

발전소 보일러 제어기에 대한 내고장성 제어 시스템의 적용에 관한 연구

(A Case Study on Application of Fault Tolerant Control System to Boiler Controller in Power Plant)

趙 瑛 朝*, 文 鳳 彩**, 金 炳 國***, 卞 增 男**

(Young Jo Cho, Bong Chae Moon, Byung Kook Kim, and Zeung Nam Bien)

要 約

발전소 보일러 아날로그 제어기에 대한 신뢰도 향상 대책으로 기존의 제어 시스템에 디지털 백업 제어기를 덧붙이는 방식의 내고장성 제어 시스템을 제시하였다. 디지털 백업 제어기 시스템(DBCS)은 고장 진단 기능, 백업 제어 기능, 자체 고장 검색 기능, 그래픽 모니터링 기능을 갖고 있으며, 이러한 여러 기능들을 효과적으로 구현하기 위하여 다중프로세서 방식을 채택하였다. 특히 제어기 출력을 절환시키는 스위칭 장치는 아날로그 제어기의 어느 부위에 대한 고장에도 동시 고장 갯수 만큼의 백업 제어 출력을 내줄 수 있도록 확장성 있는 모듈로 설계 제작되었다. DBCS의 적용 실험에서는 먼저 보일러 아날로그 제어 시스템을 모사하는 시뮬레이터를 개발하여 안전성 점검과 성능 평가를 실시한 후, 울산 화력 발전소에 설치하여 기존의 제어기 모듈을 제거하는 고장에 대해 내고장 제어성능을 확인하였다.

Abstract

A fault tolerant control system, in which a digital back-up controller system is added on the existing analog control system, is developed for enhancing reliability of boiler control system in power plant. The digital back-up controller system (DBCS) has a multi-processor structure with capabilities of fault diagnosis, back-up control, self test, and graphic monitoring. Specifically, switching mechanism composed of expandable modules is designed so that back-up controller takes over any faulty control loops and the number of back-up control loops is determined as that of simultaneous faults. A process simulator that simulates the boiler analog control system is developed for safety test and performance evaluation prior to real plant application. DBCS is installed at the Ulsan thermal power plant, and fault tolerant control performance is assured under the faults that some controller modules are pulled out.

*正會員, 韓國科學技術研究院 制御시스템研究室
(Control Systems Lab., KIST)

**正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

***正會員, 韓國科學技術大學 電子·電算學部
(School of E. E. C. S., KIT)

接受日字: 1989年 11月 6日

I. 서 론

최근 반도체와 컴퓨터 기술의 눈부신 발달로 제어 시스템에서 자동화의 단계가 점점 높아지고, 이에 따라 제어시스템은 날로 대규모화 되고 복잡해져 가고 있다. 이러한 제어 시스템의 대규모화와 복잡화는 내재적인 고장 발생 요인을 증가시켜, 사소한 내부

고장이 시스템 전체에 영향을 미치는 경우가 많아지므로, 이러한 문제점을 극소화하기 위한 시스템의 안전성과 신뢰성 문제가 제어 시스템의 설계 및 개발 시에 필수적인 고려 사항의 하나로 취급되고 있다.

시스템의 신뢰도 향상 방식은 고장 회피(fault avoidance) 방식과 내고장(fault tolerance) 방식으로 크게 구분될 수 있다. 고장 회피 방식은 온도나 진동 등의 환경 조건 개선, 고신뢰성 소자의 선택등 고장 발생의 가능성을 미연에 방지하는 대책으로 고장 발생시에 적절한 대응책을 갖지 못하므로 근본적인 신뢰도 개선책이 될 수 없다. 반면에 내고장 방식은 시스템의 구성 요소에서 고장이 발생하더라도 원하는 성능을 발휘할 수 있도록 하는 방식으로 통상 내부에 중복기(redundancy)를 구성하여 전체 시스템의 신뢰도를 높인다.

최근 디지털 시스템과 마이크로 프로세서의 기술 발달과 더불어 시스템 설계시 내고장 기능을 부여하는 경향이 두드러지고 있다. 내고장 기능은 디지털 컴퓨터 시스템에 주로 적용되고 있고,¹¹⁻⁵¹ 항공 우주 산업이나 원자력 발전소 등 매우 높은 신뢰도를 요하는 곳에서는 4중, 5중 구조의 중복 시스템(redundant system)을 구성하기도 한다.¹⁰⁻¹¹ 시스템 제어 이론 분야에서는 동적 시스템에서의 고장 진단에 관한 연구와,⁹⁻¹¹ 다중제어기(multiple controller) 구조에 의한 신뢰성 제어(reliable control),^{12,13} 고장을 포함한 동작 조건의 변화에 대한 제어기의 재구성 방식¹⁴ 등이 내고장성 제어(fault tolerant control)에 관련된 연구로서 활발히 진행되고 있다. 또한 산업공정 분야에서는 분산 제어기 마다 중복기를 구성하거나 분산제어기 간의 데이터 통신 선로를 이중으로 설치하는 방식 등으로 컴퓨터 제어 시스템의 신뢰도를 향상시키고 있다.^{15,16}

전술한 바의 내고장성 제어 방식들에서는 하나의 플랜트를 제어하기 위하여 두개 이상의 제어기가 동시에 설계 구현되어야 하므로, 전체 제어 시스템의 신뢰도 향상 효과가 기대될 수 있으나, 제어기 비용 상승으로 인한 시설 투자비의 증가가 뒤따른다. 이러한 설계 구현상의 비용 상승 문제에 대한 해결책의 하나로 기존의 제어 시스템에 다른 종류의 제어기를 부가(add-on)하는 방법이 고려될 수 있다. 즉, 보수 유지적 측면에서 제어기 한 세트의 비용으로 전체 제어 시스템의 신뢰도 향상을 꾀하는 방법이다. 이에 대한 연구로는 최근에 가산기(adder)를 통하여 중복적용 제어기를 덧붙임으로서 제어시스템의 신뢰도를 향상시키는 신뢰성 제어 이론이 소개된 바 있으나,¹⁷ 실용적인 문제로 접근하기 위해서는 아직 보완되어

야할 점이 많다.

본 논문에서는 제어 시스템의 신뢰도 향상책으로 전술한 바와 같이 기존의 대규모 아날로그 제어시스템에 디지털 백업(back-up) 제어기를 덧붙이는 방식의 내고장성 제어시스템(fault tolerant control system)을 구성하고, 이를 실제 화력 발전소에 적용한 내용을 기술한다. 이 내고장성 제어 시스템의 적용 타당성을 위한 선행 연구로 6개 제어 루프의 보일러 제어기를 모사한 제어기 시뮬레이터에 대하여 IBM-PC와 데이터 입출력 장치를 이용하여 간단히 prototype을 제작하고 모의 실험을 수행한 결과가 소개된 바 있다.¹⁸ 본 논문에서는 선행 연구결과를 확장하여 보일러 아날로그 제어기 전체에 대한 내고장성 제어 시스템의 다중 프로세서를 사용한 구성 방안을 제안하고 내고장성 제어 성능을 발휘하기 위하여 구현되어야 할 여러가지 필요 기능들과 고려되어야 할 사항들을 제시한 후, 해당 기능들을 효과적으로 구현하기 위하여 개발한 각종 하드웨어의 구조 및 알고리즘들을 소개한다. 이어서 중복 제어기를 기존의 제어 시스템에 부가하는 적용 실험을 시뮬레이터를 통한 실험실 운용 실험과 실제 화력 발전소의 보일러 제어 시스템에 접합시키는 설치적용 실험의 두단계로 나누어 기술하고자 한다.

II. 내고장성 제어 시스템의 구성 및 고려사항

발전소 보일러 제어 시스템의 보수 유지 측면에서 제어기의 고장 발생시에도 전체 제어 시스템의 제어 성능을 유지시키기 위한 대책으로 그림1과 같이 기존의 제어 시스템에 디지털 컴퓨터를 이용한 add-on 시스템-DBCS(digital Back-up controller system)로 명명함-을 덧붙이는 구조를 갖는 내고장성 제어 시스템을 제안한다. 그림1의 구성도에서 나타난 바와 같이 기존의 제어기(existing controller)와 플랜트로 이루어지는 제어 시스템은 정상 동작시 DBCS와 독립적으로 동작되므로, 기존의 제어 성능이 기본적으로 발휘된다.

한편, 기존의 제어기나 DBCS가 오동작을 일으킬 때에도 전체 제어 시스템이 원하는 제어성능을 충분히 발휘할 수 있도록 하기 위해서는 다음과 같은 기능들이 DBCS에 구현되어야 한다.

첫째, 기존의 제어기 동작 상태를 감시하고, 고장시에 전체 제어 시스템의 제어 성능을 유지시키는 기능이 필요하다. 이를 위하여 기존의 제어기에 대한 입출력을 모두 받아들여 제어기 동작을 확인하고 고장 상태를 판별해 내는 고장 진단(Fault Diagnosis) 기능과, 고장난 제어기의 역할을 대신하는 백업제어

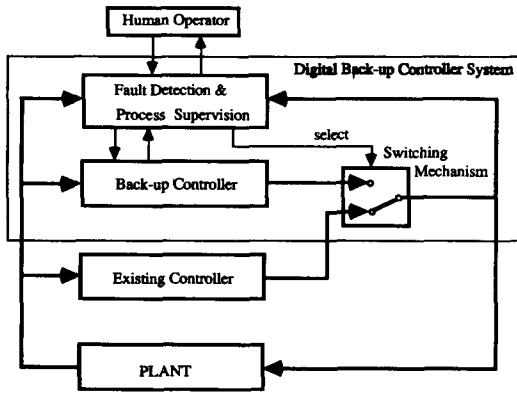


그림 1. Add-on 구조를 갖는 내고장성 제어 시스템의 구성도

Fig. 1. Block diagram of fault tolerant control system with add-on structure.

기능을 둔다.

둘째, 부가되는 DBCS 자체의 신뢰도를 높여야 한다. 백업 제어기 출력은 스위칭 장치를 통해 기존의 제어 시스템에 개입되므로, DBCS 자체의 고장 시에 잘못된 출력으로 전체 제어 시스템이 오동작할 가능성이 있다. 이에 대한 해결책으로 백업 제어기 시스템에 자체 고장 검색(self test) 기능을 갖추어 자체 고장이 탐지되면 모든 제어기의 출력을 기존의 제어기로 넘겨주는 기능을 부여한다.

세째, 운전자가 전체 제어 시스템의 운전 상태를 효과적으로 파악할 수 있어야 한다. 비록 고장 탐지 및 백업 제어 기능을 갖추고 있더라도 모든 제어 시스템 구성 요소에서의 고장에 대해 완벽하게 대응하는 것이 불가능하므로, 백업 제어기가 대처할 수 없는 상태가 발생하였을 때의 대비책은 전적으로 운전자에 의존한다. 따라서, 운전자가 전체 제어 시스템의 운전 상태를 신속, 정확하게 파악하는 것이 매우 중요한 일이 되므로 이를 위하여 칼라 그래픽 디스플레이 및 경고 기능을 활용한다.

이와 같이 기존의 제어 시스템에 부가되는 DBCS는 주요 기능으로 기존의 제어기에 대한 고장 진단 및 백업 제어 기능, 자체 고장 검색 및 그래픽 모니터링 기능 등을 갖는다.

발전소의 보일러 제어 시스템은 대규모 시스템으로 수십개의 구동기(actuator)에 분산 제어 방식을 적용한 다수의 제어 루프(control loop)들이 결합되어 있고, 각각의 제어 루프들은 PI 또는 PID 제어를 통해 조작치를 출력한다. 또한, 안전성을 고려하여 수동조작에 우선권을 두는데, 이러한 수동조작

은 구동기의 입력신호를 직접 조절하거나, cascade 제어루프의 경우 master 제어기의 출력 신호를 조절하기도 한다. 그러므로 백업 제어기에서는 제어기의 수동조작에 지장을 주지 않는 한도내에서 백업 제어의 기본단위-백업 단위(back-up unit)로 명명함을 설정하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 센서 출력단부터 수동 조작 전단까지의 제어루프를 중심으로 백업 단위를 설정한다. 이렇게 구분된 40여개의 백업 단위 중에서 고장시 동시에 몇개까지 백업 가능하게 할 것인가? 동시에 백업할 수 있는 단위가 많을수록 신뢰도가 향상되나, 제작경비, 시스템 구성의 복잡성, 계산 능력등이 고려되어야 한다. 실제로 독립적인 40여개의 백업 단위들은 동시에 기껏해야 2-3개 정도의 내부 고장이 일어나고, 그 이상 발생할 확률이 거의 없으므로, 본 논문에서는 충분히 잡아 4개까지 동시에 백업 가능하게 하되, 하나의 백업이 하드웨어 모듈 하나로 구현되게 함으로써 확장 가능성이 우수하도록 하였다.

Ⅲ. 보일러 제어 시스템에 부가되는 디지털 백업 제어기 시스템

1. 다중 프로세서 구조

보일러 제어 시스템에 부가되는 디지털 백업 제어기 시스템(DBCS)은 전술한 바의 여러 기능들을 동시에 수행하여야 하므로 많은 계산 능력과 복잡한 구조의 시스템이 요구된다. 이에 대한 효과적인 대응책으로 본 논문에서는 공유 메모리(shared memory)를 갖는 다중 프로세서(multi-processor) 구조를 채택한다. 즉 여러가지 필요 기능들을 크게 종류별로 구분하여 마이크로 프로세서를 기초로 한 단일보드 컴퓨터(single board computer) 상에 구현하고, 이를 프로세서 간의 통신은 global 버스에 연결된 메모리를 공유함으로써 가능하게 하는 구조를 말한다.

그림2는 울산 화력 발전소 보일러 제어 시스템에 적용하기 위하여 실제 구현한 DBCS의 상세 구성도이다. 여기에 채택된 프로세서는 MC68000 마이크로 프로세서를 중심으로 RAM, EPROM, RS-232C 직렬 포트, I/O bus 및 VME bus를 갖는 단일 보드컴퓨터 MVME110-1이다. 그림2에서 나타난 바와 같이, DBCS는 기능별 구분에 의해 GR(graphic), FD(fault diagnosis), BU(back-up)로 표기된 3개의 프로세서를 갖고, global 버스로 VME bus를 취하며, 64KB의 공유 메모리를 내장한다. 이들 각 프로세서에 연결되는 주변 장치들과 기능들을 나열하면 다음과 같다.

GR 프로세서는 DBCS의 운전 조작 및 칼라 그래

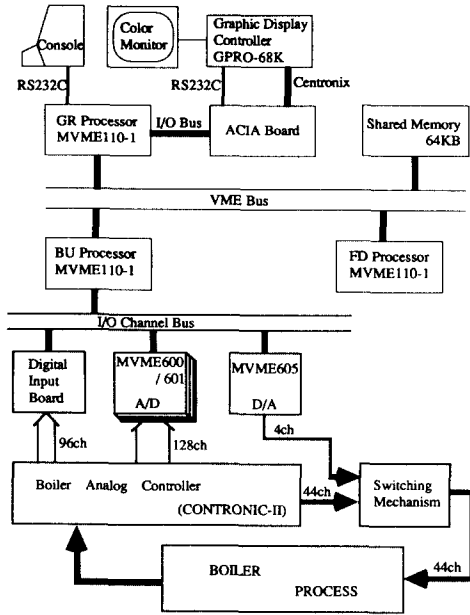


그림 2. 디지털 백업 제어기 시스템의 상세도
 Fig. 2. Detailed block diagram of digital back-up controller system.

픽 디스플레이 기능을 포함한 man-machine interface 기능을 담당한다. 운전 조작을 위하여 1대의 단말기가 RS232C 직렬 포트에 연결되고, 칼라 그래픽 디스플레이 장치 GPRO-68K가 RS-232C 직렬 포트 또는 Centronix 병렬 포트를 제공하는 ACIA (asynchronous communication interface adapter) board를 통해 연결되어 DBCS의 운전 상태 및 보일러 아날로그 제어 현황을 칼라 모니터상에 나타내 준다.¹⁹⁾

FD 프로세서는 기존의 보일러 아날로그 제어기에 대한 고장 진단 기능을 수행한다. DBCS는 모든 실시간 데이터들을 공유 메모리 상에 저장하므로, FD 프로세서가 각 백업단위 별로 저장되는 실시간 입력 데이터로 부터 기존의 제어기와 동일한 제어 연산을 수행하여 결과로 얻어진 정격 출력을 공유 메모리 상의 실제 출력 데이터와 비교함으로써 고장 판단을 내리게 된다. 고장 판단 결과는 고장 백업 단위의 정보와 함께 공유 메모리를 통해 타 프로세서에 전달된다.

BU 프로세서는 실시간 신호의 입출력 및 데이터 저장 기능과 제어기 고장시 백업 제어 기능을 갖는다. 보일러 아날로그 제어기는 총 42개의 백업 단위로 구분되고, 이를 기준으로 DBCS가 필요로 하는 각종 신호의 갯수를 산출하면 아날로그 입력 신호는

128개, 디지털 입력신호는 96개, 아날로그 출력신호는 44개가 된다. 이에 대한 모든 신호 입출력은 BU 프로세서의 I/O channel bus와 신호 입출력 장치를 통해 이루어짐과 동시에 공유 메모리에 데이터로 저장된다.

2. 백업 제어를 위한 스위칭 장치

제2절에서 언급한 바와 같이 본 논문에서는 DBCS의 신뢰도, 제작 경비, 시스템의 복잡도, 생산 능력 등을 고려하여 동시 백업 가능한 갯수를 4개로 정하고, 그 이상의 확장도 하드웨어의 추가로 쉽게 가능하도록 한다. 이를 위해서는 백업 제어기 출력 4개가 기존 제어기 출력 44개 중 고장난 어느 부분에도 대응되어 정상 제어기 출력을 제공해 줄 수 있도록 스위칭 장치를 설계하여야 한다. 그림3은 이러한 기능을 만족할 뿐 아니라 그 이상의 백업 제어까지도 확장 가능하도록 설계 제작된 스위칭 장치의 구성도이다. 그림3에서 나타난 바와 같이 스위칭 장치는 1종류의 스위칭 보드와 동시 백업 가능한 출력갯수 n개 만큼의 분배 보드(distribution board)로 구성된다.

분배 보드는 보드 선택 신호, 즉 strobe 신호에 의해 작동된다. 예를 들어 동시에 3개의 고장이 기존 제어기의 백업 단위에서 일어나 3개의 백업 제어기 출력이 필요한 경우, #1 #2 #3 분배 보드에 strobe 신호를 보내 작동시키면서 해당 백업 단위를 가리키는 선택 데이터를 데이터 라인에 실게 된다. 이때 1개의 분배 보드는 고장난 백업 단위의 출력신호

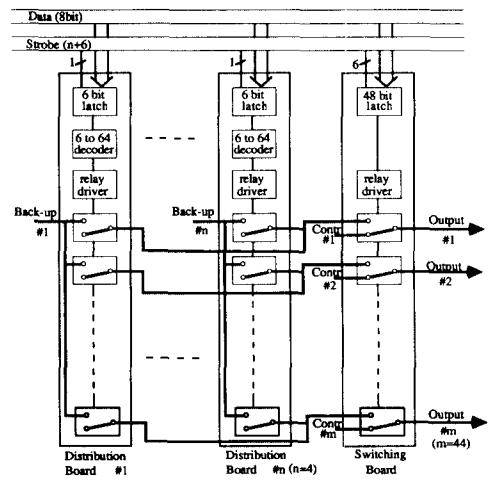


그림 3. 스위칭 장치의 구성도
 Fig. 3. Block-diagram of switching mechanism.

에 해당되는 1개의 릴레이 만을 구동시키고 구동 릴레이의 출력에는 D/A 변환된 백업 제어기의 출력 신호가 실리게 된다. 이렇게 하여 출력되는 3개의 백업 제어 출력신호는 스위칭 보드 입력단에서 고장난 백업 단위에 대응되는 스위칭 릴레이에 접합되며, 스위칭 보드의 해당 릴레이 전환에 의해 고장난 3부분이 백업 제어된다.

스위칭 보드는 총 44개의 릴레이를 갖고 고장난 부분을 백업 제어기로 스위칭하여야 하므로 44bit의 릴레이 구동 데이터가 필요하다. 즉 데이터 라인이 8 bit인 I/O channel bus에서는 6개의 strobe 신호가 요구된다. 실제로 스위칭 보드는 2개의 strobe 신호와 16개의 릴레이를 갖는 3장의 보드로 구성된다. 스위칭 보드는 분배 보드와 마찬가지로 strobe 신호에 의해 작동되나, 데이터 라인이 latch를 거쳐 바로 릴레이 구동기에 연결되므로 그 내부의 릴레이는 48개 만큼 구동될 수 있다. 따라서, 동시 백업 가능한 백업 단위를 늘리려면 분배 보드를 추가하면 되므로, 그림 3의 스위칭 장치는 간단한 구조이면서도 확장성을 갖는다.

3. 고장 진단 및 백업 제어 알고리즘

고장 진단 및 백업 제어는 DBCS가 갖추어야 할 가장 중요한 기능으로 기존의 제어기에 대한 수학적 모델에 기본을 둔다. 예를 들어 제어 루프의 한 백업 단위가 간단히 아날로그 PI제어기만으로 이루어질 경우

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{is}} \right) E(s) \quad (1)$$

(E(s), U(s) : 제어기 입력, 출력에 대한 라플라스 변환)

의 관계식을 갖게 되고, Tustin's approximation을 사용하여 이산시간 모델(discrete-time model)을 구하면

$$u(k) = u(k-1) + K_p \{e(k) - e(k-1)\} + K_p \frac{h}{2T_i} \{e(k) + e(k-1)\} \quad (2)$$

(h : 샘플링 주기)

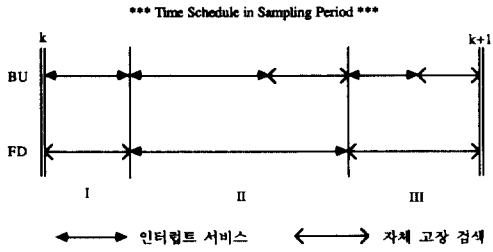
와 같이 나타낼 수 있다. 제어기 파라미터 K_p , T_i 는 기존의 아날로그 제어기에서 얻어질 수 있으므로, 식 (2)를 이용하면 제어기 입력 측정치 $e(k)$ 에 대하여 정상 동작시의 제어기 출력 정격치 $u(k)$ 를 계산할 수 있다. 이와 유사한 이산시간 모델의 계산을 모든 백업 단위에 적용하면 정상 동작시의 제어기 출력정격치를 모두 구해낼 수 있으므로, 이를 측정된 공유메모리 상의 제어기 출력 실제치와 비교함으로써 제어

기에서의 고장 유무를 판별해낼 수 있고, 백업 제어의 출력으로도 사용 가능하다.

본 논문에서는 전술한 바와 같이 제어기에 대한 출력의 정격치와 실제 측정치의 차이가 허용 한계치를 벗어나는가 확인함으로써 간단히 고장을 탐지하고, 해당 백업 단위에 대한 정보를 추출하여 고장 부위를 찾아낸다. 또한 백업 제어기에서도 식 (2)와 같은 수학적 모델을 통해 계산된 출력 정격치를 제어기 출력으로 사용한다. 단 백업단위가 식(2)의 $u(k-1)$ 과 같은 제어기 출력의 과거 값을 사용하는 방식으로 모델링될 경우 고장 진단 알고리즘에서는 실제 측정치를, 백업 제어 알고리즘에서는 계산된 정격치를 과거 값으로 사용한다. 이는 고장 진단 알고리즘에서 제어기 출력의 정격치를 사용하면 실제 측정치와 계산치 간의 오차 누적으로 인해 정상 동작도 고장으로 오판될 가능성이 있기 때문이다. 반면에 백업 제어 알고리즘은 해당 제어기가 고장날 경우에만 동작되므로 제어기 출력의 실제 측정치는 고장난 제어기 출력이 되어 사용될 수 없다.

2절에서 기술한 바와 같이 계산 능력의 분산을 위해 고장 진단 알고리즘은 FD프로세서에, 백업 제어 알고리즘은 BU 프로세서에 각각 구현된다. 그러나, FD 프로세서와 BU 프로세서는 서로 밀접한 관계를 맺고 있어, 한 프로세서의 일부 작업 수행 여부에 따라 다른 프로세서는 일부 작업을 수행할 대기 상태에 있거나 일부 작업을 동시에 수행할 필요가 생긴다. 이렇게 프로세서 간에 상호 연관된 수행 작업들을 효율적으로 처리하기 위하여 공유 메모리 상에 신호위치(semaphore location)를 둔다. 즉, 그림 4와 같이 두개의 프로세서가 수행해야 할 작업들을 step 별로 scheduling하여, step의 완료 여부를 신호위치에 표시하게 함으로써, 상호 연관된 작업들을 예정순서에 따라 수행시키는 방식으로 다중 프로세싱 알고리즘을 구현한다.

예를 들어, 그림 4에서 FD 프로세서는 BU 프로세서의 데이터 입력이 완료되어야 그 데이터로부터 고장 진단 기능을 수행할 수 있다. 그러므로 BU 프로세서는 step I을 수행하기 시작할 때 공유 메모리 상의 step I 신호 위치에 16진수 'ff'를 표기하고 있다가 step I이 끝났을 때 step I 신호 위치의 데이터를 reset하여 FD 프로세서에 step I의 종료를 알리고, step II 신호 위치에 'ff'를 표기함으로써 BU 프로세서가 step II를 진행 중에 있다는 것을 나타내어, FD 프로세서로 하여금 step II의 고장 진단 알고리즘을 수행하도록 한다. step II에서 FD 프로세서는 제어기 출력의 정격치를 계산하여 실제 측정



*** Job Schedule ***

processor step	BU	FD
I	Data Acquisition	[자체 고장 검색]
II	고장 부위에 대하여 백업 제어 계산 및 출력 [자체 고장 검색]	제어기 출력의 정격치 계산 고장 탐지 / 고장 정보 전달
III	새로운 고장 부위에 대한 백업 초기화 및 스위칭	[자체 고장 검색]

그림 4. 고장 진단 및 백업 제어의 다중 프로세스 알고리즘

Fig. 4. Multi-processor algorithm for fault diagnosis and back-up control.

치와 비교하는 고장 진단 기능을 수행하고, 동시에 BU 프로세서는 이전의 샘플 주기에서 제어기 고장이 탐지되었을 때에 한하여 해당 제어 단위의 백업 제어 연산을 수행한다. 이때 FD 프로세서는 모든 백업 단위에 대한 제어 루프의 연산을 수행하므로 고장난 부분의 계산만 수행하는 BU 프로세서 보다 작업량이 많다. 따라서 step II의 완료는 FD 프로세서에 의해 신호 위치에 표기된다. 이어서 step III에서는 FD 프로세서의 제어기 고장 정보에 의해 BU 프로세서가 고장 부분에 대한 백업을 초기화하고 해당 릴레이를 절환시킨 후 step III의 완료를 신호 위치에 표기한다.

이상과 같은 일련의 연관 작업들은 샘플 주기마다 작동되는 시간 인터럽트 서비스루틴 안에서 처리되며, 작업 수행의 대기 상태나 인터럽트 서비스로부터의 복귀 상태에서는 자체 고장 검색 기능이 수행된다.^[20]

IV. 적용 실험 및 결과

1. 시뮬레이터 운용 실험

본 연구를 통하여 개발된 DBCS의 성능 평가를 위하여 실제 운전 중인 발전소의 보일러 제어 시스

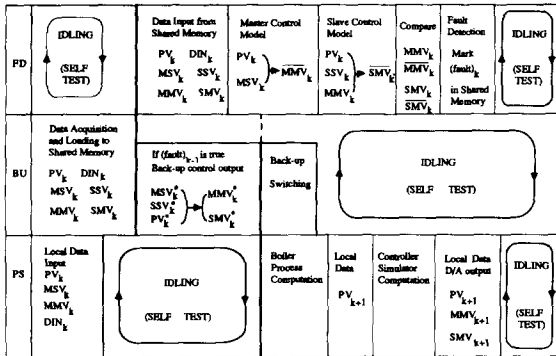
템에 DBCS를 직접 적용하는 일은 경제성과 안전성 측면에서 큰 위험을 수반한다. 이러한 실제 설치 적용시의 안전성과 예기치 못한 문제점들을 사전에 점검해 보기 위한 수단으로 프로세스 시뮬레이터를 개발하여 여러가지 기능 실험을 수행하였다.

프로세스 시뮬레이터는 보일러 아날로그 제어기의 정상 및 고장 동작과 보일러 프로세스의 동작을 모사하는 역할을 하며, DBCS 내의 VME bus에 부착된 MVME110-1 PS (process simulator) 프로세서와 45개 채널을 갖는 D/A 변환 보드에 구현된다. 즉, PS 프로세서는 DBCS의 공유 메모리로 부터 제어기 입력 데이터를 받아들여 제어 연산을 수행한 후 44개 백업 단위의 제어기 출력을 D/A 변환 보드로 내보내는 보일러 아날로그 제어기 기능과 공유 메모리의 입출력 데이터를 이용한 보일러 모델의 연산기능을 갖는다.

보일러 아날로그 제어기 기능은 기존의 아날로그 제어기에 대한 자료들을 해석하여 식(2)와 같은 방법으로 구현하였고, 고장 동작은 제어기 파라미터 값을 변화시키거나 제어기 출력신호에 변화를 주는 방법을 취하였다. 보일러 모델은 시운전 데이터를 통하여 저차 모델로 구현하였고, 각 구동기의 모델은 1차 모델을 활용하여 간략화시켰다.^[21]

PS 프로세서는 아날로그 프로세서를 모사하므로 디지털 백업 제어기의 약 1/10 이내로 샘플 주기를 갖게하는 것이 바람직하나 계산량이 많아 어려우므로 FD 및 BU 프로세서와 같은 샘플 주기(250ms)로 하되 각 프로세서 간의 연관 작업을 공유 메모리 상의 신호 위치를 통해 순서적으로 수행한다. 즉, 그림4에서 볼 때 BU 프로세서가 step II의 백업 제어 연산을 수행하여 출력하면 PS 프로세서가 그 제어기 출력 값을 이용하여 보일러 모델의 연산을 수행하도록 3개의 프로세서 (FD, BU, PS)에 대한 작업 순서를 scheduling 하는 것이다. 그림5는 3개의 프로세서에 대한 상호 연관 작업들의 순서도를 나타낸 것이다.

전술한 시뮬레이터의 구조와 알고리즘을 통하여 DBCS의 여러가지 성능을 확인해 보았다. 이 중에서 그림6은 340MW 출력의 정상 상태에서 master fuel 부분의 제어기 출력이 OV로 급격히 떨어지는 고장을 일으켰을 때, 제어기 출력의 변화를 아날로그 레코더를 이용하여 그린 것이다. 그림에서 갑자기 떨어진 부분이 고장이 발생한 때의 제어기 출력이고, 즉각적으로 고장이 탐지되어 백업 제어로 대체됨으로서 약 150초 후에는 정상 상태로 회복됨을 보여주고 있다. 고장 발생 이후의 과도 상태는 한 주기동안 제어기가 오동작한 결과로 나타난 현상이다.



PV_k (Process Value at k-th sample) DIN (Digital Input) MSV (Master Control Set Value) SSV (Slave Control Set Value)
MMV (Master Manipulated Value) SMV (Slave Manipulated Value) MV (Nominal Value of MV) MV (Back-up Control Value of MV)

그림 5. 시뮬레이터 운용 실험을 위한 다중 프로세스 알고리즘

Fig. 5. Multi-processor algorithm for operation via simulator.

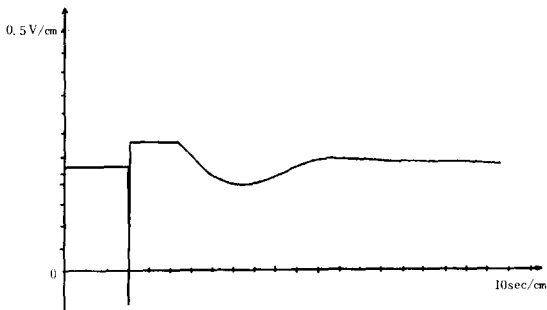


그림 6. 백업 제어기 출력 응답-master fuel oil controller

Fig. 6. Output response of back-up controller -master fuel oil controller.

2. 설치 적용 실험

프로세스 시뮬레이터를 통해 DBCS의 성능을 확인한 후 시뮬레이터를 제거하고 실제로 올산 화력발전소의 보일러 아날로그 제어기로 부터 아날로그 입력 신호 128채널과 출력신호 44채널 및 디지털 신호 96채널을 연결하는 설치 작업을 수행하였다.

이때 약 20m의 거리를 잇는 신호선에 대하여 shield를 양단 ground로 잡고 신호선 단자마다 RC 필터를 연결하여 신호선 잡음을 5mV 이내로 줄였다. 이어서 적용 실험은 정상동작 실험, 고장 진단 실험,

백업 제어 실험의 3단계로 진행하였다.

정상 동작 실험에서는 기존의 아날로그 제어기 출력과 이를 디지털 제어 방식으로 구현한 모델 제어기의 출력 정격치 사이에서 일치성을 점검하였다. 모델 제어기의 파라미터 값은 아날로그 제어기의 조절기 값으로 부터 구해지나, 조절판의 부정확성, 판독오차, 양자화(quantization) 오차 등으로 정확한 디지털 값으로 표현될 수 없다. 따라서, DBCS에서는 모델 제어기의 파라미터 조정이 운전 중에도 가능하게 하여, 이를 조정함으로써 정상 동작시 기존의 제어기 출력과 모델 제어기 출력이 일치하도록 하였다. DBCS의 칼라 그래픽 기능은 제어기 출력의 일치성을 확인하는데 이용되었으며 그림7은 이 중 한가지 예에 대한 그래픽 디스플레이의 결과이다.

고장 진단 실험은 시스템의 안전성을 위하여 백업 제어기 출력을 보일러 프로세스의 제어 입력으로 연결하지 않은 상태에서 수행되는데, 이 과정에서 FD 프로세서는 기존의 제어기 출력과 모델 제어기 출력을 비교하여 10%의 허용 한도를 벗어나면 고장을 판별하고 GR 프로세서는 해당 루프의 고장 부분을 칼라 그래픽 화면으로 나타내 준다. 모든 제어 루프에 대하여 수차례의 고장 진단 실험을 통해 시스템의 안전성을 점검한 후 백업 제어기 출력을 보일러 프로세스의 제어 입력에 연결하여 백업 제어 실험을 수행하였다.

백업 제어 실험은 기존의 아날로그 제어기에 인위적인 고장을 발생시켰을 때, 고장진단 및 백업 제어 기능을 통하여 전체 제어 시스템이 정상 동작을 유지하는가 확인하는 과정이다. 인위적인 고장은 보일러 아날로그 제어기를 구성하는 아날로그 모듈들 중 에서 일부를 제거하는 방법을 취하였다. 만일 이때

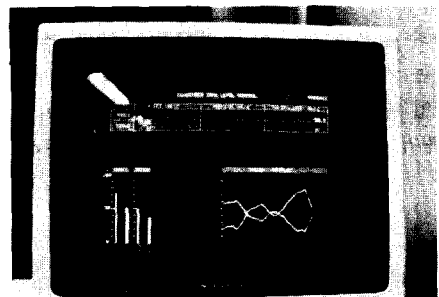


그림 7. 정상 동작 실험-제어기 출력의 trend 비교
Fig. 7. Normal operation test-comparison of the trend for controller outputs.

DBCS가 연결되지 않으면 모듈이 제거된 제어 루프는 오동작이며, 더불어 보일러 제어 시스템 전체가 그 파급 효과로 오동작되어 발전소 전체의 trip을 초래할 수 있다. 그러나, 차례로 두개의 루프에서 한 개씩의 모듈을 제거했을 때 DBCS는 고장 부위의 제어 루프에 대한 위치 표시와 백업 제어 기능을 원활히 수행하였다. 그림8은 이 과정에서 나타난 그래픽 디스플레이의 결과이다. 그림을 통해 보면 V자모양의 흠이 패인듯한 지점에서 고장이 발생되었고, 고장이 탐지되어 즉각 백업 제어로 대체됨으로써 정상 동작이 지속됨을 보여주고 있다.

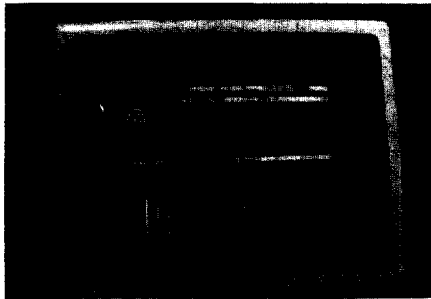


그림 8. 백업 제어 실험
Fig. 8. Back-up control test.

V. 결 론

본 논문에서는 발전소 보일러 아날로그 제어 시스템의 신뢰도를 높이는 한 방법으로 기존의 제어 시스템에 디지털 백업 제어기 시스템(DBCS)을 덧붙이는 형태의 내고장성 제어 시스템을 제안하였다. DBCS는 전체 제어 시스템이 내고장 기능을 원활히 수행할 수 있도록 하기 위하여 고장 진단, 백업 제어, 자체 고장 검색, 칼라 그래픽 디스플레이 등 여러가지 기능들을 필요로 하는데, 이 기능들은 다중 프로세서의 하드웨어 구조와 순서적으로 상호 연관 작업들이 수행되도록 공유 메모리 상에 신호 위치를 설정하는 다중 프로세서 알고리즘으로 구현되었다. 특히 고장 진단과 백업 제어 알고리즘에서는 기존의 아날로그 제어기를 이산시간으로 모델링한 디지털모델 제어기를 사용하였고, 제어기 출력 신호를 절환하는 스위칭 장치는 신뢰도를 고려하여 간략한 구조를 갖되 확장성 있도록 모듈화하였다. 적용 실험에서는 먼저 프로세스 시뮬레이터를 개발하여 결합시키

고 다양한 실험을 통해 DBCS의 성능 및 안전성을 평가한 후, 실제로 설치 적용시에 프로세스 시뮬레이터를 제거하고 울산 화력 발전소의 보일러 아날로그 제어 시스템에 결합하여, 제어기 모듈이 제거된 고장에 대하여 백업 제어 기능을 원활히 수행함을 확인하였다.

발전소의 보일러 제어 시스템과 같은 대규모 시스템에서는 고장 발생 요인도 그만큼 많고, 사소한 일부 고장이 정지 사고와 같은 대형 사고로 확산될 경우 막대한 사회적 경제적 손실을 가져오게 된다. 따라서 제어시스템의 신뢰도 개선에 관계된 연구는 사고방지를 통한 생산성 향상의 측면에서 매우 중요하다. 오늘날 마이크로 프로세서 기술을 포함한 전자분야의 발달은 더욱 우수한 성능과 저렴한 가격의 내고장성 제어 시스템을 구현 가능하게 해줄 것으로 기대된다.

VI. 감사의 글

본 연구는 한국전력공사 기술연구원의 지원을 받아 수행되었습니다. 본 연구 수행중 특히 많은 도움을 주신 한전기술연구원 자동제어연구실의 허성광 실장님, 박익수 부장님, 배병환 과장님 및 연구원 여러분께 심심한 사의를 표합니다.

參 考 文 獻

- [1] D.A. Rennels, "Fault tolerant computing: concept and example," *IEEE Trans. on Computer*, C-33, no. 12, pp. 1116-1129, 1984.
- [2] B.W. Johnson, "Fault-tolerant microprocessor-based systems," *IEEE Trans. on Computer*, C-33, no. 12, pp. 6-21, 1984
- [3] A. Avizienis, "Fault tolerant system," *IEEE Trans. on Computer*, vol. C-25, no. 12, pp. 1304-1311.
- [4] O. Serlin, "Fault tolerant systems in commercial application," *IEEE Trans. on Computer*, pp. 19-30, Aug. 1984.
- [5] 이현, "Fault tolerant computing system", 전자교 환기술 제1권 1호, pp. 46-61, 1985.
- [6] G.W. Cunningham, "Space-shuttle control systems reliability: redundant processing," *Systems & Control Encyclopedia*, vol. 7, pp. 4476-4481, Pergamon Press, 1987.
- [7] J. H. Wensley et al., "SIFT: Design and analysis of a fault tolerant computer for aircraft control," *IEEE Proc.*, vol. 66, no. 10, pp. 1240-1255, 1978.

- [8] J.H. Wensley, "Fault tolerant techniques for power plant computers," *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-101, no. 1, pp. 100-105, 1982.
- [9] A.S. Willsky, "A survey of design methods for failure detection in dynamic systems," *Automatica* 12, pp. 601-611, 1976.
- [10] R. Isermann, "Process fault detection based on modeling and estimation method-a survey," *Automatica* 20, pp. 387-404, 1984.
- [11] T. Ono, T. Kumamara, A. Maeda, S. Sagara, and K. Kumamaru, "Influence matrix approach to fault diagnosis of dynamic systems," *IECON'84*.
- [12] D.D. Siljak, "Reliable control using multiple control system," *Int. J. Control*, vol. 31, no. 2, pp. 303-329, 1980.
- [13] M. Vidyasagar and N. Viswanadham, "Reliable stabilization using a multi-controller configuration," *Automatica*, vol. 21, no. 5, pp. 599-602, 1985.
- [14] R.S. Ornedo et al., "Design and experimental evaluation of an automatically reconfigurable controller for process plants," *ACC-87*, pp. 1662-1668.
- [15] Harmann & Brown, *Contronic 3 information system*, Minden, Dec., 1986.
- [16] Taylor Instrument, *Taylor MOD300 process and information system*, SDS-32E002, Issuel, Mar., 1985.
- [17] Y.J. Cho, "A study on enhancing reliability of control system via additive redundant adaptive controller," Ph.D. Thesis, KAIST, 1989.
- [18] 김지홍 외 3명, "발전소 보일러 제어기에 적용한 Fault tolerant control system의 연구," 전자공학회논문지 제24권 1호, 1987.
- [19] 조영조 외 3명, "다중 마이크로 컴퓨터를 이용한 발전소 공정 제어 그래픽 시스템의 개발," 전기학회논문지 제38권 3호, 1989.
- [20] 신영달 외 4명, "다중 프로세서를 이용한 제어 시스템에서의 고장 탐지," 전자공학회논문지, 제 25권 8호, 1988.
- [21] 황동환 외 3명, "FTCS의 성능 시험을위한 보일러 제어 시스템의 시뮬레이터의 개발에 관한 연구," 전기학회논문지, 제37권 11호, 1988.

著 者 紹 介



趙 瑛 朝 (正會員)

1961년 3월 22日生. 1983년 2월 서울대학교 제어계측공학과 공학사 학위취득. 1985년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학석사 학위취득. 1989년 8월 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학박사 학위취득. 1989년 9월~현재 한국과학기술연구원 제어시스템연구실 선임연구원. 주관심분야는 내고장성제어, 공장자동화, 대규모 공정제어 및 응용 등임.

文 鳳 彩 (正會員)

1961년 9월 28日生. 1984년 2월 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1986년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사 학위취득. 1986년 3월~현재 한국과학기술원 전기및 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심분야는 내 고장성 제어, 분산형 제어 시스템 적용 등임.



卞 增 男 (正會員)

1943年 10月 11日生. 1969年 2月 서울대학교 전자공학과 공학사 학위취득. 1972年 Iowa 대학 전기과 공학석사 학위취득. 1972年 Iowa 대학 수학과 공학석사 학위 취득. 1975年 Iowa 대학 전기과 공학박사 학위취득. 1977年 Iowa 대학 전기과 객원 조교수. 1981年 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 조교수. 1982年 Iowa 대학 전기과 객원부교수. 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수. 주관심분야는 자동제어이론, 로보틱스 및 인공지능, 공장자동화 등임.

金 炳 國 (正會員)

1952年 10月 5日生. 1975年 2月 서울대학교 공과대학 전자공학과 졸업. 1977年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사. 1981年 2月 한국과학기술원 전기및 전자공학과 공학박사. 1981年 3月 우진계기공업(주)표준실장. 1984年 2月 우진계기공업(주)연구실장. 1986年 9月 한국과학기술대학 전자전산학부 조교수. 주관심분야는 로보틱스 및 자동화 등임.