

# 인천화력 4호기 발전기용 주/부 제어기를 갖는 정지형 여자시스템 개발

류호선, 임익현  
전력연구원

## Development of Generator Excitation System with Main/Standby Controller in In-chun Thermal power plant #4

Ho-Seon Ryu, Ik-Hyun Lim  
KEPRI

### Abstract

Potential-source controlled rectifier excitation system had been developed for synchronous generator in In-Chun thermal power plant #4 by KEPRI. This paper describes the characteristics of Main/Standby control system employed analog, digital circuit devices ( hybrid type ) and 3 PCR's(Phase Controlled Rectifier).

### 1.서론

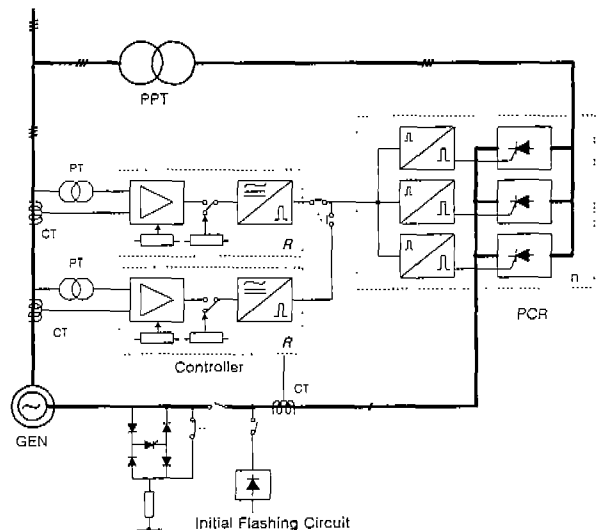
전력전자 및 계측제어 기술의 발전과 더불어 발전 제어설비 분야에서의 국산화 개발이 활발히 진행되고 있으며, 발전제어 설비중 동기발전기 여자시스템도 점차 대형화 되어가고 있다. 현재 여자시스템은 소형 전력제어에서 대형전력제어로 바뀌어 가고 있으며 제어기도 신뢰성이 높은 이중화, 삼중화된 시스템으로 교체되고 있다. 회전형 교류여자시스템이 영구자석 발전기, 여자기 등이 터빈축에 직결되어 나온 교류전력을 제어하여 발전기 전압을 제어하는데 반해서 정지형은 회전부분이 없이 자기 발전기 출력단에서 여자용 변압기를 통해서 전압을 강압한 후 사이리스터 컨버터에서 위상제어하여 필요한 발전기 계자 전류를 공급하여 발전기 전압을 제어하는 방식으로 대형전력제어이다. 전력연구원이 개발한 시스템이 갖는 이중화 정지형 여자시스템의 제어방식은 주/부제어기를 사용하여 주제어기가 이상이 발생하였을때 주제어기에서 부제어기로 자동절체되는 제어를 하고 있다. 각각의 제어는 독립적으로 수행이 가능하도록 설계되어 있고 그 기능은 자동전압제어 (AVR:Automatic Voltage Regulator), 수동전압제어 (MVR:Manual Voltage Regulator), 자동역률제어(APFR:Automatic Power Factor Regulator), 자동무효전력제어(AQR:Automatic Power Regulator) 등으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 이중화 주/부제어방식의 특징과 각종 조절제어기능 그리고 3병렬 컨버터 특징 뿐만 아니라 실제통에 적용되었을 때의 제어기능이 만족하

는지 스템응답을 실시하여 확인었다.

### 2.본론

#### 대형 발전기용 정지형 여자시스템

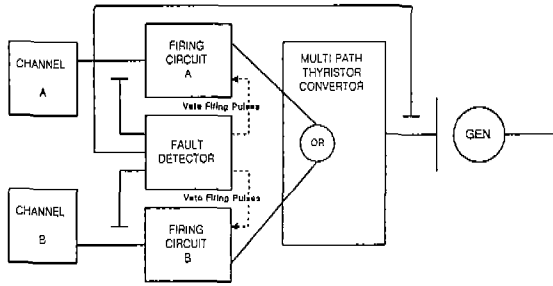
직접여자 형태의 정지형 여자제어시스템은 [그림 1]에서 보는 바와 같이 발전기 출력단자로부터 여자 변압기를 통하여 여자전원을 공급받으며, 제어정류기에 의해서 제어된다. 일부 보조 모선으로부터 변압기를 사용하여 공급받을 수도 있으나 주로 발전기의 단자로부터 여자용 전원을 인가 받고 있다. 여자변압기를 통하여 여자 전원을 공급받음으로서 발전기의 응답속도가 상당히 빠르다. 제어 방법은 자동제어와 수동제어로 구분되어 있으며 정상 운전 상태에서는 자동제어로 운전된다. 자동제어를 위해서는 변성기(PT)와 변류기(CT)를 통하여 단자 전압과 부하 보상 계 환신호를 입력받아 자동제어 설정기와 비교하여 발전기 단자전압을 제어하여 발전기의 무효전력을 제어하도록 동작된다.



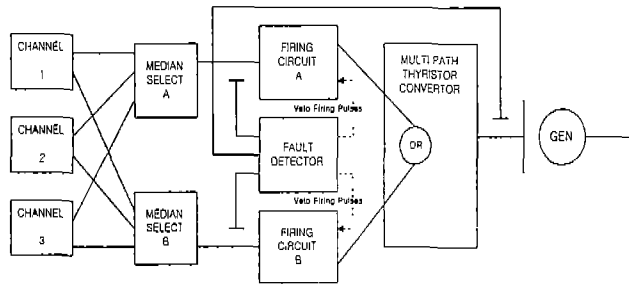
[그림 1] 인천화력 4호기에 적용된 정지형 여자시스템 개략도

### 2중화와 3중화제어방식의 특징

2중화 제어기는 [그림 2]에서 나타난 것과 같이 주 제어기로 동작하는 채널이 정상적인 제어를 하고 있는지 감시하는 부분이 독립적으로 설치되어 있다. 이런 시스템은 각각의 채널이 대칭적으로 구성되어 있을 때 양채널의 비교감시가 용이하고 복잡한 시스템 보다는 간단한 시스템에 주로 사용되고 있다. [그림 3]은 3중화 제어 시스템을 나타낸 것으로 3개의 채널의 제어신호를 평균화한후에 다시 2중화 형태의 제어를 하고 있다. 이런 시스템은 독립적인 2중화 제어보다 제어 성능은 떨어지나 다중제어로 시스템의 신뢰도는 우수하다. 또한 제어시스템이 복잡하고 제품 생산시에 가격이 2중화 제어보다 비싸다는 것이 단점이다.



[그림 2] 2중화 제어블럭도

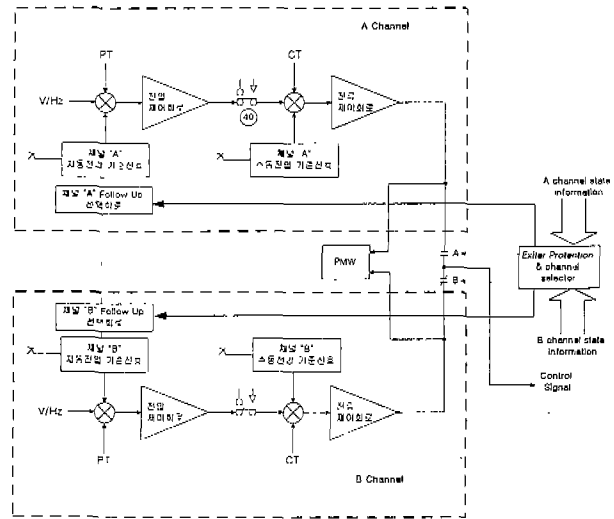


[그림 3] 3중화 제어블럭도

### 주/부 이중화 PWM 제어기

발전기 출력단자 전압을 자동조절하는 여자시스템의 신뢰도 향상을 위하여 이중화 자동추종 방식이 주로 채택되고 있다. 추종 형태의 이중화 시스템은 주 제어기가 전체 시스템의 제어를 담당하고 주 제어기에 고장이 발생하였을 경우 주 제어기의 제어신호를 추종하던 부제어기가 주 제어기로 전환되어 운전하는 방식이다. 주 제어기로 지정되어 운전중인 제어기를 자동 추종하는 부제어기는 추종시간의 설정치가 부적절한 경우가 많아 주 제어기의 이상 신호 발생시에 추종되고 있는 부제어기도 그 이상 신호를 빠른 시간에 추종하는 경우가 종종 발생하는 경우가 있는데, 이런 현상을 막기 위하여 디지털 회로에서는 N차 지연함수를 추가하여 사용하여 왔고 아날로그 회로에서는

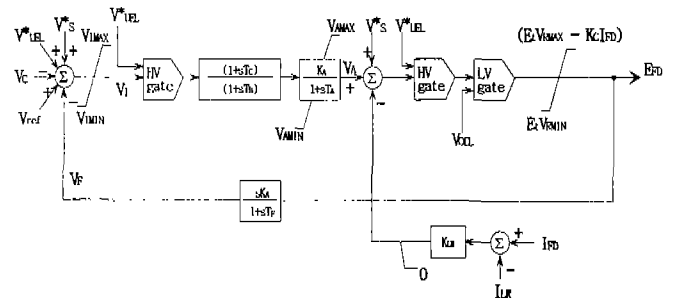
저항, 콘덴서 시정수를 이용하여 지연시켜 왔다. 그러나 지연시간의 수정시에 제어카드를 교체하여야 하는 번거로움이 있어 추종되고 있는 부제어기의 추종시간의 선정이 자유로운 시스템이 필요하여 PWM제어 회로를 추종제어에 사용함으로써 추종시간의 선택 폭을 자유롭게 함은 물론, 카드의 교체 없이 수정이 가능할 수 있게 하였다.



[그림 4] 주/부 제어기 블럭도

### AVR/MVR(자동전압제어/수동전압제어)

자동전압제어는 발전기의 운전 상황의 변화에도 불구하고 주어진 참조값에 일치하도록 단자 전압(0.9~1.1 PU)을 자동으로 조절하는 역할을 한다. 자동전압 조절기의 형태는 고전적인 PI제어기가 주로 쓰이고 있으며 개환된 발전기의 단자전압과 자동전압 조절기용 참조치의 출력과 비교하여 제어를 위한 편차 신호를 발생하여 여러 제한기를 거쳐 SCR(Silicon Controlled Rectifier)을 점호하기 위한 값으로 사용된다. 수동전압 조절기는 주로 AVR의 고장시 또는 각종 시험을 위하여 사용되는 일종의 Backup 제어기로서 사용되며 발전기 단자전압 대신 계자 전압 또는 계자전류를 궤환신호로 사용하고 있다.



[그림 5] IEEE ST1A

싸이리스터 직접여자방식 전달함수모델

**AQR/APFR (자동무효전력제어/자동역률제어)**

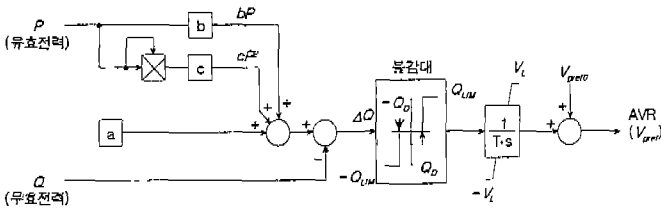
**AQR (자동무효전력제어)**

전력계통이 대형화와 복잡화가 됨에 따라 발전기의 AVR 운전에 수요단의 전압을 일정하게 제어하는데 어려움을 겪고 있으며 전력수요근접지의 대용량 조상 설비가 필수적으로 되어 있다. 또한 계통의 말단에 있는 발전소에서는 송전선에서 소비되는 무효전력 손실분의 저감을 위하여 무효전력제어가 필수적이다. AQR은 계통운용방식에 따라 여러 가지 방식이 있고 만 고효율송전을 위한 무효전력제어의 전달함수모델은 [그림 6]에 나타나 있다.

$$Q = a + bP + cP^2$$

단, a, b, c : 고효율 송전을 위한 정수  
P : 유효전력

여기서 AQR의 제어대상은 AVR의 전압설정기(90R)이고, 전달함수 모델에서는  $V_{gref}$ 를 변화시키는 것이 된다. 이 전압설정기의 제어방식도, 제어신호의 크기에 관계없이 일정한 비율로 제어하는 방식과 제어신호의 크기에 따라 주기가 변화하는 펄스폭제어방식이 있다.



(정수 예)

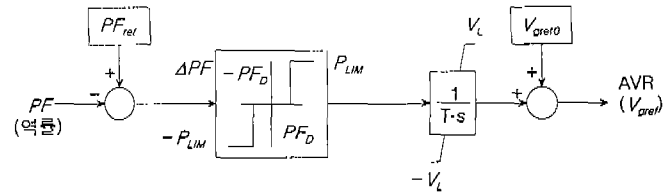
- T = 30~200 sec (전압설정기의 변화속도)
- $Q_D = 0.01$  PU (불감대폭)
- $Q_{LIM} = 1$  PU (AQR 출력)
- $V_L = 0.1$  PU

[그림 6] AQR 전달함수모델

**APFR (자동역률제어)**

APFR에는 발전기 역률을 일정치로 제어하는 방식과 발전기 역률을 일정범위내에서 제어(한정)하는 방식이 있고 전달함수 모델로는 [그림 7]와 같이 표현된다. 발전기 역률을 일정 범위내에서 제어하는 방식은 역률 설정치( $PF_{ref}$ )를 범위의 중심에 설정하고 불감대로서 그 범위를 결정하므로써 나타낼 수 있다. APFR도 AQR과 같이 제어대상은 AVR의 전압 설정기이고, AVR과의 접속부는 AQR과 같이 표현된다.  $PF_{ref}$ 는 역률의 설정치이고, APFR은 [그림 6]에서 a

= b = c = 0로서도 실현될 수 있다.



(정수의 예)

- T = 30~200 sec (전압설정기의 변화속도)
- $PF_D = 0.005$  PU (불감대폭)
- $P_{LIM} = 1$  PU (AQR 출력)
- $V_L = 0.1$  PU

[그림 7] APFR 전달함수모델

**AQR/APFR 제어방식**

제어방식 1

$$Q = a$$

$$Q = \pm a$$

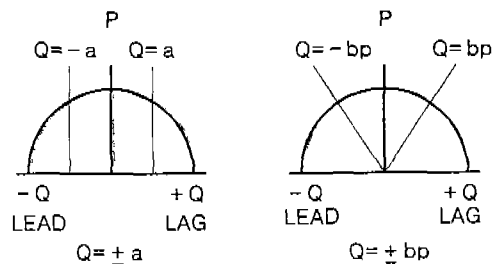
유효전력의 크기에 관계없이 무효전력을 제어하는 경우 : AQR 동작모드

제어방식 2

$$Q = bP$$

$$Q = \pm bP$$

유효전력에 따라 무효전력을 제어하여 역률을 일정하게 제어하는 경우 : APFR



[그림 8] 제어방식 1과 제어방식 2

제어방식 3

$$Q = a + bP$$

$$Q = \pm a + bP$$

$$Q = a \pm bP$$

$$Q = \pm a \pm bP$$

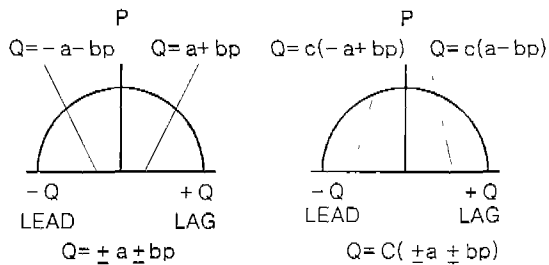
제어방식 1, 제어방식 2특성을 결합하는 경우 설정치에 따라 동작모드가 결정된다.

제어방식 4

$$Q = C (\pm a \pm bP)$$

a, b의 설정 범위를 정해 놓고 나머지 하나의 설정기 (C 설정기)로서 발전기의 출력한계 이내에서 운전하는 경우

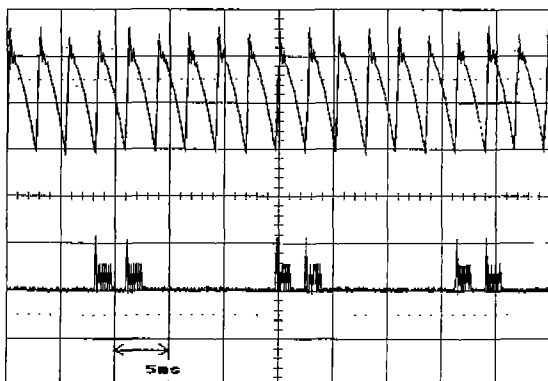
- Q : 무효전력
- P : 유효전력
- + : Lag
- : Lead



[그림 9] 제어방식 3과 제어방식 4

### 3병렬 컨버터

325MW 발전기용 여자시스템의 여자전류정격은 3000[A]이상이기 때문에 3병렬 컨버터를 사용하였다. 시스템이 3병렬로 운전됨으로서 컨버터 출력이 리액터 부하기이기 때문에 3개의 컨버터간에 전류 불평형이 발생되었고 이런 문제를 해결하기 위하여 외사의 경우에는 컨버터 출력 부스의 기하학적인 배치에 힘쓰고 있으며 또한 부스 저항값을 조절하기 위하여 시운전시에 저항이 다른 부스를 탁찰할 수 있게 되어 있다. 그러나 이런 하드웨어적인 요소보다는 제어범위에 크게 영향을 주지 않는 범위내에서 3개의 전류량을 검출하여 비교한후에 자기의 전류가 낮으면/높으면 컨버터의 점호신호에 미소신호를 가/감하여 전류 불평형이 발생하지 않도록 하였다.



[그림 10] 1 SCR 점호파형과 컨버터 출력전압

### 실증시험 결과

인천화력 4호기 발전기를 대상으로 정지형 여자시스템을 설치하여 무부하 상태에서 소신호 성능평가를 위한 계단응답 시험결과 제반 성능평가 지수가 안정

한 범위내에 들어있다. [그림 11]은 계단응답 시험시 자동운전에서의 발전기 여자 System의 응답특성을 나타낸 것으로 스텝신호에 대한 발전기 단자전압 실측출력 파형을 나타내고 있다.

<인천화력 4호기 발전기 규격>

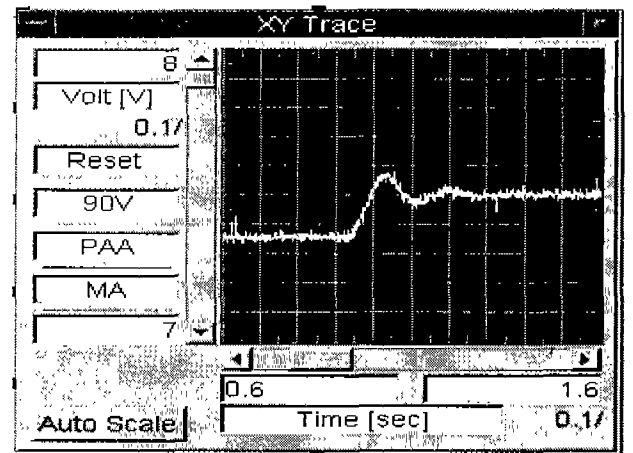
제작사 : ALSTHOM-ATLANTIQUE

정격용량 : 382.35[MVA]

유효출력 : 325[MW], 역률 : 0.85

발전기출력전압 : 24,000(±5%) [V]

여자전압, 전류 : 455[V], 3,150[A]



[그림 11] 인천 4호기 여자시스템 0.02 PU Step-Up 실측파형

### 3.결론

여러가지 설명을 통해서 325MW 동기 발전기용 이중채널 정지형 여자시스템에 대한 기능과 성능을 살펴보았다. 그리고 여자시스템의 소신호 성능평가를 실시한 결과 여자시스템이 안정 범위내에 있음을 알 수 있었다. 국내 기술에 의해서 주/부제어기 형태의 정지형 여자시스템이 각종 제한 및 능력곡선 그리고 보호 범위내에서 성공적으로 운전되는 것을 보면서 발전소 제어설비의 국산화와 전력전자 기술 개발에 일조한것에 큰 의의를 두고자 한다. 향후 초대형 정지형 여자기 개발에서 본 선행 기술로 좋은 초석이 될 것으로 확신한다.

### 참고문헌

- [1] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", The Iowa State University Press, U.S.A.,1977.
- [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., 1994.
- [3] F.P. DeMello and C. Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans. on PAS, April 1969.
- [4] "동기기" 여자계의 사양과 특성" 전기학회기술보고 제 536호 1995.2