

'98추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

차세대원전 출력제어계통 전력 캐비닛 Prototype 개발 A Prototype of KNGR Power Control System Power Cabinet

박현신, 양승권, 정학영
한국전력공사 전력연구원,
대전광역시 유성구 문지동 103-16

홍형표
한국전력기술주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

차세대원자로 출력제어계통은 원자로 출력을 제어하는 기능을 수행한다. 차세대원자로기술 개발 2단계에서는 출력제어계통에 대하여 기존 원전과 다른 새로운 설계 특성을 적용하고, Prototype 개발을 통해서 변경된 설계 사항에 대하여 성능 검증 및 확인 작업을 수행하고 있다. 본 논문에서는 차세대원자로기술개발 2단계에서 수행중인 출력제어계통의 전력 캐비닛 Prototype에 대해서 전력 캐비닛을 구성하는 주요 기기의 설계 변경 사항을 설명하고, 이들 설계 변경 사항을 확인하는 절차를 제시한다.

Abstract

The Korean Next Generation Reactor(KNGR) Power Control System(PCS) has adopted new design features which are different than the ones in an existing Korean Standard Nuclear Power Plant(KSNP). I&C design activities performed during KNGR development project (Phase II) include the development of a PCS prototype which is useful to verify the functional performance and design requirements of the PCS. This paper describes the functional variation of key subsystems consisting PCS power cabinet. In addition, this paper explains verification and validation procedures to confirm the advantages of the adopted design features.

I. 개 요

차세대원전의 출력제어계통(Power Control System: PCS)은 크게 제어봉구동장치제어계통,

원자로출력조절계통, 원자로출력감발계통, Megawatt Demand Setter로 구성된다.^[4] 차세대원자로기술개발 2단계에서는 기존 원전의 제어봉구동장치제어계통의 성능을 향상시키기 위하여 제어봉구동장치제어계통에 대한 Prototype을 개발중에 있다. 본 논문에서는 차세대원전 출력 제어계통 설계에 새롭게 적용하기 위하여 개발중인 전력 캐비닛 Prototype 구성 기기에 대해서 설명하고자 한다.

II. 출력제어계통 전력 캐비닛 Prototype 기능 및 구성

차세대원전의 출력제어계통 전력 캐비닛은 원자로 출력을 제어하기 위해 제어봉집합체(Control Element Assembly: CEA)를 삽입/인출하는 작업을 수행하며, 이를 위해서는 CEA를 구동하는 제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism: CEDM)의 4개 코일에 정해진 순서에 따라 3 종류의 직류 전원을 적절히 공급해 주어야 한다. 이러한 기능은 주로 Automatic CEDM Timing Module(ACTM)과 전력제어회로에 의해 이루어진다. ACTM은 출력제어계통 Programmable Logic Controller(PLC)의 지시에 따라 해당 CEDM 코일(Upper Gripper(UG), Lower Gripper(LG), Upper Lift(UL), Lower Lift(LL) Coils)의 구동에 필요한 타이밍 펄스를 발생하며, 코일에 흐르는 전류를 감시하여 CEDM의 동작여부를 판별하고 그 결과를 출력제어계통 PLC에 제공한다. 또한, 항상 코일에 흐르는 전류를 감시하여 코일을 보호하고 전류 상실시 다른 코일로 전환하게 하여 제어봉이 떨어지는 것을 예방한다.^[1]

전력제어회로는 펄스폭 변조방식을 사용하여 Motor-Generator Set으로부터 공급된 3상 240V 교류전원을 정류 및 절개하여 CEDM에 Zero(0V), Low(45VDC), High(160VDC)의 3종류의 전압을 ACTM의 요구에 따라 공급한다. 전력제어회로는 3상 교류 신호로부터 독립적인 동기된 클럭을 얻기 위한 Zero Crossing Detection 회로와 코일에 공급되는 전압을 조정할 수 있도록 Zero Crossing 출력과 동기된 스위칭 소자의 On/Off 펄스폭을 설정하는 Phase Sync. 회로, ACTM의 요구 전압과 Phase Sync. 출력을 논리적으로 조합하여 최종적인 스위칭 신호를 만드는 Coil Drive & Actuation Logic, 3상 교류전원을 정류하여 스위칭하는 Power Control 모듈, 이상의 논리 회로에 전원을 공급하는 Logic Power Supply로 구성된다.^[1]

차세대원자로기술개발 2단계 출력제어계통 전력 캐비닛 Prototype은 2개의 CEA를 동작시키는데 필요한 회로로 구성되며, 1개의 Cabinet에 모듈 형태로 제작되어 조립된다. 그림 1은 현재 개발중인 출력제어계통 전력 캐비닛 Prototype을 나타낸 것이다.

III. 개발 내용

1. ACTM Card

ACTM Card는 출력제어계통 PLC로부터 CEA의 삽입 또는 인출 명령이 입력되면 정해진 시간 순서에 따라 CEDM 코일에 전압 공급을 순차적으로 공급할 수 있도록 Coil Drive Actuation Logic Card에 신호를 제공하고, CEA 동작 결과를 출력제어계통 PLC에 통보하는 기능을 수행한다.^{[2][3]} 또한, CEDM 코일에 흐르는 전류를 감시하여 비정상 상태가 발견되면 자동으로 응급조치를 취하고 운전자에게 알려 후속 조치를 기다린다.

차세대원전에서 출력제어계통의 ACTM에서는 마이크로프로세서로 기존 원전에서 사용하고 있는 8비트 마이크로프로세서인 Intel의 8085 대신에 16비트인 AMD사의 AM188EM을 사용하여 프로그램의 처리속도를 크게 향상시켰다. 그리고 프로그램 및 데이터 저장에 사용되는 기억소자를 기존 8k바이트에서 128k바이트로 크게 늘리고, 프로그램 저장을 위해서 기존의 EPROM 대신에 차세대 기억 소자인 Flash 메모리를 사용하여, 소프트웨어의 처리 알고리즘 개선 및 기능 추가를 용이하게 하였다. 통신 네트워크에 의한 중앙집중식 On-line 정비가 가능하도록 하기 위하여 직렬통신기능을 추가하고 자기진단기능을 강화하였다. 소프트웨어적인 측면에서는 기존의 8085 어셈블리어 대신에 8x86 어셈블리어를 사용할 수 있어 전문적인 개발장비를 구입하지 않고, 현재 널리 쓰이는 IBM-PC를 활용할 수 있어 다양한 개발환경 및 라이브러리를 이용할 수 있다. 8x86의 기계어 명령은 인텔의 8086에서 최근에 나오는 펜티엄 II까지 호환됨으로 향후 고성능의 마이크로프로세서를 채용할 경우에도 변경에 따른 추가적인 노력 없이 현재의 프로그램을 그대로 사용할 수 있다.

ACTM의 외관은 기존 PCB 형태의 단점을 개선하여 소형의 알루미늄 모듈 케이스에 내장시켜 삽입 및 제거가 용이하도록 하였고, 전자파 차폐 효과를 도모하였다. 이를 위해 PCB는 두 장의 소형기판으로 분리하여 공간을 절약하였고, 기존의 3단자 레귤레이터 대신에 DC-DC 컨버터를 사용하여 케이스 내 발열을 크게 줄일 수 있도록 하였다.

CEDM 코일 전류 측정용 Hall Effect 센서와 연결되는 커넥터에는 기존의 DB-25형 커넥터 대신에 삽입 및 분리가 용이한 REMO 커넥터를 사용하였다. PCB에 부착되는 모든 부품은 유지보수가 용이하도록 소켓을 사용하고, AM188EM처럼 소켓이 없는 표면실장형 부품은 전용의 소형기판을 제작하여 부착한 후 커넥터를 사용하여 PCB와 연결하였다.

ACTM의 외관은 직사각형의 모듈형 케이스를 사용하여 마무리하였으며, 모듈 전면에는 모듈 제거에 필요한 Unlock 레버와 ACTM의 동작상태를 표시하는 5개의 LED와 2개의 조작스위치, 그리고 코일전류 입력커넥터와 RS-232C 커넥터가 설치하였다. 그리고 ACTM 모듈의 후면에는 16x2형태의 Edge 커넥터가 있어 전원공급 및 외부와의 제어신호 입출력이 이루어지도록 하였다.

2. Zero Crossing Detection Card

Zero Crossing Detection Card는 중성점 기준 최고전압 196V인 3상 교류전압을 감시하여 각 상의 위상이 반전되는 순간마다 펄스 폭이 매우 짧은 펄스를 출력하여, 이 펄스 신호를 기준으로 Phase Sync. Card에서 고/저전압을 발생에 맞는 일정한 폭의 펄스 신호를 출력할 수 있도록 하는 기능을 수행한다. 이러한 Zero Crossing Detection Card는 3조의 Zero Crossing 검출회로와 경보회로로 구성되어 있다.

Zero Crossing 검출은 다음과 같은 순서에 의해 이루어진다.

- ① 입력된 높은 전압을 저항을 사용하여 강압한다.
- ② 대역필터를 사용하여 고주파 잡음을 제거한다.
- ③ OP앰프에 의한 전과정류를 수행한다.
- ④ 전과 정류된 신호와 기준 값과의 차를 크게 증폭시켜 디지털화 한다.
- ⑤ OP앰프를 사용하여 파형을 반전시킨다.
- ⑥ 두 개의 단안정회로를 사용하여 Zero Crossing의 고장을 검출하고, MG Set 기동시의 저주파에서 Zero Crossing 출력이 나가지 못하도록 제한한다.
- ⑦ Zero Crossing 출력과 경보신호는 Photo Isolator를 거친 후 출력된다.

3. Phase Sync. Card

Phase Sync. Card는 Zero Crossing 신호를 입력받아 저항과 콘덴서로 구성된 펄스지연회로를 이용하여 일정한 폭의 펄스를 생산한다. Phase Sync. Card에서 만들어진 펄스의 폭은 SCR 및 IGBT의 스위칭 타이밍을 결정하므로, 펄스 폭에 따라 CEDM 코일에 공급되는 전압을 조절할 수 있다. 교류 3상 전원에 대하여 각 상별로 High 및 Low 전압에 필요한 펄스 폭을 설정할 수 있도록 되어 있으며, 한 개의 Phase Sync. Card는 두 개의 CEDM 코일에 공급되는 High와 Low 전압을 설정한다. Phase Sync. Card에서는 잡음의 영향을 줄이기 위하여 모든 논리 소자에 CMOS 소자를 사용하였다.

4. Coil Drive & Actuation Logic Card

Coil Drive & Actuation Logic은 Zero Crossing Card와 Phase Sync. Card에 의해 만들어진 High/Low 전압 제어 펄스를 ACTM의 전압 요구에 따라 선택하여 Power Switching Assembly에 제공하는 기능을 수행하는 회로이다. 또한 ACTM에 이상이 생겨 전압제어출력이 제대로 만들어지지 않을 때 ACTM은 자동적으로 Hold 신호를 발생하며, 이 Hold 신호가 Coil Drive & Actuation Logic Card에 입력되면 ACTM의 전압제어출력에 상관없이 CEDM의 UG 코일에 High 전압을 공급하여 UG 코일의 제어기능을 계속하여 유지한다.

한 개의 Coil Drive & Actuation Logic Card는 두 개의 CEDM, 즉 8개의 CEDM 코일의 전

압을 제어한다. UG 코일에 대한 전압제어신호는 다른 코일과 반대로 코일 전압을 차단하는 신호가 입력될 때만 나가도록 되어 있어 어떤 경우에도 UG 코일에 대한 전압공급이 이루어지도록 되어 있다. UG 코일을 제외한 다른 3개 코일에 대한 전압제어신호는 코일에 전압을 공급하는 신호가 입력될 때 제어신호가 나가도록 되어 있다.

Coil Drive & Actuation Logic은 모두 CMOS소자로 구성되어 잡음에 대한 영향을 줄였고 논리회로에 공급되는 전원은 이중으로 구성하였다.

5. DC Power Switching Assembly

Power Switching Assembly에서는 Coil Drive & Actuation Logic에서 제공된 펄스에 따라 3상 교류 전원을 절개(Chopping)하여 CEDM 코일에 일정한 평균 전압을 공급하고 스위칭 과정에서 발생하는 코일의 역기전력을 완화하여 소자 및 코일에 대한 영향을 줄이는 역할을 한다.

DC Power Switching Assembly에서는 기존의 SCR 방식과 달리 3상 교류전원을 각 상별로 절개하지 않고, 3상 교류전원을 먼저 전파 정류하여 안정된 직류전원을 얻은 다음 IGBT를 사용하여 절개하여 코일에 전압을 공급한다. 3상 교류전원을 정류하여 사용할 경우 입력 주파수의 변화에 관계없이 일정한 전압을 얻을 수 있으며, 3상 전원 중 1개 상이 상실되더라도 계통 운전에는 큰 지장을 초래하지 않는 장점을 가진다. 이를 위해 3상 전원의 중성점(Neutral Point)을 사용하는 3상 전파정류기법을 채택하였다. 이 경우에 3개상의 전류를 합친 전류가 중성점에 위치한 다이오드를 통하여 흐르므로 중성점에는 용량이 큰 다이오드가 사용되어야 한다. DC Power Switching Assembly에서는 3상 전파정류기법을 사용하여 코일 전원을 얻으므로 기존의 SCR 방식에서와 같이 Positive와 Negative로 구분된 별도의 회로를 구성할 필요가 없어 시스템 구성이 단순해지고 유지 보수가 용이하다. 그리고 DC Power Switching Assembly에서는 1개의 IGBT를 사용하여 CEDM 코일에 전원을 공급할 수 있으며, 각 상별로 입력된 스위칭 펄스는 Photo Coupler를 사용하여 합쳐진 후 IGBT에 공급된다. IGBT의 동작에 필요한 직류 전압은 전파정류된 162V 직류전압으로부터 DC-DC Converter를 사용하여 직접 생산한다. 단일 회로를 사용할 경우 IGBT 및 부속회로에 고장이 발생하면 코일에 전원을 공급하지 못한다. 이를 보완하기 위하여 모든 스위칭 회로는 이중으로 구성하였다.

CEDM 코일에 공급되는 전류는 코일에 공급되는 전선의 중간에 설치된 Shunt 저항의 양단 전압을 검출하여 증폭시킨 후 Isolation 과정을 거쳐 0-5V 직류전압으로 제공되고, 패널 상에 설치된 디지털 전압계에 의해 직접 확인할 수 있다.

DC Power Switching Assembly는 각 CEDM 당 1개의 정류 및 power 스위치 모듈과 코일에 전원을 공급하는 4개의 스위칭 모듈로 구성된다.

6. Logic Power Supply Module

ACTM, Zero Crossing Detection Card, Phase Sync. Card, Coil Drive & Actuation Logic Card 등의 동작에 필요한 전압을 공급하며, 고장을 대비하여 Hot-Swap 형태의 이중구조로 되어 있다.

7. CEDM 코일

CEDM 코일은 Gripper 코일과 Lift 코일의 전기적 특성에 약간의 차이가 있으며, 동작 중에 발생하는 열을 제거하기 위하여 냉각장치에 의해 차가운 공기를 코일 주변에 강제로 순환시킨다. 실제 CEDM 코일은 4개의 코일이 적당한 간격을 두고 적층되어 있고, 철심을 구성하는 내부는 매우 복잡한 기계 구조로 구성되어 있으나, Dummy 코일에서는 복잡한 기계구조물 대신에 고정철심의 중심부에 간단한 가동철심을 설치하여 CEDM 코일의 전기적 특성을 유지하도록 하였다. 가동철심은 중력에 의해 아래로 내려가며, 코일에 전압이 인가되면 위로 올라가도록 되어 있다. 또한 가동철심의 양단에는 볼트로 마무리되어 움직임이 제한된다.

CEDM 코일은 동작 중에 많은 열이 발생하므로 코일 보호를 위하여 CEDM 코일의 지지대는 방열판 역할을 할 수 있게 하였고, 코일 Assembly에는 중규모의 냉각팬이 설치되어 강제로 코일에서 발생한 열을 제거하도록 하였다. 코일의 지지구조물에는 커넥터가 설치되어 코일 양단은 내열 성질의 전선으로 커넥터 단자와 연결되어 있다.

IV. 동작 및 성능 확인

출력제어계통 전력 캐비닛의 기능을 확인하기 위하여 동작 시험을 수행하게 되는데, 동작 시험의 절차를 간략히 나타내면 다음과 같다.

- ① 모든 모듈을 캐비닛에서 제거하고 메인 차단기를 ON한 후 논리회로용 전압과 3상 전원의 전압을 확인한다.
- ② 각종 카드가 삽입될 커넥터의 전원 공급 상태를 점검한다.
- ③ Zero Crossing Detection Card를 삽입한 후 출력을 오실로스코프를 사용하여 확인한다.
- ④ Phase Sync. Card를 삽입한 후 패널에 부착된 가변저항을 사용하여 각 코일에 대한 High 및 Low 전압을 결정할 출력 펄스의 폭을 조정한다.
- ⑤ ACTM Card를 삽입하고 Engage Transfer 스위치를 조작하면서 제어출력이 제대로 나오는지 확인한다.
- ⑥ Coil Drive & Actuation Logic Card를 삽입한 후 각 코일의 3상 전압 제어 신호가 나오는지 확인한다.

- ⑦ CEDM 코일 대신에 CEDM Coil Emulator를 Power Switching Assembly에 연결한 후 전류 공급 상태를 관찰한다.
- ⑧ CEDM Dummy 코일을 연결하고 코일의 냉방기를 가동시킨 상태에서 전류 공급 상태를 확인한다.
- ⑨ Prototype이 제대로 동작하면 ACTM과 Maintenance Panel을 연결한다.
- ⑩ 운전원 화면에서 제어봉 삽입 및 인출 신호를 발생시키고 CEDM 코일의 동작이 순서에 맞게 이루어지는지를 확인한다.

V. 결론

차세대원전의 출력제어계통(Power Control System: PCS)은 크게 제어봉구동장치제어계통, 원자로출력조절계통, 원자로출력감발계통, Megawatt Demand Setter로 구성된다. 차세대원자로기술개발 2단계에서는 기존 원전의 제어봉구동장치제어계통의 성능을 향상시키기 위하여 제어봉구동장치제어계통에 대한 Prototype을 개발 중에 있으며, Prototype 개발을 통하여 기존 원전의 제어봉구동장치제어계통을 구성하고 있는 여러 종류의 기기에 대해 성능 개선 작업을 수행하고 있다. 본 논문에서는 차세대원전 출력제어계통 설계에 새롭게 적용하기 위하여 개발중인 전력 캐비닛 Prototype에 대해서 설명하였다. 차세대원전 출력제어계통은 기존원전 제어봉구동장치제어계통에 대해서 여러 가지 설계 변경 사항을 가지는데, 특히 ACTM 카드 경우에는 구성 부품을 향상시키고 통신 기능을 추가하였으며 프로그램 수정 작업도 병행되고 있다. 그리고 전력 소자에 대해서는 기존의 SCR 대신에 IGBT를 사용하여 AC 전원 입력 대신에 DC 전원을 사용할 수 있도록 함으로써 CEDM 코일의 동작 특성이 개선되도록 하였다. 이러한 여러 가지 성능 개선을 통하여 기존 원전에 비해서 차세대원전 출력제어계통의 운전 편의성과 이용률을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 참고 문헌

- [1] ABB-CE, Technical Manual For Control Element Drive Mechanism Control System for UCN 3&4, 1996.
- [2] ABB-CE, Operational Description of Software and Hardware for UCN 3&4 ACTM Description, 1998.
- [3] 이영렬, 제어봉구동장치제어계통의 타이밍 모듈에 관한 연구, 한국원자력연구소, 1995.
- [4] KOPEC, System Design Requirements for Power Control System for KNGR, 1998.

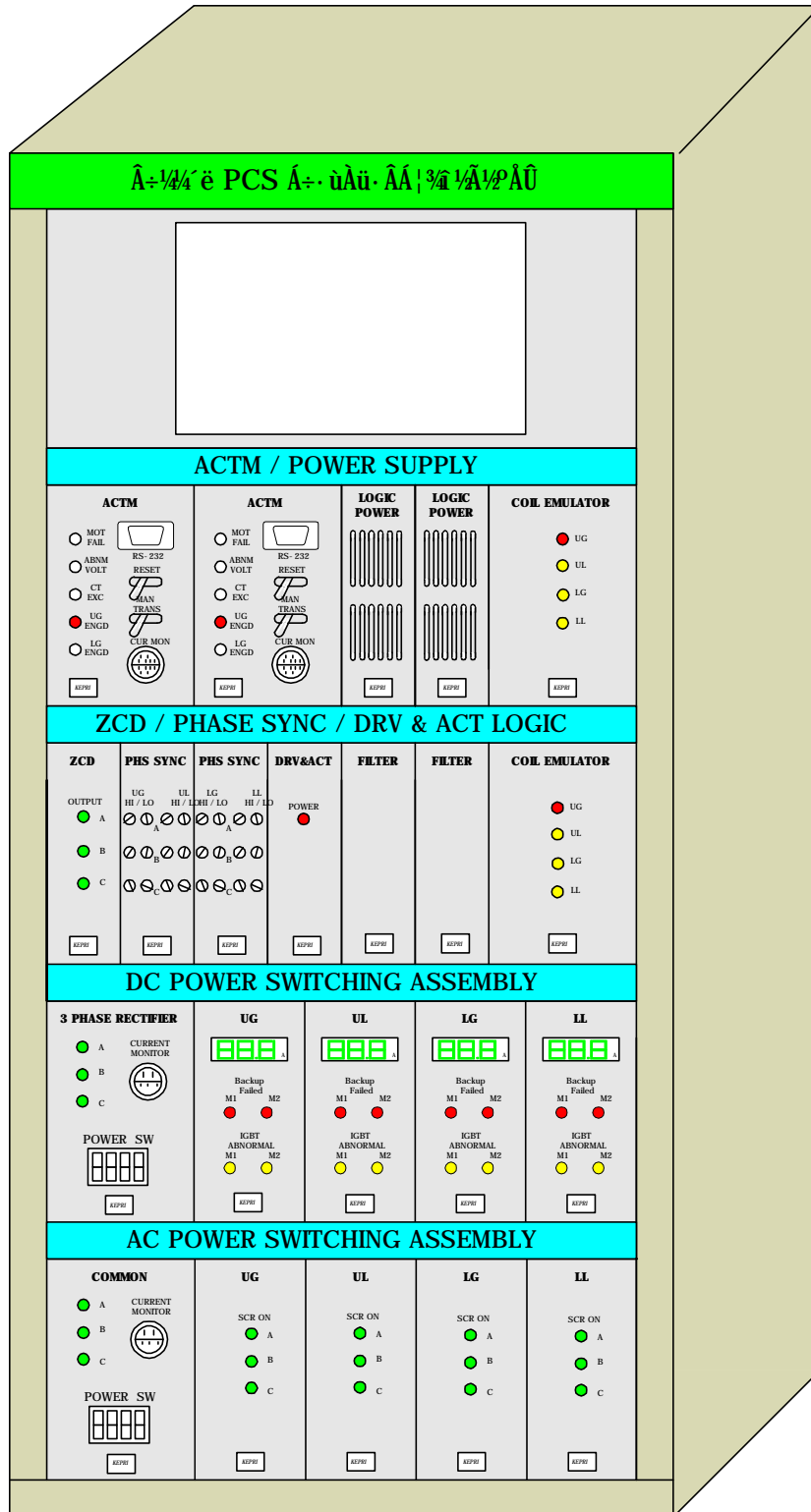


그림 1. 출력제어계통 전력캐비닛 Prototype 구성