

3-3) 응축수는 Zone별로 그룹을 지어 응축수 저장 Tank에 모이게 하고 압력 차이에 의해 발생하는 재증발 증기가 Ejector Valve의 재증발 흡입측으로 재흡입이 되도록 함.

3-4) 지속적 배출로 Set M/C Roller 내부에 응축수 고임 현상이 없음.

3-5) Set M/C Roller 내부 응축수 정체 현상이 해소 됨에 따라 온도 분포가 균일 하여 짐.

3-6) 공정의 로트 대기시 온도가 일정하게 유지되어 재 가동 시간이 축소되고 제품 생산 중간 중간에 실시하는 검사 횟수 축소가 가능해 짐.

4. 투자 기간

1997년 10월 ~ 1999년 11월
(시행 착오를 겪는 과정으로 기간이 장기화 됨)

5. 투자비

1) 총 투자비 : 1억원

2) 투자 내역

- Ejector Valve 구입 및 설치
- 재증발 증기 Tank 제작 및 설치
- 응축수 출구 Control Valve 구입 설치
- 배관 및 보온 & 전기, 계장 공사

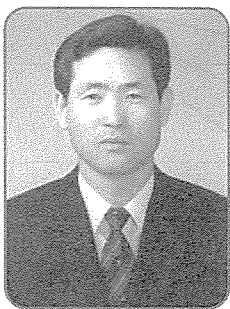


6. 연간 절감 효과

재증발 증기 사용 효과 + By-Pass 차단 효과 = 약 8.8억원/년

(기대했던 재증발 증기 회수 보다 By-Pass 차단 효과가 더욱 큼.)

발전소 제어시스템 (III-II)



한국전력공사 전력연구원
발전연구실 I & C 그룹
책임연구원 김호열/공학박사
Tel : (042)865-5270

2. HRSG 제어

HRSG¹⁾는 개스터빈 배기열을 이용하여 증기를 발생시키는 설비이다. 보통은 개스터빈 1대마다 HRSG

가 1대씩 설치된다. HRSG 제어시스템은 보통 플랜트 제어용 DCS와 동일한 종류의 하드웨어에 의해 구성되어 있다. 보통 주기기 제작사에 의해 개스터빈과 증기터빈 제어시스템이 공급되지만 HRSG 및 플랜트 종합제어 계통의 제어설비가 별도로 필요하기 때문이다.

개스터빈 및 증기터빈 제어시스템이 주기기 제작사의 제어설비로 설치되는 것은 주기기 제작사에서 하자보증과 신뢰성을 이유로 자사 제어시스템의 사용을 요구하고 있기 때문이지만, 플랜트 전체를 제어할 수 있는 능력이 부족하기 때문에 대용량의 DCS가 필요한 것이다.

HRSG 제어시스템의 출력은 주로 공기식 제어밸브

1) HRSG (Heat Recovery Steam Generator) : 통칭 배열회수 보일러

또는 전동 밸브를 구동하며, 간혹 유압 댐퍼드라이브를 구동하는 경우도 있으며 점점 출력은 각종 차단기나 솔레노이드 밸브, 릴레이 등을 구동한다.

여기에서는 150MW 정격의 개스터빈과 80MW 정격의 증기터빈으로 구성된 1:1 방식의 복합 발전소를 중심으로 제어로직과 시스템 구성을 소개한다.

가. 연소가스 전환 댐퍼

연소가스 전환 댐퍼(Diverter Damper)는 단순 사이클로 운전할 때 G/T 배기를 외기로 전환시키는 것으로서, HRSG가 트립되어야 할 때는 Full Close되는 대형의 댐퍼이며, HRSG 예열 중에는 이 댐퍼의 개도를 조정하여 증기 증발율을 조정한다.

이 댐퍼는 콘솔에서 운전원의 선택으로 Open/Stop/Close할 수 있으며, 자동 기동시에는 예열을 위하여 자동기동 로직에서 100% 또는 80% Open 지령이 발생되고, 복합사이클 기동절차가 완료되면 100% Open 지령이 출력된다. 복합 사이클 운전 중 트립신호가 발생하면 보호회로에서 Full Close 지령이 발생되어 댐퍼가 즉시 닫힌다.

댐퍼 중간 임의의 개도에서 HRSG를 예열하려면 댐퍼 제어원도우에서 Open 버튼을 누른 뒤 개도신호 변화를 확인하여 원하는 개도가 되면 Stop 버튼을 누른다. 운전 상태에 따른 댐퍼의 개도는 다음과 같다.

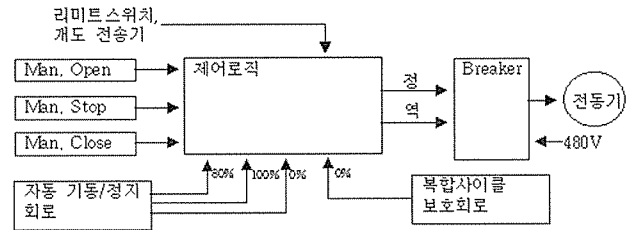
<표 2> 연소가스 전환 댐퍼의 개도

운전 상태	개도(%)	비 고	
Unit 정지 중	0	HRSG Bottle-up을 위해 폐쇄	
G/T 기동 준비(단순, 복합)	0	G/T 기동 조건	
단순 사이클 운전 시	0	바이패스 연돌로 배출	
복합 사이클 예열 시	냉간 기동	100	G/T 출력 Spinning Reserve
	온간 기동	80	G/T 출력 배기온도 538℃에 조정
	열간 기동	100	G/T 출력 배기온도 538℃에 조정
복합 사이클 운전 시	100	바이패스 연돌 차단	
복합 사이클 정지 시	0	바이패스 연돌로 배출	

전동기로 동작하는 댐퍼의 Full Stroke Time은 수십초 정도인데 HRSG의 열응답이 늦으므로 보호회로 동작시 닫히는 시간에 의해 안전성이 문제가 되지 않는다. 보호회로 동작시 댐퍼의 고장(차단기 트립, 푸우즈 용단, 리미트 스위치 불량 등)으로 60초 이내

에 닫히지 않으면 개스터빈이 런백(Runback)²⁾되거나 비상정지 된다.

이 댐퍼의 전폐(全閉) 여부는 HRSG의 안전에 아주 중요한 요소이기 때문에 3개의 리미트 스위치로 다중화되어 복합사이클 보호회로에 사용되며 개도 전송기도 설치되어 있다.

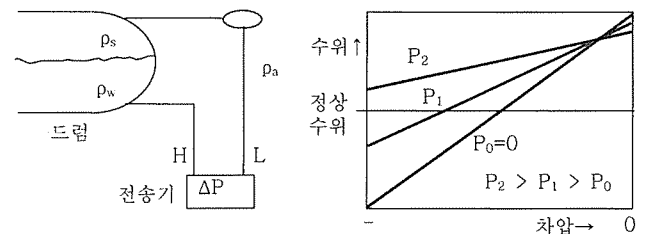


<그림 17> 연소가스 전환댐퍼 제어 계통 구성

나. 급수 제어

HRSG의 급수제어는 기력발전소의 그것과 원리나 구성이 같으며, 증기 및 물의 유량균형을 맞추는 것이다. 드럼형 보일러 또는 HRSG에서는 드럼수위를 일정하게 제어함으로써 물과 증기의 균형을 맞춘다.

드럼 수위는 드럼 내부의 물과 증기의 비중 차에 따른 압력변화를 차동압력 전송기로써 검출한다. 저압 측의 Reservoir는 기준 수위를 제공하기 위한 것으로서 그 하부 배관은 모두 물로 채워져 있다. 드럼내부 수위가 증가하면 드럼 내부에서 물의 헤드(水頭)가 증가하여 차압이 적어져 전송기 신호가 증가한다. 내부가 전부 물로 차면 압력 차가 거의 0이 된다.



<그림 18> 드럼수위 검출

드럼 내부는 포화 상태이며 물과 증기의 비중이 온도(압력)에 따라 달라지므로 차압 전송기의 신호는 그림과 같이 드럼 압력에 따른 비중을 보정하여야 정확한 드럼수위가 검출된다.

급수제어는 전통적으로 3요소(3 Element) 제어방식을 사용하는데, 드럼 수위와 증기유량 그리고 급수

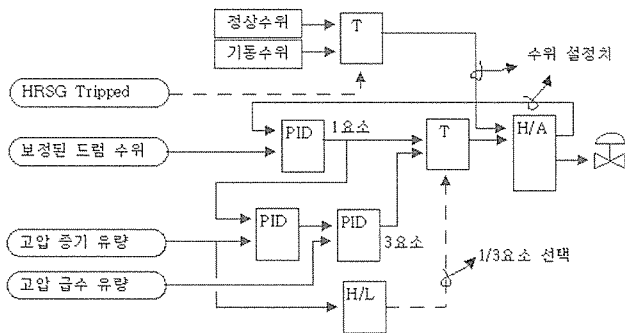
2) Runback : 발전기 출력을 안전한 수준까지 자동으로 급감발하는 것. 보조기기 비상정지 등으로 운전 가능 출력이 현재 출력보다 낮은 경우 동작하도록 구성한다.

유량을 검출하여 PID 연산으로 급수 제어밸브를 조정하는 방식이다. 이것은 증기 유량이 증가하면 곧 이어 드럼수위가 저하될 것이 예상되며, 급수유량을 미리 증가하면 수위의 변동을 더욱 적은 범위 내에서 유지할 수 있다는 선형제어 개념(Feed Forward Control)을 적용한 것이다.

1요소 방식에서는 드럼 수위 편차만 제어에 사용한다. 발전기 부하가 20-25% 이하로 내려가면 증기 및 급수유량 전송기의 오차가 커지므로 3요소 방식이 비효과적이다. 따라서 저부하시 또는 증기나 급수 신호 전송기가 고장일 때 자동으로 1 요소 제어로 선택되도록 로직을 구성한다. 필요한 경우 1 요소방식으로 운전원이 직접 선택할 수 있다.

드럼수위 제어는 고압, 중압, 저압계통이 기본적으로 동일한 로직으로 설계된다. 다만, 저압 드럼의 경우에는 종합 증기 유량으로서 저압 증기유량과 고압 및 저압 급수유량을 합산한 값을 사용한다. 이것은 저압 드럼으로 공급된 복수의 일부만이 저압증기로 발생되고, 나머지는 급수펌프를 통하여 고압 및 중압 급수로 공급되기 때문이다.

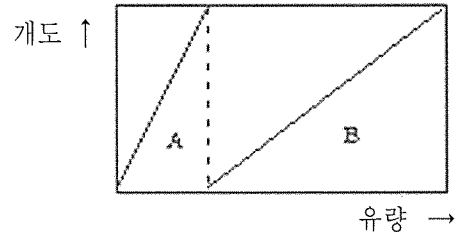
또한 보일러나 HRSG 예열시 급수를 차단한 상태에서 물의 팽창에 의해 수위가 증가하므로, 기동시에는 정상수위(NWL)보다 낮은 기동 수위에서 제어하도록 되어있으며, 수위가 일정 폭 이상 증가하면 드레인 밸브를 통하여 블로우 다운되도록 구성되어 있다.



<그림 19> 드럼수위 제어 로직

드럼수위 신호는 고/저수위 트립 로직에도 사용되며 급수밸브 제어에 중요한 요소이므로 3중화되어 있다. 3대의 신호전송기 신호는 모듈에서 정상 여부가 판단되어 평시에는 3대 평균((A+B+C)/3)으로 동작하지만 고장시에는 나머지 2대의 평균 또는 나머지 1대의 단독 신호로 자동 선택된다.

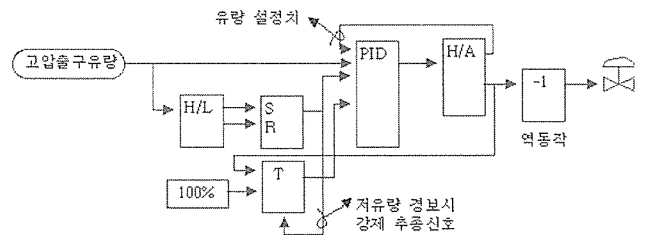
급수제어 밸브는 저부하용(30% 이하)과 고부하용의 2대가 스플릿(Split) 모드로 동작하여 기동시와 저부하시에도 원만한 제어를 도모하고 있다.



<그림 20> 스플릿 모드

다. 급수펌프 최소유량제어

급수펌프는 보통 전동기 구동방식의 정속형 원심 펌프를 사용하는 것이 일반적이며, 펌프마다 재순환 제어밸브가 설치되어 있어 저 유량시 원심펌프에서 발생할 수 있는 캐비테이션을 방지한다. 최소유량은 보통 펌프 정격유량의 25~30% 정도로 제어하고 있으며, 최소유량 확보 실패시(20~25% 이하) 펌프가 트립되도록 구성한다.



<그림 21> 급수펌프 최소유량 제어 로직

기본 회로는 간단한 PID 유량 제어로 구성되어 있다. Fail Safe를 만족시키기 위해 제어밸브는 공기 및 제어전류 신호가 상실되었을 경우 전개되도록 되어 있기 때문에 H/A Station 후단에 신호를 역전시키는 블록이 추가되어 있다.(4mA : 전개, 20mA : 전폐)

저부하에서는 급수 유량의 변화에 추종하여 순환 제어밸브를 조정하여 최소유량을 제어하며, 급수 유량이 최소유량을 초과하면 순환 제어밸브는 닫힌다.

또한, 정상동작 중 어떤 원인으로 저유량 경보가 발생하면 즉시 100% Open에 해당하는 제어신호가 출력되도록 H/A Station 및 PID 블록이 자동추종(Tracking)한다. 이와 함께 제어밸브의 공기를 배출하여 제어밸브가 신속히 열리게 하는 솔레노이드 밸브가 동시에 소자된다.

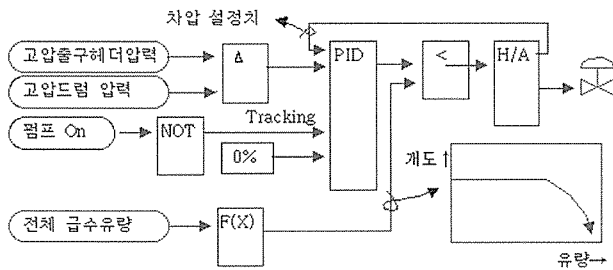
설비의 신뢰성을 보다 높이기 위하여 이밖에 다음

과 같은 기능을 가지고 있다.

- ① 유량전송기 고장 시 수동모드로 전환
- ② 자동/수동 모드간의 Bumpless 전환을 위한 추종 회로
- ③ 저유량 경보 및 펌프 정지 회로
- ④ 펌프 정지시 유량오차를 제거하는 회로

라. 급수 압력제어

고압급수 제어밸브의 전후 압력 차를 일정하게 하여 드럼수위를 더욱 안정되게 제어하기 위해, 급수펌프 고압 출구 측에 압력 제어밸브가 있어서 급수헤더와 고압 드럼 간의 차압을 일정하게(25kg/cm²)로 유지시켜 준다.



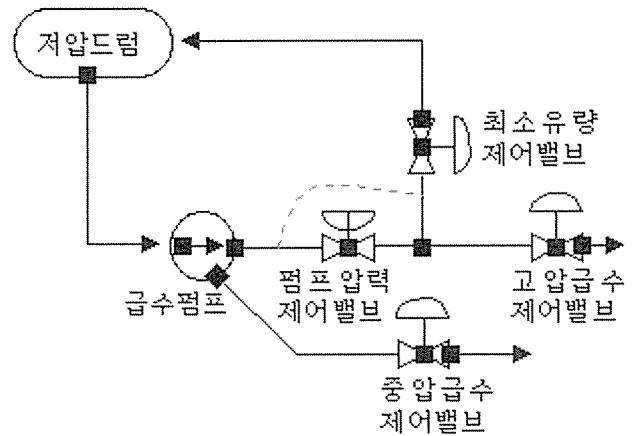
<그림 22> 급수펌프 출구 압력제어 로직

급수펌프 출구 압력이 200kg/cm² 정도이므로, 고압 드럼 압력이 낮은 상태에서는 급수 제어밸브 전후 압력 차이가 커서 밸브의 적은 개도에서도 많은 유량이 흘러 원만한 제어가 곤란한 문제를 압력 제어밸브가 개선한다.

기본적으로는 PID 차압 제어로 구성되어 있으며, 펌프 정지시 해당 압력 제어밸브가 최소위치에 오도록 강제 추종회로가 부가되어 있다. 또한 급수 펌프 2대 운전시를 감안하여 펌프 2대의 고압 및 중압 급수 유량을 합산하여 제한치를 초과하지 않도록 제한회로를 부과하고 있다.

펌프출구 압력 제어밸브의 후단에 급수 제어밸브와 최소유량 제어밸브가 설치되어 있으므로 이 밸브들의 상호영향으로 시소현상이 발생하는 경우가 있다. 예를 들면, 유량이 증가하여 최소유량 제어밸브가 닫히면, 압력 제어밸브 후단의 압력이 증가되어 압력 제어밸브가 닫히고, 이것은 제어밸브 후단 압력을 낮추는 동시에 순환 유량을 감소시키므로 다시 최소유량 제어밸브를 여는 동작이 계속될 수 있다. 이것은 압력 제어밸브의 개도가 변하면 유량과 압력이 동시

에 변하기 때문이다. 이러한 스윙은 급수 제어밸브의 급격한 움직임 후에 따라올 수 있는 데 압력 제어밸브의 추종을 유량 제어밸브보다 다소 늦게 조정하여 개선할 수 있지만 완전히 피하기는 어려운 구성이다.



<그림 23> 급수펌프 계통 제어밸브

압력 제어밸브를 사용한다면, 고부하에서 최소유량 제어밸브 전후 압력의 증가는 피하기 어려운 상황이므로, 이 밸브를 압력 제어밸브의 전단으로 이동하는 것을 검토할 수 있다. 이렇게 하면 최소유량 제어밸브의 움직임이 압력 제어밸브 전, 후 압력변화에 거의 영향을 미치지 않으므로 압력제어와 유량제어의 상호 간섭이 배제되므로 계통이 안정될 것으로 생각된다.

마. 증기 압력제어

HRSG의 각 압력계통(고압, 중압, 저압)의 증기압력은 기동 과정에서는 바이패스 제어밸브로, 복합 사이클 정상운전 중에는 증기배관 중에 있는 압력제어밸브 또는 터빈 제어밸브를 사용하여 제어한다.

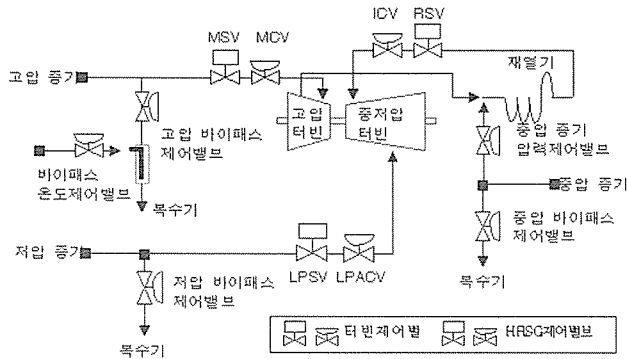
(1) 증기 바이패스 제어밸브

고압증기 바이패스 제어밸브는 기동시 증기압력을 제어하고 증기배관을 예열하는 데 사용하며, 정상운전 중에는 급격한 증기압력상승 시 열리면서 과도한 압력 증가를 예방하는 역할을 한다. 고온의 증기를 복수기로 순환시키기 때문에 이 밸브의 후단에는 물 분사 노즐과 온도 제어밸브가 설치되어 있다.

정상운전 중에 증기압력 제어는 각 증기배관 중간에 있는 압력 제어밸브로 제어한다. 고압 및 저압 증기는 증기터빈 제어장치에서 유압 제어밸브인 주제어밸브(MCV ; Main Control Valve)와 저압분사 제어밸브

브(LPACV : LP Admission Control Valve)로, 증압 증기는 DCS에서 공기식 제어밸브인 증압증기 압력 제어밸브(IP Press. Control Valve)로 제어한다.

바이패스 제어밸브는 기본적으로 PID 압력제어로 구성되어 있으며 밸브 전단의 압력을 검출하여 일정한 값으로 제어하는 입구압력 제어방식(Inlet Press Control Valve)이라는 것이 특이하다. 즉 밸브입구 압력이 증가하면 밸브를 더 열어 증기유량을 증가시켜 압력을 낮추고, 입구 압력이 감소하면 밸브를 더 닫아서 증기유량을 감소시켜 압력을 높인다.



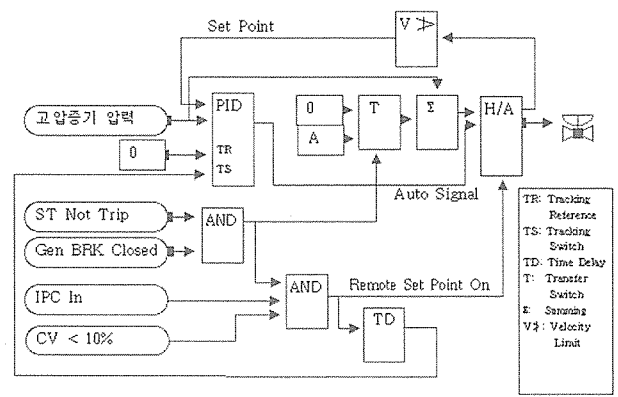
<그림 24> 복합화력 증기압력 제어계통

이러한 특성은 유량을 증가시키면 압력이 저하되는 프로세스에서 압력으로 에너지 밸런스를 맞추려고 하는 경우 사용된다.

터빈 Rolling 조건의 하나로 고압증기 바이패스 제어밸브의 개도 요구신호가 50% 이상이 있다. 이것은 고압증기 라인으로 충분한 증기유량이 형성되어 터빈으로 증기가 유입되어도 압력이 저하되지 않는 충분히 예열된 상태라는 의미이다.

터빈 Rolling 및 계통병입 후 터빈의 입구압력제어가 개시(IPC In)되고 바이패스 제어밸브의 개도요구신호가 점차 낮아져 10% 미만이 되면 고압 증기바이패스는 Quick Close된다. Quick Close 후에는 바이패스 압력제어 회로의 압력 설정치는 실제 고압 증기 압력보다 약간 높은 수준으로 서서히 추종한다. 만약 증기 압력이 급격히 증가하면 바이패스가 열려 더 이상의 과도한 압력 증가를 방지하도록 대기한다.

바이패스 증기는 후단의 물분사 노즐에 의해 온도가 저감되어 복수기로 회수되는 데, 바이패스 라인의 온도가 증가하거나 복수기 진공도가 낮아지면 바이패스 밸브가 완전히 닫히도록 연동되어 있다.



<그림 25> 고압증기 바이패스 제어 간략화 로직

(2) 증기유량 제어

고압증기 유량제어는 터빈의 주 제어밸브(Main Control Valve)에 의해 이루어지며, 터빈제어설비에서 입구압력제어, 입구압력제한 및 부하제어, 속도제어(기동시) 루프 신호 중 가장 낮은 값에 의해 제어된다.

입구압력 제어루프는 평시 이 밸브의 입구압력을 제어한다. 입구압력 제한루프(Inlet Press Limit)는 증기압력의 변동을 감시하다가 증기압력이 급격히 저하되는 경우 신호의 크기가 낮아져 밸브를 닫는다. 부하제어 루프(Load Control)는 기동시 이 밸브가 서서히 열리도록 압력제어회로를 제한한다.

증압증기 유량제어밸브(IP Admission CV)는 공기식 제어밸브를 사용하는데, 발전기 계통병입 후에 열리며, 평시에는 입구압력을 제어하지만 고압증기의 경우와 같이 3개의 제어루프 신호중 가장 낮은 신호에 의해 제어된다.

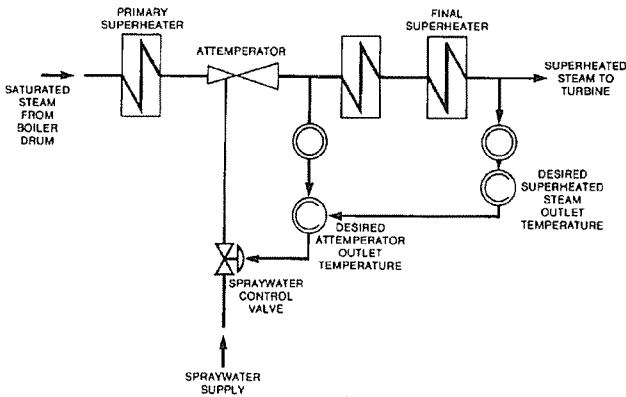
저압증기 유량제어는 터빈의 저압증기 유량제어밸브(LP Admission CV)에 의해 제어되며, 터빈제어설비에서 입구압력제어, 입구압력제한 및 부하제어 루프 제어신호중 가장 낮은 값에 의해 제어된다. 계통병입 후에 서비스 된다.

고압 및 저압증기 유량 제어밸브는 터빈제어에서 유압식 제어밸브를 사용한다.

바. 증기온도 제어

복합화력에서 증기 온도제어는 수분사(Water Spray)를 사용하는 것이 일반적이다. 간혹 증기온도를 올리기 위해 개스덕트에 버너를 사용하여 온도를 증가시키는 경우가 있으나, 일반적인 것은 아니다.

주증기 온도는 1차 과열기 후단에 수분사 노즐(과열 저감기)을 설치하고 제어밸브를 통하여 물의 유량을 가감시킴으로써 온도를 제어한다.

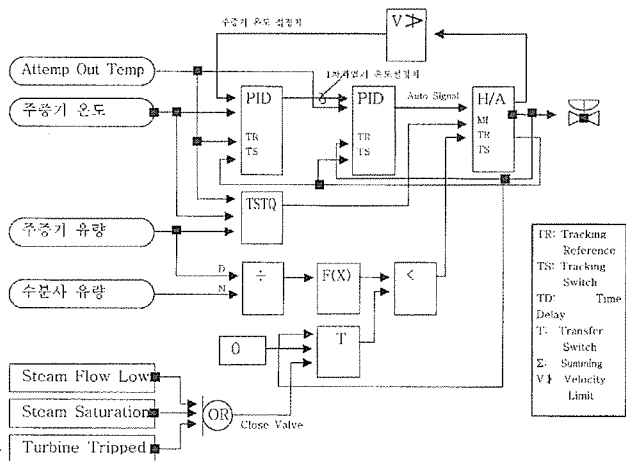


<그림 26> 증기온도 제어계통

온도제어에는 전통적인 Cascade 제어를 사용한다. 마스터 PID는 증기온도와 설정치와의 편차를 계산하여 1차 과열기 온도 설정치를 계산하여 슬레이브 PID의 설정치로 출력한다. 슬레이브 PID는 이 설정치와 과열기 후단 증기온도를 비교하여 수분사 제어밸브를 구동한다. 따라서 주증기 온도가 증가하면 1차과열기 출구온도의 설정치를 내려서 주증기 온도를 낮추며, 주증기 온도가 떨어지면 반대의 동작을 수행한다.

이렇게 2단 제어를 하는 것은 주증기 온도만으로 제어할 때는 시간지연 때문에 효과적으로 제어가 되지 않는 점을 개선하기 위한 것이다. 즉, 증기 Path에서 앞단의 온도를 제어함으로써 최종온도를 제어할 수 있다는 점을 이용한 것이다.

보다 효과적인 선형제어를 위해서 1차 과열기 온도 설정치를 출력에 대해 프로그램하고 주증기 온도의 변화에 따라서 이것을 가감하는 경우도 있다.



<그림 27> 고압증기 온도 제어 간략화 로직

이 제어로직에서는 터빈 정지시, 저부하시, 또는 증기온도가 포화온도+ $\alpha(15^{\circ}\text{C})$ 이하인 경우 수분사 제어밸브를 닫으며, 수분사 유량과 증기유량의 비율을 계산하여 물의 비율이 커지면 밸브개도를 제한하여 터빈으로 물, 또는 습증기가 유입되지 않게 설계되어 있다.

또한 제어에 사용되는 신호전송기 고장인 경우에 수동모드로 자동절체되도록 설계되었으며, 자동/수동 모드간의 Bumpless 절체를 위한 트래킹회로가 있고, 주증기 온도 설정회로에 변화율 제한기능을 사용하여 갑작스런 설정치 변화에 대해서도 안정한 동작을 보장하고 있다.

재열증기 온도제어는 주증기 온도제어와 유사한데, 재열기 튜브가 하나의 군으로 되어 있기 때문에 과열 저감기는 재열기 입구 즉 Cold Reheat 측에 설치된다.

3. DCS 및 APC

가. 디지털 제어시스템

복합발전소의 제어시스템은 마이크로프로세서를 이용한 디지털 제어를 다수 사용하는 것으로서 프로세스 규모에 따라 필요한 수량만큼 제어카드를 설치하도록 되어 있다. 이것은 소수의 제어기로 많은 프로세스를 제어하는 경우 제어기 고장으로 인한 영향의 범위를 축소하기 위한 것이다.

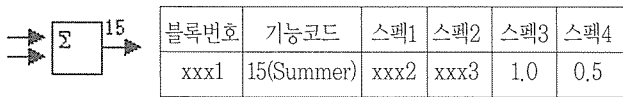
발전소 제어에 있어서 과거의 아날로그 시스템은 하드웨어에 의존한 간단한 형식의 것이 많았으며, 감시 및 기록이 용이하지 않았으나, 현재 널리 사용되고 있는 분산 디지털 제어시스템은 그 우수한 제어 성능과 함께 운용자에게 편리하고 효율적인 감시체제를 제공하고 있다.

즉, 제어기에 마이크로프로세서를 사용함으로써 디지털 통신에 의한 시스템 내부 및 운전 조작 감시장치로의 인터페이스가 용이하게 이루어지므로 "제어기의 분산 및 감시 데이터의 집중"이라는 목적을 달성하고 있다.

특히, 복합화력 발전소는 신속한 기동 정지의 장점을 최대로 살리기 위해 거의 모든 조작 및 제어를 자동화에 의존하고 있으며, 이러한 것은 대부분 분산 디지털 제어시스템에 의해 구현되고 있다.

복합발전소의 플랜트 제어용 디지털 제어설비는 개스터빈, 증기터빈 및 그 보조기기를 제외한 배열회수 보일러 및 공통설비의 제어를 담당하도록 설계되는 데, 개스터빈 및 증기터빈 제어설비를 상위에서 제어하는 역할을 담당하는 데, 플랜트 전체의 기동/정지와 같은 고도의 자동화 기능은 모두 DCS를 중심으로 플랜트제어에서 이루어진다. 디지털 제어기 특성은 다음과 같다.

- (1) 소프트웨어 알고리즘을 Blockware³⁾(Fill-in-the-form) 형태로 작성하여 사용자 제어 로직을 구성하는 소프트웨어 제어다.



<그림 28> 블록웨어

- (2) 모든 운전정보는 중앙으로 집중되어 CRT와 프린터를 통해 운전원에게 전달되며, 데이터 처리 및 그래픽 기술이 적용되어 효과적이고 신속한 감시가 가능하다.
- (3) 연산의 정도가 높고 고도의 제어, 연산기능을 보유하고 있다.
- (4) 아날로그에 비해 모듈의 수가 감소되고, 차지공간이 적어지며 자기진단에 의해 고장시의 영향이 축소된다. 상대적인 가격의 저하와 배선작업 및 조정기간의 축소에 의해 경제성이 우수하다.
- (5) 하드웨어나 배선의 변경이 없이도 시스템의 확장, 변경이 용이하다.
- (6) 대형 컴퓨터 제어와는 달리 제어 회로의 분산에 의해 고장의 범위를 축소시킬 수 있다.
- (7) 계층적이고 분산된 구조에 의해 신뢰성이 우수하다.

나. Infi90 시스템

ABB/Bailey Controls Co.는 Bailey Meter Company에서 출발하였으며, 공기식 제어기 시대부터 국내 각 발전소에서 사용하는 주제어설비를 제작하는 제어설비 제작사이다. Infi90은 베일리사의 디지털 제어시스템으로써, 1990년대 초 Network90의 용량과 속도를

향상시킨 것이다. 현재는 Symphony라는 상품명으로 제작되고 있으며, 마이크로프로세서는 모토롤라사의 MC68XXX 계열 CPU가 내장된 모듈형태의 전자카드를 사용한다.

(1) 제어기

전원장치는 모듈 형태의 것을 전류 소비를 고려하여 필요한 수만큼 사용하는 데, 가장 경제적인 구성은 N+1 대 설치이다. 입력은 교류 120/240V 또는 직류 24V이며, 디지털 및 아날로그 회로에서 사용하는 다음과 같은 전원을 공급한다. 1차 입력인 교류전원은 감시장치에 의해 건전한 전원이 선택되어 모듈화된 전원장치의 입력으로 공급된다.

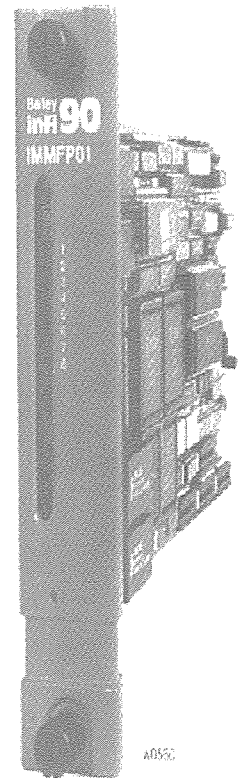
<표 3> 전원 전압의 종류 및 용도

정격 전압	전압 설정치	비 고
+5V	+5.15V	카드전원(주로 CPU, 로직IC용)
+15V	+15.30V	카드전원(주로 아날로그 IC용)
-15V	-15.30V	카드전원(주로 아날로그 IC용)
+24V	+25.5V	입출력 회로용 전원

Infi90의 중심에는 모듈이라 불리는 전자제어카드가 있는데, 마이크로프로세서를 중심으로 하여 입출력, 제어 알고리즘 및 다른 모듈, 시스템과의 데이터 통신, 자기진단 등을 수행한다.

보통 캐비닛 단위로 구성되는 PCU(Process Control Unit)의 Control Way(모듈버스) 상에 캐비닛 당 32개까지의 제어용, 통신용, 점검용 모듈이 설치될 수 있으며, 중요한 모듈은 이중화로 구성할 수 있는데, 이런 경우 2개의 모듈번지를 점유한다.

MFP(Multi Function Processor)는 가장 대표적인 제어용 마스터 모듈이며, 피드백 제어 및 시퀀스 제어를 포함하는 다양한 제어 알고리즘을 내장하고 있으며, 다양한 형태의 슬레이브 모듈을 통하여 입출력을 수행한다.



<그림 29> MFP Module

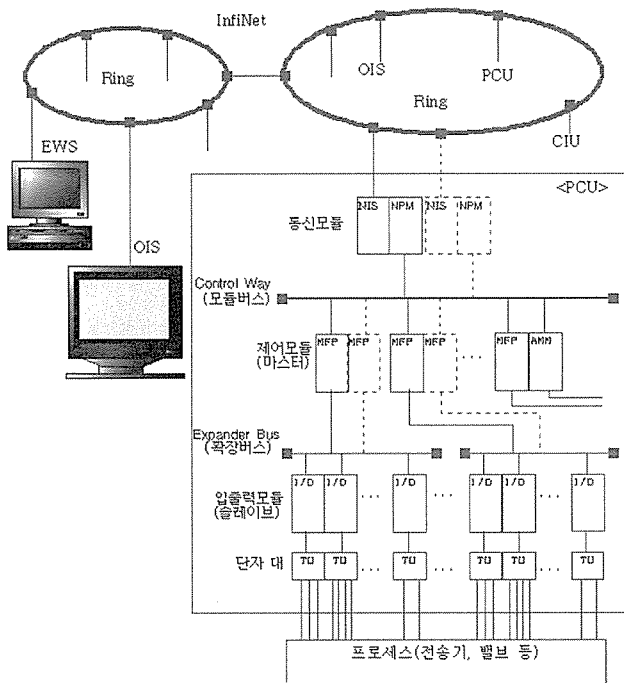
3) Blockware : 특정 기능을 블록화하여 등록하고, 관련 파라미터만 입력하면 동작이 이루어지게 하는 소프트웨어

통신에 사용되는 모듈로써, 네트워크 인터페이스 슬레이브 모듈(NIS)은 해당 캐비닛과 네트워크(InfiNet라 불림) 사이에서 데이터를 교환한다. 네트워크 프로세싱 모듈(NPM)은 NIS와 Control Way(모듈 버스) 사이에서 데이터를 주고받는 데, 해당 캐비닛에서 입출력되는 데이터 포인트 리스트를 가지고 있으며, 통신을 통하여 데이터를 주기적 또는 신호 변화시 마다 갱신한다. Infi90의 모듈버스인 이중화된 Controlway는 1MBud의 속도로 동작한다.

모듈 하위의 전자카드로서 Slave Module은 입출력 기능을 담당하며, 필요한 포인트 수에 맞추어 필요한 수량을 설치하는 데, 1개의 슬레이브는 보통 8개 또는 16 점의 현장 입력 또는 출력을 담당한다. 신호의 종류(직류/교류, V/mA, 접점/아날로그/펄스 등)에 따라 여러 가지 종류의 슬레이브가 사용되며, 보통 접퍼 등이 내장되어 신호의 종류 또는 전압 등을 선택하도록 되어 있다.

제어모듈과의 인터페이스는 확장 버스(Expander Bus)를 통하여 이루어지는 데, 1개 또는 1쌍의 이중화 마스터 모듈 MFP⁴⁾마다 확장 버스를 독립적으로 구성한다.

1개의 마스터 모듈은 64개까지 슬레이브를 사용하여 입출력을 확장할 수 있다.



<그림 30> Infi 90 제어시스템 구성도

4) MFP(Multi-Function Processor) : Infi90의 제어용 마스터 모듈

InfiNet은 각 PCU 노드간의 데이터 전송을 위한 이중화된 직렬 데이터 고속 전송로로서 통신 속도는 10MBud이다. 환형으로 이루어진 하나의 InfiNet을 링(Ring)이라 부르며, 링과 다른 링을 연결하는 게이트 웨이드도 구성할 수 있다. 전송로는 동축케이블 또는 Twinaxial Cable이 사용된다.

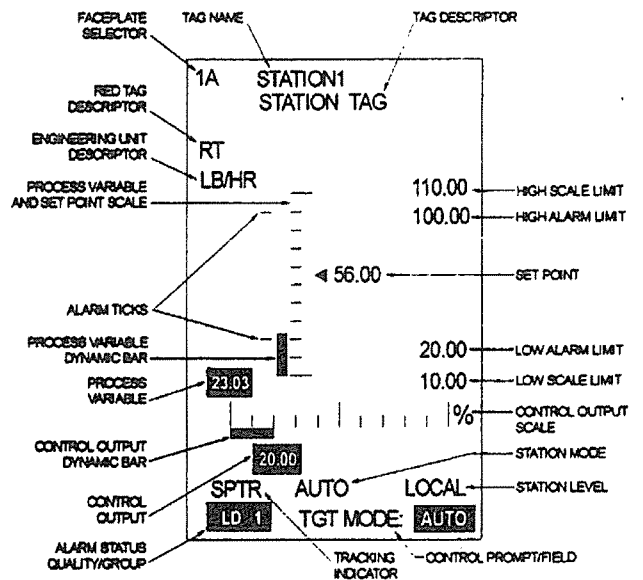
(2) 운전 조작 감시설비

OIS(Operator Interface Station)는 DCS에 네트워크로 연결되어 프로세스 데이터를 집중시키고, 이를 처리하여, CRT 및 프린터에 의해 그 결과를 신속, 정확, 효과적으로 운전자에게 전달한다. OIS의 중요한 기능은 다음과 같다.

- 그래픽 화면(Graphic Display)
- 실시간 그래프(Trend)
- 경보(Alarm Display)
- 데이터 저장 및 인쇄(Data Logging)
- 운전 조작(Control)
- 유지 정비(Maintenance)

OIS는 DCS와 네트워크로 연결되어 있지만, 완전히 독립되어 있어서 고장시에도 시스템을 자동으로 연속 운전할 수 있으며, 각 호기 당 여러 대를 사용하여 신뢰성을 확보하게 된다. 여기서 처리하는 데이터베이스는 최대 약 20,000개 정도이다.

제어설비를 직접 조작하는 윈도우는 몇 가지가 종류가 있는데, 제어 로직의 특정 블록과 연계되어 있어 운전원의 조작이 제어블록으로 전달된다.



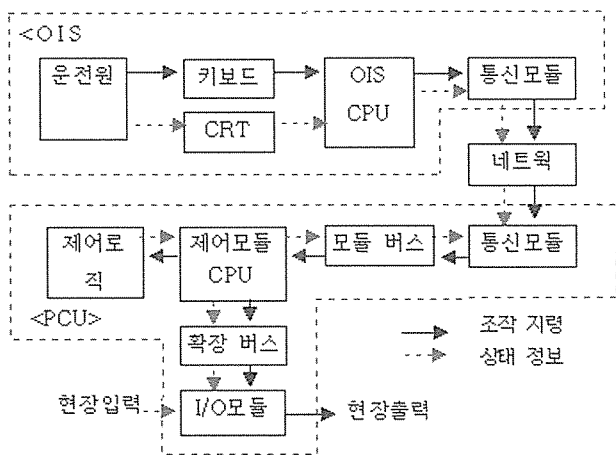
<그림 31> 팝업 윈도우

운전자가 조작하는 현장 기기에 대한 인터페이스는 제어 윈도우(Control Window)를 사용한다. 각 윈도우는 그래픽 화면에서 윈도우 선택 번호를 누르거나 마우스로 선택함으로써 모서리에 튀어나온다. 팝업(Pop-up)된 윈도우의 상단에는 선택번호와 태그번호 그리고 설명이 표시된다.

제어밸브의 조작과 감시에 사용되는 Manual/Auto Station(M/A)은 그림과 같은 모양으로 나타난다.

포인팅 장치로써 마우스와 트랙볼 또는 터치 스크린을 사용하며, 지정된 윈도우는 키보드로써 선택 가능하다. 과거에는 터치스크린 또는 트랙볼이 선호되었으나, 현재는 마우스가 보다 사용하기 용이한 것으로 인식되고 있다.

키보드를 사용한 운전원의 운전 조작 신호는 다음과 같이 통신모듈과 네트워크를 거쳐 해당 제어시스템의 PCU 내부의 모듈에 전달되어 소프트웨어 로직을 통하여 입출력 모듈을 동작시키고 그 상태가 역으로 전달되어 CRT를 통하여 운전원에게 결과를 알려 준다. 화면에서 선택하는 제어 대상에 따라 PCU 및 모듈이 달라진다.



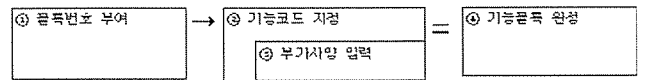
<그림 32> 운전조작 지령 및 상태 정보 흐름

(3) 제어로직 작성

제어모듈은 공장에서 출하된 후 사용자가 설계한 제어로직을 입력하여 실행시킨다. 사용자 로직은 EEPROM⁵⁾, 또는 배터리 내장 램⁶⁾에 저장되어 전원이 중단되어도 저장된 내용을 유지한다. 하나의 기능(Function)을 가진 메모리 단위를 블록이라고 하는데, 이것은 단위 모듈 내에서 고유한 일련번호를 가진다.

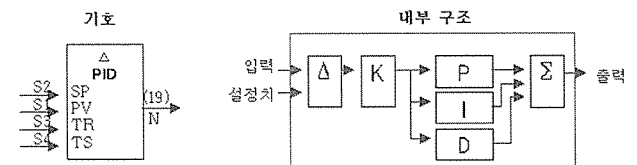
기능은 종류에 따라 코드 번호로 나타낼 수 있으며, 부수적인 사양(Specification)을 필요로 한다. 이렇게 하여 작성된 것을 기능 블록(Function Block)이라 부르며, 이런 작업을 통하여 원하는 로직을 구성하는 것을 Logic Configuration이라 한다.

기능 코드(Function Code)는 백수십개로 계속 개발되고 있으며, 보통 수 천개의 기능블록을 1개의 마스터 모듈에 수용할 수 있다.

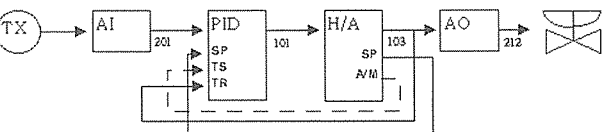


<그림 33> Configuration 과정

다음은 기능코드 19에 대한 설명과 적용 예를 나타내었다.



적용 예



Logic Configuration

블록번호	201	101	103	212
기능코드	27	19	21	29
S1	0	201	201	103
S2	100	104(N+1)	5	0
S3		103	101	
S4		105(N+2)	5	
S5		0.8	0	
S6		2.0	0	
S7		2.5	100	
S8		0.0	0	
S9		102	10	
S10		-2	100	
S11			0	
S12			0	
S13			0	
S14			0	
S15			0	
S16			15	

<그림 34> Logic Configuration 예

5) EEPROM(Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) : 전기적인 신호로 소거 및 재 프로그램이 가능한 불휘발성 메모리 소자
 6) 램(RAM, Random Access Memory) : 주기억장치로 사용되는 휘발성 메모리

이중화 구성된 MFP에서는 On-line Configuration 을 통해 블록의 추가 및 부가사양 변경은 가능하지만 삭제는 불가능하며, 추가의 경우 최후 블록 번호 이후에 지정이 가능하다. 원칙적으로는 문제가 없으나, 복잡한 조작 절차를 단계별로 엄격하게 지켜야 하며, 스텝 별로 동작이 완료된 것을 확인해야 하기 때문에 어느 경우에도 안전성이 보장된다고 말하기 어렵다.

제어로직의 실행 주기는 기본 값이 0.25초로 되어 있으며, 필요한 경우 재 지정이 가능하지만, 기능 블록의 종류와 수량에 따라 달라지므로 한 사이클이 지정된 시간 내에 완료되는 지 관측할 필요가 있다. 보일러의 경우 0.25초를 그대로 사용하는 경우가 일반적이지만, 터빈의 경우 Elsa Bailey에서는 50mS로 재지정하는 데, 반하여 GE의 TMR에서는 동기검출 부분을 제외하면 보통 0.2~0.25초가 보통 사용된다.

(4) 시스템 간 인터페이스

복합화력발전소에 설치된 기종이 다른 여러 시스템을 서로 연결함으로써, 유기적인 협조 제어를 도모하게 되는 데, 여기에는 두 가지 방식이 동시에 적용되는 것이 보통이다.

첫째는 디지털 인터페이스로써, 통신 버스 또는 네트워크를 서로 연결하여 공통 선로를 통해 많은 신호를 주기적으로 전송하는 것이다. 고속의 네트워크를 연결하는 것이 가장 바람직하지만 제작사 간의 하드웨어 및 운용 소프트웨어가 다르므로 특별한 경우가 아니면 동작되지 않는다. 따라서 표준화된 직렬포트(RS232C) 방식으로 연결하는 경우가 많지만 이런 경우에도 전송/수신을 담당하는 소프트웨어 또는 로직을 특별히 제작해야 한다. 현재는 MODBUS 프로토콜이 일반화 되어 있다.

둘째는 하드웨어적 인터페이스로써, 개별 신호마다 아날로그 혹은 로직 신호를 1대1로 연결하는 것이다. 디지털 인터페이스보다 경비가 많이 소요되지만 디지털 인터페이스의 신뢰성이 아직은 발전 단계에 있으므로, 중요한 신호의 전송에는 하드웨어 인터페이스를 사용하고 있다.

다. APC(Automatic Plant Control)

(1) G/T, S/T 원격 제어

G/T 제어장치인 Mark IV⁷⁾나 S/T 제어장치인 DCM+⁸⁾를 원격제어모드(Remote Mode)에 놓으면 G/T 또는 S/T의 기동, 정지, 출력 증감발 등의 중요 조작이 DCS를 통해서 자동, 또는 수동으로 이루어진다.

수백 개에 달하는 G/T, S/T의 운전 데이터가 모뎀을 통하여 DCS로 전송되고 각종 Graphic Display, Alarm, Trend, Logging 등을 통하여 OIS에서 감시된다.

(2) HRSG 및 보조기기 제어

Mark IV과 DCM+에서 제어하지 않는 각종 보조기기의 기동, 정지, 각종 제어밸브, 전동밸브(MOV), 댐퍼(Damper) 등은 DCS의 기능블록으로 구성된 로직에 의해 직접 제어된다.

(3) 플랜트 보호로직

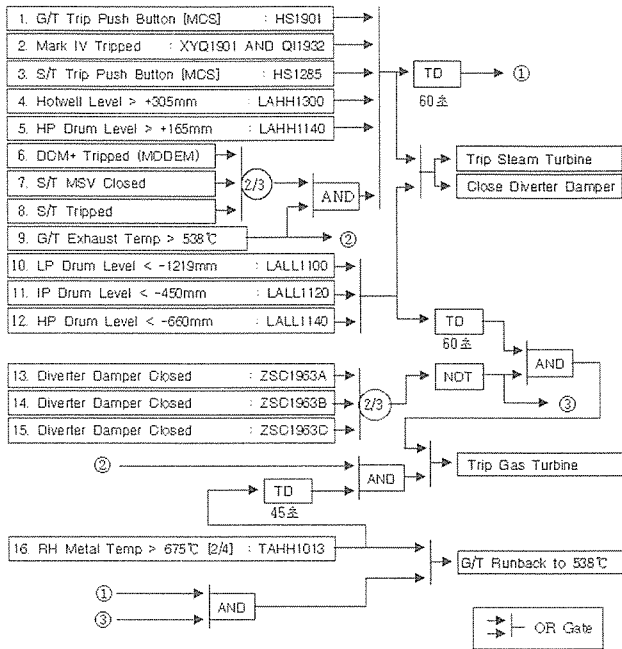
G/T 및 S/T 계통을 통합하는 복합사이클 보호로직(Protection Logic)이 구성되어 있어서, 전체적인 운전 조건을 판별하여 G/T 및 S/T를 Trip시키거나 연소가스 전환댐퍼(Diverter Damper)를 닫는다. G/T, S/T 제어시스템 내부에는 별도의 자체 보호회로가 있지만 플랜트 전체의 보호로직이 추가로 필요하다.

HRSG 및 S/T 트립 조건이 되면 즉시 S/T가 트립되며 연소가스 전환 댐퍼가 닫혀 바이패스된다. 이 트립 조건이 발생하고 60초 이내에 댐퍼가 닫히지 않으면 개스터빈 배기온도가 538°C 될 때까지 개스터빈 런백(Runback)시킨다. 드럼(고압, 중압, 저압 3개 중 1개 이상) 수위 저하의 경우 트립 조건이 발생하고 60초 이내에 댐퍼가 닫히지 않으면 개스터빈을 트립시킨다.

이것은 HRSG의 각 드럼 수위부족 시 1차적으로 댐퍼를 닫으며, 이것이 실패하는 경우 개스터빈을 정지하여 HRSG를 보호하기 위한 것이다. 보통 HRSG 및 S/T의 비상정지는 개스터빈의 연속운전에 영향을 직접주지는 않지만, 댐퍼 고장으로 60초 이내에 완전히 닫히지 않거나, 댐퍼개도 검출스위치가 불량하면 개스터빈 출력이 급감발(Load Runback)되거나 트립될 수 있다.

7) Mark IV : GE사의 개스터빈용 3중화 디지털 제어시스템

8) DCM+(Digital Control & Monitor Plus) : GE사의 증기터빈용 3중화 디지털 제어시스템



<그림 35> 복합 사이클 보호 로직의 일례

또한, HRSG R/H 튜브 온도가 675°C 이상 상승하면 배기온도가 538°C 될 때까지 개스터빈을 즉시 런백(Runback)시킨다. 댐퍼가 열려 있는 상태에서 R/H 튜브 온도가 675°C 이상으로 45초 이상 지속되면 역시 개스터빈을 트립시킨다.

라. APSS(Automatic Plant Start/Stop)

복합화력은 아직 다른 전원(기력, 원자력, 수력 등)에 비해 최대 출력이 낮은 관계로 발전기 수가 많기 때문에 운전 및 유지정비에 소요되는 인력을 최소화하는 것을 필요로 하므로 소수 운전원이 운전할 수 있도록 완전 자동화를 지향해 왔으며, 최근의 플랜트 제어 시스템은 이것을 대체로 충족하고 있다.

전자동화의 개념은 단위 루프에서의 자동화를 넘어서 플랜트 전체를 총괄 제어하는 자동 플랜트 제어(Automatic Plant Control : APC)이며, APSS(Automatic Plant Start/Stop)는 APC의 일부이다.

이것은 특히 발전소 기동 및 정지에 적용되어 One-touch Operation에 가까운 제어를 실현하고 있다. 하위의 단위제어 요소는 모두 자동으로 운전하거나 기동정지 조건에서 바이패스하여 수동 조작이 가능하게 한다.

(1) 복합사이클 자동기동

모든 제어요소(각종 제어밸브, 전동밸브, 댐퍼,

G/T, S/T 등)를 자동모드에 설정하고, “복합사이클 기동(Steam Cycle Start)” CRT 버튼을 클릭하면 플랜트 전체가 최적으로 프로그램된 조건과 시간경과에 따라 Auto Sequence 로직에 의해 기동/정지된다.

복합 사이클 발전소에서 전자동화 로직에 의한 기동 순서의 예는 다음과 같지만, 복합 플랜트 구성방식에 따라 약간의 차이가 있을 수 있다.

① G/T 기동(Cracking)

원격제어모드에 있는 Mark IV에 기동지령을 출력하여 개스터빈을 기동한다.

② G/T 점화(Fire) 및 승속(Speed-Up)

Mark IV에 의해 개스터빈이 점화되고 연료 연소에 의해 개스터빈이 승속된다.

③ 연소개스 전환댐퍼(Diverter Damper) Open

HRSG 예열을 위해 댐퍼가 열린다. 댐퍼의 개도는 증기터빈 금속온도에 따라 Hot/Warm/Cold에 적합한 개도로 열린다.

④ G/T 발전기 계통 병입(Synchronizing)

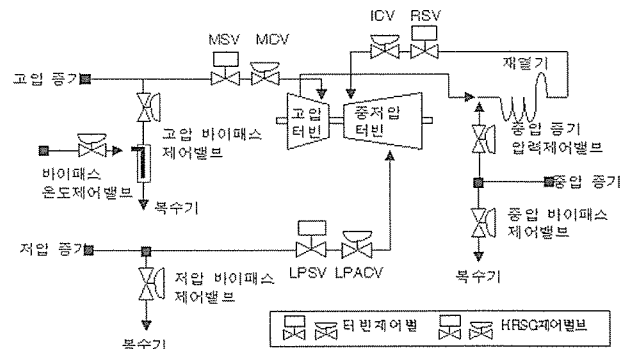
개스터빈이 3600RPM까지 승속되고 DCS로부터 병입 가능(Synchro Permissive)되어 있으면 Mark IV에 의해 계통 병입된다.

⑤ G/T Warming Load로 출력 증발

DCS에서 기동 종류(Hot/Warm/Cold)에 따라 정해진 출력까지 Mark IV에 의해 개스터빈 출력이 증발된다.

⑥ HRSG 압력 증가에 따른 By-Pass CV Open

HRSG 각 압력 계통의 벤트 및 드레인 사이클이 진행되면서 증기 압력이 증가한다. 이때의 각종 제어밸브 및 전동밸브와 같은 HRSG 부속설비는 DCS에 의해 진행된다.



<그림 36> 복합화력 증기압력 제어계통

⑦ S/T 기동(Rolling)

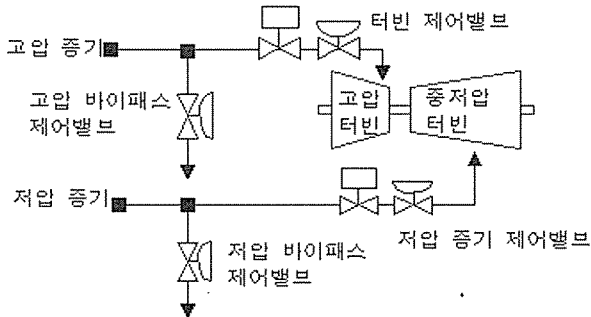
증기 압력이 증가하여 41kg/cm²가 되고 고압 바이

패스 밸브가 일정개도(50%) 이상이 되면 DCM+에 기동 신호를 전송하여 증기터빈이 기동된다. 증기터빈 기동 신호가 발생하기 전에, 증기터빈의 모든 트립 조건이 해소되고 복수기 진공이 형성되어 증기터빈이 리셋되어 있어야 한다.

⑧ S/T 발전기 계통 병입

증기 터빈이 3600RPM까지 승속되고 DCS로부터 병입 가능(Synchro Permissive)되어 있으면 DCM+에 의해 계통 병입된다.

⑨ S/T 입구압력 제어(IPC) 및 LP 분사(Admission) Service In



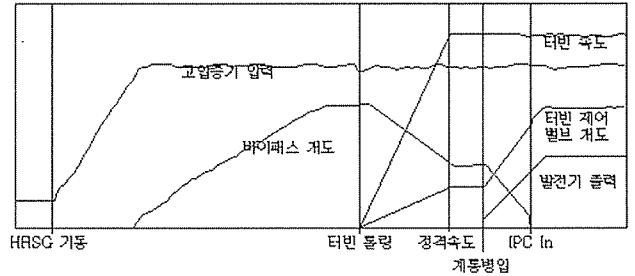
<그림 37> 고압 및 저압 증기 압력제어

증기터빈의 증기 유량이 증가하면 고압 바이패스 제어밸브가 점차 닫히는데, 개도가 10% 이하가 되면 터빈 제어밸브에 의한 입구 압력제어모드(IPC, Inlet Press Control)를 서비스하고, 증기압력을 기동압력(41kg/cm²)으로 제어한다.

바이패스 밸브는 완전히 닫힌 후 증기압력보다 약간 높은 설정치로 추종하여 자동 압력제어 모드에서 대기한다.

발전기 계통 병입 후 저압증기를 증기터빈으로 유입시킨다. 저압 증기가 공급되면 DCM+의 저압증기 유입 압력제어(APC, Admission Press Control)가 동작하여 LP Admission Stop Valve 전단의 압력이 일정(4kg/cm²)하게 되도록 LP Admission 제어밸브를 제어한다. APC가 서비스되면 고압계통과 마찬가지로 저압 바이패스 밸브가 완전히 닫힌 후 압력설정이 IPC보다 약간 높은 압력으로 추종하여 대기한다.

정상 운전 중 터빈 측에서 압력을 제어할 때 바이패스 밸브는 자동모드에 있지만 약간 높은 압력의 설정치로 대기하는 것은 갑작스런 압력 증가에 대비하는 것이며, 압력이 급상승하면 바이패스 밸브가 열린다.



<그림 38> 증기터빈 기동시 밸브 압력제어

⑩ S/T 출력 증발(부하 설정치 증가)

IPC 및 APC에 의해 압력 제어가 증기터빈 제어시스템 DCM+로 옮겨가면, DCM+의 Load Set가 100%까지 증가한다. DCM+는 IPC와 부하제어 신호 중 적은 값으로 밸브를 제어하므로 증기 증발량이 증가하면 터빈 제어밸브가 열리면서 출력이 증가한다. 이때부터 DCM+는 증기 압력을 정격으로 유지하면서 증기터빈은 가능한 최대 출력을 낸다.

⑪ 증기터빈 금속온도 매칭(Matching)

IPC에 의해 고압 증기압력을 유지하고 있는 상태에서 증기터빈의 출력을 증가시키기 위해서는 개스터빈 출력을 증가시켜야 한다. 그러나, 이때 증기터빈은 로터와 케이싱의 상대팽창(Differential Expansion)을 감시해야 한다. 상대팽창이 한계를 벗어나면 Rubbing 및 진동의 우려가 있으므로 일정치를 벗어나면 개스터빈의 출력을 Holding한다. 상대팽창이 감소하면 개스터빈의 출력을 Base 부하까지 증발한다. 냉간기동의 경우 증기터빈 금속 상대팽창 증가에 따라 수 시간 씩 출력이 Holding되는 경우가 있다.

⑫ G/T, S/T Base Load로 출력 증발

증기터빈 금속온도 매칭이 완료되어 개스터빈 출력이 증가하면 이어서 HRSG 증발량이 증가하고 IPC에 의해서 터빈 제어밸브가 계속 열리면서 증기터빈 출력이 증가한다. 약 30% 부하가 되면 터빈 제어밸브가 완전히 열리며, 이 때부터는 고압 증기압력이 증가하면서 발전기 출력이 증가한다.

개스터빈 출력 변화에 따른 증기터빈의 출력 응답은 약 20~30분간 지연된다.

이 때부터, 증기터빈은 입구압력제어(IPC) 상태에서 개스터빈 배열에 의해 HRSG에서 발생된 증기를 모두 발전에 이용하게 된다. 개스터빈 출력이 중간부하 이하로 되면 증기터빈 제어밸브가 조정되어 고압 증기 압력을 정격으로 유지한다.

(2) 복합사이클 자동정지

모든 제어요소를 자동모드에 설정하고, “복합사이클 정지(Steam Cycle Stop)” CRT 버튼을 클릭하면 플랜트 전체가 최적으로 프로그램된 조건과 시간경과에 따라 Auto Sequence 로직에 의해 정지된다.

복합 사이클 발전소에서 전자동화 로직에 의한 자동 순서의 예는 다음과 같지만, 복합 플랜트 구성방식에 따라 약간의 차이가 있을 수 있다.

① 개스터빈 출력 감발

Auto Sequence는 Mark IV에 지령을 내려 배기 온도가 548°C 미만이 되도록 개스터빈 출력을 감발시킨다. 이것은 다음 단계에서 증기터빈 출력이 감발될 때 증기온도를 정격으로 유지하기 위한 것으로써, 이 온도가 너무 낮게되면 터빈급속온도가 저하되어 다음 기동시 급속온도 Mismatch로 인해 기동이 지연될 수 있다.

배기온도가 548°C 미만이 되면 다음 단계로 넘어간다.

② 증기터빈 자동정지 및 댐퍼 폐쇄

Auto Sequence는 DCM+에 지령을 내려 증기터빈

을 자동정지 시키며, DCS 내부 로직으로 연소개스 전환댐퍼를 완전히 닫는다.

DCM+는 자동정지 모드가 되면 부하 설정치를 급격히 감소하여 출력을 감발하고 발전기를 계통병해한다.

연소개스 전환댐퍼 Closed 신호가 들어오면 다음 단계로 진행된다.

③ 증기밸브 차단

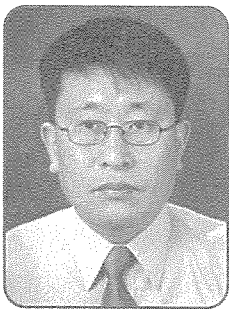
DCS 로직에 의해 HRSG의 고압, 중압, 저압증기 차단 전동밸브와 고압, 중압, 저압 드럼 연속 블로우다운 밸브를 완전히 닫는다.

앞 단계에서 이루어진 증기터빈 자동정지에 의하여 증기터빈 주증기 차단밸브(MSV) Closed 신호가 들어오면 다음 단계로 진행된다.

④ 개스터빈 자동정지

Auto Sequence는 Mark IV에 지령을 내려 개스터빈을 자동정지 시킨다. 자동정지 모드가 되면 Mark IV는 출력을 감발하고 무부하에서 발전기를 계통 병해한다.

발전소 터빈 케이싱 체결용 고온볼트재의 탄·소성 파괴인성



한전기공(주)
G/H 정비센터 기술팀
공학박사 김문영
Tel : (032)580-8255

1. 서론

가스터빈, 화력 및 원자력에서 사용되는 터빈부품은 일반적으로 안전성을 고려하여 대부분 연성이 강

한 고인성 재료를 사용하고 있다. 특히 고온·고압상태에서의 두 요소의 체결력 유지를 위하여 사용되는 볼트는 더욱 그렇다. 따라서, 이러한 체결볼트는 소성화 경향이 강하게 나타나고, 고온에서는 항복강도가 상온에서 보다 저하되며, 장시간 사용에 의한 열화 및 손상을 받게 된다.

특히, 최근 발전설비의 수명연장이 대두되면서 각종 부품에 대한 손상평가 및 수명예측 진단기법의 개발에 대한 관심이 고조되어 있으며, 설비의 안전사용 및 경제적 운영의 필요에 따라 장기간 사용된 체결볼트의 손상 평가나 잔여 수명평가가 중요한 문제로 대두되고 있다.^(1,2) 체결 볼트가 받는 손상은 주로 크립과 피로손상으로 대별할 수 있고, 이들 손상의 해석