

# 디지털 조속기 시스템의 신뢰성 향상에 관한 연구

신 천 기\* · 김 윤 식\*\*

## A Study on the Reliability Improvement of Digital Governor System

Cheon-Kee Shin\* · Yoon-Sik Kim\*\*

### Abstract

In industrialized modern society, once a power plant has a problem and stops its running, the industrial damage is unaccountable and its impact is exerted on almost everywhere in the country. And so, reliability should be secured especially in turbine governor system to avoid this kind of damage.

In this thesis, turbine speed control algorithm is studied for Buk-Jeju steam turbine power plant and also digital governor system is designed for speed control of steam turbine in power plant.

By using duplex I/O module and triplex CPU module and also 2 out of 3 voting algorithm and adding self diagnostic ability, the reliability of the designed digital governor system can be acquired satisfactorily.

After system design, CPU module, digital speed sensing module, analog I/O module, digital I/O module, serial I/O module, servo valve control module, mother board are manufactured and assembled in a rack. Designed and manufactured digital governor system is implemented in a pilot steam turbine plant of 0.2kw output power installed in Korea Maritime University. After a series of experiment the reliability and availability is confirmed and also stable operation is achieved.

And also it must be said that much more experimental running data including load

---

\* 한국해양대학교 전기공학과 대학원

\*\* 한국해양대학교 전기공학과 교수

test in connection with utility line is needed in order to implement this digital governor to Buk-Jeju power plant and other power plant not only steam turbine plant but also nuclear power plant.

## 제 1 장 서 론

현재 운전중이거나 건설중인 발전소의 계측 제어 설계는 1970년도 초반 이전의 기술을 바탕으로 되어 있어서 빠른 속도로 발전되고 있는 현재의 전기 전자 관련 기술 수준으로 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 발전 설비의 계측 제어 계통의 디지털화가 점차 요구되고 있다. 특히 차세대 신형 발전소에서는 디지털 기술의 적용을 기본 설계 요건으로 제시하고 있다.

최근 학계와 산업 현장에서는 실시간 처리 이론과 시스템의 신뢰성에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 우주 항공 산업, 자동 제어 시스템, 발전소 등 시간적 특성이 중요하게 고려되어야 하는 응용에서 더욱 강조되고 있다. 실시간 처리 이론은 주로 응용 시스템의 시간적 요구 특성을 파악하고 이를 만족시켜주는 이론이다. 예를 들어, 항공 운항 좌표계를 70[ms]마다 새로운 데이터로 갱신하여야 한다면, 방사능이 유출될 염려가 있으면 핵발전소를 30[ms]만에 차단시켜야 한다는 등이 시간적 요구 특성이 된다. 이러한 제약이 만족되지 못하면 오동작을 일으키거나 커다란 사고를 유발할 위험이 있으므로 실시간 처리와 신뢰성 있는 시스템이 필수적이라 할 수 있다.<sup>2)</sup>

미국의 TMI(three miles island) 경우와 같은 대형 사고는 물론 발전소에서 발생한 여러 사고 중 많은 경우가 부적절한 운전원 조치에 기인하는 것으로 분석되고 있다. 발전소의 운전에서 인적 오류를 줄여 안전성을 향상시키기 위해서는 운전원의 정확한 판단이 이루어지도록 지원하고, 인적 오류를 방지할 수 있도록 제어 시스템 설계를 개선해야 한다. 현재 우리 나라의 전력수요는 산업 발전과 더불어 국민의 생활, 노동 환경, 국민 의식구조의 변화, 사회여건 등의 변화로 선진국형으로 변화하고 있다. 전력공급 또한 선진국 수준의 양질의 전력을 공급해야 한다. 따라서 양질의 전력공급을 위한 일환으로 전력 계통의 주파수를 현재의 조정 목표  $60 \pm 0.2$ [Hz]에서  $60 \pm 0.1$ [Hz] 이내의 편차로 개선 유지토록 하는 것이 목적이다. 본 논문은 스팀 터빈 발전소의 터빈 속도제어 장치인 가버너를 디지털화한 디지털 조속기를 설계, 국산화 개발하기 위한 논문이다. 산업용 발전 플랜트에 있어서 발전 시스템이 한 번 정지하면, 그 손실은

돈으로 환산하지 못할 정도로 피해가 크다. 따라서 이러한 손실을 방지하기 위해서는 스팀 터빈 제어계의 신뢰성 향상이 무엇보다 중요하다.

본 논문은 이러한 디지털 가버너의 신뢰성 향상에 설계의 주안점을 두어, I/O 이중화와 CPU 모듈 삼중화에 의한 유효 제어 데이터의 산출 기법인 2 out of 3 보우팅 방법 및 자체 진단 기능을 갖춘 디지털 조속기 시스템의 하드웨어를 설계하였다. 이에 따라, CPU 모듈, 디지털 속도 검출 모듈, 아날로그 신호 입·출력 모듈, 디지털 모듈 입·출력 모듈, 직렬 신호 입·출력 모듈, 셔어보 밸브 제어 모듈, 마더 보더 등을 설계 제작하였다. 설계 제작된 디지털 조속기 콘트롤러를 본 대학에 설치된 스팀 터빈 파일럿 플랜트의 속도 제어 시스템에 적용하여 성능 시험을 하였으며, 그 결과 설계 제작된 디지털 조속기의 유용성 및 신뢰성을 확인 할 수 있었다.

## 제 2 장 디지털 조속기 설계

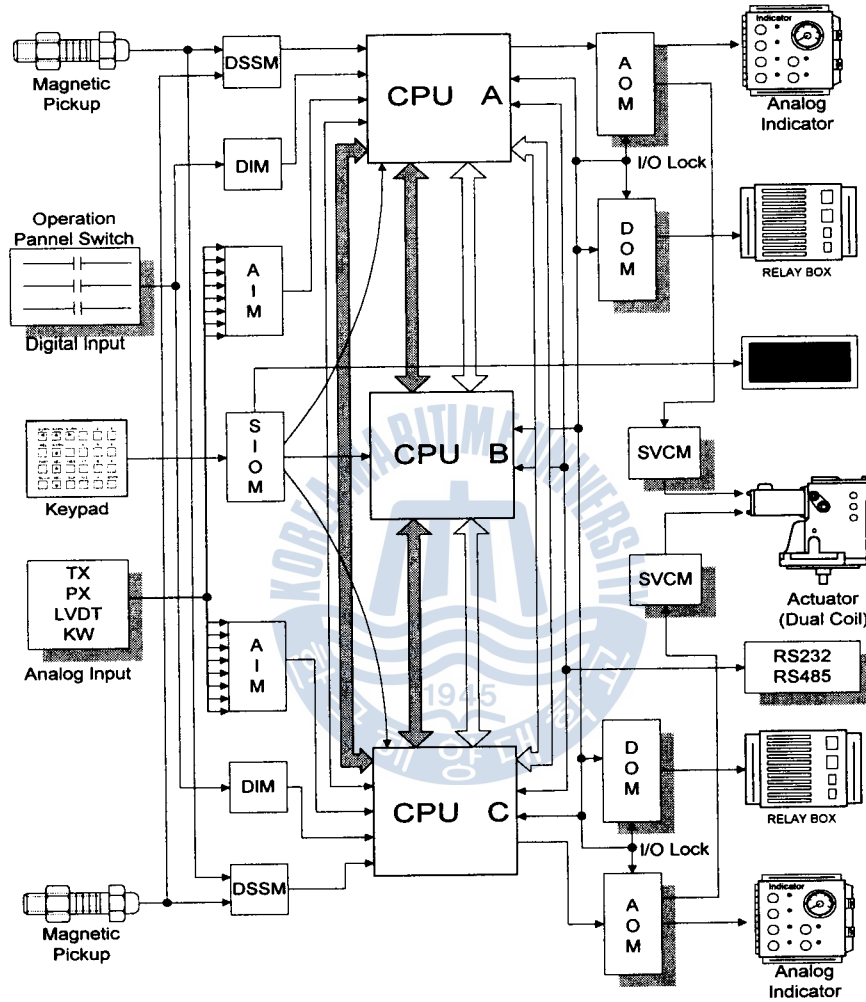
디지털 조속기 시스템의 전체 계통도는 Fig 2.1과 같이 CPU 모듈의 삼중화와 I/O 모듈의 이중화로 구성된다. CPU 모듈은 각기 독립된 프로세서와 메모리를 내장하고 있으며, 외부 센서로부터 입력된 신호(속도, 압력, 온도, 밸브 변위, 발전기 출력 등등)를 세 개의 CPU 모듈에서 개별적으로 연산 처리한 후 2 out of 3 voting 방식을 사용하여 유효 출력 제어신호를 결정한다. 선택된 유효 데이터는 DOM(digital output module), SIOM(serial input output module), AOM(analog output module)을 통하여 각종 주변장치로 출력된다.

CPU A와 CPU C 모듈은 제어권을 가지며, 입력 디바이스로부터 독립적으로 값을 받는다. 터빈의 회전수와 같은 중요한 입력 요소는 세 개 또는 그 이상의 센서로부터 입력을 받아 신뢰성을 높이는 것이 일반적이다. CPU A와 CPU C 모듈로 입력된 데이터 값은 CPU 내부 직렬 통신에 의해 세 개의 CPU 모듈이 데이터를 공유하게 되며, 각기 모듈은 독립적으로 연산을 수행한 후 유효 데이터를 재 교환함으로써 각각 2 out of 3 voting을 수행하도록 하였다.

마그네틱 픽업은 터빈 발전기의 축에 부착된 기어 치수(齒數)에 비례하는 신호(구형파, 사인파)를 발생한다. 이러한 신호는 DSSM에서 신호 처리를 수행한 후 유효 데이터를 CPU 모듈의 속도 피드백 값으로 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 A 또는 B 집점으로 온/오프 신호를 출력하도록 하였고, AOM은 아날

로그형 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 구성하였다



- DSSM : Digital Speed Sensor Module
- DIM/DOM : Discrete Input/Output Module
- AIM : Analog Input Module
- AOM : Analog Output Module
- SVC M : Servo Valve Control Module

Fig 2.1 Digital governor system block diagram

### 제 3 장 내(耐)고장성이 강한 시스템

#### 3.1 용어 정의 및 모델링

##### 3.1.1 신뢰성(reliability)

신뢰성이란 주어진 시간과 조건에서 요구되는 임무(mission)를 수행할 수 있는 가능성으로 정의되며, 수식적인 표현은 식 3.1과 같다.

$$R(t_m) = e^{-\int_0^{t_m} \lambda(t) dt} \dots\dots\dots (3.1)$$

여기서,  $R(t_m)$  = 신뢰성

$\lambda(t)$  = 고장률

$t_m$  = 임무 수행 시간(임무는 t=0에서 시작)

고장률은 순간적인 고장 가능성으로 생각될 수 있으며,  $\lambda(t)dt$ 는  $(t, t+dt)$  시간 사이에 생길 수 있는 결함의 가능성이다. 고장률은 임무 수행 시간의 전 범위에서 볼 때 상수로 취급 가능하며 식 3.1을 간략히 하면 식 3.2와 같다.

$$R(t_m) = e^{-\lambda t_m} \dots\dots\dots (3.2)$$

테일러 전개에 의해

$$e^{-\lambda t} = 1 - \lambda t + (\lambda t)^2/2! - (\lambda t)^3/3! + \dots$$

$\lambda t$ 의 값이 적으므로 신뢰성은 식 3.3으로 나타낼 수 있다.

$$R(t) \cong 1 - \lambda t \dots\dots\dots (3.3)$$

##### 3.1.2 유용성(availability)

유용성은 시스템 실행시 고장에 의한 수리 또는 대치에 필요한 시간의 관계이며, 이는 신뢰성(reliability)과 편리성(serviceability)을 동시에 제공해야 한다. 유용성을 수식적으로 나타내면 식 3.4와 같다.<sup>3)</sup>

$$\text{유용성(availability)} = \frac{\text{평균 운전 시간}}{\text{평균 운전 시간} + \text{평균 정지 시간}} \dots\dots\dots (3.4)$$

터빈 회전수의 2 out of 3 Voting 방법을 Fig 3.1에 도시하였다.

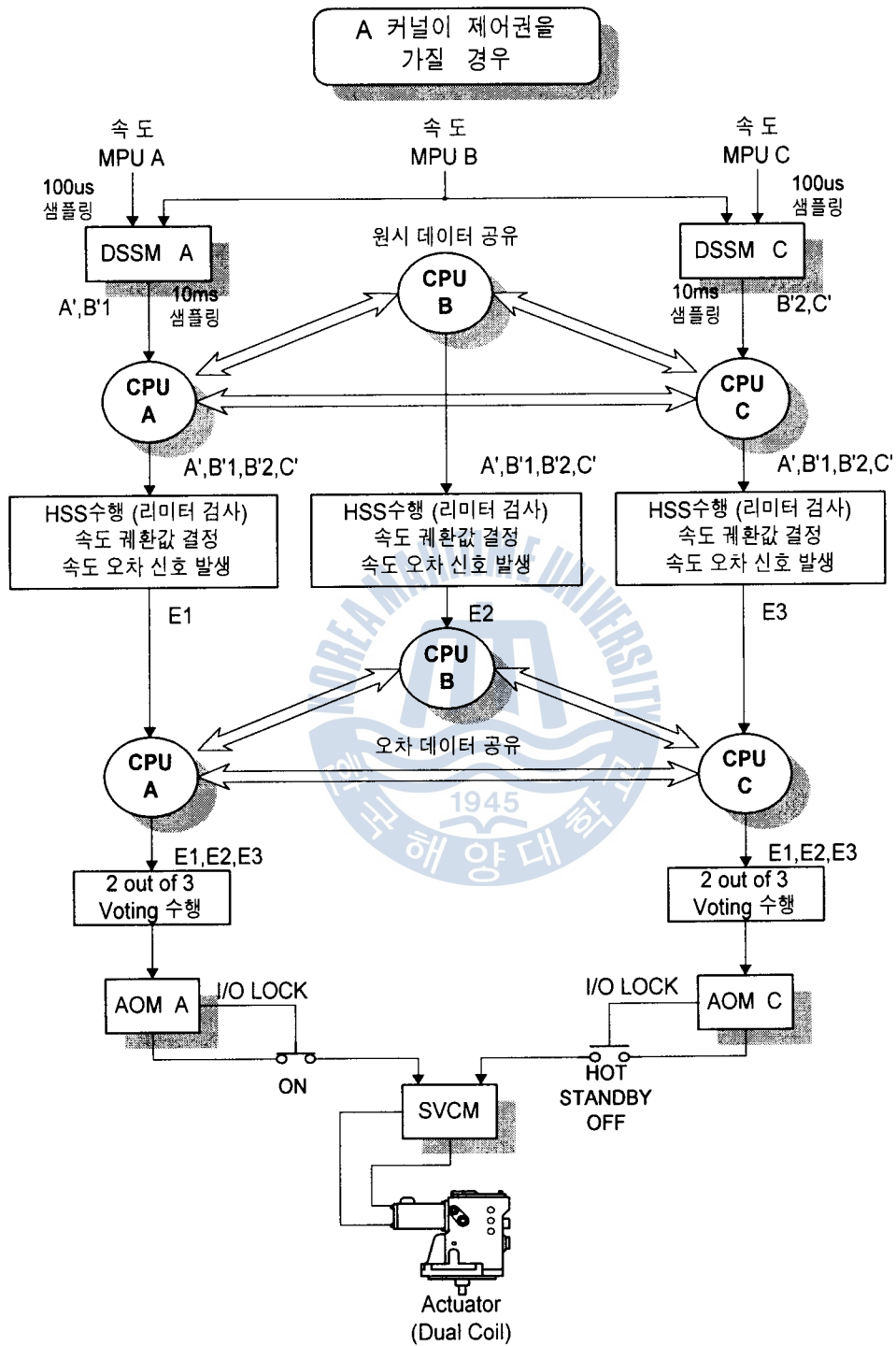


Fig 3.1 2 out of 3 voting example of turbine speed values

## 제 4 장 성능 시험

본 논문에서 다루는 디지털 조속기 시스템은 북제주 화력발전소의 10[MW] 스팀 터빈 제어를 목적으로 개발되었으며, 현재 가동중에 있으므로 터빈의 제어 및 시스템 성능 시험이 불가능하다. 따라서 현장의 조건과 흡사한 파일럿 플랜트를 이용하여 성능 시험을 실시하였다.

파일럿 플랜트는 0.3[kW]의 출력을 가지며 기계식 조속기를 포함하고 있으므로 개발된 시스템의 성능 시험을 위하여 기계식 조속기 및 기구물을 제거하였고, 디지털 제어에 사용되는 입력 센서와 스팀의 양을 조절하기 위한 컨트롤 밸브를 구동하는 액추에이터를 부착하였다. Fig 4.1은 파일럿 플랜트를 제어하고있는 디지털 조속기 시스템의 전경이다.

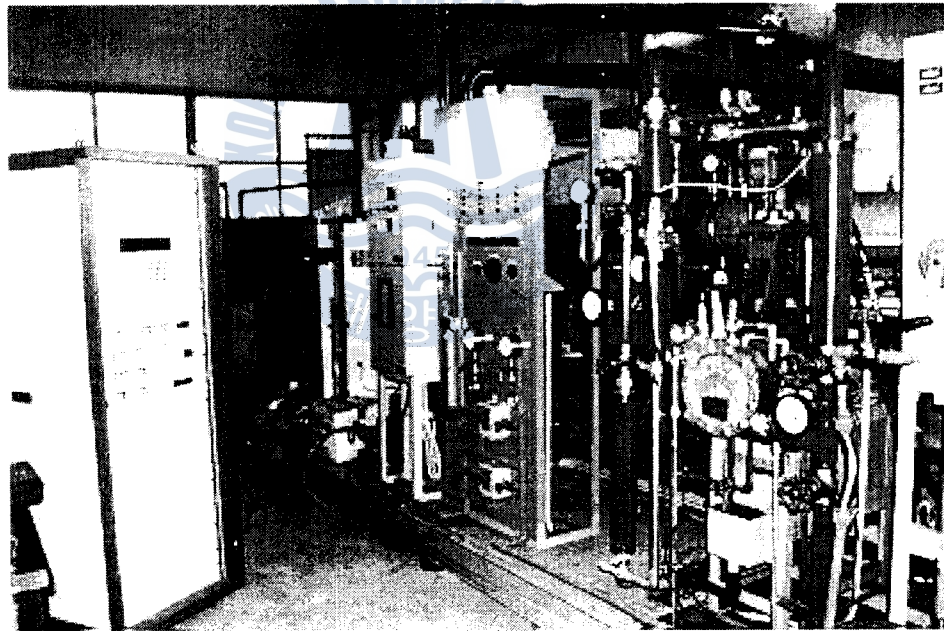


Fig 4.1 Digital governor system and pilot plant

## 제 5 장 결 론

현재 건설된 거의 모든 발전소는 에너지 자립과 경제성만을 고려하여, 양적인 면에

만 치중한 결과 자동 부하 추종성이 어려운 기저 부하용이 대다수이다. 더구나 부하 주파수 제어가 불가능한 원자력 발전소의 전력 공급이 약 50%에 이르고 있는 실정이므로 주파수 정밀 유지에 필요한 조속기 시스템의 디지털화 및 신뢰성 향상의 필요성이 대두되어 왔다.

따라서, 본 논문에서는 디지털 조속기의 신뢰성 향상에 주안점을 두어 설계하였으며, 고신뢰성 디지털 조속기의 설계 조건으로 다음과 같은 것이 있다. 첫째, 모듈을 분산함으로써 고장 부위의 확산을 방지해야 하고 둘째, 모듈을 중복 설치함으로써 중단됨이 없는 제어 동작이 가능해야 하며 셋째, 삼중화에 의한 2 out of 3 voting으로 유효 데이터를 결정할 수 있어야 한다.

이상의 설계 조건을 만족하는 시스템을 개발하여 성능시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 모듈의 각 기능에 맞는 마이크로프로세서를 내장함으로써 보다 빠르고 정확한 터빈 제어가 가능하며

둘째, 내(耐)고장성이 강한 시스템을 구축하여 CPU 모듈간 삼중화 통신 및 2 out of 3 voting에 의해 신뢰성이 향상됨을 성능시험에서 입증하였으며 셋째, 시스템이 정상적인 동작을 하고있을 때 A, B, C 커널의 전원을 임의로 차단시켜도 터빈 제어는 지속적으로 이루어졌으며, 일정시간 후 전원을 투입하면 현재 제어중인 모듈의 클럭에 동기되어 다시 제어 동작이 일어남을 확인하였다.

개발된 시스템은 파일럿 플랜트를 대상으로 실험하였으나, 실제 발전소의 터빈과는 관성 모멘트 등 많은 차이가 있다고 생각된다. 보다 정확하고 신뢰성 있는 디지털 속도 제어 시스템의 개발을 위해 발전소 현장에서의 많은 실험이 지속적으로 이루어져야 될 것이다.