

원자력플랜트 電氣·計裝 기술

1. 머리말

일본의 원자력발전은 현재 일본 국내 전체발전량의 1/3 이상을 담당하고 있으며 2000년 이후에도 안정된 전기에너지 공급원으로서 중요한 위치를 점하고 있다.

미쓰비시電機는 미쓰비시重工業과 함께 초창기였던 1970년대 이래, 줄곧 가압수형 원자력발전플랜트의 전기·계장기술의 국산화개발을 추진하여, 계장제어설비, 발전기, 개폐소설비, 플랜트전체 통신시스템 등 발전소의 거의 모든 전기·계장설비를 공급하고 있으며, 기술의 진보와 새로운 사회적 요구 등을 반영한 개발·개량에 힘써 왔다.

이들 원자력플랜트 전기·계장기술에 대한 최근의 경향으로서, 먼저 계장제어시스템에서는 중앙계장 및 제어보호분야의 고도의 마이크로프로세서 응용기술과 고속데이터 전송기술을 중앙감시조작과 플랜트제어보호에 적용하여 운전원의 부담경감, 휴먼에러의 방지, 시스템 신뢰성의 향상, 경제성의 향상을 도모한 신형 중앙제어반 및 종합디지털화 시스템을 들 수 있다. 원자로계장분야에서는 종래 시스템의 운용경험과 최신기술에 기초하여 개량한 신형 디지털제어봉 위치지시장치를, 방사선계장분야에서는 로컬네트워크기술에 의한 현장분산처리방식을 채

용, 원자력플랜트에의 적용을 고려하여 넓은 응용분야에서 실적을 쌓고 있는 신형 방사선계장시스템을 들 수 있다. 그리고 운전·유지보수·관리분야에서는 운용경험과 최신의 데이터 처리·통신기술을 적용하여 발전소의 운전 및 유지보수 관리에 한층 더 효율화를 기한 원자력발전플랜트 보전관리시스템이 있다.

대형전기설비 중에는 앞으로의 대용량 원자력플랜트에 대응하기 위해 경방향(徑方向)을 실기(實機)치수로 한 모델을 제작하여 검증한 발전기가 있다. 이 검증으로 1,800MVA급의 대용량발전기도 제작가능함을 실증하였다.

아래에 이들의 동향과 개요에 대하여 소개한다.

2. 計裝·制御시스템

가. 中央計裝시스템

원자력발전소의 중앙계장에 대해서는 다수의 계통설비에 대응하는 표시기기·조작기기를 중앙에 집중시켜 감시·제어를 하기 때문에 통상운전시 및 이상시에 플랜트 시스템의 상태를 바르게 파악하여 정확하고 적절한 판단·운전조작을 할 수 있는 중앙계장시스템을 실현하는데 중점을 두었다. 이를 위해 조작기기·계기류의 형상,

반면배열, 표시를 고안하여 시인성(視認性)·조작성을 개선하는 단계에서부터 시작하여 곧이어 계산기의 능력 향상 및 정보처리기술의 급속한 진보와 TMI사고 이후의 인간신뢰성 연구의 동향 등을 배경으로 계산기와 컬러 CRT에 의한 적절한 집약정보의 표시·활용을 운전감시 시스템의 주체로 하는 단계로 이행하였다.

운전원의 부담(負擔) 경감, 오인(誤認)·오조작 방지를 목적으로 하는 운전감시조작의 실상 분석과 인간공학에 기초하여 상세히 평가함으로써 운전감시조작의 긴급도에 따른 CRT 표시의 계층화·집약에 대해 연구하였다. 그리하여 긴급시에 필요한 정보의 CRT에의 자동표시와 운전원에 대한 가이드스 표시 등 운전지원기술을 발전시켜 표준이 되는 중앙제어반을 실현할 수 있었다.

차기플랜트 이후의 신형 중앙계장시스템에서는 운전원의 부담 경감, 오인·오조작의 방지, 경제성 향상을 더욱 진전시켜 운전원이 신형 중앙반을 향하여 앉은 자세로 플랜트전역의 상황을 양호한 화질의 정리된 화면으로 상시 감시할 수 있게 된다. 즉 운전원이 계통설비기기의 상태를 화면과 음성을 포함한 가이드스를 활용하여 상세하게 감시·확인하면서 화면상의 조작기기영상에 접촉함으로써 계통기기에 직접 조작신호를 보내는(터치 오퍼레이션) 방식을 채용하고 있다.

(1) 쏘 터치 오퍼레이션 방식

이 신형 중앙계장시스템의 운전감시조작 방식은 운전원부담(負擔) 경감, 오인·오조작 방지를 목적으로 하는 최신의 형태이며, 고화질의 CRT, 플랫디스플레이 패널, 대형표시장치, 음성기술, 고속·대용량·고신뢰성의 신호전송 처리기술 및 지식·정보처리기술을 종합한 것이다.

이것들은 어느 것이나 요소기술의 개발·검증, 프로토타입의 시작(試作)·검증, 본격적인 모델시스템의 제작·검증 그리고 운전경험자·시스템설계자·학식경험

자들의 운전조작성의 검증 등을 거쳐 실용화하였다.

이 신형 중앙계장시스템은 운전원부담 경감, 오인·오조작 방지의 대응으로서 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

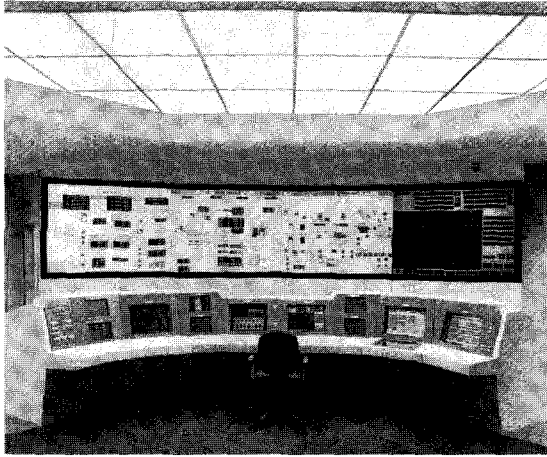
- ① 운전원이 운전석에 앉은 자세로 플랜트 운전감시조작이 가능한 전(全)터치 오퍼레이션방식의 콤팩트한 운전콘솔을 채용함.
- ② 대형 표시장치에 의해 플랜트상태와 계통설비기기 상태 등의 주요정보를 운전원 전원이 공유함.
- ③ 대형 표시장치에는 계통도와 경보를 대응시켜 표시함으로써 이상시의 경보인식·판단을 정확·용이하게 함.
또 경보 발신후 운전원이 인터록 확인과 대응처치용 화면표시, 경보처치 순서가이드스 등의 지원정보를 쉽게 참조할 수 있는 경보시스템을 구비함.
- ④ 이상시나 사고시에 현황 판별 및 대응조작 판단을 지원하는 사고시 운전지원기능을 구비함.

차기플랜트 이후의 플랜트 계측·제어시스템은 전역이 디지털화되고, 중앙계장시스템과 상호 고속·대용량·고신뢰도의 데이터 전송·처리시스템으로 긴밀하게 결합된 종합디지털화 시스템을 구성한다.

상기한 터치 오퍼레이션방식의 운전감시조작과 종합 디지털화 시스템에 의하여 감시와 운전조작을 일체화한 신뢰성 높은 운전감시조작을 가능케 하여 운전원부담 경감, 오인·오조작 방지의 관점에서 새로운 표준이 될 중앙계장시스템을 실현하였다(그림 1 참조). 또 다음 단계로는 국가의 지원을 얻어 계속해 온 세이프티 서포트 시스템 개발의 성과를 구체적으로 적용할 계획이다.

(2) 세이프티 서포트 시스템

세이프티 서포트 시스템 개발은 원자력 발전플랜트의 이상현상을 조기에 발견함으로써 그 영향을 확대시키지 않으며 운전·보수에 있어서는 고도의 자동화로 인간의 부담을 경감하는 것을 목적으로 기기고장 및 인적과오를



〈그림 1〉 신형중앙제어반(동적검증실시반)

줄여 광의의 안전성과 운전신뢰성을 더욱 높여 고도의 운전지원시스템을 개발하는 것으로 다음과 같은 기본기술을 확립하고 있다.

① 이상예지(異常豫知) 종합판단기술

1차 냉각계의 가장 중요한 기기인 1차 냉각재 펌프를 주대상으로 하여 비교적 서서히 진전되는 이상현상에 대해 운전원의 대응에 충분한 여유가 확보될 수 있는 단계에서 이상을 진단하고 정보를 제공한다.

이를 위하여 이상(異常)의 원인과 영향에 관한 식견, 운전기록 등 이상예지에 필요한 지식데이터베이스, 기기의 상태감시데이터에서 이상징후를 검출·판정하는 시스템 등을 개발하고 있다.

② 고도 자동화기술

제어기기 고장을 검지하여 플랜트에 나타나는 과도변화(過渡變化)를 예측함으로써 유효한 수동처치를 할 수 있는 시간 내에 이상확대 방지조치를 지시하거나 또는 필요에 따라서는 자동처치를 실행하여 고장으로 인한 플랜트의 정지를 피한다.

이를 위해 제어기기 하나의 고장이 바로 성능저하로 연결되는 현상을 방지하기 위한 제어시스템의 분산구성과

백업방식, 플랜트에 외란을 일으키지 않고 정상적인 제어계로 고속전환하는 기술 등을 개발하고 있다.

③ 고도 운전정보 제공기술

이상예지 종합판단기술이나 고도의 자동화기술 등에서 얻을 수 있는 운전지원에 유효한 정보를 멀티미디어기술 등을 사용하여 운전유지보수 감시정보로서 운전원에게 제공한다. 또 중요한 플랜트 운전조작을 위한 교육훈련시스템을 제공한다.

플랜트·기기의 운전상황 변화를 적절하게 표시하여 운전원의 판단·조작능력을 충분히 발휘할 수 있도록 하기 위하여 운전원이 종전의 반 이하의 조작횟수로도 정보를 가장 판단하기 쉬운 형태로 입수할 수 있는 정보제공기술을 개발하고 있다.

앞으로 이들 기술을 종합디지털화시스템 적용을 기초로 하고 실제의 중앙계장시스템, 제어시스템에 적용하여 광의의 안전성을 갖춘 차세대의 원자력플랜트를 실현해 나갈 것이다.

나. 플랜트制御·保護시스템

원자력발전소의 계장제어시스템은 플랜트의 운전상태를 규정범위 안에서 제어·조절하는 제어시스템과 정상적인 운전상태로부터의 이탈(逸脫)을 검지하여 원자로 정지신호를 발신하는 보호시스템으로 이루어진다.

당초 원자력발전소의 제어시스템, 보호시스템에는 공히 일반공업계, 화력발전 등의 분야에서 실적이 있는 아날로그계기, 전자(電磁)릴레이 등에 원자력플랜트에서 요구하는 높은 신뢰도를 만족하도록 개선·검증된 것을 적용해 왔었다.

미쓰비시電機에서는 원자력발전소 계측기기의 국산화에 더하여 '70년 후반에 원자력발전소용 카드식아날로그계기, 솔리드스테이트 로직회로 등을 국산화하여 제어시스템, 보호시스템에의 적용을 개시하여, 국산기술과 운용

경험을 살려 안전성 확보·신뢰성 향상·유지보수성 향상·가동률 향상을 목표로 계기단체(單體) 및 시스템의 양면에서 개선을 도모하여 왔다.

이와 거의 병행하여 원자력플랜트의 보조적인 감시·제어설비에의 디지털식 제어장치의 도입을 시행하여, '80년대 말에는 플랜트 주요제어시스템에 원자력용 마이크로 컴퓨터시스템 및 다중(多重)데이터 전송기술을 구사한 디지털화를 적용하였다.

이러한 동향은 마이크로컴퓨터의 성능 향상 및 대용량·고속의 신호전송처리기술의 진보를 배경으로 한 일반공업, 화력발전 분야의 디지털화 동향과, 디지털화에 의한 제어시스템으로서의 신뢰성·유지보수성·경제성의 향상요구를 반영한 것이다.

보호시스템의 디지털화에 대해서는 '90년대 초두에 디지털화 보호시스템의 기본기능·구성·성능·기준 적합성에 대하여 검증을 완료하고 있다.

다. 綜合디지털화 시스템

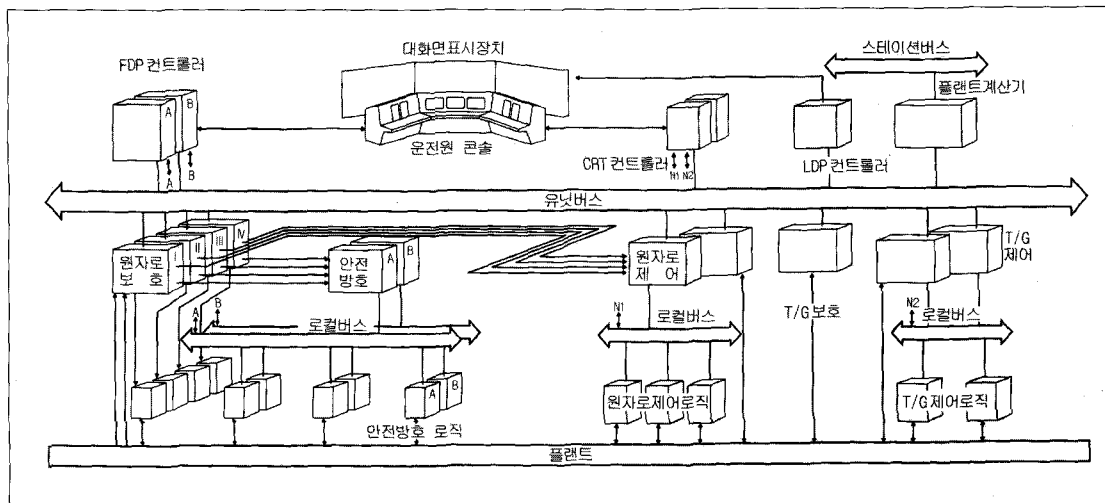
차기플랜트 이후의 계장제어시스템에서는 신형의 중앙

계장시스템을 정점으로 하는 제어시스템(常用系), 보호시스템(安全系)을 모두 디지털화하여 이들을 고속·대용량·고신뢰도의 데이터전송·처리시스템으로 결합한 종합디지털화 시스템을 적용한다.

종합디지털화 시스템은 운전원과 플랜트를 직결하는 운전감시조작 시스템, 플랜트의 중추신경으로 작용하는 계측·제어·보호 시스템, 설비의 이상·고장을 미연에 방지하는 운전·유지보수관리 시스템의 세 가지에 착안하여 플랜트경험, 최신의 컴퓨터기술 및 정보전송처리기술 사용으로 안전성·신뢰성·유지보수성·가동성의 보다 향상을 도모한 것이다(그림 2 참조).

주요 특징은 다음과 같다.

- ① 신형 중앙계장시스템의 적용으로 운전원부담 경감, 오인·오조작 방지, 이상시의 운전지원을 강화하여 운전조작의 신뢰성을 대폭 향상시키고 특히 플랜트 전역에 걸친 디지털화와 정보통신에 의하여 플랜트 전체로서의 운전신뢰성을 향상시키고 있다.
- ② 통상운전시의 운전원 부담이 되고 있는 감시·확인 작업의 계산기화와 플랜트 기동·정지를 포함한 운



〈그림 2〉 종합디지털화 시스템의 구성(예)

전의 자동화 등으로 운전원의 보다 고도의 역할·판단이 가능하다.

- ③ 운전감시·제어·보호 각 장치의 기능분담을 재검토하여 고장시의 영향범위, 제어처리내용 그리고 케이블의 양 등을 최적하게 한다는 관점에서 기능·설비의 분산을 기하고 있다.
- ④ 보호시스템의 디지털화에 있어서 페일세이프(Fail-safe)성의 향상, 자기진단기능·자동시험의 충실로 보수시를 포함한 시스템 안전성 및 유지보수성을 향상시키고 있다.
- ⑤ 플랜트 전역에 걸친 디지털화와 통신시스템에 의한 결합으로 보전·상태감시 등에 필요한 설비정보·데이터의 집중관리, 시험·기록의 집중관리 등의 유지보수·보전업무지원을 용이하게 하고 있다.

라. 原子爐計裝

원자로 계장분야에서 동사는 원자로의 중성자속(束) 계측장치, 제어봉구동장치용 제어장치, 제어봉위치 지시장치 등을 담당하여 국산화한 이래 운용경험과 신기술동향을 반영하여 개량·개선을 추진하여 왔다.

이들 원자로계장에 있어서의 개량·개선은 제어·보호시스템의 경우와 마찬가지로 아날로그계장을 디지털화하여 기능 향상·합리화를 도모하는 기술동향 외에 격납용기내 환경에 대한 내성(耐性)의 향상, 설비 콤팩트화에 의한 합리화 등을 종합하고 있다.

최근의 신형디지털식 제어봉위치 지시장치의 개선에서는 아날로그회로의 설정·조정·교정의 합리화, 자동시험기능의 충실 등 유지보수·점검작업의 합리화와 지시치의 드리프트대책·계측정도 향상 등을 디지털화에 의해 개선하여, 플랜트 정기검사에서 점유하는 소요기간의 단축 및 신뢰성의 향상을 도모하였다. 동시에 격납용기내 설치캐비닛의 환경온도 내성을 부품레벨로부터 향상시켜 전용 공조여러리가 필요 없도록 설비의 소형화를 기하

고 있다.

이 신형장치는 기설플랜트에 대해서는 제어봉위치 지시장치의 갱신을 유리하고 또한 용이하게 할 수 있도록 고려하고 있으며, 또 금후의 플랜트에 대해서는 종합디지털화 시스템의 구성요소로서 신형 중앙계장시스템에 직접 데이터를 전송하여 운전원콘솔의 CRT에 제어봉위치를 표시할 수 있는 구성으로 하고 있다.

마. 放射線計裝

원자력발전소의 방사선계장분야에서 동사는 격납용기내를 포함한 원자력시설의 분위기, 배기, 배수·폐액(廢液) 및 발전소 주변의 분위기, 배수의 각종 방사성물질농도·방사선레벨을 광범위하게 계측·감시하는 방사선감시설비를 담당하여 왔다.

이 분야는 특수 계장분야인데 일반사회로부터의 방사선안전에 대한 요구와 직접 접하는 분야이기 때문에 공적규제의 강화, 기술의 진보, 운용경험 등을 배경으로 하여 계속 개선해 나가고 있다.

차세대 방사선감시설비를 개선함에 있어서는 검출기의 검출특성변화의 영향 배제, 검출기의 장수명화, 신호전송 경로에서의 노이즈의 영향 배제, 이상진단기능의 강화, 유지보수·점검 소요시간 단축 등의 기본적 과제에 대하여 검출기측 및 계장시스템측의 양면에서 보다 개선을 도모함과 동시에, 종합디지털화 시스템에 적합한 데이터통신 인터페이스를 채용하여 광범위한 방사선감시 정보를 중앙제어실에 집약표시할 수 있도록 노력하고 있다.

구체적으로는 반도체검출기 등의 특성변화 및 수명이 실용상 문제가 되지 않는 검출기를 채용하여, 검출기 가까이에서 디지털화한 측정치리유닛으로 방사선계측펄스를 계수율(計數率) 디지털 데이터로 변환하여 광다중(光多重) 전송네트워크에 의해 중앙에 전송한다. 측정치리유닛에는 입력펄스 파형에 의해 이상펄스를 판정·제거하는 노이즈필터를 설치한다. 이 방식에 의하여 검출기

의 측정신뢰성을 향상시키고 또 검출기계(系) 및 전송경로에서의 노이즈의 영향을 배제한다.

이 차세대 방사선계장시스템은 소형화된 검출기·측정처리유닛의 세트를 현장에 분산배치하고 그것들을 전송네트워크로 결합하여 종합디지털화 시스템에 넣는 구성으로 한다.

또한 검출기신호를 중앙제어실 가까이 방사선감시반에 통상케이블로 전송하고 있는 기설플랜트의 방사선계장시스템에 대해서는 개량된 검출기를 적용하여 방사선감시반에 노이즈필터, 데이터전송 인터페이스를 두는 방식도 적용할 수 있다.

바. 운전 및 유지보수·관리

원자력발전소에서는 플랜트의 운전, 매일의 점검·유지보수, 정기점검 등을 고품질·고신뢰도를 유지하면서 원활하게 처리·관리해 나가야 한다. 이러한 기술관리업무에서는 방대한 기술정보·데이터가 기록·확인·비교·의사결정·작업지시연락·보고 등의 목적에 맞추어 여러 가지 형태로 사용되고 있다.

이를 위하여 동사는 플랜트에서의 요망사항을 반영하여 운전·유지보수, 관리업무의 효율화·성력화(省力化), 신뢰성 향상을 목적으로 기술정보·데이터를 개개의 목적에 따라 필요한 형식으로 정리·표시하는 기술·업무지원 계산시스템을, 계산기기술·정보처리기술의 진전 및 플랜트운영경험의 축적을 바탕으로 구축하여 왔다.

(1) 運轉支援시스템

이상시의 운전조작을 확실하게 하기 위하여 이상진단 결과, 상황확인·판단에 필요한 플랜트정보, 운전조작가 이턴스 등을 자동표시한다.

(2) 警報處理支援시스템

운전요령서를 데이터베이스로 하여 경보발령시에 경보

에 대응하는 운전요령을 정리한 형태로 자동표시한다.

(3) 系統隔離支援시스템

계통도를 데이터베이스로 하여 정기점검시, 유지보수시의 다양한 점검작업·보수 작업에 대응하여 점검·유지보수를 대상으로 하는 계통기기범위를 격리하기 위한 격리대상 밸브의 검토·확인·설정을 지원하며, 격리지시태그의 자동작성, 기기격리상태 등을 자동표시 한다.

(4) 補機制御로직 시뮬레이터

펌프, 모터, 밸브 등의 계통보기를 제어하는 제어로직, 신호·전원의 결합을 나타내는 EWD를 데이터베이스로 하여 보기의 기동·정지조작, 전원의 On·Off 조작 등에 의한 로직동작의 전파와 영향범위를 EWD상에서 분명하게 표시한다.

다음 단계로서 유지보수·보전의 고도화를 목표로 플랜트설비·기기의 상태데이터를 장기적으로 감시하면서 변화의 동향, 이상징후를 파악하여 적절한 시기에 유지보수·보전을 하는 상태감시보전을 지향하고 있다.

동사는 이들 니즈에 대응하여 초기의 운전관리, 도면관리, 계장품관리 등의 개별 업무를 기계화한 지원시스템에서 정기점검기간 내에 계통격리작업·보수작업 및 시운전을 고효율·고품질로 실시하기 위한 지원시스템, 나아가 플랜트 이상징후를 조기에 파악하기 위하여 플랜트데이터를 장기간에 걸쳐 정량파악하여 평가하는 시스템 등 발전소 전체의 운용을 고려한 종합시스템까지 광범위한 니즈에 대응하는 운전·유지보수 및 관리시스템을 각 전력회사의 지도하에 제안, 구축하여 왔다.

최근의 원자력발전소 보전관리시스템에 대한 대처 예로는 최신의 데이터처리·통신기술 및 운영경험을 살려 플랜트데이터, 상태감시보전정보, 설계정보, 관리요령 등을 종합한 요소시스템을 통합해 필요한 정보를 퍼스널컴퓨터 레벨에서 용이하고 적절한 형태로 활용할 수 있도록

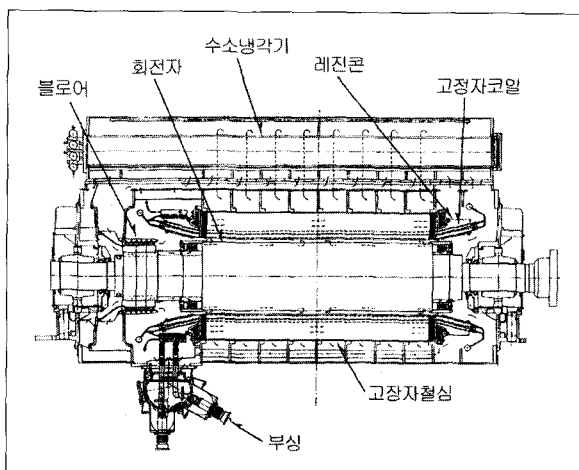
하여 발전소의 운전·유지보수 및 관리를 한층 더 효율화·고신뢰화하는 원자력보전관리 시스템을 목표로 하고 있다.

3. 플랜트 電氣機器

원자력발전플랜트 계획시에는 기설플랜트의 기술실적·운용실적 및 새로운 기술동향을 바탕으로 하여 가일층의 안전성·신뢰성·유지보수성의 향상을 지향함과 동시에 전력수요와 경제성의 요청을 배경으로 한 플랜트의 대용량화에 주력해 왔다.

동사는 최초의 국산 원자력용 터빈발전기를 제작한 이래 발전기, 1차냉각재 펌프모터, 순환수 펌프모터 등을 포함한 대형의 플랜트 전기기기에 대하여 플랜트 출력의 대용량화 요청에 대응하여 앞서의 경험을 통해 축적한 기술개발을 기초로 더욱 고도의 신뢰성을 갖는 대용량기기의 개발과 제작을 추진하여 왔다.

최근에는 앞으로의 대용량플랜트에 대응하기 위하여 1,800MVA급의 원자력용 대용량터빈발전기를 계획하여 그 신뢰성 검증을 완료하고 또 대용량플랜트용 1차냉각



〈그림 3〉 원자력용 대용량 터빈발전기

재 펌프모터, 순환수 펌프모터 등에 대해서도 대용량화에 노력하고 있다.

원자력용 대용량터빈발전기의 신뢰성 검증에는 기설기에서 충분한 실적을 쌓은 기본기술·재료기술을 적용하였다. 무리없이 대용량화·대형화를 추진시키기 위해 기술검증을 하고 회전자경(徑)의 대형화를 고려하여 경방향(徑方向)을 실기치수로 한 모델발전기를 제작하고 고정자코일단부(端部) 진동특성, 절연특성, 각부의 온도상승, 회전자 기계강도 등을 포함한 각종 기계적 강도, 전기적 특성에 대하여 다각적인 신뢰성 검증을 실시하였다. 그 결과 높은 신뢰성을 갖춘 원자력용 대용량터빈발전기를 제작하여 공급할 수 있게 되었다(그림 3 참조).

4. 맺음말

이상 원자력플랜트 전기·계장기술에 대한 미쓰비시電機의 대처와 최근의 사례에 대하여 소개하였다.

원자력발전은 장기적인 전기에너지 공급원의 하나로서 앞으로 쉽게 대체할 수 없는 중요한 역할을 담당하게 될 것이다.

원자력발전이 그 역할을 다하기 위해서는 원자력플랜트를 한층 안전하게 하고 신뢰성·경제성을 높일 수 있도록 지속적으로 노력해 나가야 한다.

이를 위하여 동사는 마이크로 일렉트로닉스기술·정보처리기술에 기초한 계장시스템, 축적된 경험과 개발기술에 기초한 전기설비분야를 통하여 미쓰비시重工業과 함께 끊임없는 노력을 계속해 갈 생각이다. ■

이 원고는 일본 三菱電機技報에서 번역, 전재한 것입니다. 본고의 저작권은 三菱電機(株)에 있고 번역책임은 대한전기협회에 있습니다.