

비선형성 해석에 의한 화력발전소 터빈 제어개봉에 관한 연구

황재호 이 정 준 서 진 훈
한전기술연구원 * 서울대학교 공과대학 전기공학과

The Improvement of control strategy in thermal power plant turbine system by nonlinear analysis

Jae-Ho Hwang * Chung-Joon Lee Jin-Hun Seo
KEPCO Research Center * Seoul National Univ.

Abstracts

This paper describes the improvement of thermal power plant turbine control system by analyzing nonlinear characteristics. The turbine control depends on the frequency variation and boiler condition. The nonlinearity of turbine control is the result of governor/valve properties, steam condition and boiler thermal unbalance. Nonlinear analysis is divided into two : main steam valve position - turbine output and governor response. Of course, every analysis must be done on considering plant operating condition. In this paper, after analyzing turbine control nonlinearity by numerical method and actual results, the sensitive operating load which corresponds to frequency is proposed, on guaranteed boiler stability. This idea is implemented at Pyung Tack thermal power plant, and the practical results are showed.

1. 서 론

전력계통 주파수 제어는 부하에 일정주파수를 공급하는 것뿐만 아니라 부하와 발전 플랜트간의 에너지 평형면에 있어서도 대단히 중요하다. 유효전력의 변화에 따른 주파수 변화는 발전 플랜트의 터빈 속도에 직접적인 결과를 나타낸다. 부하의 증가는 터빈속도를 떨어 뜨리고 감소는 속도를 증가시키므로, 입정속도 유지를 위해서는 효과적인 터빈속도제어가 이루어져야 한다.

터빈에 의한 주파수 입정제어는 터빈에 공급되는 증기유량을 가감함에 의해서 이루어지는데, 단순히 주증기 제어 밸브 개도를 증감함을 넘어서 주증기유량 확보, 보일러제어의 비선형 특성 및 터빈에서의 에너지 평형등을 고려한 가운데 부하에 전력을 공급하는 기준출력에 주파수 미소변화에 응동하는 조속기 응동제어를 포함해야 한다. 결국 터빈제어에 의한 계통주파수 제어는 보일러-터빈을 포함한 전력플랜트 전반에 걸친 종합적인 제어가 되어야 함을 의미한다.

그러나 종래의 전력플랜트의 터빈제어는 급전지시에 의해 기준출력이 정해진 상태에서 경험에 의한 조속기 응동제어를 시행함으로써 여러 문제점들이 발생하였다. 그 문제점들이란 터빈제어 특성이 출력변화에 대하여 상당히 비선형인 동시에 에너지 평형을 유지시키는 보일러 제어 역시 출력요구와 터빈응동에 대하여 비선형 동작을 함으로써 보장된 주파수 응동 조속기 제어가 되지 않았다는 점이다. 만약 보일러의 안정은 전이 보장된 상태에서 터빈제어가 고찰되지 않는다면, 터빈제어의 운전한계가 설정되지 않음으로 발생하는 플랜트 제어 전반의 불안정성을 초래하여 unit정지라는 사고를 유발케 된다. 따라서 보일러의 안정성, 터빈제어의 한계, 최적 터빈제어 부하대, 그리고 주파수 응동의 속응성 향상등을 위해서는 터빈제어의 비선형성 해석이 보일러 안정성 해석하에 이루어져야 한다. 이 비선형성 해석이란 보일러-터빈 특성 시험 결과로 얻어진다. 그리하여 보일러-터빈 비선형성 특성 해석으로부터 얻은 결과를 통하여, 주파수 응동이 양호한 운전부하대의 결정, 속응특성을 제시함으로

효과적인 플랜트 제어가 가능토록 하였다.

2. 조속기 응동 터빈제어 (Governor-free turbine control)

2.1 보일러 추종 제어방식

(Boiler-following operation)

조속기 응동 제어는 보일러 추종 제어 아래에서만 가능하다. 보일러 추종제어란 보일러가 터빈의 운전상태에 따라 운전되는 형태로서 그림1에서 보는 바와 같이 검출된 계통주파수 변화에 의해 터빈속도를 일정하게 유지하기 위해 조속기가 동작하여 터빈에 공급되는 주증기 제어밸브의 개도를 증감하게 되고, 개도를 증감함에 의한 밸브 전단의 주증기압 변화에 의해 보일러의 급수, 유량, 연소, 압력제어 등이 이루어지는 방식이다. 이 제어방식은 열용량 확보를 목적으로 드럼형 보일러를 채택하며 드럼내에 보유하고 있는 열용량에 의해 미소출력변화에 대응하게 된다.

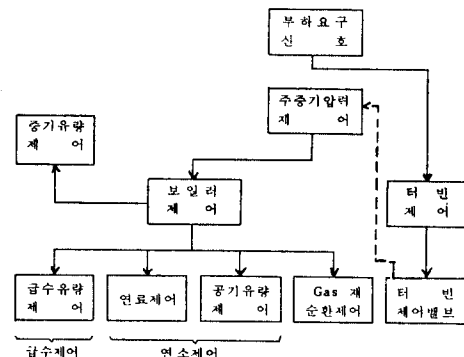


그림1

2.2 조속기 응동에 의한 주파수 제어

터빈제어는 조속기(Governor)에 의하며 그 형태에 따라 응답특성이 달라진다. 조속기는 기계식, 전기식, 디지털식으로 구분되는데 현재로서는 기계식과 전기식이 많이 사용되고 있으며, 디지털식으로 발전하고있는 추세이다. 본 논문에서는 기계식 조속기의 경우, 조속기-전달장치-밸브-출력으로 이어지는 일련의 매카니즘의 비선형특성을 분석하였다. 기계식 조속기는 터빈회전수 변화를 원심력에 의해 검출하여 유압 pilot밸브 개도를 조절하여 주증기 제어 밸브를 개폐함으로써 터빈에 유입되는 증기유량을 증감한다. 주증기 제어 밸브는 통상 4개로써 구동되는데, 각 밸브의 개폐시기가 출력에 따라 다르다. 조속기에서 변화된 기계적 신호는 제어밸브 Cam Shaft를 회전시켜 Cam의 고정위치에 의해 밸브의 개폐가 이루어진다. 터빈제어는 아래의 세부분으로 이루어진다.

- 기동시 : 주증기 제어 밸브를 전체적으로 동작시켜(전주분사) 터빈의 열용력을 감소시키며 열적 특성을 고려하여 정격속도까지 상승시킨다.
- 일정 출력 운전시 : 계통주파수 변동과는 상관없이 발전기출력이 일정하게 유지되도록 터빈 부하제한기에 의해 증기유량을 일정하게 터빈에 공급함.
- 조속기 응동 운전시 : 계통주파수 변동에 따라 조속기가 터빈 출력 제어를 담당하여 부하제한기에 의해 제한되는 범위 아래에서 주파수응동을 한다. 이때 보일러상태도 안정도불 고려하여 제한된다.

3. 터빈제어의 비선형특성 해석

조속기 응동 운전시, 주파수 변화율 검출하여 출력을 변화시키는 데는 각 부하상태에 따라 속도응성과 응답특성이 달라진다. 이 비선형성에 의해 조속기 응동성 역시 비선형적으로 나타나 선형적인 접근보다는 부하대에 따른 응동추세별 특성시험을 통해 해석해야한다.

3.1 보일러-터빈 특성 시험

비선형성을 해석하기 위해서는 보일러-터빈 전반의 특성시험이 선행되어야 한다. 특성시험은 아래와 같다.

- 부하제한기에 의한 부하 swing 시험
저출력에서 고출력에 이르기까지 출력을 연속적으로 증가, 감소 시키면서 보일러 제어상태, Cam-Shaft Position과 출력과의 응답특성을 구한다.
- 조속기 응동 특성시험
대표적인 부하대별로, 조속기가 주파수 변화에 응동하도록 함으로 보일러의 각종 상태변수들의 변화추이의 파악, 안정성분석, 주파수 변화와 출력 응동사이의 응답특성을 구한다.

3.2 출력제어의 비선형적 해석

정해진 속도조정률 하에서 보일러-터빈 특성 시험을 행하고 보일러 안정도가 보장된 가운데 응동성이 가장 양호한 운전부하대를 결정한다. 또한 속도조정률을 변경하여 같은 해석을 반복하여 주파수 응동이 가장 양호한 운전부하대를 결정한다.

방법1 : 밸브개도곡선
출력 증감발에 따른 각 제어밸브의 개도특성곡선을 구하며 응동성이 가장 좋은 운전부하대를 결정한다.

방법2 : Cam-Shaft Position 과 출력응답곡선
출력 증감발에 따른 Cam-Shaft Position과 출력과의 응답곡선을 수치해석 기법을 사용하여 분석, 미분값이 가장 높은 운전부하대를 결정한다.

방법3 : 주파수-출력 응동 특성
조속기 응동운전을 실시하여 주파수 변화에 따른 출력응동 상태별 통계적으로 파악하여 응동성

이 가장 양호한 부하대를 결정한다. 이때 보일러의 각종 상태변화가 안정한계 내에 들어야한다. 통계적 해석 방법은 대개 두가지가 있는데, 그 하나는 주파수-출력의 응동상태를 X-Y레코더에 의해 기록한후 그 추세를 간파하는 것이며, 다른 하나는 출력 증감발에 기인하는 매 순간에서의 속도조정률의 미분값을 구하여 속도응성이 가장 양호한 운전부하대를 찾는 것으로 본 논문에서는 자의 방법을 사용하였다.

4. 최적 조속기 응동 부하대의 결정

4.1 속도조정률과 조속기 응동성과의 관계

조속기 응동성은 조속기에 부착되어있는 속도조정률을 조정함에 의한다. 속도조정률을 낮게 하면 응동성은 향상되나 보일러 추종운전에 따른 보일러상태의 불안정성을 초래하여 심하면 에너지 불평형에 근거한 불안정으로 운전정지 사고를 유발할 위험이 있고, 너무 높으면 주파수 응동의 의미가 없으므로 그 최적 조정이 요구된다. 그러나 아무리 최적 조정하였다 하더라도 조속기 응동의 비선형성 때문에 보일러 안정도가 보장된 가운데 응동성이 가장 양호한 운전부하대를 찾아내야 하는 어려움이 있다. 그 최적 운전점은 특성시험과 분석에 의해서만 가능하다.

4.2 조속기 응동성을 결정하는 주요소들
조속기 응동성은 아래의 여러요소들에 의해 결정된다.

$$S.R. = \frac{\Delta F}{F_N} \cdot \frac{\Delta P}{P_N} \quad (1)$$

$$D.B. = \frac{\sum \Delta F}{N} \times \frac{1}{2} \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

$$R1 = \frac{k}{K} \times \delta \quad (\%) \quad (3)$$

$$P.S. = \frac{\Delta P}{\Delta T \cdot P_N} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

여기서

- D.B : 불감대 (Dead Band), Hz
- ΔF : 주파수 변화량, Δ Hz
- N : 측정회수
- R1 : 경사속도 조정률, %
- k : 임의 부하점에서 터빈출력-정정(PIE)속도(속도변화분/정격속도)관계 곡선에서 접선의 기울기
- K : 무부하전과 정격 부하점 사이를 연결한 직선의 기울기
- δ : 무부하점과 정격 부하점에서의 정정속도의 백분율
- ΔP : 출력변화량, MW
- ΔT : ΔP 가 변하는데 소요된 시간, 분
- PN : 발전기 정격출력, MW
- P.S. : 출력경사 변동률, % MW/min
- S.R. : 속도조정률, %
- Fw : 정격주파수, Hz

5. 결 과

비선형 해석에 의한 최적조속기 응동부하대 결정용 평택 화력발전소 제4호기 터빈 제어계통에 실제로 적용, 주파수응동에 기여하는 운전부하대를 제시하였다. 평택 화력발전소 제4호기의 보일러, 터빈 사양은 표1과 같다.

표 1

보일러
 Type : Single Drum, Radiant, Semioindoor Type
 최대 연속증발량 : 1,135 T/H
 MCR시 증기압 : 과열기 출구 175.5 kg/cm g
 MCR시 증기온도 : 과열기 출구 571 C
 뽕뽕 : 강제뽕뽕
 연료 : LNG / 중유
 제작회사 : Babcock & Wilcox

터빈
 Type : TC4F-26
 속도 : 3600 rpm
 출력 : 350 MW
 제작회사 : Hitachi, Ltd

5.1 밸브 개도곡선

그림2 에 네개의 주증기 제어밸브의 개도 특성을 보이고있다. 밸브개도가 교차되는 부분은 출력 120,220,260 MW 임을 알수있다.

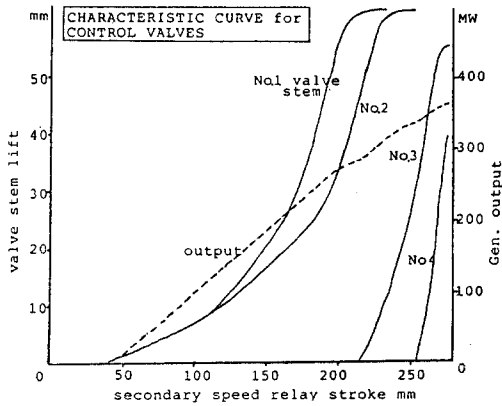


그림 2

5.2 Cam-Shaft Position 과 출력응답곡선

그림3 에는 부하제한기에 의한 Swing 시험 결과로 구한 Cam-Shaft Position과 출력응답곡선을 구했으며 그림4 에는 이불 수치해석 기법을 사용하여 선형적으로 접근시켰다. 표2 는 출력대별로 다항식을 표시하고있다.

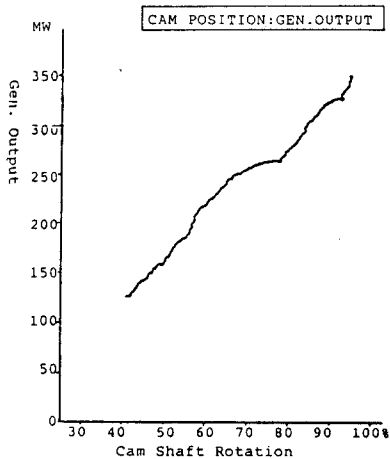


그림 3

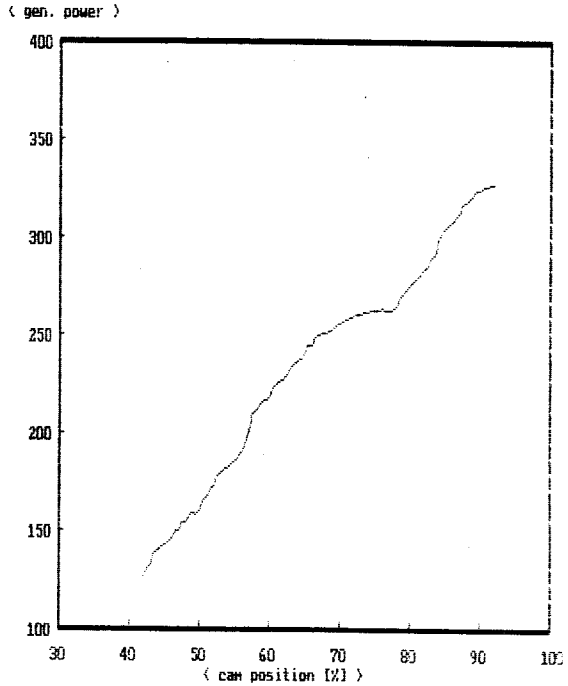


그림 4-1. 출력 응답 곡선

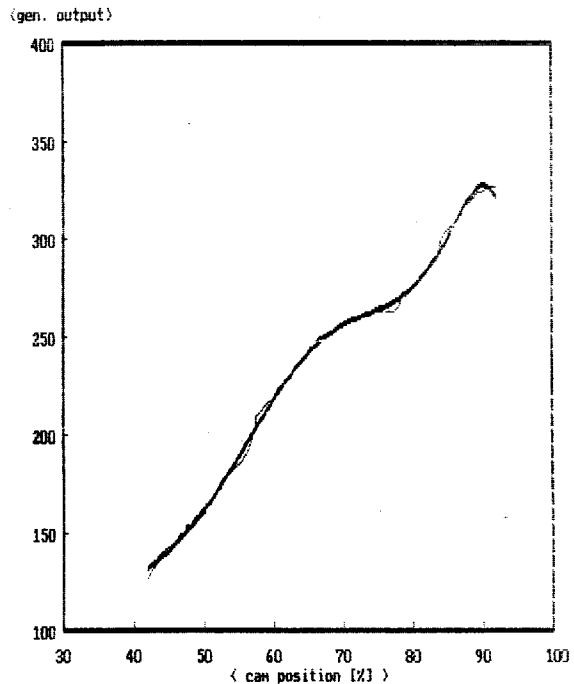


그림 4-2. 수치 해석에 따른 근사함수의 그래프

(14차)

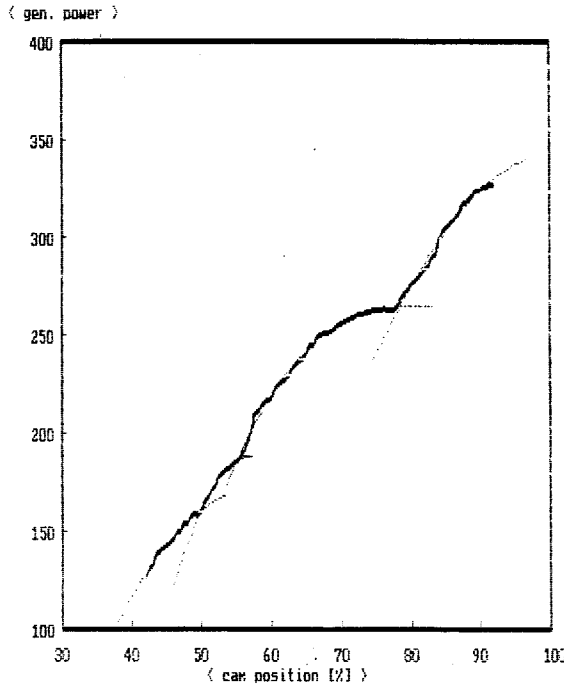


그림 4-3. Output 구간별 3차 근사식 (표2 참조)

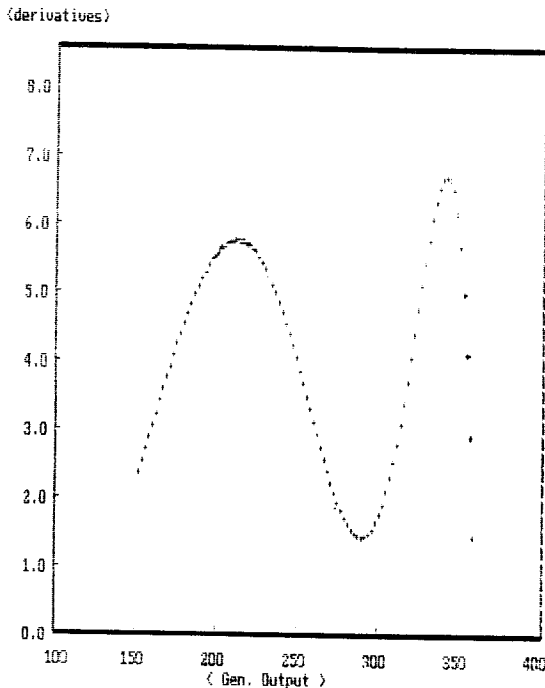


그림 4-4. 각 출력에 대한 미분치

• 그림 4-2의 근사함수식 (14차)

$$F(x) = a[1] + a[2]*x + a[3]*x^2 + \dots + a[N]*x^{N-1}$$

a[i]
a[1] = -8.14494871810894E-0001
a[2] = 1.97441297741316E+0001
a[3] = -5.76994435052038E+0001
a[4] = 2.85501638641872E+0001
a[5] = 6.81746696848422E+0001
a[6] = 2.18249042445677E+0001
a[7] = -4.84062234882149E+0001
a[8] = -8.28541329506552E+0001
a[9] = -6.19958187100128E+0001
a[10] = -1.63435106073848E+0000
a[11] = 6.51311646922259E+0001
a[12] = 1.03942378312931E+0002
a[13] = 8.86884330142057E+0001
a[14] = 5.01043896535703E+0000
a[15] = -1.50141339145601E+0002

Gen. Output	a[i]
127 - 159	a[1] = -2.96382508140960E+0000
	a[2] = 1.28635771888512E+0001
	a[3] = -1.93187391032916E+0000
	a[4] = -1.10024629325344E+0001
159 - 188	a[1] = -1.03418954823574E+0001
	a[2] = 3.25160227532615E+0001
	a[3] = -1.60406719253842E+0000
	a[4] = -3.12606315880839E+0001
188 - 266	a[1] = -1.61604554501537E+0001
	a[2] = 6.66539669664344E+0001
	a[3] = -7.86382164341630E+0001
	a[4] = 3.08902846589917E+0001
266 - 327	a[1] = -5.85049839084240E+0000
	a[2] = 1.02480492766044E+0001
	a[3] = 7.01869866350899E+0000
	a[4] = -7.98297029181413E+0000

표2. Output 구간에 따른 3차 근사식

5.3 주파수-출력 응답곡선

조속기 응답 특성 시험결과로 조속기의 주파수-출력 응답곡선을 그림 5 와 같이 구하였다. 표3 은 이경우 속도조정률과 보일러 상태를 보이고 있다.

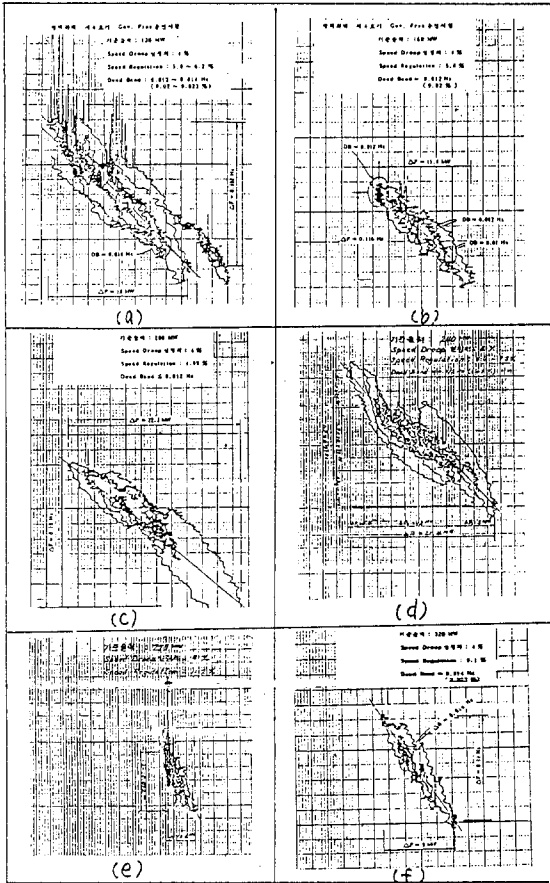


그림5

Gov. Free 운전시험 데이터

구분\내용	130 MW	160 MW	200 MW	240 MW	280 MW	320 MW
Δf	0.192 0.18 0.192	0.193 0.143 0.16	0.175 0.20 0.165	0.141 0.177 0.165	0.15 0.12 0.085	0.09 0.108 0.13
ΔMW	15.8 15.6 17.4	14.4 12.2 12.6	15.0 20.4 21.8	10.0 14.0 14.6	6.4 2.4	4.0 4.9 8.0
$\Delta MW/0.1Hz$	8.68 7.67 9.06	7.46 8.53 7.86	8.57 10.2 13.21	7.09 7.91 7.89	4.27 6.58 2.62	4.44 4.26 6.15
M.S.T °C	± 5.6	± 2.0	± 2.2	± 2.0	± 5.8	± 2.2
M.S.P %	± 1.9	± 1.0	± 1.6	± 1.4	± 2.2	± 1.0
R/H T °C	± 2.6	± 2.0	± 2.2	± 2.2	± 7.0	± 4.0
D/L mm	± 36.75	± 65.4	± 51.1	± 32.2	± 52.5	± 18.2
O ₂ %	3.0	2.5	2.2	2.1	1.6	1.5
S.R %	6.8	7.3	5.7	7.4	17.3	13.3

대상설비: 평택화력 4호기, 일시: 1987. 6.11
S.R. 위치: 4%

표3

6. 결 론

화력 발전소의 주파수 응답 조속기 운전은 계통 주파수 제어측면에 있어서 대단히 중요하다. 모든 발전소가 효율이 최대가 되는 정격 출력에서 운전할터 바람직하나 계통 주파수 기여에 착안한다면, 보일러 안정도가 보장되는 가운데, 제어의 비선형 특성을 해석함으로써 조속기 응답이 양호한 부하대에서 발전소가 운전된다면 보다 효과적인 주파수 상태가 이루어질수 있다. 물론 최적 운전부하대 뿐만 아니라 속도 조정률 역시 고찰되어야 하나 급전 규정상 화력은 4-6%로 정해져 있으므로, 평택 화력의 경우, 4%에서 최적조속기 응답부하대를 재시하여 급전운용에 기여케 함은 발전소 운전과 함께 플랜트 자동제어의 효율적 운용을 기할수 있다.

참 고 문 헌

- 1) THOSHIBA Co., "Implementation of EHC and Systematic Approaches Load Follow-up Capability", 1985
- 2) 한전 기술연구원, "주파수 조정운전을 위한 터빈 조속기 및 보일러 제어계의 성능 개선", 1987
- 3) M.A.Eggenberger, "Introduction to the Basic Elements of Control Systems for Large Steam Turbine-Generators", PP5-35 General Electric, 1978
- 4) B.S.Habibullah, Optimal Governor Control of a Synchronous Machine, IEEE Trans. on A.C. Vol.AC-26, No2, April 1981.
- 5) TOSHIBA Co., "Dynamic Behavior and Stability Problems in Steam Power Plants"