취급 및 주입 계통 및 기타 보조계통에 초기 충전수, 세정수 및 보충수를 공급한다.
- (9) 복수저장탱크 및 관련 배관은 부식 영향을 최소화하도록 설계된다.

다. 계통설명

복수저장 및 이송계통은 [그림 2-57]와 같이 2대의 복수저장탱크와 관련 배관, 밸브 및 계측제어 기기로 구성된다. 복수저장 및 이송계통은 발전소의 사고 시에 보조급수의 내진범주 I 공급원이 된다. 또한 이 계통은 복수기 보충수와 마찬가지로 양질의 수질을 필요로 하는 2차계통의 초기 충전수의 공급원이 된다. 복수저장 및 이송계통에는 동결방지 설비가 설치된다.

복수저장탱크는 스테인레스강으로 되어 있으며 각각의 탱크에는 보수용 출입구 및 배수 연결부가 하나씩 설치된다. 탱크에는 보조급수펌프 흡입 및 재순환 배관과 기타 필요한 공급 및 회수 배관용 연결부가 설치된다.

2대의 복수저장탱크는 잠금단힘 격리밸브(Locked-Closed Isolation Valve)가 설치된 2개의 스테인레스 배관으로 상호 연결된다. 이 연결관은 가상 사고후에 필요에 따라 공급수를 분담할 수 있게 된다.

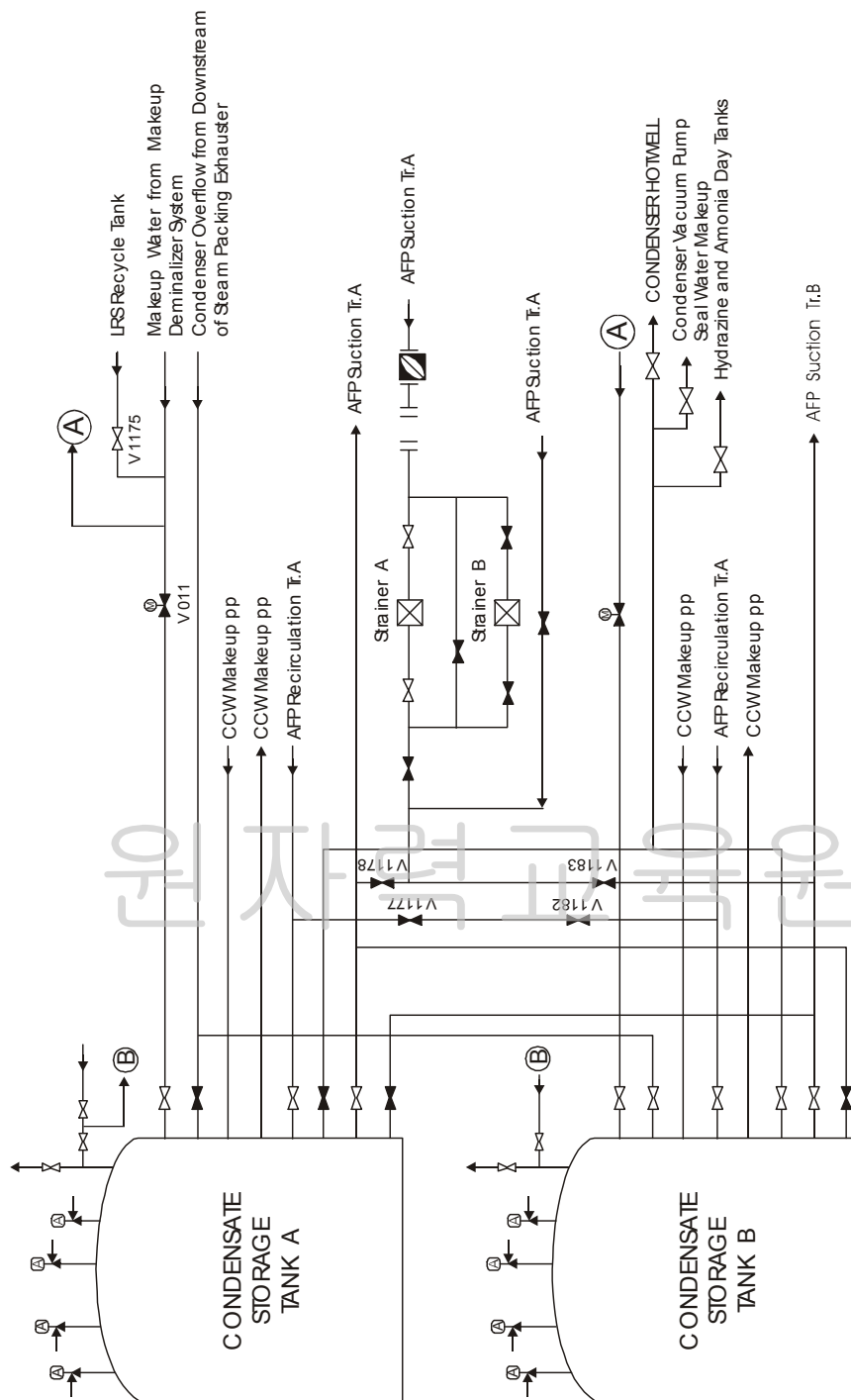
복수저장탱크는 대기중 산소가 복수로 흡수되는 것을 막기 위하여 탱크 상층부에 질소가스를 봉입하며, 탱크는 ASME 코드 Sec, III, Class 3에 따라 설계된다.

복수저장탱크의 수위가 감소하면 수위 제어밸브가 자동적으로 열려 탈염수저장탱크에서 공급받는다.

주제어실에는 복수저장탱크의 고, 저, 저-저 및 바닥 수위 정보가 설정된다. 탱크의 수위는 현장, 주제어실 및 원격정지반에 표시된다.

발전소 기동 운전중에 복수저장탱크 내에 있는 복수의 탈기는 주복수기와 탈기기를 경유하여 이루어질 수 있다.

보조급수계통이 기동되면 복수저장탱크에서는 증기발생기에 안전관련 탈염수가 공급된다.



[그림 2-57] 복수 저장 및 이송 계통

라. 안전성 평가

- (1) 2대의 복수저장탱크는 보조급수계통에 최소한 300,000gallon(1,135.6 m³)의 물을 공급하여 원자로를 고온대기 상태로 유지시키며, 온도 350°F(177°C), 압력 410psia(28.8kg/cm²a) 상태로 원자로냉각재계통을 냉각시킨다. 이 조건에서 원자로는 정지냉각계통에 의해 상온정지(Cold Shutdown) 상태까지 도달할 수 있다. 연결 부위중 용접 가능한 것은 모두 용접을 하여 복수 저장탱크의 누설을 최소화시킨다.
- (2) 비안전성 관련 공급 배관들은 보조급수계통용으로 확보해야 하는 용량에 해당하는 수위보다 높은 위치에 연결되어 복수 저장탱크는 보조급수용으로 공급하기에 충분한 양을 보유한다.
- (3) 복수저장탱크는 내진범주 I 요건에 따라 설계된다. 또한 탱크와 그와 관련된 안전성 배관들은 가상의 태풍으로 인한 비산물의 영향으로 부터 보호된다.

마. 복수저장탱크의 사양

- 수 량 : 2대
- 총용량 : 1,890m³ (500,000gal)
- 안전성 관련 용량 : 1,135.6m³ (300,000gal)
- 설계압력 : 0.35kg/cm²
- 운전압력 : 0.07 ~ 0.32kg/cm²

바. 계통 운전

(1) 정상 운전

복수저장탱크 보충수원으로는 탈염수계통의 탈염수와 액체방사물계통에서 공급되는 재생 복수가 있다. 정상운전 중에는 탈염수계통에서 충수되고, 액체방사물계통의 재생 복수의 방사선 농도와 수질조건이 2차 계통수 제한치를 만족하면 충수원으로 사용한다.

복수저장탱크중에 1대는 정상공급운전을 담당하며, 1대는 대기상태를 유지한다.

복수 공급처에는 복수기 온수조, 복수기 진공펌프 밀봉부위, 복수기 수질 배기펌프 밀봉부위, 하이드라진과 암모니아 일일탱크, 보조급수계통 및 사용후연료저장조 냉각 및 정화 계통에 공급된다.

복수저장탱크의 상부는 질소가 공급되어 부식 환경을 조성하는 산소의 유입원을 차단하고 있다. 초기 운전시에는 $0.32\text{kg}/\text{cm}^3$, 정상운전 중에는 $0.07\text{kg}/\text{cm}^3$ 으로 공급된다. 복수저장탱크의 고압력시에는 탱크 상부에 설치된 압력방출밸브가 작동한다.

(2) 비정상 운전

복수기가 저수위 도달시 복수기의 비상충수밸브가 개방되어 복수를 공급받으며, 고수위 도달 시에는 복수펌프 후단에서 과충수 제어밸브에 의해 복수저장탱크로 회수된다.

보조급수계통 운전시 복수저장탱크에서 흡입원을 공급받으며, 복수저장탱크 저수위시 탈염수저장탱크 및 원수저장탱크로 직접 연결 가능하며, 또한 복수저장탱크가 저-저수위 도달시에는 원수 공급관을 설치하여 흡입원의 후비 역할을 한다.

복수저장탱크의 수질 불만족시에는 복수기 온수조와 복수탈염설비를 거쳐 복수저장탱크로 재순환함으로써 수질개선을 할수 있으며, 수질처리 후에도 개선되지 않으면 배수후 탈염수계통으로부터 재충수 받는다.

사. 계측 제어

(1) 복수저장탱크 충수밸브

- 복수저장탱크 고수위에서 닫히고, 저수위에서 열린다.
- 충수밸브 개방시에 탈염기 계통의 진공탈기 승압펌프 기동 및 충수를 한다.

(2) 경 보

주제어실, 원격정지반 및 현장에 각 복수저장탱크의 수위 지시기가 설치된다. 주제어실에는 고, 저, 저-저, 바닥(Empty) 수위 정보가 지시된다.

[핵심요약]

복수 및 주급수계통은 증기를 응축시켜 응축된 물을 수집하고, 이를 가열, 가압하여 증기발생기에 공급하는 계통으로, 발전소 기동 및 정상운전 시에 증기발생기 내에 적당한 급수량을 유지시킬 수 있다.

복수계통은 저압터빈에서 배출되는 증기를 복수기에서 응축시키고, 이를 온수조(Hotwell)에 수집하여 급수계통에 이송하는 기능을 갖는데, 주요 구성기기는 다음과 같다.

- 주복수기
- 복수 펌프
- 복수 탈염설비
- 저압 급수가열기
- 탈기기

주급수계통은 복수계통의 탈기기저장탱크에서 복수를 흡입 받아 고압 급수가열기를 거쳐 증기발생기로 급수를 공급하여, 증기발생기의 수위를 일정하게 유지시키는 역할을 하는데 주요 구성기기는 다음과 같다.

- 급수승압펌프
- 주급수펌프
- 기동용급수펌프
- 고압 급수가열기
- 주급수 제어밸브
- 주급수 차단밸브

제8절 터빈보조계통

[학습목표]

1. 터빈제어유계통의 기능 및 구성기기를 이해한다.
2. 터빈윤활유계통의 기능과 구성기기를 이해한다.
3. 터빈증기밀봉계통의 기능과 구성기기를 이해한다.

1. 터빈제어유계통

가. 계통개요

(1) 계통의 목적

터빈제어유계통의 목적은 터빈밸브를 제어할 수 있는 구동력을 제공하는 것이다. 터빈에서는 부하에 따라 터빈에 공급되는 증기량을 조절해야하는데 터빈밸브가 이 기능을 한다. 발전소에 있는 대부분의 자동조절밸브의 구동력은 압축공기가 제공하지만 이 터빈밸브는 크기 때문에 압축공기로 구동할 수 없어 별도의 유압설비로 구동을 해야 한다.

(2) 계통의 기능

터빈제어유계통이 갖은 기능은 고압 및 저압 증기밸브 (MSV, CV, CIV)를 정밀하게 제어하여 터빈속도와 터빈출력을 제어하고 터빈보호신호발생시 터빈을 트립시키는 것이다. 터빈트립(터빈밸브 닫힘) 기능을 갖는 이유는 터빈보호신호발생시 유압유를 배유할 수 있는 비상트립시스템이 유압계통에 포함되어 있기 때문이다.

(3) 계통 특성

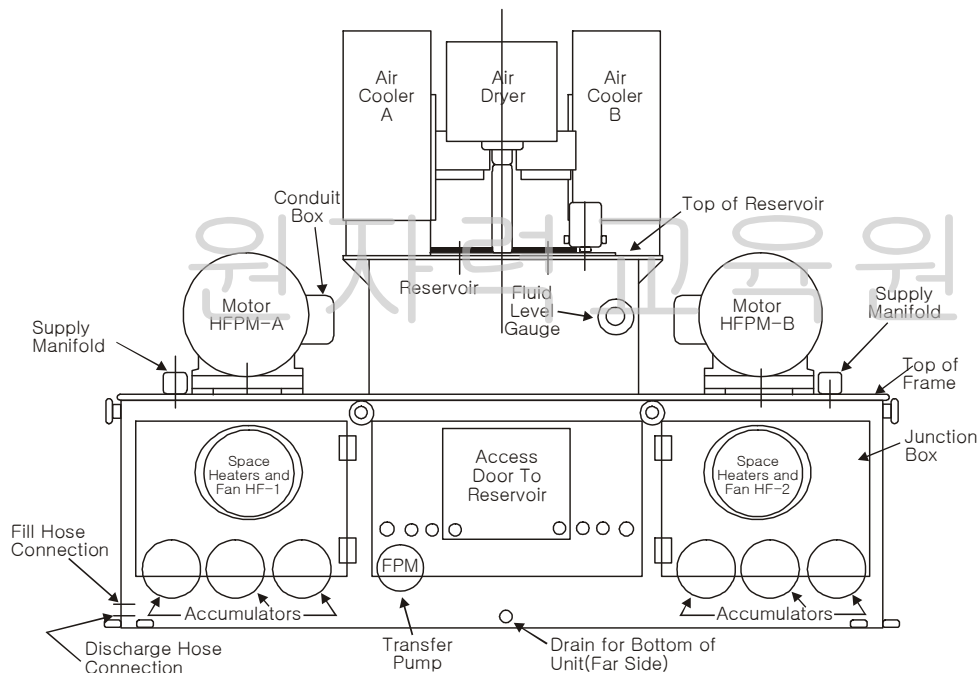
- 계통유체로 화재에 강하고 윤활특성과 안정성이 좋은 합성 인산에스테르를 사용한다.
- 윤활유(Lube Oil)계통과는 분리된 별도의 설비로 구성되어있다.
- 계통압력은 약 120kg/cm^2 정도이다. 높은 압력은 서보밸브(Servo Valve)를 제어하는데 용이하고 작동기의 유압실린더를 작게 할 수 있는 이점이 있다.

(4) 계통구성기기

- 유압계통(HPU : Hydraulic Power Unit)
 - 제어유 저장탱크 및 부속설비
 - 제어유 공급설비
 - 제어유 이송 및 여과설비
- 유압계통에서 각 제어장치에 연결된 배관
- 증기밸브(Steam Valve)의 Control PAC(Shut off 밸브→서보밸브→실린더)
- 보호장치로는 기계적 정지계통과 조속기(Mark-V)로부터의 보호신호가 있다.

나. 유압계통(Hydraulic Power Unit)

(1) 개 요



[그림 2-58] Hydraulic Power Unit

터빈을 제어하는 터빈제어유계통의 유압부이다. 유압유를 기능별로 두 부분으로 공급하는데 하나는 Control Package(Shut-off V/V→ Servo V/V→ 실린더)로 공급하

여 증기밸브를 동작시키고 다른 하나는 터빈·발전기 비상정지계통(ETS)을 거쳐 FASV(Fast Acting Solenoid Valve), Disk Dump Valve & Shut-off Valve steam Valve 및 Control PAC에 공급한다.

유압계통은 과도운전상태 하에서도 모든 제어장치에 항상 안정된 유압을 제공하고 적절한 온도 및 요구되는 청정도의 유압유를 공급하며, 장기간 운전에도 유압유의 특성을 유지할 수 있도록 화학활성여과기(Chemically Active Filter)가 설치되어 있다.

이 계통은 두 계열(Pumping Unit)이 설치되어 있어 한 계열이 기능을 상실하면 대기 중인 펌프(Stand-by Pump)가 자동 기동된다.

(2) 제어유 저장탱크 및 부속설비

(가) 제어유 저장탱크

저장탱크(Reservoir)는 스테인리스강으로 만들어져 있으며 내화유압유(Fire-resistant Hydraulic Fluid) 3,028L를 저장 할 수 있다.

저장탱크 내의 설비점검과 청소 목적으로 상부에 덮개(Cover Plate)가 설치되어 있으며, 계통에서 회수되는 제어유가 펌프 흡입구(Suction)에 유입되기 전 제어유에 함유된 공기가(Air)가 배출될 수 있도록 흐름시간을 충분히 길게 하고 고온의 회수 오일이 저장탱크의 제어유에 직접 접촉되는 것을 방지하기 위하여 격벽(Baffling)이 설치되어 있다.

유위지시계(Fluid Level Gauge)는 저장탱크의 유위를 지시하며 High/Low 경보를 발생하고, 저장탱크의 유체가 넘치는(Over Flow) 것을 방지하기 위하여 비상유위지시계(Emergency Fluid Level Gauge)가 있다.

유량 온도 스위치는 제어유의 온도에 따라 High/Low 경보를 발생시키며, 열전대는 연속적으로 유온을 측정 감시한다.

- 유위지시계(FLG : Fluid Level Gauge)
 - 고-유위 경보 : 4" Above Normal Level
 - 저-유위 경보 : 4" Below Normal Level

○ 비상유위지시계(EFLG : Emergency Fluid Level Gauge)

– 고-고 유위 경보 : 3" Below Top of the Tank

○ 제어유 온도 스위치(Fluid Temperature Switch)

– 고온 경보 : 65.5°C (150°F)

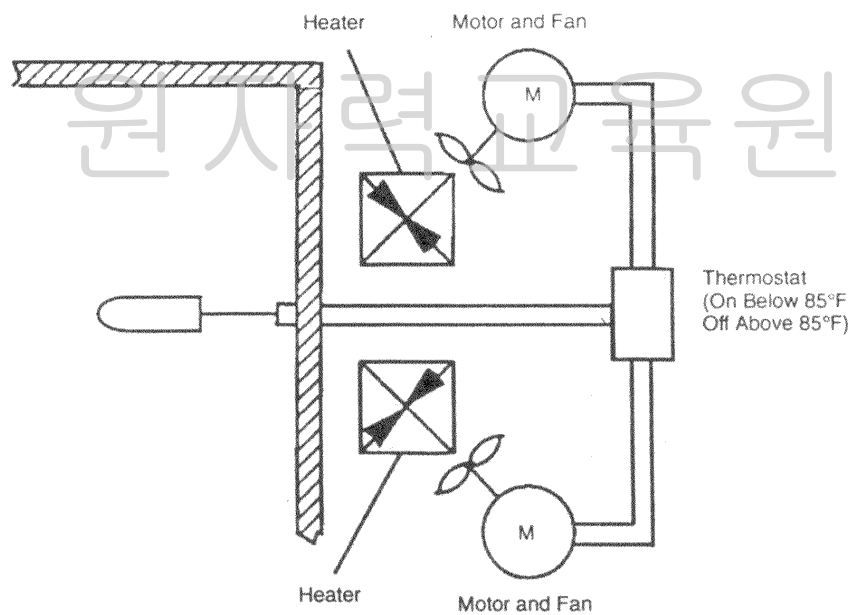
– 저온 경보 : 18.3°C (65°F)

(나) 제어유 냉각기

증기밸브(Steam Valve) 작동기(Actuator) 및 터빈정지장치(Trip Device)에서 회수되는 제어유를 냉각시키기 위해 저장조 상부에 설치되어 있는 순환펌프에 의해 유압유는 냉각기로 순환되며, 온도 감지기는 저장조의 유온이 43.3°C (110°F)에서 48.8°C (120°F) 사이를 유지하도록 공기 냉각 팬과 펌프를 기동하거나 정지시킨다.

냉각계통은 하나 또는 2개의 유닛을 모두 운전할 수 있도록 전기적 연동이 되어 있으며 정상시에는 한 유닛만 운전된다.

(다) 예열기(Space Heaters and Fans)



[그림 2-59] Space Heater and Fans

유압계통(HPU)에 설치된 2대의 전열기(Electric Heater)와 팬은 겨울철 운전 중 대기용 펌프계통의 파이프, 팬, 축압기(Accumulator) 및 저장탱크를 예열된 상태로 유지시켜 준다.

예열기는 온도조절장치(Thermostatic Control)에 의해 자동으로 운전되며 저장탱크의 유온이 29.4℃(85°F) 이하가 되면 전열기와 팬이 기동된다.

(라) 공기건조기(Air Dryer)

제어유계통이 운전 중 유면 변화에 따라 저장탱크 내부로 공기가 유입된다. 이때 공기 중의 습분을 제거하기 위해서 활성알루미나(Al_2O_3)를 이용한 공기건조기가 설치되어 있다.

공기건조기에는 습분표시기가 설치되어 있으며 이것은 알루미나의 상태를 색깔로서 나타낸다. 알루미나가 습분을 흡수하면 청색에서 자주색으로 변하고 최종적으로 분홍색으로 변한다. 분홍색으로 변한 것은 건조제가 포화되었다는 것을 나타내는 것이며 이때는 건조제를 교환하거나 재활성화시켜야 한다. 여과기는 6개월에 한번씩 교환하거나 건조제를 교체하거나 재활성화 한다.

건조기를 거친 공기는 여과기를 거쳐 탱크로 들어간다.

(3) 제어유 공급설비(Pumping Unit)

(가) 공급계통

100%의 용량을 가진 독립된 2대의 유압공급계통은 가변토출 전동기구동피스톤펌프와 펌프 흡입측 스트레이너(Wire-mesh Suction Strainer) 및 출구측 전류량 고압필터(Full Flow High Pressure Filter)로 구성되어 있다. 펌프의 압력보정기(Compensator)가 계통의 유량변화에 따라 토출량을 조절하여 계통의 압력을 자동적으로 조절한다.

공급 분기관(Manifold)에 설치되어 있는 방출밸브(Relief Valve)는 펌프의 토출압력이 2,000psig를 초과하면 토출유량을 저장조로 회수하여 계통의 과압을 방지한다.

(나) 스트레이너 및 필터(Strainers and Filters)

각 펌프 입구측에는 스트레이너가 설치되어 있으며 출구측에는 5μm의 정교한 필터가 설치되어 있다.

입구 스트레이너(Suction Strainer)에는 운전 중 육안으로 점검할 수 있는 상태표시기가 있고, 표시기는 “Filter is Clean”, “Needs Cleaning” 및 “Bypassing”의 3가지 스트레이너 상태를 나타낸다. 이 스트레이너는 세척이 가능하다.

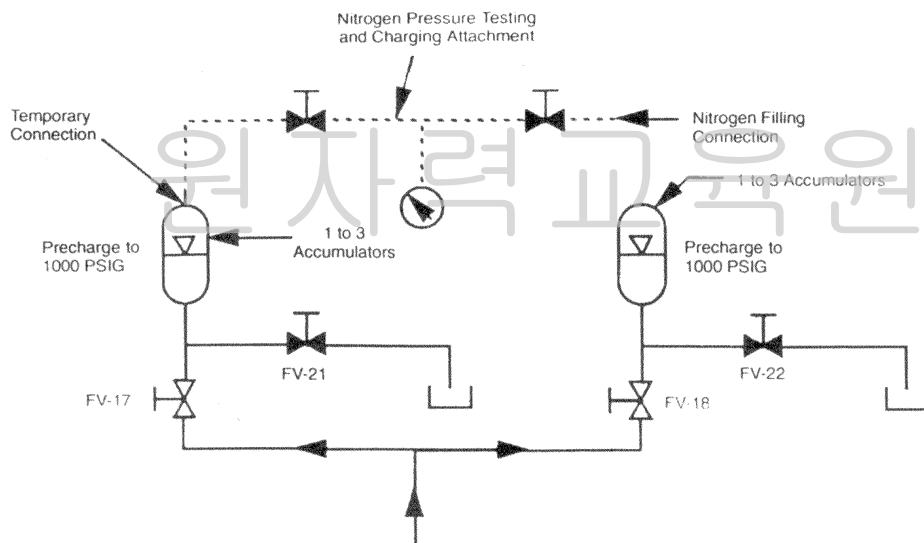
펌프 출구필터에는 차압측정 스위치가 설치되어 필터 단의 압력차가 $7\text{kg}/\text{cm}^2$ (100psig)이 되면 경보를 발생시킨다. 경보가 발생하면 필터를 교체하여야 한다.

(다) 공기방출밸브(Air Bleed Valves)

각 펌프의 출구측에는 공기방출밸브가 설치되어 있으며 기동중 펌프 및 배관에 차 있는 공기를 저장탱크로 배기시킨다.

펌프 출구압력이 $9.8\text{kg}/\text{cm}^2$ (140psig) 이하인 상태에서는 공기방출밸브는 스프링의 힘에 의해서 열려 공기를 저장탱크로 방출하고, $9.8\text{kg}/\text{cm}^2$ (140psig) 이상에서는 유압유의 빠른 속도에 의하여 생기는 압력강하로 스프링의 힘을 이기고 밸브를 닫게 한다.

(라) 축압기(Accumulator)



[그림 2-60] Accumulators

축압기는 급격한 유량변동에 대비하여 설치되어 있으며 저장탱크 하부에 설치되어 있다. 축압기는 $70.3\text{kg}/\text{cm}^2$ (1,000psig)의 질소가 충전된 실린더 형이며 유압헤더

(Hydraulic Header)에 직접 연결되어 있다.

(마) 펌프 운전

펌프출구 압력계는 각 펌프의 운전상태를 나타내 주며, 압력스위치는 펌프의 운전상태를 알려준다.

(4) 제어유 이송 및 여과설비

(가) 이송여과계통(Transfer Filtering System)

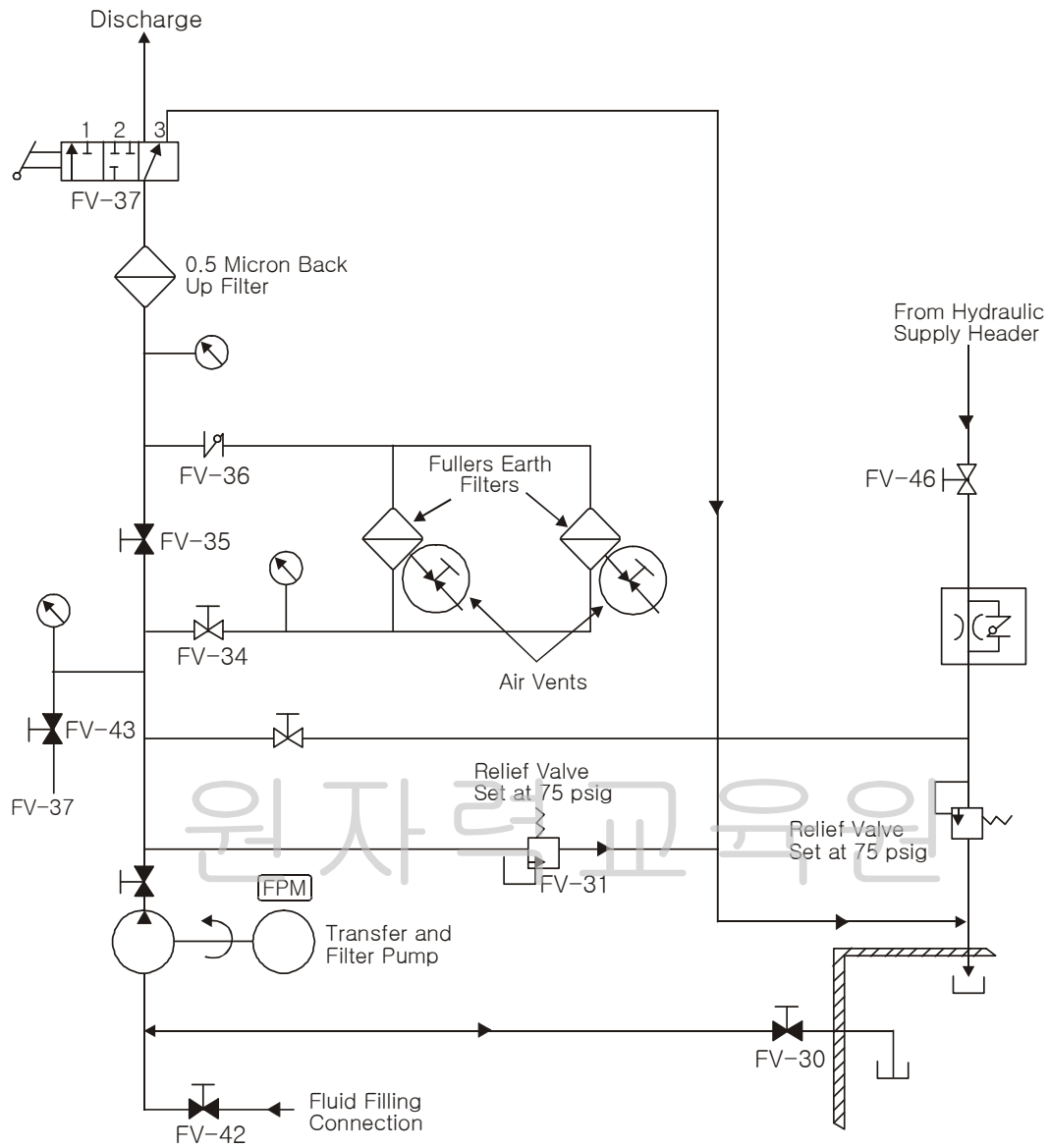
저장탱크 충유 및 배유시 유압유의 오염을 방지하고 유체 내 미립자를 여과하도록 필터(Fuller's Earth Filter)와 $0.5\mu\text{m}$ 의 보조여과기를 통과시켜 유압유의 청정도를 유지시킨다.

(나) 미립자 여과 필터(Fuller's Earth Filter)

Fuller's Earth Filter는 유압계통의 신뢰성 및 수명연장을 위하여 내장된 설비이며 유압유 중의 산화물, 수분을 흡수하여 낮은 중화가로 유지시키며, 허용범위의 염소 함유량을 유지하는 역할을 한다.

계통이 운전되면 저장탱크에서 유압펌프를 거친 일부의 유량이 유량제어밸브를 거쳐 Fuller's Earth Cartridge를 통과한 후 $0.5\mu\text{m}$ 보조필터를 통해 저장탱크로 순환된다.

원자력교육원



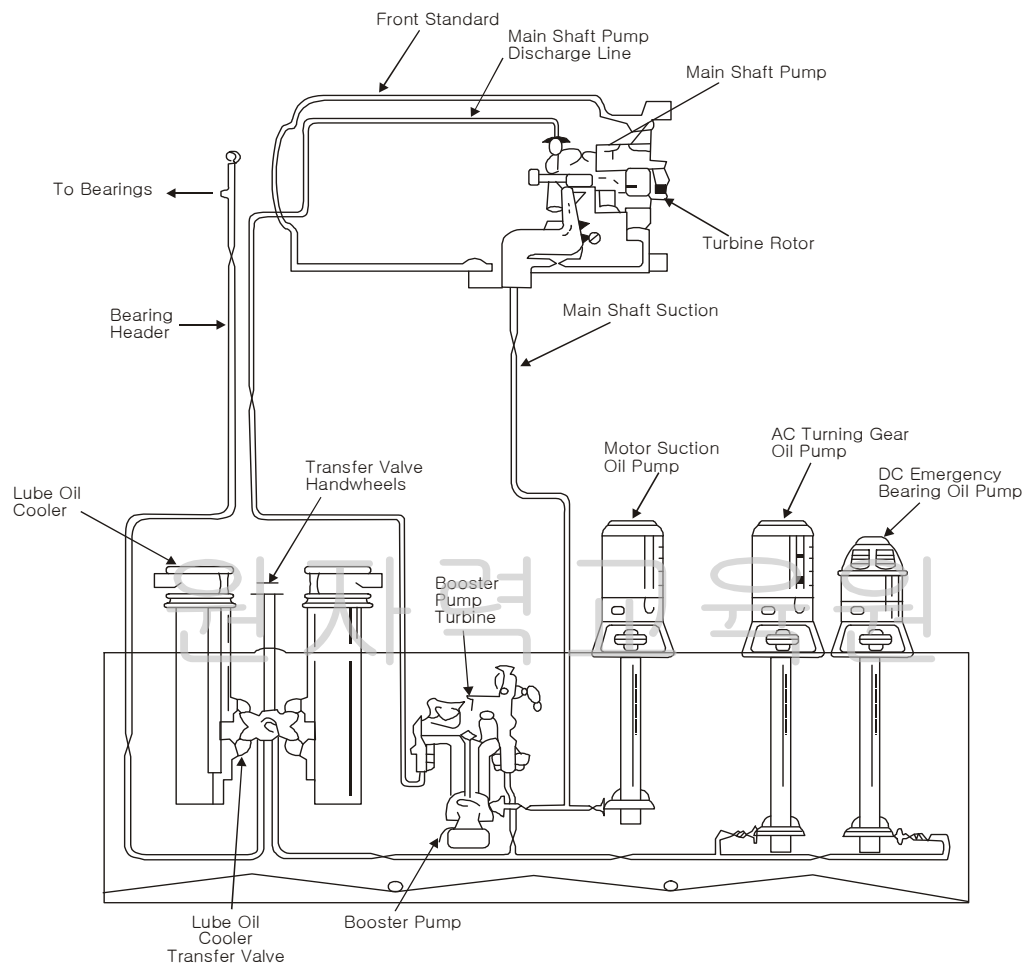
[그림 2-61] 유체이송 및 필터링 개요

2. 터빈유탄유계통

가. 계통개요

(1) 계통의 기능

터빈유탄유계통의 목적은 터빈베어링에서의 마찰을 최소화하는 것이다.



[그림 2-62] 유탄유계통 요약도

축을 지지하는 부분에서는 회전하는 축과 고정되어 있는 베어링 사이에 마찰이 발생한다. 마찰은 운동에너지가 다시 열에너지로 바뀌게 하는 요소이므로 이것을 최소화시켜주어야 한다. 그리고 마찰에 의해 열에너지로 변환된 마찰열을 제거해주어야 한

다. 터빈윤활유계통의 기능은 저널베어링 (Journal Bearings)과 추력베어링 (Thrust Bearing)의 마찰을 최소화하고, 마찰에 의해 발생하는 열을 제거하는 것이다.

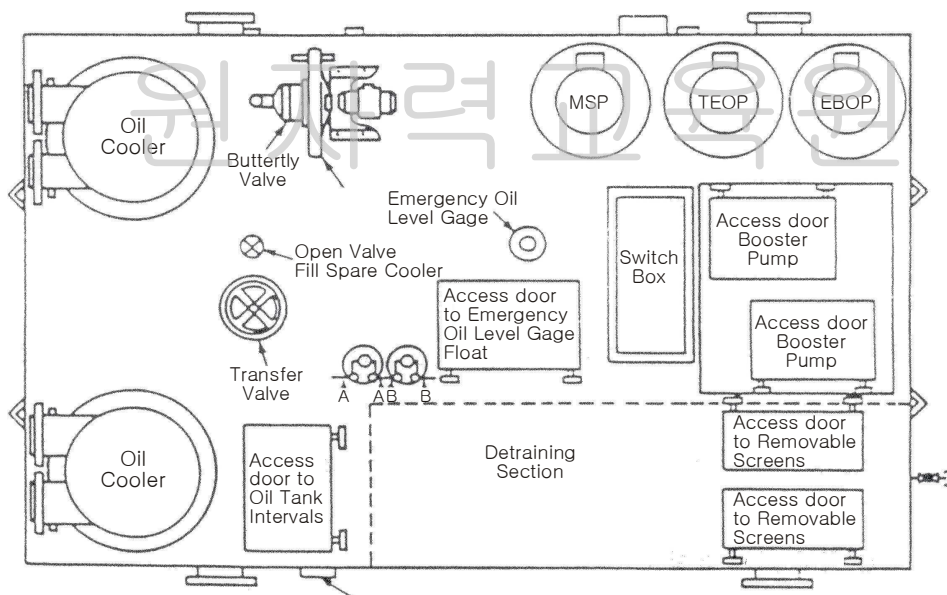
이 기능을 하기 위하여 윤활유계통은 5대의 원심펌프로 구성되어 있으며, 주윤활펌프는 터빈축에 설치되어 있고 나머지는 윤활유탱크 내에 설치되어 있다.

윤활유계통의 요약도는 [그림 8-5]와 같다.

나. 계통구성기기

(1) 윤활유탱크(Lube Oil Tank)

- 윤활유를 저장하는 탱크이며 윤활유펌프(주윤활유입구펌프, 터닝기어윤활유펌프, 비상베어링윤활유펌프, 윤활유승압펌프)와 윤활유냉각기, 제어밸브 및 제어기 등이 설치되어 있다.
- 터빈베어링에서 회수된 윤활유는 탱크 내의 여과기를 거친 후 윤활유펌프의 입구측으로 유입된다.
- 윤활유탱크 유위는 탱크 상부에서부터 91cm 정도를 유지해야 한다.



[그림 2-63] 윤활유 탱크 상부 기기 배치도

(2) 윤활유탱크 여과계통

회수되는 윤활유가 윤활유탱크에 유입되기 전에 이물질을 제거하기 위하여 30mesh의 여과기 2개가 직렬로 설치되어 있으며, 운전 중 청소가 가능하도록 두 계열로 구성되어 있다.

(3) 터닝기어윤활유펌프(TGOP)와 주윤활유입구펌프(MSP)

(가) 터닝기어윤활유펌프

교류전동기에 의하여 구동되며 터닝기어 운전 및 터빈 기동시에 베어링에 윤활유를 공급한다.

(나) 주윤활유입구펌프

교류전동기에 의해 구동되며 터닝기어 운전에서 정격속도의 90% 도달시까지 주윤활유펌프에 흡입원을 제공한다.

(다) 운 전

- 1) 터닝기어윤활유펌프(TGOP)는 터닝기어 운전시 터빈베어링에 윤활유를 공급한다.
- 2) 터닝기어윤활유펌프와 주윤활유입구펌프는 터빈기동 전에 반드시 운전되어야 한다.
- 3) 터닝기어윤활유펌프(TGOP)는 주윤활유입구펌프(MSOP)가 제성능(터빈속도 90% 이상)을 발휘할 때까지 터빈베어링에 윤활유를 공급하고, 주윤활유입구펌프(MSP)는 터빈속도 90% 이하에서 주윤활유입구펌프의 흡입원을 주윤활유탱크로부터 공급하기 위해 운전한다.
- 4) 정격속도 도달시 터닝기어윤활유펌프와 주윤활유입구펌프는 주윤활유입구펌프에 의해 모든 기능이 수행되므로 더 이상 운전할 필요가 없다. 따라서 수동으로 정지시켜 자동(Auto) 위치에 놓는다.

(4) 비상베어링윤활유펌프(EBOP)

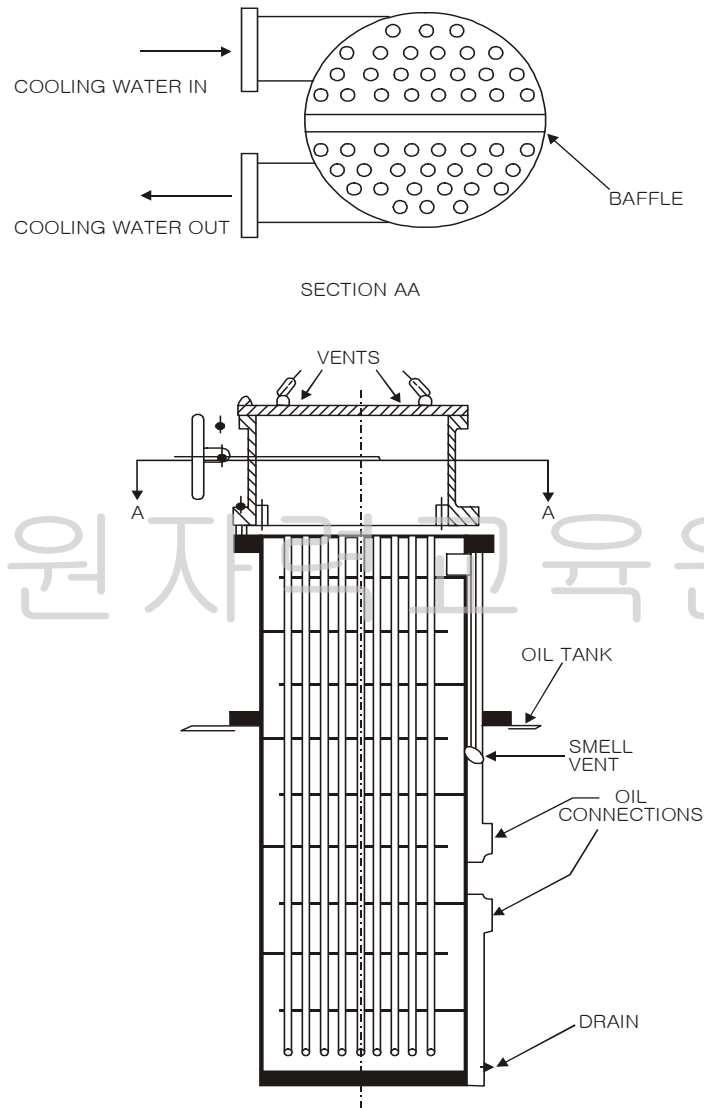
(가) 교류전원상실에 의해 터닝기어윤활유펌프(TGOP)의 운전 불가능시 터빈베어링에 윤활유를 공급하기 위해 비상배터리에 의해 구동된다.

(나) 터빈정지 후 속도감소(90% 이하)에 따라 주윤활유입구펌프가 제성능을 발휘하

지 못하므로 터닝기어윤활유펌프(TGOP)가 기동되어 윤활작용을 해야 하나 터닝기어윤활유펌프의 기동 불가능시 비상베어링윤활유 펌프가 기동된다.

(5) 윤활유냉각기

- 1) 윤활유탱크 내에 2개의 유활유냉각기가 병렬로 설치되어 있으며 튜브측으로 냉각수가 흐른다.



[그림 2-64] 윤활유 냉각기

- 2) 각 냉각기는 100% 용량을 가지며 터닝기어가 운전중일 때는 윤활유 온도를 26~32℃로 유지하고 터빈 정격속도에서는 43~49℃를 유지한다.
- 3) 정상운전 중일 때는 한 대의 냉각기가 운전되며, 한 대는 대기상태를 유지하고 압력 변동 없이 냉각기를 교체할 수 있도록 하기 위하여 냉각기 절체 밸브가 냉각기 사이에 있다.

(6) 윤활유탱크 공기추출기(Vapor Extractor)

- (가) 윤활유탱크 공기추출기는 윤활유저장탱크 상부에 있으며, 모터에 의해 구동되며, 윤활유탱크 내부에 부압을 형성한다.
- (나) 윤활유탱크로부터 가스나 증기를 제거하는 역할을 하며 윤활유탱크 내부 압력은 공기추출기의 전단에 설치된 나비형 밸브들에 의해 조절된다.
- (다) 윤활유계통이 운전되고 있을 때 윤활유탱크 공기추출기는 항상 운전되고 있어야 한다.

(7) 주윤활유펌프(MSOP)

- (가) 터빈축에 설치되어 터빈에 의해 구동되며, 터빈이 정격속도로 운전중일 때 윤활유터빈(Oil Turbine)을 구동시키고 베어링에 윤활유를 공급한다.
- (나) 터빈이 정상운전 중일 때 윤활유터빈에 의해 구동되는 증압펌프(Booster Pump)는 윤활유탱크에서 흡입원을 취하여 주윤활유펌프의 흡입원을 제공한다.
- (다) 펌프의 흡입압력은 1.26kg/cm²(18psig)이고 출구압력은 15.46kg/cm²(220psig)이며 출구압력으로 윤활유터빈에 구동력을 제공하고 3.86kg/cm²(55psig)로 감압되어 윤활유냉각기를 통해 냉각되어 터빈·발전기의 베어링으로 공급된다.

(8) 윤활유증압펌프(Booster Pump)

- (가) 윤활유탱크 내에 설치되어 있으며 윤활유터빈에 의해 구동되어 주윤활유펌프에 흡입원을 제공한다. 이는 주윤활유펌프가 윤활유탱크 보다 6.1m(20ft) 정도 높은 위치에 있어 직접 윤활유를 끌어올릴 수 없기 때문이다.
- (나) 터빈이 정격속도의 90% 이상이 되면 주윤활유펌프의 흡입원을 제공한다.
- (다) 터빈이 정격속도의 90% 이하에서는 교류모터에 의해 구동되는 주윤활유입구펌프에 의해 주윤활유펌프에 흡입원을 제공한다.

(9) 윤활유터빈 (Oil Turbine)

윤활유택크 내에 설치된 윤활유터빈은 승압펌프를 구동한다. 윤활유터빈의 속도는 주윤활유펌프 흡입압력에 직접 영향을 주기 때문에 제어밸브로 조절된다.

(10) 베어링올림유펌프(Bearing Lift Oil Pump)

(가) 터닝기어 모터의 회전력과 기어의 응력을 줄이기 위해 고압의 윤활유를 베어링의 하부 표면으로 공급하며 충분한 유압이 형성되면 축은 약 2~5mills 정도 들리게 된다.

(나) 펌프의 흡입측에는 2개의 여과기(전단 : 40 μ m, 후단 : 10 μ m)가 직렬로 연결되어 있다.

3. 터빈증기밀봉계통

가. 계통개요

(1) 계통의 목적 및 기능

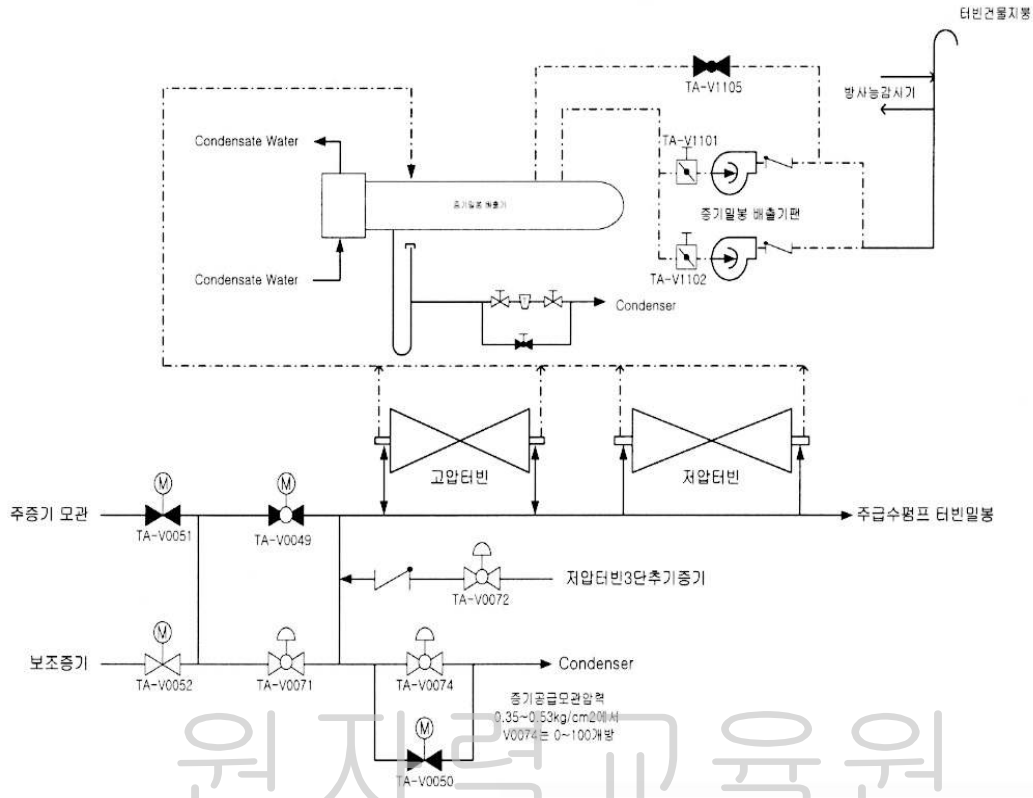
터빈증기밀봉계통의 목적은 터빈축을 따라 증기가 누설되는 것을 방지하기 위한 것이다.

터빈증기밀봉계통은 고압부분(HP-Section)과 저압부분(LP-Section)으로 구분되며 고압부분은 터빈으로부터의 고압증기가 대기로 누설되는 것을 방지하고, 저압부분은 대기로부터 공기가 터빈으로 유입되는 것을 방지한다.

고압터빈의 제어밸브 및 정지밸브와 저압터빈밸브(CIV)의 축에서 증기가 누설되는 것을 방지하고, 주급수펌프의 터빈축을 통해 증기가 누설되는 것을 방지한다.

여러 개의 스프링 눌림 패킹링(Spring-Backed Segmented Packing Ring)에는 특별하게 설계된 톱니(Tooth)가 가공되어 있으며, 이 톱니는 로터(Rotor)와의 최소한의 원주방향 간격을 가지고 링에 부착되어 있다. 고압터빈패킹(Pressure Packing)은 증기밀봉모관의 압력을 0.21~0.35kg/cm²으로 조절하면서 여분의 증기를 배출시키고, 증기밀봉모관유출(Leak-off) 출구는 증기밀봉배출기(Steam Packing Exhauster(SPE))에 의해 76~127mmH₂O의 저진공상태로 유지되며, 증기밀봉배출기(SPE)는 증기를 응축

시키기 위한 셸과 튜브형 열교환기로 구성되어 있다.

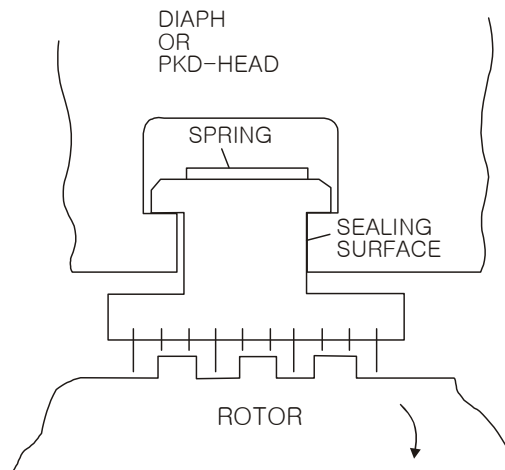


[그림 2-65] 증기밀봉계통 요약도

나. 계통구성기기

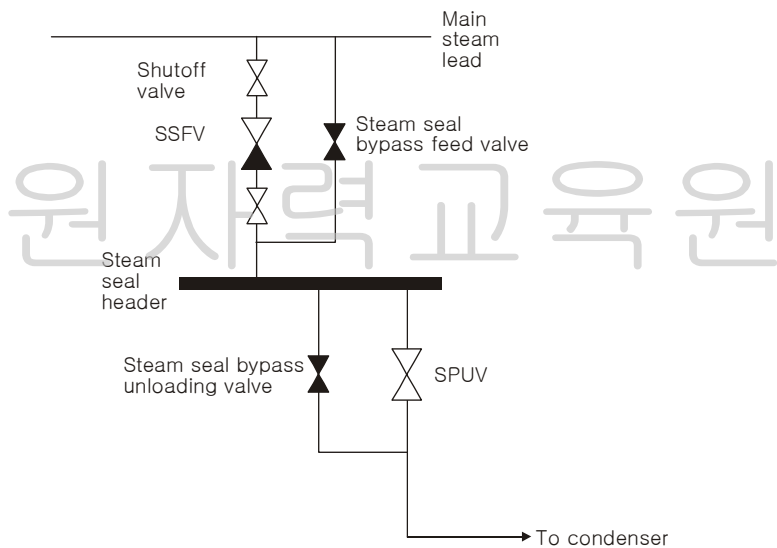
(1) 래비린스형 축 밀봉(Labyrinth-type shaft packing)

밀봉장치는 정지부분과 톱니를 가진 회전부분으로 구성되어 원주방향으로 작은 간격을 두고 배열되어 있다. 누설증기는 여러 개의 톱니를 지나면서 높은 저항을 받아 압력이 줄어들게 되어 누설을 줄인다. 회전톱니는 터빈회전축에 직접 가공되어 있다.



[그림 2-66] Labyrinth-type shaft packing

(2) 증기밀봉 조절밸브



[그림 2-67] 증기밀봉 조절밸브

밀봉증기모관압력을 터빈출력에 관계없이 자동으로 일정하게 유지한다. 이는 증기밀봉공급밸브와 방출밸브(Unloading Valve)에 의해 조절된다.

저출력에서 증기밀봉방출밸브(SPUV)는 완전히 닫힌 상태에서 증기공급밸브가

밀봉증기 공급압력을 조절하고, 고출력에서는 증기공급밸브가 완전히 닫힌 상태에서 증기밀봉방출밸브가 압력을 조절한다.

밸브들은 터빈보호를 위해 고장안전(Fail to Safe) 형식으로 되어 있으며 증기 밀봉공급밸브는 신호상실이나 계기압 상실시에 완전히 열리도록 되어있다. 다이어프램 손상 등 고장시 닫히도록 설계되어 있다.

(가) 증기밀봉공급밸브(SSFV : Steam Seal Feed Valve)

터빈 기동시나 저출력 운전시 밀봉증기는 SSFV를 통해 공급된다. 공기구동 밸브로서 공기압력 $0.21\text{kg}/\text{cm}^2(3\text{psig})$ 에서 완전히 열리고 $0.63\text{kg}/\text{cm}^2(9\text{psig})$ 에서 완전히 닫히며 공기압력은 밀봉증기공급모관 압력에 따라 조절된다.

(나) 우회공급밸브(SSBFV : Steam Seal Bypass Feed Valve)

패킹손상 등의 원인으로 증기밀봉모관압력이 저하될 경우 축밀봉을 위해 SSFV와 같이 병렬로 사용되며 전동기구동밸브로서 수동으로 증기모관 압력을 조절한다.

(다) 보조증기공급밸브(SSAFV : Steam Seal Aux. Feed Valve)

SSFV와 같은 방법으로 운전되며 기동시 주증기가 확보되기 전에 사용된다. 공기구동 밸브로서 공기압력 $0.21\text{kg}/\text{cm}^2(3\text{psig})$ 에서 완전히 열리고 $1.05\text{kg}/\text{cm}^2(15\text{psig})$ 에서 완전히 닫히도록 되어 있다. 공기압력은 밀봉증기공급모관 압력에 따라 조절된다.

(라) 밀봉증기추기공급밸브(SSFVX : Steam Seal Feed Valve Ext. Source)

출력증가와 함께 터빈압력이 증가함에 따라 터빈출력 약 50%정도에서 SSFVX는 저압터빈 3단 추기에서 증기밀봉모관으로 밀봉증기를 공급하고 고압터빈 패킹으로부터의 증기유출이 저압터빈 패킹의 증기유량을 초과하게 되면 SSFVX는 자동으로 닫힌다. 공기구동밸브로서 공기압력 $0.63\text{kg}/\text{cm}^2(9\text{psig})$ 에서 완전히 열리고 $1.05\text{kg}/\text{cm}^2(15\text{psig})$ 에서 완전히 닫히며 공기압력은 밀봉증기공급모관 압력에 따라 조절된다.

(마) 증기밀봉방출밸브(SPUV : Steam Packing Unloading Valve)

터빈부하 약 50%이상에서 SSFV는 완전히 닫힌다. 이 상태에서는 터빈 내 증기압력 및 유량의 증가에 의한 과잉증기 때문에 더 이상 밀봉모관으로 증기공급은 불필요하며, 오히려 증기밀봉모관의 과압을 방지하기 위해 이 과잉의 증기를 복수기로 방출한다. 공기구동 밸브로서 밀봉증기공급모관 압력에 따라 조절된다.

(바) 증기밀봉우회방출밸브(SPBUV : Steam Packing Bypass Unloading Valve)

SPUV의 고장으로 인한 증기밀봉모관의 과압을 방지한다. 전동기구동 밸브로서 수동으로 증기모관압력을 조절한다.

(사) 과압보호밸브(Relief Valve)

증기밀봉공급밸브 우회관 및 공급모관에 각각 2개 및 5개의 과압보호 밸브가 있으며 공급밸브우회관의 2개의 밸브는 $1.4\text{kg}/\text{cm}^2(20\text{psig})$ 에서 열리기 시작해서 $1.75\text{kg}/\text{cm}^2(25\text{psig})$ 에서 완전히 열리고, 공급모관에 있는 5개의 밸브는 $8.43\text{kg}/\text{cm}^2(120\text{psig})$ 에서 열리기 시작해서 150psig 에서 완전히 열려 증기를 방출함으로써 계통을 과압을 방지한다.

(3) 밀봉증기응축기계통(SPE : Steam Packing Exhauster System)

(가) 밀봉증기응축기(Steam Packing Exhauster : 1대)

- Shell Side : 배기 증기
- Tube Side : 복수
- 증기유출관의 압력을 $76\sim 127\text{mmH}_2\text{O}$ 로 유지하며 누설증기를 응축시키고 응축수는 복수기로 회수하는 기능을 가진다.

(나) 송풍기(Blower : 2대)

정상운전 중에는 한 대의 송풍기가 운전되며 밀봉증기응축기 내의 불응축성 가스를 제거하고 진공을 유지하는 기능을 가진다.

[핵심요약]

1. 터빈제어유계통의 기능

- 터빈밸브제어 유압구동력제공
- 터빈보호신호발생시 트립기능 제공

2. 터빈제어유계통의 주요 구성기기

- 제어유냉각기, 예열기, 공기건조기, 유압펌프, 스트레이너, 필터, 공기방출밸브, 축압기, 제어유이송 및 여과설비

3. 터빈윤활유계통의 기능

- 터빈발전기 베어링 마찰 최소화 및 냉각

4. 터빈윤활유계통의 주요구성기기

- 주윤활유펌프, 터닝기어윤활유펌프, 주윤활유입구펌프, 비상베어링윤활유펌프, 윤활유승압펌프, 윤활유냉각기, 윤활유탱크 증기추출기

5. 터빈밀봉증기계통의 기능

- 고압터빈에서 고압증기가 대기로 누설되는 것을 방지
- 대기로부터 공기가 저압터빈으로 유입되는 것을 방지
- 고압터빈제어밸브 및 정지밸브와 저압터빈 CIV에서 증기누설 방지
- 주급수펌프 터빈 축관통부를 통해 누설되는 증기차단

6. 터빈밀봉증기계통의 주요구성기기

- 래비린스형 축패킹, 증기밀봉조절밸브, 증기밀봉공급밸브, 우회공급밸브, 보조 증기공급밸브, 밀봉증기추기공급밸브, 밀봉증기응축기, 밀봉증기배기팬

제3장 발전소 전력설비

제1절	주발전기	192
제2절	발전기 여자제어계통	210
제3절	발전기 보조계통	230
제4절	소내전력계통	252
제5절	소외전력계통	272
제6절	무정전 전원설비	280
제7절	비상디젤발전기	307

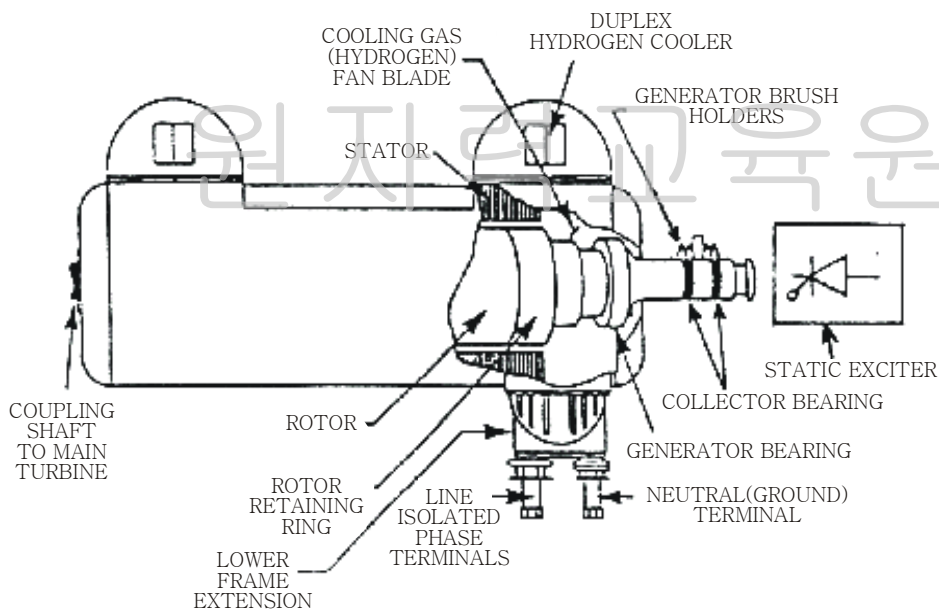
제1절 주발전기

[학습목표]

1. 주발전기의 전체적인 구조를 이해한다.
2. 주발전기의 주요 구성부품 및 기능을 이해한다.
3. 주발전기의 설계용량 및 냉각방식을 이해한다.

1. 개요

주발전기는 회전계자형 동기발전기로서, 그 구조는 자속을 발생시키는 계자(Field), 즉 회전자(Rotor)와 기전력을 발생시키는 전기자(Armature), 즉 고정자(Stator)로 대별하게 된다.



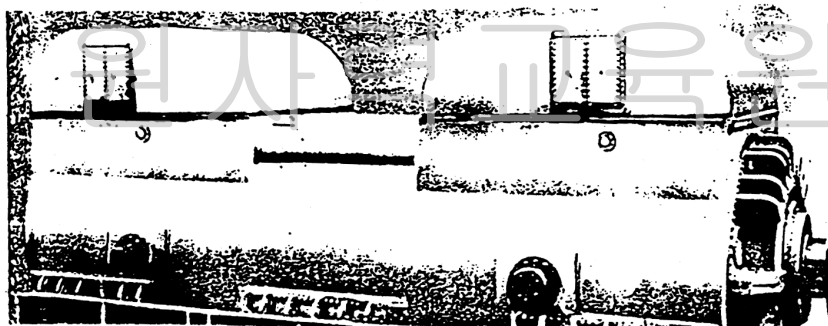
[그림 3-68] 주발전기 구조

고정자는 발전기의 각 구성품을 지지하는 대형 하우징(Housing) 또는 프레임(Frame)의 형태이다. 주발전기는 운전 중, 철심 및 권선으로부터 많은 열이 발생하게 되므로 냉각계통과 3상 단락이나 급작스런 부하 변동 등에 대비한 각종 제어 및 보조 계통이 요구된다. [그림 3-1]은 모선 공급 형태의 정지형 여자기를 포함한 간단한 주발전기의 구조이다.

2. 고정자 프레임(Frame)

주발전기의 고정자 프레임(Frame)은 철심(Iron Core)을 포함한 전기자 권선(Armature Winding), 팬(Fan) 및 냉각기(Cooler), 고압 부싱(High Voltage Bushing) 등의 중요 구성품을 수용하는 케이싱과 가스 누설 방지를 위하여 두꺼운 철판으로 제작된 단부 차폐체(End Shield)로 구성된 용접 구조물이다.

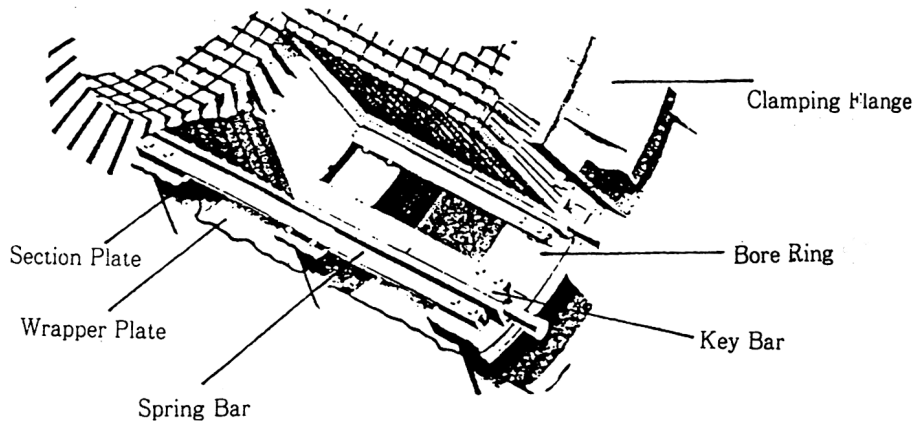
[그림 3-2]와 같이 고정자 프레임은 건물 기초(Foundation) 위에 볼트로 고정되고, 측면에 이 중량물을 크레인으로 들어올리는데 필요한 인양 기구(Lifting Trunnion)가 볼트로 부착되어 있는데 이것은 건물 기초 빔(Beam)에 설치가 완료되면 제거된다.



[그림 3-69] 수소냉각방식의 발전기 고정자 프레임(Frame)

[그림 3-3]은 스프링 장치(Spring Mounting)가 고정자 프레임에 부착되어 고정자 권선의 원심 방향으로, 그리고 축방향의 자진 진동을 방지하도록 축방향으로 긴 스프링 바(Spring Bar)를 고정시키고 있다. 이 스프링 바가 권선 집합체(Core Assembly)가 조립된 키 바(Key Bar)를 떠받치고 있다. 권선의 진동은 스프링 바의 탄성에 의해

효과적으로 억제되는데, 3,600 rpm의 발전기에는 이 스프링 장치(Spring Mounting)를 사용하고 1,800rpm의 발전기에서는 스프링 바를 볼팅(Bolting)이 아닌 용접한 구조이다. 또한 발전기 운전 중에 권선과 철심에서 발생하는 열을 제거하기 위해 공기보다 훨씬 냉각 효과가 좋은 수소를 사용하도록 가스 관(Tube)을 일정하게 배열하고 팬 날개(Blade)에 의해 수소가스를 순환시켜 냉각시킨다.



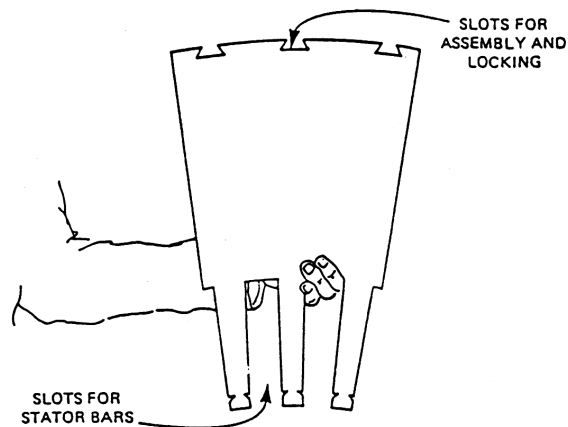
[그림 3-70] 수소냉각방식 발전기의 Core Mounting 단면도

내부 격판(Section Plate)은 대구경의 보어 링(Bore Ring)에 고정되어 철심(Core)을 지지하고 공진 현상을 억제할 수 있는 충분한 강도를 가진 것으로 철심과 Wrapper Plate 사이에서 적당한 간격으로 배열된 환형의 구조로 설계되고, 여기에 가스를 순환시키도록 격판(Section Plate) 사이의 Tube를 고정시킨 구조이다.

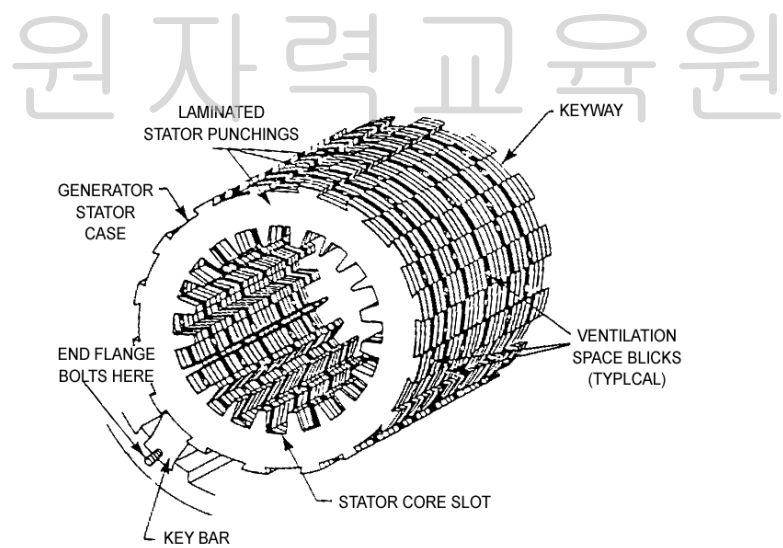
3. 고정자 철심

고정자 철심(Stator Core)은 [그림 3-4]에 도시된 모형의 실리콘 강판을 수십 만장 쌓아 놓은 것으로 비정상 상태의 열이 발생했을 때도 절연 값을 유지할 수 있는 재질을 열처리 한 것이다. 이 철심은 환모양으로 고정자 철심환(Core Ring)에 축방향으로 배열된 Key Bar에 부착된 Key에 양측의 일정한 간격으로 Segment 모양으로 조립되어 기체 냉각 통로가 [그림 1-5]처럼 구성된다.

이 고정자 철심이 상기와 같이 조립되면 고정자 Bar를 삽입할 수 있는 4각의 홈 (Slot)이 만들어지고 이 고정자 바(Stator Bar)를 고정시키는 웨지(Wedge)를 삽입하는 홈이 포함된다. 이렇게 조립된 철심 집합체는 [그림 3-4]에서 나타낸 것과 같이 고정자 키바(Stator Key Bar)에서 플랜지 단부(End Flange)에 고정된다.



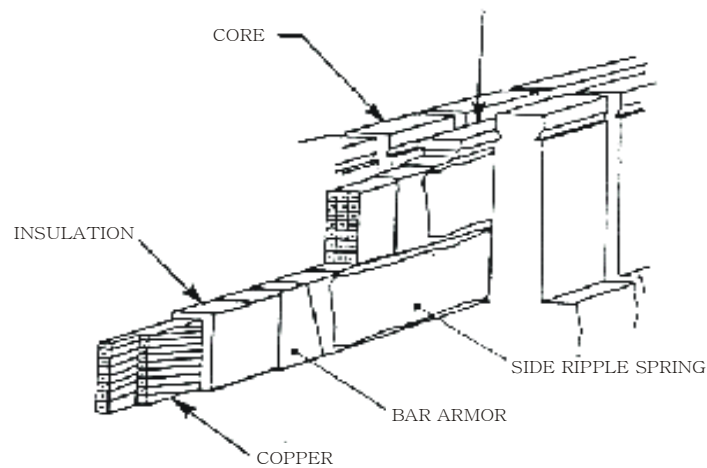
[그림 3-71] 고정자 철심 Punching



[그림 3-72] 고정자 철심 구조

4. 고정자 바(Bar)

철심(Core)이 조립되면 전기자 권선(Armature Winding)은 절연된 Bar를 Core Slot 속으로 삽입하고 이 Bar의 끝부분을 도체와 연결하여 코일이 형성된다. [그림 3-6]은 Core Slot에 조립된 고정자 집합체이고 [그림 3-7]은 Bar 끝부분이 Conductor와 연결된 구조이다.



[그림 3-73] 철심 슬롯에 조립된 고정자 Bar Assembly

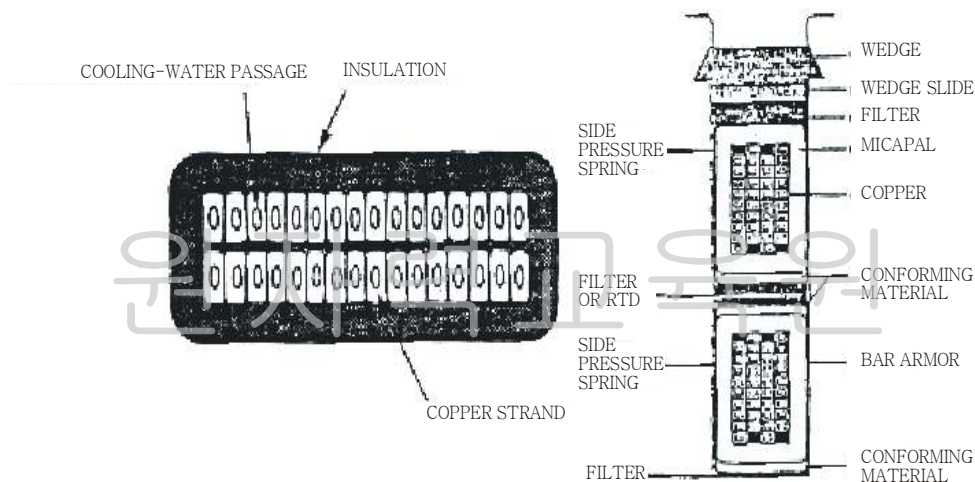


[그림 3-74] Winding End Connection

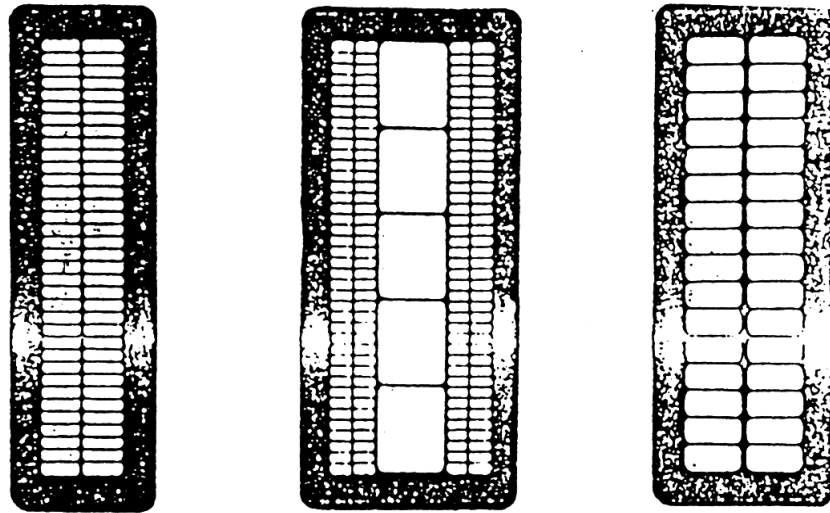
각 Bar는 4각형의 구리 재질로 동판의 표면을 절연시킨 도체(Strand)인데 전류 분포를 균일하게 흐르도록 하여 자기 유도 현상에 따르는 Bar 자체의 전류 손실을 최소화하도록 전위(Transposition) 시킨 구조이다.

각 Bar는 내부에서 발생하는 열을 제거하기 위하여 냉각수가 흐르도록 [그림 3-8]과 같이 길이 방향으로 뚫어서 냉각관(Cooling Tube) 구조를 만든다. 절연된 각 Bar는 [그림 3-8]과 같이 서로가 절연되고 수직 격리판(Vertical Separator)은 2개의 Stack을 절연한다. 여기에 다시 각 Stack의 둘레를 Epoxy Resin 재질의 Micapal로 몇 겹씩 감싼다.

이 절연 위에 Asbestos Tape가 감겨서 코로나를 억제하고 기계적인 손상 방지를 하는 역할을 한다.



[그림 3-75] Liquid Cooled Bar, Four-Wire/Two Wire Bar



A. Solid-strand conventional B. Gas conductor-cooled C. Liquid conductor-cooled

[그림 3-76] 종류별 고정자 Bar 단면도

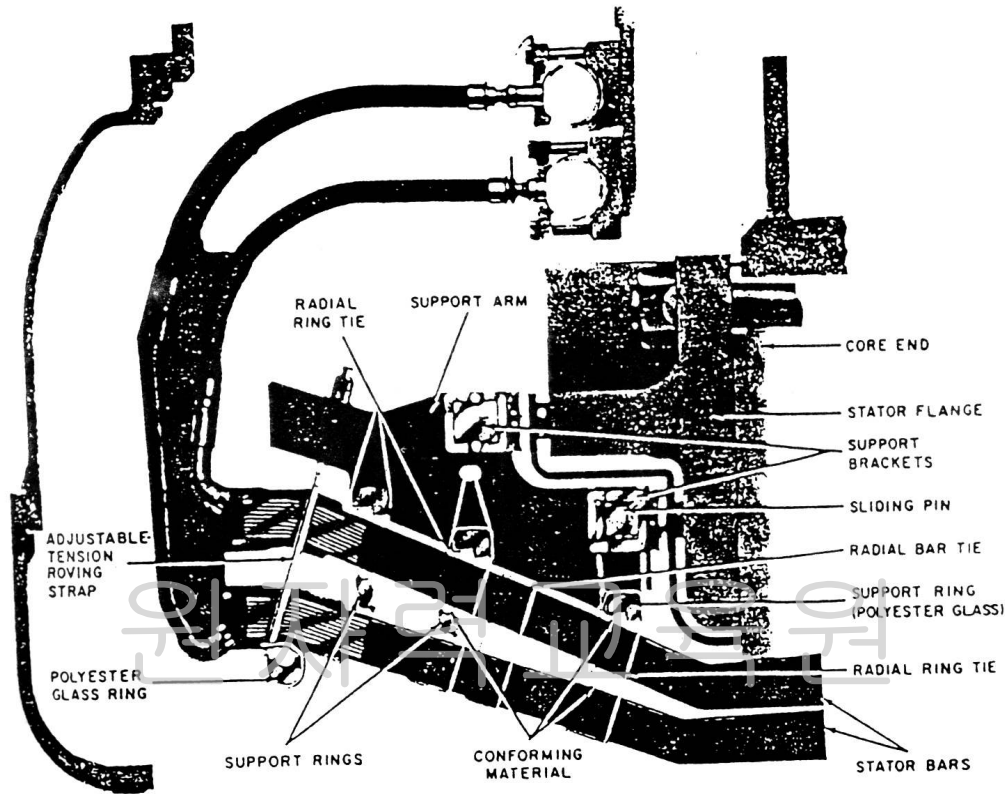
[그림 3-9]는 3가지의 Cooling Stator Bar를 도시한 것으로 좌측의 Stator Bar는 발생된 열이 절연층을 통하여 소모되는 구형이다. 용량이 커지면 열발생량이 증가되어 절연이 파괴되므로 전류 용량이 제한된다. 중앙의 가스냉각 도체의 단면도는 가운데 수직으로 배열된 4각형의 동공을 통해서 팬에 의해 수소가스를 순환하는 것으로 비교적 용량이 큰 발전기에 사용된다.

우측의 Water Cooled Bar는 전술한 바와 같이, 냉각 Tube로 액체를 순환 하는데 탈염 순수에 의해 최상의 냉각 상태를 유지하므로 대용량에 사용되며 냉각수용 펌프, 냉각기 및 여과기가 추가된다.

5. 고정자 냉각수 연결부

앞에서 기술한 바와 같이 고정자 Bar의 각각은 길이 방향으로 냉각수를 통과시키므로 중공동 도체(Hollow Strand)라고 부르는데 [그림 3-10]에서 나타낸 바와 같이 각 Bar의 끝부분에서 Clip Assembly에 의해 서로 분기(Manifold)되고, 냉각수가 흐르는

Bar-Strand의 입구 구멍은 테프론 튜브와 연결되도록 Clip 속으로 브레이징(Brazing)된다. 이 Clip Assembly에서 Braze된 또 하나의 Conductor는 그 다음의 Bar에 연결되어 전기적 회로를 구성하는데 이 배열은 [그림 3-7]과 같이 End Winding이 연결된다.



[그림 3-77] End Winding Connection

각 Bar 사이는 열경화성 플라스틱 재질의 Radial Bar Tie와 Support Ring Tie로 묶고 Support Ring 과 Support Bracket에 의해 고정된다. 그리고 Core End와 Stator Flange를 Bolting으로 연결하여 이 Support Bracket이 다시 Support Arm에 지지되어 움직이지 않도록 고정되어 있다.

이 Support Bracket는 부하 변동시 발생하는 열팽창이나 열 수축에 따른 축방향의 움직임을 수용하는 Slotted Bearing이 있다. Flexible Heavy Wall 테프론 호스는

Bar 끝에 연결된 Tube Fitting에서 고정자 Frame 내경에 용접된 냉각수용 대구경 환 튜브의 헤드로 연결된다.

[그림 3-10]은 Double-flow 구조이지만, 한국표준형 주발전기는 Single-Flow 구조인데, 이것은 입구 헤드가 Collector End 쪽에 있어서 연결관(Connection Hoses)이 상층권(Top-Bar)과 하층권(Bottom-Bar)에 동시에 연결되고 출구 헤드는 터빈 쪽에 설치되는 구조이다.

6. 주발전기 회전자

대용량의 주발전기는 전기자(Armature)를 고정시키고, 계자(Field)를 회전시키는 회전 계자형 동기발전기이므로, 주발전기의 회전자는 대형 전자석(Electro Magnet)의 기능을 갖는다. 회전자가 고정자 내부에서 회전할 때 자속 쇄교에 의해서 각 Slot의 권선에 기전력이 유도된다.

주발전기의 회전자는 축방향으로 가공된 긴 실린더 모양으로 각 Slot에는 [그림 3-11]과 같이 구리 권선이 고정되고, 이러한 형태의 권선이 Slot 표면의 Wedge에 의해서 긴 축을 따라 지지된다. 각 Slot은 권선과 절연이 되어있고, 권선간에도 서로 절연이 되어있으며 회전자 권선 지지환(Retaining Ring)에 의해 회전자의 양끝부분에서 고정된다.

일반적으로 화력 발전소의 주발전기는 3,600rpm에서 운전되므로 회전자는 2극 권선으로 구성된다. 하지만, 원자력 발전소의 주발전기는 화력 발전소 주발전기의 정상 속도의 절반인 1,800rpm의 회전속도에서 운전되며, 이에 따라서 회전자도 4극 권선으로 구성된다.

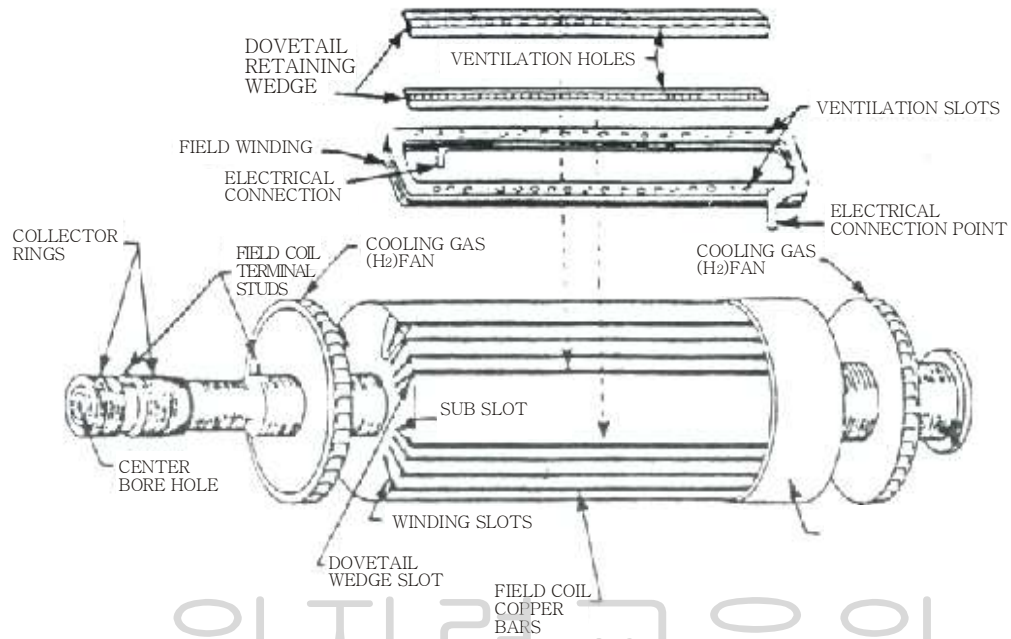
이것은 3,600rpm 발전기의 Single 권선과는 달리 계자(Field)에 2개의 자석을 만드는 2 Set의 권선의 구조이다. 이 결과 동일 주파수에서 발전할 경우 발전기의 자극수(P)와 회전수(N) 및 주파수(f) 사이에 다음 식이 성립된다.

$$f = \frac{P}{2} \times \frac{N}{60} \text{ [Hz]} \quad \text{또는,} \quad N = \frac{120 \cdot f}{P} \text{ [rpm]}$$

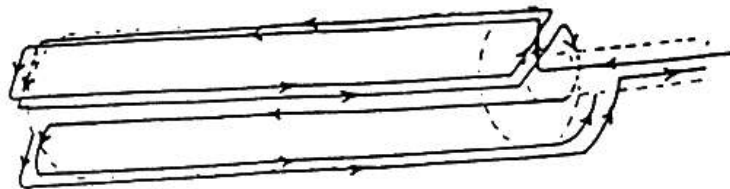
상기 식에서 회전수 N을 자극수 P와 주파수 f에 대한 동기속도라고 하며, 동기속

도로 회전하는 교류 발전기를 동기 발전기라 한다.

[그림 3-12]는 여자기에서 회전자로 들어온 DC 여자 전류가 회전자 권선을 통과하여 흐를 때, 그 전류의 방향을 나타낸 것이다.



[그림 3-78] 발전기 회전자 구조



[그림 3-79] 회전자 권선 전류 흐름

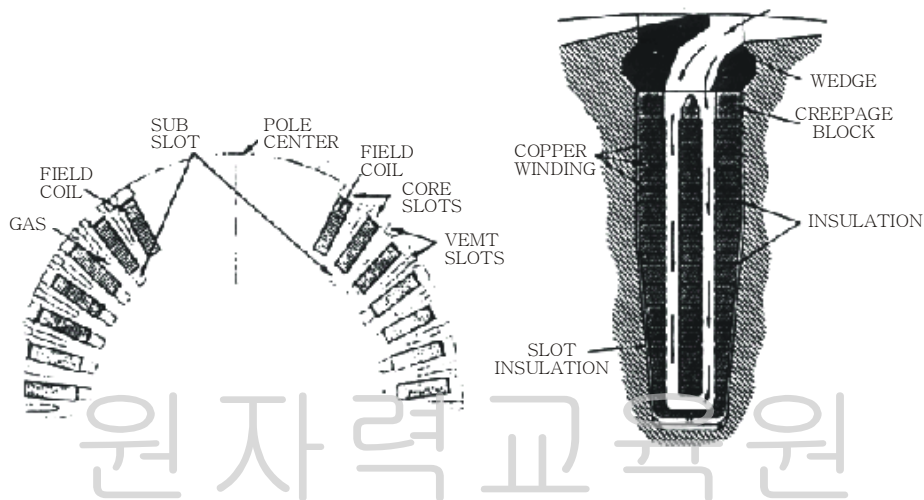
[그림 3-12]에서 회전자 권선에서의 전류의 흐름을 보면, Collector에서 회전자를 거쳐 2권선을 흐르고, 다시 회전자를 통과하여 나머지 2권선을 흘러서 회전자를 빠져 나가는 것을 이해할 수 있다.

7. 회전자 권선

[그림 3-13]은 주발전기의 회전자 권선, 즉 계자 코일의 구조인데 코일에서 발생된 열은 Slot Insulator를 통해 회전자 집합체로 열을 전달한다.

이 Slot를 절연하는 Barrier가 1차적으로 열전달을 방지하고 전기 유도를 방지하는 1차 기능을 수행하고 있다.

4극의 회전 계자로 설계되어 있는 원자력 발전소의 주발전기에 이용되는 "Radial Flow" 냉각방식은 회전자의 양끝부분에 부착된 냉각팬에 의해서 냉각 가스가 회전자



[그림 3-80] 회전자 권선과 가스 흐름

권선 지지환(Retaining Ring) 아래로 유입이 되어 회전자 권선의 중앙부분으로 흐르게 된다. End Turn 부분은 냉각 가스가 회전자 권선 하부의 Sub-Slot으로 유입되기 전에 일차적으로 냉각된다.

회전자 몸체의 양끝부분으로부터 Sub-Slot으로 냉각 가스가 유입이 되어 회전자 몸체의 중앙부분으로 흐르게 되며 Coil에 형성된 Hole을 따라서 Core 쪽으로 흐른다.

Sub-Slot은 Coil에 형성되어 있는 Hole을 통해서 유입된 냉각 가스를 분배하기 때문에 계자권선의 온도상승을 일정하게 유지해주게 된다.

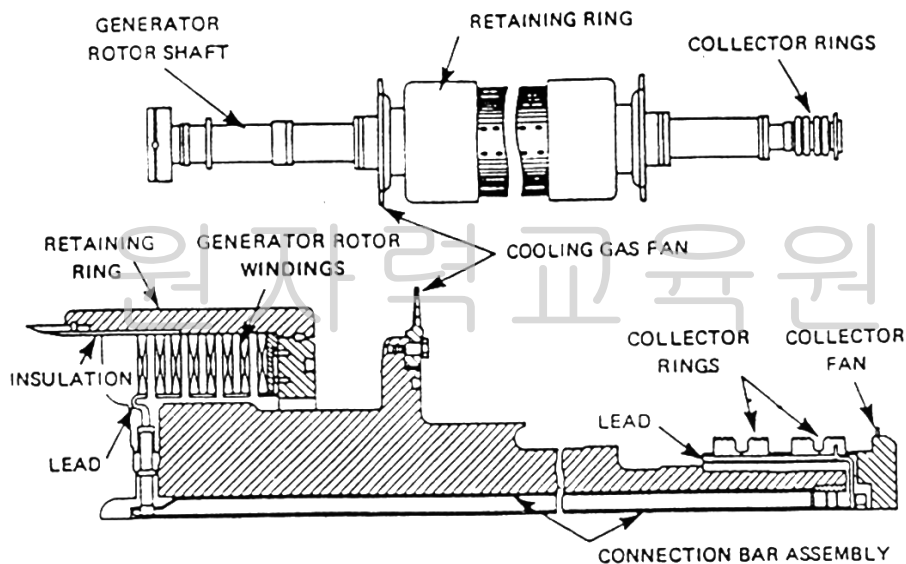
따라서, 이러한 Radial Flow 냉각방식은 회전자 몸체의 중앙 부분에서 온도상승이 발생하는 Axial Flow 냉각방식을 개선한 것이라고 할 수 있다.

8. 컬렉터(Collector)

여자 계통에서 공급되는 직류(DC) 여자 전원은 주발전기 베어링에 인접한 Collector Ring을 통해서 회전자 축(Shaft)에 공급되는 비교적 낮은 전압 전력 회로이다. 발전기의 여자 계통은 용량에 따라 125V DC, 250V DC, 375V DC 등이 있으나, 대용량의 원자력 발전소 주발전기의 경우, 여자 계통의 전압은 555V DC이다.

대부분의 여자 계통에서는 회전자 끝부분에 붙어 있는 Collector와 Brush를 통해 DC 전원을 회전자에 공급한다.

[그림 3-14]는 회전자 권선이 연결된 회전자 축의 끝부분에 Smooth Type의 Collector Ring을 나타낸 것이다. 이 Collector Ring은 주발전기의 회전자 축상에 둘러 쌓여있는 Insulation Ring상부에 장치된 열처리 강이다.



[그림 3-81] Collector Arrangement for Generator Rotor

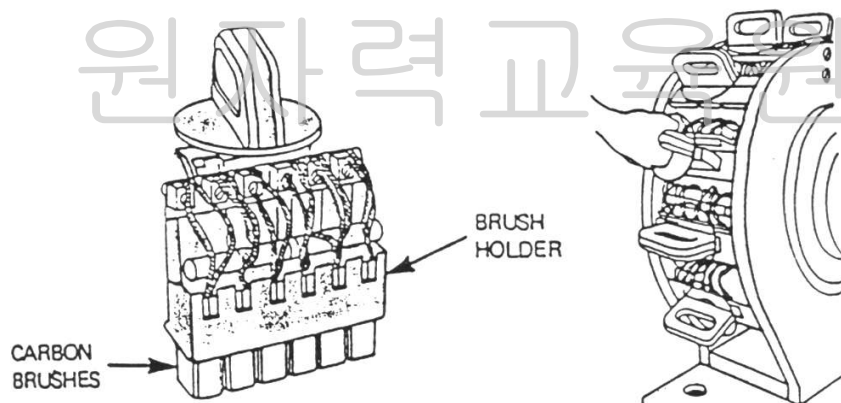
Collector의 각 Ring의 바깥쪽 표면은 나사 모양으로 가공된 홈이 있어서 방열 효과를 주게 되며, Brush와 Brush Lead로부터 여자 전원은 이 표면의 치차를 통해 전류를 균일하게 회전자 축(Rotor Shaft)으로 공급하게 된다. 또한, Collector와 Brush의 냉각을 위하여 공기를 공급하는 팬(Fan)이 필터(Filter)와 함께 장치된다.

주발전기 회전자 측에 장치된 Collector Ring은 (-)극이고, Collector Fan 외곽 측에 장치된 것이 (+)극이다. DC 전압계의 (+)측 단자를 이 Ring에 접촉시켰을 때 상승값을 지시하는 쪽이 (+)극이다.

9. 브러시(Brushes)

발전기의 회전자에 여자전원을 공급하기 위해서 마찰계수가 적은 흑연(Graphite) 재질의 Brush가 사용되는데, 이 Brush에는 2회선의 구리 재질의 연선(Pig Tail)이 연결되어 있으며, Brush의 중심부에 압력이 걸리도록 Brush Holder에 Spring이 장착되어 있는 구조로 설치되어 있다.

[그림 3-15]에서 나타낸 바와 같이, 몇 개의 Silver-Plate Magazine에 Brass 재질의 Support Bar가 연결되고 여기에 Brush가 삽입된다. 플라스틱 손잡이(Plastic Handle)는 Magazine에 접촉되어서 Collector의 Brush Holder Rigging으로부터 쉽게 빠져 나올 수 있는 구조이다. Collector Ring 표면과 Carbon Brush Box 밀면간의 Gap은 1.52mm~4.76mm를 유지한다.



[그림 3-82] Brush Magazine & Brush Holder Rigging

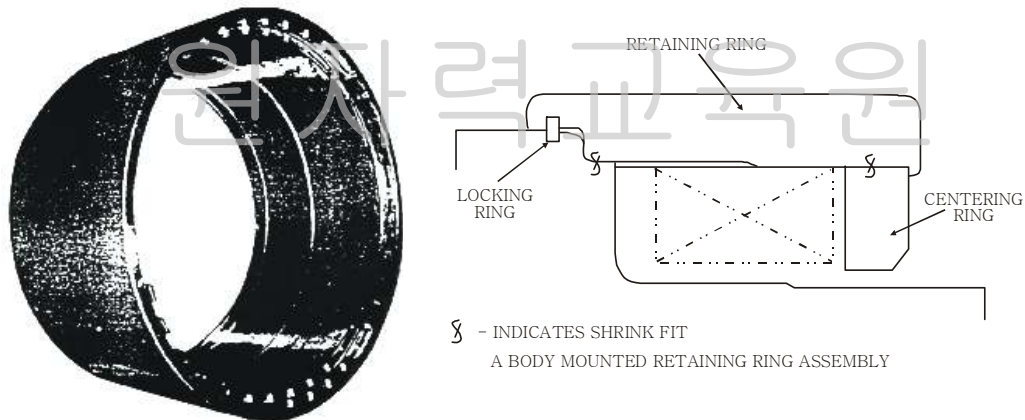
또한, Brush의 숫자는 발전기 계자 전류에 따라 결정되는데 하나의 Brush Magazine에 4~6개의 Brush가 배열된다. Brush 접촉면을 기준으로 7.75Amp/cm² 이하의 전류값으로 설계된다.

10. 회전자 권선 지지환(Retaining Ring)

계자 권선(Field Winding) 양끝 부분의 End Turn을 지지하고 있는 회전자 권선 지지환(Retaining Ring)은 [그림 3-16]에서 나타낸 바와 같이, 고강도의 비자성체를 원통 모양으로 가공한 것으로서, 회전자 권선이 원심력에 의해 이탈하려는 것을 억제하고 있다.

이 회전자 권선 지지환(Rotor Retaining Ring)은 회전자 몸체 양끝부분의 Fit에 Key로 고정되어 있다. End Winding의 원심력은 회전자 권선 즉, 구리(Copper)의 전 중량에 따라 5,000~8,000lbs까지 작용하는데, 회전자 권선 지지환 쪽으로 확산이 되어 지지환(Ring)을 압박하게 된다. 만약, End Turn 조립체가 불균일하게 팽창할 경우 회전자 권선 지지환은 타원형으로 변형이 될 수도 있다.

대용량 발전기에서 회전자 권선 지지환(Rotor Retaining Ring)은 비자성체 금속재질을 사용하여 제작하는데, 이것은 누설 자속을 최소화하고 손실을 감소시키기 위한 것이다.



[그림 3-83] Retaining Ring 구조

11. 주발전기 설계용량 및 냉각 방식

가. 주발전기 설계용량

터빈발전기의 대용량화는 냉각 기술의 진보에 따라 이루어진다 하여도 지나친 표현이 아니다. 주발전기의 용량을 기계적 크기와 기타 요소로 간단히 표시하면,

$$P = K \times D^2 \times L \times N \text{ 이 된다.}$$

여기서, P : 주발전기 설계용량 [kVA]

K : 출력계수

D : 고정자 철심의 내경 또는 회전자의 직경 [m]

L : 고정자 철심의 폭 또는 회전자의 길이 [m]

N : 정격 회전수 [rpm]

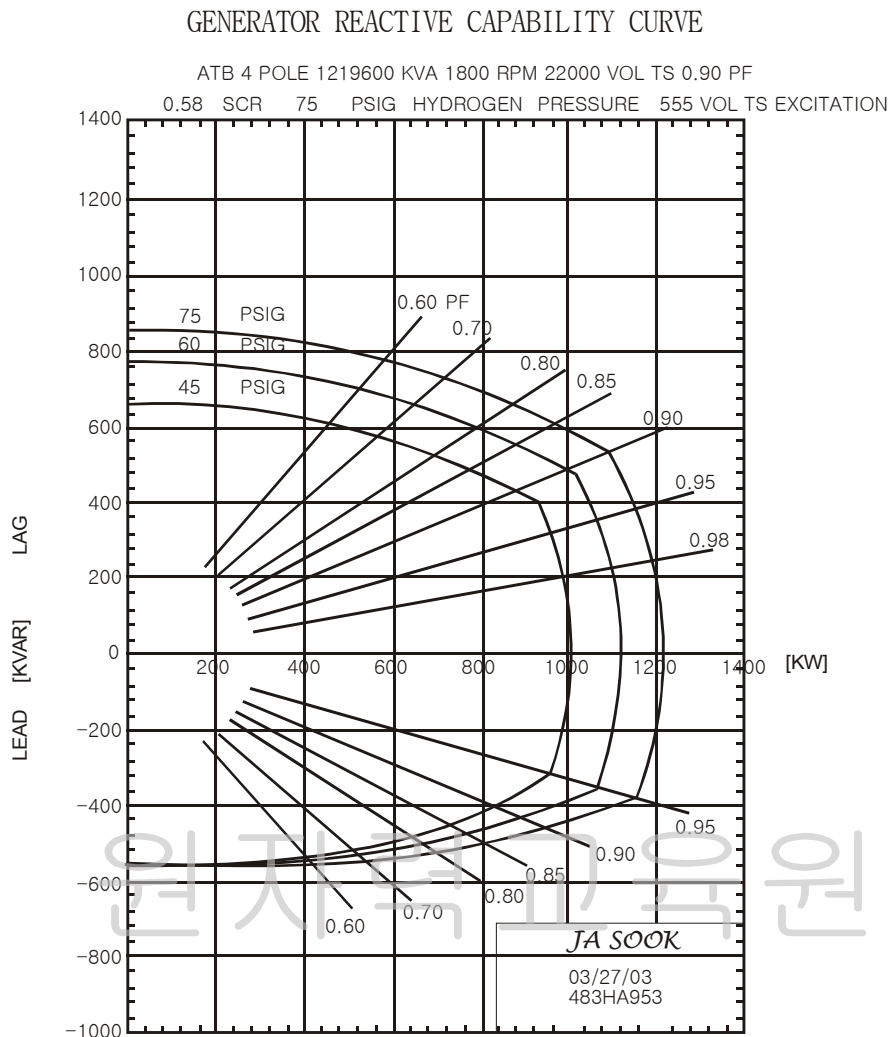
발전기의 용량 결정식을 살펴보면, 발전기의 용량을 증대시키기 위해서는 다음과 같은 점을 고려하여야 함을 알수 있다.

- 철심 내경을 크게, 즉 회전자 직경을 크게 한다.
- 철심의 적층을 많이, 즉 회전자를 길게 한다.
- 출력계수를 크게, 즉 냉각 효과를 좋게 한다.
- 정격 회전수를 증가시킨다.

즉, 발전기의 정격 회전수는 극수와 주파수에 의해 자동적으로 결정되므로 (1,800rpm, 4극, 60Hz), 결국 발전기의 용량은 회전자의 제작한도와 냉각능력에 의해 결정되는 출력계수에 의해 좌우된다.

그런데, 회전자의 직경을 크게 하려면 기계적강도 측면에서 제작 한계가 있으며, 회전자의 길이와 관련해서도 기계적, 전기적, 열적인 여러가지 제약 조건에 따라 한계에 도달하게 된다.

이와 같이, 회전자의 직경과 길이가 정해지면 주어진 수치 범위내에서 용량을 증대시키는 방법은 효율적인 냉각 기술의 개발 밖에 없으며, 실제로는 재질 및 설계 기술의 진보가 이것을 결정하고 있는 실정이다.



[그림 3-84] 발전기 용량 곡선

나. 주발전기 냉각 방식

회전자 권선의 간접 냉각 방식에서는 수소 가스가 코일 슬롯의 하단부나 철심 표면(Tooth)부분에 설치된 통풍 구멍을 통과하게 되며, 코일은 절연물을 통하여 간접적으로 냉각된다. 한편, 내부 냉각 방식은 크게 구분하여 “End feed 형”과 “Air gap pick up 형”의 두가지 종류가 있다.

최근 발전기의 용량이 더욱 증가함에 따라 회전자 코일의 냉각 방식에도 수냉식

이 채용되고 있다. 즉, 고정자 및 회전자가 모두 물에 의해 냉각되어 냉각효과가 대폭 개선되고 발전기의 중량 감소, 저부하 시의 효율 향상, 급속 여자에 요구되는 특수 전원설비의 응용 등 많은 개선 효과가 기대된다.

회전자의 물에 의한 냉각은 원리적 측면에서는 간단하지만, 실제로 고속 회전에 물을 통과시켜 냉각하는 데는 어려운 점이 있다.

따라서, 발전기의 초대형화를 위해서는 수소 냉각식 회전자의 제작 한계와 수냉식 회전자의 제작 기술상 어려운 점, 경제성 등의 문제가 내재하고 있다.

수소 냉각방식의 경우, 수소 압력을 증가시키면 냉각 효과가 상승하지만 어느 정도 이상이 되면 도체 주위의 절연물이 발생하는 열을 충분히 전달하지 못하므로, 용량 증대의 한계에 도달하게 된다. 이러한 관점에서 고안된 방법이 회전자의 도체 내부에 직접 수소를 통과시켜 냉각하는 수소 직접 냉각방식이다.

그런데, 회전자에 직접 냉각 방식을 채용하여 일정 용량 이상이 되면, 이번에는 고정자 측이 한계에 이르게 된다. 그 후, 고정자 권선의 내부 수냉각 방식이 출현하게 되었고 지금까지 적용해오던 직접 냉각 방식에 비해 냉각 효과가 크게 향상되었다.

한편, 고정자 도체의 효율을 향상시키기 위한 방법으로서 고정자 액체 냉각방식이 도입되었다. 초기에는 고정자 권선의 냉각을 위해서 변압기유를 사용하였으나, 순수한 물이 기름에 비하여 오히려 냉각 성능이 우수하므로 현재와 같은 수냉각 방식을 전반적으로 적용하기에 이르렀다.

[핵심요약]

1. 주발전기는 회전계자형 동기발전기이다.

- 회전자(Rotor) : 4극의 전자석으로 계자(Field)로 설계
- 고정자(Stator) : 3상 교류 출력을 발생하는 전기자(Armature)로 설계

2. 주발전기의 주요 구성부품

- 고정자 프레임(Frame)
- 고정자 철심 및 바(Bar)
- 고정자 권선(Winding)
- 회전자 축
- 회전자 권선 및 지지환(Retaining Ring)
- 컬렉터 링(Collector Ring)
- 브러시(Brushes)

3. 주발전기의 설계용량 및 냉각방식

- 설계용량 $P = K \times D^2 \times L \times N$ 이 된다.

여기서, P : 주발전기 설계용량 [kVA]

K : 출력계수(냉각효율에 비례)

- D : 고정자 철심의 내경 또는 회전자의 직경 [m]
- L : 고정자 철심의 폭 또는 회전자의 길이 [m]
- N : 정격 회전수 [rpm]

4. 주발전기의 냉각방식

- 회전자(Rotor) : 수소 냉각방식
- 고정자(Stator) : 수(水) 냉각방식

제2절 발전기 여자제어계통

[학습목표]

1. 발전기 여자제어계통의 목적과 기능을 이해한다.
2. 여자제어계통의 종류를 이해한다.
3. 여자제어계통의 설계특성을 이해한다.
4. 여자제어계통의 구성기기 및 원리를 이해한다.

1. 개 요

발전기에 있어서 계자(Field)란 자계를 형성하는 부분을 말하는 것으로, 발전기의 전기자 권선 즉, 회전계자형 발전기에서의 고정자권선에 대하여 계자 즉, 회전계자형 발전기에서의 회전자 권선을 회전운동시킴으로써, 자속 쇄교에 의한 자계의 변화를 형성하여 전기자 권선에 유도기전력이 발생하도록 하는 기능을 수행한다. 발전기의 회전자(계자)에 자계를 형성시켜 주기 위해서는 영구자석이나 전자석을 회전자로 사용하여야 한다. 현실적으로, 주발전기에 강한 자계를 형성시켜 주기 위해서는 전자석을 주로 사용하고 있으며, 회전자를 전자석으로 만들어 주기 위해서는 직류(DC) 여자 전원이 필요하다. 따라서, 여자기는 발전기의 회전자(Field)에 직류 여자 전원을 공급하여 주는 장치를 말하는 것이며, 이와 같이 주발전기에 직류 전원을 공급하여 회전자를 전자석으로 형성시켜 주는 수단을 여자(Excitation)라고 한다. 또한, 발전기의 회전자(Field)에 공급되는 직류 전원을 여자전원이라고 하는 것이다.

결국, 발전기의 계자에 공급되는 전원은 직류가 되며, 이 여자전류의 공급을 위해서는 직접 직류전원을 발생시키는 직류발전기에 의해 여자전원을 공급하는 방식과 별도의 교류전원 또는 교류발전기의 출력을 정류기(Rectifier)를 통해 직류로 변환시킨 후 여자전원으로 공급하는 방식이 있다. 여기서, 전자의 방법을 직류 여자 방식이라고 하며, 후자의 방법을 교류 여자 방식이라고 한다. 직류 여자 방식에서 직류여자기는 발전기의 용량이 약 200MW 급까지는 적용이 가능하지만, 여자기의 용량이 약 400kW

이상으로 증가될 경우에는 직류발전기의 정류자(Commutator) 직경이 증가하게 되며 고속회전 시에 정류자편이 원심력에 의해 파손되기 쉽고 대전류를 집진하는 문제가 발생하기 때문에 대용량 발전기에서는 교류여자방식이 유리하다고 할 수 있다. 직류여자방식에서 원심력의 완화를 위해 감속 기어를 사용하거나 별도의 축을 사용하여 전동기로 구동하는 경우가 있으나, 현재 대용량 발전기의 여자장치로는 부하 변동 시, 또는 고속 응답 계통에서 강한 자계로 운전될 때, 정류자(Commutator) 간에 플래쉬 오버(Flash-over)와 같은 위험이 발생할 가능성이 있으며 신뢰성도 떨어지기 때문에 직류여자방식은 이미 사용하지 않고 있는 실정이다.

최근에는 대용량 제어정류를 위한 전력용 반도체 소자의 기술 진보에 따라서, 싸이리스터(Thyristor)를 적용하여 회전형 교류발전기를 사용하지 않고 직접 교류전원을 여자시키는 정지형 여자방식을 채택하는 경우와 회전형 교류발전기를 사용하여 발생시킨 교류전원을 정류기(Rectifier)에 의해 직류로 변환시킨 후 여자전원으로 공급하는 방식을 일반적으로 많이 적용하고 있다. 또한, 직류전원을 발전기의 계자에 공급하고자 할 때, 일반적으로 대용량의 주발전기는 회전계자형이므로, 여자전원의 공급부가 정지형일 경우 주발전기의 회전자와 전기적으로 연결되기 위해서는 브러쉬(Brush)와 슬립링(Slip Ring)장치가 있어야 한다. 만약, 여자전원의 공급부가 회전전기자형 여자기로 구성되어 있고 회전형 정류기(Rotating Rectifier)를 사용하고 있는 경우에는 브러쉬와 슬립링이 필요없게 되며, 회전자의 축을 따라 설치되어 있는 회전형 정류기를 거쳐서 주발전기의 회전 계자에 여자전원을 바로 공급할 수 있는 무브러쉬형(Brushless Type) 여자방식이 구성된다.

2. 여자계통의 분류

여자방식의 명칭과 종류에는 여러 가지가 있는 데, 일반적으로 여자계통의 분류 방법을 살펴보면 다음과 같다.

가. 교류여자방식

일반적으로 대용량의 터빈 발전기에 가장 많이 적용되고 있는 여자기 형식으로

는 정류기 별치식이 있으며, 이 방식을 무정류자형(Commutatorless Type) 여자방식이라고 하기도 한다. 이 방식은 주발전기 축에 직결된 교류여자기의 출력을 별도로 설치되어 있는 정류기에 의해 직류로 정류한 후, 주발전기의 여자전원으로 공급하는 것으로서, 회전계자형 주여자기와 정지형 정류기를 사용하는 방식을 브러시형 교류여자방식이라고 하고, 회전전기자형 주여자기와 회전형 정류기를 사용하여 브러시와 슬립링을 제거한 방식을 무브러시형(Brushless Type) 교류여자방식이라고 한다.

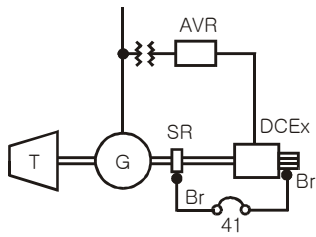
이들 두가지 방식은 각각의 특징을 가지고 있는 데, 먼저 브러시형 교류여자방식이 브러시와 슬립링이 있어야 하지만 정류기를 별치 고정형으로 설치하게 되므로 각 구성 부분의 구조가 간단하고 점검 및 감시가 비교적 간편하게 된다. 한편, 무브러시형 교류여자방식은 정류기가 발전기의 축을 따라 설치되는 회전형 정류기이므로 운전 중의 원심력에 충분히 견딜 수 있도록 설계해야 하며, 그 구조가 복잡하게 되지만 브러시와 슬립링이 근본적으로 불필요하므로 운전 중의 일상 점검이 간편하고 정비 편의성이 증가된다.

나. 여자방식의 종류

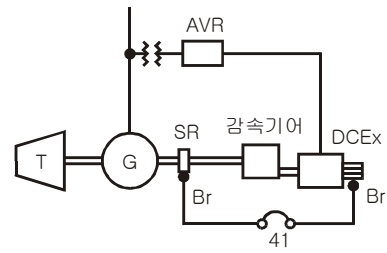
(1) 브러시형(Brush Type) 교류여자방식

무정류자형의 여자방식에도 여러가지 종류가 있으며, 각 여자방식의 특성에 있어서도 약간의 차이가 있으나, 여기서는 가장 일반적인 브러시형 교류여자방식을 중심으로 설명하기로 한다. 브러시형 교류여자방식에서는 정지형 정류기를 사용함으로써 회전 부위에 정류자(Commutator)가 설치되지 않기 때문에 정류회로의 문제점은 감소하게 된다. 또한, 여자기를 주발전기와 같은 고속회전체로 설계할 수 있으므로, 여자기의 크기와 중량을 감소시킬 수 있으며 설계비용도 절감할 수 있게 된다. 응답속도 측면에서도 교류여자방식이므로 직류여자방식보다는 속응성이 있다.

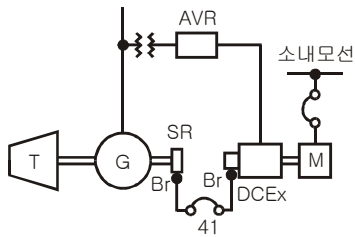
브러시형 교류여자방식은 정비 측면에서는 정지형 정류기를 사용하고 정류자를 사용하지 않기 때문에 유리하지만, 브러시와 슬립링이 있어야 하기 때문에 브러시의 일상점검 등, 유지관리 및 정비 편의성 측면에서는 부담이 있다.



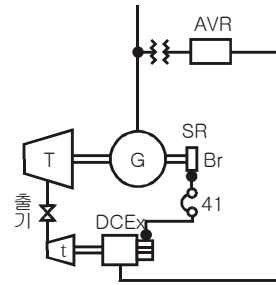
(a) 직류발전기 직결방식



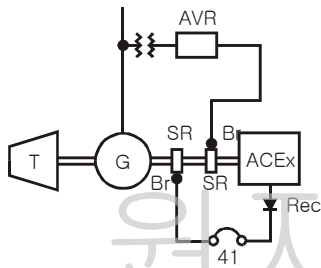
(b) 감속기어 구동방식



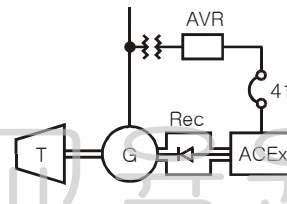
(c) 별치전동기 구동방식



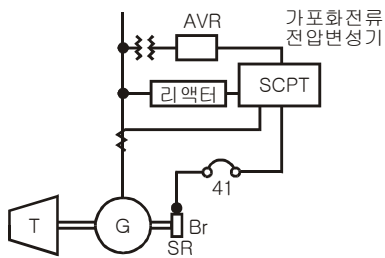
(d) 별치터빈구동방식



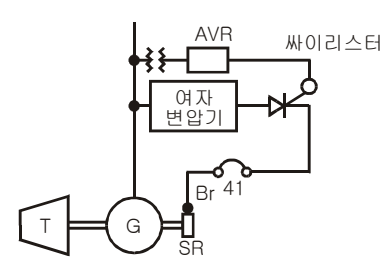
(e) 정류기별치교류 여자방식
(무정류자방식)



(f) 정류기장치 교류여자방식
(무브러쉬방식)



(g) 복권여자자방식



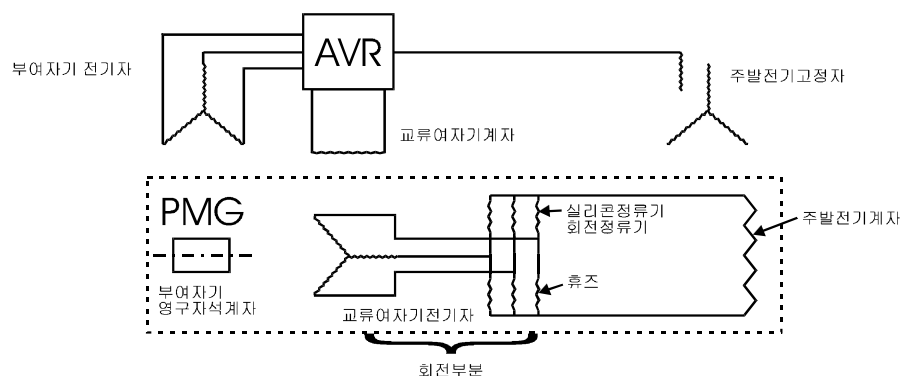
(h) 싸이리스터 방식

(주) T : 주터빈 t : 구동용터빈 G : 주발전기 DCEx : 직류여자기
ACEx : 교류여자기 AVR : 자동전압조정기 Rec : 정류기 SR : 슬립링
Br : 브러쉬 41 : 계자차단기 (Slip Ring)

[그림 3-85] 여자방식의 종류

(2) 무브러시형(Brushless Type) 교류여자방식

무브러시형 교류여자방식의 가장 큰 특징은 회전 전기자형 여자기를 사용함으로써 브러시와 슬립링이 없다는 것이다. 무브러시형 교류여자 방식은 주발전기의 축에 직결된 교류 여자기, 회전형 정류기, 영구자석을 사용하는 부여자기(PEX : Pilot Exciter) 등으로 구성되어 있으며 이들 기기는 모두 동일 축상에 설치되어 운전되고 있다. 실제 여자방식은 주발전기의 축에 직결된 회전계자형 교류 동기발전기인 주여자기(Main Exciter)가 있으며, 이 주여자기에 여자전류를 공급하기 위하여 부여자기(PEX : Pilot Exciter)는 영구자석이 내장된 교류발전기(PMG : Permanent Magnet Generator)로 설계되어 있으며, 역시 주발전기의 회전자 축에 직결되어 있다. 즉, 회전전기자형 교류여자기의 출력이 회전형 정류기를 거쳐서 직류로 변환된 후 주발전기의 회전자(Field)에 공급된다. 이러한 무브러쉬형 여자방식에서는 교류여자가 반드시 회전전기자형 여자가 되어야 한다. 이 방식은 여자기 출력을 외부로 끌어내지 않고, 회전형 정류기(Rotating Rectifier)를 거쳐 바로 주발전기의 회전자(Field) 권선에 직류 여자전원을 공급할 수 있으므로 정류자(Commutator), 브러쉬, 슬립링 등의 회전 접촉 부분을 필요로 하지 않는다. 주발전에 있어서, 여자전류의 제어 원리는 부여자기의 출력이 주여자기로 공급될 때, 싸이리스터 방식(Thyristor Type)의 자동 전압 조정장치(AVR : Auto Voltage Regulator)에 의해 주여자기에 공급되는 여자전류의 크기를 조절하도록 함으로써 주발전기의 여자전류를 제어하도록 설계되어 있다.



[그림 3-86] 무브러쉬형 여자기의 원리

3. EX-2000 개요

가. 목 적

주발전기 여자제어계통은 EX-2000(GE사의 모델명) 디지털 여자로 구성된 “정지형 모선 공급” 형식의 여자를 적용하고 있다. EX-2000 여자는 마이크로 프로세서에 기초한 전력변환기로서, 주발전기의 여자전원을 제어하여 발전기의 출력 단자전압 및 무효전력을 제어한다.

나. 기 능

(1) 여자전류 공급

주발전기 출력단에 연결된 여자용 변압기(Power Potential Transformer : PPT)를 통하여 공급된 여자로용 전원을 싸이리스터(Scillicon Controlled Rectifier : SCR)에 의해 3상 전파 정류한 후, 주발전기의 계자 권선에 공급하게 된다. 따라서, EX-2000 여자방식을 싸이리스터 자여자방식이라고 하기도 한다.

(2) 조정기능

SCR 점호각의 위상제어로 여자전류를 제어하며, SCR 점호신호는 Control Core의 디지털 조정기에서 발생이 된다.

(가) 자동 조정기(AC Regulator : 발전기 단자전압 조정기)

부하조건이 변화하더라도 발전기 단자전압을 일정하게 유지한다. 자동조정기에 의한 운전이 정상운전 상태이며, 발전기 단자전압 궤환 신호가 상실될 경우 수동 조정기에 의한 운전 형태로 자동절체(Automatic Transfer)가 된다.

(나) 수동 조정기(DC Regulator : 발전기 계자전압 조정기)

발전기 출력단의 운전조건에 무관하게 계자전압을 일정하게 유지한다.

(다) 자동추적 장치(Automatic Tracking)

운전형태 변경(자동→수동, 또는 수동→자동)시, 동요 없는 절체를 위해서 자동 및 수동 조정기가 설치되어 있다.

(라) 평형전압계(Balance Voltmeter)

자동 및 수동 조정기 사이의 평형전압계(Balance Voltmeter)가 운전 제어반

(Intelligent Operator Station : IOS)에 설치되어 있으며, 두 조정기 간의 절체를 운전 제어반(IOS)에서 수행할 수 있다.

(3) 보호 기능

- (가) V/Hz : 과전압 상태나 저주파 운전에 따른 주발전기 또는 주변압기의 손상을 방지.
- (나) 저여자 보호 : 발전기 고정자 철심 단부의 과열을 방지하고, 터빈 발전기의 정태 안정도를 확보.
- (다) 과여자 보호 : 발전기 계자 권선의 과열 방지.
- (라) 발전기 과전압 보호
- (마) 초기여자 보호
- (바) 계자 접지 보호 : 국부적인 과열 방지 및 회전자의 기계적 손상방지.
- (사) 축전압 억제 보호 : 전식으로부터의 베어링 손상 방지.

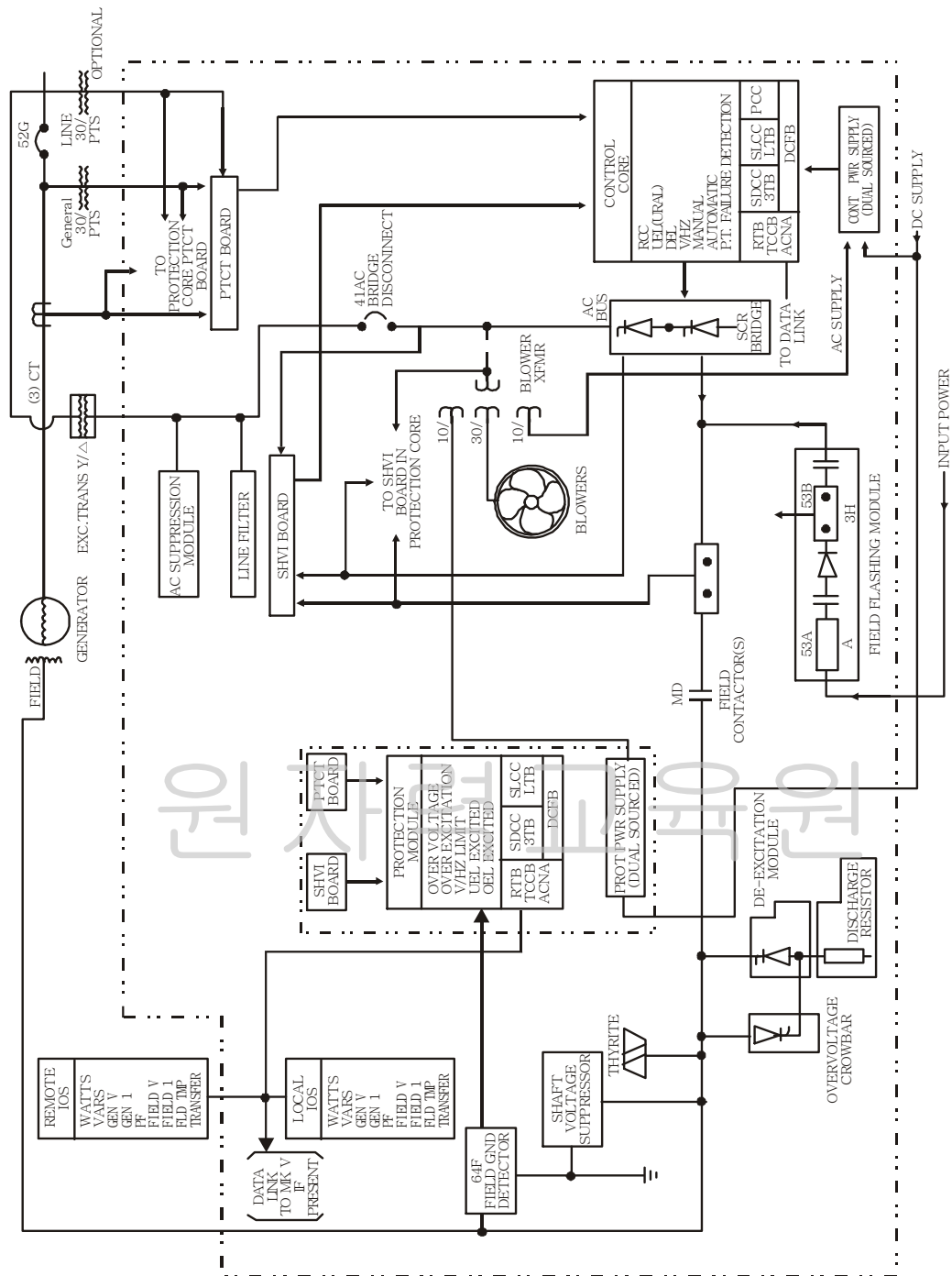
(4) 기동(Start-up)기능

비여자 회로 및 하드웨어와 소프트웨어간의 운전원 접속(Operator Interface) 등을 수행한다.

[그림 3-20]은 EX-2000 여자기통의 전형적인 단선도로서, 일반적인 기능을 포함한 단일 브릿지 여자기통의 하드웨어 구성을 나타낸다.

소프트웨어 블록(Software Block)은 여자기의 제어 및 보호기능을 표시하며, 이 블록은 Control Core, Protection Core에 내장된 여자기 소프트웨어 데이터베이스 내부에 저장되어 있다.

소프트웨어는 RS-232C 통신망(Communication Link)을 통해서 Super Tool 2000 (ST-2000) 프로그램을 이용하여 접근할 수 있다.



[그림 3-87] EX-2000 여자계통 단선도

ST-2000은 마이크로 프로세서에 기초한 일종의 소프트웨어로서, EX-2000 여자기를 구성하고 유지 관리할 수 있는 제어도구(Toolkit)이다.

다. EX-2000 시스템 특성

(1) 설계 특성

EX-2000 여자기는 강력한 응용 소프트웨어가 탑재된 디지털 하드웨어로 설계되어 있다. 사용자 진단 인터페이스(Diagnostic User Interface)는 10개 영문자와 숫자를 표시할 수 있는 표시판(Display)과 키패드(Keypad)로 구성되어 있으며 이 장치로 감시, 진단, 조정을 수행할 수 있다.

(가) 통신 접속(Communication Interface)

EX-2000 시스템은 근거리 통신망(Local Area Network : LAN)과 ST-2000 사용에 필요한 외부 통신을 위해 RS-232C 통신망에 접속이 사용된다.

(나) 소프트웨어 설계

여자기 응용 프로그램은 시스템의 요구조건에 따라 기능적 소프트웨어 모듈(블럭 조합)의 결합으로 구성되어 있고, 블럭의 정의와 구성 변수(Configuration Parameter)는 ROM(Read-Only Memory)에 저장되며 변수는 RAM(Random Access Memory)에 저장된다. 또한, 마이크로 컨트롤러는 코드(Code)를 실행한다.

진단 소프트웨어는 알기 쉽게 구성이 되어 있고 디지털 표시판과 키패드로 구성된 프로그래머 모듈(Programmer Module)을 이용하여 운전원이 변수를 확인하고 자기진단(Selfcheck)을 할 수 있다.

(다) 하드웨어 설계

EX-2000 하드웨어는 제어부분과 전력변환 부분으로 구성되어 있다. 제어기는 EEPROM(Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory)이라고 하는데, 프로그램이 가능한 마이크로 프로세서 등으로 구성된 전자회로 기판의 형태로 구성되어 있다.

여자기의 전력변환기(Power Converter)는 브릿지 정류기, 저항-캐패시터 필터 및 제어회로 등으로 구성된다.

(라) 조정기 모듈(Control Core)

조정기 모듈(Control Core)은 SCR 브릿지와 동일한 판넬에 설치되어 있어 운전중 접근이 가능하다. 조정기 모듈(Control Core)의 전자기판(Circuit Board) 구성은 다음과 같다.

- DC 전원 및 변환(DCFB)
- 근거리 통신망 및 통신카드(SLCC : LAN/Communication Card)
- 근거리 통신망 단자대(LTB : LAN Terminal Board)
- 마이크로프로세서 응용 보드(TCCB)
- 전원 연결 보드(PCCA)
- 입출력 단자대(NTB/3TB : I/O Terminal Board)
- 드라이브 제어카드(SDCC : Drive Control Card)
- 릴레이 단자대(RTBA : Relay Terminal Board)
- ARCNET 링크(ACNA)

DC 전원 및 변환(DCFB) 부분은 전원을 재분배하고 브릿지와 초기여자 모듈(Field Flash Module)로 부터의 변환신호(직류 전압, 전류)를 격리하고 비율 변환(Scaling)한다. 근거리 통신망 및 통신카드(SLCC)는 LAN 통신을 제어하고 프로그래머 키패드에 의한 운전원 접속과 제어를 가능하게 한다. 마이크로프로세서 응용 보드(TCCB)는 격리 및 스케일링 보드로부터의 입력을 수학적으로 조작하는 소프트웨어 변환 알고리즘을 포함한다. 이들 입력은 CT 및 PT로부터 변환되는 아날로그신호로 발전기 출력 및 계통 전압을 감시하기 위하여 사용된다.

다양한 조정기 기능을 위하여 필요한 주발전기 유효전력, 무효전력, 선 전류 및 기타 변수들은 디지털 계수기에 의해 변환되어 RAM에 저장된다. DCFB와 TCCB 보드는 아날로그와 디지털 신호간의 주요 연결 기능을 담당한다.

전원 연결 보드(PCCA)는 자동 및 수동조정기에 의한 제어시 SCR 브릿지의 점호 펄스(Firing pulse)를 발생한다. 입출력 단자판 보드(NTB/3TB)는 개인용 컴퓨터(PC)를 연결하기 위한 RS-232C 통신 포트를 포함하고 있다. PC는 ST-2000을 사용하는 터미널 에뮬레이터(Terminal Emulator)로 동작중인 여자기의 응용 소프트웨어에

접근하고자 할 때 사용할 수 있다.

1) 소프트웨어

여자기의 응용 소프트웨어는 전통적인 아날로그 제어 기능을 대체하는 것으로 개방 구조 시스템(Open Architecture System) 즉, 현존하는 소프트웨어 블록 라이브러리(Block Library)를 사용하여 구성된다. 각 블록은 특정기능 즉 AND Gate, 비례적분(PID) 제어, 기능 발생기(Function Generator), 신호준위 검출기 등의 기능을 수행한다. 이러한 블록(Block)들이 상호 접속되어 복잡한 제어기능을 담당한다.

예를 들면, 저여자 제한(UEL)과 같은 기능은 EEPROM(Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory)에 내장된 소프트웨어에 점퍼를 설정함으로써 자동전압 조정기의 입력신호로 부가된다. 해당 블록웨어(Blockware)는 입력이 존재하는 RAM 위치에 블록 입력을 지정하면 된다. 즉, 저여자 제한(UEL)은 MW, kV, MVAR 등의 입력 변수가 필요하다. 저여자 제한(UEL)의 출력은 자동전압 조정기 합산점(Summing Junction)의 입력으로 지정된다. 소프트웨어 블록(Block)은 ST-2000에 의해 순서 및 실행비율이 정의된 블록(Block) 해석기에 의해서 순차적으로 실행이 된다. 블록 웨어(Block ware)는 ST-2000을 사용하여 동작 중에 병합할 수 있다. 각 블록(Block)의 동적인 입력 변환을 운전 중에 감시할 수 있다. 이 기법은 전압계를 사용하여 아날로그 신호를 추적하는 것과 유사하다.

2) 고장(Fault)

EX-2000은 정교한 자기진단 능력을 갖추고 있다. 고장이 발생하면 프로그램머 표시판에 고장 코드(Fault Code)가 지시된다.

3) 모의제어기(Simulator)

모의제어기는 Control Core의 소프트웨어에 위치하는 계자와 발전기의 특성을 모델링하는 정교한 시스템 모의제어 프로그램이다. 모의제어기는 EEPROM에 소프트웨어 점퍼를 설치함으로써 작동이 된다. 모의제어기는 상태신호가 발생되면 계자차단기와 초기여자 접점을 동작시킨다. 계자와 발전기 궤환 신호를 대신하는 신호들은 TCCB에서 모의(Simulation) 되어 변환 알고리즘으로 공급된다. 제어 소프트웨어는 자체입력이 모의되어 영향을 받지 않도록 되어 있다. 예를 들면, 시뮬레이터 모드에서

기동시퀀스가 성공적으로 수행되면 IOS의 표시판에 계사전압, 계사전류, 발전기 전압이 표시된다. 시뮬레이터는 훈련, 시운전 및 교정을 위한 점검 시 유용하게 사용된다.

4) 비율 변환(Scaling)

여자기 소프트웨어는 비율변환을 필요로 한다. 즉 조정기는 특정 변수(발전기 전압, 계자 전류, 등)의 1.0 PU(Per Unit)에 해당하는 정규화된 계수(Count)를 사용한다. 이 계수는 보통 1.0 PU(Per Unit)에 20,000 Count를 사용한다.

5) 자동전압 조정기(AC Regulator)

자동전압 조정기의 합산점에는 기준신호 입력 외에 다음과 같은 변수들이 입력된다. 한편, 전력 계통 안정화 장치(Power System Stabilizer)는 선택 사양이다.

○ 무효전류 보상(Reactive Current Compensation : RCC)

발전기 전압은 전력계통에 병렬로 연결된 발전기간에 분배된 무효전력을 증감시키면서 변화된다. 발전기 전압은 과여자 상태에서 무효 전류가 증가되면 감소하고, 저여자 상태에서 무효전류가 감소하면 증가한다.

○ 저여자 제한(UEL)

저여자 상태는 발전기 철심의 과열을 방지하고 터빈 발전기의 동태 안정도를 확보하기 위해 제한되어야 한다. 저여자 상태가 특성곡선의 제한치에 도달하면 저여자 제한기가 자동조정기의 기능을 넘겨받아 제한치 이내 즉, 허용범위 내에서 발전기가 운전되도록 조정한다.

○ V/Hz

주파수에 대한 발전기 단자전압의 비(V/Hz)는 과전압 상태나 저주파수 운전에 따른 발전기나 주변압기의 손상을 방지하기 위하여 제한된다.

○ 전력 계통 안정화 장치(Power System Stabilizer : PSS)

여자가 높은 초기 응답과 고이득을 갖게 되면 전력 계통의 동태 안정도 문제가 제기될 수 있다. 이러한 여자기의 장점은 과도 안정도를 향상시키는 반면, 동태 안정도를 저하시켜 낮은 주파수 동요를 야기할 수 있다. PSS는 가속력(Accelerating Power)의 적분 즉, 속도신호를 자동조정기에 병합하여 자동조정기의 특성을 수정하는 역할을 담당한다. 동기 속도와 회전자 속도와의 편차신호가 자동전압 조정기의 합산점

에 공급된다. 따라서, 발전기의 속도나 부하에 편차가 발생 하면 전압 및 속도 신호의 합성신호에 의해 조정기의 출력이 발생되어 여자기를 조정한다. 따라서, PSS는 회전자에 제동 토크를 발생시켜 동태 안정도를 증가시킨다.

- 과여자 제한(OEL)

이 기능은 발전기 계자의 열용량 곡선(Thermal Capability Curve)에 근거한 모델을 사용하는 브릿지 계자의 Thermal Current Limiter로 작용한다.

- (마) 보호 모듈(Protection Module)

보호 모듈(Protection Module)은 보조 판넬에 취부되는 선택 사양의 모듈로서, 조정기 모듈(Control Core)과 물리적으로 유사하다. 조정기 모듈과 다른 점은 브릿지의 점호 펄스 발생 기능을 가지지 않는다는 것이다.

보호 모듈은 PCCA(전원연결 보드)나 SCR 브릿지를 포함하지 않는다. 또한 보호 모듈은 브릿지 회로에 근접되어 있지 않으므로 냉각팬을 구비하고 있지 않다. 자체의 격리 및 스케일링 보드에 의해 보호모듈에는 조정기 모듈의 입력과 동일한 전압, 전류가 입력된다. 보호 모듈은 조정기 모듈에 의해 조정된 계통조건이 한계치를 벗어나는 경우 적절한 보호기능을 수행한다. 보호 모듈용 소프트웨어는 조정기 모듈의 소프트웨어와 유사하다.

- (바) 운전제어반(Intelligent Operator Station : IOS)

운전제어반(IOS)는 여자계통과 운전원을 접속시켜 준다. 기동/정지 명령, 조정기 절체 명령, 조정기 작동 명령 등을 발생시킨다. 또한, IOS에는 MW, MVAR, 여자 전압, 여자 전류와 조정기 평형을 나타내는 계기 표시판을 구비하고 있다. 계기의 정보는 보호 모듈 또는 조정기 모듈에서 공급받는다.

- 데이터 통신

운전제어반(IOS), 조정기 모듈, 보호 모듈과 Mark-V 터빈제어기는 동축 케이블링크로 ARCNET LAN (Area Resource Communication Network Local Area Network)과 정보를 교환한다. 통신 프로토콜(Protocol)은 GE사의 "Status S" 시스템이 사용된다.

(사) 계기용 변압기 및 변류기(PT & CT)

이 보드들은 조정기 모듈 및 보호 모듈에 격리 및 스케일링된 전압 및 전류의 변환신호를 제공한다.

(아) 전원 공급 장치(Bulk Power Supply)

제어전원 공급장치(CPS) 및 보호전원 공급장치(PPS)는 이중전원 공급 장치로서 조정기 모듈, 보호 모듈, 현장 IOS, 비여자 모듈, 초기 여자 모듈 및 계자 차단기에 DC 전원을 공급한다. 제어전원 공급용 AC 전원은 여자기 냉각팬용 변압기에서 공급받고, DC 전원은 소내 축전지에서 공급받는다.

(자) 여작용 변압기(Power Potential Transformer : PPT)

여작용 변압기는 여자기에 전력을 공급한다. 여작용 변압기는 연속정격 여자 및 단시간 최고 여자(Ceiling Excitation) 운전에 필요한 전력을 공급하도록 설계되어 있다.

(차) 초기여자 모듈(Field Flashing Module)

초기여자 모듈은 발전기 전압 형성을 위한 초기여자를 제어한다. 발전기 기동 시 여작용 변압기로부터 AC 전류를 수전, DC 전류로 정류하여 발전기 계자에 초기여자전류를 공급한다.

(카) 계자 접지 검출기(Field Ground Detector)

발전기 계자 권선은 대지로부터 절연되어 있다. 회전자에서의 1개소 접지는 별다른 문제를 야기하지 않으나 2개소 이상에서 접지가 발생되면 자기적 불평형과 열적 불평형에 의한 국부적인 과열이 발생되어 회전자의 단조 구조물(Forging) 및 금속 구조물이 손상될 수 있다. 계자접지 검출기의 기능은 주계자 권선에 연결된 여자기 회로에서의 접지를 검출하는 것으로 검출기는 낮은 AC 전압에서 계자권선의 전기적 중심점에서 동작한다. 검출기의 접점은 경부 또는 트립회로에 사용된다.

(타) 축전압 억제기(Shaft Voltage Suppressor)

축전압이 효과적으로 제어되지 않으면 발전기 베어링이 손상될 수 있다. 정지형 정류기를 거쳐 정류된 DC는 리플 및 스파이크(Ripple and Spike) 전압을 포함하고 있는데 이 전압의 급속한 상승 및 감소시간에 기인하는 유기전압에 의해 계자권선과

회전자 몸체가 용량적(Capacitive)으로 결합된다. 이에 의해 회전자 축에 전압이 형성된다. 축전압 억제기는 유도된 전압 중 고주파 성분은 대지로 방출하는 역할을 담당한다.

(과) 비여자 모듈(De-Excitation Module)

정상절차에 의한 정지시는 SCR에 완화된 점호와 계자전류 감쇄에 필요한 충분한 시간이 주어지므로 문제가 되지 않으나, 발전기가 비상 정지되면 발전기 계자에 축적된 에너지의 발산이 필요하다.

이러한 목적으로 구비된 것이 비여자 모듈이다. 이 모듈은 조정기 모듈, 계자 차단기의 보조접점 또는 계자 과전압신호에 의해 점호되는 SCR를 구비하고 있어 발전기 정지시 계자전류를 계자 방출 저항(Field Discharge Resistor)을 통하여 소멸시킨다. 대형 발전기에서는 비여자 모듈에 독립된 2개의 점화 제어회로가 설치된다.

(하) 싸이리트(Thyrite)

싸이리트(Thyrite)는 비여자 모듈을 사용하지 않은 시스템에서 SCR 브릿지의 DC 출력 모선에 가로질러 연결되어 있으며, 비정상적인 운전에 기인하는 높은 침투 역전압으로부터 SCR을 보호한다.

(거) DC 초기 여자 전자접촉기

이 회로는 2극 전자접촉기, 다이오드 및 저항 몸체로 구성되어 있다.

(너) DC 계자 전자접촉기

출력 전자접촉기는 단일 브리지(Bridge) 및 HOT Backup에 적용되며, 다중 브리지(Bridge) 시스템에는 적용되지 않는다.

(더) 냉각팬 변압기(Blower Transformer)

이 변압기는 3상 전력 변압기로서 여자용 변압기의 2차측에서 전원을 취하여 브릿지 냉각팬과 전원 공급장치에 AC 전원을 공급한다.

(러) 선 필터(Line Filter)

선 필터(Line Filter)는 정류기 브릿지의 3상 입력측에 가로질러 연결되어 있어 전류의 급속한 감소나 SCR의 정류기간 중에 형성되는 유도성 및 용량성 회로내의 전압의 급속한 변화에 기인하는 전압 스파이크를 최소화한다.

(며) AC 억제 모듈(AC Suppression Module)

AC 억제 모듈은 여자용 변압기가 고전압원에 의해 여자되고, 여자되는 시점에 브릿지가 2차측에 연결되는 경우에만 적용된다. 이것은 변압기를 통하여 브리지(Bridge)로 전도되는 고전압의 과도현상을 야기할 수 있다. AC 억제 모듈은 선-대지 필터(Line-to-Frame Filter)로서 이러한 과도 성분을 대지로 방출시킨다.

4. EX-2000 구성기기 및 운전 원리

가. 여자기 운전

EX-2000은 전력회로와 프로그램이 내장된 DC 여자계통으로 구성되어 있으며, 계자전류는 마이크로 프로세서로 제어된다.

이 설비는 수동조정 기능을 갖춘 계자전압 조정기(FVR 또는 수동 조정기)와 기준 설정치에 따라 발전기 단자전압을 일정하게 유지시키는 자동조정 기능의 발전기 전압조정기(AVR 또는 자동 조정기)로 구분된다. 자동전압 조정기(AVR)는 무효전력 보상 및 소프트웨어에 의해 수행되는 보호 제한기능(UEL, V/Hz 등)을 포함하여 여자계통의 변수는 EEPROM에 저장된다.

(1) 자동전압 조정기(AC 조정기)

(가) 제어 범위 : 발전기 정격 단자전압의 95~105%(필요 시, 조정가능)

(나) 주파수 : 60Hz

(다) 전압 신호 : 발전기 PT로부터 3상, 120V(PT 부담 : 10VA 이하)

(라) 전류 신호 : 발전기 CT로부터 3~5A(CT부담 : 1VA 이하)

(2) 수동전압 조정기(DC 조정기, 계자전압 조정기)

(가) 제어 범위 : 발전기 정격 계자전압의 20~120%(필요 시, 조정가능)

(나) 감지 신호 : 수동조정기용 계자전압 제한신호(브리지 출력)가 DCFB(직류전원 제한부)로 공급된다.

나. 여자계통 소프트웨어 구조

EX-2000 응용 소프트웨어는 데이터 흐름과 기능 수행을 정의하는 소프트웨어

모듈로 구성된다. 모듈들은 미리 정의된 코드의 블록(Block)으로 특정 기능을 수행한다.

예를 들면, 합산점(Summing Junction)과 같은 단순한 블록과 PI 조정기와 같은 블록들이 있다. 기능은 블록 조합기법 (Building Block Architecture)에 의하여 구성이 된다.

(1) 블록 조합기법(Building Block Architecture)

블록(Block) 프로그래밍 구조는 개방 구조 프로그래밍(Open Architecture Programming) 기법을 사용하여 블록(Block)을 조합함으로써 다양한 기능을 구성할 수 있다. 여자기 소프트웨어는 기능 블록(Block)의 라이브러리(Library)를 이용 구성되며, 실행 순서를 정하고 제어하는 메카니즘으로 결합된다. EX-2000 여자기는 다음과 같이 프로그래밍 데이터를 저장한다.

- (가) Block Library(Block Definition) : DCP(Drive Control Processor) ROM
- (나) Block 변수 : RAM
- (다) Block Configuration 변수 : EEPROM

(2) 진단(Diagnostics)

EX-2000 여자기 제어기는 전원 가압 상태에서 자동적인 자기진단과 고장진단을 수행한다. 이러한 진단은 개개 회로로부터 보드에 이르기까지 다양하며, 진단 메시지를 발생시킨다. 메시지를 다음의 3가지 방법으로 알 수 있다.

- (가) 드라이브 제어카드(SDCC)의 LED 진단 정보 판독
- (나) 프로그래머의 문자 및 숫자 정보 판독
- (다) RS-232C 통신 링크상의 진단 메시지 판독(ST-2000)

근거리 통신망 및 통신카드(SLCC)상의 프로그래머, 또는 ST-2000을 사용하여 EEPROM(Electrically Erasable Programmable Read Only Memory)에 저장된 운전변수를 시험, 조정할 수 있다.

(3) 블록 구성(Configuring Block)

블록(Block) 소스 리스트는 프로그램 스케줄로서, 이는 실행되어야 하는 블록과 이들의 비율 및 상대적인 실행 순서를 정의한다. 이 리스트는 EEPROM(Electrically

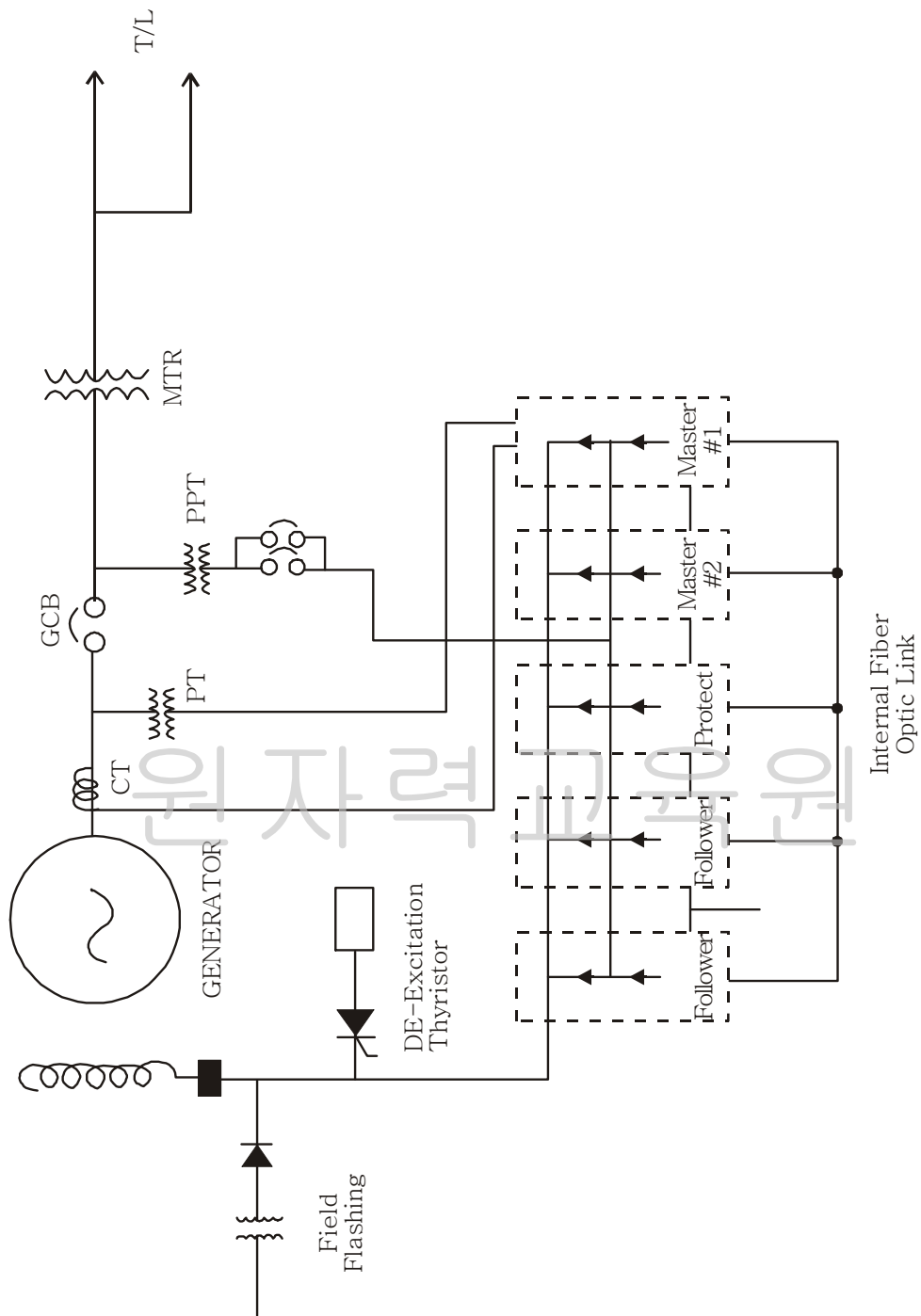
Erasable Programmable Read Only Memory)에 저장된 소스 워드의 선형 시퀀스 (Linear Sequence of Source Words)로 구성된다. 이들 리스트는 런-타임 코드와 데이터 블록(Block)을 나타낸다. 블록(Block) 컴파일러는 소스 정보를 실행 리스트로 번역한다. 블록 해석기는 실행 리스트를 읽어 들인다. 컴파일드된 블록을 실행시키기 위해서는 NEXT BLOCK이라는 지침 시퀀스를 사용한다. ST-2000은 특정 응용을 위해 구성된 블록을 표시한다.

다. 여자기 하드웨어 구조

EX-2000 여자기 하드웨어의 주요 구성품은 다음과 같다.

- 여자용 변압기(PPT)
- 선간 필터
- 냉각팬용 변압기 또는 제어전원 변압기
- Core 모듈
- 전원 장치
- 계자 접지 검출기
- 축전압 억제기
- 비여자 모듈
- 운전제어반(IOS)
- 보호 모듈(선택 사양)
- 수동 AC 단로기(선택 사양)
- 초기 여자 모듈(선택 사양)

제어 하드웨어는 여자계통의 형식이 다르더라도 기본적으로는 동일하다. 전력변환 하드웨어는 필요 용량에 따라 브릿지의 용량을 다르게 선정할 수 있다. 다음 그림은 다중 브리지(Bridge) 정지형 여자계통의 개략도이다.



[그림 3-88] 정지형 여자계통 개략도

[핵심요약]

1. 발전기 여자제어계통의 목적 및 기능

- 주발전기 회전자(계자)에 공급되는 여자전류 제어
- 주발전기의 출력단자 전압조정
- 주발전기의 무효전력 성분을 조절

2. 여자제어계통(교류여자방식)의 구분

- 브러시형(Brush Type) 교류여자방식 : 회전 계자형 여자기, 정지형 정류기
- 무브러시형(Brush Type) 교류여자방식 : 회전 전기자형 여자기, 회전형 정류기

3. 여자제어계통의 설계특성

- EX-2000 : 디지털 여자제어방식(GE 모델)
- 싸이리스터(SCR 3상 전파 정류) 자여자 방식
- 전원 가압 상태에서 자기진단 및 고장진단 수행

4. 디지털 여자제어방식(EX-2000)의 주요 구성기기

- 여자용 변압기
- 선간 필터
- 냉각팬용 변압기
- 제어전원 변압기
- 전원 장치
- Core 모듈
- 계자 접지 검출기
- 축전압 억제기
- 비여자 모듈
- 운전 제어반(Intelligent Operator Station)

제3절 발전기 보조계통

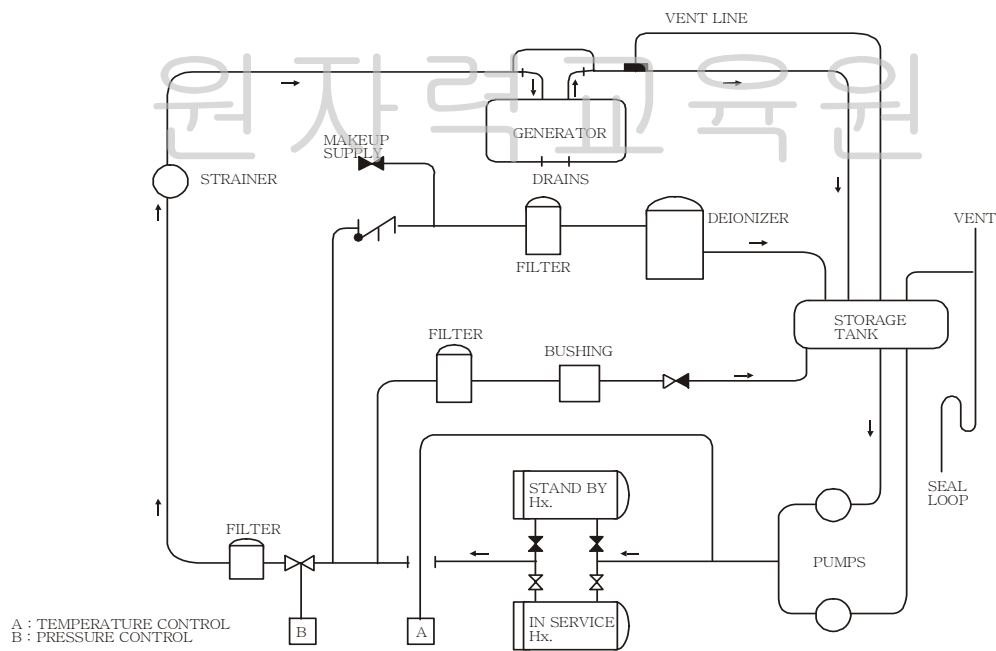
[학습목표]

1. 발전기 보조계통의 목적과 기능을 이해한다.
2. 고정자 냉각계통의 구성기기와 그 기능을 이해한다.
3. 발전기 수소 밀봉계통의 구성기기와 그 기능을 이해한다.
4. 발전기 가스 제어계통 및 감시계통의 구성기기와 그 기능을 이해한다.

1. 고정자 권선 냉각수계통

가. 개요

고정자 권선 냉각수계통은 발전기 고정자 권선에서 발생하는 열을 효과적으로 제거하기 위한 순수의 유량과 온도를 자동으로 조절하여 강제 순환시키는 폐쇄 회로의 냉각계통이다.



[그림 3-89] 고정자 냉각계통 개요

이 계통은 그림에서 보는 것과 같이 고정자 냉각수 저장 탱크, 2대의 고정자 냉각수펌프, 2대의 열교환기 및 여과기 등으로 구성되어 있고, 보조 우회 유로는 이온교환수지를 통과하는 탈염 유로와 고압 부싱 냉각유로 등으로 구성되어 있다.

나. 주요 기기

(1) 저장조 탱크

이 저장조 탱크는 다음과 같은 3가지 기능을 수행한다.

- (가) 펌프의 충분한 흡입 수두 제공
- (나) 냉각수의 체적 변화를 수용할 수 있는 공간 유지
- (다) 냉각수 내의 불 응축성 가스를 제거

이 탱크는 냉각수 수위 감시용 Sight glass가 설치되어 있고 발전기 고정자 권선 절연체 연결 부위 등을 통해 2 ft³/day 의 수소가 계통 내로 누설되어 들어올 수 있는데 이는 탱크 내의 배기 배관을 통해 제거되고 배기 배관에 Loop seal이 있어 응축수가 수집되어 배수될 수 있도록 되어 있다.

(2) 기포 제거장치(Debubblor)

저장 탱크의 정상수위 아래에 설치된 단순한 구조의 차폐판(Baffle plate)를 거쳐서 기포 제거장치(Debubblor)로 들어오는 냉각수는 차폐판(Baffle plate)의 구멍을 통해 확산되어 기포(Bubble)를 형성하는 공기나 가스의 제거를 용이하게 한다.

(3) 고정자 냉각수 펌프

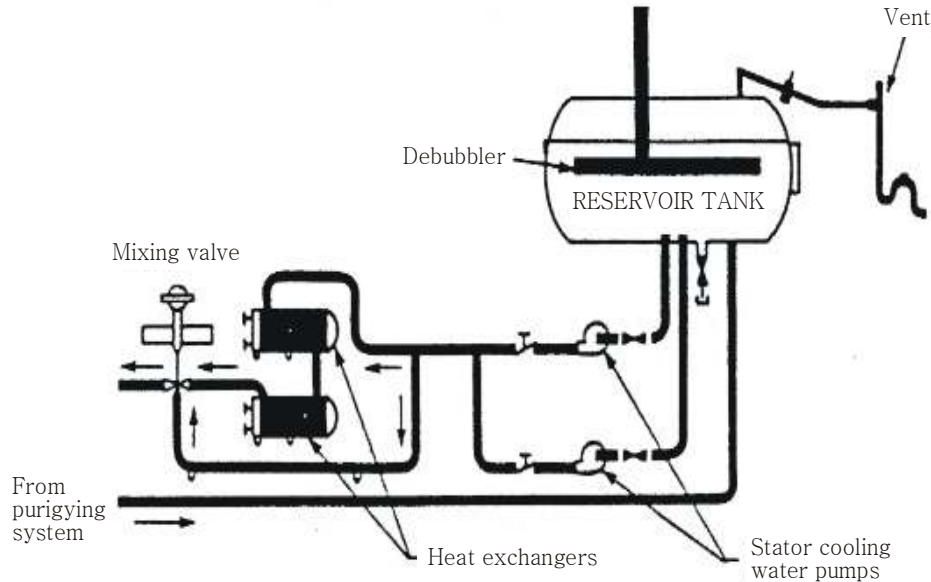
100% 용량 2대의 AC 모터구동 원심 펌프로 구성되어 있으며 계통 운전 중 1대는 운전하고 나머지 1대는 대기 상태를 유지하며, 각 펌프의 운전 시간을 균등하게 관리하기 위하여 월 1회 교체 운전하는 것이 좋다.

고정자 냉각 계통에는 직류 비상 펌프가 없으며, 출구 압력이 10 psig 이상 감소하면 압력 스위치에 의해 자동으로 대기 중인 펌프를 기동시키도록 되어있다.

(4) 열교환기

100%용량의 열교환기 2대가 병렬로 펌프 출구에 설치되어 있으며, 정상운전시는 2대중 1대를 운전하고 튜브측에 2차 기기 냉각수를 공급하여 셀측을 흐르는 고정

자 냉각수를 냉각시킨다. 대기 중인 열교환기는 쉘과 튜브측 밸브를 차단하고 배수를 시켜 보존하고, 필요시 교체운전을 실시한다.



[그림 3-90] 고정자 냉각계통 주요 구성품

다. 온도 및 유량 제어

고정자 권선의 열 제거는 고정자 권선 냉각수의 온도 차이와 냉각수량에 의해 좌우되므로 냉각수 온도와 유량 제어는 필수적이다.

(1) 온도 제어

냉각수의 온도 제어는 밸브(Y-07)에 의해 냉각수가 열교환기를 우회하도록 하여 열교환기를 우회한 냉각수와 열교환기를 통과한 냉각수를 혼합 시켜 계통에서 요구하는 온도를 유지하도록 되어 있는데 밸브(Y-07)는 밸브 하부에 있는 온도 감지기에서 온도 제어기로 공기 제어 신호를 보내고 밸브(Y-07)는 온도 제어기에서 공기지시(Air Positioning) 신호를 받아 제어된다.

(2) 유량 제어

계통의 냉각수 유량을 제어 장치에 직접적인 영향을 주는 3가지 필수적인 운전 조건은 다음과 같다.

- (가) 충분한 냉각수 유량을 공급하기 위하여 최소 22 psig의 압력 필요
- (나) 발전기 내부의 수압은 항상 일정하게 유지
- (다) 냉각수 유량의 최대량은 발전기 설계에 의해 결정

냉각수 유량 제어기는 온도 제어기의 하부에 설치되어 있으며 냉각수 유량 제어는 발전기 입구측의 압력을 검출하여 밸브(Y-63) 제어에 의해 유량이 조절되는데 밸브(Y-63)의 유량 제어기는 전 후단의 차압을 조절하는 차압 조절기에 의해 구동된다. 또한, 밸브(Y-63)의 유량 제어기는 정확도를 높이기 위해 주발전기 고정자 권선의 입구 배관에 설치된 밸브(Y-37)에 교정용 임시 계기를 설치하여 그 값을 이용하여 교정해야 한다.

라. 전도도 제어

주발전기 고정자 권선의 냉각 계통에서는 냉각 매체로서 물을 사용하므로 고정자 권선을 통하여 흐르는 이 냉각수는 아주 낮은 전도도 준위를 유지해야 한다.

고정자 냉각수는 용해성 무기염을 제거하도록 되어 있으며, 아래 세가지 조건 중 한가지라도 해당되면 이온 교환수지를 교체해줘야 한다.

- 탈염기를 24시간 연속 사용한 경우
- 탈염기 차압이 1.05kg/cm^2 이상일 경우
- 고정자 냉각수의 전도도가 $0.5\mu\text{S/cm}$ 이하를 유지하지 못하는 경우

이온 교환수지 교체는 발전기 출력 변동 없이 가능하며 탈염기를 통과한 냉각수의 전도도는 고정자 권선 공급 전에 감시되도록 되어 있다.

정상 운전중에 전도도는 $0.5\mu\text{S/cm}$ 이하로 유지되어야 하고 $0.5\mu\text{S/cm}$ 도달시는 1차 경보가 발생하며 전도도 값이 더욱 증가하여 $9.9\mu\text{S/cm}$ 에 이르면 발전기를 수동으로 즉시 정지시켜야 한다. 또한, 탈염기의 이온 교환수지는 고온에서 그 성능이 저하되므로 탈염기 공급수를 55°C 이하로 유지해야 한다.

마. 고정자 냉각수 유로

냉각수는 발전기 상부에서 절연 튜브를 통해 발전기 단부측에서 단부측으로 흐르면서 고정자 권선을 냉각시키고, 고정자를 냉각시킨 냉각수는 다시 상부에서 기포 제거장치(Debubbler)를 거쳐 저장 탱크로 회수되고 출구 모관 상부에 2'배관이 저장 탱크 상부로 연결되어 있어 가스가 연속적으로 배기 되도록 되어있다. 냉각수 순환 유로 방식은 단류(Single pass) 방식 또는, 복류(Double pass) 방식으로 2가지가 있으며 일반적으로 단류(Single pass) 방식을 적용하고 있다.

2. 발전기 수소밀봉계통

가. 개요

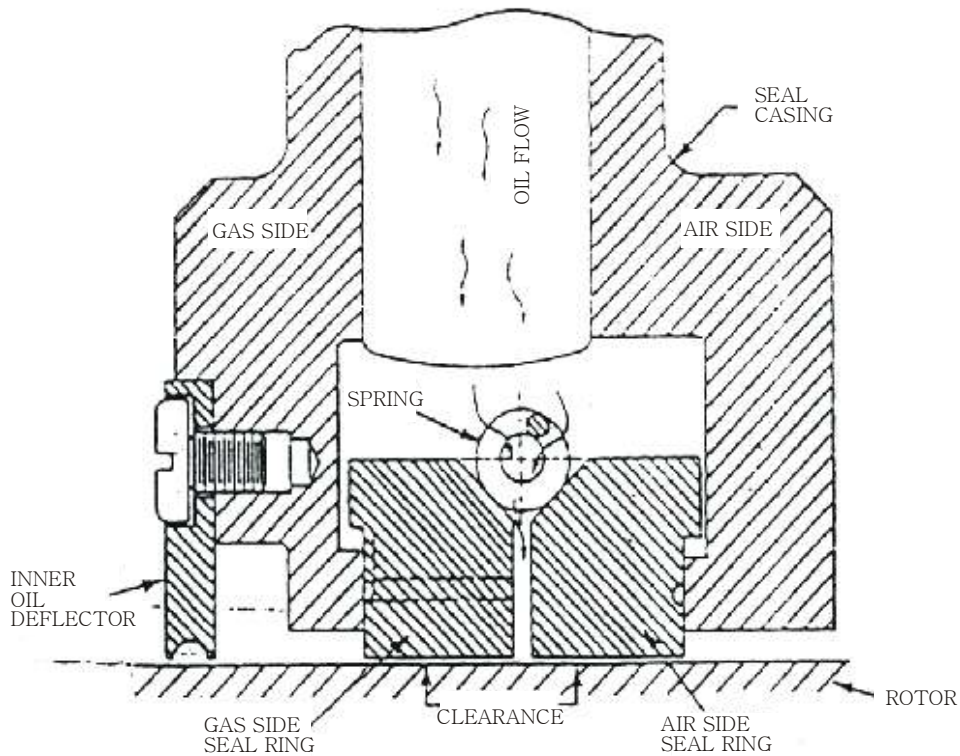
수소 밀봉계통은 발전기 케이싱으로부터 수소가 누설되는 것을 방지한다. 밀봉장치는 발전기의 양쪽 끝부분 차폐부(End Shield)에 용접되며, 밀봉유 공급계통으로부터 공급받은 진공 밀봉유는 밀봉장치내의 밀봉유 공급홈을 지나 스프링을 통해 각 밀봉 장치의 밀봉링 사이로 주입되어 밀봉링과 회전자 사이의 유막을 형성하여 양쪽 차폐부(End Shield)로 수소가 누설되는 것을 방지한다. 밀봉링의 내경은 발전기 축의 저널 직경보다 2~3mm 크며 각 링의 조립부(Segment)는 가터스프링(Garter Spring)에 의해 원주 방향으로 지지된다.

밀봉링을 통과한 밀봉유는 공기측과 수소측으로 분리되어 수소측은 H_2 Detraining Tank로 배유되고, 공기측은 Aux. Detraining Section을 통해서 윤활유(Bearing Oil)와 혼합되어 배유된다.

나. 주요 기기

(1) 진공탱크와 펌프

수소 밀봉유 계통용 저장조는 진공탱크이며 터빈의 중심 아래 지면에 설치된다. 진공탱크의 주 기능은 밀봉유에 섞여있는 불응축가스인 공기와 습분을 제거하고 Oil에 섞여 있는 수소중 큰 기포(Bubble)는 H_2 Detraining Section에서, 작은 기포(Bubble)는 진공탱크에서 분리된다.

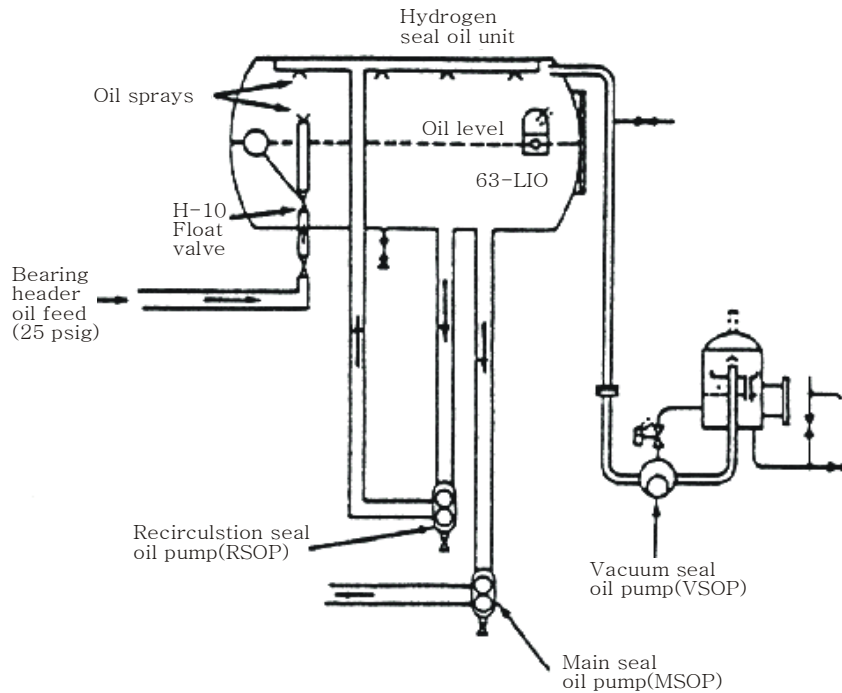


[그림 3-91] 주발전기 밀봉링 구조

윤활유 계통으로부터 유량(Oil Flow) 조절 밸브(H-10)를 통해 오일(Oil)을 위로 분사하여 가스를 분리한다. 오일(Oil) 내부에 남아 있는 가스의 대부분은 하부측 재순환 밀봉 펌프(RSOP)에 의해 아래로 분사되면서 분리된다.

Float Operated 스위치(63-LI)에 의해 정상수위 이하나 3"이상으로 상승시 경보 장치가 작동하며, 정상 윤활유계통 사용 중지시 재순환 밀봉펌프(RSOP)에 의해 순환한다.

진공탱크 내에서 분리된 불응축 가스는 진공펌프(VSOP)에 의해 제거된다. 밀봉유는 주밀봉유펌프(MSOP)에 의해 발전기로 공급된다.

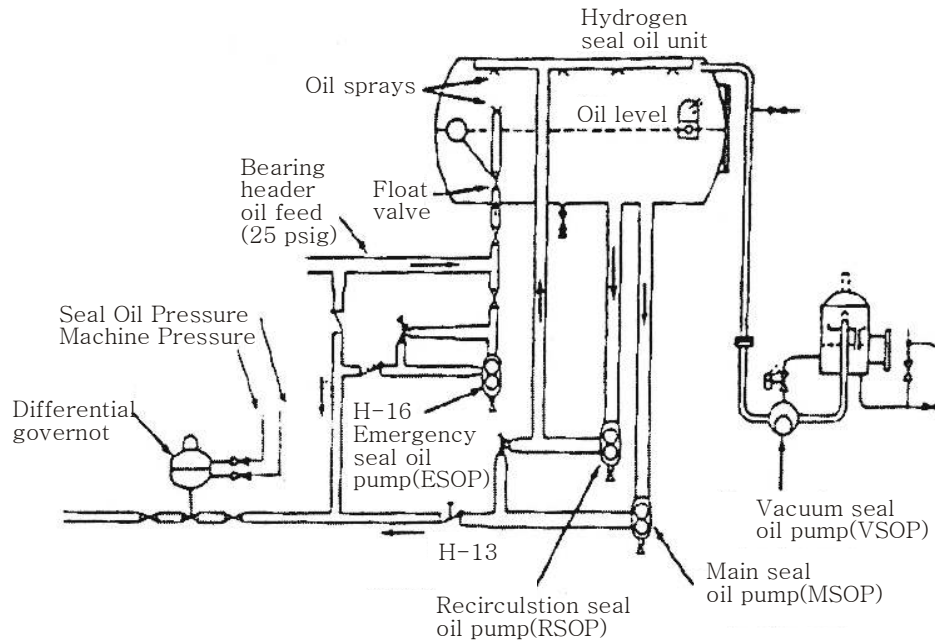


[그림 3-92] 진공탱크 및 펌프

(2) 차압 조절기(Differential Governor)

밀봉유(Seal Oil) 압력과 발전기내의 수소 압력간의 차압을 유지하기 위하여 차압 조절기(Differential Governor)가 설치되어 있다. 차압 조절기(Differential Governor)의 하부측은 Collector End의 밀봉유 배관에, 상부측은 수소압력 배관에 연결되어 있으며 주밀봉유 펌프 출구의 Relief 밸브(H-12)에 의해 재순환 펌프(Recirculation Seal Oil Pump) 쪽으로 오일(Oil)을 계속 방출하므로 주밀봉유 펌프 출구압력은 수소압력 보다 최소한 45 psig 이상 유지한다.

밀봉유 압력의 감지(Sensing) 신호는 Collector End 측의 조절밸브 후단에서 받으며, 수소 압력의 감지(Sensing) 신호는 H₂ Detraining Tank의 하부에서 취하며 감지관(Sensing Line)은 오일(Oil)로 채워져 있다.



[그림 3-93] 진공탱크 및 펌프

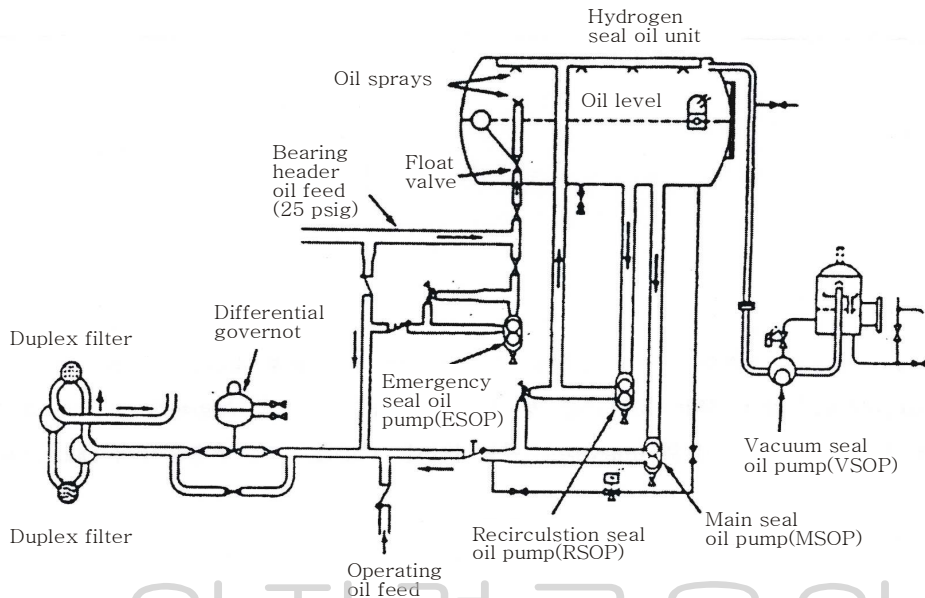
(3) 비상 밀봉유 펌프 (Emergency Seal Oil Pump)

수소가스는 공기와 혼합시 폭발하기 때문에 주밀봉유 펌프(MSOP)가 기동되지 않을 때는 비상밀봉유 펌프(ESOP)가 자동으로 기동된다. 비상밀봉유 펌프의 흡입원은 진공탱크에서 취하지 않고 밀봉유 공급관(Oil Feed Line)에서 직접 취한다.

주밀봉유 펌프(MSOP)는 교류 전원 상실(Loss of AC)과 펌프의 고장으로 인해 출구 압력이 비상밀봉유 펌프(ESOP)의 출구 압력보다 10psig 낮은 압력(95psig 이하)으로 감소하면 압력스위치에 의해 비상밀봉유 펌프(ESOP)가 자동으로 기동된다.

주밀봉유 펌프(MSOP)와 비상밀봉유 펌프(ESOP)가 동시에 상실되면 밀봉유 공급배관쪽 밸브(H-17)를 통해 직접 공급되지만, 베어링 모관의 압력은 25psig로 낮고 수소 압력은 75psig로 높아서 수소를 밀봉할 수 없으므로 차압 조절기(Differential Governor)와 주밀봉유 펌프(MSOP) 사이의 상류(Upstream) 배관을 통해 주윤활유 펌

프(MSOP)에서 밀봉유를 공급받게 되는데 터빈 정격속도 70% 이상에서 가동되어 밀봉에 필요한 압력과 유량을 공급하게 되며 윤활유 계통에 있는 오리피스와 방출(Relief) 밸브에 의해 제어된다.



[그림 3-94] 수소 밀봉유계통 여과기

(4) 밀봉유 여과기

차압 조절기(Differential Governor) 후단에 설치되며 한 쌍으로 구성되어 하나는 운전되고 다른 하나는 대기상태를 유지한다. 각 여과기 사이에는 3-Way 이송밸브(Transfer Valve)가 있어 정상운전 중에도 교체운전을 할 수 있도록 되어 있다.

(5) 밀봉유 압력 감지관(Sensing Line)

차압 조절기(Differential Governor)를 통과한 밀봉유는 여과기를 거쳐 발전기 케이싱으로 들어가기 전에 발전기 Collector End 측과 터빈 End 측으로 양분되어 케이싱 전단의 터빈측 축밀봉유 공급밸브(H-22)와 여자기측 축밀봉유 공급밸브(H-46)를

통해 밀봉링으로 주입되는데, 이 게이트 밸브들은 내부에 구멍이 있어 밸브를 완전히 차단하더라도 유량이 형성되도록 되어있다.

차압 조절기(Differential Governor)에서 공급된 밀봉유는 압력 감지관(Sensing Line)을 지나서 여자기측 축밀봉유 공급밸브(H-46)를 통과한 후, 주발전기 Collector End 측의 밀봉유 공급관(Oil Feed Line)으로 제공된다.

(6) Aux. Detraining Section

밀봉링을 거친 밀봉유는 발전기 측(H_2)과 베어링 측(Air)으로 분류되어 배수되는데 공기측 밀봉유(Drain Oil)와 수소측의 수소가 분리된 밀봉유도 Aux. Detraining Section으로 배유된다.

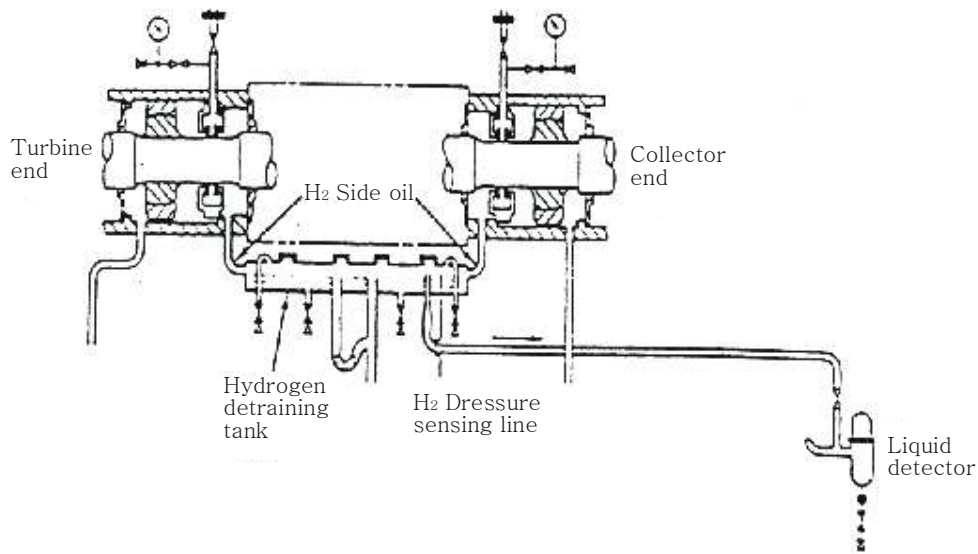
Aux. Detraining Section의 내부 공간은 어떠한 큰 기포(Bubble)도 허용할 수 있도록 충분히 크며, 내부 표면에 발생된 기포(Bubble)는 Roof로 배기되고 밀봉유는 수직 형태의 긴 배관을 통해 Loof Seal을 Over Flow 하면서 최종적으로 터빈 윤활유 탱크로 되돌아간다.

(7) H_2 Detraining Tank

발전기 양쪽 끝부분에 배수관이 있어 발전기 측(H_2)으로부터 밀봉유를 받는다. 진공탱크로 밀봉유를 공급하기 전에 보다 큰 기포(Bubble)를 방출시킨다.

이 탱크의 터빈 End 측과 Collector End 측의 중간에는 격막이 설치되어 발전기 양끝의 냉각팬 압력차에 의해 발생하는 Oil Vapor가 배수관을 통하여 순환되는 것을 방지하며, 이들 양측은 Loop Seal로 연결되어 있으며, Oil Flow는 이곳을 통과하여 Downcomer로 내려간다.

이 탱크의 밀봉유는 수소와 접촉하고 있으며, 발전기 측의 수소가스 압력이 영향을 미치고 있는 상태이다.



[그림 3-95] Hydrogen Detraining Tank 구조

(8) 액체 검출기 (Liquid Detector)

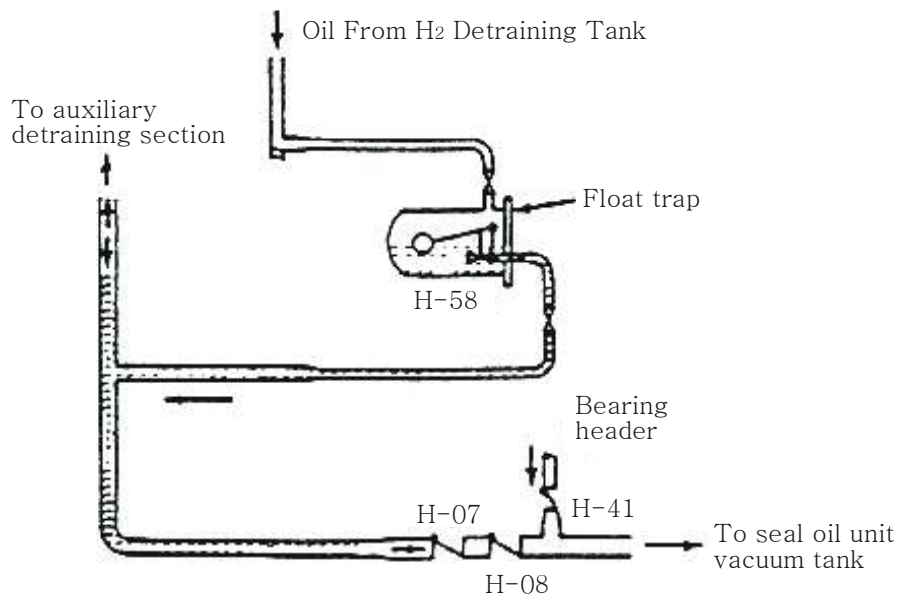
Detraining Tank의 수위가 증가하면 정상 수위보다 높은 위치의 배관을 통하여 경보를 동작시키는 액체 검출기로 간다.

Sensing Line에 수소 압력이 걸린 상태에서 밀봉유가 채워지므로 Head Difference를 직접 비교하여 밀봉유가 발전기 내부로 역류되는 것을 방지하게 된다.

(9) Float Trap

Float Trap은 Detraining Tank의 수소측 밀봉유를 순환시키기 위해서 수소가스 압력 하에서 대기압으로 바꾸는 장치이다.

수소측 밀봉유는 Float Trap으로 배출되는데 유위 (Oil Level)가 출구밸브 (H-58) 보다 올라갈 경우, 밸브를 개방시켜 Aux Detraining Section으로 흐르도록 한다.



[그림 3-96] Float Trap

(10) 비상 밀봉유 펌프 운전

주밀봉유 펌프(MSOP)의 운전정지시 비상 밀봉유 펌프(ESOP)가 기동되며, 주 밀봉유 펌프(MSOP)에 의한 밀봉유 압력이 정상적으로 복구되면 비상 밀봉유 펌프(ESOP)를 정지시켜야 한다.

3. 발전기 가스제어계통

가. 개요

발전기 내부의 고정자 표면과 회전자 권선에서 발생하는 열을 냉각시키는 매체로는 수소가 사용된다. 수소는 공기에 비해 분자운동이 빠르기 때문에 열전달율이 좋고 또한 냉각중 풍손이 적어서(수소의 밀도가 공기 밀도의 1/4) 열 제거에 효율적이며 산소와는 다르게 건조상태를 유지할 수 있고 오염이 잘 되지 않아 발전기의 수명연장과 양호한 절연상태를 유지할 수 있는 장점이 있다.

그러나, 대기압에서 공기중에 수소가 4.1~74.2% 포함되어 있을 경우 인화성이 있어 위험하므로 취급에 주의가 요구되며, 발전기내의 수소 순도는 98% 이상으로 유지해야 한다. 또한, 발전기내의 수소가스는 최대 75psig까지 가압되므로 수소의 누설율을 제한하기 위해 발전기 밀봉유계통의 압력을 발전기내의 수소압력보다 8psig이상 높게 유지하여 밀봉을 유지한다.

발전기에 수소가스를 초기 충전할 때는 먼저 CO₂를 주입하여 발전기 내부의 공기를 배출시켜야 하며, 발전기 내부의 CO₂순도가 높아져서 공기가 거의 없는 상태일 때 발전기 내부로 수소가스를 공급해야 한다.

발전기 정지 후 정비작업 시에는 수소를 배출하기 위해 먼저 CO₂를 공급하여 발전기 내부의 수소를 배출시키고, 수소가 거의 없는 상태일 때 공기를 공급하여 발전기 내부의 CO₂를 배출해야 하며, 케이싱 내부가 완전히 감압된 후 발전기 Cover를 개방해야 한다.

나. 주요 기기

(1) 제어 캐비닛

발전기 수소가스의 운전상태를 감시하기 위해 필요한 여러 계측기와 경보 장치가 설치되어 있다.

(2) 가스 온도지시계 및 경보

발전기 수소가스 냉각기의 순환수 공급차단이나 불충분한 냉각수 공급으로 인한 발전기 권선의 손상을 경고하기 위해 가스온도 지시계 및 '가스 온도 높음' 경보를 제공한다. 저항 온도 감지기(GTG-1)는 가스냉각기를 통과하는 가스의 중간 부분의 온도를 감지하도록 설치되어 있다.

발전기 내부의 수소온도는 최소 30℃에서 최대 46℃로 유지되며 수소의 온도가 56℃로 상승하면 가스 온도 높음 경보를 발생한다. '가스 온도 높음' 경보 발생 시, 조절기는 수소냉각기의 냉각수 유량을 조절하고, 5분 이내에 경보를 제거하기 위해 출력을 감발해야 한다. 출력을 감발하여도 경보가 제거되지 않으면, 가능한 빠른 시간내에 발전기를 트립시켜야 하며 경보 발생으로부터 15분을 초과하지 말아야 한다.

(3) 가스 압력지시계(GGA) 및 경보

가스 압력 높음' 경보(63-P1)는 가스 압력 조정기(GRE-2)의 고장으로 인한 발전기 내부의 압력 상승을 나타내며 조정기(GRE-2) 고장시는 수동으로 G-05 및 GRE-1 조정기로 압력을 조절하여야 한다. 가스 압력 높음' 경보는 발전기 내부의 정상 가스 압력보다 4psig 높게 설정되어 있다.

가스 압력 낮음' 경보(63-P2)는 가스 압력 조정기(GRE-2)의 고장이나 낮은 수소 공급압력 즉, 수소 공급배관의 대량 누설 등으로 인하여 발전기내의 수소 압력이 낮을 때 발생하며 정상 압력보다 2psig 낮게 설정되어 있다.

발전기 케이싱 압력의 급속한 감소는 대량 누설이나 밀봉유 압력이 낮은 경우에 발생되므로 그 원인을 해결할 때까지는 케이싱 압력을 낮게 유지해야 한다.

(4) 가스 압력 조정기(Pressure Regulator)

가스 압력조정기(GRE-2)는 발전기내 수소가스 압력을 일정하게 유지하기 위해 사용되는데 조정기 전단의 입구 압력은 후단의 출구 압력보다 약 10psig 정도 높게 유지해야 하며, 100psig 보다는 높지 않아야 한다.

(5) 액체 탐지기(Water and Oil Detector)

발전기 케이싱 내부에 냉각수나 밀봉유가 존재하거나 H₂ Detraining Tank 내의 밀봉유가 케이싱 내부로 역류하면 발전기의 손상을 초래하므로, 경보 발생 시 즉각적인 조치가 요구된다. 경미한 밀봉유 유입으로 판단될 경우에는 다음 계획예방정지 시까지 계속 운전이 가능하다.

발전기 케이싱 내부에 액체 유입을 방지하기 위해서 발전기 케이싱으로 유입되는 액체는 액체 탐지기(Water and Oil Detector)를 통해서 확인 및 배수된다. 수소 냉각기나 고정자 냉각수의 누설이 발생되면 발전기 내부로 물이 유입될 수 있다.

고정자 냉각수의 비정상적인 보충이 요구될 경우, 고정자 냉각수의 누설이 추정되므로 원인 규명이 필요하다.

밀봉유 디플렉터(Oil Deflector)의 부적절한 체결이나 손상은 발전기 내부로 밀봉유의 유입을 초래할 수 있으며, 축 밀봉(Shaft Seal)의 결함이나 과도한 밀봉유 압력으로 인한 밀봉유 유량의 증가로 밀봉유가 유입될 수도 있다.

액체 탐지기(Water and Oil Detector)에는 액체를 육안으로 확인할 수 있는 Sight Glass가 있으며, 실제로 액체를 충수하여 성능을 주기적으로 시험할 수 있다.

(6) 가스 분석기(Total Gas Analyzer)

가스 분석기는 발전기내의 수소 순도를 퍼센트 값으로 나타내며 캐비닛 내부에 설치되어 있고, 공기중 수소 농도를 50~100%까지 읽을 수 있도록 교정되어 있다.

발전기 케이싱 내부의 수소 순도는 수소폭발 한계치인 75% 이상으로 유지해야 하며, 냉각효과를 위해 90% 이하로 순도가 떨어지서는 안된다. 어떤 원인에 의해서 수소 순도가 만족되지 않을 경우, 발전기를 정지하고 CO₂로 수소를 퍼지해야 한다.

수소 밀봉유계통에서 비상 밀봉유 펌프가 밀봉유를 공급하거나 진공탱크의 진공이 나쁜 상태에서 계통이 운전될 경우 수소의 순도가 저하된다.

실제로 계통내 수소의 순도가 저하된 경우, 교류전원의 상실, 가스 분석기 자체의 고장이나 결함, 습기가 Cell Block에 있거나, Electronic Alarm Relay의 고장 발생 시, 수소의 순도는 낮게 지시된다.

(7) 휴대용 가스 분석기(Portable Gas Analyzer)

휴대용 가스 분석기(Portable Gas Analyzer)는 발전기 내부를 CO₂로 퍼지할 때나 수소를 채울 경우, 발전기 케이싱에서 배출되는 CO₂의 농도를 퍼센트 값으로 측정하기 위한 것으로 가스 분석기와 측정 원리가 같다.

(8) 팬 차압지시계(GGA-2)

발전기 내부가 수소로 가압되어 있을 때 회전자 축에 의해 구동되는 냉각 팬 전·후단의 차압을 측정하며, 발전기 내부가 공기로 채워져 운전되고 있을 경우에는 차압 지시계를 차단하여야 한다.

발전기가 일정 속도로 운전되고 있을 때 팬의 압력은 가스밀도에 비례하므로 팬 차압으로 발전기 내부의 수소 순도를 확인할 수 있는 또 다른 방법이 될 수 있다.

따라서, 팬 차압지시계(GGA-2)는 가스분석기 고장이나 공급전원 상실 등으로 가스분석기를 사용할 수 없을 때 발전기 수소 순도를 확인하는데 사용할 수 있다.

(9) 가스 냉각기

발전기 고정자와 회전자에서 발생한 열을 흡수한 수소 가스를 냉각시키기 위해 발전기 프레임의 상부 양측 끝단에 4대의 가스 냉각기가 설치되어 있으며 다수의 냉각관을 통해서 2차 기기냉각수가 순환된다.

(10) 가스 건조기

가스 건조기를 통과하는 수소 내에 포함된 습분은 활성 알루미나에 의하여 제거된다. 활성 알루미나에 흡수된 습분은 가열기로 가열되며 가스 건조기 내부에 형성된 진공에 의해서 제거된다. 활성 알루미나가 대기온도로 냉각된 후 다시 가스 건조기를 운전하게 된다.

(가) 흡수

가스 건조기 출구에서 습분 함유량이 허용치를 초과하면 흡수제는 재생되어야 한다. 가스 건조기에는 재생 시기를 알려주는 흡수제 확인 튜브(Tube)가 설치되어 있어, 푸른색의 활성 알루미나가 습분을 흡수하면 활성 알루미나의 색깔이 핑크색으로 변하고 다시 흰색으로 변하게 되므로 재생 시기를 알 수 있다.

(나) 재생

가스 건조기를 재생하기 위해서는 가스 건조기 입·출구 밸브를 닫고 하부 연결부에 진공을 형성시키고 상부 연결부에는 밸브와 오리피스를 거친 외부 공기를 유입시킨다. 이때, 가스 건조기 내부의 전기 가열기(500W Heater)를 운전한다.

재생을 위해 약 3시간 정도 소요되며 활성 알루미나의 색깔이 푸른색으로 회복되면 재생이 완료된 상태이다. 활성 알루미나의 재생이 완료되면 외부 공기 유입 밸브를 닫고 가열기를 끄며 진공을 파괴시킨다.

(다) 냉각

가스 건조기를 재생 운전한 후, 가스 건조기가 대기온도까지 자연 냉각되고 나면, 다시 건조기 운전을 한다. 재생 운전 후, 가스 건조기를 냉각시키는데 4시간이 소요된다.

4. 발전기 가스 감시계통

가. 개요

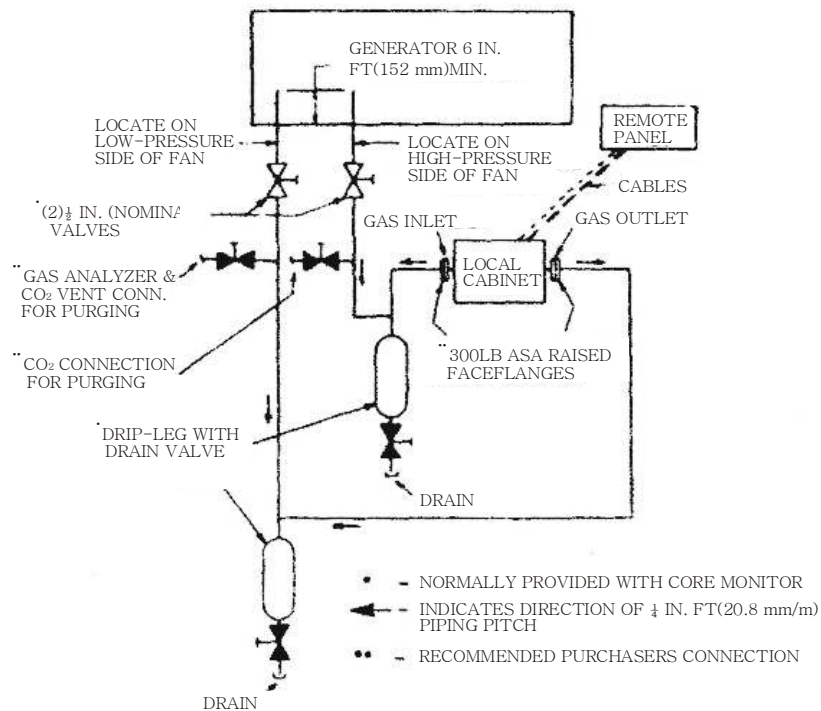
발전기 가스 감시계통은 발전기 내부의 국부적인 과열을 신속히 알려주는데 코어 감시기(Core Monitor)의 경보가 발생했을 때 자동적으로 코어 감시기가 고장인지, 발전기가 실제 과열된 상태인지를 진단하고, 과열에 의해서 발생한 입자를 자동적으로 수집하여 입자의 종류가 무엇인지 그리고, 과열에 의해서 발생한 것인지를 화학적으로 분석한다.

발전기 가스 감시계통은 발전기 코어 감시기(Core Monitor), 감시기능 유효성 확인(Validation Control), 가스입자 채취분석기(Pyrolysat Collector)등으로 구성되어 있다.

발전기 코어 감시기(Core Monitor)는 민감한 계측기로서 발전기 내부의 국부과열을 신속히 알려준다. 발전기 내부에 사용된 소량의 유기물질이 열적으로 분해되어 0.001~0.1 micron 정도의 입자가 다량으로 발생할 경우, 발전기 코어 감시기는 이를 쉽게 감지하게 된다.

즉, 발전기 내부의 과열로 인하여 발전기의 손상이 확산되기 전에 국부적인 과열에 대해 신속하게 경보를 제공하기 위해서 발전기 코어 감시기(Core Monitor)를 사용하고 있다. 발전기 코어 감시기(Core Monitor)는 과열 경보 발생 시, 경보의 유효성 확인을 자동으로 수행하고 발전기 내부의 가스를 자동으로 수집하여 분석한다.

코어 감시기(Core Monitor)가 발전기 과열에 대해 경보를 발생하면, 자동으로 감시기능 유효성 확인(Validation Control)은 코어 감시기가 제 기능을 수행하는지, 발전기에 실제로 과열 상태가 존재하는지를 확인하고, 판단한 후에 발전기 부하 감발 또는 트립신호를 자동으로 제공하게 된다.



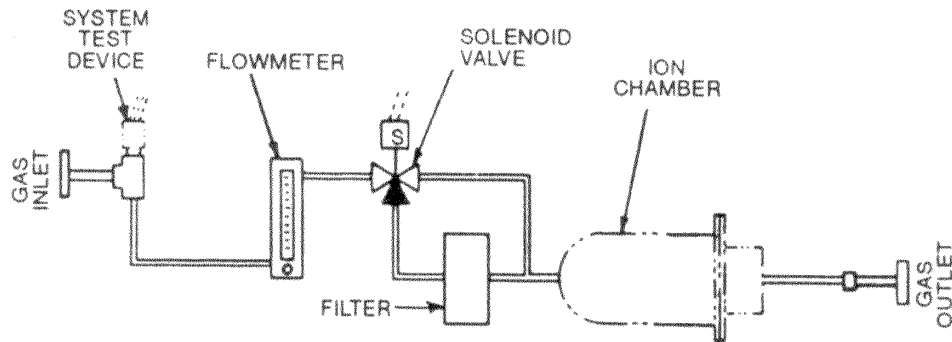
원자력교육원

[그림 3-97] 발전기 가스 감시계통 개요

나. 주요 기기

(1) 코어 감시기(Core Monitor)

코어 감시기(Core Monitor)에는 약한 알파 방사능 선원(Thorium-232)이 있는 전리함(ionization chamber)이 설치되어 있으며, 전리함은 발전기를 냉각시키는 수소의 흐름에 따라 이온 전류를 발생시킨다. 이온 전류의 세기는 전리함을 통과하는 수소의 흐름에 따라 0~1V DC의 전류를 나타내도록 설정된다.



[그림 3-98] 코어 감시기(Core Monitor) 구성

만약, 주발전기 수소가스의 흐름 속에 절연 물질이나 코팅 물질(Epoxy Paint, Core-Lamination Enamel, Insulating Material 등)의 열적 분해로 인하여 발생한 작은 미립자가 존재하면, 그 미립자의 집중도에 비례하여 전리함에서 전류의 흐름이 감소하게 되며 경보가 발생된다.

발전기 내부가 과열되거나 고온 부위가 확산될 경우, 발전기 내부의 Epoxy Paint, Core-Lamination Enamel 등, 절연 물질이 소손되기 시작하며 미립자가 발생하여 수소가스에 포함이 된다.

이와 같이, 발전기 내부의 가스 흐름 속에 부유하는 절연 물질의 유무를 감시하기 위해 코어 감시기(Core Monitor)가 사용된다.

(2) 감시기능 유효성 확인(Validation Control)

감시기능 유효성 확인(Validation Control)은 코어 감시기(Core Monitor) 전리함의 Detector 신호를 감시하여 과열경보 발생 시, 발전기가 실제로 과열 상태인지, 코어 감시기의 고장인지를 자동으로 확인한다.

코어 감시기(Core Monitor)에 경보가 발생하면, 전리함 전단의 솔레노이드 밸브가 여자되어 가스가 여과기를 통과하여 흐르도록 가스 흐름이 전환된다. 여과기를 통과하면서 가스 속의 이물질이 제거된다.

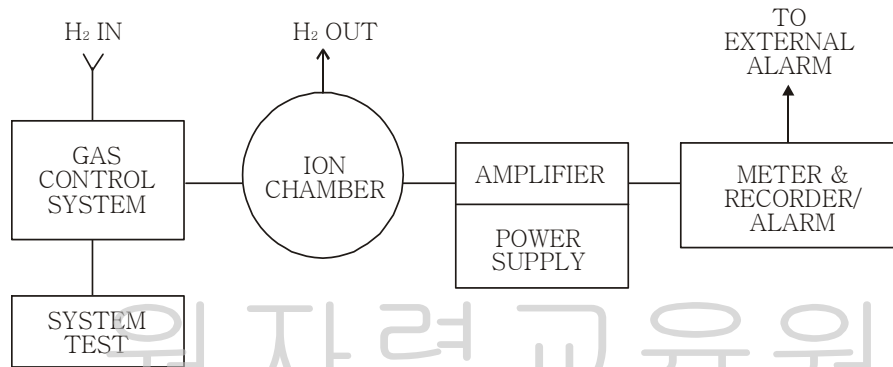
만일, 경보가 실제 상황이고 미립자가 가스에 존재할 때, 이물질은 여과기에 의해서 제거되고 감시기능 유효성 확인(Validation Control)은 경보의 유효성을 판단한다.

코어 감시기(Core Monitor) 전리함의 신호가 전 눈금의 75% 이하를 지시하면, 운전원에게 경보를 제공한다.

2초 이상 60% 이하를 지시하면 경보가 울리고, 감시기능 유효성 확인(Validation Control)은 경보의 유효성 확인 절차를 자동으로 수행한다.

전리함의 신호가 60% 이하로 감소하면, 감시기능 유효성 확인(Validation Control)은 코어 감시기(Core Monitor)의 솔레노이드 밸브를 자동으로 여자하여 냉각 가스가 여과기를 통과하도록 하며 이물질 제거한다.

이물질이 제거된 후, 전리함의 신호가 70% 이상으로 증가하면 감시기능 유효성 확인(Validation Control)은 발전기 과열 경보를 발생한다.



[그림 3-99] 코어 감시기(Core Monitor) 흐름도

전리함의 신호가 60% 이하로 5~10초 동안 지시하게 되면 감시기능 유효성 확인(Validation Control)은 경보에 대한 유효성 판정을 시작하게 된다.

냉각 가스가 여과된 후, 전리함의 신호가 70% 이상을 지시하게 되면 과열경보를 발생한다. 만약, 전리함의 신호가 3.5분 후에 70% 이상으로 증가하지 않으면 코어 감시기 고장 신호를 발생한다.

(3) 가스입자 채취분석기(Pyrolysate Collector)

가스입자 채취분석기(Pyrolysate Collector)는 코어감시기(Core Monitor)가 경보를 발생하거나 수동으로 조작 될 경우, 냉각 가스 속의 입자를 자동으로 채취하여 분

석한다.

코어감시기(Core Monitor) 전리함의 신호가 60% 이하로 감소하면, 제어 판넬의 접점은 가스입자 채취분석기(Pyrolysat Collector)에 있는 솔레노이드 밸브를 여자시켜 5~10초 동안 개방하고 입자를 채취한다.

또한, 제어판넬의 “MANUAL SAMPLE” 푸시버튼을 5~10초 동안 누르면, 제어 판넬의 “SAMPLE BEING TAKEN”이 점등되고 입자를 채취하게 된다.

원자력교육원

[핵심요약]

1. 발전기 보조계통의 목적 및 기능

- 고정자 권선 수(水) 냉각
- 회전자 및 발전기 내부 수소 냉각
- 수소 누설 억제를 위한 밀봉계통
- 수소 및 이산화탄소(중간 치환 매체) 제어
- 발전기 내부 가스 감시

2. 발전기 보조계통의 구성

- 고정자 권선 냉각수계통
- 발전기 수소 밀봉계통
- 발전기 가스 제어계통
- 발전기 가스 감시계통

3. 발전기 보조계통의 압력 제어

- 밀봉유 압력 > 수소 압력 : 균압 밸브(Pressure Control Valve)
- 수소 압력 > 고정자 권선 냉각수 압력 : 고정자 권선의 누설 고려

4. 고정자 권선 냉각수의 추가 기능

- 여자기의 정지형 정류기 냉각
- 발전기 출력단자 터미널 냉각

제4절 소내전력계통

[학습목표]

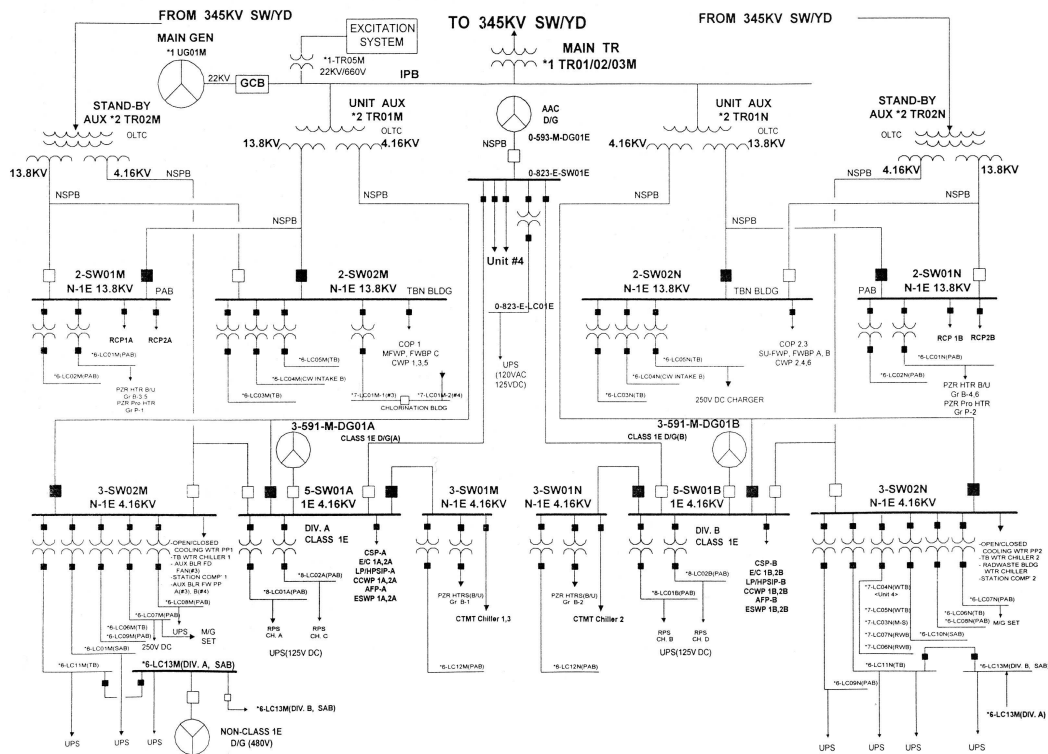
1. 표준형 원자력발전소 소내전력계통의 기본 구성도를 그릴 수 있다.
2. 표준형 원자력발전소 소내전력계통 구성기기 종류를 설명할 수 있다.
3. 표준형 원자력발전소 소내전력계통 구성기기들의 기능을 설명할 수 있다.

1. 교류전력계통

가. 개 요

소내 교류전력계통은 발전소 운전에 필요한 전기 1급(Class-1E) 및 비-전기1급(Non-1E) 양 계통의 부하들에 충분한 용량의 신뢰성 있는 전력을 공급할 수 있도록 설계된다. 표준형 원자력발전소인 울진3,4호기 소내 전력계통 단선도(Single Line Diagram)를 보면 주발전기, 발전기 차단기, 주변압기, 2대의 소내보조변압기(UAT : Unit Aux Transformer) 및 2 대의 대기변압기(SAT : Standby Aux Transformer), 그리고 2 대의 비상디젤 발전기로 구성되어 있음을 알 수 있다.

발전소가 정상운전 중이고, 전력계통, 주변압기 및 보조변압기가 정상운전 중일 때는 전기 1급 및 비-전기1급 부하들은 모두 보조변압기를 통해 주발전기로부터 전력을 공급받는다. 만약 주발전기가 정지되어 소내 전력계통에 전원을 공급하지 못할 경우에는 발전기차단기(GCB)를 개방한 상태에서 전력계통에서 전원을 받아 주변압기와 보조변압기를 통해 소내 전기부하들에 전원을 공급한다. 주변압기나 보조변압기의 고장이 발생한 경우에는 해당 변압기에서 전원을 공급하는 모선은 보조변압기에서 대기변압기로 전원공급이 자동으로 전환된다.



[그림 3-100] 울진3,4호기 소내전력계통 단선도

나. 주요설비 및 기능

발전소 소내 전력계통 설비들은 비-안전관련 설비와 안전관련 설비로 분류된다.

(1) 비-안전관련 설비

비-안전관련 설비들은 발전소가 정상운전 시에는 보조변압기를 통해 발전기로 부터 전력을 공급받게 되고, 발전소의 기동 또는 가동 정지 상태에서는 소외전원인 345kV 스위치야드 계통으로부터 주변압기와 보조변압기를 통하여 전력을 공급받게 된다. 보조변압기를 통한 전력공급이 중단되었을 경우에는 대기변압기를 통하여 345kV 스위치야드 계통의 전력을 소내 안전 및 비-안전관련 설비들에게 공급하게 된다. 발전기 차단기는 주 발전기와 주 변압기 사이에 설치되는데, 주발전기나 주전력계통에 전기적인 고장 발생시에는 계통으로부터 주발전기를 신속하게 분리하는데 사용되며

정상운전 시에는 주발전기를 계통에 동기 투입시키거나 계통으로부터 격리시키는데 사용된다.

(2) 안전관련 설비

안전관련 설비들은 예비전원인 비상디젤발전기가 연결된 전기1급(Class-1E) 모선으로부터 전력을 공급받는다. 전기1급 모선은 정상운전 및 발전소 정지 시에는 비-안전관련 설비와 똑같은 경로로 전원이 공급되는데 다만 보조변압기 및 대기변압기 전원이 모두 상실된 경우 비-안전관련 설비는 정전이 발생하는데 반해 안전관련 설비는 비상디젤발전기가 자동 기동되어 부하에 전원을 계속해서 공급할 수 있다. 또한 최근에는 정전대처설비인 대체교류 디젤발전기(AAC DG)가 설치되어 비상디젤발전기까지 정지되는 소내 정전이 발생할 경우에도 운전원의 조치에 의해 전원을 공급할 수 있도록 설계되어 있다.

(3) 발전소 내 교류배전계통

표준형 원자력발전소의 교류배전계통은 2개의 계열로 나누어지는데 각 계열은 해당계열의 보조변압기(3권선 변압기)로부터 전력을 공급받거나 또는 대기변압기로부터 전력을 공급받을 수 있다. 비-전기1급 13.8kV 모선은 4개가 있는데 각 13.8kV 모선은 해당계열의 보조변압기로부터 전력이 공급되며 또한 대기변압기로부터 전력을 공급받을 수도 있다. 4.16kV 스위치기어는 비-전기1급모선 4개와 전기1급모선 2개가 있다. 2대의 보조변압기 및 2대의 대기변압기는 해당계열의 4.16kV 모선에 전력을 공급한다. 이 구성방식은 소외전원으로부터 안전관련 전기설비에 최소 2개 이상의 물리적으로 독립된 우선전력공급(Preferred Power Supply) 라인을 확보하도록 요구하고 있는 미국 연방규제법 일반설계기준 17(10CFR50 App. A, General Design Criteria 17)을 충족시킨다.

또한 전기1급 모선에는 각각 안전관련 비상디젤발전기가 연결되어 있고, 4개호기 공용으로 대체교류 디젤발전기 1대가 설치되어 있다. 대기변압기와 고압 스위치기어 사이의 연결은 금속폐쇄형 비상분리 모선이 사용된다. 보조변압기와 대기변압기들은 각 변압기에 연결된 모선에서 전력을 공급받는 부하들에 고압스위치기어의 정격을 초과하지 않고 안정된 전압으로 전력을 공급할 수 있다.

각 보조변압기는 소내 부하 중 절반가량의 전기1급 부하와 약 절반의 비-전기1급 부하에 전력을 공급할 수 있다. 대기변압기 또한 절반가량의 전기1급 부하와 절반의 비-전기1급 부하에 전력을 공급할 수 있다. 따라서 발전소 내 교류전력계통은 2대의 보조변압기 또는 2대의 대기변압기 중 어느 1개 전원만 사용할 수 있어도 안전하게 발전소를 정지할 수 있다.

(4) 부하별 공급전력

발전소 내 부하들은 용량에 따라 전원공급 모선을 결정하는데, 일반적으로 적용되는 전압별 전동기용량은 다음과 같다.

- 13.8kV 고압배전반 : 1,500마력 이상의 비-안전등급 전동기
- 4.16kV 고압배전반 : 250~1,250마력의 비-안전등급 전동기, 250마력 이상의 안전등급 전동기
- 480V Load Center : 50~225마력 전동기
- 480V 전동기제어반 : 50마력 이하 전동기

조명설비에는 주로 220V 전원을 사용하는데 480/380-220V의 3상 4선식을 사용한다. 비-필수계측 설비와 1/2 마력 미만의 전동기 부하에 전원을 공급하는 120V 분전반은 480V 전동기제어반에서 별도의 분전반을 거쳐 전력을 공급한다. 안전관련 부하에는 전기1급 모선으로부터 전력이 공급되며, 비-안전관련 부하들에는 비-전기1급 모선으로부터 전력이 공급된다. 다중설비들은 어느 한쪽 계통의 전원이 상실되더라도 정상적인 운전이 가능하도록 양쪽 계통으로부터 모두 전력이 공급된다.

비-전기1급모선 가운데 전기1급 4.16kV 모선으로부터 전력을 공급받는 모선이 각 계열별로 하나씩 설치되어 있는데, 이 비-전기1급 모선은 전기1급 차단기를 통하여 전기1급 모선에 접속되고, 이 차단기가 격리장치 역할을 하게 된다. 이 모선에서 전원을 공급받는 부하에는 TMI 후속 조치사항 II.E.3.1에서 요구하고 있는 가압기 후비가열기(Backup Heater)가 있다.

(5) 공급전원 전환

모든 고압 배전반의 차단기는 수동으로 조작할 수 있다. 고압배전반에는 보조변압기와 대기변압기에서 각각 전원을 공급할 수 있는데, 보조변압기와 대기변압기가

동시에 모선에 연결되지 않도록 차단기가 연동되어 있다. 보조변압기나 주변압기 고장 등에 의해 발전소 내의 전력이 상실되면 고압배전반의 전원 공급이 보조변압기에서 대기변압기 측으로 자동적으로 전환된다. 이렇게 고압배전반의 공급전원이 자동으로 전환되는 것을 자동절체(Auto Transfer)라고 하고, 표준형 원자력발전소의 경우 고속절체(Fast Transfer)와 잔류전압절체(Residual Voltage Transfer)가 있다. 이런 자동절체 신호는 고압배전반 모선에 설치된 각각의 저전압계전기에 의해 발생된다.

(가) 비상디젤 발전기

2대의 전기1급 비상디젤발전기가 별도구역에 설치되는데, 각 계열은 서로 물리적 및 전기적으로 완전히 독립되어 있다. 비상디젤발전기는 전기1급 4.16kV 모선에 전원이 상실된 경우 자동으로 기동되어 10초 이내에 정상상태에 도달하여 모선에 연결된 부하에 전력을 공급할 수 있도록 설계되어 있다. 표준형 원자력발전소의 비상디젤발전기의 기동신호는 다음과 같다.

- 안전주입작동신호(SIS)
- 격납건물 살수작동신호
- 보조급수 작동신호(AFWAS)
- 소외전원 상실신호(LOOP)
- 수동

소외전원이 가압된 상태에서 자동기동 신호가 발생한 경우, 비상디젤발전기는 자동기동 되지만 전기1급 모선에 연결되지 않고 무부하 상태로 운전된다. 이 상태에서 소외전원이 계속 운전 가능한 경우 1시간 이후에는 운전원의 판단에 따라 비상디젤발전기를 정지시킬 수 있다.

전기1급 4.16kV 모선의 전원이 상실되면 모선 저전압계전기가 동작되어 비상디젤발전기가 자동기동 되고, 480V 부하반 공급차단기를 제외한 모든 차단기가 자동으로 개방된다. 비상디젤발전기가 정상속도에 도달하여 부하에 전원을 공급할 수 있게 되면 비상디젤발전기 출력 차단기가 자동으로 투입되고, 전기1급 4.16kV 모선에서 전원을 공급받는 부하들이 정해진 순서에 따라 순차적으로 자동 투입된다. 소외전원 상실 시 부하를 모두 차단한 후 순차적으로 부하를 투입하는 것을 자동부하차단(Load

Shedding) 및 순차부하투입(Load Sequencing)이라고 한다. 이렇게 자동부하차단 및 순차부하투입을 하는 이유는 비상디젤발전기의 과부하를 방지하여 디젤발전기 신뢰성을 확보하고, 안전성관련 전동기의 가속시간을 최소화하기 위해서이다.

비상디젤발전기에서 전원을 공급하는 상황에서 소외전원이 복구될 경우에는 전기1급 4.16kV 모선을 비상디젤발전기에서 소외전원으로 운전원에 의해 수동으로 동기 절환 시킬 수 있다.

비상디젤발전기는 발전소 정상운전 중 정기시험을 위해 발전소 내 전원 또는 소외 전원에 동기 투입시켜 병렬로 운전할 수 있다. 비상디젤발전기의 운전 가능성 확인 시험은 비상디젤발전기의 신뢰성 제고를 위해 정기적으로 시행된다. 비상디젤발전기는 첨두부하 공급용 또는 이와 유사한 목적으로 운전하지 않는다. 비상디젤발전기가 자동기동 신호에 의해 운전 중일 때에는 일반적인 트립 신호들은 우회되고, 단지 차동보호계전기와 엔진 과속도, 수동 비상정지 레버 조작에 의해서만 정지된다.

(나) 대체교류 디젤발전기(AAC DG)

대체교류 디젤발전기는 발전소 정전에 대처하기 위해 설치된 설비이다. 표준형 원자력발전소의 경우 보통 4개호기에 1대가 설치되어 있다. 대체교류 디젤발전기는 발전소 내 및 소외 전원이 완전히 상실되는 발전소 정전사고(SBO : Site Black Out)가 발생하면, 10분 이내에 주제어실 운전원이 수동으로 기동하여 전기1급 4.16kV 모선 1개를 가압할 수 있도록 설계되었다. 전기1급 4.16kV 모선에 대체교류 디젤발전기에서 전원을 가압한 경우에는 안전성관련 부하들을 수동으로 기동하여야 한다. 대체교류 디젤발전기에서 전원을 공급하고 있는 상태에서 소외전원이 복구되면 소외전원 측으로 동기절체 시킬 수 있고, 대체교류 디젤발전기는 수동으로 모선에서 차단시킨 후 정지시킬 수 있다. 또한 비상디젤발전기가 복구될 경우에는 대체교류 디젤발전기를 모선에서 차단시킨 후 비상디젤발전기로 모선에 전원을 공급할 수 있다.

대체교류전원은 발전소가 정상운전중인 경우라도 대체교류전원의 시험을 위해 소외전원 계통과 병렬로 동기운전을 할 수 있다. 비상디젤발전기와 대체교류 디젤발전기는 발전소 운전 정지 시 필요한 모든 부하와 가상사고의 결과를 완화하기 위해 발전소를 안전정지상태로 유지하기 위한 모든 부하에 충분한 전력을 공급할 수 있는

용량을 가지고 있다.

(다) 비안전 디젤발전기

표준형 원자력발전소에는 각 호기 당 480V 비-전기1급 디젤발전기가 1대씩 설치되어 있다. 비-전기1급 디젤발전기는 주 터빈-발전기 터닝기어전동기, 베어링 리프트 오일펌프, 터닝기어 윤활펌프, 발전소 보안계통, 통신계통, 주제어실의 경보계통, 비-전기1급 무정전전원장치의 조절변압기, 컴퓨터실과 기술지원센터의 공기조화계통, 필수부하와 관련된 비안전 부하같은 비안전관련 필수부하에 비상전원을 공급한다. 비-전기1급 디젤발전기는 현장에서 제어 및 감시한다. 비-전기1급 디젤발전기의 차단기는 비상시 주제어실에서 그리고 시험을 위해서는 현장에서 작동할 수 있다.

다. 계통 주요기기 사양

울진3,4호기를 기준으로 주요한 전기기기들에 대한 사양을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 비-전기1급기기

(가) 발전기 차단기(GCB : Generator Circuit Breaker)

발전기차단기의 정격 및 특성은 다음과 같다.

- 공칭전압 : 22kV
- 정격 최고전압 : 24kV
- 정격 주파수 : 60Hz
- 연속전류 : 34,000A
- 최대 대칭전류 차단 용량 : 190kV
- 최대 비대칭전류 차단용량 : 260kV
- 정격 절연강도
 - － 정격 상용주파 절연내력(1분) : 75kV
 - － $1.2 \times 50\mu s$ 에서 정격 전파 임펄스 절연내력 : 170kV
- 차단시간 : 5 사이클
- 주 접점 분리시간 : 3 사이클
- 투입시간 : 15 사이클

(나) 주변압기

주변압기의 정격과 특성은 다음과 같다.

- 단상3대, 2권선, Y/△, 감극성 주변압기
- 정격 : 1,060/1,187MVA, OA/FA 55°C/65°C (3상 기준)
- 탭 : 고압 측, 무부하시 절환장치, 단계 당 2.5% $\pm 5\%$
- 임피던스 : 16% (1,060 MVA, 중간 탭 기준)
- 절연강도, BIL : 25kV, 권선과 부싱 150kV, 345kV 권선 1,050kV, 92kV 권선 450kV, 345kV 부싱 1,300kV, 115kV 부싱 550kV

(다) 소내보조변압기(UAT : Unit Aux Transformer)

울진3,4호기 소내보조변압기의 정격과 특성은 다음과 같다.

- 삼권선, △/Y/Y, 감극성인 부하용량의 절반용량 보조변압기 2대
- 정격
 - 22kV 결선(h) : 53/70.5 MVA, OA/FA 55°C 온도 상승
59.36/78.96 MVA, OA/FA 65°C 온도 상승
 - 14.49kV결선(x) : 35/46.6 MVA, OA/FA 55°C 온도 상승
39.2/52.19 MVA, OA/FA 65°C 온도 상승
 - 4.47kV결선(y) : 18/23.9 MVA, OA/FA 55°C 온도 상승
20.16/26.77 MVA, OA/FA 65°C 온도 상승
- 탭 : 고압 측, 부하 시 탭 절환장치, 단계 당 1.25% $\pm 8\%$
- 임피던스 : $Z_{hx}/Z_{hy}/Z_{xy} = 8.75/30.25/39.0\%$ (53 MVA, 중간 탭 기준)
- 절연강도, BIL : 22kV 부싱과 권선 150kV, 14.49kV 부싱과 권선 110kV, 14.49kV 중성선 부싱 110kV, 4.47kV 부싱과 권선 75kV, 4.47kV 중성선 부싱 75kV
- 중성선 접지사향
 - 14.49kV 중성선 : 6.6Ω, 1,200A, 8,365kV
 - 4.47kV 중성선 : 2.0Ω, 1,200A, 2,580kV

(라) 대기보조변압기(SAT : Standby Aux Transformer)

울진3,4호기 대기보조변압기의 정격과 특성은 다음과 같다.

- 4권선, Y/△/Y/Y 결선인 부하용량의 절반용량 대기보조변압기 2대
- 정격
 - 345kV 결선(h) : 47.0/62.5MVA, OA/FA 5°C 온도 상승
52.6/70.0MVA, OA/FA 65°C 온도 상승
 - 13.8kV 결선 (x) : 31.0/41.2MVA, OA/FA 55°C 온도 상승
34.7/46.1MVA, OA/FA 65°C 온도 상승
 - 4.16kV 결선 (y) : 16.0/21.3MVA, OA/FA 55°C 온도 상승
17.9/23.9MVA, OA/FA 65°C 온도 상승
- -탭 : 고압 측, 부하 시 탭 절환 장치, 단계 당 1.25% ± 10%
- -임피던스 : $Z_{hx}/Z_{hy}/Z_{xy} = 9.35/30.0/39.25\%$ (44 MVA, 중간 탭 기준)
- -절연강도, BIL : 45kV 부싱과 권선 1,425/1,050kV
 - 13.8kV 부싱과 권선 110/110kV
 - 4.16kV 부싱과 권선 110/75kV
 - 345/13.8/4.16kV 중성선 부싱 550/110/110kV
- 중성선 접지사향
 - 345kV 중성선 : 170kV 단로기와 병행으로 108kV 피뢰기
 - 13.8kV 중성선 : 6.6Ω, 1,200A, 7.967kV, 10초
 - 4.16kV 중성선 : 2Ω, 1,200A, 2.4kV, 10초

(마) 13.8kV 고압배전반

울진3,4호기에는 보조건물과 터빈건물에 4개의 13.8kV 비-전기1급 고압배전반이 있다. 4개의 금속폐쇄형, 3상 배전반에는 인출형, 에너지 축적형 회로차단기가 설치되어 있고, 계기용변압기(PT), 보호계전기, 계기용 변류기(CT) 및 각종 지시계기들이 설치되어 있다.

울진3,4호기 13.8kV 비-전기1급 고압배전반의 모선과 차단기의 정격은 다음과 같다.

- 공칭전압 13.8kV, 3상, 60hz
- 정격 주모선 연속전류

모선번호 3-821-E-SW01M	.....	1,200A, 연속정격
모선번호 3-821-E-SW01N	.....	1,200A, 연속정격
모선번호 3-821-E-SW02M	.....	1,200A, 연속정격
모선번호 3-821-E-SW02N	.....	1,200A, 연속정격
- 공칭차단 용량 1,000MVA
- 정격 최고전압 15.0kV, 실효치
- 정격전압 범위계수, K 1.3
- 공칭전압에서 차단용량 40,000A, 실효치, 대칭전류
- 투입 용량 77,000A, 실효치
- 비대칭 정격계수 1.2
- 제어전압 125V 직류 (90V~140V)
- 공간 가열기(Space Heater) 120V, 60Hz

(바) 4.16kV 고압배전반

울진3,4호기 보조건물과 터빈건물에 4.16kV 전기1급 및 비-전기1급 고압배전반이 설치되어 있다. 4개의 금속폐쇄형, 3상 배전반에는 인출형, 에너지 축적형 차단기가 있고 계기용변압기(PT), 계전기, 계기용 변류기(CT) 및 각종 지시계기들이 설치되어 있다.

울진3,4호기 4.16kV 비-전기1급 고압폐쇄배전반의 모선과 차단기의 정격은 다음과 같다.

- 공칭전압 4.16kV, 3상, 60Hz
- 정격 주모선 연속전류

모선번호 3-822-E-SW02M	.....	3,000A, 연속정격
모선번호 3-822-E-SW02N	.....	3,000A, 연속정격
모선번호 3-822-E-SW01M	.....	1,200A, 연속정격
모선번호 3-822-E-SW01N	.....	1,200A, 연속정격

- 공칭차단 용량 350MVA
- 정격 최고전압 4.76kV, 실효치
- 정격전압 범위계수, K 1.19
- 공칭전압에서 차단용량 46,900A, 실효치, 대칭 전류
- 투입 용량 78,000A, 실효치
- 제어전압 125V 직류(90V~140V)
- 공간 가열기(Space Heater) 120V, 60Hz 연결

(사) 480V 저압부하반(Load Center)

비-전기1급 480V 저압부하반은 3상 변압기, 차단기반, 지시계기 및 계전기를 포함하고 있다. 비-전기1급 480V 저압부하반은 비-전기1급 13.8kV와 4.16kV 계통으로부터 전력을 공급받는다. 각 부하반 변압기의 2차 결선은 전력용 회로차단기를 통해 비-전기1급 부하에 전력을 공급하는 480V 모선에 연결된다. 모든 저압 부하반은 정상 시 연속적으로 전력을 공급한다. 옥외변전소, 염소주입설비, 보조보일러, 수처리설비, 기기공작실 및 폐기물 처리건물 등과 같은 공용설비에 위치한 480V 저압부하반은 양 쪽 호기에서 각각 전원을 공급받을 수 있게 구성되는데, 정상운전 중 양 호기 중 어느 한 호기에서 전원을 공급받게 된다. 비-전기1급 계통을 위한 480V 저압부하반은 인출형, 에너지 축적형 차단기를 포함한 금속 폐쇄형 배전반으로 구성되어 있다. 이들 저압부하반은 발전소 여러 지역에 분산 설치되어 있는데, 울진3,4호기 저압부하반의 정격은 다음과 같다.

○ 변압기

- 1,500/2,000kVA (AA/FA)	.....	13.8kV/480V, 3상, 60Hz
- 1,000/1,333kVA (AA/FA)	.....	13.8kV/480V, 3상, 60Hz
	.....	4.16kV/480V, 3상, 60Hz
- 750/1,000kVA (AA/FA)	.....	4.16kV/480V, 3상, 60Hz
- 500/667kVA (AA/FA)	.....	13.8kV/480V, 3상, 60Hz
	.....	4.16kV/480V, 3상, 60Hz
- 225kVA (AA)*	.....	4.16kV/480V, 3상, 60Hz

* 225kVA 변압기반 (3/4-824-E-TR15M, 3/4-824-E-TR15N)에는 전동기 제어반에 직접 전력을 공급하는 변압기가 있다.

○ 주모선 정격연속전류

- 3,000A	.....	1,500/2,000kVA 정격
- 2,000A	.....	1,000/1,333kVA 정격
- 1,600A	.....	1,000/1,333kVA 정격
- 1,600A	.....	750.0/1,000kVA 정격
- 1,600A	.....	500.0/667.0kVA 정격

○ 회로차단기

연속전류 정격차단전류, 480V, 대칭전류, 실효치

800A	42,000A
1,600A	50,000A
2,000A	65,000A
3,200A	65,000A

○ 제어전압 125V 직류 (90V ~ 140V)

○ 공간가열기 (Space Heater) 120V, 60Hz

(아) 480V 전동기제어반 (MCC : Motor Control Center)

울진3,4호기 비-전기1급 전동기제어반은 발전소 여러 지역의 옥내에 위치하며 각 전동기제어반은 전폐형이고, 정격은 다음과 같다.

○ 정격전압 480V, 3상, 60Hz

○ 주모선 정격 연속전류 600A

○ 차단기

정격전류 정격차단전류, 480V, 대칭전류, 실효치

150A	65,000A
225A	65,000A

(2) 전기1급 전기기기

울진3,4호기 4.16kV 전기1급 배전반은 보조건물에 설치되어 있다. 2개의 금속폐쇄형 3상 배전반에는 인출형, 에너지 축적형 차단기가 설치되어 있고, 배전반은 2개의 독립적인 모선계통으로 배열되고 내진범주 1급의 격리된 방화구역 내에 위치하고 있다. 각각의 배전반들은 내진범주 1급으로 분류되고 계기용변압기, 계전기, 계기용 변류기 그리고 지시계기들이 설치된다. 울진3,4호기 4.16kV 전기1급 배전반 모선의 기기 번호는 3/4-823-E-SW01A와 3/4-823-E-SW01B이고, 각 모선의 연속전류는 3,000A이다. 그 밖의 정격은 4.16kV 비-전기1급 배전반과 같다.

전기1급 저압부하반과 전동기제어반은 발전소 여러 내진범주 I 급 건물 내에 위치하고 있다. 각각의 저압부하반과 전동기제어반은 내진범주 I 급으로 분류되고 계기용변압기, 계전기, 계기용 변류기와 지시계기들이 설치된다. 전기1급 저압부하반과 전동기제어반의 정격은 비-전기1급 저압부하반과 전동기제어반의 정격과 같다.

2. 직류전력계통

가. 전기1급 직류전력계통

(1) 개요

울진3,4호기는 각 호기 당 4개의 전기1급 직류전력계통이 있으며, 대체교류전원 관련 부하용으로 1개의 공용 직류보조계통이 구비되어 있다. 직류전력계통 A와 C는 각 채널별로 해당 채널의 인버터에 직류전력을 공급하고, 또한 A계열 직류 부하에 전원을 공급한다. 직류보조계통 B와 D는 각 채널별로 해당 채널의 인버터에 직류전력을 공급하고, 또한 B계열 직류 부하에 전원을 공급한다. 공용으로 설치된 대체교류전원용 전기1급 직류전력계통은 대체교류전원관련 자체부하와 대체교류전원용 공용변환기에 제어전원과 직류전력을 공급하며, 이 계통은 E 채널로 구분된다.

(2) 계통 구성

각 전기1급 직류전원계통은 125V축전지, 충전기, 직류제어반을 하나의 계통으로 구성하고 있고, 각 계통의 충전기에는 동일 계열의 480V 저압부하반에서 교류전원이

입력으로 공급된다.

(3) 전기1급 직류부하

울진3,4호기의 주요한 전기1급 직류부하는 다음과 같은 것들이 있다.

- 전기1급 계측 및 제어전원계통 역변환기(Inverter)
- 원자로냉각재 냉각 제어 및 계측설비
- 솔레노이드밸브(Solenoid Valve)
- 직류전동기(DC MOTOR)
- 비상디젤발전기 초기여자(Field Flashing) 전원
- 대체교류 디젤발전기 제어전원(AAC DG Control Pane)
- 대체교류발전기 초기여자(Field Flashing, Inverter)전원
- 전기1급 고압배전반(Switchgear) 제어전원
- 전기1급 저압부하반 제어전원
- 경보계통

(4) 전기1급 축전지 및 충전기 사양

울진3,4호기 전기1급 계통은 각 호기마다 4개의 125V 직류전력계통으로 구성되어 있으며, 각 전기1급 축전지는 전기1급 부하들에 전력공급을 위한 충분한 용량을 가지고 있다.

○ 전기1급 축전지 정격

형 식	납축전지(Lead-antimony)
셀 수	116(58셀, 2조)
공칭 전압	125V
용 량	2,800AH(10시간 정격)
부동 전압	2.15V/셀(최소) 2.17V/셀(최대)
균등 전압	2.25V/셀(최소) 2.40V/셀(최대)

최소 운전 전압	1.81V/셀
운전 전압 범위	105V~140V

각 전기1급 충전기는 “균등충전”에서 “부동충전”으로의 자동변환 기능이 갖추어져 있으며, 이는 0~120 시간의 범위를 가진 타이머에 의해 조정된다. “부동충전”에서 “균등충전”으로의 변환은 수동으로만 가능하다.

○ 전기1급 충전기 정격

- 교류입력 - 3상 480VAC $\pm 10\%$, 60Hz $\pm 5\%$
- 직류출력 - 125V 정격전압, $\pm 0.5\%$ 조정
 - 부동전압범위 2.15~2.17V/셀
 - 균등전압범위 2.25~2.40V/셀
 - 800 암페어 출력

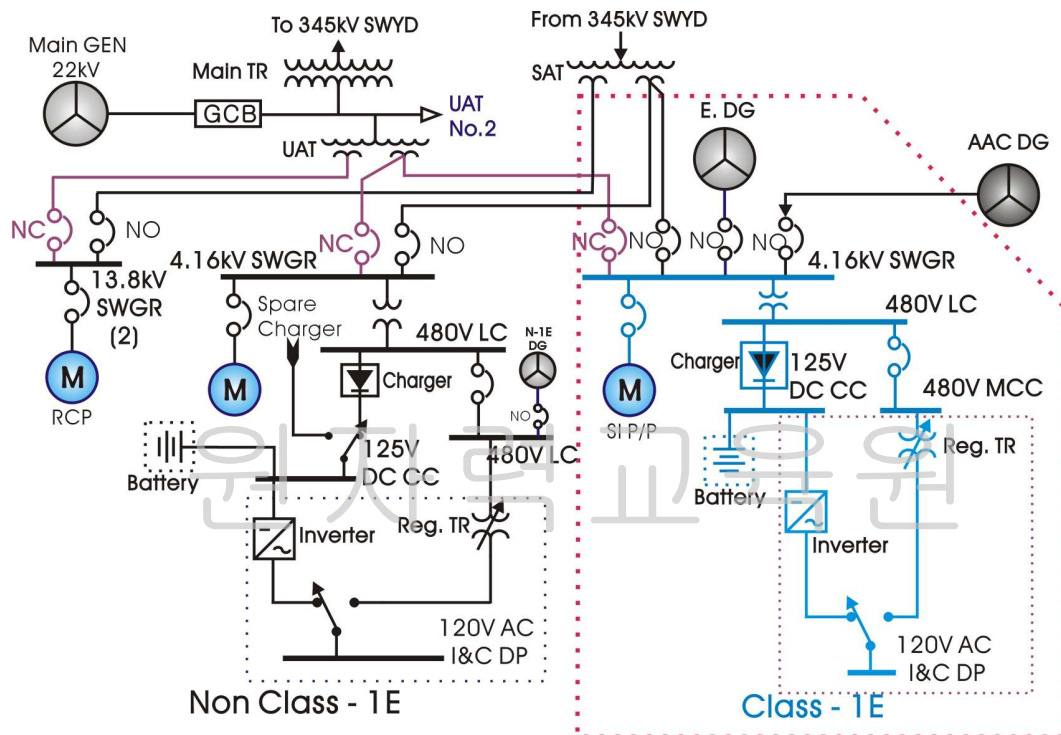
나. 비-전기1급 직류전력계통

울진3,4호기의 비-전기1급 직류계통은 각 호기 당 2개의 250V 직류전력계통, 2개의 125V 직류전원계통 및 2개호기 공용으로 1개의 125V 직류전력계통이 있다. 각 250V 직류전력계통은 1그룹의 축전지, 충전기, 직류 제어반으로 구성되어 있고, 1대의 스윙 충전기가 기존 충전기의 유지 보수 또는 수리를 위해서 설치되어 있다. 각 호기 당 설치되어 있는 125V 직류계통 축전지의 용량은 2,800Ah이며, 폐기물처리건물에 설치된 양 호기 공용 125V 직류계통 축전지의 용량은 800Ah이다. 또한 스위치야드에 설치된 2개의 125V 축전지의 용량은 1,600Ah이다. 250V 직류계통의 경우는 컴퓨터계통용 250V 축전지가 1,400Ah이며, 터빈건물용 축전지가 1,800Ah의 용량을 갖추고 있다. 여기에서 언급한 축전지의 용량은 모두 10시간 방전을 기준이다.

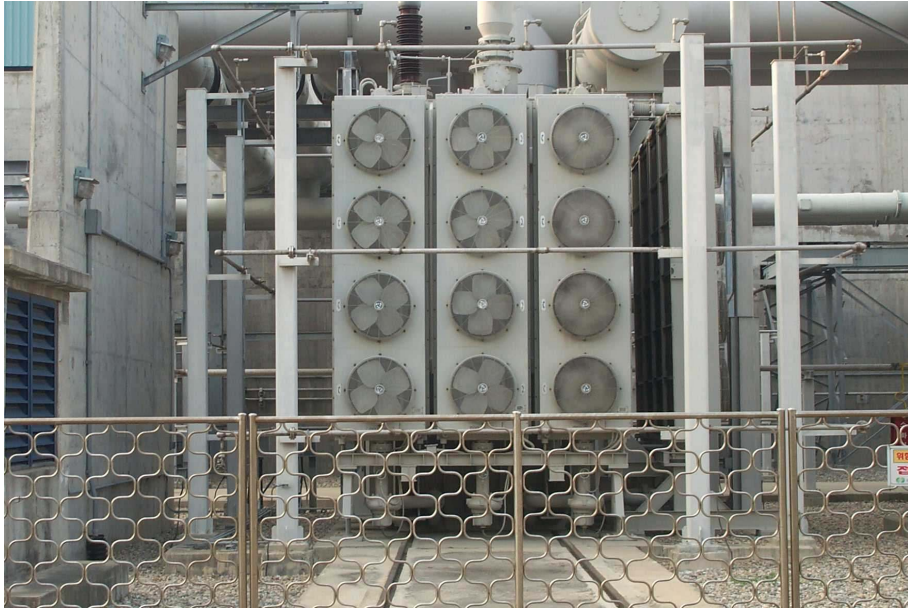
○ 비-전기1급 축전지 정격

형 식	 납축전지 (Lead-antimony)
셀 수	 116셀, 250V 직류용
	 58셀, 125V 직류용
공칭 전압	 250V 직류/125V 직류
부동전압	 2.15V/셀 (최소)

	.....	2.17V/셀 (최대)
균등전압	.....	2.25V/셀 (최소)
	.....	2.40V/셀 (최대)
최소 운전 전압	.....	1.81V/셀
전압 범위	.....	210~280V, 250V 계통
	.....	105~140V, 125V 계통



[그림 3-101] 표준형 원자력발전소 소내전력계통 개요도



[그림 3-102] 주변압기(울진3호기)



[그림 3-103] 대기보조변압기(울진3호기)



[그림 3-104] 고압배전반(울진3호기)



[그림 3-105] 480V 저압부하반(울진3호기)



[그림 3-106] 480V 전동기제어반(울진3호기)



[그림 3-107] 전기-1급 충전기(울진3호기)

[핵심요약]

1. 소내전력계통 구성기기
 - 주전력계통 : 발전기차단기, 주변압기, 상분리 모선
 - 소내보조전력계통 : 소내보조변압기, 대기보조변압기, 고압배전반 등
2. 표준형 원자력발전소 소내전력계통 전원공급 경로
 - 소내외 전원 정상 공급 시 : 주발전기⇒소내보조변압기⇒스위치기어⇒부하반 (Load Center)⇒전동기제어반(MCC)
 - 발전기 정지 시 : 스위치야드⇒주변압기⇒소내보조변압기⇒스위치기어⇒부하반(Load Center)⇒전동기제어반(MCC)
 - 주변압기 또는 소내보조변압기 고장 시 : 스위치야드⇒대기보조변압기(SAT)⇒스위치기어⇒부하반(Load Center)⇒전동기제어반(MCC)
 - 소내외전원 상실(LOOP) 발생 시 : 비상디젤발전기⇒안전등급 스위치기어⇒안전등급 부하반(Load Center)⇒안전등급 전동기제어반(MCC)
3. 우선전력(Preferred Power) : 소외전원으로부터 발전소 전기1급 고압배전반 모선에 공급되는 전력, 원자력발전소는 2개의 독립된 우선전력 라인 확보필요
4. 주변압기 : 주발전기의 출력전압을 송전전압까지 높이는 전기정지기
5. 전동기 용량별 공급전압
 - 13.8kV 고압배전반 : 1,500마력 이상의 비-안전등급 전동기
 - 4.16kV 고압배전반 : 250~1,250마력의 비-안전등급 전동기, 250마력 이상의 안전등급 전동기
 - 480V Load Center : 50~225마력 전동기
 - 480V 전동기제어반 : 50마력 이하 전동기
6. 비상디젤발전기 자동기동 신호
 - 안전주입작동신호(SIS)
 - 격납건물 살수작동신호
 - 보조급수 작동신호(AFWAS)
 - 소외전원 상실신호(LOOP)
7. 자동부하차단 및 순차부하투입 : 소외전원 상실 시 부하를 모두 차단한 후 순차적으로 부하를 투입하는 것. 비상디젤발전기의 과부하를 방지하여 신뢰성을 확보하고, 안전성관련 전동기의 가속시간을 최소화하기 위함.
8. 대체교류 디젤발전기 : 발전소 내 및 소외 전원이 완전히 상실되는 발전소 정전 사고(SBO : Site Black Out)시, 10분 이내에 수동으로 전기1급 4.16kV 모선 1개 가압 가능

제5절 소외전력계통

[학습목표]

1. 표준형 원자력발전소 소외전력계통 구성방식을 설명할 수 있다.
2. 가스절연 스위치기어의 장단점에 대하여 설명할 수 있다.

1. 개요

소외전력계통은 옥외변전소(Switchyard)와 송전선로로 구성된다. 옥외변전소는 일반적으로 2개호기 공용으로 사용되며, 송전선로는 한국전력 송전계통과 2개 혹은 그 이상의 독립적인 송전선로로 연결되고 동일 부지 내 인접 발전소와도 연계선로로 연결된다.

2개의 345kV 송전선로로 구성된 경우 그 각각의 송전선로는 상호 적절한 이격거리를 유지하면서 독립적으로 2개호기에 소외전력을 공급한다. 또한 2개의 송전선로는 각각 다른 원방 변전소에 연결되고 상호 독립된 별도의 선로로 발전소의 옥외변전소에 연결되기 때문에, 1개 송전선로가 고장 나더라도 나머지 한 선로의 운전에 지장을 초래하지 않는다.

한국전력 송전계통은 통제하기 어려울 정도의 광범위한 선로 또는 발전기 불시정지 사고가 아니라면, 1개의 송전선로 또는 한 발전소 전체가 정전 상태일지라도 송전계통이 감당할 수 있도록 설계되어 있다. 이것은 같은 발전소의 2개호기 발전기가 동시에 운전정지 되더라도 송전계통에 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 여건 하에서 발전소의 전기1급(Class-1E) 모선에 대한 소외전력 공급은 상실되지 않는다. 발전소의 송전선로 설계는 동적 안정성을 유지하도록 계통설계를 하였기 때문에 어느 한 송전선로의 고장이 발전소 불시정지를 초래한다거나, 어느 한 발전소의 불시정지가 나머지 한 발전소의 불시정지를 초래하지는 않는다.

이와 같은 설계로 모든 345kV 송전선로가 동시에 정전될 가능성은 극히 희박하지만, 이런 사고가 발생하더라도 발전소 안전운전과 안전정지에 지장을 주지 않도록 받

전소 내에 전기-1급(Class-1E) 비상디젤발전기를 설치하여 안전정지에 필요한 전력을 공급하도록 설계되어 있다. 소외전원이 상실된 상태에서 발전소 내의 전기-1급(Class-1E) 비상디젤발전기가 운전 불가능할 경우에는 대체교류 디젤발전기(AAC DG)가 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있도록 필요전력을 공급한다.

2. 송전계통

2개의 송전선로는 각각 2회선으로 구성되어 한국전력의 송전계통과 발전소 옥외변전소에 연결된다. 2개의 송전선로 각각은 충분한 물리적 이격을 가지고 서로 다른 송전선로와 교차하지 않도록 설계된다. 또한 송전선로는 상호 간격을 충분히 유지시킴으로써 철탑 붕괴나 단선 사고와 같은 단일 사고가 동시 사고로 파급되어 모든 345kV 송전선로를 상실시키지 않도록 설계되어 있다.

각 송전선로 회선 상부에는 가공지선을 설치하여 직격뢰로부터 송전선을 보호한다. 소외전력은 소내전력과 별도로 독립적으로 운전될 수 있도록 되어 있으며, 보호계전기, 차단기 제어회로 및 전원장치를 별도로 구비하여 두개의 소외전력 회선이 동시에 상실되지 않도록 설계되어 있다.

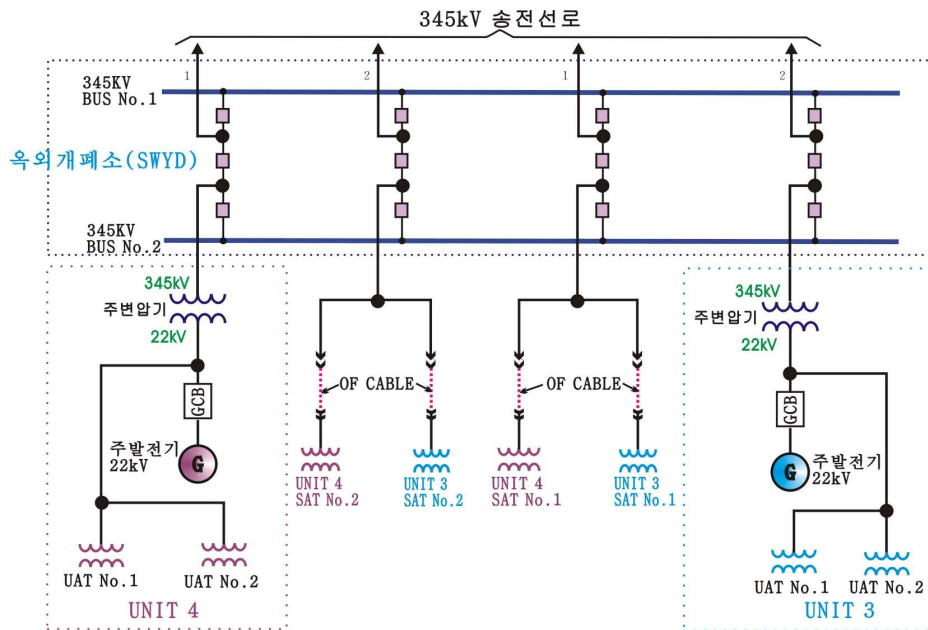
3. 옥외변전소(Switchyard)

표준형 원자력발전소 옥외변전소는 일반적으로 2개회기가 공용으로 사용하며, 연계선로를 통해 동일 부지 내 발전소와도 연결된다.

표준형원전의 옥외변전소는 SF_6 가스절연 방식으로 2개의 주모선(Main Bus)과 주모선사이를 연결하는 베이(Bay)로 구성되어 있는데, 이 베이는 각 발전소 별로 4개에서 8개 정도로 구성된다. 각 베이는 3조의 차단기로 2개회로를 차단하는 1.5차단 방식으로 되어 있다. 1.5차단 방식은 고장이 발생한 1개의 회로 또는 1개의 차단기를 운전 중인 다른 회로 또는 차단기의 운전에 지장을 주지 않고 계통에서 분리할 수 있어 운전 및 조작 편의성이 뛰어나고, 신뢰성도 높아 고리1,2회기와 월성1회기를 제외한 대부분의 원자력발전소에서 이 방식을 적용하고 있다.

아래 그림은 1.5차단방식으로 구성된 가장 기본적인 2모선 4베이(Bay) 방식의 옥외

변전소의 단선도이다.



[그림 3-108] 1.5차단기 방식 옥외변전소 모선 개념도

일반적으로 정상운전 시 모든 옥외변전소 차단기는 닫힘(Close) 상태로 운전되며, 각 송전선에는 고속도로 동작하는 보호계전기가 이중으로 구비되어 있어 선로사고 또는 비정상 상태 시에 신속하게 계통에서 분리할 수 있다.

옥외변전소는 여러 개의 중첩된 서로 다른 보호 구역으로 분할하여, 사고 구역을 계통에서 분리시킬 때 운전계통에 대한 과급효과를 최소화 시키도록 되어 있다. 각 보호구역은 2가지 이상의 고장검출 장치를 구비하고 있다.

각 차단기는 전기적으로 독립된 2개의 트립회로가 있으며, 트립회로는 각각 독립된 직류전원에 연결되어 있다. 만일 어느 차단기 하나가 트립 신호를 받은 후 일정한 시간 이내에 사고를 차단하지 못하면 인접하고 있는 모든 차단기가 트립되어 사고 구간을 분리시킨다.

옥외변전소 기기보호 및 제어용으로 2개의 비-전기1급(Non-1E) 직류계통이 구비되어 있으며, 각 직류계통은 충전기, 축전지 및 분전반으로 구성된다.

옥외변전소와 주변압기까지의 연결은 SF_6 가스절연모선과 가공선로를 통하여 연결되고, 각 발전소의 물리적으로 독립된 2대의 대기보조변압기(SAT)와 2대의 소내 보조변압기(UAT)를 통하여 13.8kV 및 4.16kV 소내 배전계통까지 우선전력을 공급한다. 주변압기를 통한 우선전력공급은 발전기차단기가 개방된 상태에서 옥외변전소에서 주변압기를 통해 345kV가 22kV로 강하되고, 소내보조변압기(UAT)는 22kV 전압을 13.8kV와 4.16kV로 강하시켜 소내 배전계통에 공급하게 된다. 옥외변전소의 보조전원은 양호기 중 어느 한쪽으로부터 전원을 공급받을 수 있는 옥외변전소 저압차단기반(Load Center)으로부터 전원을 공급받는다.

지금까지 살펴본 내용은 울진3,4호기를 기준으로 한 일반적인 표준형원전의 옥외변전소에 대한 설명이다.

다음 표는 각 발전소별 옥외변전소 모선방식과 절연방식을 비교한 것이다.

〈표 3-5〉 각 발전소별 옥외변전소 비교

발전소 명	모선 방식	절연 방식	비 고
고리 1,2호기	환상모선(Ring Bus)방식	옥외개방공기절연방식	
고리 3,4호기	1.5차단 방식	옥외개방공기절연방식	
영광 1~6호기 울진 1~6호기 월성 1~4호기	1.5차단 방식	GIS*방식(SF_6 가스절연)	*GIS : Gas Insulated Switchgear

다음 사진은 옥외개방형공기절연방식 옥외변전소와 가스절연방식 옥외변전소(GIS)를 보여주고 있는데, 옥외개방형은 고리3,4호기 옥외변전소이고, 가스절연방식은 표준형원자력발전소인 영광5,6호기 옥외변전소이다. 가스절연방식 옥외변전소는 개방형공기절연방식에 비해 태풍, 염해, 낙뢰 등과 같은 주변 환경의 영향으로부터 자유롭고, 소음이 작으며, 설치면적을 줄일 수 있는 장점이 있다. 반면 SF_6 가스를 관리하여야 하고, 대부분의 기기가 밀폐된 용기 안에 내장되어 있어 이상 유무에 대한 육안점검이 어려운 단점이 있다. 하지만 단점에 비해 장점이 크기 때문에 위 표에서 알 수 있는 바와 같이 최근에는 대부분 가스절연방식을 적용하고 있다.



[그림 3-109] 옥외개방형공기절연방식 옥외변전소



[그림 3-110] 가스절연방식 옥외변전소

4. 옥외변전소 구성기기 사양

울진3,4호기 옥외변전소(Switchyard)를 기준으로 주요 구성기기 및 설계사양에 대해 간단히 살펴보면 다음과 같다.

가. 차단기

통상의 부하전류 및 해당회로에 발생하는 사고전류를 차단하는 전기기기로 주요 사양은 다음과 같다.

- (1) 형식 : SF_6 차단호소, 개별 압축공기 구동식 3상 수평형

(2) 수량 : 6Bay × 3조 × 3상(계 18조, 54개)

(3) 구동력

- 투입 구동력 : Spring식
- 개방 구동력 : 압축공기

(4) 조작구분

- 주제어실-발전단측 차단기, 가스절연모선(GIB)측 발전단 단로기
- 옥외변전소 패널(SWYD Panel) - 모든 차단기, 단로기

나. 단로기(DS : Disconnection Switch)

단로기는 전류(부하전류나 사고전류)가 흐르지 않은 충전회로만을 개폐하는 전기기기이다. 울진3,4호기 옥외변전소 단로기의 사양을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

(1) 형식 : SF₆ 가스, 공기 개별 구동식 3상 수직형/수평형

(2) 수량 : 48조 × 3상

다. 접지단로기(Earth Switch)

접지단로기는 계통의 전위상승 억제, 계통안정도 유지, 기기 보호 및 감전 방지를 위한 설비로 울진3,4호기 기준 사양은 다음과 같다.

(1) 형식 : SF₆ 가스, 공기 개별 구동식 3상 수직형/수평형

(2) 수량 : 62조 × 3상

라. 계기용변성기

고전압 회로의 보호나 계측제어를 하는데 고압이나 초고압회로의 전압, 전류입력을 변환 없이 직접 도입하는 것은 기술적으로나 안전상의 문제로 불가능하므로 취급하기 쉬운 일정한 전압과 전류로 변환하여 사용하게 된다. 이를 위해 계기용변성기를 사용하게 되는데 계기용변성기는 여기에 접속되는 부하에 적합한 특성을 가져야 하며 규격 상 보호계전기는 변류기(CT : Current Transformer)와 계기용변압기(PT : Potential Transformer)로부터 공급되는 전류와 전압으로 설비의 감시 및 제어가 이루어진다.

(1) 계기용변압기(PT)

- 형식 : SF₆ 절연 권선형
- 부담(Burden) : 1,500VA
- 변압비 : 345kV/115-66.4V
- 정밀도 : 0.3급

(2) 변류기(CT)

- 형식 : BCT Type(효성)
- 권선비 : 4,000-3,000-2,000-1,500-1,000 : 5A
- 정밀도 : 0.3급
- 부담(Burden) : 100/200VA

마. 피뢰기(LA)

전력계통에서 발생하는 이상전압(Surge)에는 낙뢰(직격뢰)에 의한 외부 이상전압과 유도뢰나 개폐조작에 의한 내부이상 전압이 있는데, 이런 충격성 이상전압으로부터 변압기와 같은 소내 전기기기들을 보호하는 기기가 피뢰기이다. 울진3,4호기에 설치된 피뢰기의 일반적인 정격은 다음과 같다.

(1) 형식 : ZLA × X25HF

(2) Arrester Class : 288kV 20kA

[핵심요약]

1. 표준형 원자력발전소 옥외변전소 형식

- 절연방식 : SF_6 가스절연방식
- 모선방식 : 1.5차단기방식

2. 가스절연방식의 장단점

- 장점 : 가스절연방식 옥외변전소는 개방형공기절연방식에 비해 태풍, 염해, 낙뢰 등과 같은 주변 환경의 영향으로부터 자유롭고, 소음이 작으며, 설치면적을 줄일 수 있다.
- 단점 : SF_6 가스에 대한 관리 필요, 이상 유무에 대한 육안점검이 어려움.

3. 옥외변전소 가스차단기 구동력(울진3,4호기)

- 투입구동력 : 스프링
- 개방구동력 : 압축공기

원자력교육원

제6절 무정전 전원설비(UPS)

[학습목표]

1. 무정전전원장치에 대한 정의를 내릴 수 있다.
2. 무정전전원장치 구성기기에 대하여 설명할 수 있다.
3. 축전지 충전방식에 대하여 설명할 수 있다.
4. 무정전전원장치 운전모드에 대하여 설명할 수 있다.

1. 개요

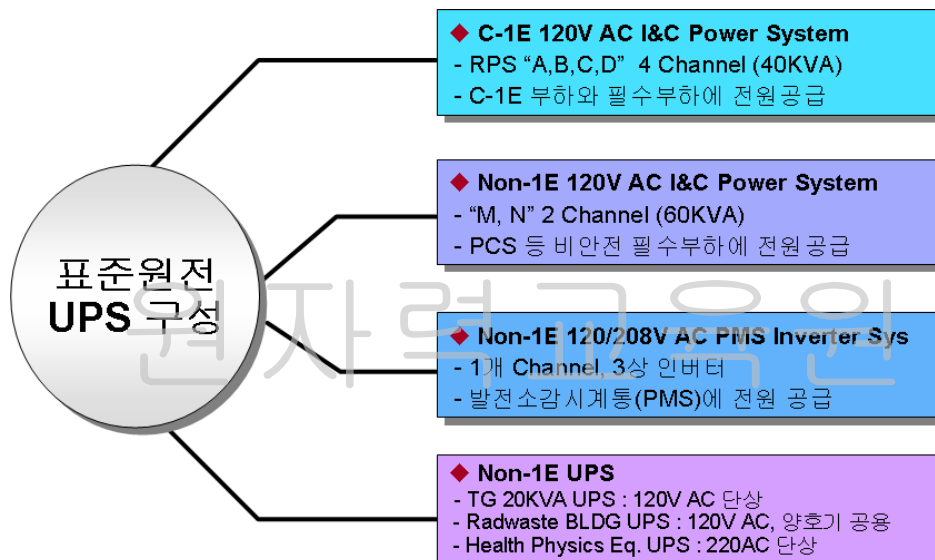
무정전전원장치(UPS : Uninterruptible Power Supply)란 상용전원 또는 예비전원의 각종 장애(전압변동, 순간정전, 정전, 주파수변동, Surge, Flicker)가 발생하더라도 부하 측에 무정전, 정전압, 정주파수의 안정된 양질의 교류전력을 공급하는 전원장치이다. 현대사회는 사회 구조 및 산업분야가 다양화·정밀화·고도화되어 정전이나 전력품질 저하 시 큰 손실을 유발하는 분야가 많아졌다. 따라서 이런 분야에서 무정전의 안정적인 전원을 요구하는 수요가 증가되어 무정전전원장치를 채택하는 사례가 급속하게 증가하고 있다. 무정전전원장치가 적용되는 주요산업분야를 요약하면 다음 표와 같다.

〈표 3-6〉 무정전전원장치용도

구 분	용 도
컴퓨터	금융, 증권, 보험 등의 온라인 시스템
방송통신기기	방송국, 전화, 교환설비, 무선 통신설비, 신문사
관제·관리시스템	항공관제, 교통관제, 전력계통 관제
공장	반도체공장 등
비상용	병원, 백화점, 호텔, 터널조명 등
생산·계획설비	발전설비, 화학설비, 물처리 설비
발전설비	계측제어 설비, 전산시스템, 고장기록계, 터빈제어시스템, 각종제어설비 등

원자력발전소에서는 주로 원자로보호계통(RPS), 발전소제어계통(PCS), 공학적안전설비작동계통(ESFAS)과 같은 계측 및 제어계통에 전원을 공급하기 위해 무정전전원장치를 사용한다. 원자력발전소에 사용되는 무정전전원장치는 안전성관련 부하에 전원을 공급하는 전기1급(Class-1E) 무정전전원장치와 안전성과는 관련이 없는 보조설비(BOP)에 전원을 공급하는 비-전기1급(Non-1E) 무정전전원장치가 있다. 전기1급 무정전전원장치의 경우 중수로형 원자력발전소인 월성원자력을 제외하고, 나머지 모든 원자력발전소에는 독립된 4개의 채널로 구성된다. 이 4개의 독립된 무정전전원장치가 각각 독립된 4채널의 원자로보호설비들에 전원을 공급하게 된다.

다음 그림은 표준형 원자력발전소의 무정전전원장치의 종류와 간단한 기능에 대하여 보여주고 있다.



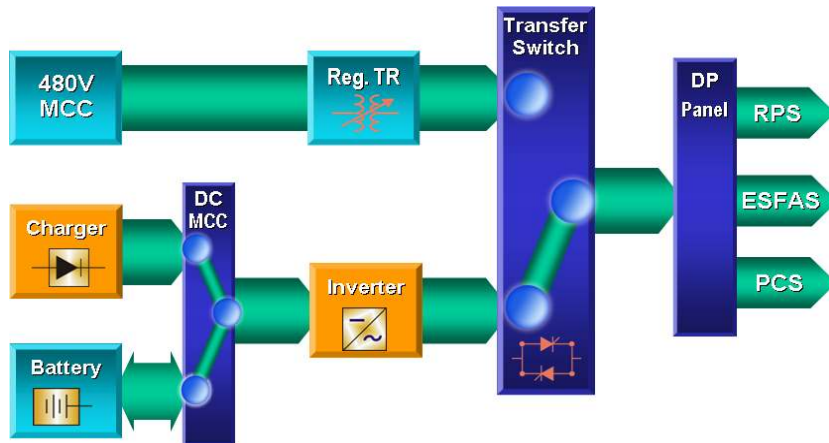
[그림 3-111] 표준형 원자력발전소 무정전전원장치 종류

2. 무정전전원장치 구조

가. 일반 구조

무정전전원장치는 구성방식에 따라 충전기, 축전지, 인버터, 절체스위치, 수동 우회스위치, 전압조정변압기 등을 조합하여 사용하며, 이들과 관련된 경보장치, 보호장치

및 기타 부속장치 등으로 구성된다. 특히 이런 구성기기 중에서 충전기, 축전지, 인버터는 정지형 무정전전원장치를 구성하는 필수구성기기이다. 다음 그림은 표준형 원자력발전소에 적용된 무정전전원장치의 기본구성방식을 블록도로 표현한 것이다. 이런 구성기기에 대하여 간단하게 설명하면 다음과 같다.



[그림 3-112] 무정전전원장치 구성 블록도(표준형원자력발전소)

- 충전기 또는 정류기(Battery Charger or Rectifier)
 - 충전기 : 교류전원을 직류로 변환시켜 축전지를 충전시킴과 동시에 인버터에 직류전원을 공급하는 정류장치, 사이리스터와 같은 제어정류소자 사용
 - 정류기(Rectifier) : 무정전전원장치에서 정류기는 축전지 충전기능은 하지 않고 인버터에 입력을 제공하는 기능만 수행하는 정류장치를 의미, 다이오드와 같은 정류소자 사용
- 축전지 (Battery) : 전기에너지를 화학에너지로 변환하여 저장하였다가 필요할 때 다시 전기에너지로 변환하여 사용하는 장치. 납축전지가 대표적이며 가역전지 또는 2차전지라고도 함.
- 인버터(Inverter) : 직류를 교류로 변환하는 장치. 무정전전원장치에서는 충전기(정전 시는 축전지)로부터 직류전원을 공급받아 정전압·정주파수의 교류로 변환하여 부하에 안정적인 전원을 공급하는 장치
- 정적절체스위치(Static Transfer Switch) : 인버터와 대체전원 간을 무정전으로

전환시키는 반도체 스위치를 이용한 절체장치의 총칭

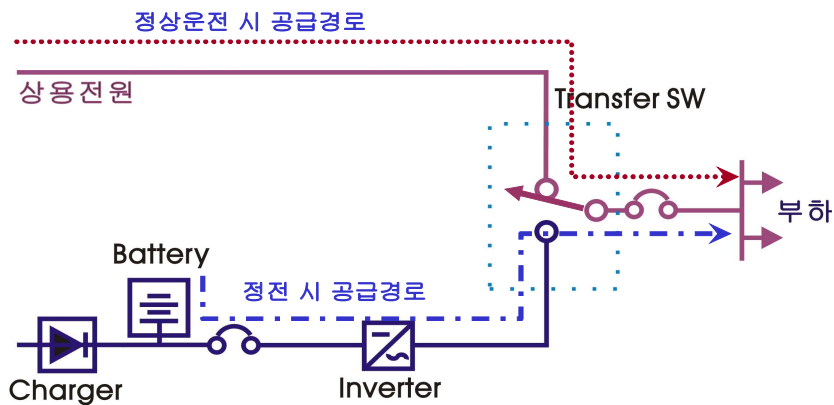
- 수동절체스위치(Manual Bypass Switch) : 무정전전원장치나 정적절체스위치를 정비하거나 시험을 위해 격리할 때 사용하는 수동조작 스위치. 원자력발전소에 서는 보수용우회스위치(Maintenance Bypass Switch)라고 부름.
- 조절변압기(Regulating Transformer) : 인버터 고장 시 또는 무정전전원장치에서 전원을 공급할 수 없을 때 임시로 부하에 전원을 공급하기 위해 설치된 대체전 원 측의 변압기로 일종의 자동전압조정 변압기임.

나. 무정전전원장치 구성방식

무정전전원장치는 설비의 기능이나 중요도, 신뢰성, 경제성 등을 고려하여 다양한 방식으로 구성된다. 여기에서는 무정전전원장치의 일반적인 구성방식과 원자력발전소에 적용되고 있는 구성방식들을 함께 살펴보고자 한다.

(1) 오프라인(Off Line) 무정전전원장치

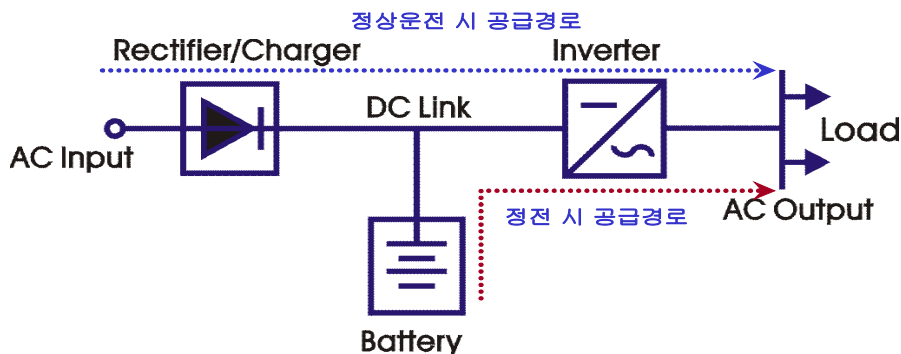
상용전원이 정상적으로 가압될 경우에는 직접 상용전원을 부하에 공급하고 있다가 정전 시에만 인버터를 통해 부하에 전원을 공급하는 방식으로 주로 서버 전용 등 소용량에 많이 사용되고 있다. 원자력발전소와 같은 중요부하에 대한 전원공급용으로는 사용되지 않고 있다. 다음 그림은 오프라인방식의 무정전전원장치의 구성을 보여주고 있다.



[그림 3-113] 오프라인 무정전전원장치

(2) 단일 무정전전원장치(Single UPS)

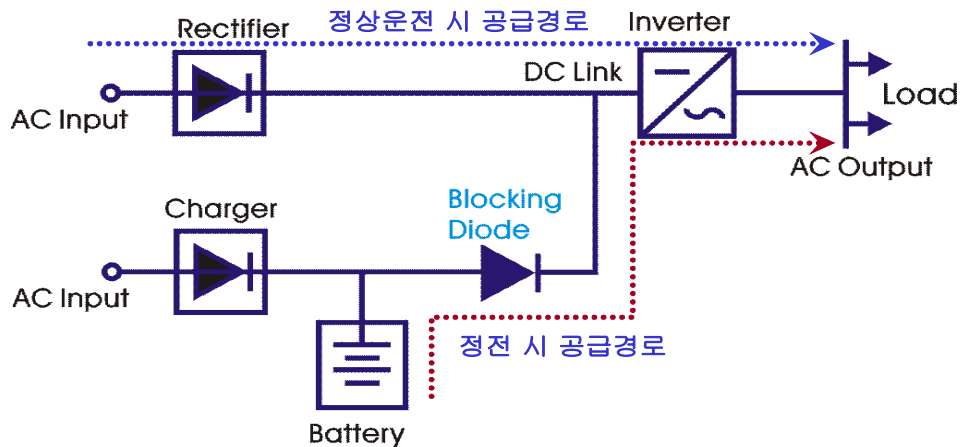
가장 기본적인 구성방식으로 외부전원이 정상적으로 가압된 상태에서도 무정전 전원장치를 통해 부하에 전원을 공급한다. 충전기와 정류기 기능을 함께하는 순변환부가 있고, 정상운전 중 축전지는 충전기에 의해 만충전상태를 유지한다. 외부전원이 상실되거나 과부하가 유기되면 축전지에 저장된 화학에너지를 전기에너지로 변환하여 부하에 공급한다. 다만 이 방식은 인버터가 고장이 발생할 경우 부하 측에 공급되는 전원이 차단되어 정전이 발생한다. 다음 그림은 단일 무정전전원장치의 구성도이다.



[그림 3-114] 단일 무정전전원장치

(3) 별도충전기형 무정전전원장치(Single UPS With Separated Charger)

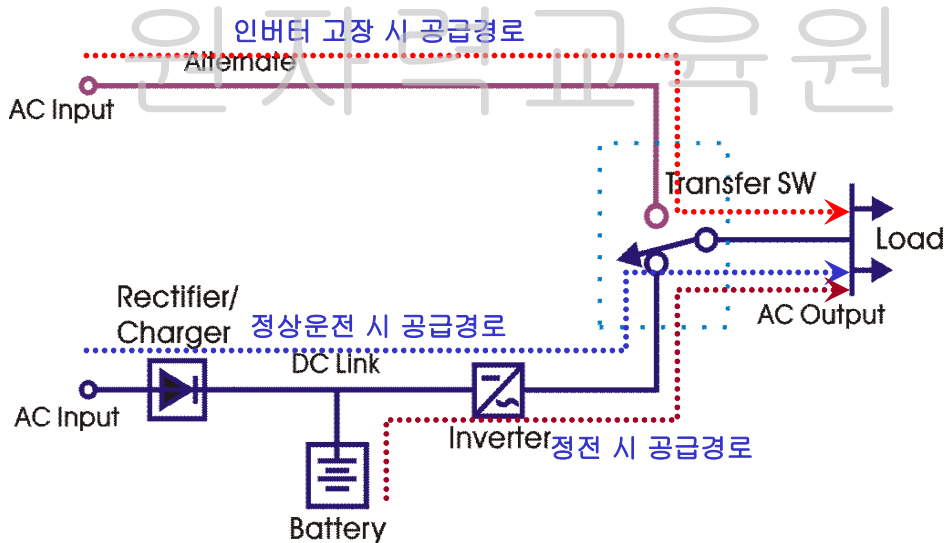
단일 무정전전원장치에서 충전기와 정류기 기능을 함께 하던 순변환부를 충전기와 정류기로 분리한 방식이다. 이 방식은 다음 그림과 같이 정류기(Rectifier)는 인버터 입력만을 공급하고, 축전지는 별도의 충전기에 의해서 충전하는 방식으로 정류기 출력이 축전지 쪽으로 공급되지 않도록 차단하는 차단다이오드(Blocking Diode)가 설치된다. 정상전원이 정전 시에는 충전된 축전지에서 부하에 전원을 공급하는 것은 단일무정전전원장치와 동일하다.



[그림 3-115] 충전기분리형 단일 무정전전원장치

(4) 대체전원형 무정전전원장치(Single UPS With Alternate Source)

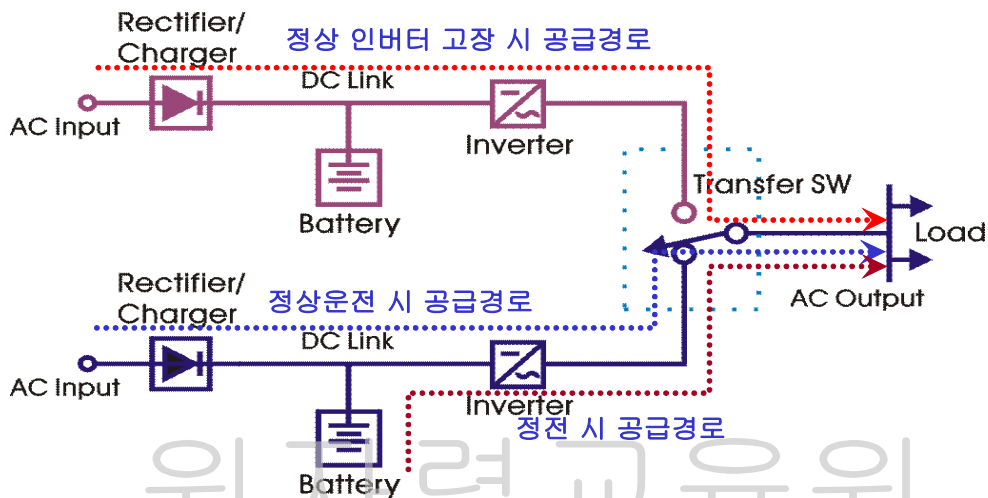
단일 무정전전원장치 방식의 단점인 인버터 고장 시 부하 측 정전을 보완하기 위해 대체전원을 설치하고, 인버터와 대체전원 간을 무정전으로 전환할 수 있는 스위치가 설치된 방식이다. 대체전원은 인버터 고장이나 시험 등과 같이 짧은 시간동안 무정전전원장치를 사용할 수 없을 경우 부하에 전원을 공급하는 역할을 수행한다.



[그림 1-116] 대체전원이 있는 단일 무정전전원장치

(5) 대기 다중형 무정전전원장치(Standby Redundant UPS)

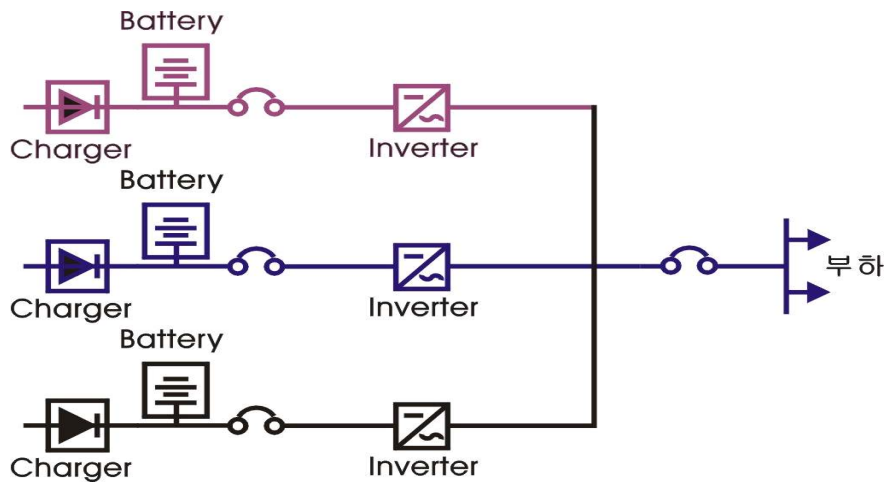
대기 다중형 무정전전원장치는 2대의 무정전전원장치를 다중으로 설치하여 정상운전 중인 무정전전원장치가 고장이 발생하면 대기 중인 무정전전원장치로 전환하여 전원을 공급하는 방식이다. 이 방식은 대체전원이 없이 양쪽이 모두 무정전전원장치이므로 한쪽 설비 고장 시에도 안정적인 전원을 부하에 공급할 수 있지만 반면 설비투자비가 많이 소요되고, 한쪽 설비는 정상운전 시 계속 무부하운전을 하고 있어야 하므로 효율이 저하되는 등의 문제점도 가지고 있다.



[그림 3-117] 대기 다중형 무정전전원장치

(6) 병렬운전형무정전전원장치(Parallel UPS)

병렬운전형무정전전원장치는 2대 이상의 무정전전원장치를 서로 동기시켜 병렬로 운전하는 방식이다. 울진 1발전소 비-전기1급 무정전전원장치에 적용되고 있는 방식으로, 예를 들면 각 50%의 용량을 가진 3개의 무정전전원장치를 병렬운전하면서 부하에 전원을 공급하다가 하나의 무정전전원장치가 고장 나면 해당 설비는 차단하고 나머지 2개의 설비로 100% 운전을 하는 방식이다.



[그림 3-118] 병렬운전형무정전전원장치

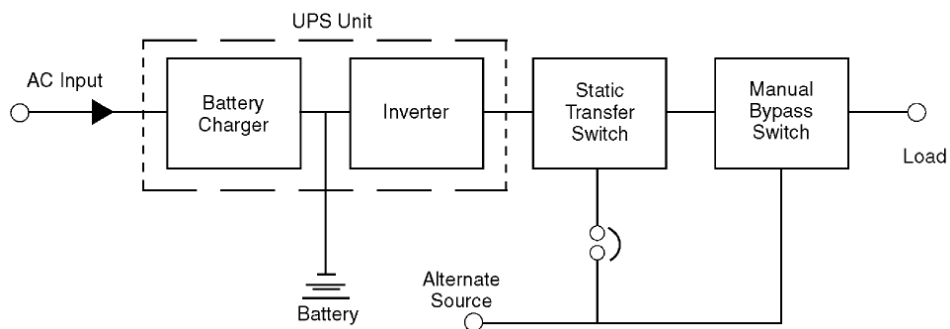
다. 원자력발전소 무정전전원장치 구성

원자력발전소에 설치된 무정전전원장치는 다음과 같은 주요 기기들로 구성된다.

- 축전지 충전기
- 인버터
- 축전지
- 정적절체스위치(Static transfer switch)
- 수동우회스위치(Manual bypass switch)
- 조절변압기(Regulating transformer)

아래 그림인 단일 부동방식 무정전전원장치는 원자력발전소에서 사용되는 전형적인 무정전전원장치의 구성방식 중 하나이다. 무정전전원장치는 상용전원으로부터의 교류를 축전지충전기를 이용하여 직류로 변환하고 이것을 다시 인버터를 이용하여 교류로 변환하는 이중 전력변환 계통으로 구성된다. 충전기는 축전지와 인버터에 직류 전력을 공급한다. 인버터 후단의 교류출력은 정적절체스위치와 수동우회스위치를 거쳐 부하에 공급된다. 정상운전 상태에서는 인버터 출력에서 부하에 전원을 공급한다. 만약 인버터 출력이 상실되거나 정상범위를 벗어난 경우에는 정적절체스위치가 동작하여 부하전원을 인버터에서 대체전원 측으로 전환 시킨다. 수동우회스witch는 기계적

인 차단-전-투입(Mechanical Make-before-break)스위치 구조로 되어 있어 동작 시 무정전으로 절체가 가능한데, 무정전전원장치를 정비하거나 시험하기 위해 계통으로부터 분리시키기 위해 사용된다. 축전지 충전기로의 교류입력이 상실된 경우에는 축전지에서 인버터를 거쳐 부하에 전원을 공급한다. 아래 그림과 같은 구성을 가진 무정전전원장치를 부동충전방식(Float Configuration)이라고 하는데, 이런 방식은 정상운전 중 축전지가 직류 분배모선에 상시 연결되어 부동(Float)충전상태를 유지하기 때문이다.



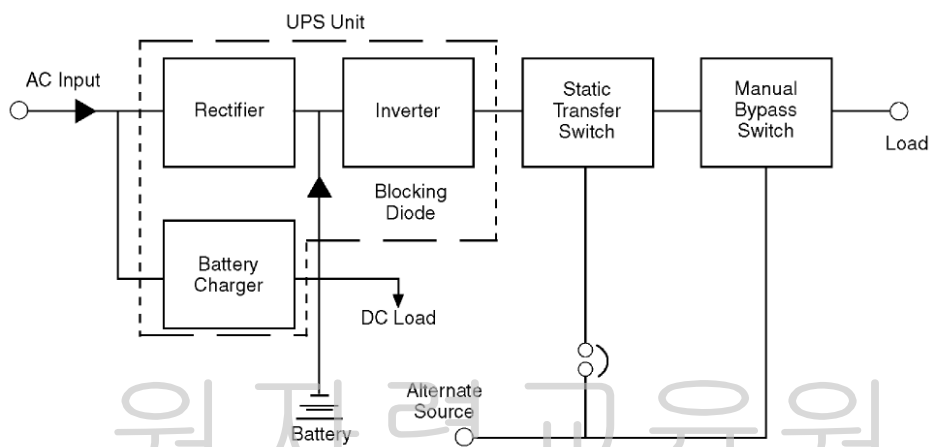
[그림 3-119] 단일 부동방식 무정전전원장치

이런 방식의 무정전전원장치는 축전지가 부동(Floating)상태를 유지하므로 축전지와 계통 사이에 절체를 위한 스위치가 필요 없다. 조절변압기는 대체전원 측 전압을 조절하여 부하에 공급한다.

사용용도에 따라 무정전전원장치의 구성방식이 달라지는데, 일부 무정전전원장치의 경우에는 위에서 살펴본 기본적인 구성 기기 중 하나 또는 그 이상의 기기가 포함되지 않을 수도 있다. 예를 들면, 무정전전원장치 중에는 수동우회스위치나 정적절체스위치 또는 2개의 스위치 모두를 설치하지 않을 수도 있다. 하지만 표준형 원자력발전소에서는 정적절체스위치와 보수용 우회스위치를 모두 갖춘 방식을 적용하고 있다.

아래 그림은 원자력발전소에서 사용되는 또 다른 타입의 무정전전원장치인데, 이 방식은 정류기형태(Rectifier Configuration)라고 부른다. 이 방식도 이중 전력변환 계통으로 구성되나, 축전지충전기 대신 정류기에서 인버터로 직류전력을 공급한다. 축전지 충전기는 축전지 충전 기능만을 수행한다. 여기서 정류기의 기능은 일부 정류기

가 전류제한 능력이나 출력전압 조절을 할 수 없는 것을 제외하고는 축전지충전기와 같다. 이 방식은 정류기와 축전지 사이에 차단다이오드(Blocking Diode)가 설치되어 정류기에서 축전지로 충전전류가 흐르지 못하도록 차단한다. 즉 정류기가 축전지 충전을 하지 못하도록 차단한다. 정류기는 주로 다이오드를 사용하여 정류회로를 구성하므로 출력 전압은 조절할 수 없다. 정류기방식은 일반적으로 주발전소 축전지(Main Station Battery)로부터 전원을 공급받는 무정전전원장치에 사용한다. 만약 무정전전원장치에 별도의 축전지(Dedicated Battery)가 설치되어 있는 경우에는 축전지 충전기도 설치하여야 한다.



[그림 3-120] 단일 정류기방식 무정전전원장치

라. 축전지충전기 / 정류기(Battery Charger / Rectifier)

축전지 충전기 또는 정류기는 교류를 직류로 변환하는 정류기능을 수행하는 반도체 브리지 회로가 중심이 된다. 브리지 회로에 사용되는 반도체로는 다이오드나 실리콘제어정류기(SCR)로 불리는 사이리스터가 사용된다. 충전기는 입력차단기, 입력변압기, 퓨즈, 제어회로, 필터회로로 구성된다. 충전기 입력차단기로는 일반적으로 배선용 차단기(MCCB : Molded Case Circuit Breaker)가 사용된다. 이 차단기는 충전기 전체에 대한 과전류보호 기능을 가지고 있지만, 교류전원으로부터 충전기를 격리시키는 것이 주 기능이다. 입력변압기(Isolation Transformer)는 충전기 입력 측의 계통 잡음에 의한 영향을 제한하고, 정류기 회로에 제한된 입력전압을 공급하는 기능을 한

다. 이 변압기는 1차와 2차권선 간에 특별한 차폐장치를 설치한다. 이 차폐물질은 선로 잡음 파형을 감소시키고, 이 선로 잡음이 변압기 1차에서 2차 측으로 전달되는 것을 저지하는 기능을 한다. 필터부분은 출력파형을 평탄화하고, 리플전압을 감소시키기 위한 인덕터와 커패시터 조합회로로 구성된다.

충전기를 통한 축전지의 충전방식에는 초충전, 부동충전, 균등충전이 있다. 이들에 대해 간단히 설명하면 다음과 같다.

- 초충전 : 축전지에 전해액을 붓고 처음으로 실시하는 충전으로 축전지의 극판을 황산납에서 해면상 납의 형태로 환원시키는 과정
- 부동충전 : 정류 장치의 직류 출력에 축전지와 부하를 병렬로 접속하고, 항상 축전지에 일정 전압(부동충전 전압)을 가하여 충전상태를 유지하고, 동시에 정류 장치로부터 부하에 전력을 공급하고, 정전 또는 부하 변동시에 차단 없이 축전지로부터 부하로 전력을 공급하는 충전 방식
- 균등충전 : 여러 개의 축전지를 1조로 하여 장시간 사용하고 있는 경우, 자기방전 등으로 발생하는 축전지의 충전상태의 불균등을 시정하여 충전상태를 균일하게 하기 위한 충전

발전소 무정전전원장치에 사용되는 충전기는 다음과 같은 3가지 형태로 분류할 수 있다.

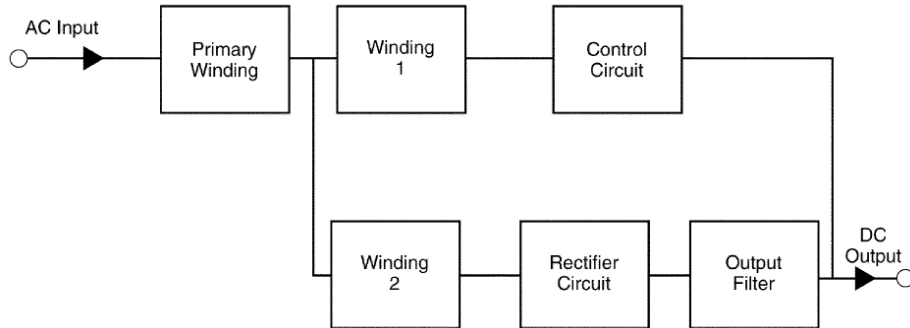
- 철공진변압기 방식(Ferroresonant Transformer Controlled Type)
- 자기증폭기 방식(Magnetic-amplifier Type)
- 실리콘제어정류기 브리지 방식(SCR Bridge Type)

위에서 언급한 3가지 방식에 대하여 간단히 설명하면 다음과 같다.

(1) 철공진변압기 방식

이 방식의 충전기는 아래 그림에서와 같이 정류기 입력에 일정한 전압을 공급하기 위해 철공진변압기를 사용한다. 이 변압기는 2개의 2차권선과 변압기 2차 전압을 피드백 받는 인덕터와 커패시터로 구성된 동조회로를 가지고 있다. 이 방식의 충전기는 출력전압과 전류의 맥류(Ripple)를 제한하기 위해 간단한 출력필터를 사용한다. 이 변압기는 입력 측 전류를 일정값 이하로 제한하고 충전기 브리지회로에 설계범위

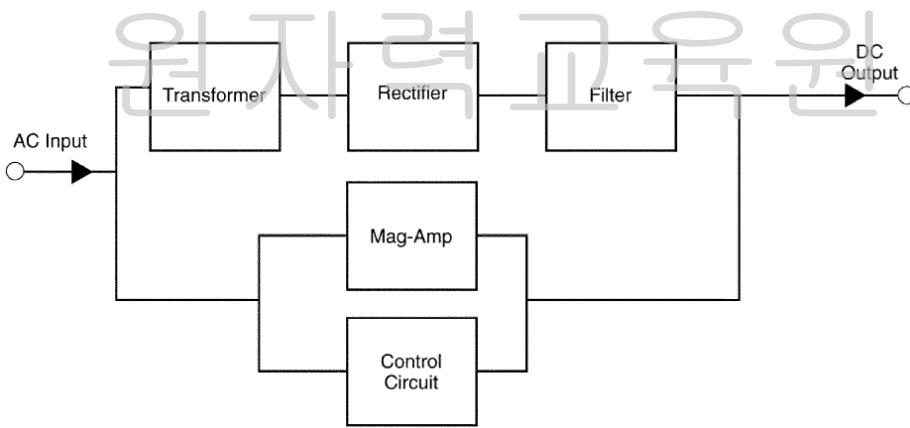
이내의 일정전압을 공급한다. 출력전압이 제한치에 도달하면 변압기는 더 이상 출력 전류를 공급하지 않으므로, 출력전압이 급격하게 감소하게 된다.



[그림 3-121] 철공진변압기방식 충전기/정류기

(2) 자기증폭기 방식 (Magnetic-Amplifier Type)

자기증폭기(mag-amp) 방식 충전기는 다음 그림과 같이 출력을 조절하기 위한 궤환회로(Feedback loop)를 구성하는 자기증폭기와 교류를 직류로 변환하는 정류기 방식 컨버터로 구성된다.



[그림 3-122] 자기-증폭기방식 충전기/정류기

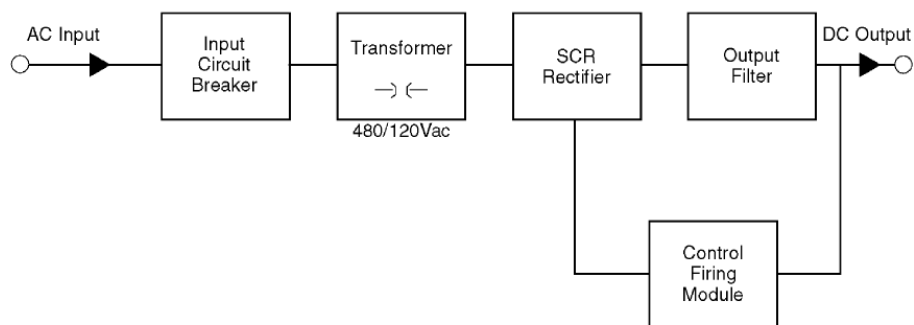
자기증폭기는 자기회로저항을 변화시켜 변압기 출력전압과 전류를 바꾸는 조절 가능한 인덕터이다. 이것은 정류기 출력으로부터 피드백 된 직류전압을 이용하여 리

액터의 포화를 조절함으로써 정류기에 교류입력을 제공한다.

(3) 실리콘제어정류기(SCR) 브리지방식

실리콘제어정류기 브리지방식 충전기에서는 다이오드 대신 실리콘제어정류기 브리지를 사용하여 정류를 시킨다. 출력전압은 실리콘제어정류기 점호신호(Firing Order)와 시퀀스는 발진기회로(Oscillator Circuit)를 사용하여 제어한다. 직류출력은 아래 그림에서와 같이 발진기회로를 거쳐 제어회로로 제한 되는데, 이 신호에 의해 전압과 전류를 제어하게 된다.

출력필터는 고조파와 맥류 전압을 제거하는 역할을 한다.



〔그림 3-123〕 실리콘제어정류기 브리지방식 충전기/정류기

마. 인버터(Inverter)

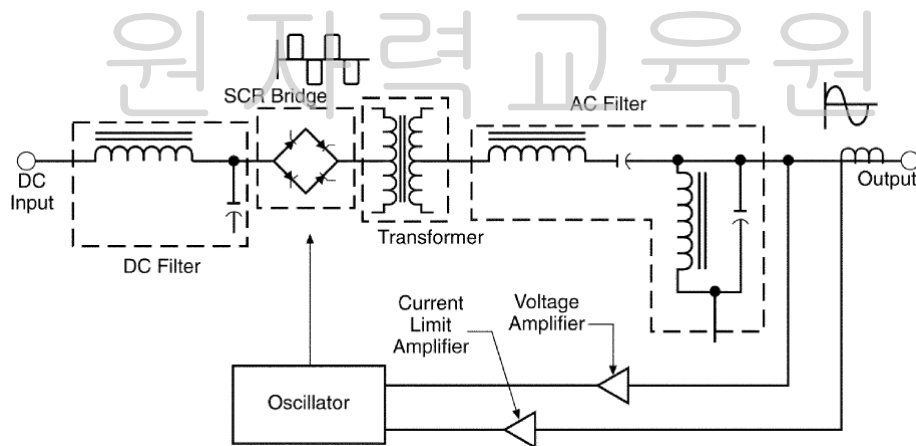
인버터도 핵심부분은 반도체브리지로 구성되는데 이 브리지회로를 이용하여 직류를 교류로 변환하는 역변환을 수행한다. 여기에 사용되는 반도체소자는 보통 실리콘제어정류기(SCR)나 절연게이트 바이폴라트랜지스터(IGBT)가 사용되는데, 이는 소자를 스위칭하기 위한 제어 능력과 내구성이 뛰어나기 때문이다. 전압변환 시 한 소자에서 다른 소자로 전환만 시켜주는 정류기와는 달리 인버터는 교류 사인파전원을 지속적으로 공급하기 위해 조합된 반도체소자 그룹들을 정확한 기간과 정확한 간격을 가지고 턴-온 및 턴-오프 시켜야 한다. 이것은 전류가 반도체소자 사이에서 신뢰성 있게 전환되어야 함을 의미한다. 원자력발전소에 적용 중인 인버터 형식은 다음과 같은 4가지가 있다.

- 준-구형파방식(Quasi-square Wave)
- 계단파형방식(Step Wave)
- 철공진방식(Ferroresonant)
- 펄스-폭 제어방식(Pulse-width Modulation Control)

이중 철공진형과 펄스-폭 제어방식이 1970년대 이후 설치된 무정전전원장치에 가장 많이 사용되고 있다. 인버터 타입에 상관없이 모든 인버터는 입력차단기, 반도체소자 브리지, 퓨즈, 제어회로, 맥류를 제한하는 입력 및 출력필터로 구성된다.

(1) 준-구형파방식(Quasi-Square Wave Type)

준-구형파방식 인버터는 사이리스터 브리지를 사용하는데, 사이리스터의 동작 시간(Firing Time)을 제어하는 제어회로를 통해 출력전압과 전류를 조절한다. 사이리스터 브리지에서 발생된 2개의 오프-셋 구형파 출력은 요구되는 전압으로 변환되고 이런 준-구형파가 연달아 발생된다. 인덕터와 커패시터로 구성된 출력필터는 고조파를 제거하거나 감소시킨다. 이 방식의 인버터는 고조파를 제한하기위해 복잡한 필터 회로를 필요로 한다. 이런 방식은 전동기 기동 시 돌입전류와 같은 짧은 기간의 과부하에 대해 전류제한 영역에 도달하지 않고 제어할 수 있다는 장점이 있다.

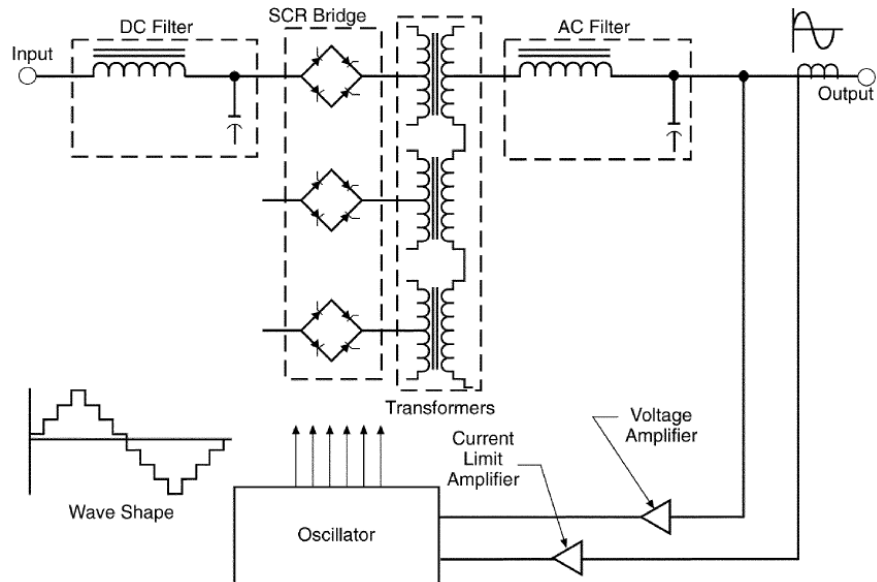


[그림 3-124] 준-구형파 인버터(Quasi-Square Wave Inverter)

(2) 계단파형방식(Step Wave Type)

계단파형 방식의 인버터는 준-구형파 방식 인버터의 변형형태 중 하나이다.

이 방식은 복잡한 필터회로를 필요로 하지 않으면서 준-구형파 방식의 장점을 그대로 가지고 있다. 다중 브리지 스위칭 회로를 사용하여 정현파에 근접한 계단형태의 파형을 연속적으로 발생시키므로 복잡한 필터회로를 필요로 하지 않게 된다. 브리지회로의 수를 증가시키면 인버터 출력 용량을 증가시킬 수 있다.



[그림 3-125] 계단파형방식 인버터

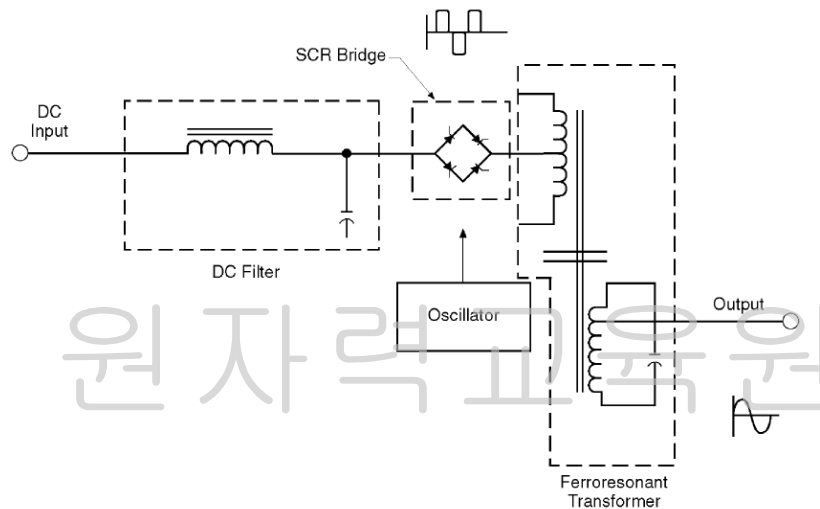
(3) 철공진 방식(Ferroresonant Type)

철공진형 인버터는 준-구형파 인버터와 비슷한 브리지와 발진기회로를 사용한다. 가장 큰 차이점은 철공진방식 인버터는 출력필터로 정전압변압기(CVT : Constant Voltage Transformer)라고도 불리는 철공진변압기를 사용한다. 이 정전압변압기는 고조파를 필터링하고, 전압을 제어하며, 과전류를 제한하는 기능을 한다. 이 방식 인버터는 출력제어가 브리지회로에 대한 피드백 회로 없이 이루어진다. 철공진방식은 출력전압과 전류가 철공진변압기의 설계전압 및 전류범위 이내로 조절된다.

일종의 정전압변압기인 철공진변압기는 설계용량에 해당하는 출력만을 제공하므로 전류제한장치라고 할 수 있다. 주파수가 일정하게 유지되는 경우 이것은 또한 전압조절회로라고 할 수 있다. 이런 원리로 철공진방식 인버터에서 출력제어는 전자

적이 아닌 마그네틱 제어에 의해 이루어진다. 그러므로 철공진방식 인버터는 간단한 전자제어회로와 제어카드(Circuit Boards)만으로도 제어가 가능하다. 반면 철공진방식 인버터는 다음과 같은 2가지 주요한 한계를 가지는데, 첫 번째는 50kVA보다 큰 용량의 인버터를 적용할 경우 초기 투자비가 높고, 두 번째는 과도상태에서 반응이 느리다는 것이다. 기타 한계점들을 다음과 같은 것이 있다.

- 현장에서 사용 중 출력전압 조절이 불가능
- 출력 파형 중 총 고조파함유율이 높음(5% 초과)
- 낮은 부하에서 효율이 낮음
- 때때로 동일 용량의 다른 방식에 비해 넓은 설치면적(footprint)이 필요함



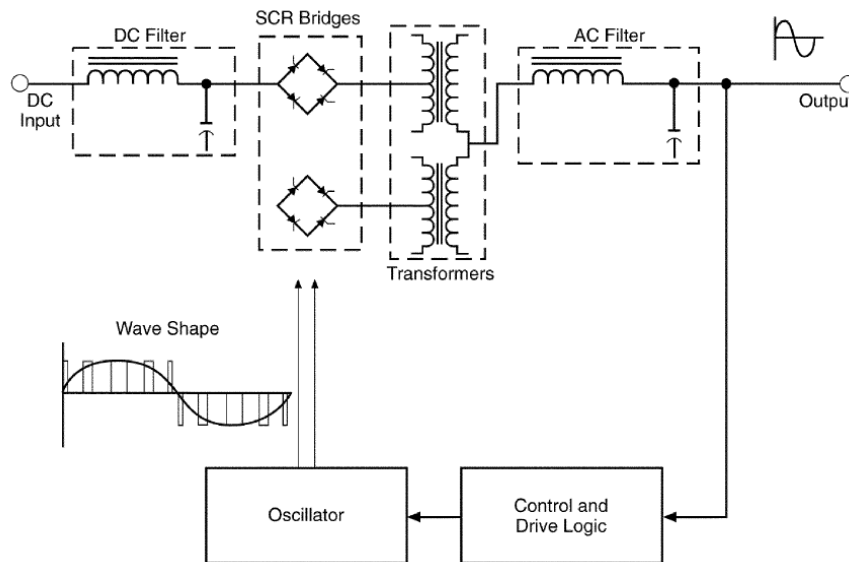
[그림 3-126] 철공진방식 인버터

과거 고리3,4와 영광1,2호기와 같은 웨스팅하우스 타입의 원자력발전소 안전등급 인버터들이 이런 철공진방식 인버터를 사용하였으나 최근에는 이런 인버터들이 펄스폭제어 방식으로 교체되고 있다.

(4) 펄스폭제어 방식(PWM Type)

펄스폭제어방식 인버터(PWM Inverter)는 높이는 같으나 다양한 폭을 가지는 일련의 구형파를 만들기 위해 다중 정류기브리지를 사용한다. 이 구형파의 주파수는 600

또는 1,200Hz이다. 복잡한 피드백 회로가 출력을 제어하는데 이것은 정현파형에 근접한 다양한 폭을 가지는 일련의 구형파를 제어하기 위한 것이다. 발진기(Oscillator)는 인버터의 주파수를 제어한다. 반도체소자 브리지는 교류파형의 각 반주기마다 턴-온과 턴-오프를 무수히 반복한다.



(그림 3-127) 펄스폭제어방식 인버터(PWM Type Inverter)

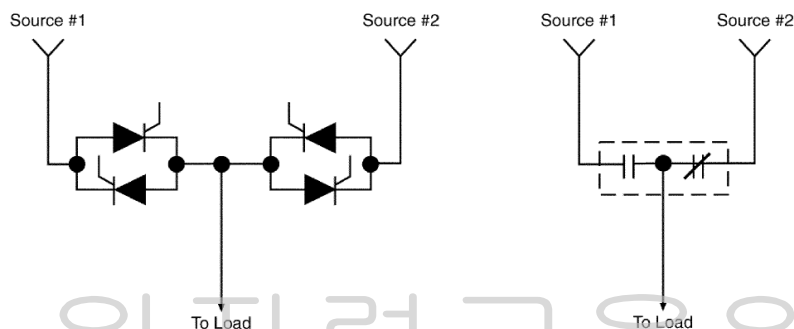
이 방식의 인버터는 펄스 반복률을 제어함으로써 제20차 고조파와 그 이상 차수의 고조파를 제한할 수 있다. 따라서 이 방식의 인버터는 다른 방식 인버터에 비해 필터회로가 간단하고 작아지게 된다. 펄스폭제어방식 인버터의 최적설계는 필터의 크기, 전력변환률에 해당하는 효율, 반도체소자의 운전변수(턴-온 및 턴-오프 시간 등)와 같은 몇 가지 항목들이 어떻게 균형을 이루느냐에 의해 결정된다. 전력전자 스위칭 소자의 가장 중요한 특성 중 하나는 과전류제한 능력이다. 그러므로 피드백제어계통은 인버터에 과부하가 걸리거나 고장 상태에서 인버터 출력전압을 감소시킴으로써 인버터 출력전류를 안전한 값으로 제한한다.

펄스폭제어방식 인버터는 전력용반도체 소자 브리지회로를 여러 개 연결하여 사용함으로써 매우 큰 용량의 인버터를 설계할 수 있다. 또 다른 장점으로 빠른 과도상태 응답특성이 있다. 반면 주요한 취약점으로는 설계가 매우 복잡하고, 아주 많

은 전자제어회로와 제어카드를 필요로 한다.

바. 절체스위치(Transfer Switch)

현재 원자력발전소에 설치된 대부분의 무정전전원장치는 정적절체스위치를 포함하고 있다. 정적절체스위치의 기능은 하나의 전원공급원과 또 다른 전원공급원 사이에 전원을 절체할 때 끊어짐 없는 절체를 함으로써 부하 측에 무정전전원을 공급하는 것이다. 부하절체는 인버터나 정류기의 고장이나 계통정비 시에 필요하다. 전동기 기동이나 부하 측 고장 등과 같이 큰 전류를 필요로 하는 경우 인버터가 전류제한 범위에 들어가는 것을 방지하기 위해 절체스위치가 짧은 기간 대체전원 측으로 부하를 절체시키는 경우도 있다.



[그림 3-128] 사이리스터를 이용한 정적절체스위치

위 그림과 같이 일반적인 정적절체스witch는 전자적인 차단-전-투입(Make before-break)스위치인데 보통 병렬 연결된 2개의 사이리스터로 구성된다. 정적절체스위치 용 사이리스터는 인버터 측 사이리스터 스위치가 오프(Off)되기 전에 대체전원 측 사이리스터가 먼저 온(On)되어 부하 측에 전원의 끊어짐 없이 무정전절체가 이루어진다. 정적절체스witch는 부하전류, 전압, 브리지 출력파형을 감시하는 회로를 포함하는데 이런 변수들은 보통 브리지회로 출력 측에서 측정한다. 일반적으로 인버터에서 대체전원 측으로 전원을 절체시키는 조건은 다음과 같은 4가지 경우이다.

- 인버터 고장(Inverter Failure)
- 인버터 출력전압 비정상(Inverter Output Voltage High or Low)

- 인버터 과부하(Inverter Overload)
- 수동(Manual)

또한 절체 시 절체속도는 교류파형 1주기(Cycle)의 $\frac{1}{4}$ 이내 이어야 한다. 즉 60 Hz를 기준으로 하면 4.17ms이내에 절체되어야 한다. 비동기절체에 의한 부하 측에서의 상 회전(상 불일치)을 방지하기 위해 정적절체스위치는 2개 전원 간의 위상차가 5° 이내 일 때에만 절체 된다. 만약 동기가 만족이 되지 않은 상태에서 인버터가 기능을 상실할 경우에는 인버터 측 사이리스터 스위치를 먼저 오프(Off)시키고, 대체전원 측 사이리스터를 온(On)시키도록 절체회로를 구성하여야 한다. 또한 대체전원 측으로 절체된 상태에서 인버터 출력이 정상으로 복구되면 절체스위치는 다시 인버터 측으로 자동으로 무정전 절체된다.

그 밖에 계통전체의 신뢰성 향상 측면에서 정적절체스위치를 사용하는 또 다른 큰 이점은 정적절체스위치를 사용함으로써 부하 측에서 순간적으로 큰 전류를 필요로 하는 경우 대체전원 측으로 자동절체 시켜 대체전원이 단시간 동안 이 전류를 공급하는 역할을 할 수 있다는 것이다. 이런 특징으로 인해 인버터와 충전기/정류기는 과도한 안전기능수행을 위한 용량이 아닌 적정용량으로 설계가 가능하고 또한 무정전전원 장치를 더 효율적으로 운전할 수 있다.

사. 조절변압기(Regulating Transformer)

조절변압기는 대체전원 측에 설치되어 인버터에서 전원을 공급할 수 없을 경우에 부하에 전원을 공급하는 역할을 한다. 조절변압기는 2개의 보상권선(Compensating Windings)을 가진 특별히 설계된 변압기를 사용한다. 하나의 보상권선은 다른 하나가 입력전압을 감소시키는 쪽으로 작용하는 동안 입력전압을 증가시키는 작용을 한다. 철공진변압기와 비슷하게 조절변압기는 특별하게 조립된 철심(Iron Core)을 가지고 있다. 이 철심의 포화준위는 전자 피드백 제어회로에 의해 제어할 수 있다. 철심의 포화준위를 제어하는 것과 보상권선의 작용에 의해 입력전압의 변화를 보상하여 거의 일정한 출력전압을 공급한다. 그렇지만 조절변압기는 공급주파수를 제어할 수 없고, 입력전압이 상실된 경우에는 출력전압도 공급할 수 없게 된다.

3. 표준형 원자력발전소 무정전전원장치

앞에서 살펴 본 바와 같이 표준형 원자력발전소에는 다양한 종류의 무정전전원장치가 적용되어 있다. 그 중에서 필수부하에 전원을 공급하는 표준형 원자력발전소 필수모션전원공급계통(VBPSS : Vital Bus Power Supply System)에 대한 간단한 설계 사양에 대하여 살펴보고자 한다.

가. 기기 설계 사양

표준형 원자력발전소 필수모션전원공급계통 인버터는 울진3,4호기부터 국산화가 진행되어 울진5,6호기까지 국산 인버터가 설치되었다. 울진3,4호기의 필수모션전원공급계통 인버터에 대한 기본적인 설계 사양은 다음 표와 같다.

〈표 3-7〉 울진3,4호기 필수모션전원공급계통 인버터 사양

구 분	C-1E 40kVA	Non-1E 60kVA	Non-1E 75kVA
수 량	4대/ Unit	2대/ Unit	1대/ Unit
DC Input Volt	105~140VDC	105~140VDC	210~280VDC
DC Input Current	357~476A	536~714A	324~446A
Bypass Input Volt	120VAC $\pm$ 2%	120VAC $\pm$ 2%	120/208VAC
Bypass Input Current	400(120% FLC)	600(120% FLC)	250(120% FLC)
AC Output Volt	120VAC $\pm$ 2%	120VAC $\pm$ 2%	120/208VAC $\pm$ 2%
AC Output Frequency	60 $\pm$ 0.5Hz	60 $\pm$ 0.5Hz	60 $\pm$ 0.5Hz
Power Factor	0.8 Lag	0.8 Lag	0.8 Lag
Phase	1	1	3
Ambient Temp.	10 ~ 40℃	10 ~ 40℃	10 ~ 40℃
제 작 사	국제전기	국제전기	국제전기

나. 울진3,4호기 VBPSS 인버터 개요

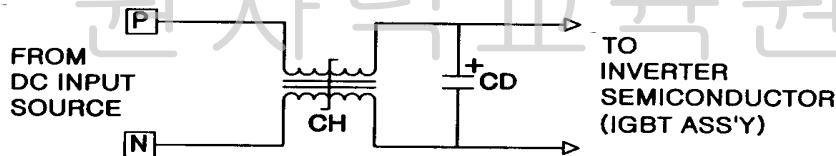
인버터(Inverter)는 전력용 반도체 소자의 스위칭작용을 이용하여 직류전압을 원하는 크기의 교류 출력전압으로 변환하는 장치를 말한다. 울진3,4호기의 인버터는 다음과 같은 세부적인 부분으로 구성되어 있다.

- 입력필터(Input Filter)
- 주 스위칭 회로(Power Switching Circuit : Inverter Bridge)
- 출력필터(Output Filter)
- 자동절체스위치(Automatic Transfer Switch)
- 보수용 우회스위치(Maintenance Bypass Switch)
- 분배패널(Distribution Panel)

인버터를 구성하고 있는 각 구성부분에 대해 간단하게 설명하면 다음과 같다.

(1) 입력필터(Input Filter)

인버터 입력필터는 직류 충전기나 축전지로부터 입력되는 직류에 포함된 맥류(Ripple)를 제거하는 기능을 수행하는 직류 리액터와 커패시터 조합회로이다. 아래 그림에서 'CH'는 직류 리액터이고, 'CD'는 직류 커패시터이다.

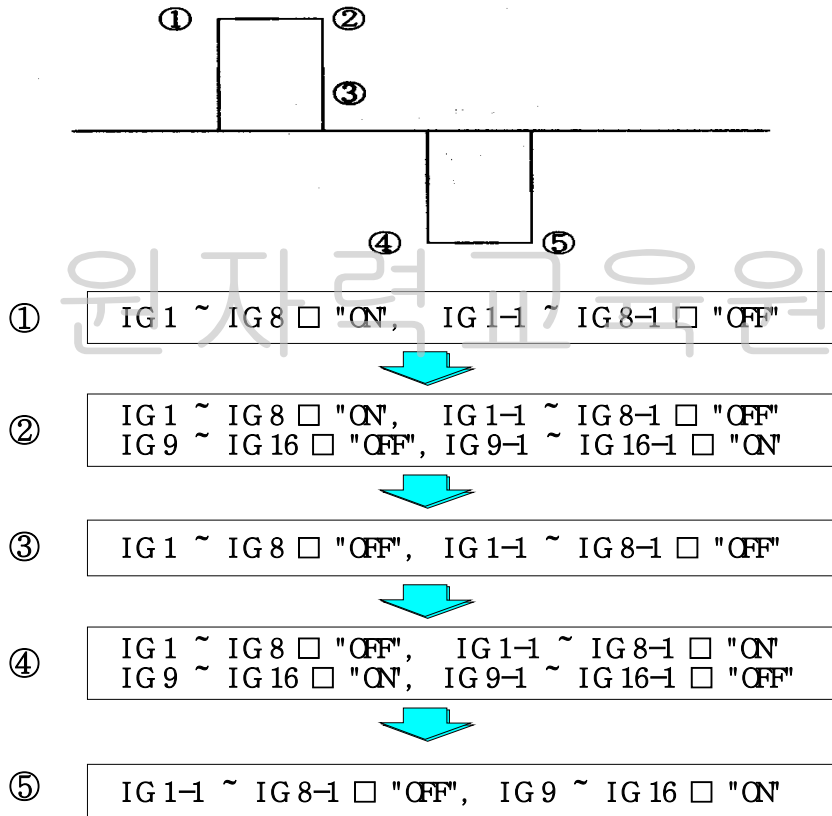
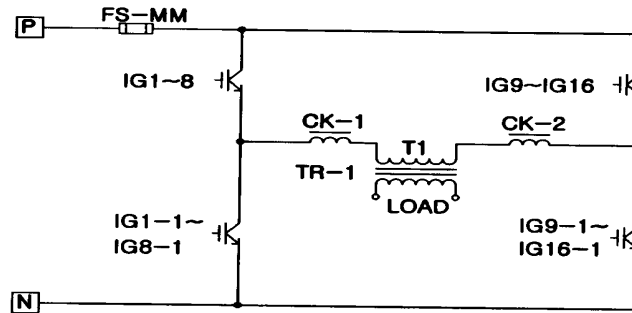


[그림 3-129] 인버터 입력필터

(2) 주 스위칭 회로

주 스위칭 회로는 전력용 반도체소자로 구성된 브리지 회로형태이다. 이 부분은 인버터의 주 회로부분인데, 아래 그림에서와 같이 절연게이트 양극성트랜지스터(IGBT) 그룹이 온-오프 스위칭을 반복하여 직류입력을 방형파(Square Wave)출력으로 변환한다. 예전에는 전력용반도체 소자로 사이리스터를 주로 사용하였으나, 울진 3,4호기부터 절연게이트 양극성트랜지스터가 주 소자로 사용되고 있다. 아래 그림은

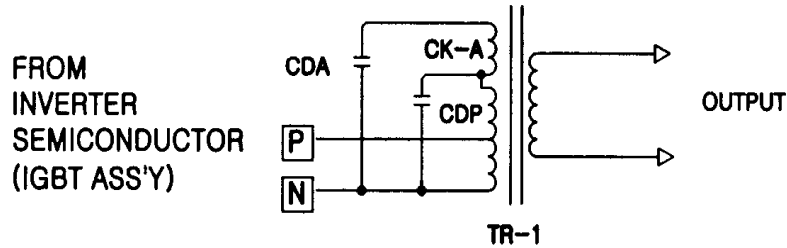
인버터 주 스위칭 회로와 회로의 동작특성을 간단하게 나타낸 것이다. 아래 그림에서 'IG 1~16-1'까지는 절연게이트 양극성트랜지스터이고, 'CK-1, CK-2'는 교류 리액터, 'TR-1'은 인버터 출력변압기이다.



[그림 3-130] 인버터 주 스위칭 회로와 동작원리

(3) 출력필터(Output Filter)

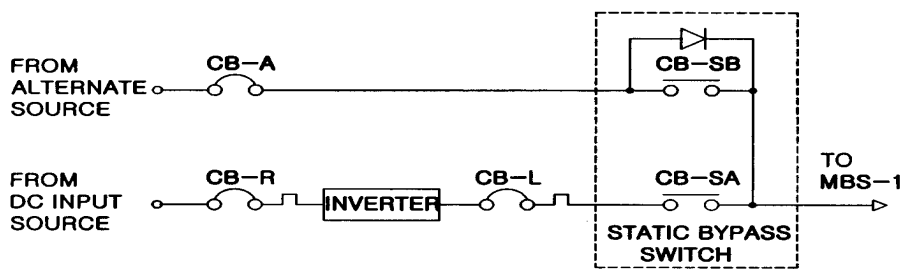
인버터 출력필터는 인버터 출력에 포함된 고조파를 제한하여 총 고조파 함유율은 기준파형의 실효치 대비 5%이내, 단일 고조파는 3% 이내로 제한하는 기능을 수행한다. 아래 그림에서 'CK-A'는 교류 리액터이고, 'CDA, CDP'는 교류 커패시터, 'TR-1'은 인버터 출력변압기 이다.



[그림 3-131] 인버터 출력필터

(4) 자동절체스위치(Automatic Transfer Switch)

자동절체스witch는 인버터와 대체전원 간을 무정전으로 절체하는 스위치이다. 현재 국내 원자력발전소에는 정적으로 동작하는 반도체스위치 방식(Fully Electro Switch Type)과 반도체스위치와 전자접촉기 또는 반도체스위치와 배전용차단기를 조합한 조합형식(Hybrid Type)이 적용되어 있다. 을진3,4호기의 경우에는 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 반도체스위치와 배전용차단기를 조합한 조합형 방식이 설치되어 있다.



[그림 3-132] 조합형 자동절체스위치

자동절체스위치가 인버터에서 대체전원 측으로 전원을 자동절체 시키는 신호로는 다음과 같은 것들이 있다.

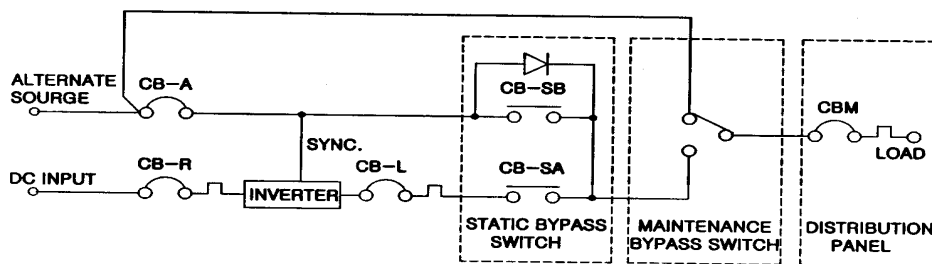
- 인버터 출력 고전압(Output Over Voltage)
- 인버터 출력 부족전압(Output Under Voltage)
- 인버터 고장(Inverter Failure)
- 인버터 과부하(Overload)

인버터에서 부하에 전원을 공급하고 있는 상태에서 대체전원(Alternate Source) 측으로 무정전으로 절체되는 프로세스는 다음과 같다.

- 절체신호 발생 ⇒ SCR 스위치 턴-온 ⇒ 배선용차단기 CB-SA 개방 ⇒ 배선용차단기 CB-SB 투입 ⇒ SCR 스위치 오프(Off)

(5) 보수용 우회스위치(Maintenance By-Pass Switch)

보수용 우회스위치는 인버터나 자동절체스위치를 정비하거나 시험이 필요할 때 인버터와 자동절체스위치를 계통으로부터 격리시키기 위해 사용한다. 보수용 우회스위치는 운전원에 의해 수동으로 조작하는 스위치이기 때문에 절체 시 동기를 확인하는 기능이 없기 때문에 인버터에서 대체전원으로 절체 시에는 반드시 자동절체스위치를 이용하여 인버터에서 대체전원 측으로 절체 한 후에 보수용 우회스위치를 이용하여 인버터와 자동절체스위치를 격리하여야 한다. 반대로 대체전원 측에서 인버터로 절체 시킬 경우에는 보수용 우회스위치를 먼저 인버터 측으로 절체한 후 대체전원에서 인버터로의 최종적인 전원절체는 자동절체스위치를 이용하여 수행한다.



[그림 3-133] 보수용 우회스위치 단선도

보수용 우회스위치는 기계적인 차단-전-투입(Make-Before-Break)접점을 사용하여 무정전으로 절체가 가능하다.

(6) 분배패널(Distribution Panel)

분배패널은 인버터에서 전원을 공급하는 각 부하에 전원을 분배하는 기능을 수행한다. 각 분배패널에는 부하별 배선용 차단기와 보호용 퓨즈가 설치되어 있다. 울진3,4호기 전기1급 인버터 분배패널은 각 분배패널 당 42개의 분기회로로 구성되어 있고, 각 분기회로에는 배선용 차단기와 보호용 퓨즈가 설치되어 있다.

원자력교육원

[핵심요약]

1. 무정전전원장치 : 상용전원 또는 예비전원의 각종 장애(전압변동, 순간정전, 정전, 주파수변동, Surge, Flicker)가 발생하더라도 부하 측에 무정전, 정전압, 정주파수의 안정된 양질의 교류전력을 공급하는 전원장치
2. 무정전전원장치 구성기기
 - 충전기 : 교류전원을 직류로 변환시켜 축전지를 충전시킴과 동시에 인버터에 직류전원을 공급하는 정류장치
 - 축전지 (Battery) : 전기에너지를 화학에너지로 변환하여 저장하였다가 필요할 때 다시 전기에너지로 변환하여 사용하는 장치
 - 인버터(Inverter) : 반도체소자의 스위칭을 이용하여 직류를 교류로 변환하는 장치
 - 정적절체스위치(Static Transfer Switch) : 인버터와 대체전원 간을 무정전으로 전환시키는 반도체 스위치를 이용한 절체장치의 총칭
 - 수동절체스위치(Manual Bypass Switch) : 무정전전원장치나 정적절체스위치를 정비하거나 시험을 위해 격리할 때 사용하는 수동조작 스위치. 원자력발전소에서는 보수용우회스위치(Maintenance Bypass Switch)라고 부름.
 - 조절변압기(Regulating Transformer) : 인버터 고장 시 또는 무정전전원장치에서 전원을 공급할 수 없을 때 임시로 부하에 전원을 공급하기 위해 설치된 대체전원 측의 변압기로 일종의 자동전압조정 변압기임.
3. 축전지 충전방식
 - 초충전 : 축전지에 전해액을 붓고 처음으로 실시하는 충전으로 축전지의 극판을 황산납에서 해면상 납의 형태로 환원시키는 과정
 - 부동충전 : 정류 장치의 직류 출력에 축전지와 부하를 병렬로 접속하고, 항상 축전지에 일정 전압(부동충전 전압)을 가하여 충전상태를 유지하고, 동시에 정류 장치로부터 부하에 전력을 공급하고, 정전 또는 부하 변동 시에 차단 없이 축전지로부터 부하로 전력을 공급하는 충전 방식
 - 균등충전 : 여러 개의 축전지를 1조로 하여 장시간 사용하고 있는 경우, 자기방전 등으로 발생하는 축전지의 충전상태의 불균등을 시정하여 충전상태를 균일하게 하기 위한 충전

(다음 장에 계속)

[핵심요약]

4. 무정전전원장치 운전모드

- 소내외 전원 정상운전 시 : 4.16kV 스위치기어 ⇒ 480V 부하반(Load Center)
⇒ 충전기 ⇒ 인버터 ⇒ 정적절체스위치 ⇒ 보수용 우회스위치 ⇒ 부하
- 소내외 전원 상실 시 : 축전지 ⇒ 인버터 ⇒ 정적절체스위치 ⇒ 보수용 우회스
위치 ⇒ 부하
- 인버터 고장 시 : 4.16kV 스위치기어 ⇒ 480V 부하반(Load Center) ⇒ 480V 전
동기제어반(MCC) ⇒ 조절변압기 ⇒ 정적절체스위치 ⇒ 보수용 우회스위치 ⇒
부하

원자력교육원

제7절 비상디젤발전기

[학습목표]

1. 비상디젤발전기의 기능 및 설계기준, 그리고 운전기능에 대해 알 수 있다.
2. 비상디젤발전기의 회전력을 제공하는 디젤엔진의 원리와 주요기기에 대해 알 수 있다.
3. 엔진관련 보조계통 중 고온냉각수계통, 저온냉각수계통, 윤활유계통에 대해 알 수 있다.
4. 비상디젤발전기의 보조계통 중 기동공기계통, 연소용 공기 및 엔진배기계통, 연료유 계통에 대해 알 수 있다.
5. 비상디젤발전기 기동 및 정지, 부하탈락 및 재 투입에 대해 알 수 있다.

1. 개요

가. 기능

- (1) 원자로 출력 운전중 외부전원 상실사고(LOOP)시나, 안전주입신호(SIAS)와 외부전원 상실사고(LOOP)가 동시에 발생하더라도 원자로를 확실하게 정지시키는 안전관련 부하에 전원을 공급한다.
- (2) NUREG 0737에 의거, 운전원의 판단에 의해 비안전등급 부하에도 전원을 공급한다.

나. 설계기준

- (1) 비상발전기 기동신호 발생후 10초 이내에 정격전압($4160 \pm 416\text{VAC}$), 정격주파수($60 \pm 1.2\text{Hz}$)에 도달해야 한다.
- (2) 공학적 안전설비 작동신호(SIAS, AFAS, CSAS) 발생시 자동기동 되어야 한다.
- (3) 부하 재 투입시 2초 이내에 속도는 98% (58.7Hz) 전압은 90% (3744VAC)

이상 유지되어야 한다.

- (4) 부하투입 및 차단시 주파수는 95%, 전압은 75% 이하가 되어서는 안된다.
- (5) 전부하 상실시 비상디젤 발전기 속도는 과속도 트립 설정치까지 도달되어서는 안된다.
- (6) 중복성 및 물리적, 전기적 독립성이 유지되어 단일기기사고가 일어난다 하더라도 안전전력 계통의 고유기능 수행에는 방해를 받지 않아야 한다.
- (7) 내진 설계 및 주기적 시험이 가능해야 한다.
- (8) 2대의 디젤발전기 각각의 보조계통도 상호 독립적이어야 한다.

다. 운전 기능

- (1) 소외전원 상실시 안전등급 모션 저전압 계전기 동작에 의해 비상발전 기 (그림1참조)가 기동되며 정상전원 차단기가 차단되고, 비상발전기 전압 및 주파수가 정상에 도달되면 출력차단기가 투입되고 부하재투입 (Load Sequence) 순서에 따라 필수부하가 자동 기동된다.(붙임1.참조)
- (2) 공학적 안전설비 작동신호 발생 시 비상디젤발전기는 자동 기동되나 정상 교류 전원이 이용 가능하면 (LOOP 없을시) 안전모션에 연결되지 않고 단지 무부하 운전된다.
- (3) 소외전원상시 및 공학적 안전설비 작동신호 (SIAS, AFAS, CSAS) 동시 발생 시 부하투입 순서는 소외전원 상실과 동일하나 재투입되는 부하는 동일하지 않다.
- (4) 디젤발전기가 비상운전모드로 운전시 대부분의 정지신호는 우회되고 단지, 수동비상정지(주제어실, 현장), 엔진과속도, 발전기 차동계전기, 정지레버 (Stop Lever)에 의해서만 디젤발전기 정지된다.

라. 계통구성

- (1) 각 계열별로 D/G가 있으며 이들은 IEEE-279 및 384에 따라 물리적/전기적으로 격리되어 있다.

(2) 각 D/G가 연속정격 7000kW로서 1대의 엔진에 의해 구동되는 Single Type 발전기이다.

(3) 각 발전기당 아래와 같은 보조설비가 있다.

- (가) 저온 냉각수 계통(LT Cooling Water System)
- (나) 고온 냉각수 계통(HT Cooling Water System)
- (다) 윤활유 계통(Lube Oil System)
- (라) 기동용 공기계통(Starting Air System)
- (마) 연료유 계통(Fuel Oil System)
- (바) 연소용 공기 및 배기 가스계통(Combustion Air Exhaust Gas System)

2. 기기 사양

가. 엔진(Engine)

Equipment No.	3/4-591-M-DG01A/B
Quantity	Two(2) per unit
Model No.	SEMT PIELSTICK Type(16 PC 2.5V)
Max. Brake HP	7300 kW/Engine
No. of Cylinders	16/engine
Type of Fuel NO.	2 Diesel Fuel Oil
Design Code Diesel	Association Standard Practice

나. 발전기(Generator)

Equipment NO.	3/4-591-M-DG01A/B
Manufacturer	GEC ALSTHOM
Type	Diesel engine driven, horizontal open type self cooled, Model Rp 51AY 14 P
Quantity	Two(2) per unit
Continuous Rating	7000 kW

Short time Rating	7700 kW
Speed	514.3 rpm
Power Factor	0.8
Voltage	4160V
Overall Efficiency	97.0%
Voltage	4160V : 삭제
Insulation Class	F

다. 여자기

Manufacturer	GEC ALSTHOM
Type	RK90. 20.24D, static with terminal
Rating	45.3 kW
Rated Voltage	62V

라. 접지 설비

(1) 변압기

Manufacturer	BC
Type(Catalog No.)	Indoor-self cooled dry type(432,489)
Continuous Rating	15 KVA
Voltage Rating	4160V/120-240 V
Insulation Class	F
Temperature Rise	90°C

(2) 저항

Manufacturer	METAL DEPLOVE
Type	GRIDEXU
Rating	2.67 Ω

3. 운전모드

모든 상태에서도 D/G는 운전 대기상태를 유지해야 하며 이때의 D/G는 정상 대기 모드(Normal Standby Mode)라 한다. 소외 전원상실, 격납용기 살수 동작신호(CSAS), 안전주입 작동신호(SIAS), 보조급수 작동신호(AFAS)에 의해 “Active Mode”로 자동 전환한다.

가. 정상운전

D/G의 정상운전에는 두 가지 모드가 있는데 이는 “Active”와 “Standby” 모드이다. Active 모드는 D/G가 운전중인 상태를 나타내며, 대기모드란 D/G계통이 고온 대기상태로 유지되면서 즉시 Active 모드로 운전될 수 있는 준비상태를 말한다. 따라서 대기모드에서는 모든 스위치가 “자동(Automatic)” 위치에 있어야 하며, D/G 기동신호가 발생되면 즉시 기동할 수 있다.

(1) 대기모드(Standby Mode)

- (가) 발전소에 사고가 발생했을 때 디젤발전기가 즉시 기동하여 비상전원을 공급할 수 있는 상태를 말하며, 디젤발전기가 비상 기동하여 부하운전을 할 때 열응력에 의한 엔진손상을 방지하기 위하여 대기운전 상태에 있을 때 고온의 물을 엔진 블록에 계속해서 순환시켜 준다.
- (나) 각 엔진은 독립적인 예열 계통을 가지고 있으며, 엔진 정지 시에는 냉각수 계통이 예열 계통으로 이용되고, 냉각수는 침수형 전열기에 의해서 가열되어 전동기 구동 순환펌프에 의해서 엔진 각 부위로 순환된다.
- (다) 냉각수 온도가 고-설정치가 되면 온도 스위치가 동작하여 전열기용 전원차단기가 차단되고, 저-설정치가 되면 온도 스위치가 동작하여 차단기가 투입된다. 냉각수 보충은 순수(Demi Water) 계통에서 공급된다. 디젤엔진 기동시 엔진 마모를 방지하기 위하여 엔진이 대기 운전상태에 있을 때 윤활유를 엔진 블록 등 각 부위로 보내 계속해서 윤활 작용을 하며, 윤활유는 냉각수/윤활유 열교환기 및 예비윤활 펌프에 의해서 일정한 온도를 유지한다.
- (라) 압축기 기동 및 정지는 공기저장조에 설치된 압력스위치에 의해서 자동 조절되며 저장조 압력이 저-설정치 이하가 되면 자동 기동되고 고-설정치가

되면 자동 정지된다. 압축기가 정지되면 압축기의 배기 밸브가 열리며 남아 있는 공기를 배기 시켜 준다.

(마) 연료주입기(Fuel Injector)는 일일탱크로부터 중력에 의해서 충유 되어 있다.

(2) 기동(Start-up) 및 운전(Operation)

(가) 엔진 기동신호가 발생하면 동시에 기동용 공기 솔레노이드 밸브와 연소용 공기 솔레노이드 밸브가 개방되어 엔진 구동형 공기분배기에 의해서 제어되는 공기 파이프 밸브에 공기가 공급되며 이 공기는 각 엔진 실린더에 보내진다.

(나) 주기시험(Periodic Test) 및 발전소 정상 운전상태 하에서 Reg. Guide 1.108 및 IEEE 387에 의거한 부하분담 시험을 위해 주제어실 또는 현장에서의 기동 및 정지가 가능하도록 선택 스위치가 있다.

(다) D/G가 기동되면 예열 및 예비 순환 계통이 정지되고 D/G가 정지되면 재기동 된다. D/G가 기동되면 디젤발전기실의 고 체적 흡입 및 배기 팬과 두 개의 연료유 이송 펌프가 자동 기동된다.

나. 비정상 및 비상운전

(1) 소외 전원상실(LOOP)에 의한 저전압 계전기 동작, SIAS, CSAS, AFAS 신호에 의해 D/G는 자동으로 기동된다.

(2) 소외 전원상실에 의한 D/G 기동 시에는 대기변압기로 연결된 안전모선 인입용 차단기가 자동 개방되어 D/G에 의한 안전모선의 자동 가압이 가능하게 한다.

(3) SIAS, CSAS, AFAS와 같은 공학적 안전설비 작동신호에 의한 D/G는 대기운전상태로 지속 운전된다.

(4) D/G차단기가 투입되면 자동부하투입(Load Sequencing)이 이루어진다.

(5) 소외전원이 투입되면 안전모선을 소외 전원으로부터 역가압 시키고 D/G와 병렬 운전을 한다. 다음에 D/G 출력차단기를 수동 개방하고 D/G를 수동 정지시킨다.

- (6) D/G는 주제어실에서 비상기동(Emergency Operation)” 푸시버튼에 의한 비상운전이 가능하며, 현장에서는 수동기동과 정지가 가능하다.
- (7) 비상운전 상태에서는 수동 비상정지, 엔진과속도, 발전기 차동계전기 동작 신호 이외의 트립 신호는 자동 우회되며, 정지신호는 2분 동안 지속된다.

4. 보조계통운전

가. 엔진(Engine) 관련 계통

(1) 고온 냉각수 계통(HT Cooling Water System)

고온 냉각수계통은 엔진 및 T/Charger에서 발생된 열을 기기냉각수계통(CCW)에 의해 냉각시키는 폐회로이다.(붙임 2 참조)

- 1대 engine driven pump
- 2대 turbocharger, 1개 thermostatic valve
- 1대 HT/CC water heat exchanger
- 1대 expansion tank, 1대 preheating water pump
- 1대 electric heater,
- 1대 HT/lube oil heat exchanger

(가) 대기모드

대기모드에서 예열수 순환펌프(Preheating Water Cir. P/P)는 연속적으로 운전된다. 이 펌프의 흡입원은 엔진 냉각수 출구 배관이며 전열기 쪽으로 배출된다. 전열기는 물의 온도가 63℃ 이하이면 비 가압되고, 55℃ 에 도달하면 가압된다. 전열기로부터 나온 예열수는 윤활유 열교환기로 유입되고 엔진 실린더 블럭 냉각수 입구배관으로 흐른다. 역시 고온 냉각수 계통의 팽창탱크도 용수 처리된 순수에 의해 적정수위를 유지해야 한다. 역지밸브(Check V/V) 설치로 기존 냉각라인 유로를 차단한다.

(나) 운전모드

- 엔진 구동형 고온 냉각수 펌프에 의해 냉각수가 실린더 블럭으로 유입되어 실린더 라이너 및 헤드를 냉각시킨다.

- 각수 일부분은 T/Charger의 냉각챔버(Cooling Chamber)로 순환
- 열동형 밸브는 서로 다른 유로간의 유량을 조절함으로써 냉각수의 온도를 조절
- 95℃ 이상 시 열동형 밸브에 의해 HT/CC water 열교환기로 유로가 전환
- 물의 온도가 95℃ 이하이면 유로는 두 방향 (물의 온도에 비례하는 각 유로 별 유량형성)
- 고온 냉각수 팽창탱크는 펌프 입구에 연결되어 있어 냉각수의 팽창 및 연속 배기가 가능하도록 되어 있다. 각 기기들의 사양은 아래와 같다.

－ 고온 냉각수 열교환기

Equipment NO.	3/4-591-M-HE03A/B
Design Pressure	6.12/10.2 (Shell/Tube, kg/cm ²)
Design Temperature	110/75 (Shell/Tube, °C)
Design Code	ASME Sec. III Class 3& TEMA Class "C"
Type	BEM
Surface Area/Shell	67.1m ²
Quantity	Two(2) per unit

－ 예열 고온수 순환펌프

Equipment No.	3/4-591-M-PP01A/B
Quantity	Two(2) per unit
Capacity	12m ³ /hr at 3.06kg/cm ²
Design Code	ASME Section III

－ 예열 고온수 전열기

Equipment No.	3/4-591-M-HT01A/B
---------------	-------------------

Quantity	Two(2) per unit
Capacity	140/90 kW
	(Rating/Operating)

(2) 저온 냉각수 계통(Low Temp. Cooling Water System,)

저온 냉각수 계통은 Super charging air, 엔진 윤활유(Lube Oil)계통 및 HT water system에서 발생하는 열을 기기냉각수(CCW)에 의해 냉각시키는 계통이다.(붙임 3. 참조)

- 1대 engine driven pump
- 2대 super charging air cooler
- 1대 LT water expansion tank
- 1대 LT/CC water heat exchanger
- 1대 Lube Oil/LT water heat exchanger
- 1대 thermostatic valve

(가) 대기모드(Standby Mode)

저온 냉각수계통은 대기모드에서는 운전되지 않는다. 대기모드에서 팽창탱크는 충수 되어 있고, 팽창탱크의 충수밸브를 경유하여 전단탱크로부터 용수 처리된 순수가 수동으로 공급되고 보충수는 순수보충계통에 의해 공급된다.

(나) 운전모드(Active Mode)

엔진구동형 저온 냉각수 펌프에 의해 윤활유 냉각기 튜브측에 냉각수를 공급하여 윤활유를 냉각시킨다. 냉각수는 기기냉각수(CCW) 열교환기를 통해 냉각시킨 후 다시 엔진구동형 저온 냉각수 펌프 흡입원으로 제공된다.

한편 2대의 Super charging air cooler의 튜브측에 기기냉각수(CCW)를 공급하여 Super charging air를 냉각시킨다. 펌프 입구 측에 설치된 팽창탱크는 냉각수의 팽창흡수와 계통의 연속배기가 가능하도록 한다. 저온 냉각수계통의 열교환기 및 팽창탱크의 사양은 다음과 같다.

- 저온 열교환기

Equipment NO. 3/4-591-M-HE02A/B

Design Pressure	6.12/10.2
.....	(Shell/Tube, kg/cm ²)
Design Temperature	95/75
.....	(Shell/Tube, °C)
Design Code	ASME Sec. III Class
.....	3& TEMA
.....	Class "C"
Type	BEM
Tube Thickness	ψ15.87 × 1.24mm
Surface Area/Shell	130m ²
Quantity	Two(2) per unit
○ 팽창탱크	
Equipment No.	3/4-591-M-TK01A/B,
	TK10A/B
Design Temperature	110°C

(3) 윤활유계통 (Lube Oil System)

윤활유계통은 폐회로로서 각 엔진부품에 윤활유를 공급, 순환시키고 저온 냉각수계통에 의해 윤활유가 냉각된다.(붙임 4. 참조)

- 1대 engine driven lube oil pump
- 2대 lube oil heat exchanger
 - 1개 Lube Oil/LT WTR heat exchanger
 - 1개 Lube Oil/HT WTR heat exchanger
- 1대 thermostatic valve / oil filter / makeup Tank
- 1대 motor driven pre-lube oil pump

(가) 대기모드

대기상태에서는 예비윤활유 펌프(Pre-lube Pump)가 계속 운전되며 이 펌프

에 의해 윤활유가 집수조(Sump)로부터 윤활유 열교환기의 동체측을 거쳐 엔진의 윤활계통으로 유입된다. 윤활유는 열교환기의 튜브측을 흐르는 예열된 고온수에 의해 가열된다.

(나) 운전모드

1대의 엔진 구동형 윤활유 펌프는 각각 집수조로부터 흡입을 취하며, 윤활유 열교환기의 동체측으로 흐른다. 열교환기에는 우회배관이 설치되어 있으며, 열교환기 후단에는 3-유로 열동형 밸브가 설치되어 있다. 이 밸브는 열교환기 통과 및 우회유량을 조절하며 윤활 온도를 52.8℃로 유지시킨다. 열동형 밸브를 통과한 윤활유는 후단 여과기를 거쳐 엔진의 각 윤활개소를 경유한 후 집수조에 저장된다. 예비 윤활유 펌프 및 윤활유 탱크 사양은 아래와 같다.

○ 예비윤활유 펌프

Equipment No.	3/4-591-M-PP01A/B
Quantity	Two(2) per unit
Capacity	20m ³ /hr
Type	Rotary Gear
Design Code	ASME Section III
Motor Data	
A. Rating	≤15kW
B. Rated Voltage/Frequency	460 VAC/60 Hz

○ 윤활유 탱크

Equipment No.	3/4-591-M-TK30A/B
Design Pressure	4.5kg/cm ²
Design Temperature	65.6℃
Volume	3.104m ³
Design Code	ASME Sec. VIII
Quantity	Two (2) per unit

(4) 기동 공기계통(Starting Air System)

기동 공기계통은 엔진을 기동하기 위한 압축공기를 공급 및 제어하여 엔진실린더 내부에 공급한다. 각각의 엔진에는 다중성 및 독립성이 보장된 기동용 공기계통 (Subsystem A, B)이 엔진에 연결되어 있다.(붙임 5. 참조)

- 각 subsystem은 1개 compressor, air dryer, air receiver, air filter, air cooler
- 2 starting air receiver에서 common header 및 starting air frame을 통하여 2 air distributer에 유입
- 각 subsystem으로 엔진 기동 가능

(가) 대기모드

공기 압축기에 의해 압축된 공기가 생성되면 공기건조기에서 건조시켜 공기수급기에 저장된다. 공기압축기는 압력 스위치에 의해 자동으로 제어되며, 공기압이 36.71kg/cm² 이하이면 공기압축기가 자동으로 기동되고, 40.79kg/cm²에 도달하면 자동으로 정지된다.

(나) 운전모드

엔진 기동신호가 발생되면 압축공기가 공기분배기로 공급된다.

각 공기분배기와 실린더의 기동용 공기밸브는 엔진에 압축공기를 주입하여 엔진이 기동하기에 충분한 초기 회전력을 제공한다.

엔진이 기동하는 동안 기동용 공기는 빠른 속도로 윤활유를 압축시켜 조속기 (Governor)를 가압하며 엔진이 운전되고 있는 동안 조속기의 윤활유 압력은 엔진 구동형 펌프에 의해 유지된다. 엔진이 운전되고 있는 동안 기동 공기계통은 엔진 정지잭 (Stop Jack)이 동작될 수 있도록 압축공기를 공급하며, 엔진 과속도시 연료유를 차단시킬 수 있도록 한다. 공기압축기 및 공기수급기의 사양은 아래와 같다.

- 공기 압축기

Equipment No.	3/4-591-M-CM01A/B, CM2A/B
Quantity	Four (4) per unit
Capacity	1.75 STD m ³ /min
Max. dischare Pressure	42bar

No. of Stage	3
Cooling Type	Air Cooled
Motor Data	
A. Rating	26 kW
B. Rated Voltage/Frequency	460 VAC/60 Hz
C. Speed	1770 rpm
○ 기동용 공기수급기	
Equipment No.	3/4-591-M-TK40A/B, TK41A/B
Design Pressure	50bar
Design Temperature	65.6°C
Volume	2m ³
Design Code	ASME Sec.III Class 3
Quantity	Four(4) per unit

(5) 연소용 공기 및 엔진 배기계통

연소용 공기계통 및 엔진 배기계통은 엔진이 운전중일 경우에만 동작, 운전된다. 연소용 공기는 엔진 기동신호에 의해 팬이 동작되고 외부의 청정공기가 D/G실로 유입되어 엔진에 공급된다. 연소용 공기는 공기 여과기를 거쳐 T/Charger에 의해 압축되고 이 고압의 연소용 공기는 공기 냉각기의 동체측을 거치면서 냉각된 후 각 실린더에 공급된다. 한편 실린더 헤드로부터 방출된 배기가스는 T/Charger의 터빈구동부로 유입되어 T/Charger 공기 압축기의 구동력을 제공한다. 엔진의 양쪽에서 배출된 배기가스는 모관에서 합쳐져 배기관을 거쳐 소음기(Silencer)를 통과한 후 대기로 방출된다.(붙임 7. 참조)

(6) 연료유계통(Fuel Oil System)

(가) 연료유계통은 연료유를 일일탱크(Day Tank)로부터 엔진의 연료 주입기로 공급한다. 이 계통은 엔진 구동형 연료유 공급펌프, 오일 여과기, 연료유 주입펌프(Fuel Oil Infector), 전동기 구동형 연료유 공급펌프로 구성되어 있다.(붙임 6. 참조)

(나) 연료유계통은 대기상태에서는 운전되지 않으며 운전모드에서 연료유는 일일 탱크로부터 엔진구동형 연료유 공급펌프를 거쳐 여과기로 이송된다. 여과기를 통과한 연료유 주입펌프 및 주입기를 거쳐 실린더로 분사된다. 주입기 및 이송펌프에서 발생한 누유로 연료유 압력이 저하될 경우에는 전동기 구동형 연료유 공급펌프가 자동으로 기동되어 압력을 상승시킨다.

(다) 전동기 구동 대기펌프의 사양은 아래와 같다.

○ 예비 연료유 펌프

Equipment No.	3/4-591-M-PP22A/B
Quantity	two(2) per unit
Capacity	3.6m ³ /hr
Motor Data	
A. Horsepower Rating	≤5 kW
B. Rated Voltage/Frequency	460 VAC/60 hz

나. 발전기 계통(Generator System)

발전기는 수평형 공기냉각방식의 동기 발전기이다.

회전계자, 고정전기자 형으로서 계자전류를 조정하여 D/G 출력전압이 가변되고 발전기는 위험한 과열상태만 없다면 정격전압에서 110% 과부하로 2시간 운전이 가능하다. 초기여자(Field Flashing)는 발전기 끝에 설치된 영구자석으로부터 전원을 공급받아 이루어지며, 이는 짧은 시간 내에 부하를 감당할 수 있는 여건을 제공해준다. 무부하 상태에서는 출력전류가 없으므로 발전기 단자 전압만이 궤환요소를 작용하며, 출력운전 중에는 전압 및 전류가 궤환요소로 작용한다. 요구되는 부하량 및 전압값에 따라 정류회로 내 SCR의 도통시간(Turn-On-Time)이 제어된다.

전압 조정기는 자동전압 조정기와 수동전압 조정기가 있는데, 자동전압조정기는 아주 민감한 감지용 변압기와 전자회로로 이루어져 있어 대용량 부하 변화 시에 매우 안정되고 빠른 속도로 전압을 회복, 유지시켜 준다. 또한 부하탈락 시 전압상승이 과도하게 이루어지지 않도록 하는 장치가 있으며, 운전중 발전기 전압을 변화시켰더라도 D/G 정지 시 최초의 설정치로 복귀되도록 함으로써 다음 기동 시 정격전압이 발생되

도록 한다. 물론 이 설정치는 필요에 따라 조정할 수 있다. 발전기에는 중성점 변압기가 설치되어 있어 저항을 통해 접지 되어 있고, 발전기 고정자 코일에도 습분 응축 방지용 보조전열기(480V AC, 3kW)가 설치되어 있다.

다. 진동 격리장치(Vibration Isolation System)

진동격리 장치는 동적인 힘을 감소시키고 구조물로의 진동전달을 감소시키기 위해 스프링 격리장치로 되어 있다. 이 설비는 스프링, 감쇠기(Damper), 내진물, 유연한 연결장치 등으로 구성되어 있다.

5. D/G 운전제어 및 감시

가. 제어 스위치

(1) 주제어실 스위치

제어 스위치	기 능
Emerg Start/Stop, 푸시버튼	E. Start : 수동으로 D/G를 비상기동 E. Stop : 수동으로 D/G를 비상정지
Governor Speed Control	무부하 상태에서 D/G의 주파수(속도) 제어기능 • Raise : 주파수(속도)증가 • Lower : 주파수(속도)감소
Governor Load Control	계통병입(병렬운전) 상태에서 D/G 출력 제어가능 (Droop Mode 자동 선택됨) •Raise : 출력 증가 •Lower : 출력 감소
Output Voltage Adjust	무부하 및 계통병입 상태에서 발전기 전압제어 기능 •Raise : 전압 증가 •Lower : 전압 감소

(2) 현장제어 스위치

(가) 디젤엔진은 현장제어 패널에서 절환스위치를 “Local” 위치로 선택한 후 현장에서 수동기동/정지가 가능하다.

(나) 현장제어 패널에 설치된 제어스위치는 아래와 같다.

나. 계측설비

(1) 발전기 감시용 계측설비(주제어실)

(2) 경보(주제어실)

(3) 발전기 제어패널 계측설비

(4) 현장 엔진 제어패널 계측설비

(가) 온도 지시

(나) 온도 경보 스위치

(다) 압력 경보 스위치

(라) 수위 및 유위 경보 스위치

(마) 진단감시 및 표시설비

(DMDS : Diagnostic Monitoring and Display System)

각 디젤 발전기에는 한대의 진단감시 및 표시설비(DMDS)가 부착되어 있으며, 이는 디젤발전기가 최대의 운전가능성과 신뢰성을 확보하도록 설계되어 있다. 진단감시 및 표시설비(DMDS)의 주요기능은 다음과 같으며 현장 제어패널에 설치되어 있다.

- 디젤발전기 경보의 감시 및 기록
- 기동상황 검증
- 기동시퀀스 감시 및 실패여부 확인
- 비상 및 정상운전 절차를 수행하는데 도움
- 디젤발전기 고장원인 분석
- 디젤발전기 예방점검

다. 보호 계전기

(1) 차동 계전기

(가) 주제어실에 경보 제공

(나) 디젤발전기 공급차단기 정지

(다) 디젤발전기 엔진정지

(2) 역전력 계전기

- (가) 주제어실 경보 제공
- (나) 디젤발전기 공급차단기 정지
- (다) 디젤발전기 엔진 정지

(3) 계자상실 계전기

- (가) 주제어실에 경보제공
- (나) 디젤발전기 공급차단기 정지
- (다) 디젤발전기 엔진정지

(4) 저주파수 계전기

(5) 상 불균형 계전기

(6) 접지과전압 계전기

- (가) 주제어실에 경보제공
- (나) 디젤발전기 공급차단기 정지
- (다) 디젤발전기 엔진정지

(7) 과전류 계전기

- (가) 주제어실에 경보제공
- (나) 디젤발전기 공급차단기 정지
- (다) 디젤발전기 엔진정지

(8) 과전압 계전기

라. 디젤발전기(D/G) 트립신호

(1) 정상운전 모드

(2) 비상 운전 모드

비상디젤이 비상운전 모드로 운전되고 있을 때 대부분의 정지신호는 우회되고 다음의 신호에만 정지된다.

- 수동 비상정지(주제어실, 현장)

- 엔진 과속도
- 발전기 차동 계전기
- 정지 레버 (Stop Lever)



[그림 3-134] 표준형 원전 디젤발전기



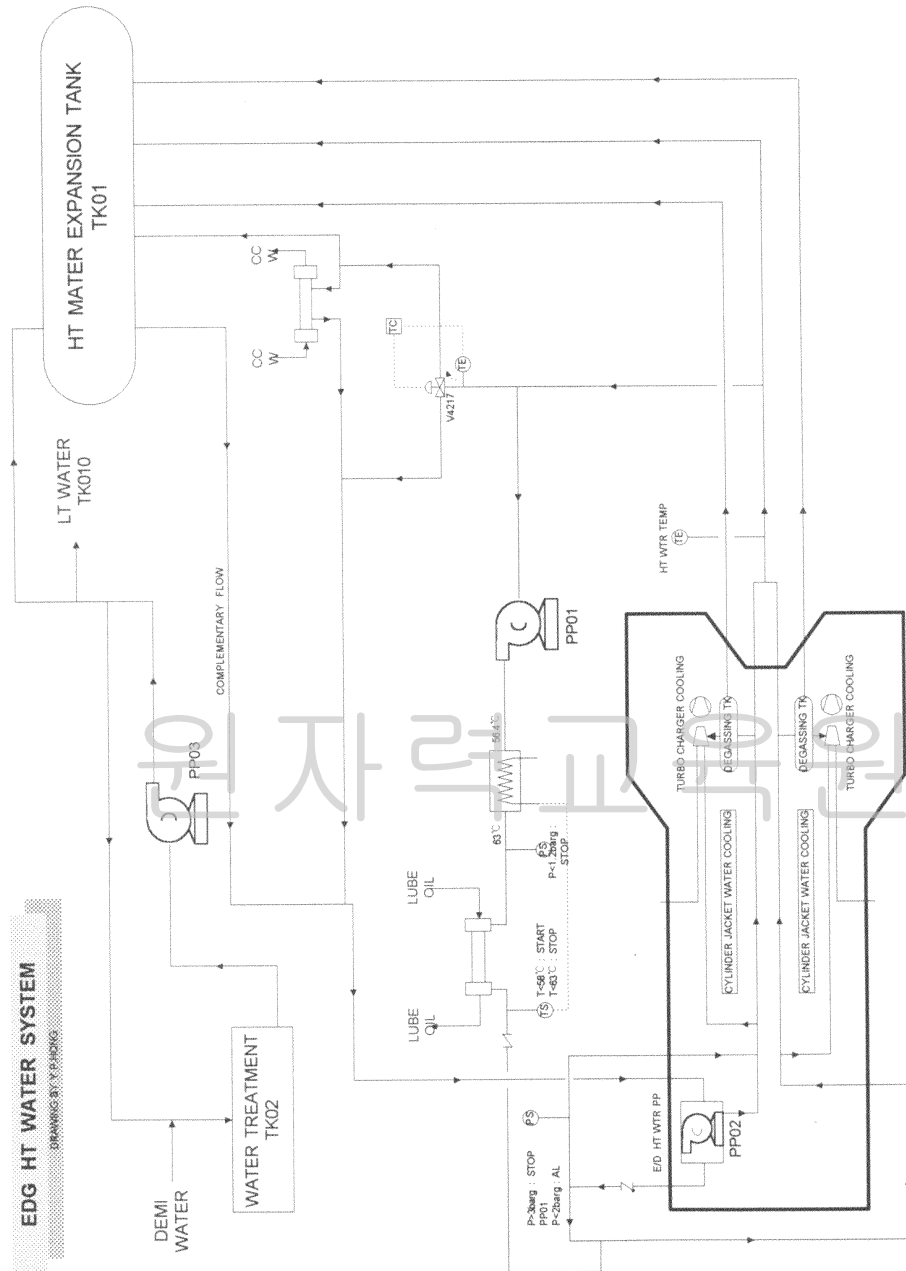
[그림 3-135] 비상디젤발전기 현장 제어반

붙임 1. 비상디젤발전기 부하분배 순서

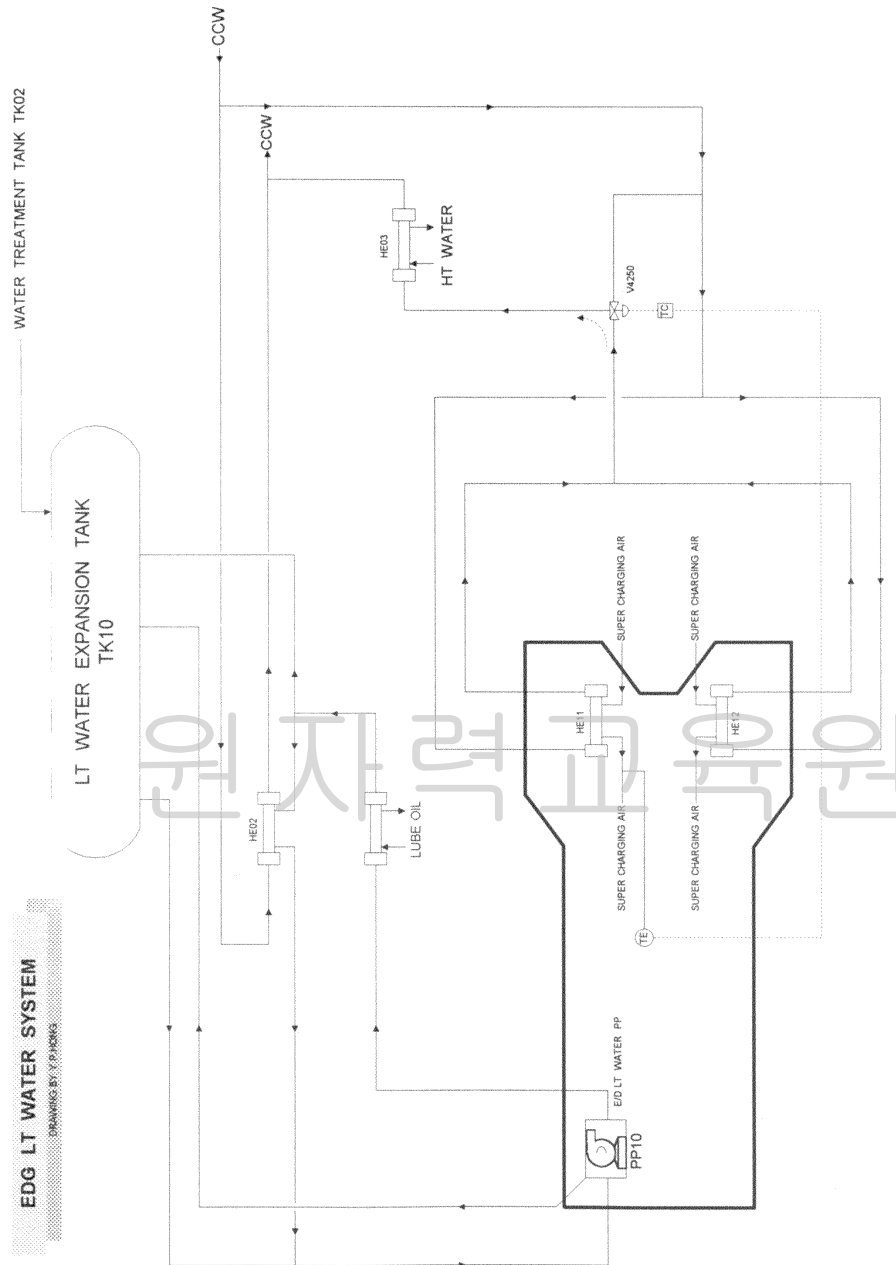
Stop	Time	Equipment		Rating	Continuous Load	Remarks
		Train "A"	Train "B"			
1	0 sec	Transformers 3/4-812-ETR-11A 3/4-812-ETR-12A	Transformers 3/4-812-ETR-11B 3/4-812-ETR-12B	2000 KVA	1750 KW	
2	5 sec	HPSI Pump 3/4-441-MPP-02A	HPSI Pump 3/4-441-MPP-02B	1000 HP	910 KW	
3	10sec	AFW Pump 3/4-542-MPP-01B	AFW Pump 3/4-542-MPP-01A	1052HP	946 KW	
4	15sec	CS Pump 3/4-442-MPP-01A	CS Pump 3/4-442-MPP-01B	800 HP	764 KW	
5	20sec	LPSI Pump 3/4-441-MPP-01A	LPSI Pump 3/4-441-MPP-01B	600 HP	470 KW	
6	25sec	CC Water Pump 3/4-461-MPP-01A	CC Water Pump 3/4-461-MPP-01B	1000 HP	1000 HP	
		CC Water Pump 3/4-461-MPP-02A	CC Water Pump 3/4-461-MPP-02B	1000 HP	1000 HP	
7	30sec	ESW Pump 3/4-462-MPP-01A	ESW Pump 3/4-462-MPP-01B	1375 HP	1250 HP	
		ESW Pump 3/4-462-MPP-02A	ESW Pump 3/4-462-MPP-02B	1375 HP	1250 HP	
8	35sec	ECWC Pump 3/4-633-MCH-01A	ECWC Pump 3/4-633-MCH-01B	800 HP	707 HP	
		ECWC Pump 3/4-633-MCH-02A	ECWC Pump 3/4-633-MCH-02B	800 HP	707 HP	

HPSI – High pressure safety injection
 AFW – Aux. feedwater
 CS – Containment spray
 LPSI – Low pressure safety injection
 CC – Component cooling
 ESW – Essential service water
 ECWC – Essential chilled water chiller
 LOOP – Loss of off-site power
 SIAS – Safety injection actuation signal
 AFAS – Auxiliary feedwater actuation signal
 CSAS – Containment spray actuation signal

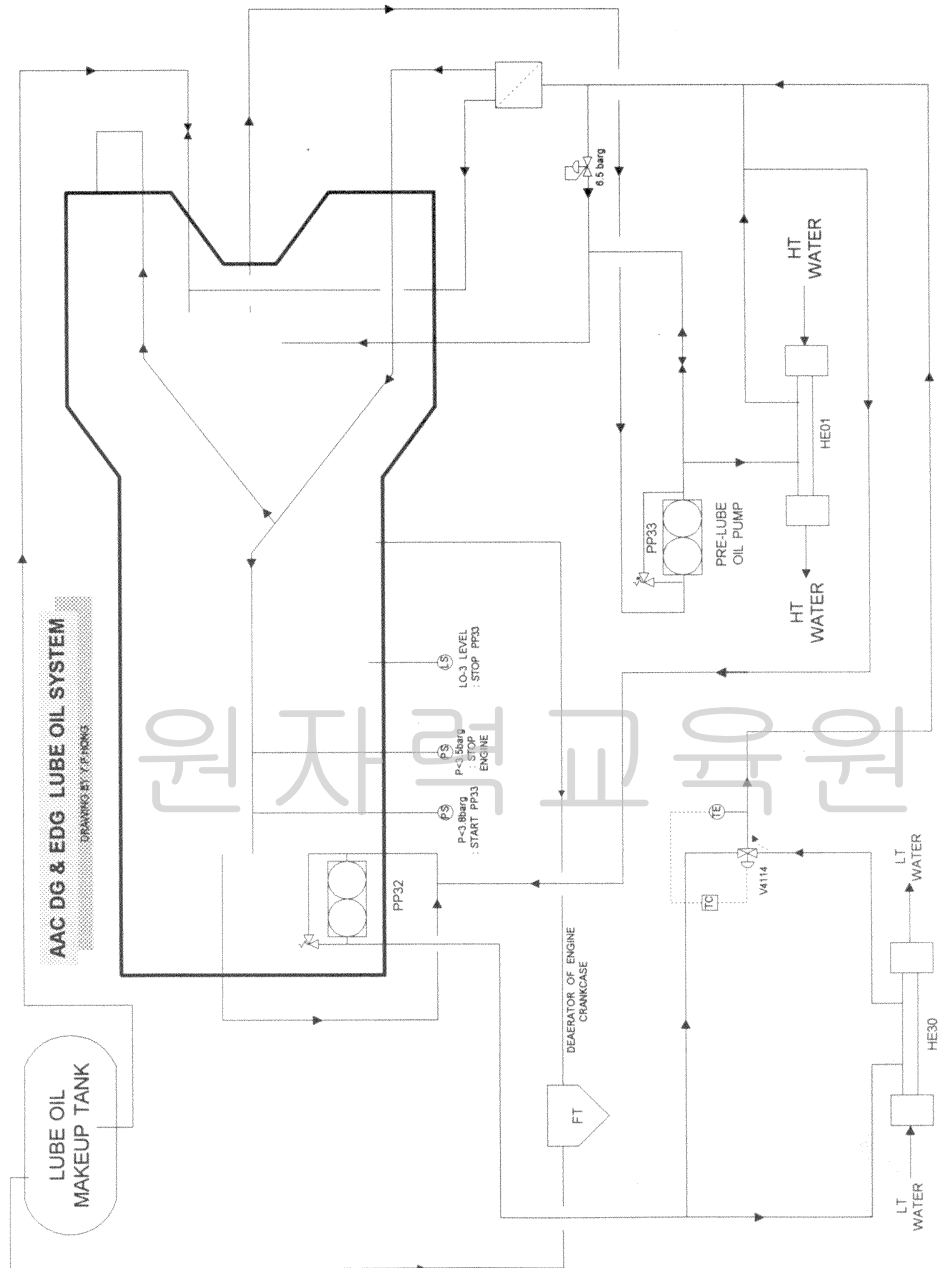
붙임 2. 고온 냉각수 계통(HT Cooling Water System)



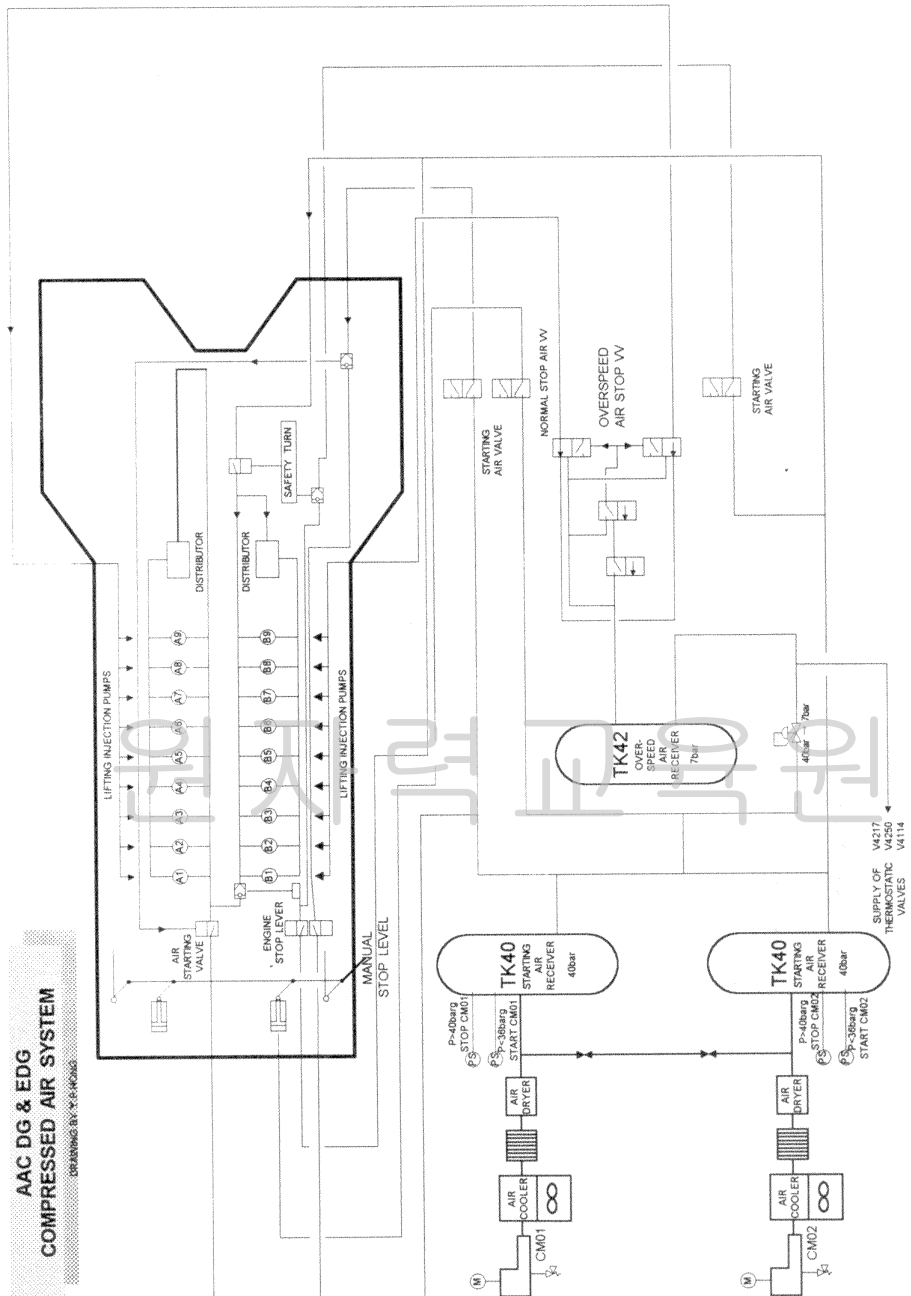
붙임 3. 저온 냉각수 계통(LT Cooling Water System)



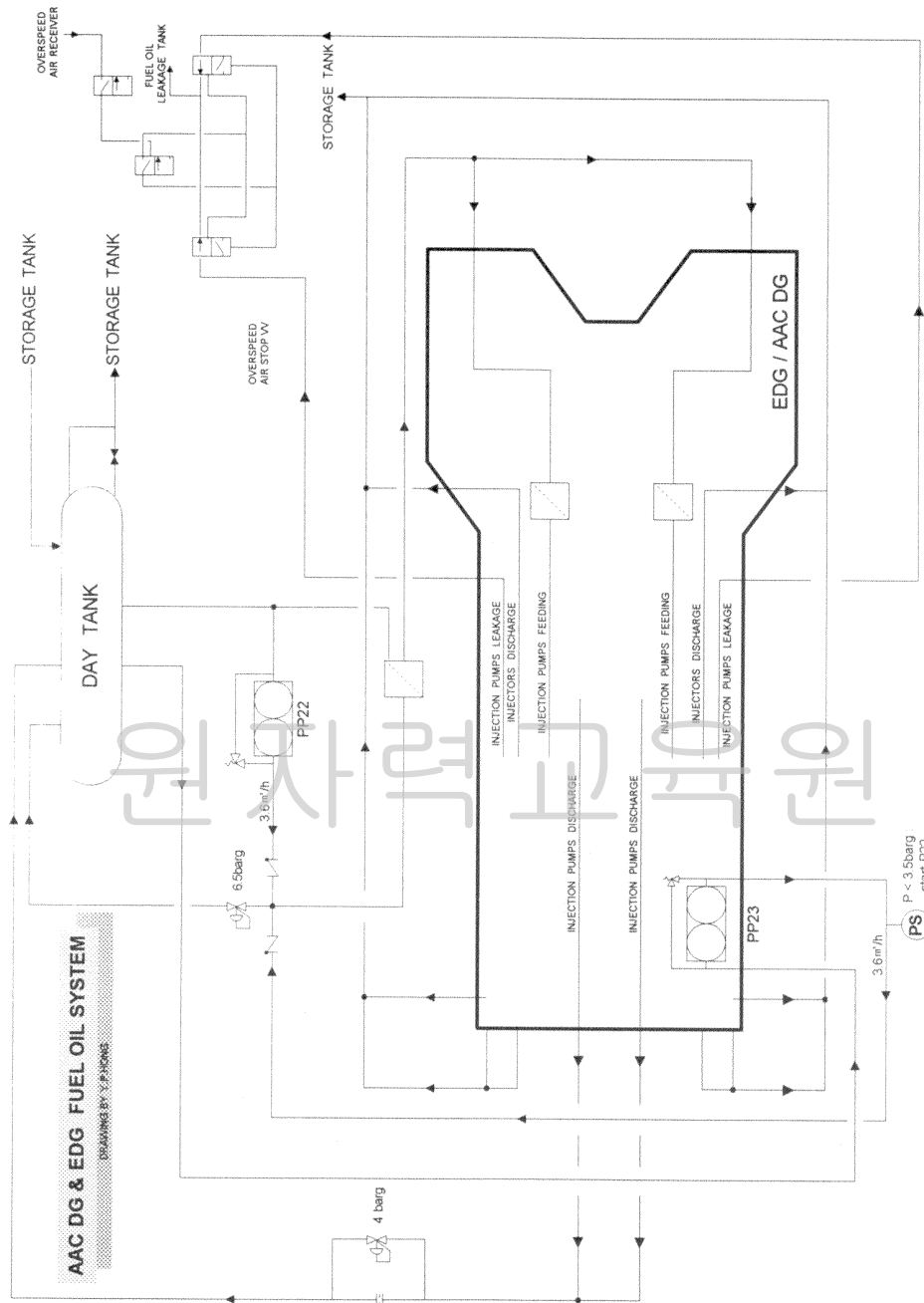
붙임 4. 윤활유 계통(Lube Oil System)



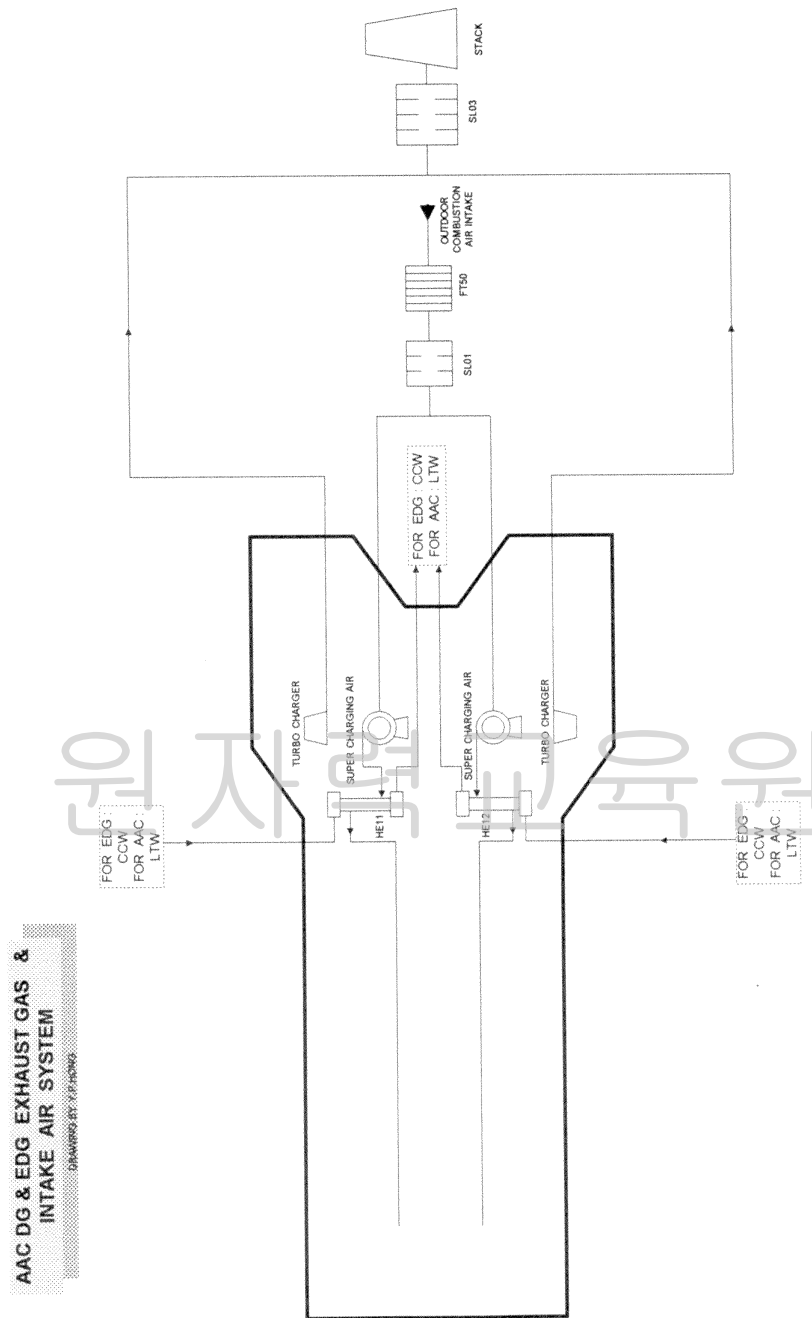
붙임 5. 기동용 공기계통(Starting Air System)



붙임 6. 연료유 계통(Fuel Oil System)



붙임 7. 연소용 공기 및 배기가스계통(Combustion Air Exhaust Gas System)



[핵심요약]

1. 비상디젤발전기 기능, 설계기준 및 운전기능
2. 디젤엔진의 운전원리는 4행정기관이다.
3. 크랭크축 회전에 따른 각종 기어의 종류 및 역할
4. 주요기기별 기능 및 역할
 - 터보차저
 - 조속기
 - 실린더
5. 보조계통 설명
 - 고온냉각수계통 : 운전중 엔진 및 터보차저에서 발생된 열을 CCW에 의해 냉각
 - 저온냉각수계통 : 윤활유 및 고온냉각수계통에서 발생된 열을 CCW에 의해 냉각
 - 윤활유계통 : 각 엔진부품에 윤활유 공급
 - 기동용공기계통 : 엔진을 구동하기 위한 압축공기 공급 및 제어
 - 연소용 공기 및 엔진배기계통 : 외부의 청정공기 및 배기가스의 대기 방출계통
 - 연료유계통 :
6. 비상디젤발전기 기동
 - 자동기동, 정상(비상) 수동기동
7. 비상디젤발전기 정지
 - 기계적(전기적) 신호에 의한 정지
 - 비상보호기능 및 수동정지
- 8 비상디젤발전기 부하탈락 및 재투입
 - 안전주입발생시
 - 공학적 안전설비 동작 및 소외전원상실시

참 고 문 헌

명 칭	저자명	출판사	인용부분 및 페이지 수	기타
- 표준형원전 FSAR - 표준형원전 System Description - 기기공급사 Manual	한수원(주)	한수원(주)	전체	
원 자 력 교 육 원				

교재개발관리이력

원저자 : 박영돈 등 9명 최초개발 : 2004년 01월 최초제작 : 2004년 01월

[illegible]

원고작성(개정)자 명단

개정 번호	편	장	절	과 목 명	작 성 자	
					원저자	개정자
0		1		2차계통 개요	조현철	—
		2	1,7	제1절 증기발생기 등	조현철	—
			2	제2절 증기발생기 수위제어계통	심중보	—
			3	증기발생기 취출수계통	강창원	—
			4	증기 및 터빈 계통	박영돈	—
			5	터빈제어계통	조승우	—
			6	터빈우회증기제어계통	박용식	—
			8	터빈보조계통	김동혁	—
		3	1-3	제1절 주발전기 등	이종규	—
			4,5,7	제4절 소내전력계통 등	안광영	—
			6,8	제6절 무정전 전원설비 등	양재성	—
1		1	1	2차 계통 개요	조현철	김배주1
		2	1	증기발생기	조현철	윤종길
			2	증기발생기 수위제어계통	심중보	고병무
			3	증기발생기 취출수계통	강창원	윤종길
			4	증기 및 터빈 계통	박영돈	윤종길
			5	터빈제어계통	조승우	고병무
			6	터빈우회증기제어계통	박용식	권순일
			7	복수 및 주급수계통	조현철	허 욱
			8	터빈보조계통	김동혁	김배주
		3	1	주발전기	이덕구	이종규
			2	발전기 여자제어계통	이덕구	이종규
			3	발전기 보조계통	이덕구	이종규
			4	소내전력계통	안광영	김경태
			5	소외전력계통	안광영	김경태
			6	무정전 전원설비	양재성	김경태
			7	비상디젤발전기	안광영	양재성

교재이름 : 원자력계통기초Ⅱ (표준형) [계통기초-2]

등록번호 : 2008-1276-단-026

발행기관 : 한국수력원자력(주) 원자력교육원

교육기획부 ☎(051) 726-6341~3

초판발행 : 2004년 01월 [개정0]

08판발행 : 2008년 03월 [개정0]

인쇄기관 : 공란 (인쇄시 자동 기입 됨)