

터빈 감시제어용 삼중화 제어시스템 설계에 관한 연구

안종보, 김국현, 김석주, 김춘경, 김종문
한국전기연구소 전력연구단 계측제어연구그룹

A Study on Design of TMR Control System for Steam Turbine

Ahn Jongbo, Kim Kookhun, Kim Seogjoo, Kim Chunkyong, Kim Jongmoon
Korea Electrotechnology Research Institute, Electric Power Research Center, I & C Group

Abstract - For the control system of thermal turbine in fuel and nuclear power plant, as high reliability and availability are required, redundant control system is generally applied. This paper presents the configuration and design of such a redundant control system that can be suitable for control and monitoring of the turbine. System components such as I/O system, communication networks, voting system are designed, and especially the new intelligent voter using serial communication are proposed.

The characteristics of the implemented control system is independence of the control, protection and monitoring functions, and discrimination of the redundancies, and high availability. The control functions such as speed control, load control, valve control and protective functions such as overspeed and PLU are designed in detail.

1. 서 론

삼중화 시스템은 높은 신뢰도와 가동율을 요구하는 설비의 제어시스템으로 적용될 수 있는 하드웨어적인 여유분(redundancy)을 가진 시스템 중의 하나이다. 즉 동일한 3개의 하드웨어로 구성하여 단일 부품의 고장(single point of failure)에 의해 제어가 정지하거나 혹은 잘못된 출력을 내는 것을 회피하도록 설계하는 것이다. 이를 위해서 삼중화 시스템(triple modular redundancy)은 발생한 고장이 사고로 파급되지 않도록 고장을 차폐 혹은 차단해야 하며 이러한 과정이 제어 대상에 미치는 영향을 최소화하도록 설계되어야 한다[1].

본 논문은 화력이나 원자력 발전소에서 운영되고 있는 가스 혹은 증기터빈의 제어 및 감시장치로 적용될 수 있는 삼중화 터빈 디지털 제어시스템의 설계에 관한 것이다. 먼저 터빈 제어시스템의 요구 기능을 제어, 보호 및 단순 감시의 측면에서 살펴보고 이들 기능을 구현하는 삼중화 제어시스템의 설계 사례를 소개한다. 삼중화 제어시스템 설계의 기본 개념과 이에 따른 입출력 구조, 통신 방식, 보팅 구조에 대해 상세히 기술되며 특히 삼중화 제어시스템에 있어서 핵심적인 보터(voter)의 새로운 구성 방식이 제안된다.

2. 본 론

2.1 터빈 제어시스템의 요구 기능

현재 국내 화력발전소에서 운영되고 있는 500MW급 증기터빈 제어 시스템의 기능을 제어, 보호 및 단순 감시의 측면에서 분석하면 다음과 같다.

2.1.1 제어

증기터빈 제어의 기본은 보일러로부터 발생된 증기가

터빈 내부로 들어가는 양을 조절하는 것에 의해 터빈의 속도와 부하를 제어하는 것이다. 이 제어루프는 속도제어, 부하제어, 밸브제어로 구성되며 기동 시에는 속도제어가 주제어가 되며, 동기속도로 회전하여 발전기가 계통에 병입되어 송전을 개시하면 부하제어가 주제어가 된다. 밸브제어는 속도 혹은 부하제어의 출력을 받아서 실제로 터빈의 제어밸브를 구동하는 최종적인 내부루프이다. 터빈제어의 블록선도가 아래의 그림 1에 나타나 있다[2].

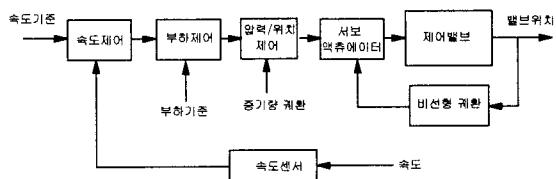


그림 1 터빈의 제어 블록선도

속도제어기는 터빈이 기동할 때 일정한 가속율로 가속될 수 있도록 제어하는 기능과 가속 완료 후 일정 속도를 유지하게 하는 기능을 한다. 속도의 검출은 일반적으로 터빈의 축에 연결된 60개 정도의 치자와 MPU(magnetic pickup)을 이용하게 되며 신뢰도의 향상을 위하여 여유분의 센서를 갖도록 설계된다[3].

부하제어기는 터빈이 출력하는 기계적인 출력을 제어하는 것으로 부하기준과 속도편차가 그 입력이 된다. 압력/위치제어기는 부하제어기에서 출력된 부하기준을 주증기압으로 나누어서 필요한 증기량으로 변환하는 역할을 한다. 출력은 압력과 유량의 곱으로 결정되며 때문이다. 요구되는 증기량은 최종적으로 밸브의 위치기준신호로 변환되어 출력된다.

밸브제어에는 밸브위치기준으로 밸브를 구동하는 루프이며 밸브의 비선행성의 보상과 위치제어의 안정도를 높이기 위하여 내부 제어루프를 보유하고 있다. 밸브위치는 선형가변차동변압기(linear variable differential transformer)를 이용하여 검출한다. 제어밸브는 서보액추에이터(servo actuator)에 의해 유압을 증폭하게 되고 이 힘으로 주 증기의 유량을 제어하게 된다.

실제의 제어에 있어서는 보다 복잡한 제어 기능이 추가되는데 아래와 같은 것들이다[3].

- 속도제어에 있어 가속율 제한
- 부하제어에 있어 부하 증가율 제한
- 가속 중 공진속도 회피(wobblulator function)
- 주증기압력 제한(main steam pressure limit)
- 밸브위치제한(valve position limit)
- 밸브 시험(valve tightness test)

터빈제어시스템에 있어서 가장 중요한 부분은 조절기(regulator), 센서, 서보시스템 등이며 다중화에 의한 신뢰도의 향상은 이들을 여유 설계함으로서 달성될 수 있다. 제어루프 중에서 센서와 조절기는 각각을 다중화하여 센서나 조절기의 고장에 의해 시스템이 트립되지

않도록 구성할 수 있다. 그러나 이 부분이 전전하다고 해도 최종적으로 조절밸브를 구동하는 서보시스템이 고장날 경우 다중화는 무의미하게 된다. 또 많은 경우 조절기의 출력력을 제어대상에 연결하기 위한 증폭기는 하나인 경우가 많으므로 이들 사이의 인터페이스 문제를 해결할 수 있어야 한다. 따라서 터빈의 증기조절밸브는 3-코일 서보액추에이터(3-coil servo actuator)를 적용하게 되며 이는 아래의 그림2에서 보는 것과 같다. 각 조절기는 독자적으로 액추에이터에 제어출력을 보내며 최종적으로는 각 제어의 출력들이 합산된 형태의 소위 플럭스 합산형(flux summing) 서보시스템을 구성하게 된다[1]. 이러한 구성으로 다중화의 인터페이스의 문제와 액추에이터의 신뢰도 병목현상을 경감할 수 있다.

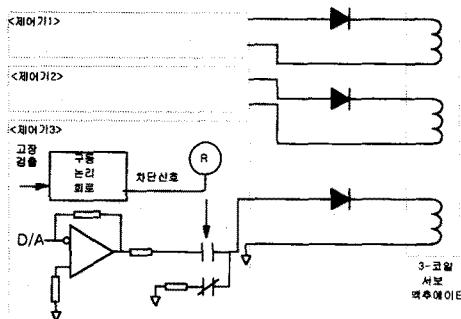


그림 2 서보 액추에이터

2.1.2 보호

터빈의 보호는 고온증기에 의한 회전자의 표면과 심층부(bore)의 온도편차에 의해 기계적인 변형을 초래하거나 수명을 단축하는 과도한 열응력(thermal stress)으로부터의 보호가 필요하며 기계적 출력과 전기적인 부하의 불균형(power-load unbalance, PLU)에 의한 과속으로부터의 보호가 중요하다[4].

열응력은 회전수와 터빈 각부의 금속온도를 계측하여 터빈의 보어의 열응력을 계산하여 이 결과로부터 자동기동(automatic turbine startup, ATS)시 가속률 혹은 속도유지를 결정하는 기준으로 사용하게 된다.

발전기부하를 차단하면 터빈은 무부하상태로 되면서 기계적인 출력은 급속히 감쇄하지 않으므로 급가속하게 되어 회전자나 베어링의 파괴에 이르므로 과속으로부터 터빈을 보호해야 한다. PLU는 과속으로부터 터빈을 보호하는 한 방법으로서 발전기의 전기적 출력과 터빈의 기계적 출력을 각각 발전기의 전류와 증기의 압력으로부터 계산하여 그 편차가 일정 수준을 초과하면 밸브를 차단하는 기능이다. 또 속도센서로 속도를 계측하여 터빈을 트립시키도록 설계되어 있다.

또한 터빈의 보호에 있어 중요한 부분은 진동과 마모의 감시이다. 터빈의 주요부와 베어링은 진동센서, 위치센서 등에 의해 감시되며 이들은 과도한 진동, 팽창, 마모 등이 검출되면 터빈의 운전을 정지하게 한다.

실제의 터빈제어시스템은 제어뿐만 아니라 보호부분도 검출센서, 트립회로 등을 다중화하여 안전성을 강화하고 있다.

2.2 삼중화 시스템의 설계

터빈의 제어와 보호 및 감시에 적용할 수 있는 고신뢰도의 제어 시스템은 다음과 같은 기본 개념으로 설계되었다.

-시스템 수준의 삼중화 구성

상업화되고 그 기본적인 기능이 입증된 분산처리시스템(distributed control system)을 기반으로 하여 삼

중화 시스템을 구성하였다.

-다중화의 독립성과 차별성

보호와 제어, 감시를 별도의 독립된 시스템으로 다중화하며 상호 영향을 최소로 하고 제어와 보호에 있어서는 삼중화, 단순 감시기능의 2중화 방식을 채택했다. 충분한 신뢰도의 확보와 경제성 관점이 고려되었다.

-지능형 입출력 시스템의 채택

입출력 보드 내에 프로세서를 내장하여 주 제어장치의 부하를 경감하고 단위 시스템 내에서 신호처리 등의 기능의 분산화를 도모하였다.

2.2.1 입출력 시스템

입출력 시스템은 전압, 전류 등 표준 신호입출력형 보드와 신호처리보드, 단자대 보드로 구성된다. VME 버스를 채택한 입출력 시스템은 병렬로 입출력을 할 수 있는 구조로 설계되어 이더넷(ethernet) 기반의 고속 통신망을 이용하여 주 처리장치로 데이터가 전송된다. 입출력시스템에 있어서 단위 시스템의 고장이 전전한 다른 시스템에 영향을 끼치지 않도록 설계되어 있다.

주요한 입출력 신호는 아래와 같다.

-점검 입력, 계전기/솔레노이드(solenoid) 출력

-4~20mA 표준 아나로그 입력, 출력

-MPU 입력

-LVDT 입력

-열전대(thermocouple) 입력

-RTD(resistance temperature detector) 입력

-발전기의 단자전류, 전압 입력

2.2.2 통신

세 종류의 통신이 적용되고 있는데 각각의 기능은 다음과 같다.

-IOU-net

입출력을 담당하는 IOU(input output unit)와 PMU(process management unit)간의 데이터 전송에 사용되는 통신망으로 IEEE802.3 CSMA/CD 물리층을 기반으로 하고 있으며 속도는 10Mbps이다.

-PMU-net

Ethernet TCP/IP 상에 구현된 스테이션간의 통신망으로 10Mbps의 속도를 가지고 있다. 삼중화 시스템에서 이 통신망은 다중화된 제어기간에 데이터 공유를 통한 소프트웨어적인 보팅(voting)을 위하여 사용된다.

-HOST-net

PMU-net과 동일한 통신망으로서 각 다중화된 제어기들의 PMU를 시스템의 설정이나 감시, 응용프로그램의 작성을 위한 엔지니어링 스테이션과 시스템의 운영 및 감시를 위한 HIS(human interface station)에 연결하는 기능을 한다.

이들 세 개의 통신망은 PMU 내에 독자적인 통신모듈에 의해 운영되며 각 통신포트는 이중화되어 있다.

2.2.3 보팅 구조

여분의 하드웨어를 가진 다중화 시스템의 일반적인 구조는 입력다중화, 입력선택기, 연산 혹은 처리 다중화, 출력선택기로 구성된다[1]. 입력다중화는 입력 센서의 다중화나 입력모듈의 다중화로 구현될 수 있다. 따라서 센서나 입력 모듈의 고장이 발생해도 전전한 입력을 얻을 수 있다. 문제는 고장난 입력을 연산이나 제어에 사용되지 않도록 선택하는 기능이 필요하다. 그 기능을 입력선택기가 하게 된다. 삼중화 시스템의 경우 디지털입력은 다수결의 원칙, 즉 3개중의 2개(2-out-of-3) 선택을 하게 되고 아나로그 신호는 중간값 선택(median select)을 사용하게 된다[1]. 이 입력선택기를 1개만 구성할 경우 다중화에 따른 신뢰도의 병목현상이 발생하게 된다. 또 선택기를 다수 개 설치한다해도 최종적으로는 1개의 전전한 값의 선택이 필연적이므로 신뢰도 문

제는 해결되지 않는다. 디지털 제어시스템에서는 통신망의 적용이 용이하므로 입력모듈이나 제어기간의 통신을 통한 데이터의 공유가 가능하다. 따라서 각 제어기는 다중화된 다른 제어기가 입력한 정보도 보유하므로 이를 이용하여 전술한 선택기의 기능을 구현할 수 있다. 디지털 터빈 삼중화 시스템에서는 별도의 입력 선택기가 없는 구조를 채택하고 있다.

제어의 연산은 다중화된 각 제어기가 동일한 입력값으로 연산하게 되므로 제어기가 전전한 이상 다른 결과를 낼 수가 없다. 그러나 제어기에 고장이 발생할 경우 틀린 출력을 낼 수 있으며 이것은 출력선택기에 의해 제외될 수 있다. 출력선택기도 입력선택기와 동일한 신뢰도의 문제가 발생한다. 아나로그 출력인 경우는 앞의 그림 2에서와 같은 액츄에이터로 인터페이스가 가능하지만 디지털 출력인 경우 계전기나 솔레노이드 등을 구동하기 위해서는 1개의 출력이 필요하다. 이를 위해서 많이 사용하는 방법은 각 제어기가 출력하는 접점을 배선으로 연결하여 $OUT = A \cdot B + B \cdot C + C \cdot A$ 의 논리로 출력하는 것이다. 이 경우 항상 2개의 제어기가 전전한 출력을 내야 한다.

출력선택기의 신뢰도 병목을 해결하고 제어기가 2개 고장이 발생해도 계속 운전이 가능하며 디지털 출력에 대해서 접점의 배선에 의한 논리 구성으로 복잡해지는 배선을 단순화하여 IOU에 입출력보드를 사용하지 않는 새로운 디지털 출력장치가 아래의 그림 3에 나타나 있다.

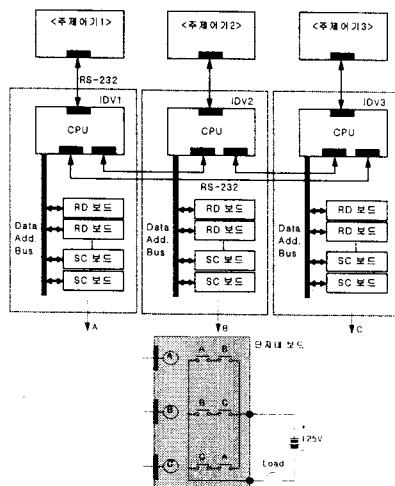


그림 3 지능형 보더의 구조

다중화된 각 제어기는 IOU의 디지털 출력보드가 아니라 직렬통신으로 그 출력 데이터를 전송한다. 이 직렬통신은 표준화된 모드버스(modbus) 프로토콜을 사용한다. 출력장치의 CPU는 이 데이터를 또 다른 출력장치와 교환하고 공유된 이 데이터로부터 최종적인 출력의 선택을 하게 된다. 이러한 과정을 통하여 출력장치의 각 CPU는 전전한 출력 데이터를 가지게 되며 이를 계전기 구동보드(relay drive board)를 통해 출력하게 된다. 각각의 출력은 단자대 보드에서 배선으로 구성된 논리에 의해 최종적인 1개의 출력이 발생된다. CPU는 이 과정에서 상위 제어기가 2개까지 고장나도 출력장치의 통신망만 전전하면 계속적으로 출력을 유지하도록 프로그램될 수 있다.

2.3 전체 시스템의 구성

기본적인 설계 개념에 따라 주제어(CR)와 보호(PR)

부분을 독립적으로 삼중화하고 감시(NM) 부분을 이중화하여 구성한 전체 시스템의 구성이 그림 4에 나타나 있다. 3개의 통신망은 이중화되어 있으며 맨 아래에 출력장치가 나타나 있다. 주제어반의 내부가 그림 5에 나타나 있으며 그림 6은 제어반의 구성을 나타낸다. 주제어반은 좌측에서 세면으로 구성하였으며 동일한 구조이다. 필요에 따라서 단일 제어반으로 혹은 이중화로 구성하여 적용할 수 있다. 맨 오른쪽은 이중화되어 있는 단순 감시반이다. 단순 감시는 제어와 트립에 직접적으로 연계되지 않는 보조기기들의 감시를 포함하고 있다.

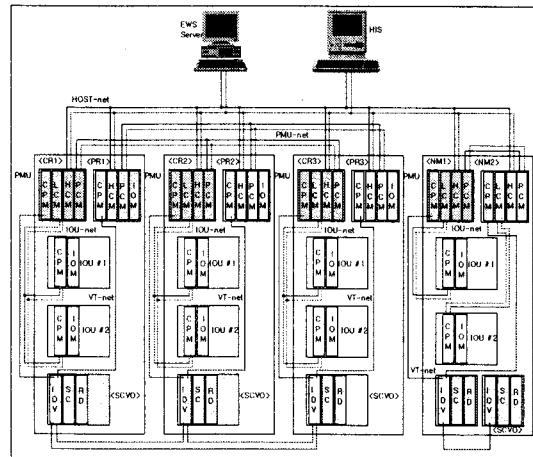


그림 4 전체 시스템 구성



그림 5 주제어반

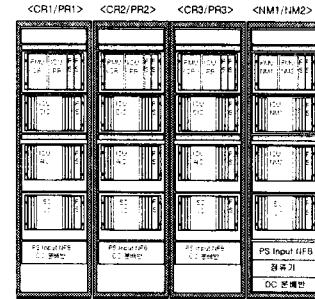


그림 6 제어반의 구성

3. 결론

증기 터빈의 제어와 보호 및 감시에 요구되는 기능을 검토하고 이를 바탕으로 제어시스템의 신뢰도와 가동율을 최대화 할 수 있는 삼중화 제어시스템을 설계하였다. 이 설계는 상업화된 분산제어시스템을 기반으로 하였으며 여유시스템(redundant system)에 필수적인 많은 기능들이 소프트웨어로 처리된 SIFT(software implemented fault tolerant) 개념의 삼중화 시스템을 개발하였다.

본 연구는 전력연구원의 지원으로 수행되었습니다.

(참고문헌)

- [1] Barry W. Johnson., Design and Analysis of Fault Tolerant Digital Systems, Addison-Wesley Pub. Co., 1989.
- [2] "Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies". IEEE committee report, 1973
- [3] GE Power Systems. Description of SPEEDTRON -IC Mark V Control System-Large Steam.
- [4] P. Kundur. Power System Control and Stability, McGraw-Hill, inc., 1994