

터빈제어용 3중화 디지털 제어시스템의 구성방식에 관한 연구

정창기, 신윤오
한전 전력연구원

A Study on Configuration Method of TMR Control System for Turbine Control

Jeong, chang-ki, Shin, yoon-oh
KEPRI

Abstract - Distributed Control System has been used for large scale and critical system control such as aerospace industries, chemical and power plant and so on. It is very important factors for design of the control system to be reliable and fault-tolerant.

These control systems have backup or redundant processing modules for minimizing the time of failure and improving reliability. But such methods have changeover duration from faulty module to healthy one. During that interval, feedback control loop raises bumper and performance of the system become worse. TMR(Triple Modular Redundancy) control system is one of the best reliable ones that can overcome such a mortal drawback.

This paper analyzes the components of TMR system functionally and proposes practical and cost effective configuration method for turbine control of thermal power plant.

1. 서 론

우주항공, 화학플랜트, 발전소등 안전, 환경보호, 장비 보호가 제어시스템 설계의 중요한 목표가 되는 분야에 있어서 신뢰도의 향상을 위한 내고장성(Fault Tolerant) 제어시스템이 적용되어 왔다. 이들 플랜트들은 다수의 제어루프와 연산처리 및 고장시 시스템 정지를 최소화하기 위하여 분산제어시스템(Distributed Control System)에 의해 제어되고 감시되는데 플랜트의 중요성에 따라 각 분산제어장치의 단위시스템들은 연산처리모듈이나 입출력모듈의 2중화 혹은 백업(backup)모듈을 설치하여 고장시간을 최소화하고 있다. 그러나 기존의 2중화방식은 제어기의 고장시 건전한 모듈로 절제하는 방식을 취하기 때문에 절제기간에 제어상 과도현상이 발생할 수 있다.

이러한 문제점들을 해결할 수 있는 대표적인 내고장성 제어시스템 중의 하나가 TMR(Triple Modular Redundancy)시스템이다.[1, 2] 본 논문에서는 터빈의 디지털제어시스템에 적용될 수 있는 TMR제어기의 주요 구성요소의 기능을 중심으로 그 구성 방안을 비교분석하고 성능, 신뢰도, 경제성 측면에서 우수한 방식을 제안하고자 한다.

2. 터빈의 제어-보호 시스템

2.1 터빈의 제어

터빈의 제어는 속도제어와 부하제어로 구성되며 제어기의 출력은 조절밸브를 동작시키는 서보밸브 액추에이터에 의해 증폭된다. 제어기의 블록선도가 아래의 그림1에 나타나 있다. 다음 그림에서 보는 것처럼 속도제어기는 터빈이 기동할 때 일정한 승속률로 가속될 수 있도

록 제어하는 기능과 가속 완료후 일정 속도를 유지하게 하는 기능을 담당하게 된다. 속도제어의 궤환요소는 터빈의 운전속도가 되며 속도제어기의 출력은 외부 부하기준과 더불어 부하제어기의 입력이 된다.

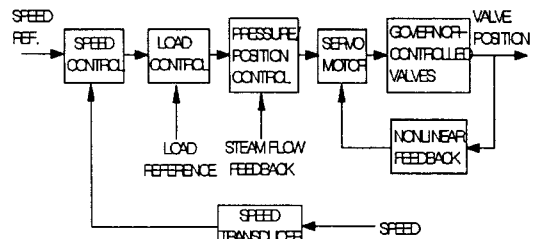


그림1. 터빈의 제어 블록선도

부하제어기는 터빈에 의해 구동되는 발전기가 전압을 확립하고 계통에 병입되어 전기적인 출력을 낼 때 필요한 기계적 출력, 즉 부하를 제어하는 기능을 담당하게 된다. 터빈이 일정 출력으로 운전하기 위해서 발전기의 전기적 출력이 궤환신호로 사용되며, 부하제어기의 출력을 주증기압력으로 나누면 부하기준신호가 된다. 이 부하기준신호는 주증기조절밸브(main steam control valve)의 개도를 변화시켜 터빈으로 인가되는 증기량(steam flow)을 변화시키므로써 속도와 부하를 제어하게 된다. 부하기준신호는 부하, 즉 증기량을 결정하는 밸브 개도의 신호로 변환되어 밸브를 구동하는 서보액추에이터로 입력된다. 밸브는 이 신호에 비례하여 작동하게 되는데 여기에는 2개의 비선형성이 존재하므로 밸브의 위치를 검출하는 센서인 LVDT(linear voltage differential transformer)를 사용하여 이를 보정해 주어야 한다. 이 비선형성 중의 하나는 조절밸브의 개도율과 증기량 사이의 비선형성이고 다른 하나는 부분분사(partial arc admission)에 의한 것이다.

위에서 설명한 2개의 제어루프는 터빈제어의 가장 중요한 부분으로서 조절기(regulator), 센서, 서보시스템등을 다중화하므로써 제어시스템의 신뢰도를 제고하고 과속 등으로부터 터빈을 보호할 수 있다.

제어루프의 다중화중 센서와 조절기는 각각을 다중화하여 센서나 조절기의 고장에 의해 시스템이 트립되지 않도록 구성할 수 있다. 그러나 이 부분이 건전하다고 해도 최종적으로 조절밸브를 구동하는 서보시스템이 고장날 경우 다중화는 무의미하게 된다. 또 많은 경우 조절기의 출력을 제어대상에 연결하기 위한 증폭기는 하나인 경우가 많으므로 이들 사이의 인터페이스문제를 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 'Flux summing'형 서보시스템을 구성하게 된다.[2] 이러한 구성으로 다중화의 인터페이스의 문제와 액추에이터의 신뢰도 병목현상을 경감할 수 있다.

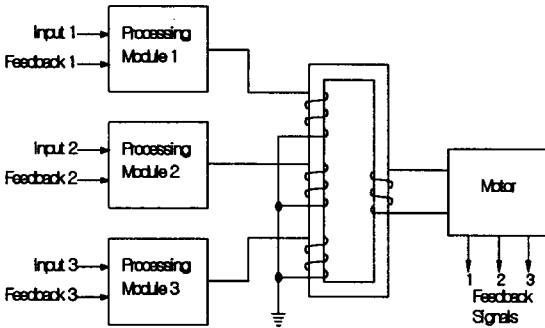


그림 2. 3-코일 서보 액추에이터

2.2 터빈의 보호

터빈 보호의 핵심은 냉각시 고온증기에 의한 회전자의 표면과 보어(bore)의 온도편차에 기인하는 과도한 열응력(thermal stress)으로부터의 보호와 기계적 출력과 부하의 불균형(power-load unbalance, PLU)에 의한 과속으로부터의 보호이다.

먼저 열응력은 회전수와 터빈 각부의 급속온도를 측정하여 터빈의 보어의 열응력을 계산하는 것으로서 이 열응력의 결과는 자동기동(Automatic Turbine Startup, ATS)시 가속을 혹은 속도유지(speed hold)를 결정하는 기준이 된다.

부하 차단시 터빈은 무부하 상태로 되면서 기계적인 출력은 급속히 감소하지 않으므로 급가속하게 되어 회전자나 베어링의 파괴에 이르므로 과속으로부터 터빈을 보호해야 한다. PLU는 과속으로부터 터빈을 보호하는 한 방법으로서 발전기의 전기적 출력과 터빈의 기계적 출력을 각각 전류와 증기의 압력으로부터 계산하여 그편차가 일정 수준을 초과하면 밸브를 차단하는 기능이다. 또 과속은 속도센서로부터의 속도계측에 의해 터빈을 트립시키도록 되어 있다.

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

3. TMR 터빈제어시스템의 구성방식

앞 절에서 설명한 터빈의 제어와 보호기능을 수행하는 제어시스템은 운용의 편이성, 신뢰성의 제고 측면에서 디지털화, 다중화의 추세에 있다.

본 논문에서는 터빈의 제어와 보호의 측면에서 다중화의 방식들을 검토하여 장단점들을 분석하여 보다 경제적이고 신뢰성 있는 제어시스템 개발의 발판을 마련하고자 한다.

다중화는 제어시스템의 구성측면에서는 입력, 조절기, 출력 모두가 동일한 수준에서 다중화될 수 있으며 기능적으로는 제어, 보호, 감시들이 각각 다중화될 수 있다. 또한 다중화방식은 시스템 구성의 비용과 요구되는 신뢰도의 측면에서 검토되어야 하며 다중화에 의한 복수개의 출력들을 1개의 제어대상 플랜트에 연결하기 위해 선택하는 과정, 즉 Voting 시스템의 구조와도 관련이 있다.

가장 일반화된 다중화방식중의 하나가 '2 out of 3 voting'을 적용하는 3중화방식, 즉 TMR방식이다.

아래에 TMR방식을 채택하기 위한 제어기의 구성을 검토하였다.

3.1 표준형 TMR시스템

표준형 TMR 시스템(standard multi-stage TMR system)은 아래의 그림3과 같이 개념적으로는 가장 완벽한 형태의 보팅시스템을 갖고 있는 구조이다. 이 구조의 특징은 입력, 출력, 제어기중에서 다중화의 병목현상이 없으나 최종 출력이 다수개이므로 액추에이터가 다수개 혹은 병렬운전이 가능한 형태야야 한다는 점이다. 여자제어시스템에서의 전력변환기의 병렬운전에 이 개념이 적용되고 있다. 또 입력보터(input voter)를 사용하므로 정상상태에서 각 제어기들이 동일한 값을 가지게 되어 적분기를 가진 제어기의 발산등의 문제가 야기되지 않는다. 이 구조의 단점은 하드웨어로 구현시 시스템의 크기 및 배선문제등이 따르게 되므로 입출력이 많은 대형플랜트의 제어에는 적합하지 않다는 점이다.

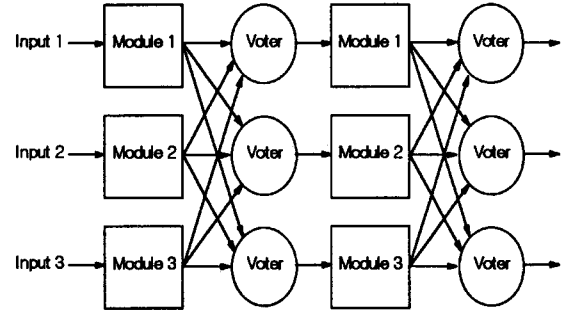


그림 3. 표준형 TMR시스템

이 구조의 복잡한 배선문제는 디지털 제어시스템에서는 제어기 간의 통신으로 해결할 수 있고 입력보터는 공유한 데이터를 소프트웨어로 구현할 수 있다. 이 개념을 터빈 제어에 적용한 예가 아래의 그림 4에 나타나 있다.

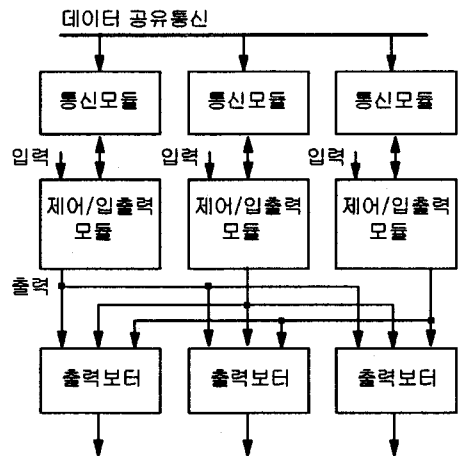


그림 4. 표준형 TMR의 터빈제어 적용

이 구조는 그림에서 보는 것처럼 제어, 보호, 입출력이 하나의 모듈로 되어 있고 다중화된 각 모듈들은 완전히 하드웨어나 소프트웨어가 동일하므로 표준화와 확장성이 우수한 것이 장점이 될 수 있다. 이 구조가 완벽히

동작하려면 제어주기 내에서 각 다중화된 제어기간의 데이터 공유가 이루어져야 하므로 고속의 통신망이 요구된다. 또 동일한 구조를 유지하기 위해서는 입출력의 중요도에 관계없이 단순한 감시를 위한 입출력도 다중화되므로 터빈의 제어 경우처럼 입출력 점수가 많을 때 하드웨어나 통신의 부담이 커지는 단점이 있다.

3.2 기능별 모듈형 TMR시스템

위의 표준형 TMR시스템의 단점인 데이터 공유의 실시간화 문제는 기능별 모듈형 TMR시스템으로 극복이 가능하다. 이는 아래 그림5에서 보는 것처럼 단위제어기를 기능별로 분류하여 제어, 보호, 감시를 각각 다중화하는 방법이다. 다음 그림에서 보는 것처럼 제어를 담당하는 제어기 C1, C2, C3가 서버랙단위 혹은 기판단위로 3중화되어 있으며 이들간의 데이터 공유는 제어에 필요한 부분만을 공유하므로 통신의 부담을 줄일 수 있다.

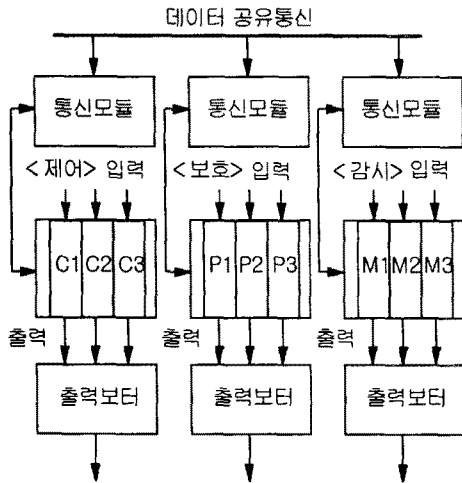


그림 5. 기능별 모듈형 TMR시스템

마찬가지로 보호는 P1, P2, P3로 감시는 M1, M2, M3로 각각 다중화되는 구조이다.

이 구조의 단점은 제어와 보호, 감시를 담당하는 모듈들이 서로 상이한 입출력 점수와 소프트웨어를 가지게 되므로 제작상에 어려움이 있고, 상대적으로 제어를 담당하는 모듈의 입출력, 연산등에 과부하를 초래할 수 있다는 점이다. 또한 일반적인 터빈의 제어, 보호, 감시에 있어서 서로간은 완전히 독립적이 아니라 정보를 공유해야하므로 상호간의 데이터 공유는 여전히 제약을 받을 수 있다.

3.3 제안된 TMR시스템

디지털 다중화방식의 구현에 있어서 제한조건은 다중화 차수와 입출력 점수의 증가에 따른 입출력 배선의 문제, 그리고 주어진 통신망을 이용한 제어주기 내에서의 실시간 데이터공유와 입출력보팅의 문제이다. 이것을 해결하기 위하여 아래의 사항들을 전제로 시스템을 재구성할 수 있다.

- 제어와 보호에 있어 요구되는 신뢰도를 평가하여 이것을 바탕으로 다중화의 차수를 결정한다.
- 입출력 중에서 제어와 보호에 영향을 미치지 않고 단순히 감시만 되는 입출력을 분류한다.

이러한 조건에서 아래의 그림6에 경제적이고 성능의 향상을 기대할 수 있는 시스템의 구성이 보인다. 그림에서

볼 수 있는 것처럼 제어를 담당하는 C와 보호를 담당하는 P를 결합하여 하나의 서브시스템으로 구성하고 이들간의 데이터 공유는 통신을 사용하게 된다. 전절의 터빈 제어와 보호개념 소개에서 알 수 있듯이 제어의 핵심은 속도와 부하제어이고 보호의 핵심은 열용력과 과속도로부터의 보호이다. 따라서 이들이 담당해야할 입출력은 제한되며 이 데이터를 통신으로 실시간공유하는 것은 어려운 문제가 아니다. 한편 각 서브시스템 내에서 C와 P는 랙(rack)단위 혹은 기판단위 어느 쪽이라도 가능하게 된다.

실제 터빈의 운전에 있어서는 터빈을 트랩에 이르게 하지는 않지만 운전자가 감시해야 하는 감시전용의 센서들이 있으며, 일반적으로 터빈의 제어기들은 운전자의 운전면령, 설정치를 받을 수 있을 뿐만 아니라 상위의 플랜트 컴퓨터, EMS(energy management system), ABC(automatic boiler control)등으로 부터의 명령을 받아서 운전되어야 하므로 이 부분의 인터페이스는 모두 M으로 표시된 감시모듈에서 처리될 수 있다. 이 부분은 터빈의 운전상 3중화까지의 중요도는 없으므로 2중화도 처리하면 충분하다.

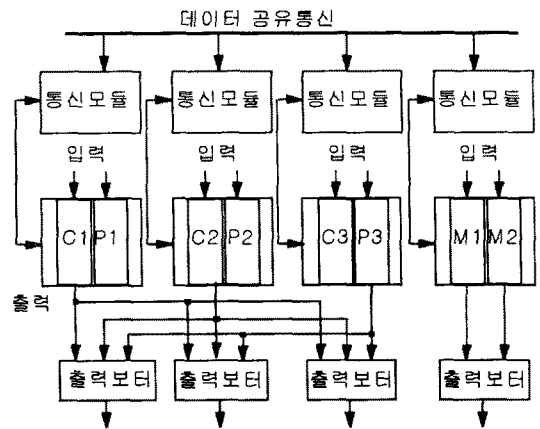


그림 6. 제안된 TMR시스템

4. 결론

터빈의 제어, 보호 및 감시의 관점에서 신뢰성을 높이기 위한 3중화 제어방식들을 검토하고 이를 바탕으로 2중화 제어장치에 있어서의 시스템 구성의 제한요소인 데이터 공유와 배선의 복잡함을 해소할 수 있는 경제적이고 성능을 보장할 수 있는 TMR시스템을 제안하였다.

(참 고 문 헌)

- [1]Ayache,J.J. Courtiat, and M.Diaz."REBUS:A fault tolerant distributed system for industrial real-time control",IEEE Trac. on Computers, Vol. C-31, No. 7, July 1982, pp. 637-647.
- [2]Barry W. Johnson., Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital Systems, Addison-Wesley Pub. Co., 1989.
- [3]GE Power Systems, Description of SPEEDTRO -NIC Mark V Control System-Large Steam.