

터빈 제어 기술 동향

권 육현*. 변 대규**

(*서울대 공대 제어계측공학과교수, **박사과정)

1. 서 론

최근의 터빈 제어기는 종래의 속도 제어를 위한 간단한 형태에서 전체 plant의 통합 제어에 필수적인 역할을 하는 핵심적 요소로 변화하고 있다. 1950년대 공기압에 의한 전송, 제어 장치 및 부피가 큰 표시 장치들은 1960년대에 와서 아날로그 전자 장치들로 대체되기 시작하였고 이들 아날로그 장치들은 보다 정밀하고 다양한 제어 기능 및 향상된 표시, 기록 기능을 가능하게 하였다. 1970년대에 접어들어 아날로그 전자장치의 기능들은 더욱 향상되었고 메인프레임(main frame) 컴퓨터가 도입되고 중앙 제어실에서의 발전소 운용이 일반화되었다. 최근 들어 마이크로프로세서에 의한 디지털 제어 시스템이 등장하여 기존의 제어 시스템의 대체 뿐 아니라 CRT 터미널에 의한 운전, 시스템 분석기능의 실현 및 이중화된 시스템에 의한 신뢰성의 강화, 분산화된 시스템에 의한 유지, 보수의 간편성 등 많은 새로운 장점들을 제공하고 있다.

이상에서 언급한 바와 같은 제어 수단에 의해 터빈 제어 장치를 분류하면 다음의 3가지 종류로 대별할 수 있다.

- 기계-유압식 제어 장치
(MHC: Mechanical Hydraulic control)
- 전기-유압식 제어 장치
(EHC: Electro Hydraulic control)
- 디지털 전기-유압식 제어 장치
(D-EHC: Digital-EHC)

위에서 MHC는 제어신호의 검출, 전달, 연산 및 증폭을 기계 장치인 레버, 캠, 링크 및 유압 릴레이 피스톤 등으로 행하고 EHC, D-EHC는 아날로그 혹은 디지털 식으로 각각 행하게 된다.

다음의 그림1은 제어의 복잡성과 제어 장치의 종류에 따른 복잡성의 연관 관계를 표시하고 있다. 제어의 복잡성은 제어 변수의 수, 요구되는 성능에 관계되고 제어 장치의 복잡성은 비용, 설치, 유지, 보수 등에 관계된다. 그림 1에서 간단한 제어 시스템인 경우엔 MHC 방식이, 중간 정도의 복잡성을 가진 시스템에는 EHC 방식이 그리고 현대의 제어 시스템의 경우와 같은 복잡한 환경에서는 D-EHC 방식이 적당함을 알 수 있다.

본고에서는 앞에서 분류한 MHC, EHC, D-EHC에 대한 기술적 특성을 간단히 소개하고 D-EHC의 특징

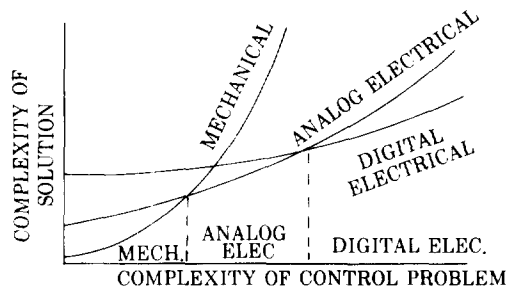


그림 1. 제어 대상과 해결의 난이도

및 구성에 관해서 서술하고자 한다.

2. 화력 터빈 제어 시스템

다음의 그림 2는 재열(Reheat) 터빈 시스템의 증기 흐름도를 표시하고 있다. 간단히 말하면 터빈 제어의 목적은 증기를 유입시키는 증기 밸브(steam valve)를 제어하여 로터(rotor)를 정격속도까지 가속시킨 다음 그 속도를 유지하면서 계통에 병입될 수 있도록 하고 그 후 주어진 부하를 담당할 수 있도록 더 많은 증기의 유입을 조절하는 것이라고 할 수 있다.

2.1 MHC

MHC는 속도/부하 제어 시스템과 보조 제어 및 보호 장치의 두 부분으로 구성된다. 재열 터빈의 속도/부하 제어를 위한 MHC 시스템의 블록선도는 그림3과 같다. 속도 기준치(P_{σ})는 실제 속도(ξ)와 비교되어 편차 ϵ 을 발생시키고 편차 ϵ 은 작은 서보모터인 속도 릴레이

를 동작시킨다. 속도 릴레이 신호(η_1)은 주 서보모터에서 다시 증폭되어(η_2) 비선형 캠을 통하여 밸브 위치를 조절한다. 그러면 비선형인 밸브는 증기량 μ_v 를 발생시키고 이는 터빈 증기량 μ_z 를 발생시킨다. 이 때 bowl의 용적 때문에 지연시간 T_3 이 생긴다. μ_z 는 마찰계수 f 인 고압 터빈과 마찰계수 $1-f$ 인 중압 및 저압 터빈을 돌리게 된다. 증기의 재열 때문에 재열 지연시간 T_R 이 이 때 발생한다. z 개의 부분적인 터빈토크(2HP 와 3IP and LP)의 합인 토크 z 는 부하 토크 λ 와 비교되고 그 편차가 로터를 돌리는 가속 토크 Δz 가 된다. 그러면 적분기 $\frac{1}{T_S}$ 의 출력이 속도 Governor를 동작시키는 축의 속도가 된다. 이상이 간략화된 MHC 시스템의 동작 설명이다.

앞에서 설명한 것과 같은 기본적인 속도/부하 제어 이외에도 MHC 시스템은 보조 제어 기능과 보호 기능을 가진다. 먼저 보조 제어 기능으로서 보조 속도 제어 기능과 보조 압력 제어 기능이 있는데 보조 속도 제어 기능으로서는 과속일 때 급히 폐쇄되는 인터셉트 밸브

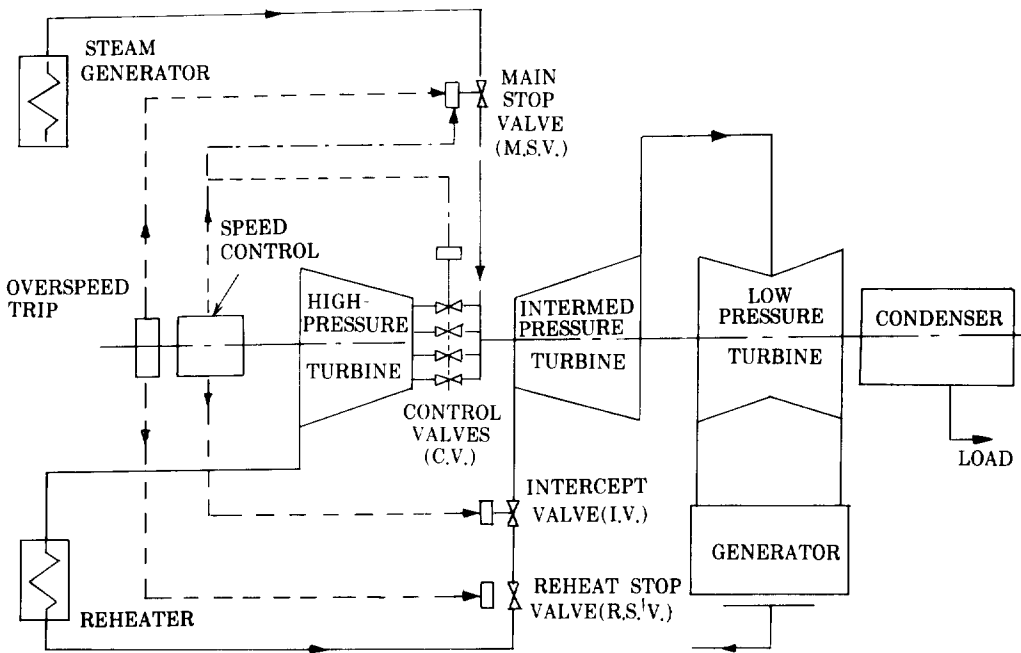


그림 2. 재열 터빈의 증기 흐름도

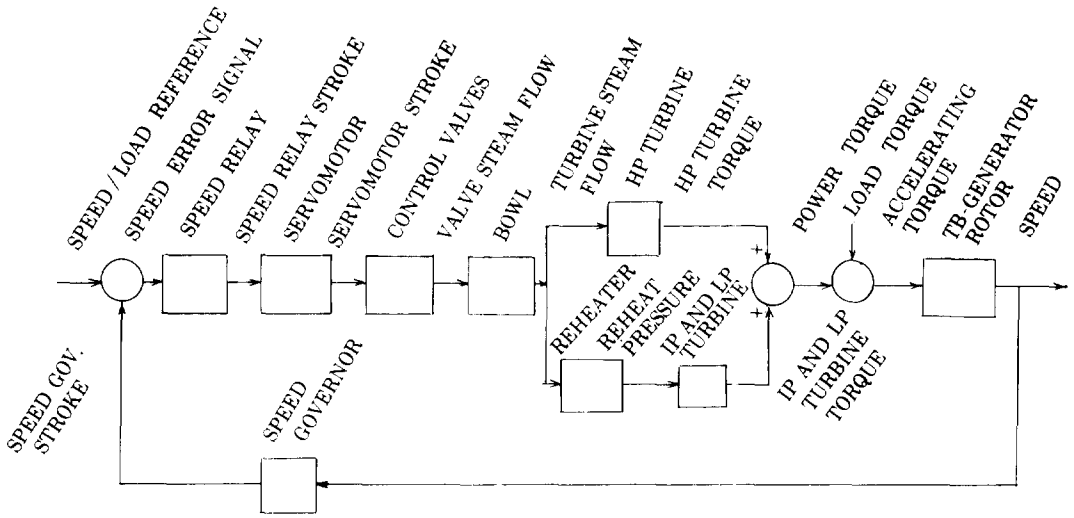


그림 3. MHC 시스템 블록선도

제어 기능과 기동시 전주 분사 운전을 위해 스톱 밸브 바이패스 밸브를 동작시킬 수 있도록 하는 LRSC(Long Range Speed Control) 기능이 있다. 보조 압력 제어 기능은 보일러 압력이 90% 이하로 떨어질 때 제어 밸브를 닫는 역할을 한다. Emergency 트립 시스템을 통하여 터빈운전을 중지시키는 보호 기능으로서는 다음의 것들이 있다.

- Overspeed Protection
- Low Vacuum Protection
- Thrust-Bearing Failure Protection
- Generator Protection
- High Exhaust Temperature Protection
- Excessive Vibration Protection
- Excessive Differential Expansion
- Others

이 외에 T.A.(Trip Anticipator) 기능 등이 있다.

2.2 EHC

EHC 시스템은 3개의 주요 부분으로 나뉘어져 구성되는데 이러한 구조의 주요한 이유는 세 부분들 사이의 상호 작용을 최소화하기 위해서이다. 그림4의 EHC 터빈 제어 시스템의 블록선도에서 볼 수 있듯이 EHC 시스템은 속도제어부, 부하제어부, 증기량제어부로 구성된다. EHC 계통의 설정 속도, 설정 가속도 및 부하 증가

율은 자동기동장치 혹은 운전원에 의해 결정되며 정상 운전 중의 부하 요구는 협조 제어 계통으로부터 입력된다. 또한 조속기 계통은 과속운전 및 기타 위험한 상태에서부터 터빈을 보호하기 위하여 EHC와는 별도로 트립 및 경보계통을 구비한다.

1) 속도 제어부

속도제어부는 속도감지기가 검출한 터빈의 실제 속도와 자동기동장치 또는 운전원이 수동설정된 목표속도를 비교하여 터빈속도를 터닝(Turning 속도에서 정격속도까지 안전하게 자동적으로 증속시키고 발전기 병입시 터빈속도를 미세로 정하는 기능을 위한 부분으로서 하나의 속도 오차 신호를 부하제어부로 전달한다. 속도제어부는 터빈과속도 보호에 매우 중요한 역할을 하므로 동일한 회로를 3중으로 구성하고 두개의 검출속도 신호가 상실되면 터빈을 정지시킨다.

2) 부하제어부

부하제어부는 속도 오차와 부하 설정값의 합을 주증기정지밸브(MSV), 주증기제어밸브(CV) 및 인터셉트밸브의 조정율에 따라 증폭하여 밸브 유량신호를 출력하는 기능을 갖는다. 이러한 기본적인 출력신호는 다음의 것들에 의해 변경, 조정될 수 있다.

- 출력 / 부하 불평형(power / load unbalance)회로
- 전주분사 / 부분분사 전환회로
(full arc and partial arc transfer circuit)
- 주증기 압력 제한장치

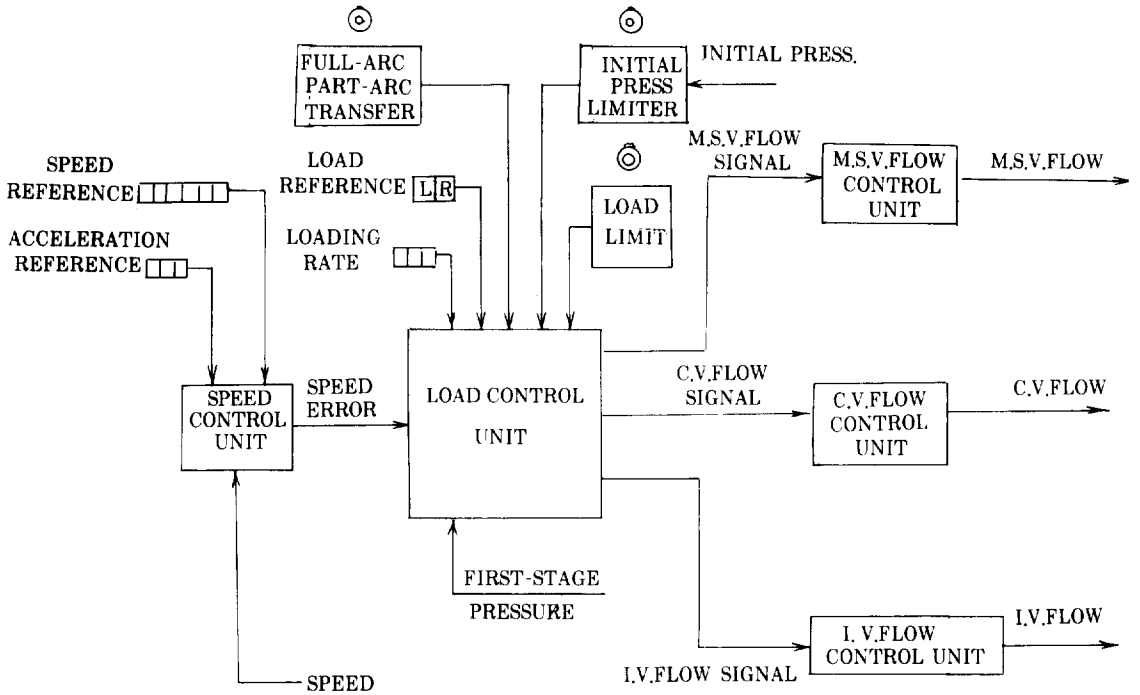


그림 4. EHC 터빈 제어 시스템의 블록선도

(main steam pressure limiter)

- 부하제한 설정회로(Load Limiter)
- 증기가압밸브의 비선형 특성 Feedback 회로
(1st pressure feedback circuit)
- 부하추종 제어기
(Automatic Following Regulator)

3) 증기량제어부

증기량제어부는 주증기 정지밸브, 주증기 제어밸브, 인터셉트 밸브로 구성되며 부하제어부의 유량요구신호에 따라 증기유량을 조절하는 기능을 구비하고 밸브의 비선형 특성을 보상하기 위하여 보회로가 부가된다.

터빈 제어 시스템에 이상에서 설명한 EHC 방식을 사용하는 경우 다음의 중요한 2가지 이점을 생각할 수 있다.

- i) 몇 가지의 특성을 통합하여 운용할 수 있다. 이는 MHC 시스템에서는 기대하기 힘든 점이다.
- ii) MHC 시스템보다 향상된 제어 성능을 제공한다.

2.3 D-EHC

그림 5는 재열 터빈 시스템에 D-EHC를 적용한 예를

보여준다. D-EHC 시스템인 경우 속도 검출기, 압력 검출기, 입력 변환기 등으로부터 검출한 플랜트의 상태가 입력으로 들어오고 Actuator를 구동시키기 위한 신호가 출력으로 나가게 된다. 그리고 MHC 혹은 EHC에서 증기의 연산을 위해 사용되었던 각종 기계장치 혹은 아날로그 회로들은 모두 소프트웨어로 처리된다. 이러한 이유로 D-EHC 시스템에서는 기능의 부가 및 제거는 장치의 배선 변경없이 소프트웨어의 수정으로 가능해진다.

D-EHC의 제어기능은 MHC, EHC가 가지고 있는 제어기능 외에 좀 더 복잡한 제어도 포함하는데 주요 기능은 승속, 속도, 부하 제어기능을 비롯하여 부하 제한기의 자동추종기능, 터빈열응력 관리기능과의 연동기능 등이 있고 다음과 같은 특수한 기능의 구현이 가능하다.

a) 비선형 속도조정을 특성:

전력계통 동요시에 보일러 및 터빈으로의 요란을 적게 하기 위하여 비선형 속도조정을 도입하는 것이 바람직하다. MHC나 EHC에서는 조정을 자동적으로 가변하는 것이 불가능하지만 D-EHC에서는 소프트웨어적으로 비선형 속도조정을 특성을 효과적으로 실현 가능하다.

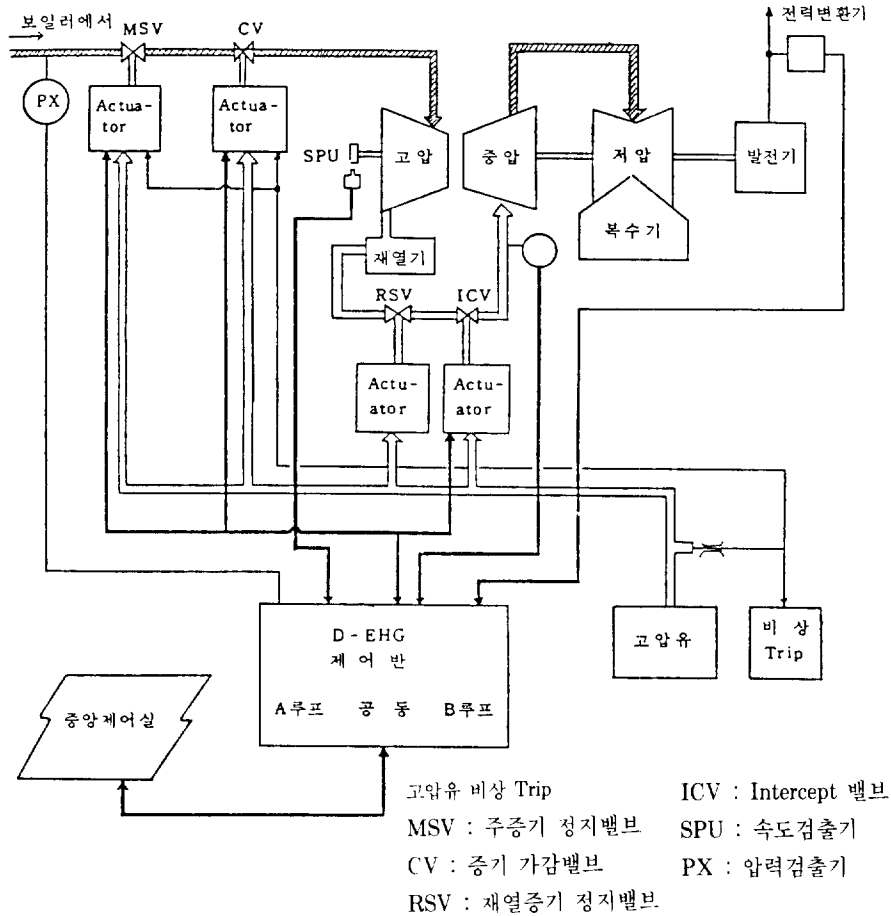


그림 5. D-EHC 재열 터빈 시스템의 블록선도

b) 제어밸브(CV) 시험시의 부하저하 방지 기능:

제어밸브 시험을 할 때 증기량 변동을 적게 유지하는 것이 필요하다. 아날로그 방식에서는 #1 CV를 닫을 때 부하 저하를 터빈 제1단계 후의 압력을 검출한 후 #2~4 CV를 열어 줌으로써 부하저하를 방지하지만 D-EHC에서는 외부 신호의 보조없이도 #1CV의 교축량에 적당한 신호를 #2~4 CV에 부가하여 보상하므로 합리적으로 부하저하를 방지할 수 있다.

c) 초압저부하제한 기능:

수증기압력이 저하되었을 때 터빈에 습증기가 유입되는 것을 방지해야 한다. 예를 들어 정상압력의 90% 이하에서 CV를 닫기 시작하여 80% 압력에서 무부하개도까지 닫게 된다. MHC나 EHC에서는 부하별로 이러한 특성을 얻기가 곤란했으나 D-EHC에서는 앞에서와 마찬가지로 소프트웨어 기법으로 이를 처리할 수 있다.

다음의 표는 MHC, EHC, D-EHC 조속기의 특징을 간단히 비교하고 있다.

표 1. MHC-EHC-DEHC 특징 비교표

구 분	M H C	E H C	D E H C
1. Speed Sensor	Centrifugal Governor	Permanent Magnet Generator	Gear Wheel & Magnetic Pickup
2. Pressure Sensor	Bellows and Spring	Bourdon Tube and LVDT	Bourdon Tube LVDT
3. Operating Device	Lever & Rod	Electronic Circuit	up & I/O System
4. Manipulating Device	Hydraulic Cylinder with Pilot Valve	Hydraulic Cylinder with Electro-Hydraulic Servovalve	Hydraulic Cylinder with Electro-Hydraulic Servovalve
5. Hydraulic Pressure	14Kg / Cm ² g	110Kg / Cm ² g	110Kg / Cm ² g
6. 속도조정범위	정격속도 ±6%	5% - 112%	5% - 112%
7. 속도조정율	2-6%	2%-7%(운전중 조정가능)	1%-10%(운전중 조정가능)
8. 속도조정정도	정격 ±0.2%(4rpm)	정격 ±0.1%(2rpm)	정격 ±0.05%(1rpm)
9. 속도계의 응답성	0.2-0.3초	0.2초 이하	0.2초 이하

3. D-EHC 시스템의 특징

터빈의 용량 증대와 함께 안정성, 부하응답성 개선, 중간부하 운용, 고효율 운전을 목적으로 한 자동화 및 제어장치의 진보에 따른 상호 접속 기능을 실현하기 위해서는 디지털 연산방식이 그 제어의 양, 질적인 면에서 또 경비절감의 면에서도 우수하므로 점차 D-EHC 시스템이 발전 제어 설비에 사용될 전망이다. 최근의 D-EHC 시스템은 마이크로 프로세서 기술을 활용하여 그 전까지의 하나의 중앙 처리 장치에 의한 시스템을 분산 처리 시스템으로 구성하고 있다. 분산화된 D-EHC 시스템은 일반적으로 다음과 같은 특성을 가진다.

i) 수행 기능의 융통성

D-EHC의 기능은 모두 소프트웨어로 처리되기 때문에 아날로그 회로로 실현하기 힘든 기능을 쉽게 실현할 수 있을 뿐 아니라 기능의 변경, 추가 역시 손쉽게 수행될 수 있다.

ii) 고신뢰성

아날로그 시스템의 경우와 달리 디지털 시스템인 경우 비교적 손쉽게 2중화할 수 있다. 이렇게 하여 사고가 났을 경우 다른 한쪽이 기능을 대신하여 줌으로써 터빈을 정지시키는 일없이 연속적으로

로 제어를 할 수 있다. 또 분산화되어 있는 까닭에 어느 한 부분의 고장이 전체 시스템의 고장으로 확산되지 않는다.

iii) 용이한 보수성

분산화된 D-EHC 시스템에서는 보수기능이 명확히 구분되어 수행되기 때문에 시스템의 한 부분만을 shut-down시켜 on-line으로 수리할 수 있다. 이는 이중화된 시스템의 한 부분을 shut-down시켜도 시스템 전체의 동작에는 전혀 영향을 주지 않기 때문에 가능한 일이다. 일반적인 D-EHC 시스템에 구비되어 있는 자기 진단 기능은 어느 정도까지 고장난 위치를 알려주기 때문에 보수는 더욱 쉬워진다. 또 시스템에서 사용되는 입출력 장치 혹은 다른 보드들이 상호 교환 가능한 것이 많기 때문에 재고를 많이 준비할 필요가 없고 새로운 시스템을 익히는데 걸리는 시간을 절감해 준다.

이 외에 D-EHC 시스템은 네트워크 기능을 구비하고 있기 때문에 발전소 내부외부의 다른 디지털 장비와의 연결이 용이할 뿐만 아니라 기존의 시스템을 확장하고자 할 경우에도 네트워크의 한 단말로써 연결하면 되므로 확장성 또한 뛰어나다.

4. D-EHC 시스템의 구성예

다음의 그림6은 웨스팅하우스사의 DEH MOD III 시스템의 기본 구성도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 시스템은 수동제어 및 보호 시스템(manual control and protection system)과 운전원 자동 시스템(operator automatic system)으로 구성된다. 이러한 구성은 이중화된 운전원 자동 시스템이 고장난 경우에도 터빈은 수동으로 운전될 수 있음을 보여준다.

수동 및 보호 시스템은 속도, 출력, throttle 압력, 그 외 터빈의 상태를 받아들이는 마이크로프로세서 제어를 이용하여 보호 기능을 제공한다. 이러한 주요 입력들은 Two-out-of-three logic으로 임혀지고 사고로 판정

될 때는 과속도 보호, 부하 급강발 예측(load drop anticipation), throttle 압력 제한 등과 같은 기능이 수행된다.

운전원 자동은 일상적으로 수행되는 시스템 동작이다. 운전원 접속부(operator interface)는 멤브레인 패널, CRT 화면, 혹은 프린터로 구성된다. 운전원 접속부를 통하여 속도 혹은 부하 등의 설정치가 입력되면 Auto System Controller는 밸브 위치를 계산하여 MVP(Microprocessor based valve positioner) 카드를 전송하고 MVP 카드는 실제로 서브밸브를 구동시킨다. 운전원은 버튼 하나로 수동 모드로 들어갈 수 있고 정상 운전 중에 2개의 Auto System Controller 중 하나가 고장나면 제어 기능은 나머지 하나로 옮겨지고 두개 모두 고장나면 자동적으로

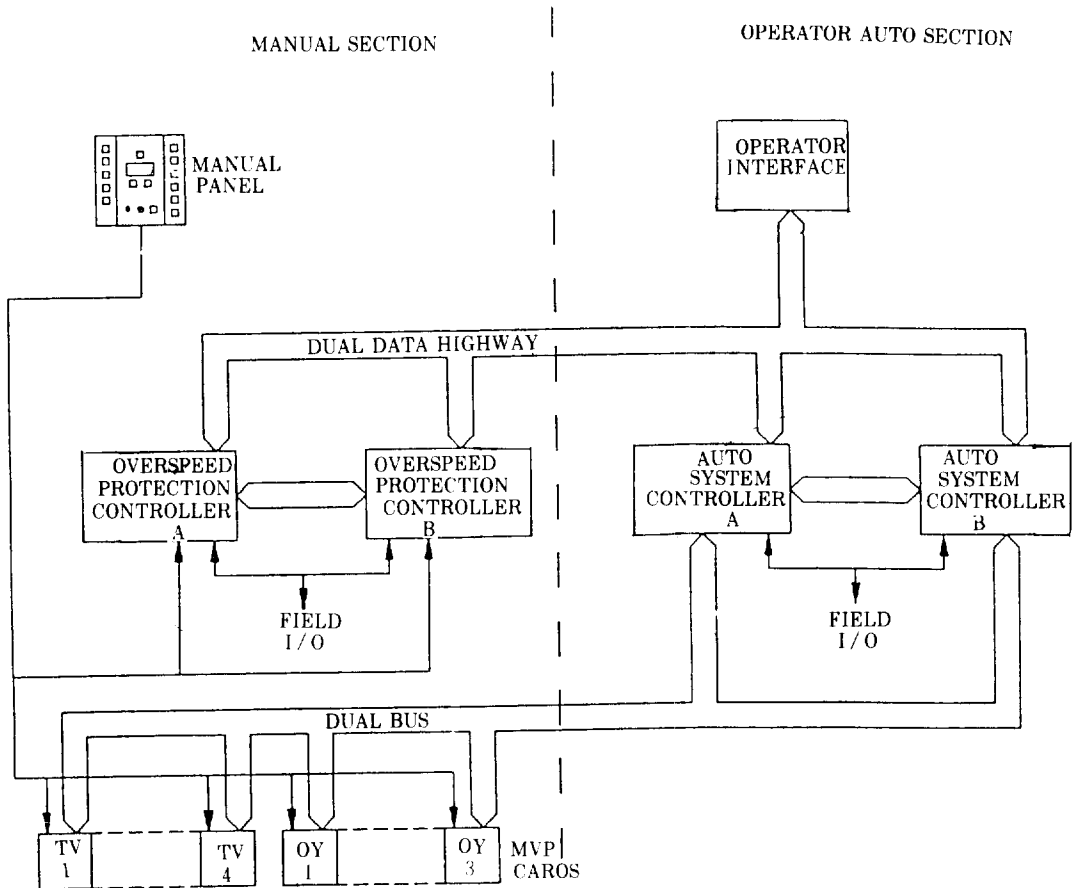


그림 6. D-EHC 시스템의 기본 구성도

수동 보드로 전환된다.

5. 결 론

아날로그 EHC 시스템이 도입된 이래 터빈 제어 시스템에서 속도와 부하 제어의 기본 기능은 크게 변화하지 않았다. 그러나 감시, 운용 등에 대한 요구가 복잡다양해지고 자동기동 등에 대한 요구가 증가함에 따라 보다 유연한(flexible) 제어 시스템이 요구되고 있다. 게다가 기존의 기저부하를 담당하던 발전소들도 점차 변동부하를 담당할 필요가 생겼고 이를 위해서 터빈 제어 시스템은 여러가지 다른 동작점에서도 운용할 수 있게 개수될 필요가 생겼다. 이는 또 터빈제어 시스템이 보일러 혹은 발전소의 다른 부분과 협조 운전을 할 수 있는 기능의 구비를 요구하였다.

이러한 여러가지 요구점들은 최근의 마이크로프로세서 기술에 의한 D-EHC 시스템으로 대부분 해결 가능한 것들이다. 앞에서 언급한 D-EHC의 여러가지 장점은 다양하고 복잡한 기능을 처리할 수 있는 터빈 제어 시스템에 대한 요구를 충족시킬 수 있다는 점에서 D-EHC 시스템의 도입을 촉진시킬 것으로 보여진다. 게다가 아날로그 전자 장치에 대한 기술적 축적도가 디지털

시스템에 대한 기술적 축적도에 비해 상대적으로 미흡한 우리나라의 실정을 생각할 때 D-EHC 시스템으로의 전환은 발전제어 시스템의 국산화에도 한결 유리하고 쉬운 길을 제공하리라고 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) M.A. Eggenberger, Introduction to the basic elements of control systems for large steam turbine generators, General Electric, 1978. 2
- 2) T.E. Dy Liacco, G. Mowrey and F. Villena, "Advanced Technology for the control of an unattended hydro power plant, vol. PAS-102, no. 11, 1983. 11
- 3) 주파수 조정운전을 위한 터빈조속기 및 보일러 제어계의 성능 개선, 한국 전력 공사 기술연구원 자동 제어연구실, 1987. 6
- 4) T.C. Elliott, "Power Plant Controls," Power, 1987. 9
- 5) D. R. Lirich, "Turbine Generator Control System Experience," conf. on control systems for fossilfuel power plants, 1987. 2
- 6) DEH III Turbine Controller Description, Westinghouse.