

# 북제주 화력 발전소 스팀 터빈 발전기용 인텔리전트 디지털 조속기 개발

\*전 일영, \*하 달규, \*\*신 명철, \*\*김 윤식  
\*삼창기업(주) 중앙연구소, \*\*한국해양대학교

## Development of Intelligent Digital Governor System for Steam Turbine Generator in Buk-Cheju Thermal Power Plant

\*Il-Young Jeon, \*Dal-Gyu Ha, \*\*Myung-Chul Shin, \*\*Yoon-Sik Kim  
\*Sam Chang Enterprise R&D Center, \*\*Korea Maritime University

### Abstract

This thesis aims at developing of a digital governor system for the steam turbine generator of the Buk-Cheju Thermal Power Plant of KEPCO.

The steam turbine generator of the Buk-Cheju Thermal Power Plant is modelled. As a hardware platform, a triple modular system which is fitted 32-bit microprocessor of Motorola company to perform the digital governor system is used.

The parameters of the PID controller algorithm in the speed control block is tuned on the basis of the estimated model.

한 신뢰성 향상 방안으로 입출력의 이중화와 프로세서 모듈 삼중화에 의한 유효 제어 데이터의 산출 기법 및 자체 진단 기능을 가지고 있다.

개발된 소프트웨어는 프로세서의 구동에 필요한 운영 프로그램과 터빈의 제어에 필요한 응용 프로그램으로 구성되어 있다. 또한 유효한 데이터를 산출하기 위하여 두 개의 입력 프로세서로 입력된 데이터들은 내부 통신 프로그램에 의하여 데이터를 교환, 공유, 처리 및 재공유 함으로써 유효한 데이터를 얻을 수 있다. 응용 프로그램은 실제 발전소에 적용할 수 있도록 설계되었고, 적용 대상 발전소인 북제주 화력 발전소 스팀 터빈의 데이터를 측정하여 모델링을 수행하였다. 이렇게 모델링된 제어대상의 매개변수를 추정하는 작업이 이루어졌고, 이 모델의 제어기로서 PID 제어기를 설계한 후, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 유효성을 확인하였다.

### 1. 개요 및 배경

현재 운전중이거나 건설중인 발전소의 계측제어 기술은 1970년도 초반 이전의 기술을 바탕으로 되어 있어서 빠른 속도로 발전되고 있는 현재의 전기 전자관련 기술수준으로 볼 때 매우 낙후하다. 특히 사양 기술인 아날로그 계통이 근간을 이루고 있어 단종 부품의 증가 및 관련 전문가의 감소 등으로 운전 및 유지·보수에 어려움이 많으며, 또한 아날로그 계통의 경직성으로 신기술 이식 등을 통한 성능 향상에 제한을 받고 있다. 따라서 이와 같은 문제점들을 해결하기 위한 방안으로 발전소 계측제어 계통의 디지털화가 점차 요구되고 있다.

본 논문은 북제주 화력 발전소 스팀 터빈에 적용할 수 있는 디지털 조속기 시스템의 개발과 모듈별 프로세서 장착에 의한 실시간 제어 기법을 다루었다. 또

### 2. 하드웨어

디지털 조속기 시스템의 전체 계통도는 그림 2.1과 같이 프로세서 모듈의 삼중화와 입출력 모듈의 이중화로 구성된다. 프로세서 모듈은 각기 독립된 프로세서와 메모리를 내장하고 있으며, 외부 센서로부터 입력된 신호(속도, 압력, 온도, 밸브 변위, 발전기 출력 등등)를 세 개의 프로세서 모듈에서 개별적으로 연산 처리한 후 유효 데이터 처리 방식을 사용하여 유효 출력 제어신호를 결정한다. 선택된 유효 데이터는 DOM (Digital Output Module), SIOM (Serial Input Output Module), AOM (Analog Output Module)을 통하여 각종 주변장치로 출력된다.

프로세서 A와 프로세서 C 모듈은 제어권을 가지

며, 입력 디바이스로부터 독립적으로 값을 받는다. 터빈의 회전수와 같은 중요한 입력 요소는 세 개 또는 그 이상의 센서로부터 입력을 받아 신뢰성을 높이는 것이 일반적이다. 프로세서 A와 프로세서 C 모듈로 입력된 데이터 값은 SCC(Serial Communication Controller)에 의해 3개의 프로세서 모듈이 데이터를 공유하게 되며, 각 프로세서 모듈은 독립적으로 연산을 수행한 후 유효 데이터를 재 교환한다.

MPU(Magnetic Pickup)는 터빈 발전기의 축에 부착된 기어 치수에 비례하는 신호를 발생한다. 이러한 신호는 DSSM에서 신호 처리를 수행한 후 유효한 속도 데이터로 사용된다. SIOM은 시스템의 동작 및 파라미터 조정을 위한 키패드의 입력을 샘플링 방식으로 처리하며, VFD (Vacuum Fluorescent Display)에 각종 운전 상태를 표시한다. 압력, 온도, LVDT, KW등의 입력 신호는 AIM에서 디지털 신호로 변환되며, DOM은 릴레이 보드를 통하여 접점 신호를 출력하도록 하였고, AOM은 아날로그형 지시계를 구동하기 위한 아날로그 신호를 출력한다. RS232C, RS485 통신 드라이버를 사용하여 운전 상황 및 데이터 전송을 가능하게 하였으며, 디지털 조속기 시스템이 원격으로 감시, 운용될 수 있도록 구성되었다.

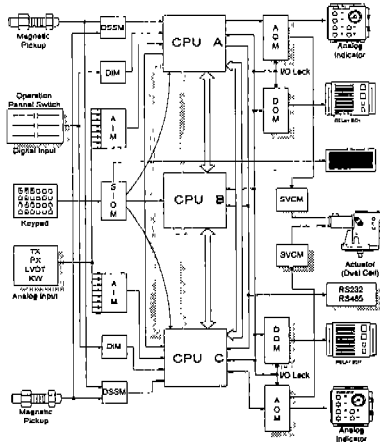


그림 2.1 디지털 조속기 시스템 전체 계통도

프로세서 모듈은 산업 현장에서 널리 사용하는 모토롤라사의 MC68EC040 32bit 마이크로프로세서를 사용하여 모듈 자체의 높은 성능을 보장하였으며 데이터용 SRAM 과 명령어 SRAM을 분리하고 내부 프로세서 통신 기능과 전원 백업 기능 (백업용 SRAM)이 포함되어 있다. 본 연구에서의 속도처리 방식으로 실시간 처리 및 응용이 유연한 DSSM을 사용한 디지털 속도 검출 방식을 채용하였고, TMS320C25 16bit DSP 모듈을 사용하여 성능을 향상시키고 저속/고속 회전수에서 안정된 카운트를 위

한 프리스케일러 기능을 가지고 있다.

다음의 그림은 개발된 시스템의 각 모듈이 주기판에 장착된 모습을 나타낸 것이다.

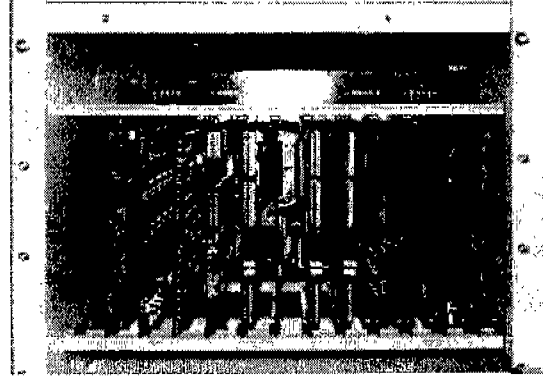


그림 2.2 주기판에 장착된 각 모듈

### 3. 소프트웨어

인텔리전트 디지털 조속기 소프트웨어는 운영 프로그램과 터빈 제어에 필요한 응용 프로그램으로 구분된다. 프로세서 기동에 필요한 운영 프로그램은 전원 인가 후 하드웨어 리셋에 의해 프로세서내의 프로그램 카운터 초기화나 벡터 테이블을 정립하고 프로세서 레지스터, 메모리, 입출력등의 이상 유무를 테스트하며, 시스템에 사용되는 모든 슬레이브 디바이스를 초기화한다.

응용 프로그램은 터빈 제어에 필요한 입출력 프로세싱, 속도제어, PID, 내부 프로세서 통신, 시스템의 각종 기능 프로그램을 수행한다. 또한 유효 데이터 검출을 수행하기 위해 A 프로세서와 C 프로세서에 입력되는 모든 값은 내부 통신 프로그램에 의해 데이터를 교환할 수 있도록 하여, 세 개의 프로세서가 입력된 데이터를 공유하도록 하였다. 각 프로세서는 응용 프로그램에 의해 데이터를 처리하고 처리 결과를 재 교환하여 유효하지 않은 데이터를 차단 할 수 있도록 하였다.

#### 3.1 운영 프로그램

시스템 프로그램은 메인 프로그램, 초기화 프로그램, 셀프테스트 프로그램, 인터럽트 프로그램, 응용 프로그램으로 구성된다.

#### 3.2 응용 프로그램

응용 프로그램은 그림 3.1과 같이 나타난다. 전체적인 제어신호 및 입출력 신호의 흐름은 우측에서 좌측

으로 흘러가도록 구성되었다.

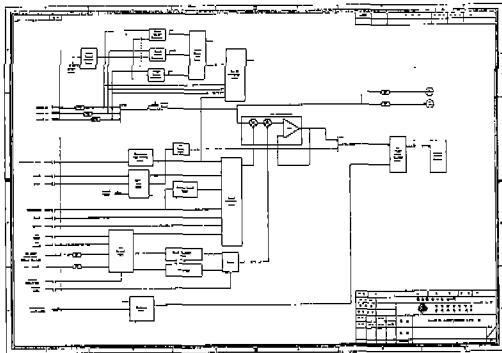


그림 3.1 디지털 조속기 시스템의 응용 프로그램

입력 신호들은 세 개의 속도신호, 기동/정지, 증·감속의 명령을 위한 접점입력과 발전기의 유효전력 측정 입력, 증기 제어 밸브의 변위측정입력 등 아날로그 신호입력을 받을 수 있다. 출력 신호들은 액추에이터로 제어전류출력, 접점출력과 계기 장치를 구동시키는 아날로그 출력 등이 있다. 응용 프로그램을 수행하는 내부블록들의 종류는 다음과 같은 것들이 있다

- Speed Signal Fault Override Logic
- Start-Stop Logic
- Speed Pickup Fail Logic
- Overspeed Test Enable Logic
- Critical Speed Logic
- Speed Reference Logic
- KW Control Logic
- Droop Logic
- Speed Control Logic
- Governor Valve Ramp Logic
- Governor Valve Final Driver Control Logic

MPU로부터 입력된 세 개의 속도신호는 세 가지의 신호 중 가장 높은 신호를 선택하는 HSS (High Signal Selector)를 통과하여 가장 높은 속도신호를 제어의 입력으로 사용하게 된다. 또한 세 개의 속도신호 입력은 Failed Signal Detector에 의해서 각각의 속도신호가 정상적인 속도신호인가를 판단하게 된다. HSS를 통과한 속도신호는 Start-Stop 로직과 KW Control 로직, Speed Reference 로직에서 설정된 속도의 목표 값이 PID Control 로직에서 비교되어 그 오차만큼 제어동작을 수행하게 된다. PID Control 로직의 출력 값과 조속기 Valve Ramp 로직의 출력 값은 LSS (Low Signal Selector)를 통과하여 가장 낮은 제어 신호를 출력하게 된다. 이러한 LSS와 전술한 HSS를 이용하여 터빈 운전의 신뢰성을 제고할

수 있다. LSS를 통과한 제어의 출력신호는 Governor Final Driver Control 로직을 통해 액추에이터로 전류신호를 보내준다.

#### 4. 알고리즘

속도제어 알고리즘은 속도 측정용 센서로부터 신호를 받아 이를 목표치(회전수 설정치)와 비교하여 그 편차에 따른 PID 동작을 하며, 부하제어 알고리즘은 부하변동에도 불구하고 희망 유효전력을 계속적으로 출력하기 위하여 동작한다. 그림 4.1은 본 논문의 발전용 증기 터빈의 속도 및 부하제어를 위한 블록 선도를 보여주고 있다.

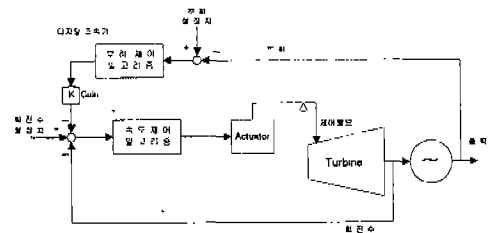


그림 4.1 발전용 증기터빈의 제어 시스템

#### 4.1 제어대상의 모델링

실제의 시스템을 제어하기 위한 제어알고리즘을 구성하기 위해서는 시스템의 동특성을 수학적 모델로써 나타낼 필요가 있다. 여기에 나타난 수학적 모델은 일반적으로 알려진 제어대상의 수학적 모델이고 실제의 적용의 문제에 있어서는 개별적으로 제어대상의 모델의 구조를 먼저 얻고 모델의 매개변수 값을 실제 터빈을 운전하며 적절한 동특성을 얻도록 조작한다. 그림 4.2는 본 연구에서 구성된 제어대상을 블록도로 보여주고 있다.

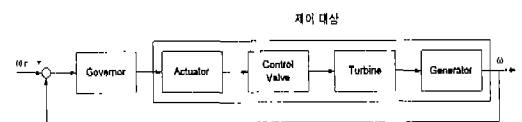


그림 4.2 구성된 제어대상의 블록도

속도제어 시스템에서 액추에이터, 제어밸브(또는 드로틀 밸브), 터빈과 발전기를 모두 포함하여 제어 대상으로 간주한다. 제어대상의 각 요소들은 비선형 요소들을 포함하고 있고, 운전조건에 따라 각 요소의 매개변수가 달라지기 때문에 정확한 모델을 얻는 것은 어려웠으나, 제어대상을 선형시불변인 공칭모델 (Nominal model)로 기술할 수 있었다. 액추에이터 입력 단에서 회전속도까지의 제어대상을 동작점 부

근에서 선형모델을 얻고, 이를 요약하고 블록선도로 표시하면 그림 4.3과 같다.

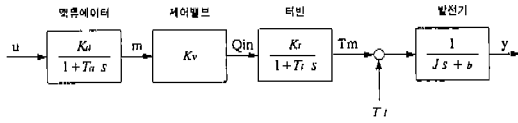


그림 4.3 제어대상의 블록선도

그림 4.3의 블록선도로부터 제어대상의 입출력 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$Y(s) = \frac{K_a K_v K_t}{(1 + T_a s)(1 + T_i s)(b + Js)} U(s) - \frac{1}{(b + Js)} T_i s \quad (4.1)$$

여기서 u는 제어입력 (액츄에이터의 입력), y는 회전수(속도),  $T_i$ 는 전기적 부하 토크 신호이고,  $K_a$ 는 액츄에이터의 이득,  $K_v$ 는 제어밸브의 비례상수,  $K_t$ 는 증기터빈의 비례상수이다. 한편  $T_a$ 는 액츄에이터의 시정수,  $T_i$ 는 증기터빈의 등가 시정수,  $J$ 는 회전부의 등가 관성모멘트,  $b$ 는 등가 마찰계수이다. 식 (4.1)로부터 제어입력에서 출력 회전수까지의 전달함수는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (4.2)$$

#### 4.2 입출력 신호계측

시스템 모델의 구조와 차수를 결정한 후, 매개변수들을 추정하기 위하여 실험적 방법으로 입출력 신호를 실제 제주도 한국전력 북제주 화력 발전소에서 운전되고 있는 증기터빈 발전기의 무부하 상태에서 취득하였다. 발전시스템이 무부하로 운전되고 조속기의 속도 설정치를 정격회전수 3600 [rpm] 부근에서 변경할 동안 제어입력 신호전압과 회전수 신호전압을 12 [bit] A/D, D/A 변환기를 이용하여 계측하였고 샘플링 시간은  $T=0.01$  [sec]로 선정하였다. 그림 4.4와 그림 4.5는 서로 다른 실험을 통해 계측된 두 신호를 나타낸 것인데 그림 4.4는 매개변수의 추정을 위해 사용하였고 그림 4.5는 모델의 검증에 사용하였다.

#### 4.3 유전알고리즘을 이용한 매개변수의 추정

계측된 입력 신호를 조정모델에 인가하였고, 유전알고리즘은 시스템 출력과 모델의 출력 차가 최소가 되도록, 즉 모델의 동특성이 시스템의 동특성에 가까워지도록 계속적으로 모델의 매개변수를 조정하게 된

다. 이 때 모델을 초기화하기 위하여 모든 상태변수의 추정이 요구된다. 집단이 진화해 가는 동안 유전 알고리즘은 집단내 개체간의 우열, 즉 각 개체로부터 복호화된 매개변수로 설정된 모델의 성능을 평가하기 위하여 적합도를 필요로 하는데 적합도는 적절히 정의되는 목적함수로부터 계산된다. 본 연구에서는 유한시간 동안만 계산되는 다음 식을 목적함수로 이용한다.

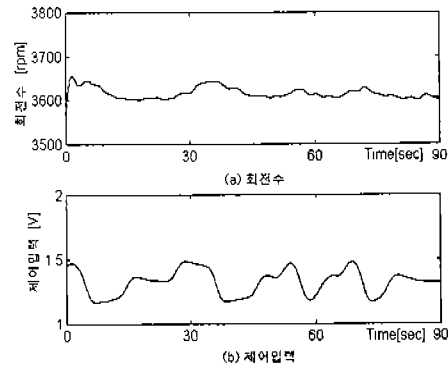


그림 4.4 매개변수 추정에 사용된 입출력 데이터

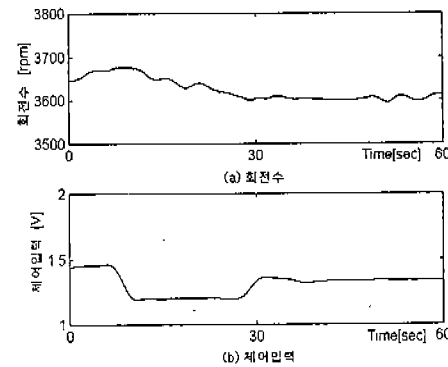


그림 4.5 모델 검증에 사용된 입출력 데이터

$$J(\varphi) = \sum_{j=1}^W |y(j) - y_M(j)| \quad (4.3)$$

여기서  $\varphi = a_1 a_2 a_3 b_0 T$ 는 조정되는 매개변수 벡터이고,  $W$ 는 데이터의 크기이다. 상기의 최적화 문제에서 유전알고리즘은 목적함수의 값이 최소가 되도록  $\varphi$ 를 조정해 나간다. 모의실험 결과 추정치로  $\hat{a}_1 = 2.51$ ,  $\hat{a}_2 = 4.64$ ,  $\hat{a}_3 = 0.04$ ,  $\hat{b}_0 = 0.08$ 를 얻을 수 있었다.

#### 4.4 추정된 모델의 검증

그림 4.6은 추정된 모델의 유효성을 확인하기 위하

여 실제 시스템과 모델의 출력을 비교한 것이다. 그림 4.6 (a)는 추정에 이용된 입출력 데이터를 이용한 결과이며, 그림 4.6 (b)는 추정에 이용되지 않은 데이터를 이용한 결과이다. 두 그림 모두 모델의 출력은 시스템의 출력에 근접함을 보여주고 있다.

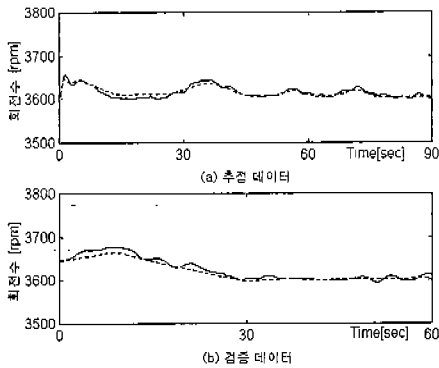


그림 4.6 실제 시스템과 모델의 출력

마지막으로 추정된 모델로부터 계단응답을 얻는 시뮬레이션을 실시하였다. 모델의 출력이 3600 [rpm] 일 때, 이 부근에서 50 [rpm] 증속시켰다가 다시 50 [rpm] 감속시키는 응답시험을 실시하였다. 응답시험 결과 복제주 화력발전시스템의 제어대상 시정수는 약 2 [min]임을 확인할 수 있었다.

#### 4.5 디지털 조속기의 시뮬레이션

여기서는 개발된 시스템 알고리즘의 동작상태를 점검하고 또한 그 성능을 파악하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에 사용된 공칭계의 제어대상과 PID 제어기의 매개변수를 요약 정리하면 다음과 같다.

- PID 매개변수
  - :  $K_P = 0.06$ ,  $T_I = 2.0$ ,  $T_D = 0.5$
- 제어대상
  - :  $a_1 = 2.51$ ,  $a_2 = 4.64$ ,  $a_3 = 0.04$ ,  $b_0 = 0.08$

이것으로부터 제어계를 구성하고 시뮬레이션을 행하였다.

##### 4.5.1 속도제어

아이들속도(Idle speed) 운전 모드는 발전설비, 특히 터빈과 관련장치가 정지 상태에서 서서히 증속되면서 운전되는 과정으로서 이 모드에서는 회전수는 정지 상태에서 1000rpm 까지 약 7rpm/sec의 변동률을 가지고 변하도록 매 샘플링 시마다 회전수 설정치가

가 변경된다. 회전수 설정치가 1000rpm에 도달되면 고정되고 정격속도 운전 또는 수동운전 모드에서만 회전수를 변경할 수 있다. 그림 4.7은 아이들 속도 운전모드에서의 시스템 응답을 그린 것이다. 그림 4.7 (a)는 회전수 설정치와 출력 회전수, 그림 4.7 (b)는 제어입력을 나타낸다. 그림에서 보면 출력 회전수는 회전수 설정치에 좋은 응답특성을 가지고 잘 추종함을 확인할 수 있다.

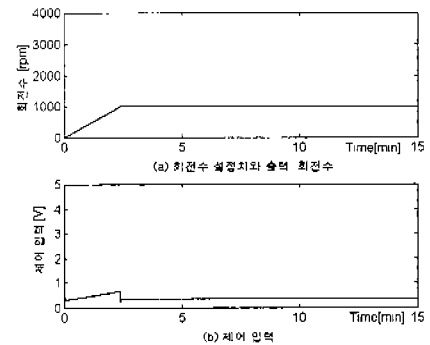


그림 4.7 아이들속도 운전 모드에서의 시스템 응답

정격속도 운전모드는 시스템이 기동하여 승속곡선에 따라 정격 회전수까지 승속되면서 운전되는 과정으로서 그림 4.8은 정격속도 운전 모드에서의 회전수 설정치에 대한 출력 회전수의 응답과, 액츄에이터에 가해지는 제어입력 신호를 나타내고 있다.

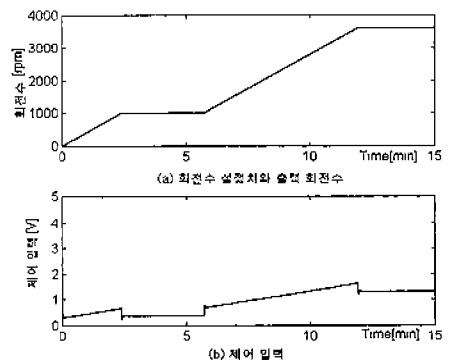


그림 4.8 정격속도 운전 모드에서의 시스템 응답

##### 4.5.2 부하제어

전력계통은 부하변동을 예측하기가 어렵고, 각 지역간의 연계성 등의 강한 비선형성으로 인해 계통의 해석이 매우 어려울 뿐만 아니라 모델을 얻기가 까다롭기 때문에, 본 연구에서는 부하제어 성능을 정확히 시뮬레이션 하기가 어려워 제한적인 실험을 실시하였다. 그림 4.9은 시스템이 전부하 운전 중에 부하가 탈

락되었을 때 요구되는 응답특성을 가지는지를 확인하기 위한 것으로서, 전부하에서 정상운전을 한 후, 10 [sec]에서 스텝상의 부하(주파수와 독립)를 탈락하였을 때의 제어계의 출력과 제어입력을 그린 것이다.

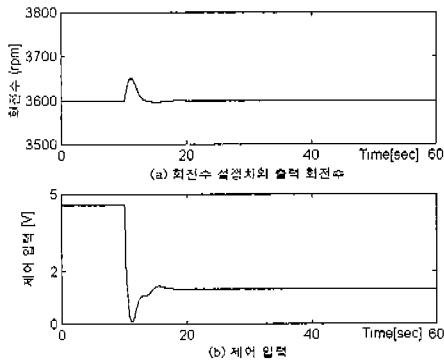


그림 4.9 전부하 운전중 부하 탈락 시 시스템 응답

## 5. 결 론

본 논문에서는 북제주 화력 발전소의 터빈 속도제어 시스템을 대상으로 디지털 속도제어 시스템을 설계하고 제어대상으로 모델링 하였으며, 설계된 디지털 속도제어 시스템은 그 유효성의 검증을 위하여 시뮬레이션을 행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 디지털 속도제어 시스템을 개발하는 과정에서 제어 알고리즘의 실제 적용이 가능하도록 하였고, 현재 발전소에서 운전되고 있는 스팀 터빈의 데이터를 측정하고 유전 알고리즘을 이용하여 매개변수들을 추정하여 제어대상을 평가해 보았다.

(2) 디지털 속도제어 시스템의 속도제어 알고리즘의 전체적인 기능과 세부적인 기능까지 지정하여 중·소형 용량의 증기터빈 발전기에 직접 적용이 가능하도록 제작하였다.

(3) 디지털 속도제어 시스템의 세부구조를 설계하면서 내부적으로 사용되는 기능 블록 및 로직들을 모두 라이브러리로 만들어 금후의 다른 시스템의 제작 및 적용의 경우 문서화 및 알고리즘의 타당성 검토에 소비되는 시간이 현저히 줄어들 것으로 예상된다. 이러한 구조를 이용하여 시스템 내부의 변수를 다양하게 변경할 수 있고, 발전소 현장의 터빈조건이 변경되어도 손쉽게 시스템의 기능을 변경시킬 수 있는 장점을 확인하였다.

본 연구에서는 스팀 터빈 모델을 기초하여 조속기의 알고리즘 및 응용 프로그램을 제작하였다. 이러한 연구를 바탕으로 하여 다양한 형태의 터빈 모델에 적용할 수 있는 알고리즘의 연구와 소프트웨어 및 하드웨어의 성능향상의 연구를 지속적으로 수행되어야 할 것이다. 또한 이 연구과제를 바탕으로 화력 발전소의 스팀 터빈뿐만 아니라, 수력 발전소의 다양한 형태의 수차의 조속기로도 활용이 가능하리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] A. W. Ordys, A. W. Pike, M. A. Johnson, R. M. Katebi and M. J. Grimble, "Modelling and Simulation of Power Generation Plants, Springer-Verlag, 1994
- [2] "NetCon® Digital Control Hardware Manual" Manual No. 85544E, Woodward Governor Company.
- [3] "10MW 인텔리전트 디지털 조속기 개발", 중간 보고서, 한국전력공사 전력연구원-삼창기업(주) 부설 연구소, 1997
- [4] 정태한, "Control of Prime Mover Speed", 한국전력공사 정비기획실, 1997
- [5] "509 Digital Control System Hardware Manual", Manual No. 85512E, Woodward Governor Company
- [6] 李珍杰 譯, "油壓 서보 制御의 設計", 機電研究社, 1989.
- [7] Ron Platz, "Steam and Gas Turbine Control Retrofits", Woodward Governor Company TechTalk No. 83407
- [8] ASME PTC 20.1-1997, "Speed and Load Governing Systems for Steam Turbine-Generator Units", American Society of Mechanical Engineers, 1997
- [9] M. S. Ghausi and K. R. Laker, "Modern Filter Design", Prentice-Hall Inc., London, 1981
- [10] K. J. Åström and T. Hägglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins", Automatica, Vol.20, No.5, pp.645-651, 1984