

화력발전소 부하조절기 자동추종장치에 의한 계통주파수 개선에 관한 연구

Improvement in Power System Frequency Control by Automatic Follow-up Regulator of Thermal Power Plant

權 旭 鉉* · 黃 載 皓**
(Wook-Hyun Kwon · Jae-Ho Hwang)

요 약

이 논문은 발전소 부하조절기 자동추종장치에 의한 전력계통주파수 개선에 관한 것이다. 전력계통 주파수는 어떠한 부하 변화나 발전소 및 계통에서의 외란에서도 일정하게 유지되어야 한다. 기저 부하나 중간부하에서의 발전소 출력은 급전지시에 의해 유지 되지만, 일정 출력 상태에서의 미소한 주파수 변화는 발전소 운전상태에 의해 결정된다. 주파수 변화에 대응하여 출력이 제한된 범위내에 움직이게 하고, 그 제한된 범위에 신속성을 부여하는 부하조절기 자동추종장치를 고안 함으로 주파수 특성을 개선토록 하였다. 계통에서 발전소 제어가 계통주파수 변화에 미치는 영향이 함께 고찰되었으며 삼천포화력 발전소에 실제로 적용한 효과를 보였다.

Abstract- An improved control method in turbine control system is proposed. By automatic follow-up design, power system frequency may be maintained within prespecified range. Base or half load control is possible by distributing power plant load allotment. Otherwise, diminutive frequency-load control is done by governor-free operation in power plant. This paper proposes governor-free operation which is automatically followed by load-limiter setter. The condition which limits governor action may be somewhat improved within boiler condition by this idea. This design has been implemented at Samchunpo thermal power plant. The improved practical results are shown.

*正 會 員 : 서울대 工大 制御計測工學科 教授 · 工博

**正 會 員 : 韓電技術研究院 先任研究員
接受日字 : 1990年 4月 3日
1次修正 : 1990年 11月 22日
2次修正 : 1990年 12月 3日

1. 서 론

전력계통 주파수 일정 제어는 계통운용 뿐만 아니라 발전소 운전제어 측면에서도 대단히 중요하다. 수, 화력, 원자력 발전소는 부하상태에 따라

경제적부하 분담을 지게 되는데, 미세한 주파수 변화에 응동하는 발전소 출력은 각 발전소의 주파수-출력 운전에 의해 결정된다. 이러한 부하 추종 운전은 발전 방식에 따라 다양하나, 화석 연료발전소 보일러를 채택한 화력발전소의 경우는 터빈 제어방식과 함께 보일러의 안정성을 고려해야 한다. 왜냐하면 터빈에 의한 주파수-출력(MW)제어의 한계는 보일러의 제반 조건과 터빈의 동특성에 의해 결정되기 때문이다.

조속기응동운전 하에서의 부하추종운전은 터빈 출력을 미리 정해진 부하대에서 유지 시킨후-이는 주어진 출력조건에 의해 보일러 안정된 상태를 이루었을 때를 의미 하는데-부하제한기에 의해 제한된 출력 이하에서 터빈 조속기가 주파수 변화를 검출하여 속도조정유에 따른 속응성을 갖고 미리 정해진 (60HZ)주파수를 유지하도록 터빈출력을 제어한다.

그러나 현재까지 국내에서 시행되고 있는 발전소의 부하 추종운전은 조속기응동 하에서 계통주파수를 벗어나 급감하는 경우, 보일러 안정성을 지나치게 우려한 나머지 조속기의 추종성이 부하 제한기에 의해 불합리하게 제한됨으로 효과적인 주파수 추종제어가 이루어지지 않았다. 이때 보일러의 안정성을 보장하면서 부하제한기 동작에 신속성을 부여한다면, 보다 양질의 전력 공급은 가능하게 된다. 따라서 본 논문에서는 보일러의 안정성을 고려하는 동시에 부하제한기의 조속기응동 한계치를 추종시키는 부하조정기 자동 추종장치(A.F.R. Automatic Follow-up Regulator)연구 개발하고 실제로 삼천포 화력발전소 터빈제어 계통에 적용시켜, 조속기 응동성을 향상시켜 계통주파수 개선을 도모한 결과를 보였다. 그와같이 하기 위해, 먼저 보일러 안정조건과 터빈 동특성을 포함한 보일러-터빈 특성시험을 실시하여 부하제한기의 추종폭과 추종율을 산출하였고 터빈 모델링을 실시, 터빈시뮬레이터를 개발하였으며 A.F.R장치를 설계, 제작 및 터빈시뮬레이터와 연결, 시뮬레이션 후 발전소에 설치 운영하고 있다.

2. A.F.R.에 의한 계통주파수 개선 효과

출력의 증감발은 급전지시나 운전원에 의해 이루어지고 부하제한기 운전이나 조속기응동 등의 운전 Mode은 운전상태를 고려하여 운전원이 선택한다. 출력의 증감발 시나 일정 부하 유지를 위해서는 부하 제한기 운전을 하고, 부하 추종을 위해서는 조속기 응동 운전을 하는데, 이때 부하 제한

기는 조속기 응동 상한을 제한한다[1].

2.1 A.F.R.형태(MODE)

A.F.R.은 아래의 두 형태에 의해 터빈출력을 제어한다.

2.1.1 조속기 형태

조속기 Mode는 부하제한기가 조속기 응동량의 상한폭 만큼 추종토록 한 형태로서 장치의 출력값들은 식(1)~(4)과 같이 정의한다.

$$p = \min(p_G, p_L) \tag{1}$$

$$p_L = p_G(1 + \alpha(1 - \beta)) \tag{2}$$

$$p_G = p \cdot \text{If } P_G < P \tag{3}$$

$$|p - p_s| < p_i \tag{4}$$

이는 부하제한기가 조속기응동에 상한치를 갖고 추종하는 것으로 계통 주파수 급감에 따른 주증기 제어 밸브의 과도한 개로(OPEN) 동작을 추종함에 따라 제한하여 보일러의 안정성을 보장하면서 주파수 변화에 의한 터빈출력에 속응성을 갖게 한다.

2.1.2 부하제한기 형태

부하제한기 Mode는 주파수 변화와 무관하게 일정출력을 유지하는 형태로서 장치의 출력값들은 식(5)~(6)와 같다.

$$p_L = p_s = p \tag{5}$$

$$p_G = p_L(1 + \alpha) \tag{6}$$

여기서,

P : 실제 출력값

P_G : 조속기 출력값

P_L : 부하제한기 출력값

P_s : 운전원 설정값

α : 추종폭

β : 조속기응동 속도와 부하 제한기 추종속도와 의 편차

p_i : 출력증감 제한치

이는 계통주파수와 무관하게 터빈출력을 유지하되 부하급감시 주증기 제어 밸브의 폐로(CLOSE) 시간이 불감대 만큼 지연되는 것을 감소시켜 터빈의 과속을 방지한다.

2.2 A.F.R. 추종율 및 추종폭 결정

추종율은 보일러의 안정성과 관련된다. 최적의 추종율은 보일러-터빈 특성시험에 의해 보일러의

안정도와 터빈의 동특성을 고려한 적정선에서 경험적으로 결정한다[3]. 추종폭의 상, 하한은 운전 경험에 의해 결정되며 터빈출력에 따라 운전원이 임의로 선택할 수 있도록 몇 가지 추종폭을 설정해 놓는다.

2.3 주파수 개선효과

A.F.R.에 의한 계통주파수 개선효과는 주파수 변화에 따른 터빈출력 변화량으로 가름할 수 있고 그 속응성은 경사속도조정율로 정해지며[3]응동량은 추종을 정도로 구해진다.

A.F.R.에 의해 조속기 신호가 제한되는 시점과 기존의 부하제한기 설정치가 일치한다고 가정할 때, A.F.R.장치에 의한 출력조정은 기존의 조속기 응동운전에 비해 식(10)과 같은 주파수 개선효과가 있다.

$$P_g = \int_{t_0}^{t_1} (P_C - P_L) dt + \int_{t_1}^{t_2} P_C dt - P_{Ls}(t_2 - t_1) \quad (7)$$

여기서,

- P_g ; 주파수 변화에 따른 응동출력 변화분
- P_{Ls} ; 운전원에 의해 설정된 부하제한기 출력 제한값(기존의 방식)
- $t_0 \sim t_1$; A.F.R.에 의해 P_L 이 P_C 보다 낮은 부하 추종 운전시간
- $t_1 \sim t_2$; 기존의 P_{Ls} 에 의해 P_{Ls} 가 P_C 보다 낮은 운전시간

(식 7의 유도과정)

시간 $t_0 \sim t_2$ 사이에 A.F.R.에 의한 조속기응동 운전을 한 경우의 주파수 변화에 따른 출력변화는 그림 1(c)와 같으며 기존의 부하제한기 운전에 의한 조속기응동에 따른 출력변화는 그림 1(d)와 같다.

두 경우의 응동출력 변화분의 차는 다음과 같다.

시간 t_0 이하나 t_2 이상에서의 출력응동은 동일하며 시간 $t_0 \sim t_2$ 에서는

i) A.F.R. 운전의 경우

$$\text{응동출력} = \int_{t_0}^{t_1} (P_C - P_L) dt + \int_{t_1}^{t_2} P_C dt \quad (8)$$

ii) 기존의 부하제한기 운전

$$\text{응동출력} = P_{Ls}(t_2 - t_0) \quad (9)$$

iii) 주파수 응동출력분

$$P_g = \int_{t_0}^{t_1} (P_C - P_L) dt + \int_{t_1}^{t_2} P_C dt - P_{Ls}(t_2 - t_1) \quad (10)$$

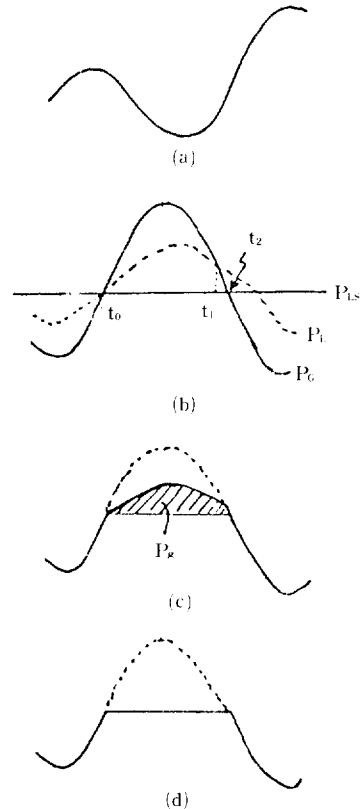
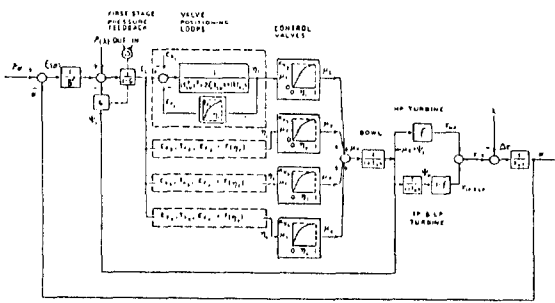


그림 1 A.F.R.에 관한 주파수응동 출력변화
 (a) 주파수 변화 (b) 부하추종 운전
 (c) A.F.R.운전 (d) 기존의 부하제한기 운전
Fig. 1 The MW variation when governor-free operation by A.F.R.
 (a)Frequency variation (b)Governor-free operation (c) A.F.R. operation (d) Load limiter operation

3. 자동추종장치의 설계 및 제작

- 설계 및 제작은 다음의 몇 단계로 진행되었다.
- 보일러-터빈 특성시험 : 조속기응동 운전범위, A.F.R.추종율 및 추종폭 선정
 - 터빈제어 모델링 ; 시뮬레이터 개발
 - 시뮬레이터 개발 및 제작
 - A.F.R.설계, 제작 ; 터빈제어신호 형성 아나로그 부 시퀀스 처리용 PLC구현, 기존 터빈제어설비에의 추가설치에 따른 신호 변환, 아나로그 및 PLC의 BACK-UP기능
 - 시뮬레이션



- ρ_A = load reference
- σ = speed
- σ' = speed regulation
- G = gain of first-stage pressure feedback
- Ψ_1 = first-stage pressure
- E_L = total flow signal
- ζ = damping factor
- T_{A_i} = integration time constant of actuator i
- E_{B_i} = bias signal of valve i
- T_{S_V} = servovalve time constant
- T_R = reheater time constant
- μ_i = valve flow
- τ = driving torque
- T_4 = turbine time constant
- T_3 = bowl time constant
- η_1 = valve lift
- f = fraction of total power
- K_{V_i} = per unit maximum flow of each individual control valve
- μT = turbine steam flow
- μV = total valve flow

그림 2 터빈제어계통 모델
Fig. 2 Turbine control system model

3.1 터빈 제어계통 모델링

보일러, 터빈의 특성시험에서 얻은 데이터와 제어회로 해석에 의해 터빈제어 계통을 모델링하고 A.F.R.장치 동작시험을 위한 시뮬레이터를 구성한다. 그림 2는 이 논문에서 적용한 삼천포 화력발전소 터빈 제어계통의 모델이다. (이 모델은 제작 회사에서 제시한 자료를 기초로 한 것임 (4)(5)(6))

3.2 시뮬레이터(SIMULATOR)

시뮬레이터는 삼천포화력발전소 제2호기 터빈제어계통과 A.F.R.과의 시뮬레이션용으로서 IBM/AT와 대형 PLC를 사용하여 그림 3과 같이 구성하였다.

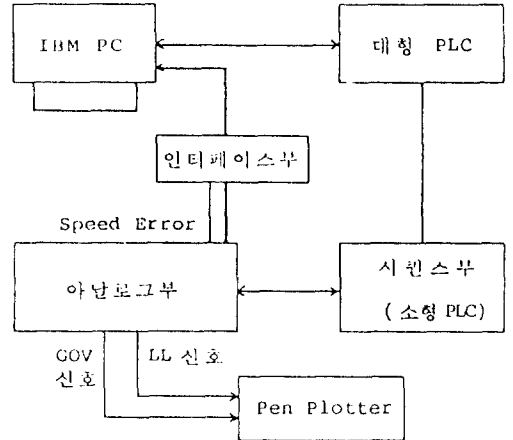


그림 3 터빈제어 시스템 시뮬레이터
Fig. 3 Turbine control system simulator

3.2.1 기본 적용 알고리즘

아나로그 회로의 기본 구성요소는 역전소자, 적분기, 합산기, 증폭기 및 비선형소자 등이다. 정상 동작 중에는 비선형소자를 적분기의 형태로 간주할 수 있으므로 시뮬레이션 프로그램의 대부분 내용은 적분 요소를 해석하는 미분방정식을 푸는 부프로그램을 요한다. 시뮬레이션 아나로그회로 프로그램에서는 RUNGE-KUTTA방법을 사용하였으며 정확성을 기하기 위해 4차 접근 방법을 사용하였다.

3.2.2 아나로그 회로 시뮬레이션

프로그램 아나로그 시뮬레이션을 위한 프로그램은 전체적인 아나로그 회로시뮬레이션, 부분 및 외부 입출력 연결 부분, 주요 상태 변수의 화면처리 부분, 그리고 화면 상태 변이를 위한 키 입력 처리 부분으로 구성된다.

(1) 전체 아나로그 회로 시뮬레이션

이 부분은 속도제어부, 부하제어부, 밸브제어부, 및 터빈 로타부로 구성되는데 그림 2의 모델로 구한다. 밸브제어부 신호에 의해 최종 터빈출력이 얻어진다.

(2) 외부 PLC와의 신호 연결

부하제어부의 LOGIC시뮬레이터인 대형 PLC의 신호 입출력회로

— 입출력신호

대형 PLC출력(SIMULATOR입력) : 추종율 설정, 추종상태 시작 LOGIC

대형 PLC입력(SIMULATOR출력) : 부하제한

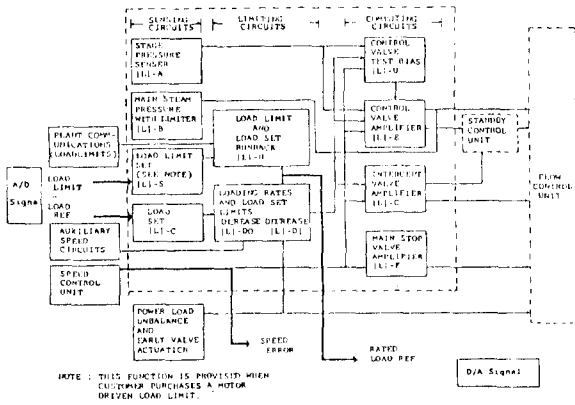


그림 4 터빈출력제어 부분
Fig. 4 Turbine MW control part

신호와 조속기 신호의 변화추이
터빈 속도오차 신호

— 운전 MODE, 아나로그 회로 입출력 상태, 속도 오차 상태, 부하제어부의 LOGIC, 부하제한 신호와 조속기 신호와의 BIAS 상태

- (4) 화상 상태변이 용 키 입력 처리
- (5) 터빈출력 제어

아나로그 회로와 내부 시퀀스로 구성되며 대형 PLC와의 입출력과 시뮬레이션 결과에 의해 동작 (그림 4). 해석 프로그램은 터빈제어 시스템의 전체 동작을 추적하는 전체 프로그램과 직접 시뮬레이션 대상이 되는 일부만 효율적으로 추적하는 전문 프로그램의 두 가지의 별도 프로그램으로 구성된다(부록 참조)

- (6) 시뮬레이션 과정

그림5와 같이 시뮬레이션을 진행한다.

3.2.3 시퀀스 시뮬레이터

A.F.R. 장치의 동작과 관련있는 터빈제어 시퀀스 동작을 대형 PLC로 구현하여 아나로그 시뮬레이터와 연결, 시퀀스 신호의 입출력을 도모.

— 시퀀스 동작

기준부하 설정, 터빈출력 제한, 터빈출력 증감발출, A.F.R. 동작을 위한 발전소 운전상황(MAS-TER TRIP, PLU, SETBACK)

3.3 A.F.R. DESIGN

A.F.R.은 아래와 같이 크게 다섯 부분으로 되어 있다.

- (1) 조속기 제어부: 기준부하 설정, 추종율 조정, 부하추종 제어부의 입력신호 생성
- (2) 부하 제한부: 부하제한치 설정, 추종율 조

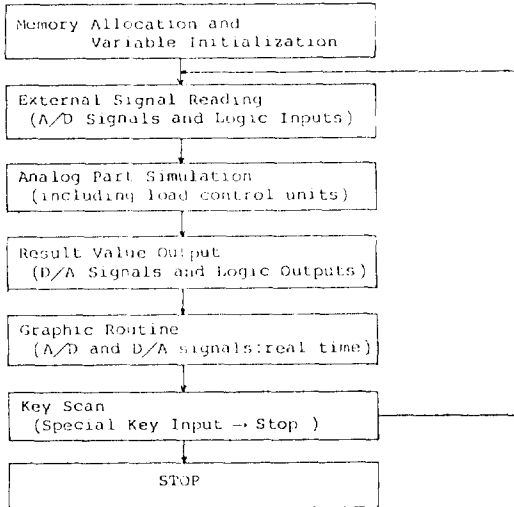


그림 5 시뮬레이션 과정
Fig. 5 Simulation procedure

신호에 대한 기준부하설정 신호의 상한값 설정
A/D변환: 부하제한 신호, 기준부하 설정 신호
D/A변환: 터빈 속도오차 신호, 부하 증감발출 설정 신호

(3) 상태변수들의 화상처리
시뮬레이션의 주요 변수 및 아나로그 회로의 제어 상태변수들의 실시간 화상처리

— 화상 내용

화면 그래프: 부하제한 신호와 부하 증감발출 설정 신호의 변화추이 부하제한

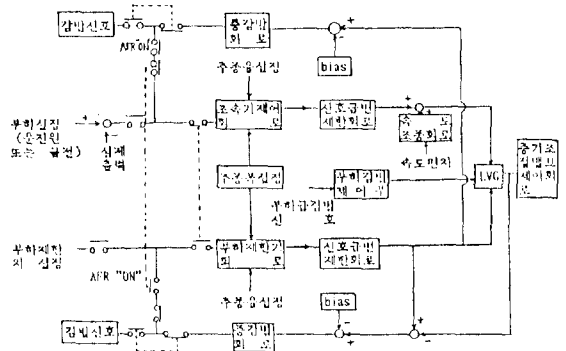


그림 6 A.F.R. 개념도
Fig. 6 A.F.R. Idea

- 정, 부하추종 제어부의 입력신호 생성
- (3) 부하추종 제어부: 추종폭 조정, 추종율 조정, 신호 감발, Mode의 절환, 부하 급감발 검출, LVG(Low Valve Gate)에 의한 신호 선택, 제어밸브 증폭회로의 협력신호 제공
 - (4) 논리 및 시퀀스부: PLC에 의해 논리 및 시퀀스를 구현.
운전 MODE의 결정(Governor/Load-Limiter Mode) 및 Bumpless절환, A.F.R. "ON"/"OFF"기능, 부하설정에 따른 EHC System과의 신호처리
 - (5) 디지털 BACK-UP부: A.F.R.회로의 이상상태를 검출하여 주증기 제어 밸브 구동 신호를 그 상태에서 유지시켜, 오동작에 의한 위험 과급 방지

3.4 시뮬레이터 및 시뮬레이션

A.F.R.의 동작 테스트를 위해 그림 7과 같이 구성한다. 그림 8은 A.F.R.장치와 시뮬레이터이다. 시뮬레이션을 통한 A.F.R.동작 확인은 다음과 같다.

- MODE 운전 (조속기MODE, 부하제한기MODE)
- 각종 시퀀스 동작
- 추종상태
- 터빈 출력 변동
- MODE간 무교란 변환(BUMPLESS TRANSFER)
- 현재 출력에 비례하는 추종폭

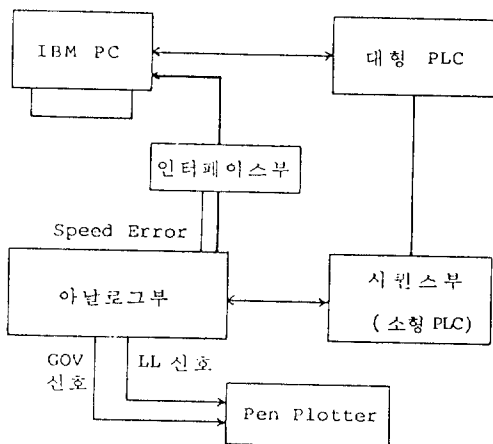
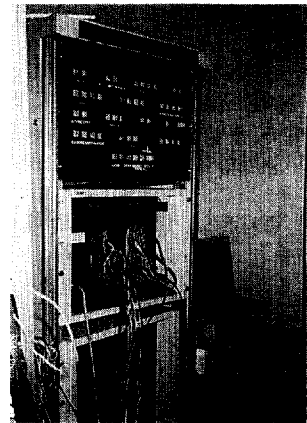
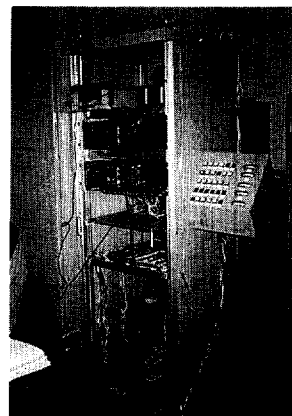


그림 7 모의시험장치 구성도
Fig. 7 Simulator block diagram



(a) 터빈제어 시뮬레이터
(a) Turbine control simulator



(b) A.F.R.장치
(b) A.F.R. device

그림 8 터빈제어 시뮬레이터 및 A.F.R.장치
Fig. 8 Turbine control simulator & A.F.R. device

4. 결 과

이 결과는 삼천포 화력 발전소의 주파수-출력 응답 터빈제어에 관한 것으로 자동 추종 장치에 의한 개선 효과를 보였다. 삼천포화력 발전소의 보일러, 터빈 사양은 표1과 같다.

*보일러-터빈 특성 시험 결과에 의한 추종율은

표 1 보일러 터빈 사양.

Table 1 Boiler/turbine spec.

<p>보 일 리</p> <ul style="list-style-type: none"> · TYPE: CONTROLLED CIRCULATION RADIANT REHEAT · 최대 연속 증발량 : 1,796,608kg/Hr · 정격시 증기압력 : 177.9kg/Cm²(과열기 출구) · 정격시 증기온도 : 540.6°C(과열기 출구) · 통 풍 : 평행 통풍 · 연 료 : 유연탄 연소 	
<p>터 빈</p> <ul style="list-style-type: none"> · TYPE: TC-4F 33.5" · 출 력: 560MW · 회전수: 3600RPM · 제작사: G.E 	

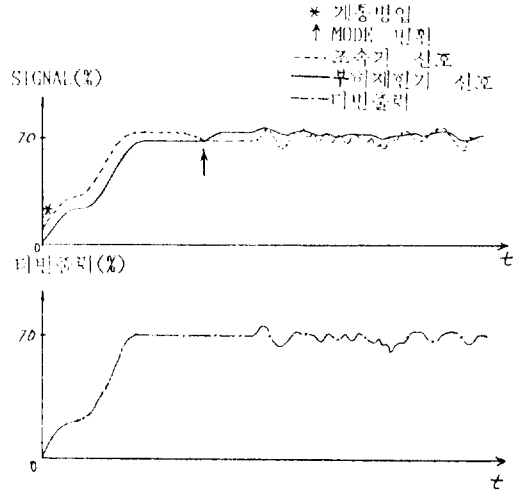


그림 10 삼천포 화력발전소 제2호기 A.F.R.운용 시험 데이터

Fig. 10 The actual A.F.R. operation result at Samchum-po T/#2

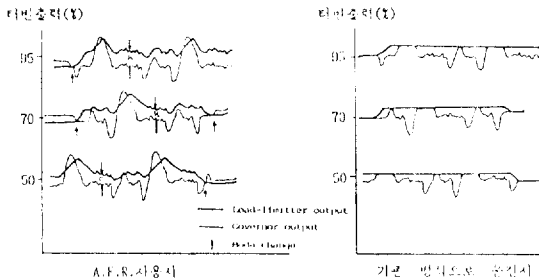


그림 9.1 조속기 응답운전시 터빈출력 변동에 따른 추종 상태

Fig. 9.1 The A.F.R. effect when governor-free operation

$$7 * B, B = 7/5 * C$$

4.2 화력발전소 운용시험 결과

* 결과에 대한 검토

현재 출력변화에 따른 추종폭의 변화와 추종제어로 GOVERNOR-FREE상태가 개선된 것을 시뮬레이션 및 실제 적용 결과로 알 수 있으며 무교란 MODE변환 효과도 관찰 할 수 있다.

5. 결 론

화력발전소 보일러-터빈 특성시험, 터빈제어계의 모델링, 시뮬레이터 개발 A.F.R.장치 설계 제작, 시뮬레이션 및 발전소 운용시험을 통해 조속기 응답운전시 계통주파수 변화에 따른 출력변화의 응용효과를 높임으로 계통주파수 상태가 개선될 수 있음을 보였다. A.F.R.의 추종폭과 추종율은 각 발전소 특성에 따라 설정해야 하며 기존 터빈 제어 신호와의 신호적 연결 및 장치의 신뢰도 향상을 위한 BACK-UP회로를 아울러 고려해야 한다. 추종폭의 신속성도 보일러 안정도 측면에서 대단히 중요하다. 하여튼 보일러의 안정성과 터빈의 속응성을 고려하여 개발된 이 A.F.R.방식이 조속기 응답운전하는 모든 발전소에 적용된다면 보다 나은 양질의 전력 공급에 기여하리라 본다.

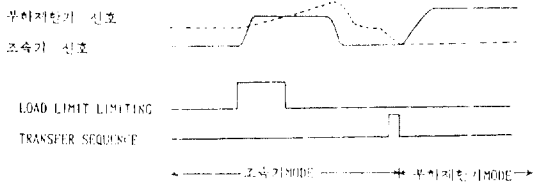


그림 9.2 MODE간 무교란 변화(BUMPLESS TRANSFER)

Fig. 9.2 The bumpless transfer

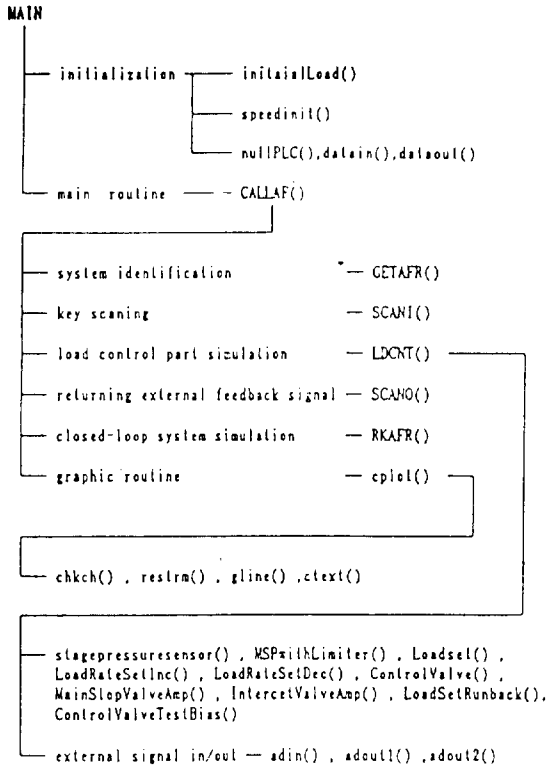
15%/분, 추종폭은 2%, 5%, 10%, 15%

4.1 시뮬레이션 결과

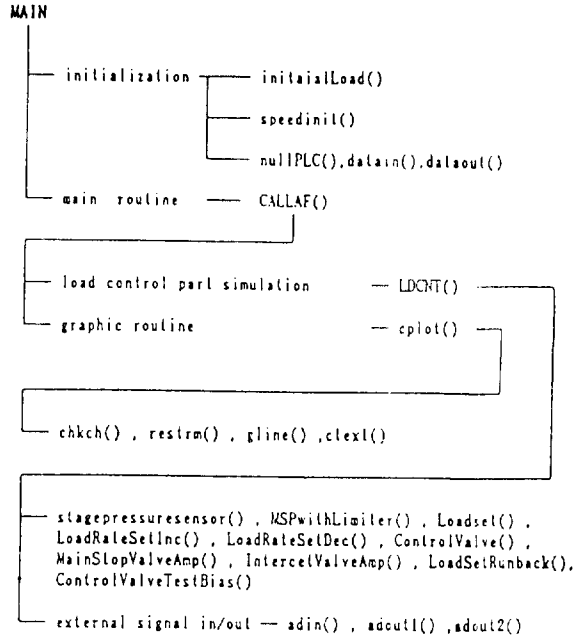
* 현재출력에 비례하는 追從폭 : $A = 9.5/5 * C = 9/$

부 록

— 터빈출력제어 프로그램 —



(터빈시스템 전체적 동작 프로그램 구성도)
(전문 프로그램 구성도)



참 고 문 헌

[1] TOSHIBA Co., "Implementation of EHC and Systematic Approaches to Improve Load Follow-up Capability", 1985.
 [2] TOSHIBA Co., "Specification for the Modification of the EHC Load Limiter", 1985
 [3] 한전 기술연구원, "주파수 조정운전을 위한 터빈 조속기 및 보일러 제어계의 성능 개선", 연구보고서 KRC-84G-S10, 1987.

[4] M.A. Eggenberger, "Introduction to the Basic Elements of Control Systems for Large Steam Turbine-Generators", pp. 5~35 General Electric, 1978.
 [5] B.S. Habibullah, "Optimal Governor Control of a Synchronous Macnine", IEEE Trans. on A.C. Vol. AC-26, No. 2, April 1981.
 [6] P.A.W. Walker, O.H. Abdalia, "Discrete Cotrol of an A.C. Turbogenerator by Output feedback", PROC. IEE, Vol. 125, No. 9, OCTOBER 1978.