

도록 하여 제어성을 향상시킨다.

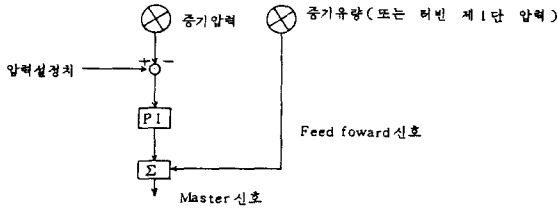


그림 2 증기압력 제어도

2-1-2. 공기 제어

보일러의 저공기 과잉을에 의한 연소는 배기게스의 열손실을 저하시키고 보일러 효율을 향상시키며, 배기 개스중의 O₂ 량이 줄어들어 보일러 저온부 금속의 부식을 억제하며, 공해요소인 NO_x, SO_x 생성을 억제하는 등 효과가 크다.

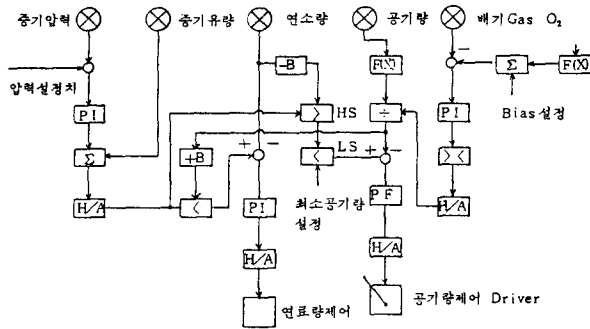


그림 3 연소제어 계통도

저공기 과잉을 제어는 그림 3에서와 같이 항상 공기량이 부족하지 않도록 저신호 선택기 (LS) 및 고신호 선택기 (HS) 를 두어, 부하 증가는 공기량 증가를 선행시키고, 부하 감발시는 역으로 연료량의 감소를 선행제어 한다.
즉 Air Rich 회로를 채용하고 있다.

2-2. 급수 제어

그림 4는 드럼형 보일러의 드럼수위, 증기 및 급수 유량으로 이루어지는 3요소식 급수제어 방식을 보여준다. 급수제어는 증기유량의 변화(부하 변화)에 대하여 급수유량을 제어하고, 드럼수위를 설정수위와 비교, 그 편차에 의해 보일러로 공급되는 급수량을 제조정 하는 데 있다.

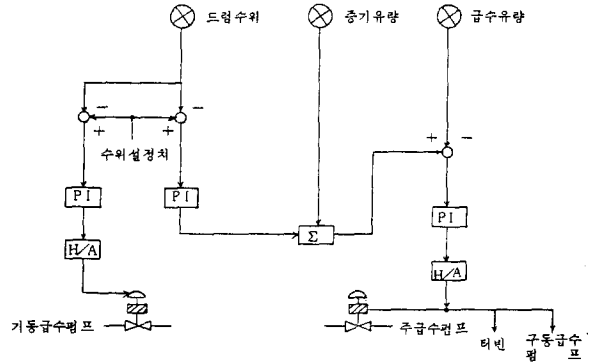


그림 4 3요소식 급수제어 계통도

급수펌프는, 전동기구동 펌프와 터빈 구동 펌프 2종류가 있으며 전동기구동 펌프는 기동시 또는 저부하시, 터빈 구동 펌프는 정상 운전시에 급수량을 공급한다. 각각의 급수펌프에는 유량제어기가 있어 각 급수량을 Feed Back 제어한다.

2-3. 증기온도 제어

2-3-1. 주증기 온도제어

주증기 온도 제어계에서는 설정온도에 대하여 실제 증기온도의 편차를 검출하여 PID 제어를 한다.

그러나 증기온도 제어는 응답이 늦기 때문에 온도 편차에 의한 제어로서는 증기온도를 규정치로 유지하기가 어렵으므로 이를 그림 5에서와 같이 증기온도의 변화 지표가 되는 증기유량 (또는 공기유량) 을 더하고, 감온기에서 감온된 증기가 2차 과열기를 통과하는데 걸리는 시간지연을 고려하여 2차 과열기 입구온도를 검출, 미분하여 이 온도 변화율을 취하여 감온기를 제어한다.

그리고 보일러 부하가 증가하면 출구 증기온도가 상승하는 특성이 있기 때문에 부하에 비례하는 신호를 주어 감온기의 Spray 밸브 제어할 필요가 있다.

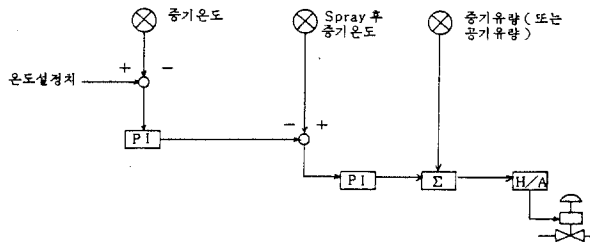


그림 5 주증기 온도 제어도

2 - 3 - 2. 재열증기 온도 제어

재열기 출구온도를 규정치내로 유지 하기 위하여 연소 개스 재순환량, 버너 Tilt, 개스분배 Damper 및 재열증기 Spray 를 조절하는 방식등을 병용하고 있다. 재열기 출구온도 편차를 없애기 위해서는 먼저 버너 Tilt 를 제어하고, 버너 Tilt 가 규정 위치에도 도달하면 개스 재순환 및 개스 분배 Damper 제어가 이루어지고 최종적으로 재열증기 Spray 밸브로 제어되어 재열증기 온도를 제어하게 된다. 즉, 재열증기 Spray 밸브는 재열증기 온도가 계속 상승하여 개스 재순환량, 버너 Tilt 및 개스분배 Damper 등 연소 개스측에서 재열기 출구온도를 내릴 수 없는 제어상의 한계에 도달할 때 사용한다.

3. 터빈제어

터빈 조속기는 터빈의 부하변동에 따라 그 속도 및 출력을 제어한다. 터빈에 유입되는 입력 조건이 일정할 때 부하가 변하면 터빈의 회전수가 변하게 된다. 따라서 회전수를 일정 변동폭 이내로 조정하기 위하여 속도변화를 검출하여 입력량을 가감하는 조속기를 Hardware 측면에서 분류해 보면 기계 유압식, 전기 유압식 및 전자 유압식으로 분류된다. 여기서는 전자 유압식(EHC : Electronic Hydraulic Control) 으로 된 증기터빈 조속기에 대하여 논하고자 한다.

3 - 1. EHC 의 구성

EHC 계통은 증기 조절밸브 (GV), Inter Cept 밸브 (ICV) 등의 주증기 유입을 가감하는 제어부와 터빈의 위험상태를 검출하여 터빈을 정지시키는 보호부로 구성되어 있다. 제어부는 그림 6에서와 같이 속도제어, 부하제어 및 밸브위치 제어로 나

누어진다.

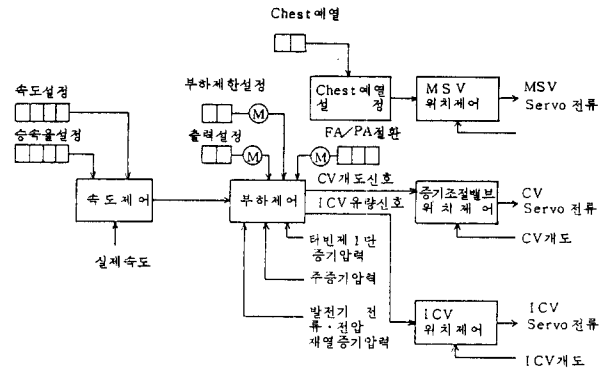


그림 6 EHC 제어연산부 계통도

3 - 2. 속도 제어

속도제어는 속도설정치와 실속도와와의 편차, 승속율 설정치와 실제 승속율과의 편차를 연산하여 부하제어부로 출력한다. 그리고 부하제어 회로는 입력된 속도편차 신호와 출력설정신호 및 부하 제한신호에 의하여 증기조절 밸브개도를 조작하는 신호와 ICV 유량 신호를 연산하여 내보낸다.

또한 밸브위치 제어는 부하제어로부터의 개도 및 유량지령 신호를 취하여 실제의 밸브개도와와의 편차신호를 연산하여 밸브개도를 조정한다.

속도편차 신호와 승속율편차 신호는 저가우선 선택회로 (LVG) 에 입력된다.

터빈의 속도를 승속시킬 경우, 승속율편차 신호가 낮으므로, LVG 의 출력은 승속율 편차 신호가 되고, 터빈은 승속된다. 그리고 터빈의 속도가 설정치에도 도달하면 속도편차 신호가 승속율 편차 신호보다 낮아져 LVG 는 속도편차 신호를 선택 터빈 속도를 일정하게 유지시킨다. 계통병입전 속도제어는 계통주파수에 발전 기속 주파수가 추종한다. 일단 계통병입이 되면 터빈의 속도제어는 속도편차 신호에 의해서만 제어된다.

3 - 3. 부하 제어

부하제어 운전방식에는 보일러 자동 제어계 (ABC : Automatic Boiler Control) 자동과 EHC 단독 운전이 있으며 양자간의 전환은 ABC 측의 조건에 의해 이루어진다.

EHC 단독 운전의 경우 부하제어는 부하설정기 또는 부하제한기를 조정함으로써 가능하며, ABC 자동운전시는 ABC 로부터 출력설정신호를 입력

해서 실제 출력설점치와 비교하여 그 편차신호가 "0" 이 되도록 출력설점기를 조정한다.

부하 제한설점기에 의한 부하제한 운전시는 부하 제한기에 의해서만 운전된다. 계통 병입전에는 EHC 단독으로 운전하기 때문에 병입시는 계통 병입전 속도 증감펄스에 의해서도 출력설점기를 증감하고 발전기 주파수를 계통 주파수에 추종시킨다.

증기 가압밸브 (GV) 의 유량조정을 제어하는 유량조정 신호는 부하제한 설점신호 및 자동추종 신호중에서 낮은 값을 선택하여 증기유량을 제어한다. 출력설점치는 속도편차 신호에 속도조정을 의역수를 곱한 신호를 가산하여 LVG 회로에 입력한다. 5% 조정을에서 100% 부하로 운전되는 경우, 터빈 속도가 105%로 되면 GV는 무부하 개도까지 닫힌다.

4. Plant 제어

4-1; Plant 제어 방식에는 보일러 추종 제어 터빈 추종 제어 및 터빈-보일러 협조제어 3가지로 구분된다. 보일러 추종 제어는 그림 7에서 보 여주듯이 부하추종성이 뛰어난 반면, 보일러가 불안하며, 터빈 추종 제어는 부하 추종성은 미흡하나 안정된 운전을 할 수 있다. 터빈-보일러 협조 제어는 2방식의 장점을 살린 운전방식이다.

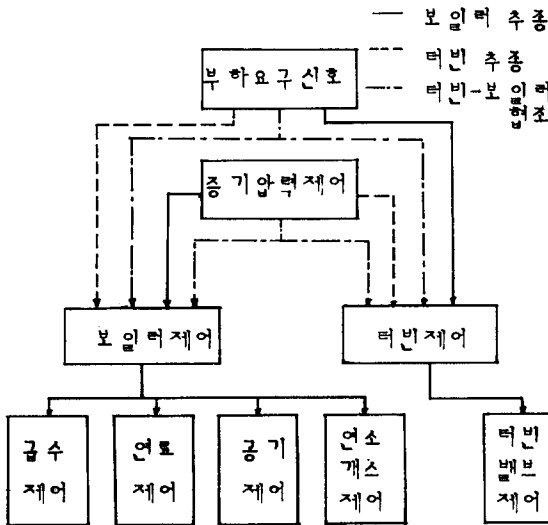


그림 7 Plant 제어도

4-2; 주파수 제어 : 주파수 제어를 위한 부하제어는 그림 2에서 보여주는 바와 같이 부하

변동의 크기에 따라

- 20분 이상의 장주기 부하제어는 ELD 운전
- 10분 내외의 주기는 자동 제어발전 (AGC) 운전
- 2분 이내의 단주기 변화는 Governor Free 운전
- 수십초 내의 단주기 변화는 기계적응동에 의해 부하제어를 하여 주파수를 유지시킨다.

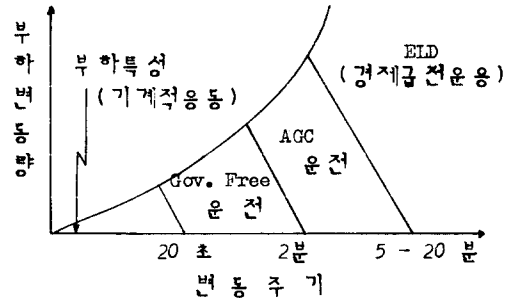


그림 8 제어분담 개략도

5. 조정시험 및 특성개선

5-1. 1983년에 전 발전소를 대상으로 시행한 주파수 변화에 대한 발전기 출력응동 상태의 실험 결과 결과를 근거로, 제어설비의 특성이 불량한 제어 설비를 재조정 시험하여 동특성을 개선하고 각 발전소 마다의 조속기 자동운전상태를 양호하게 하여, 응동부하 범위를 확력은 정격부하의 100 ~ 50%, 수력은 100 ~ 40% 까지 응동폭을 향상시키고자 한다.

표 - 1 : 조정항목 및 한계치

구분	항목	기준치			비고	
		수력	화력	원자력		
터빈조속기 계통	속도조정율 (%)	3	4~6	(8)		
	불감대 (Hz)	기계식	0.06	0.06	0.06	
		전기식	0.03	0.03	0.03	
	출력변동율 (%/Min)		중유:4.5 혼소:3.0			
	주파수변화에 대한 발전응동량 (% MW/0.1 Hz)	1.0	1.0	1.0	계통정수 10%/Hz	
보일러 제어계통	<ul style="list-style-type: none"> ○ 주증기 압력, 온도, 유량제어 ○ 드림수위제어 ○ 급수유량제어 ○ 연료유량제어 ○ 공기유량제어 ○ Smoke density 				운전허용 범위이내 유지	

5 - 2. 조속기 정수 계산

◦ 속도조정을 (S·R : Speed Regulation) : 각 부하별로 주파수 변화와 그 변화에 대한 발전출력 응답량을 측정하여, 주파수 변화분 (ΔF) 과 출력 변화분 (ΔP) 를 산정, 아래 공식에 의해 계산한다.

$$S \cdot R = \frac{\Delta F}{F_N} \div \frac{\Delta P}{P_N} \times 100(\%)$$

여기서 F_N : 기준주파수 (60 Hz)

P_N : 발전기 정격출력 (MW)

◦ 불감대 (D·B : Dead Band) : 주파수 변화에 대한 발전기 출력 응답 감도를 나타내는 수치로서 다음 공식에 의해 산정한다.

$$D \cdot B = \frac{\Sigma \Delta F}{N} \times \frac{1}{2} \text{ (Hz)}$$

여기서 ΔF : 임의 출력에서의 출력증가시와 감소시의 주파수 편차 (Hz)

N : 측정횟수

◦ 출력 경사 변동율 (P·S : $\% \text{ MW / Min}$) : 속도조정을 산출점에서의 단위 시간당 (Min) 의 출력 변동량 (ΔP) 을 정격출력에 대해 %로 산출한 것이며 아래식에 의하여 산출한다.

$$P \cdot S = \frac{\Delta P}{\Delta T \cdot P_N} \times 100(\%)$$

여기서 ΔP : 출력 변동량 (MW)

ΔT : ΔP 가 변하는 데 소요되는 시간 (Min)

P_N : 발전기 정격출력 (MW)

◦ 주파수 대부하응답량 (P·F ; $\% \text{ MW / 0.1Hz}$) : 속도조정을 산출점에서 계통의 주파수 0.1Hz 변화에 해당하는 출력 변동량을 산출한 것으로 다음과 같이 계산한다.

$$P \cdot F = \frac{\Delta P}{\Delta F} \times \frac{0.1}{P_N} \times 100(\%)$$

여기서 ΔF : 주파수 변동량 (Hz)

ΔP : 출력 변동량 (MW)

5 - 3. 보일러 자동 제어계 특성 조정시험

5 - 3 - 1. 보일러 제어계의 최적조정

화력발전소 제어는 설정치가 정해지면 그 설정치는 거의 변경되지 않는 정치제어가 사용된다.

제어계의 외란은 부하변동이라고 볼 수 있으며

제어계에 외란이 발생되었을 때 제어량이 설정치에 따르도록 조절기의 조정량을 가감하여 최적제어가 되도록 한다. 최적제어 조건은

- 제어면적이 최소 (그림 9 - a)
- 정정시간은 짧게 (그림 9 - b)
- 과도응답에서 첫 Cycle의 첨두치에 대한 두번째 Cycle의 첨두치 비가 1/4 또는 1/e 이내에 들도록 한다. (그림 9 - c)

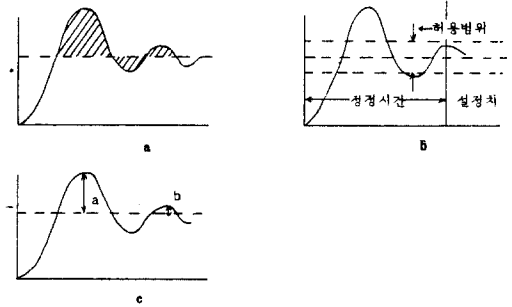


그림 9 제어계의 응답특성

5 - 3 - 2. 과도응답에서의 최적조정

보일러 제어계에 계단상 입력을 주었을 때 PID 조절기의 이득 (K_P), 적분시간 (T_I) 및 미분시간 (T_D) 을 각 제어부별로 최적조정하여 전술한 제어조건을 만족하도록 한다. 이러한 조정방법은 또는 표-2 에 주어지는 Ziegler - Nichols 의 실험식에 주로 따른다.

표 - 2 : PID 조절계수

제어기	이득	K _P	T _I	T _D
P		1 / RL		
PI		0.9 / RL	3.3 L	
PID		1.2 / RL	2.L	0.5 L

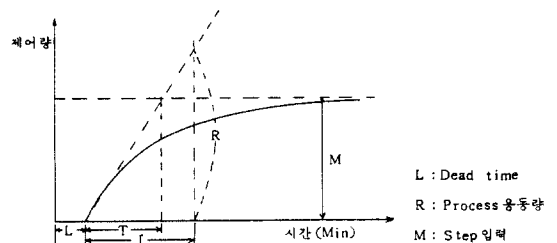


그림 10 1차지연 요소를 갖는 Process 응답

1-1. 기기의 전달함수 $G = K_p (1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S)$

보 주어지며

1차 지연요소인 경우 전달함수,

$$G_2 = \frac{R}{\frac{R}{M} + S} \cdot e^{-Ls} \text{ 이고, } \frac{R}{M} = \frac{1}{T} \text{ 이므로}$$

$$G_2 = \frac{RT}{1 + TS} \cdot e^{-Ls} \text{ 가 된다.}$$

그리고 고차원 지연요소를 갖는 경우는 그림 10과 같은 응답특성곡선을 그려 1차 지연요소에 근사시켜 R 과 L 을 구하여 Ziegler - Nichols 방법을 적용시킨다.

5-3-3. 보일러 동특성 시험

부하를 계단상으로 변화시켰을 때와 경사변화를 주었을 때, 급수유량, 증기유량, 연료 및 공기량 그리고 개스재순환량 등이 잘 제어되어,

- 드럼수위
- 증기온도
- 증기압력
- 노내압

등의 변동량이 운전허용 범위내에 들도록 제어계를 조정한다.

6. 결 과

6-1. 화력 발전소

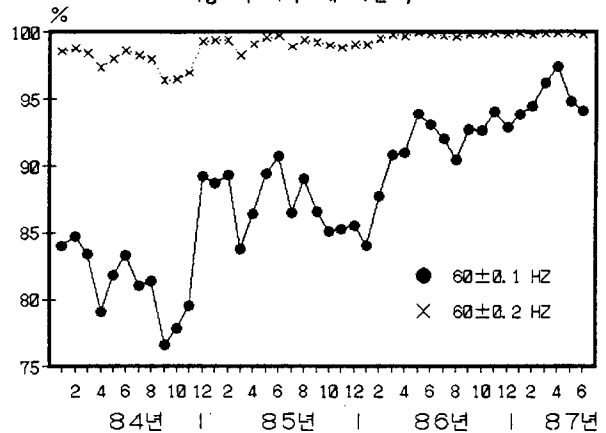
인천화력 제 1호기와 16개 Unit 의 발전소에 대한 Governor Free 운전 및 동특성 시험 (Load Swing Test) 을 통하여, 보일러 자동제어계의 동특성 개선과 제어설비의 개조·개선, 터빈 조속기의 성능을 개선함으로써 불감대를 줄이고 속도 조정율의 최적설정, Governor Free 운전가능 범위의 결정 및 각 발전소별로 부하변동을 설정하고, 설비상 운전한계내에서 계통 주파수 변화에 대해 발전기 부하응동량을 최대화 하였다.

6-2. 수력 발전소

팔당수력 제 1호기를 포함한 11개 Unit 에 대하여 부하변 Governor Free 운전시험과 조속기의 분해점검을 통하여 성능을 개선하였고, 계통 주파수 변화에 대한 출력 응동량이 최대인 부하를 선정하여 운전하게 하고, 설비의 노후 및 특성상 Governor Free 운전이 불가능한 발전소에 대해서는 자동제어발전을 할 수 있도록 회로를 변

경하였다.

6-3. 계통 주파수 유지실적도



7. 결 론

우리나라 발전제어 설비는 매우 다양하며 제어 특성 또한 설비만큼 다양하며, 설비의 진단, 조정 시험 및 개조 개선에 많은 시간을 요하고 있다.

거의 모든 발전소는 에너지자립과 경제성만을 고려하여 부하 추종성이 불량한 기저부하 (Base Load) 용으로 건설되었으며, 더구나 부하주파수 제어성이 없는 원자력 발전에 의한 전력공급이 50%를 넘고 있다. 본 프로젝트를 시작하기 전 주파수 유지실적 (60 ± 0.1 Hz) 이 약 80%에 머물렀었다. 연구가 시작되면서 대응량 유연한 발전소의 제어설비 개조, 개선 및 동특성 개선으로 Governor Free 운전, 일일정지 - 기동, 주압정지 등의 운전책, 수력발전소의 조속기 성능 개선에 따른 Governor Free 운전 및 AGC 운전 부하범위의 확대로 1987년 6월말 현재 주파수 유지실적이 약 97%에 이르고 있으며, 1990년대는 선진국 수준의 60 ± 0.05 Hz 이내의 편차로 양질의 전력을 공급할 수 있으리라 본다.