

### CEDM 구동용 전력변환회로 설계 검토

이 중무, 김 춘경, 천 종만, 박 민국, 권 순만  
한국전기연구원

### Design Review of A Power Converter Topology for CEDM Driving

J.M. Lee, C.K. Kim, J.M. Cheon, M.K. Park, S.M. Kwon  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - This paper deals with the design review of a power converter topologies for CEDMCS (Control Element Drive Mechanism Control System). The CEDMCS provides the control signals and motive power to operate the CEDMs. The CEDM's raise and lower the CEAs (Control Element Assemblies) in the reactor core. The CEAs are constructed with the Boron-10 isotope which has a high microscopic cross section of absorption for thermal neutrons. This characteristic causes the addition of negative reactivity when a CEA is inserted and positive reactivity when it is withdrawn from the reactor core.

#### 1. 서 론

국내 원자력 발전의 역사는 1978년 고리 1호기 원전을 시작으로 현재 20기가 운용되고 있다. 이들 중 경수로형 원전은 16기로서 주로 초기에 도입된 8기는 중성자를 흡수하여 핵반응도를 제어하기 위한 제어봉 흡수체를 구동하는 Magnetic Jack 형태의 Actuator가 3 Coil형의 CRDM (Control Rod Drive Mechanism) 이고, 나중에 도입된 8기는 한국표준형 원전으로서 4 Coil형의 CEDM이 Actuator로 설치되어 있다. 본 논문에서는 4 Coil형의 CEDM을 구동하기 위한 여러 가지 형태의 전력변환 회로들에 대한 장단점을 비교 검토하여 가장 적합한 전력변환 회로를 선정하여 원자로 출력제어계통(PCS, Power Control System)의 국산화 개발에 활용하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 대상 플랜트 검토

국내의 경수로형 원전 중 CEDM을 Actuator로 채용하고 있는 발전소와 전기적 출력 용량, CEDM 수 및 상업운전 개시일은 표 1과 같다.

〈표 1〉 대상 플랜트 검토

발전소명	호기명	용량[MWe]	CEDM 수	상업운전일
영광 원전	3호기	1,000	73	1995. 3.31
	4호기	1,000	73	1996. 1. 1
	5호기	1,000	73	2002. 5.21
	6호기	1,000	73	2002.12.24
울진 원전	3호기	1,000	73	1998. 8.11
	4호기	1,000	73	1999.12.31
	5호기	1,000	73	2004. 7.29
	6호기	1,000	73	2005. 4.22

##### 2.2 원자로 출력제어계통이란 ?

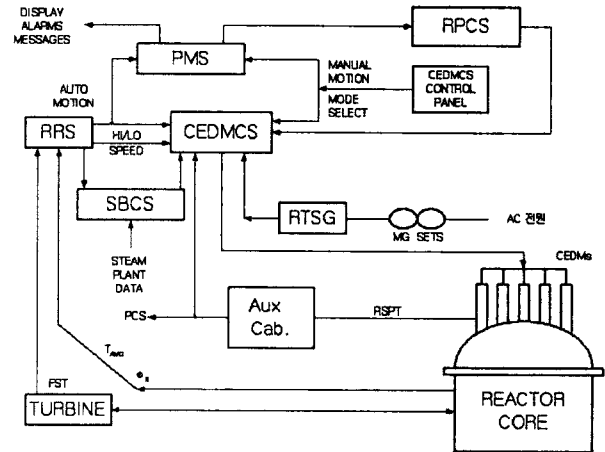
원자로 출력제어계통이란 그림 1에 나타난 바와 같이 차세대 원전인 APR-1400에 처음 도입된 용어로서 표준형 원전에서의 CEDMCS 계통, RPCS (Reactor Power Cutback) 계통, AUX Cabinet 계통 및 RRS (Reactor Regulating System) 계통을 포함하는 것이다.

RRS 계통은 터빈 출력과 원자로 냉각수 온도를 비교하여 원자로 내의 핵반응도를 증감하기 위한 명령을 CEDMCS 계통으로 출력한다.

CEDMCS 계통은 RRS 계통으로부터 혹은 운전원으로부터 핵반응도 증감 방향과 속도 명령을 받아서 CEDM을 구동하는 신호를 출력한다.

RPCS 계통은 터빈 부하의 Trip이나 급감발 시 원자로 내의 핵반응도를 급격히 줄여서 원자로 출력과 터빈 출력의 균형을 유지하기 위하여 미리 선택된 Regulating Group의 CEA들을 원자로 내로 낙하시켜기 위한 계통이다.

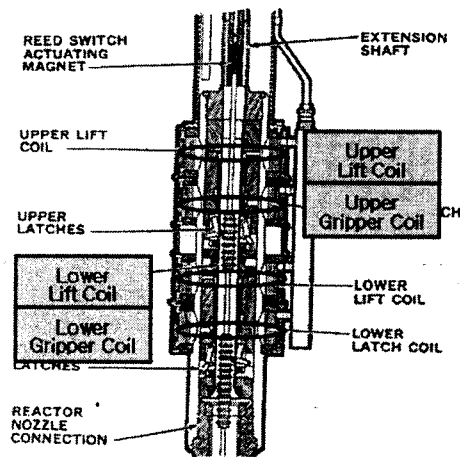
AUX Cabinet은 CEDM의 RSPT (Reed Switch Position Transmitter)와 관련된 신호들을 CEDMCS 계통에 전달하기 위한 캐비닛이다.



〈그림 1〉 원자로 출력제어계통 구성도

##### 2.3 CEDM 구조

Magnetic Jack 형식의 CEDM 구조도를 그림 2에 나타낸다. CEDM은 크게 Upper Coil 부와 Lower Coil 부로 구성되어 있으며, 각각은 다시 Lift Coil부와 Gripper Coil 부로 구성되어 있다. CEDM의 일련의 동작에 의해서 제어봉 구동축을 한 스텝씩 위아래로 구동시킬 수 있으며, CEA는 구동축에 연결되어 있고, 구동축에는 한 스텝에 해당하는 3/4 인치 간격으로 홈이 만들어져 있다.



〈그림 2〉 CEDM 구조도

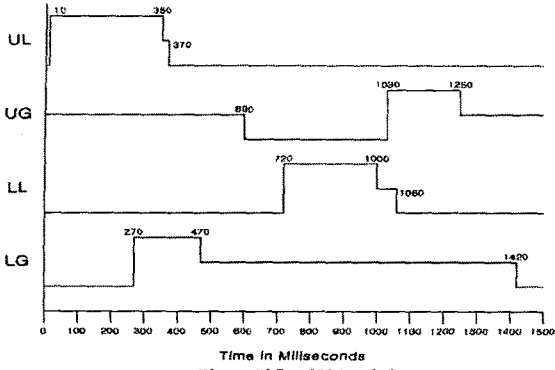
##### 2.4 CEDM 구동 원리

###### 2.4.1 인출 시퀀스

제어봉 구동장치를 한 스텝 인출하기 위해서는 UL, UG, LL, LG 코일에 그림 3에 나타난 바와 같은 시퀀스로 전압 혹은 전류를 인가하면 된다. 그림에서 횡축은 시간을 나타내고 종축은 전압 혹은 전류의 크기를 나타낸다. 제어봉 구동장치가 한 스텝을 동작시키는데 소요되는 시간은 1,500ms 이고, 제어봉의 구동 속도 조절은 각 스텝 동작 사이의 휴지시간으로 조절한다.

CEDM에 인가하여야 할 전압 혹은 전류의 크기는 제어봉 구동장치의 전기 및 기구적인 사양과 밀접한 관련이 있다.

CEA WITHDRAWAL TIMING SEQUENCE

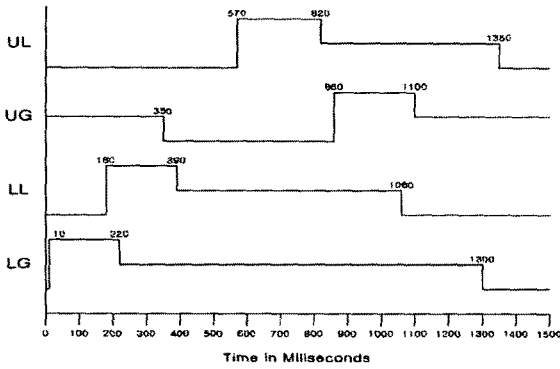


<그림 3> 인출 시퀀스 명령

2.4.2 삽입 시퀀스

제어봉 구동장치를 한 스텝 삽입하기 위해서는 UL, UG, LL, LG 코일에 그림 4에 나타낸 바와 같은 시퀀스로 전압 혹은 전류를 인가하면 된다.

CEA INSERTION TIMING SEQUENCE



<그림 4> 삽입 시퀀스 명령

2.5 CEDM 구동용 전력변환 회로 검토

CEDM을 구동할 수 있는 전력변환 회로의 형식은 다양하게 있을 수 있지만 본 논문에서는 기존 CEDMCS에서 채용하고 있는 3상 반파 제어정류기와 1상한 쇼퍼 및 2상한 쇼퍼에 국한 시켜서 검토하기로 한다.

2.5.1 3상 반파 제어정류기 회로

3상 반파 제어정류기를 적용하면 Coil 회로 하나당 필요한 싸이리스타의 수량이 3개이다. 기본적으로 반파 정류를 활용하기 때문에 중성점 전류가 흐른다는 단점을 가지고 있다.

기존 CEDMCS에서는 Open Loop 전압제어를 하고 있으며, 전압 혹은 전류의 감소시 Coil 회로에 축적된 에너지를 빨리 소비시키기 위하여 Freewheeling 회로 및 방전용 저항을 필요로 한다. 방전용 저항의 크기는 CEDM의 전기 및 기구적인 사양과 밀접한 관련이 있다.

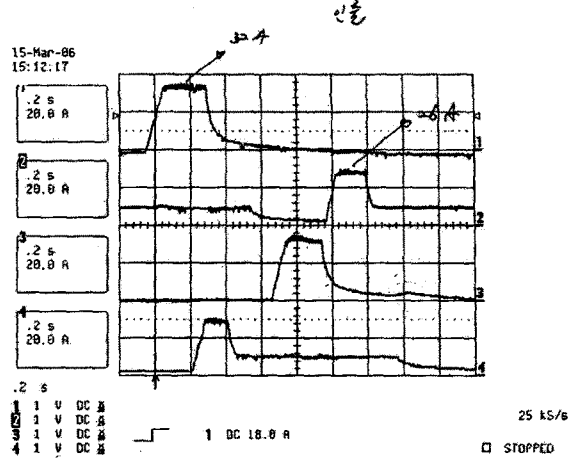
2.5.2 1상한 쇼퍼 회로

CEDM을 구동하기 위해서 3상 반파 제어정류기에서 언급한 중성선 전류의 단점을 극복하기 위해서는 3상 전파 정류기로 DC 전압으로 변환하여 사용하는 방안이 있다. DC 전압을 이용하여 CEDM을 구동하기 위한 회로로서 가장 간단한 1상한 쇼퍼를 기본적으로 고려할 수 있다. 1상한 쇼퍼 적용시 Open Loop 전압제어의 문제점을 해소하기 위하여 Closed Loop 전류제어를 적용하는 것으로 한다. 1상한 쇼퍼 역시 Coil의 전류 감소시 Freewheeling 회로 및 방전용 저항을 필요로 한다. 그러나 3상 반파 제어정류기와는 달리 1상한 쇼퍼의 경우 매 스위칭 Off시 마다 전류가 방전회로를 거치므로 아주 큰 용량의 방전 저항을 필요로 한다. 따라서 1상한 쇼퍼의 경우 필요한 스위칭 소자 수는 감소시킬 수 있으나 방전용 저항의 발열 문제가 새로운 단점으로 대두된다.

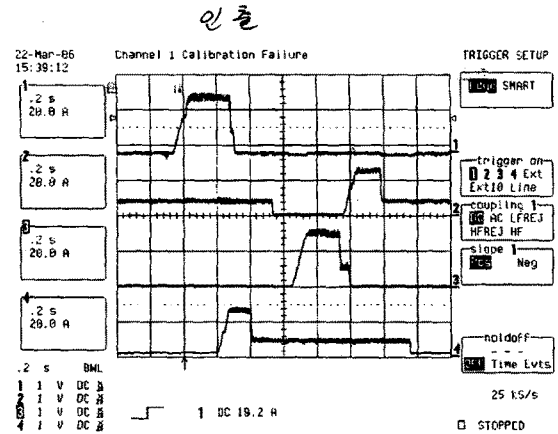
1상한 쇼퍼로 CEDM을 인출할 때의 각 Coil의 전류파형을 그림 5에 나타낸다. 그림 5는 발열문제를 제거하기 위해 방전저항을 영으로 하였을 때의 파형으로서 그림에서는 알 수 없지만 코일의 전류가 빨리 방전되지 못하기 때문에 CEDM이 정상적으로 인출되지 않는다.

2.5.3 2상한 쇼퍼 회로

위에서 언급한 1상한 쇼퍼의 문제점을 해소하기 위하여 비록 스위칭 소자 수는 2배로 필요하지만 2상한 쇼퍼가 대안으로 떠오른다. 2상한 쇼퍼로 CEDM을 인출할 때의 각 Coil의 전류파형을 그림 6에 나타낸다. 그림 6에 나타나 있는 것처럼 전류가 빨리 감소함으로써 CEDM이 정상적으로 인출된다.



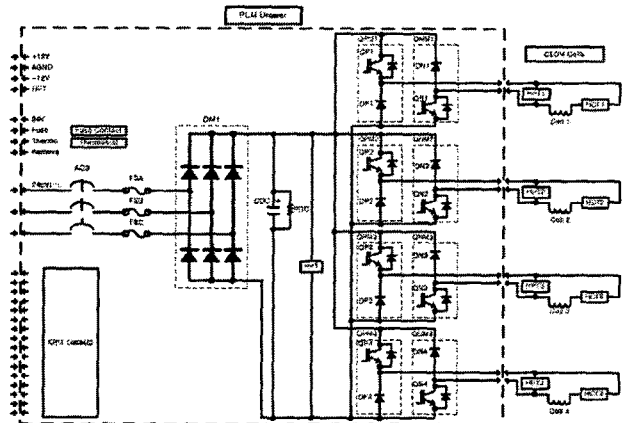
<그림 5> 1상한 쇼퍼로 CEDM 인출시 코일 전류 파형



<그림 6> 2상한 쇼퍼로 CEDM 인출시 코일 전류 파형

3. 결 론

차세대 원전인 APR-1400용 PCS로 개발 중인 제어봉 구동장치 제어시스템은 위에서 언급한 2상한 쇼퍼를 채용하고 있다. 시스템의 단일 고장 요건과 유지보수성 등을 설계 입력자료로 고려하여 CEDM의 UL Coil 4회로용으로 개발하고 있는 단위 전력변환 회로는 서랍형 구조로서 그림 7에 나타낸 바와 같다. UG, LL 및 LG 회로도 전기 및 기구적으로 동일하다.



<그림 7> 2상한 쇼퍼로 CEDM 인출시 코일 전류 파형

[참고 문헌]

[1] ABB Combustion Engineering Inc., "Technical Manual for Control Element Drive Mechanism", Volume 1, 1995