

# 발전소용 터빈제어시스템 소개

정 창 기

한국전력공사 전력연구원 발전연구실 책임연구원

## 1. 머리말

발전소는 연료의 화학적 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 변환기구이며 크게 보일러, 터빈 및 발전기로 구성된다. 보일러는 물을 증기로 바꾸는 장치이며 여기서 분출되는 증기가 터빈과 발전기를 구동한다. 터빈은 증기 및 가스와 같은 압축성 유체의 흐름을 이용하여 충동력 또는 반동력으로 회전력을 얻는 기계장치이다. 여기서 증기를 이용하면 증기터빈, 연소가스를 이용하면 가스터빈이라 한다. 증기터빈은 증기의 열에너지를 기계적 에너지(회전력)로 변환시키고, 동일 축에 연결된 발전기는 터빈에서 변환된 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 기계장치이다.

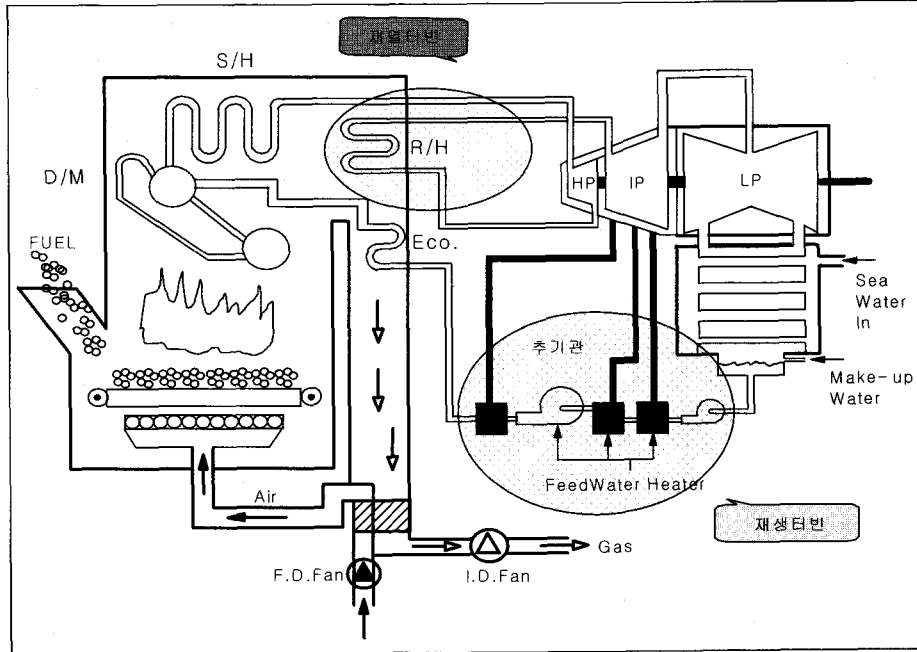
발전소의 궁극적인 목표인 발전기의 전기적 출력을 조절하기 위해 터빈의 회전력을 적절히 조절할 필요가 있으며, 이를 위해 터빈 제어시스템이 필요하다. 터빈 제어시스템은 발전소의 핵심제어 설비중 하나로서 발전기를 구동하는 터빈의 속도를 저속회전 상태에서 정격속도까지 승속한 후, 발전기가 전력계통에 병렬로 운전되면 전기출력을 조절하게 된다. 전기 품질의 가장 중요한 요소인 정격주파수 유지를 위해서도 터빈 제어시스템의 건전성은 필수적인 요소이다.

이러한 발전소 제어에 중요한 위치를 차지하는 터빈 제어시스템을 소개하기 위해 증기터빈의 구성 및 운전에 대해서 간략히 서술하고, 현재 적용되고 있는 터빈 제어 및 감시의 기능에 대해 살펴보고자 한다. 마지막으로 우리나라에 많이 설치되어 운전되는 외국 제작사의 모델과 전력연구원에서 국내 최초로 개발 적용한 모델에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 터빈의 구성 및 운전 개요

증기터빈의 제어시스템을 이해하기 위해 화력발전소에 많이 적용되는 보일러와 터빈의 구조를 그림 1에 간략히 나타내었다. 터빈은 고압(HP) 터빈, 중압(IP) 터빈과 2개의 저압(LP) 터빈으로 이루어지며 증기의 흐름은 다음과 같다.

보일러의 과열기(S/H, Super Heater)를 통과한 과열증기(온도 537.8°C, 압력 247.11kg/cm<sup>2</sup>)는 고압터빈에 들어가며, 고압터빈을 거친 증기는 보일러의 재열기(R/H, Reheater)에서 재 가열되어 온도 537.8°C, 압력 40.17Kg/cm<sup>2</sup>의 상태로 중압터빈에 들어간다. 중압터빈을 나온 증기는 다시 가열되지 않고 절반씩 나뉘어 2개의 양방향성 저압터빈을 거쳐 온도와 압력의 대부분을 잃고



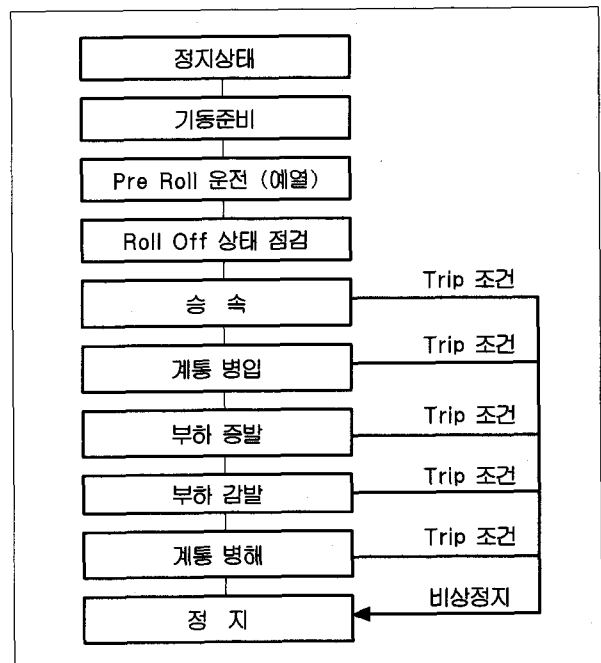
재생 - 재열 터빈

〈그림 1〉 보일러 - 터빈 구성 개요도

복수된다. 증기가 고압터빈 및 중압터빈으로 들어가기 전에는 각각 우회밸브가 있어 비상시에 터빈에 들어가는 증기를 우회시킬 수가 있다.

터빈 제어는 각 터빈으로 유입되는 증기의 양을 적절히 제어하여 터빈의 속도 및 전기적 출력을 조절하는 것이 최종 목표이며, 이는 각 터빈의 입구측에 설치된 여러 가지 정지밸브(Stop Valve) 및 제어밸브(Control Valve)에 의해 이루어진다.

터빈 운전은 위에서 언급한 각종 밸브와 기기를 기동 및 정지하여, 운전시 터빈에 유입되는 증기온도와 터빈 금속온도 차이에 의한 열응력 발생, 케이싱과 축의 상대 팽창, 터빈 회전부의 진동 등 여러 가지 제한요소와 그 요소를 발생시키는 원인을 추적하고 사고를 미연에 방지하도록 하는 것이다. 그림 2에 간략한 운전 흐름을 보여주고 있다.



〈그림 2〉 터빈 운전 흐름도

터빈을 승속하는데 필요한 각종 보조기기(펌프, 밸브 등)의 상태를 점검하고 필요 기기를 기동 및 정지하거나 밸브를 열거나 닫아 둔다. 모든 기동준비 상태가 정상임을 확인한 후, Pre Roll 운전을 하는데 이는 터빈이 고속으로 승속하기 전에 터빈 각 부위 및 밸브의 열응력을 적게 하기 위해 매우 낮은 속도로 회전시키는 것을 말한다. 터빈이 정격속도까지 승속되기 위해 필요한 모든 상태가 만족됨을 확인한 후 3600RPM까지 승속한다. 정격속도 부근에서 발전기는 계통전압과 같은 전압을 유지하며 계통 주파수와 일치 여부, 위상조건 맞춤단계를 거쳐 발전소의 주 차단기가 투입됨으로써 동기운전(계통병입)이 시작된다. 이후 운전원에 의해 부하증감발이 이루어지며, 운전중 비정상 상태(Trip 조건)가 발생되면 정해진 절차에 따라 운전이 이루어진다.

### 3. 터빈 제어 및 감시

터빈제어시스템의 제어와 감시에 적용되는 범위는 대략 다음과 같다.

#### 가. 터빈 제어 범위

- 터빈의 속도제어 기능
- 자동 동기 투입(계통병입) 기능
- 부하제어 기능
- 밸브 위치 제어
- 각종 보조기기(펌프, 밸브 등)의 제어
  - 유탄시스템 제어
  - 제어용 유압계통 제어
  - 주급수 펌프 터빈(BFPT : Boiler Feed Pump Turbine) 제어
- 보호(Protection)의 범위
  - 터빈 과속도 정지 기능(전기식 및 기계식)

- 속도신호 상실에 의한 정지, 배기후드 과열에 의한 정지(LP Hood Temp. Trip), 복수기 저 진공에 의한 정지(Low Vacuum Trip)
- PLU(Power Load Unbalance)
- 베어링 진동, 트러스트 베어링 마모, 진동 Trip
- 기타
  - Emergency Trip Pushbutton
  - Lub. Oil Pressure Low Trip
  - Generator Trip 등

#### 나. 감시의 범위

- 터빈, 발전기 각 부위의 운전 온도 측정
- 각종 보조기기의 운전상태 감시
- 터빈 속도 측정
- 발전기 출력 측정
- 터빈 증기밸브 위치 측정
- 터빈 진동 위상각 측정
- HP 편심 측정 등

이상에서 살펴본 바와 같이 터빈은 기계적으로는 고정부, 회전부, 베어링 및 축이음장치로 구성되어 있으며 전기적으로는 터빈의 운전상태를 진단, 감시하는 각종 센서와 각종 밸브를 제어하는 조속장치로 구성되어 있다. 제어시스템이 담당하는 범위는 터빈의 밀봉장치, 유탄장치, 유압장치, 조속장치의 제어와 감시에서부터 터빈의 운전에 영향을 끼치는 보조기기들, 예를 들면 복수기의 진공도, 발전기의 운전상태 등을 포함한다.

또한 기능의 측면에서는 터빈제어의 주기능인 속도, 부하, 밸브제어에서 터빈의 온도, 진동, 마모, 열응력, 상대팽창에 이르는 전반적인 감시기능과 과속도 등의 보호 기능까지를 담당하고 있다. 뿐만 아니라 터빈의 운전엔 필수적인 보조기기들의 감시와 제어, 보호도 담당하고 있다.

#### 4. 국내 터빈제어시스템 적용 현황

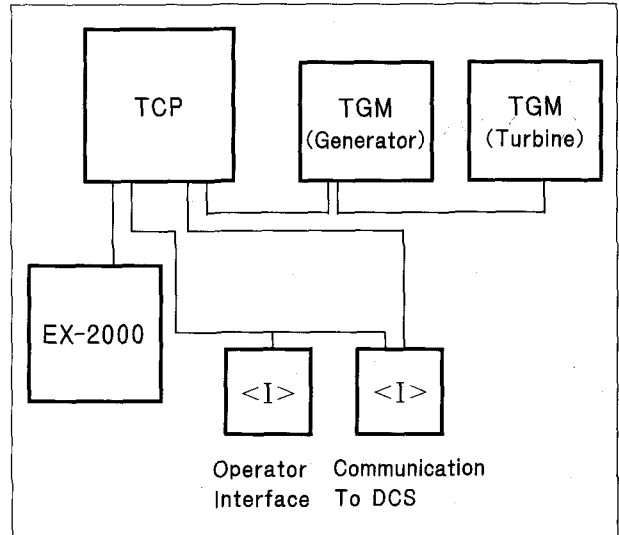
현재 우리 나라에 운용되고 있는 터빈제어시스템은 거의가 외국 제작사에 의해 공급되고 있는 제품들이고, 주 제어 모듈은 삼중화 혹은 이중화로 구성되어 단일부품 고장에 의한 터빈운전의 정지를 예방할 수 있는 구조를 채택하고 있다. GE(General Electric)사는 태안 3, 4호기, 삼천포 5, 6호기, 당진 화력 등 여러 발전소에 “MARK V”란 삼중화 제어시스템을 적용하였고, Westinghouse 사는 태안화력 5, 6호기 등에 “WDPF II” 및 영광원자력 1, 2호기에 “OVATION”을 적용하였고, Bailey 사는 발전소의 보일러 주제어 설비에 “INFI-90”을 화력발전소에 공급하고 있었으나 최근에 기존 화력발전소의 개조시에 터빈 제어설비에 “INFI-90”을 적용하기도 하였다.

전력연구원은 '97년 11월부터 “기력발전소 터빈 디지털 제어시스템 개발” 연구에 착수하여 3년여의 연구 끝에 중부발전(주) 서천화력 제1호기에 삼중화 터빈 디지털 제어시스템을 개발하여 국내 기술로는 처음으로 2000년 5월에 준공하여 현재까지 상업 운전중에 있으며, 이를 이어서 2002년 5월에는 중부발전(주) 인천화력 제2호기에 본 제어시스템을 적용하였다. 아래에 각 제작사의 제어시스템을 간략히 비교 및 분석하였다.

##### 가. GE사의 MARK V 모델

###### (1) 주 제어시스템

우리 나라에 많이 보급되고 있는 모델중의 하나인 GE사의 Mark V 터빈제어시스템은 삼중화(TMR : Triple Modular Redundant) 설계방식을 채용하고 있다. 터빈 콘트롤 패널(TCP: Turbine Control Panel), 터빈발전기 운전 감시 모니터(TGM), Operator Interface(I)와



〈그림 3〉 GE사의 MARK V 모델

통신계통으로 구성된다. 마이크로 프로세서를 기초로 한 <R>, <S>, <T>, <C>, <D>, <P>, <PLU>는 유지정비가 용이하도록 모듈화 되어 있으며, 각각의 컨트롤러는 전원 공급장치를 포함해 여러 장의 모듈을 가지고 있으며, 카드 간의 통신은 리본 케이블과 커넥터로 이루어진다(그림 3 참조).

주 제어모듈인 <R>, <S>, <T>는 제어 및 트립 보호를 담당하는 삼중화된 모듈이며, 각 모듈은 서로 독립되어 동작되며 다른 2개의 모듈과 데이터를 교환해서 각종 보팅(Voting) 및 선택을 취하여 응용프로그램을 실행시킨다. <P> 모듈 또한 과속도 보호 등 각종 보호 기능을 수행하기 위해 3개의 모듈로 구성되어 동작된다. <C>와 <D>는 <R>, <S>, <T> 모듈의 상태를 진단하고, 이들과 Operator Interface인 <I>간의 통신을 담당한다.

Mark V에는 3 종류의 네트워크를 보유하고 있는데 IOnet, DEnet, Stage Link가 이들이다. IOnet은 삼중화된 단위제어기 내에서 입출력부와 주제어기 사이의 데이터 전송을 담당하는 기능을 하며 DEnet은 각 단위제

어기들 사이의 데이터 공유를 위한 네트워크이다. Stage Link는 운전자 인터페이스용 컴퓨터 및 상위 분산제어 장치(DCS : Distributed Control System)와의 연계를 위한 네트워크이다.

(2) 운전원 조작 시스템

Mark V에서의 운전과 엔지니어링을 위한 EWS (Engineer Work Station, 제어 정비원용 컴퓨터)/OIS (Operator Interface Station, 운전원용 컴퓨터)는 서로 분리되지 않고 하나의 시스템으로 구성되어 있다. 이들이 실행되는 것은 <I> 컴퓨터로서 386, 486 IBM 호환 기종이 사용된다. <I> 컴퓨터의 운영체제는 IDOS라고 하는 디스크 운영체제를 사용한다. IDOS는 터빈을 운전, 제어 보호하기 위하여 <I>의 마이크로프로세서의 임무(Task)를 스케줄링하는 역할을 한다. <I> 컴퓨터의 주목적은 제어반과의 실시간 통신, 특히 경보의 표시를 위한 통신을 개시하는 것이다.

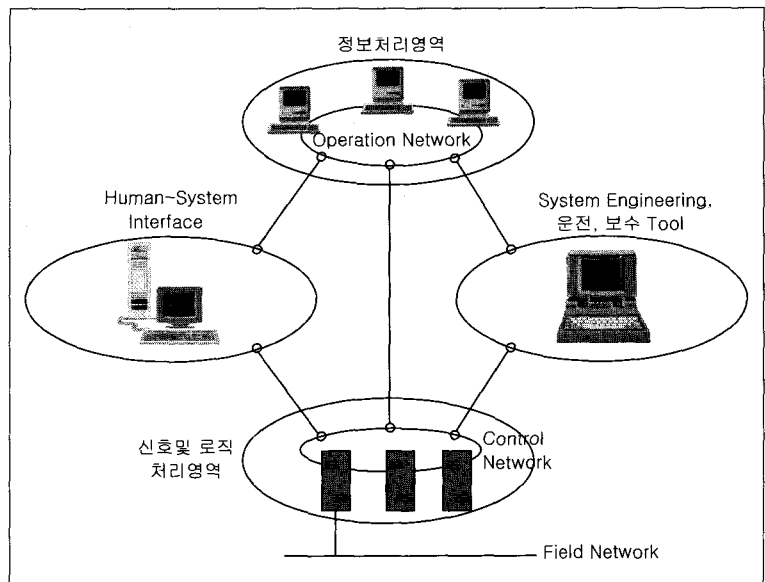
나. Bailey사의 Infi-90 모델

Bailey사는 공정제어를 기반으로 하는 분산제어장치(DCS)의 적용분야로 화력 발전소의 보일러, 터빈제어에 일찍부터 많은 실적을 가지고 있으며 국내 발전소에도 이미 여러 군데 설치되어 있다. 터빈-보일러 제어시스템은 영남화력, 울산화력, 여수화력, 영동화력에, 터빈제어시스템은 호남화력과 인천화력발전소에 설치 운전되고 있다.

최신 제품인 Symphony 시리즈(일부는 기존의 Infi-90 모델을 사용)의 시스템 구성과 특징을 간략히 살펴보고자 한다. Symphony는 기업단위의 관리와 제어에

필요로 하는 Platform, 응용, 전문적인 서비스까지를 지원하는 기존 DCS의 영역을 초월하는데 까지를 담당하는 시스템이다. Symphony는 하부의 조절기(Regulator)와 순차제어(Sequence Control)에서 출발하는 다층 제어 구조이며 나아가서 생산관리, 유지보수 관리, 시뮬레이션, 네트워크 관리를 포함한 상위의 관리와 Advanced Control 기능까지도 포함하고 있다. 전체 시스템의 구성이 그림 4에 나타나 있다. 시스템을 4개의 큰 영역, 즉 정보처리영역, Human-System Interface, 신호 및 로직처리영역, 엔지니어링 운전 보수 영역으로 나누고, 각 부분은 기능에 따라 계층화하거나 혹은 영역 내의 새로운 네트워크를 구축하고 이들이 다른 영역과 직접 통신할 수 있는 토털 시스템을 구축하고 있다.

- 영역관리 및 제어시스템(Area Management and Control Products)  
재래의 공정제어, 조절기제어, 순차제어 등과 입출력 인터페이스를 포함하는 포괄적인 시스템



<그림 4> Bailey사의 Symphony 모델

- 시스템 도구(System Tools)
  - 전체적인 자동화를 지원하도록 설계된 엔지니어링, 운전, 유지보수를 위한 도구
- Human System Interface
  - 단위 공정제어와 입출력 수준에서부터 플랜트, 기업 단위에 이르는 복수의 운영체제로부터 데이터를 접근하고 감시하는 콘솔 제품군
- 플랜트 관리 및 제어
  - 플랜트의 관리와 제어, 통신망과 망의 관리를 위한 제품군, 인터넷용 Process Web Server 제품군도 포함

#### (1) 주 제어시스템

Symphony 시스템의 최하위를 구성하는 이 영역관리 및 제어시스템은 기본적으로 입출력과 제어를 담당하는 구성 요소들이다. 여기에는 입출력과 제어를 담당하는 요소가 이중화로 구성되어 있으며 이것이 상위의 네트워크와 연결되기 위한 인터페이스가 있다.

입출력과 제어를 담당하는 요소는 Rack I/O와 Block I/O이며 기존의 Network 90, Infi-90 등과 호환되며 PCU (Process Control Unit)를 구성하게 된다. Block I/O란 사시, 케이블, 입출력모듈, 전원장치, 단자대까지를 하나의 장치로 결합한 입출력 제어장치를 말한다. 이 장치는 입출력 랙의 설치 공간을 감소시킬 수 있으며 분산 배치도 가능하므로 긴 배선을 감소시킨다. 상위 시스템과의 인터페이스는 Onet(Ethernet 방식)으로 Engineering Tool, Human-System Interface와 연결되며, 하위는 Cnet에 의해 PCU와 연결된다.

#### (2) 운전원 조작 시스템

System Engineering Tools은 시스템의 엔지니어링, 운전, 유지보수를 위한 통합환경을 제공하는 것으로서 Multi User Client/Server 구조를 갖는다. 이것은

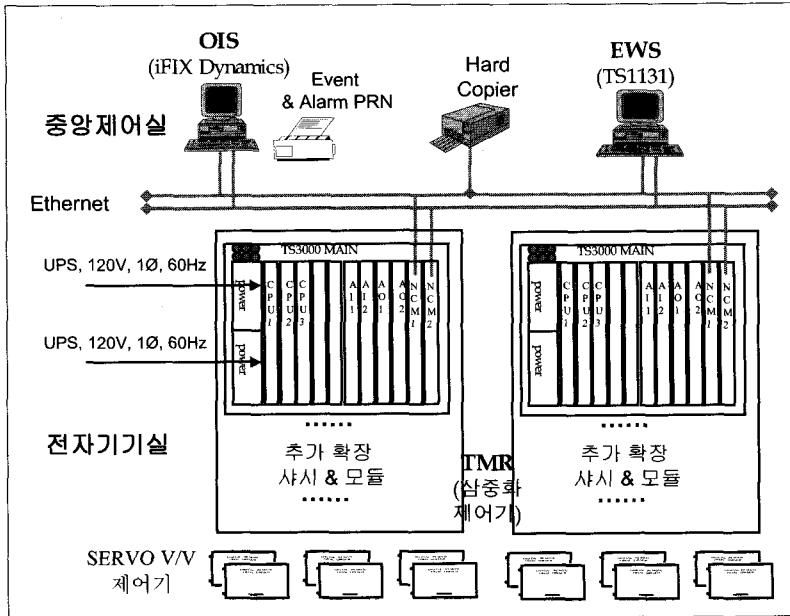
Windows NT용으로 개발되었으며 PC의 데스크탑 엔지니어링을 On-line 혹은 Off-line 상에서 지원한다. 통합된 Explorer는 Microsoft의 Explorer 형태의 최상위 사용자 인터페이스로서 Windows NT 상에서 운영된다. 제어기와 HSI(Human-System Interface) 자원을 하나의 통합된 응용프로그램으로 제공한다. 플랜트의 운전과 감시를 위한 HSI는 Microsoft Foundation Class Library 기반의 Window NT용과 Alpha의 64bit RISC 프로세서를 탑재한 Workstation에서 동작하는 Open VMS 시스템용 2가지가 있다.

#### 다. 전력연구원 개발 모델(STAR 2000)

전력연구원은 '97년 11월부터 "기력발전소 터빈 디지털 제어시스템 개발" 연구에 착수하여 3년여의 연구 끝에 중부발전(주) 서천화력 제1호기에 삼중화 터빈 디지털 제어시스템을 개발하여 국내 기술로는 처음으로 2000년 5월에 준공하여 현재까지 상업 운전중에 있으며, 이를 이어서 2002년 5월에는 중부발전(주) 인천화력 제2호기에 본 제어시스템을 적용하여 성공함으로써 이 분야의 기술 국산화를 앞당기고 있다. 전력연구원이 개발한 STAR 2000은 터빈제어 알고리즘 및 운전 조작용 화면 등 응용 프로그램은 타 발전소의 터빈제어 시스템을 비교 분석하여 최선의 제어방식을 선택하고 적용 발전소의 현 시스템을 분석하여 운전원이 이해하고 사용하는데 불편이 없도록 하였다.

#### (1) 주 제어시스템

터빈제어시스템의 구성은 그림 5와 같다. 삼중화 제어기인 TMR은 미국 Triconex사의 상용화된 제품으로, 전력연구원은 이 모델을 사용하여 필요한 각종 응용프로그램을 개발하였다. 제어로직 및 각종 자기진단 기능을 수행하는 CPU 모듈, 현장의 각종 센서로부터 신호를 입



〈그림 5〉 전력연구원 개발 터빈 제어시스템

력받고 현장의 각종 기기를 구동하기 위한 신호를 출력하는 입출력 모듈과 운전원 조작시스템과 통신을 위한 모듈(NCM) 등으로 구성되어 있다.

주 제어 모듈은 삼중화로 구성되어 있고, 나머지 입출력 모듈, 통신 모듈, 전원 모듈 등은 이중화로 구성되어 있다.

(2) 운전원 조작 시스템

EWS는 발전 정비원이 TMR의 현재 이상 상태 여부를 확인하며, 제어로직을 작성하고 다운로드하며 운전중에 제어변수를 감시할 수 있는 기능을 제공해 준다. IBM 호환 컴퓨터로 구현하며 Windows 2000을 운영체제로 하며 TMR 제작사에서 제공해 주는 전용 소프트웨어인 "TriStation 1131"라는 프로그램을 사용한다. TriStation 1131은 IEC 1131-3의 국제규격에 따라 사용자가 목적에 적합한 프로그램을 쉽게 구성할 수 있도록 개발되었다. 제공되는 프로그래밍 언어는 Function Block

Diagram(FBD), Ladder Diagram (LD), Structured Text(ST) 등으로 구현할 수 있다.

OIS는 발전 운전원들이 발전소 현장의 운전상태를 감시하며 각종 구동기의 동작을 GUI에 의해 가능하도록 해준다. IBM 호환 컴퓨터로 구현하며 Windows 2000을 운영체제로 하며, GUI를 위한 프로그램은 Intellution사의 "iFix"를 사용하여 구현하였다.

5. 맺음말

이상에서 발전소용 터빈의 구조와 운전 및 터빈 제어시스템에서 사용되는 제어기능 및 감시기능에 대해서 간략히 언급한 후, 현재 우리 나라 발전소에 많이 적용되고 있는 외국 제작사의 제품과 전력연구원에서 적용한 제품에 대해 살펴보았다. 주 제어 모듈과 네트워크는 단일 부품 고장에 의해 터빈정지를 예방하기 위해 이중화 혹은 삼중화로 구성되어 있고, 운전원 조작은 윈도우즈 환경하에 그래픽으로 구현하여 쉽게 사용할 수 있도록 되어 있다.

전력연구원은 디지털 터빈제어시스템을 서천화력 제1호기에 이어 인천화력 제2호기에 성공적으로 적용함으로써 분산제어 방식의 터빈제어시스템에 대한 설계 및 제작 기술의 자립도가 한층 높아졌고, 적용범위가 터빈제어뿐만 아니라 터빈구동 급수펌프 제어와 터빈 보조기기 제어 등 터빈제어 전 범위에 걸쳐 전력연구원의 기술을 실증함으로써 고객의 신뢰도를 높일 수 있었다. 장기사용 발전소의 설비개선 기술과 예방정비 기술을 확보하였으며, 발전소 총합 자동화 제어시스템 기술자립의 기반을 구축하였다.