

'99 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

**차세대원전 출력제어계통 Prototype 개발**  
**A Prototype of KNGR Power Control System**

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

홍형표, 임형순  
한국전력기술주식회사  
대전광역시 유성구 덕진동 150

**요 약**

차세대원자로 출력제어계통은 원자로 출력을 제어하는 기능을 수행한다. 차세대원자로기술 개발 2단계에서는 기존 원전과 다른 새로운 설계 특성을 적용하기 위하여 Prototype 개발을 수행하였으며 이를 통해서 변경된 설계 특성에 대하여 성능 검증 및 확인 작업을 수행하였다. 본 논문에서는 차세대원자로기술개발 2단계에서 개발한 출력제어계통 Prototype에 대해서 Prototype을 구성하는 주요 기기의 설계 변경 사항을 설명하고, 이들 설계 변경 사항을 확인 하기 위해 수행된 시험 결과를 제시한다.

**Abstract**

The Korean Next Generation Reactor(KNGR) Power Control System(PCS) has adopted new design features which are different from the ones in the 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 prototype. In addition, this paper explains the test results to confirm the advantages of the adopted design features.

## I. 개요

차세대원전의 출력제어계통(Power Control System: PCS)은 크게 제어봉구동장치제어계통, 원자로출력조절계통, 원자로출력감발계통, Megawatt Demand Setter로 구성된다.<sup>[2]</sup> 차세대원자로기술개발 2단계에서는 기존 원전의 제어봉구동장치제어계통의 성능을 향상시키기 위하여 제어봉구동장치제어계통에 대한 Prototype을 개발하였다. 차세대원자로기술개발(II) 단계에서 개발된 출력제어계통 Prototype은 출력제어계통을 구성하는 여러 계통들 가운데 제어봉구동장치제어계통을 선정한 이유는 제어봉구동장치제어계통이 기능적인 측면에서 주요한 기능을 수행하는 계통이고 또한 기존 원전 설계에 대해서 하드웨어적으로 그리고 소프트웨어적으로 많은 개선이 이루어졌기 때문이다. 본 논문에서는 차세대원전 출력제어계통 설계에 새롭게 적용하기 위하여 개발된 Prototype 구성 기기에 대한 설명과 시험 결과를 제시한다.

## II. 출력제어계통 Prototype 기능 및 구성

차세대원자로기술개발(II)단계에서 수행한 출력제어계통 Prototype은 KNGR 출력제어계통의 중요한 기능 및 설계 요건을 적용하고 확인하기 위하여 개발하였다. 출력제어계통 Prototype을 구성하는 기기는 크게 Programmable Logic Controller(PLC)와 Automatic CEDM Timing Module(ACTM) 그리고 DC 전력제어회로로 이루어진다. 이 가운데 PLC는 기존 원전의 제어봉구동장치제어계통의 논리캐비닛의 기능을 수행되고 ACTM과 DC 전력제어회로는 기존 계통의 전력캐비닛의 기능을 수행하게 된다.

### 1. Prototype 논리캐비닛

출력제어계통 논리캐비닛은 PLC와 운전원 연계를 위한 Flat Panel Display로 이루어진다. 그림 1은 논리캐비닛 Prototype 구성을 나타낸 것이다.<sup>[3]</sup>

#### 1.1 Programmable Logic Controller (PLC)

PLC 프로그램은 제어봉구동장치제어계통의 기본적인 알고리즘을 수행하는 부분이다. 기존 원전에서 제어봉구동장치제어계통에 설치되어있는 PLC는 주로 계통 내부에서 사용하기 위한 계산 및 신호 전송이 주요 기능이었다.<sup>[4]</sup> 그러나 차세대 원전에서는 기존 원전과 달리 계통 제어를 위하여 Soft Controller를 사용하고 계통간의 연계 사항도 통신망을 사용하는 개념을 적용함에 따라서 PLC도 기존 원전 PLC에서 수행한 기능 외에 다른 계통과의 연계 기능 및

운전원과의 연계를 위한 제어 및 표시 기능이 강화되었다. 이러한 기능을 수행하기 위하여 Prototype에서는 기존 원전 PLC에서 사용한 Ladder Diagram 대신에 윈도우 기반의 프로그래밍 소프트웨어를 사용하여 Functional Block Diagram으로 PLC 프로그램을 개발하였다. PLC 프로그램은 여러 Section으로 나누어져 있으며, 각 Section은 각각 별도의 기능을 수행하도록 하였다.

PLC에서 수행하는 기능을 간략히 설명하면, PLC는 각 CEA 동작 완료 신호를 받아 각 CEA의 위치를 계산하며, 각 CEA가 동작한 전체 Step 수를 계산하고, 그리고 개별 CEA와 CEA Group 위치값을 계산하여 운전원 화면에 제공한다. 그리고 그룹 운전을 위하여 Upper Group Stop과 Lower Group Stop 그리고 Sequential Permissive 신호를 제공한다.

이러한 기능을 수행하는 PLC는 하드웨어적으로 크게 Controller와 Input/Output 연계 부분으로 나뉘어진다. Controller는 Hot Standby 구조를 가지며 Primary Processor 고장시에 Standby Processor로 전환이 이루어지도록 하였다. 그리고 Controller와 하부의 I/O 모듈간에는 Remote I/O Processor/Interface 모듈을 이용하여 이중의 동축 케이블로 연결하여 전체적으로 단일 고장에 의한 영향을 받지 않도록 구성하였다.<sup>[4]</sup> 그리고 Flat Panel Display과 Controller와의 연계는 Modbus Plus Network를 통해서 이루어지도록 하여 차세대원전의 기본 설계 개념을 만족할 수 있도록 하였다.

## 1.2 Flat Panel Display

Prototype에서 Flat Panel Display(FPD)는 Touch screen display 기능을 가진 PC로 구현되어 있어, KNGR Soft controller에 적용할 수 있도록 개발되었으며, 제어봉구동장치제어계통을 감시하고 제어하는 기능을 수행한다. 개발된 운전원 모듈 프로그램은 상업용 소프트웨어를 사용하여 개발하였으며, 운전원 모듈은 논리캐비닛에 설치된 PLC와 실배선을 이용한 연결대신에 통신 방식을 사용하여 연결함으로써 향후 운전원 모듈의 프로그램 수정이나 확장이 용이하도록 하였다.

개발된 운전원 모듈 프로그램은 모두 세 화면으로 구성하였으며, 두 화면은 원자로에 설치된 제어봉집합체의 위치를 보여주기 위한 것으로 각각 제어봉 위치를 수평 및 수직 방향으로 볼 수 있도록 하였다. 그리고 다른 한 화면은 운전원의 제어 기능을 위한 것이다.

운전원 모듈에서 보여지는 정보 및 제어 가능한 기능은 다음과 같다.

- ① 제어봉구동장치제어계통 운전 모드(Standby, 수동 개별, 수동 그룹, 수동 순차, 자동 순차) 선택 스위치 및 표시
- ② 제어봉집합체 그룹 선택 스위치 및 표시

- ③ 개별 CEA 선택 스위치 및 표시
- ④ Signal bypass 스위치 및 표시
- ⑤ Subsystem 선택 스위치 및 표시
- ⑥ 제어봉집합체 인출/삽입 스위치 및 표시
- ⑦ 선택된 제어봉집합체 위치 표시
- ⑧ 선택된 제어봉집합체 그룹 위치 표시

## 2. Prototype 전력캐비닛

전력캐비닛은 논리캐비닛으로부터 제어봉집합체의 인출 또는 삽입 명령을 받아 정해진 순서에 따라서 Control Element Drive Mechanism(CEDM) 코일에 전압 공급을 순차적으로 공급하여 제어봉집합체의 동작이 가능하도록 하는 기능을 수행한다. 이러한 기능을 수행하기 위하여 전력캐비닛은 FPD, ACTM 카드, Zero Crossing Detector(ZCD) 카드, Phase Sync 카드, Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)를 이용한 전력 스위칭 카드로 구성하였다. 그림 2는 전력캐비닛 Prototype 구성을 나타낸 것이다.<sup>[5]</sup>

### 2.1 ACTM 카드

ACTM 카드는 Microprocessor를 기반으로 하는 제어 모듈로서, CEDM 코일에 가해지는 전류의 파형을 감시하고 해석하여 제어봉집합체의 기계적 동작이 이루어졌는지를 확인하고, 제어봉의 인출 또는 삽입이 정상적으로 수행될 수 있도록 정해진 순서대로 CEDM 코일에 전력이 공급 되도록 하는 기능을 수행한다. 그리고 동작중에 계속적으로 CEDM 코일에 가해지는 전류 파형을 감시하여 이상 상태가 발생한 경우에는 정해진 복구 동작을 수행한다. 그리고 논리캐비닛내에 장착된 PLC에서 제어봉의 위치를 계산할 수 있도록 제어봉집합체의 한 스텝 동작이 완료되었을 때 동작 완료 신호를 PLC에 제공한다. 이러한 기능을 수행하는 ACTM 카드는 기존 원전 CECMCS의 ACTM 카드에 비해서 다음과 같은 개선된 기술을 적용하였다.<sup>[6]</sup>

- ① 8비트 마이크로프로세서인 Intel의 8085 대신에 16비트인 AMD사의 AM188EM을 사용하여 프로그램의 처리속도를 크게 향상시켰다.
- ② 프로그램 및 데이터 저장에 사용되는 기억소자를 기존 8k바이트에서 128k바이트로 늘렸다.
- ③ 프로그램 저장을 위해서 기존의 EPROM 대신에 차세대 기억 소자인 Flash 메모리를 사용하여, 소프트웨어의 처리 알고리즘 개선 및 기능 추가를 용이하게 하였다.

- ④ 통신 네트워크에 의한 중앙집중식 On-line 정비가 가능하도록 하기 위하여 직렬통신기능을 추가하고 자기진단기능을 강화하였다.
- ⑤ 기존 원전의 CEDM Coil 전류 측정 방식을 Hall effect sensor에서 Shunt 저항으로 변경하였다.
- ⑥ 기존 PCB 형태의 단점을 개선하여 소형의 알루미늄 모듈 케이스에 내장시켜 삽입 및 제거가 용이하도록 하였고, 전자파 차폐 효과를 도모하였다.

## 2.2 DC 전력제어회로

Prototype의 DC 전력제어회로는 Logic power supply 카드, Zero crossing detector, Phase sync. 카드, Coil drive & actuation 카드, IGBT를 이용한 전력 스위칭 카드로 구성되어 있다.

Zero crossing detector와 Phase sync. 카드는 IGBT를 사용한 전력 스위칭 카드를 위한 Pulse Width Modulation clock 발생 장치로 사용된다. Coil drive & actuation 카드는 ACTM에서 출력하는 전압제어신호에 따라서 적절한 스위칭 펄스를 선택하는 논리 회로이다.

Prototype에서 DC 전력제어회로에 적용된 개선된 기술은 다음과 같다.

- ① 전력 스위칭 기기를 Silicon Controlled Rectifier(SCR)에서 IGBT로 대체하였다. IGBT를 사용함으로써 구동 전력에 포함된 노이즈의 감소시킬 수 있으며, 전원 주파수의 변동에 따른 영향을 최소화할 수 있다.
- ② 전력제어회로를 이중화하여 하나의 부품의 고장이 발생하더라도 정상적인 운전이 가능하도록 하였다.
- ③ IGBT의 비정상 상태 및 다중화 기능의 상실을 표시할 수 있도록 하였다.
- ④ 전력 스위칭 카드 전면에 디지털 전류계를 설치하여 현재 코일에 흐르는 전류를 확인할 수 있도록 하였다.
- ⑤ 기존의 Hall effect sensor 대신에 Shunt 저항을 사용하여 코일에 흐르는 전류 신호가 ACTM 카드에 입력되도록 하였다.
- ⑥ 계통의 상태를 감시하고 시험하고 문제를 해결하기 위하여 Maintenance & Test Panel을 설치하였다.

## 2.3 Maintenance and Test Panel

Prototype에서는 전력캐비닛에 Maintenance and Test Panel을 설치하였다. 이 Panel은 전력캐비닛에 설치되어 있는 ACTM 카드와 DC 전력제어회로의 상태를 감시하고 시험하며, 고장 등이 발생하였을 때 충분한 정보를 제공하여 고장 조치를 쉽게 할 수 있도록 하는 기능을

제공한다. 이 Panel은 Touch screen 기능을 가진 PC로 되어있으며, 16 채널의 아날로그 입력과 8개의 디지털 입력 포트를 가진 Data acquisition 카드를 설치하여, ACTM 카드를 감시하고 제어하며 PLC와 통신할 수 있는 기능을 제공한다. 개발된 Panel에서 제공하는 정보 및 제어기능은 다음과 같다.

① 출력제어계통 DC 전력 제어 시험 화면

이 화면에서는 ACTM의 주요 출력 신호를 표시하고 ACTM을 수동으로 제어하기 위한 스위치를 제공한다.

② ACTM 자기진단 화면

이 화면에서는 ACTM의 전반적인 상태와 디지털 입력/출력 상태 그리고 A/D 변환값을 표시한다.

### 3. 기타 장비

Prototype에서는, 실제 CEDM을 사용할 수 없었기 때문에 실제 CEDM을 모사할 수 있도록 CEDM Coil assembly를 사용하였다. 하나의 CEDM 동작을 모사하기 위하여 모두 4개의 CEDM Coil Assembly - Upper Gripper(UG) coil, Upper Lift(UL) coil, Lower Gripper(LG) Coil, Lower Lift(LL) coil - 가 필요하다. 이를 위하여 실제 CEDM Coil과 같은 전기적 특성을 가지는 CEDM Coil assembly를 제작하였다.

## III. 시험 및 결과

차세대원자로기술개발(II) 단계에서는 출력제어계통 Prototype을 개발하고, Prototype을 구성하는 주요 기기, 즉 PLC, ACTM, 그리고 DC 전력제어회로와 프로그램의 기능을 확인하기 위한 시험을 수행하였다.

### 1. Programmable Logic Controller

PLC에 대해서는 프로그램을 구성하는 각 Section 별 기능에 대한 시험을 수행하였으며, PLC의 Scan time, 계통 내부 네트워크(Modbus Plus) 성능, 그리고 운전원 모듈과의 정보 제공 및 제어 신호 전달 기능에 대한 시험을 수행하였다. 시험 결과 개발된 프로그램 및 PLC 기능 수행에는 문제가 없는 것으로 확인되었다. 단, PLC 프로그램 개발 소프트웨어가 온라인 상태에 있을 때 네트워크 연결이 불안정한 현상이 발견되었으나, 실제 발전소 운전에서는 PLC 프로그램 개발 소프트웨어가 온라인 상태로 사용되지 않으므로 문제가 없을 것으로 판단

된다.

## 2. Automatic CEDM Timing Module

개발된 ACTM의 기능을 확인하기 위하여, 제어봉집합체의 삽입/인출 순서 제어, CEDM 코일에 흐르는 전류를 감시하고 그 결과에 따른 동작 수행, Maintenance & Test Panel에서의 자기진단기능, Shunt 저항을 이용한 Coil 전류 측정 기능을 시험하였다. 이러한 시험은 DC 전력제어회로와 함께 개별적으로 수행되었다. 시험을 수행한 결과, ACTM은 설계 요건대로 제어봉집합체 인출 및 삽입 기능을 수행하는 것을 확인하였으며, Maintenance & Test Panel을 통해서 ACTM의 자기진단 결과 및 동작에 대한 충분한 정보를 확인할 수 있었다. 그리고 Shunt 저항으로부터 검출된 CEDM 코일 전류가 DC 전력제어회로에서 증폭되어 ACTM 카드로 입력되어 동작이 수행됨을 확인하였다. 차세대원자로기술개발(II) 단계에서는 ACTM Prototype 개발을 통해서 새로운 개념 및 기능을 구현하였으며, (II)단계에서는 이러한 기능을 확인하는데 중점이 주어졌다. 그 외에 ACTM의 신뢰도 및 성능 등은 계속적으로 검증이 수행되어야 할 것이다.

## 3. DC 전력제어회로

Prototype에서 개발된 DC 전력제어회로의 기능을 시험하기 위하여, CEDM 코일에 흐르는 전류 파형을 검출하고, IGBT 동작 특성 시험, IGBT 회로 보호 기능 확인, 구동 전원의 전압 및 주파수 변동에 따른 코일 전류 영향을 확인하고, 회로의 이중화 기능 확인, Shunt 저항을 이용한 CEDM 코일 전류 검출, 원자로출력감발 기능 및 원자로 트립에 따른 동작을 확인하기 위한 시험을 수행하였다. 시험 결과 IGBT를 기반으로 하는 DC 전력제어회로는 설계 요건대로 ACTM의 전압제어신호에 따라서 네 개의 CEDM 코일에 안정적으로 일정한 전력을 공급하는 것으로 확인되었다. 그리고 IGBT는 비정상 조건에서 그 상태를 표시하고 IGBT 보호 기능이 정상적으로 동작하였다. 입력 전원의 전압 및 주파수가 변경되는 경우에 코일 전류는 입력 전류와 전압에 비례하는 것으로 나타났다. 이중화된 회로에서 하나의 회로가 상실된 경우에도 정상적인 운전이 가능하며 이상 상태가 표시되었다. Shunt 저항을 사용하여 전류값을 측정한 결과 Shunt 저항 양단에 걸리는 전압에 비례하여 전류값이 출력되며 Isolation 요건도 만족함을 확인하였다. 그리고 원자로출력감발 동작 신호나 원자로 트립 신호가 입력되는 경우 설계 요건대로 CEDM 코일에 가해지는 모든 전력이 차단됨을 확인하였다.

#### IV. 결론

차세대원전의 출력제어계통(Power Control System: PCS)은 크게 제어봉구동장치제어계통, 원자로출력조절계통, 원자로출력감발계통, Megawatt Demand Setter로 구성된다. 차세대원자로기술개발(II) 단계에서는 기존 원전의 제어봉구동장치제어계통의 성능을 향상시키기 위하여 제어봉구동장치제어계통에 대하여 PLC를 이용한 논리캐비닛과 ACTM과 DC 전력제어회로를 이용한 전력캐비닛 Prototype을 개발하였다. 출력제어계통의 Prototype 개발을 통하여 기존 원전의 제어봉구동장치제어계통을 구성하고 있는 여러 종류의 기기에 대해 성능 개선 작업을 수행하였으며, 새롭게 적용된 기술이 출력제어계통의 성능 요건을 충분히 만족할 수 있음을 시험을 통하여 확인하였다. 출력제어계통 Prototype 개발을 통해서 계통에 새롭게 적용된 기술은 기존 원전의 제어봉구동장치제어계통에 비해서 차세대원전 출력제어계통의 운전 편의성과 이용률을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### V. 참고 문헌

- [1] ABB-CE, Technical Manual For Control Element Drive Mechanism Control System for UCN 3&4, 1996.
- [2] KOPEC, System Design Requirements for Power Control System for KNGR, 1998.
- [3] KOPEC, Design Report for Power Control System for KNGR, 1999.
- [4] 박현신, 박종범, 양승권, 정학영, "PLC를 이용한 출력제어계통 논리 캐비닛 개발", '98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp772-774, 1998.
- [5] 박현신, 양승권, 정학영, 홍형표, "차세대원전 출력제어계통 전력 캐비닛 Prototype 개발", '98년도 대한전기학회 추계학술발표회 요약집, pp 86, 1998.



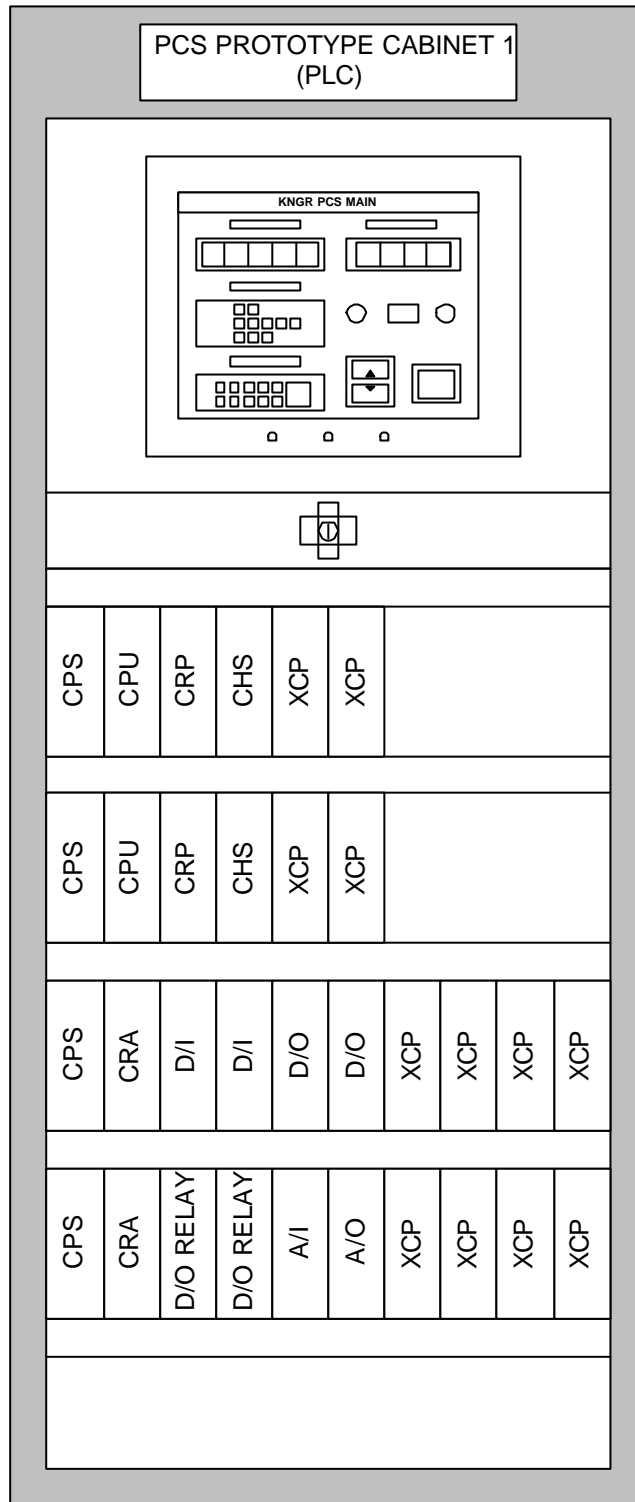


그림 1. 출력제어계통 Prototype 논리캐비닛 구성도

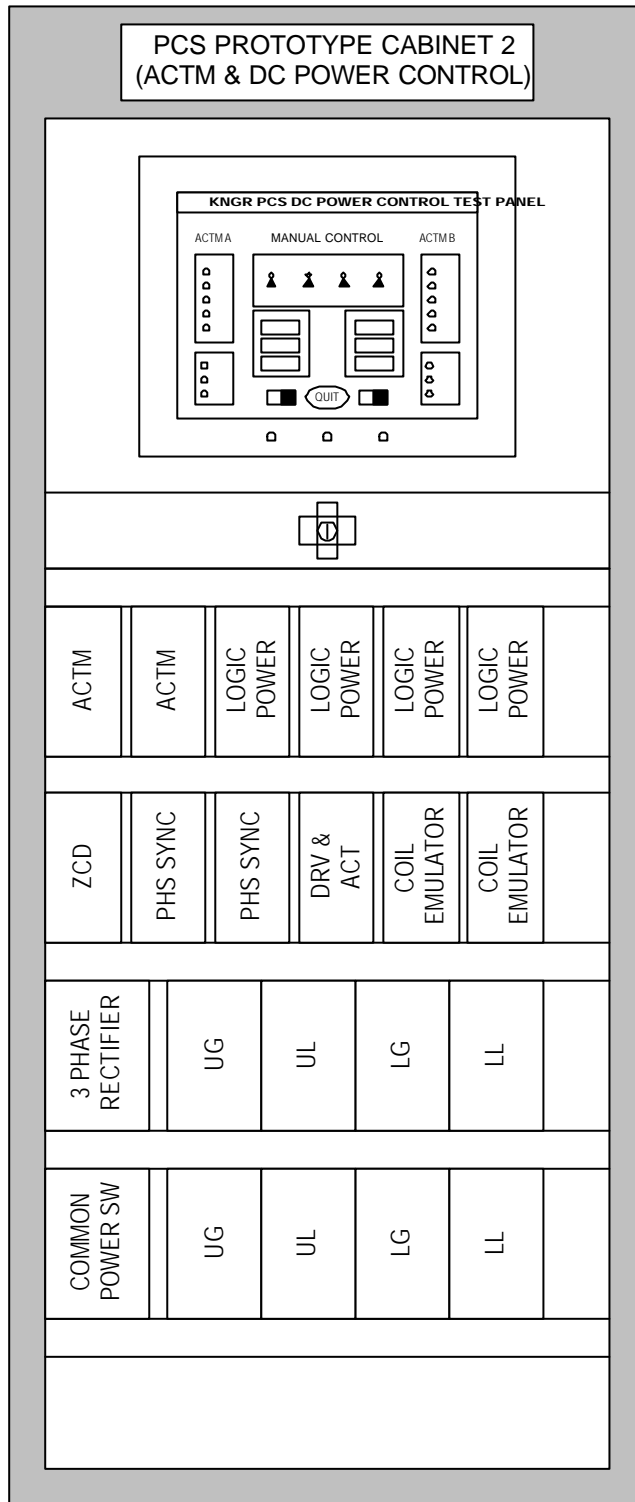


그림 2. 출력제어계통 Prototype 전력캐비닛 구성도