

양수 발전소 디지털 여자시스템에 관한 연구

류호선, 신만수, 이주현, 임익현  
전력연구원

A Study of digital excitation system for pumped storage power plant

Ho-Seon Ryu, Mahn-Su Shin, Joo-Hyun Lee, Ick-Hun Lim  
KEPRI

**Abstract** - For the life extension of the aged pumped storage power plant, the static digital excitation system had been developed by KEPRI(Korea Electric Power Research Institute). This paper will discuss the control design conception of pumping mode and the application results of system.

1. 서 론

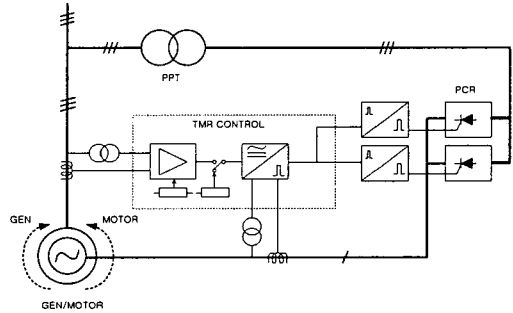
최근 대형 발전소용 발전기 여자시스템은 과도 안정도를 향상하기 위하여 속응성이 있는 정지형 여자방식을 채용하고 있고, 국내에서 개발된 여자시스템은 30기 이상이 2중화 하이브리드형(아날로그+디지털)과 3중화 디지털 시스템으로 실증적용 되어 상업운전 중에 있다. 이런 계속된 여자시스템의 확대 적용 중에 청평 양수 발전소(200MW급)의 요청에 따라 양수 발전소용으로 2001년에 개발되어 실증 적용되어 현재까지 무사고 운전을 계속하고 있다. 본 논문에서는 화력 발전소와 달리 양수발전소의 특이한 모드(Pumping+Generating Mode)에 수반되어 나타나는 여러 문제점의 해결과 운전모드별 특성을 분석하여 기술하였다. 양수발전용 여자시스템은 전운전 모드 즉, 여자제어의 고유기능인 자동전압제어 (AVR : Automatic Voltage Regulator), 수동전압제어 (MVR : Manual Voltage Regulator)는 물론 양수발전에서는 발전과 펌프를 병행해야 하므로 주로 사용되고 있는 자동역률제어(APFR : Automatic Power Factor Regulator), 자동무효전력제어(AQR : Automatic Quadrature Regulator)등에 대한 알고리즘을 도출하여 제어블록에 대한 실험을 실시하고 현장 적용하였다. 자동전압제어의 제어범위는 발전기 정격전압의 0.9PU~1.1PU, 자동역률 조정장치의 역률조정범위는 -0.9PU~+0.85PU, 자동무효전력 제어는 -0.5PU~+0.5PU로 설정되어 있다. 여자시스템의 시험은 Off-Line, On-Line으로 나누는데 본 논문에서는 On-Line 상황 즉 발전기가 계통 병입후 시험은 발전소 특성상 제어가 되는 추이 및 제한기능을 주로 확인하는 관계로 Off-Line 즉 발전기 계통병입전 주요 시험 결과를 기술하였다.

2. 본 론

2.1 양수발전용 디지털 여자시스템

양수발전용 직접여자 형태의 정지형 여자제어시스템은 [그림 1]에서 보는 바와 같이 발전기 출력단자로부터 여자변압기를 통하여 여자전원을 공급받으며, 제어정류기에 의해서 Power가 제어된다. 일부 보조 모션으로부터 변압기를 사용하여 공급받을 수도 있으나 주로 전동/발전기의 단자로부터 여자용 전원을 인가 받고 있다. 이런 시스템은 여자변압기를 통하여 여자 전원을 공급받음으로서 발전기의 응답속도가 상당히 빠르다. 제어방법은 자동제어와 수동제어로 구분되어 있으며 정상 운전 상태에서는 자동제어로 운전된다. 자동제어를 위해서는 변성기(PT)와 변류기(CT)를 통하여 단자 전압과 부하

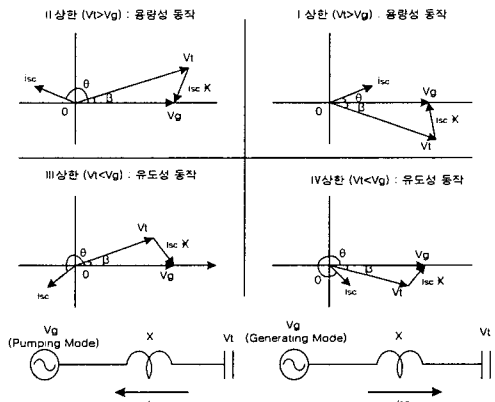
보상 제환신호를 입력받아 자동제어 설정기와 비교하여 발전기 단자전압을 제어하여 발전기의 무효전력을 제어하도록 동작된다. 특히 양수 발전기의 여자시스템에는 보통의 화력 발전소와는 달리 발전기가 펌프작용을 하기 위하여 전동기로 동작해야 되며 회전방향은 발전모드와는 반대로 회전하므로 실제 제어기로 입력이 되는 전압, 전류 제환신호의 상순이 역순이 되기 때문에 주의 하여야 한다.



[그림 1] 양수발전용 직접여자형 디지털 여자시스템

2.2 4상한 동작에 따른 유효, 무효전력

[그림 2]는 발전기가 시계방향으로 회전한다는 가정하에 도시된 무효, 유효전력의 흐름선도이다. 양수발전소에서 유효전력은 수차시스템에서 제어되고 무효전력은 여자시스템에서 제어되는 비간섭 제어를 하고 있는데 발전모드 일때는 일반적으로 화력 발전소와 같으나 펌프모드 즉, 전동기로 운전될 때 회전 방향이 반대로 되는 점을 제어 블록 내에 추가하여 +Q, -Q의 제어시 문제점이 없도록 하여야 한다.

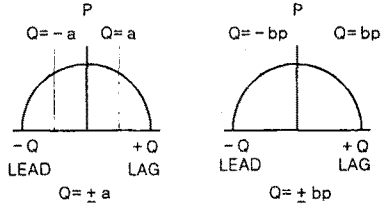


[그림 2] 유효, 무효 전력흐름도

### 2.3 AQR/APFR 제어

(1) 제어방식 1 :  $Q = \pm a$   
 유효전력의 크기에 관계없이 무효전력을 제어하는 경우 : AQR 동작모드

(2) 제어방식 2 :  $Q = \pm bP$   
 유효전력에 따라 무효전력을 제어하는 역률을 일정하게 제어하는 경우 : APFR

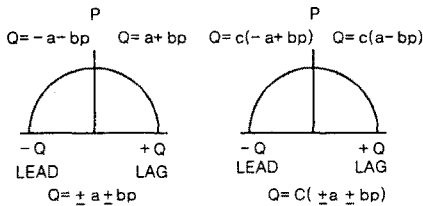


[그림 3] 제어방식1과 제어방식2

(3) 제어방식 3 :  $Q = \pm a \pm bP$   
 제어방식 1, 제어방식 2특성을 겸하는 경우 설정치에 따라 동작모드가 결정된다.

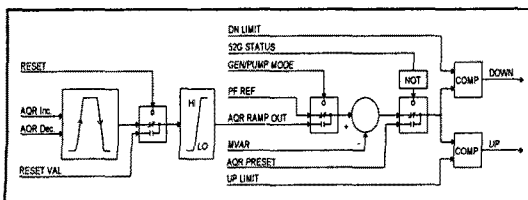
(사용예)  
 청평양수 채용방식  
 $a = 0$  ----- APFR  
 $b = 0$  ----- AQR

(4) 제어방식 4 :  $Q = C(\pm a \pm bP)$   
 $a, b$ 의 설정 범위를 정해 놓고 나머지 하나의 설정기 ( $C$  설정기)로서 발전기의 출력한계 이내에서 운전하는 경우



[그림 4] 제어방식 3과 제어방식 4

청평양수발전에 적용된 AQR/APFR 제어블록은 [그림 5]와 같다. 기본적으로 발전기 단자전압 조정기와 같이 AQR/APFR 제어도 운전원이 기준값을 조정할 수 있도록 설정기가 별도로 설치되어 있다. 이 설정기와 캐환 신호로 입력이 되는 발전기 출력 유효분과 무효분이 신호처리 회로에서 계산되어 제어기의 부담을 적게 하고 있다. 블록도에 보는 바와 같이 기준신호에 따른 편차 (error)신호가 발전기 기준전압 신호의 보조신호로 입력이 됨으로써 제어되는데, 약간의 Deadband로 오차 신호에 대하여 민감도 설정이 가능하도록 되어 있다.



[그림 5] 양수모드에서 주로 사용되는 AQR/APFR

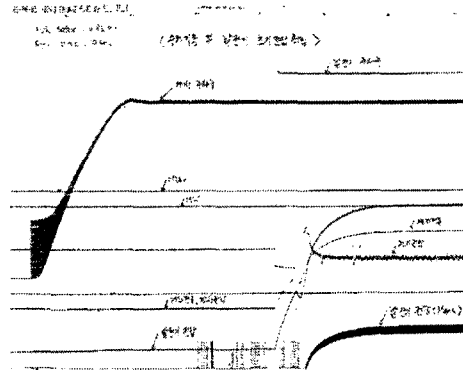
### 2.4 청평양수 발전소 적용시의 실측파형 분석

전력연구원에서는 개발된 양수발전소용 디지털 여자시스템을 청평양수 발전소를 대상으로 시운전을 실시(2001.4)하고 현재 무사고 운전을 하고 있다.

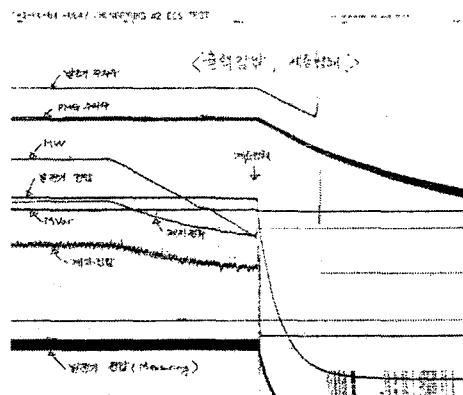
[표 1] 청평양수 발전기의 사양 (Fuji #)

제조사	FCJI
Type	입출삼상동기기
Rating and Voltage	220[MVA], 13,800[V]
Current	9204[A] - GEN MODE 9393[A] - PUMP MODE
Power Factor	91[%] - GEN MODE 100[%] - PUMP MODE
Speed	450[RPM] GEN MODE - 시계방향 PUMP MODE - 반시계방향
Pole and Frequency	16[Pole], 60[Hz]
Excitation Voltage	350[V]
Excitation Current	1220[A] - GEN MODE 975[A] - PUMP MODE

[그림 6]는 초기 전압 확립 과정을 나타낸 것이다. 전압 확립시 일차 놀림폭이 있는 곳은 초기 여자 전류(Initial Flashing) 공급과 주 정류기 사이에서 과도적으로 나타난 현상이다. 현장에 적용된 초기 여자제어 블록은 초기전압 확립시 과도한 Overshoot를 방지하기 위하여 0.98PU까지 Soft Build-Up 설계가 되어 있어 설정치는 시운전시에 변경이 가능하도록 되어 있다.

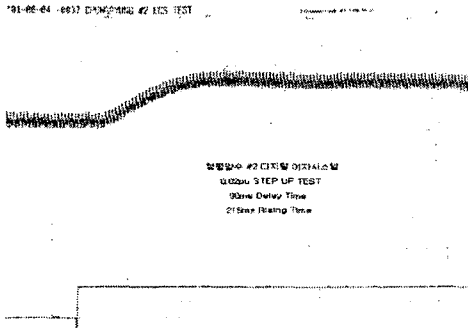


[그림 6] 발전기 전압 확립 특성



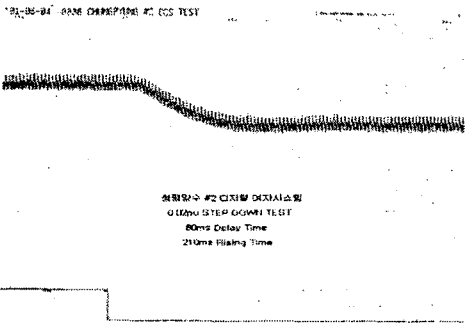
[그림 7] 정지명령 후 교류 계차차단기와 발전기 전압 감소 특성

[그림 7]은 여자시스템 정지 명령 후 발전기 계자 차단기가 개방 될 때까지의 발전기전압 감쇄특성을 나타낸 것이다. 발전기 전압 감쇄 특성에서 나타낸 것과 같이 감쇄율은 계자차단기 동작과 동시에 FDR(Field Discharge Resistor)로 발전기 계자에 남아 있는 에너지가 방전되는 비율에 따라 달라진다. 이와 별도로 급격한 감쇄를 유도하기 위하여 제어기는 위상제어 정류기의 점화각을 Inversion Mode로 유도하여 계자전압을 부의 극성으로 하여 에너지가 여자 변압기 축으로 방전되게 한다.



[그림 8] 2% Step Up 응답시험 결과

[그림 8]은 200MW 청평양수 발전기 출력전압 계단응답 시험 특성을 나타낸 것이다. 자동전압 조정기 전압 설정치를 2% 계단으로 상승했을 때 계통에 병입되지 않은 무부하 상태에서의 발전기 전압 응답 특성을 통해서 여자시스템 성능을 시험한 결과이다. 설정치를 계단으로 변화시키면 정지형 여자시스템은 순간적으로 계자 전류를 증대시켜서 빠르게 새로운 설정값에서 발전기 전압이 안정된다. 발전기 전압은 처음 빠르게 상승해서 설정전압으로 안정되고 전압 Overshoot는 0.3% 이내이다 (응답 지연시간 : 90ms, 상승시간 215ms).



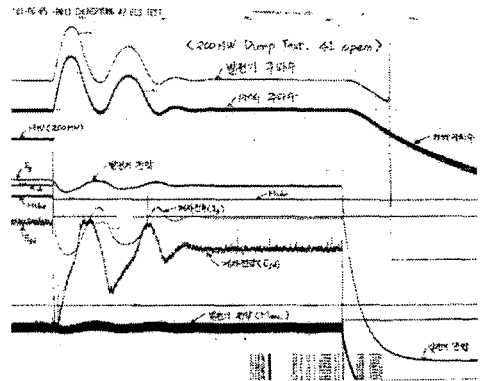
[그림 9] 2% Step Down 응답시험 결과

[그림 8]의 시험과 반대로 [그림 9]는 발전기 전압 설정값을 2% 계단으로 낮출 경우에는 6-싸이리스터 브리지 출력 계자 전압이 순간적으로 부극성 전압이 되어 계자코일 내에 남아 있는 에너지를 전원으로 빠르게 회생시킴으로써 발전기 전압을 하강시킨다. 이 경우에도 발전기 전압 Overshoot는 0.2% 미만이며 응답 지연시간은 80ms이고 하강시간은 210ms이내에 회복된다.

[그림 10]은 청평양수 발전기의 Dump Test를 측정한 파형이다. 보통 발전소에서는 터빈제어기의 성능을 확인하기 위하여 전부하에서 계통과의 연계를 차단하여 측정하고 있다. 이와 마찬가지로 청평양수 발전소에서도 200MW로 발전기가 출력을 내는 상태에서 갑자기 계통과 연계를 분리할 경우의 과도상태를 시험하였다. 파형이 화력 발전소와 다른 점은 양수 발전소의 특성상 주파수 제어를 위하여 수차의 블레이드를 조절하는

관계로 수차제어의 응답특성이 화력에 비해 낮은 것을 알 수 있다. 이런 응답특성시 여자시스템에서 고려하여야 할 사항으로는 주파수가 높아짐에 따라 발전기 단자전압도 증가하기 때문에 충분한 응답속도를 갖추어 주파수 상승시 신속히 발전기 단자전압 제어가 가능해야 한다. 또한, 여자 시스템에는 V/Hz 제한 기능이 있는데 과도한 주파수 증가시 V/Hz 제한동작이 적절히 동작하도록 해야 한다.

[그림 10]에서 발전기 주파수는 Dump Test시에 거의 135~140%까지 상승이 됨을 알 수 있었고 이런 과도현상에 따라 발전기 전압, 계자전압, 전류가 신속히 응답함을 알 수 있었다.



[그림 10] 200MW Dump Test시 발전기 전압 및 주파수 파형

### 3. 결 론

본 논문은 한국전력연구원이 10여년에 걸쳐 연구한 기술을 바탕으로 하여 청평양수 발전소용 디지털 여자시스템 개발과 함께 현장 실증적용 결과를 기술한 것이다. 개발된 디지털 여자시스템의 구성은 크게 3개의 부분 즉, 신호처리부분, 제어기부분, 위상제어 정류기부분으로 개발되었으며, 신호처리부는 제어기의 제어속도를 고려하여 제어기에 필요한 연산처리를 담당하였고, 제어기 부분은 3중화 디지털 방식으로 설계하였고 싸이리스터 위상제어정류기는 N+1 방식으로 1개의 예비 용량을 갖도록 설계해서 모의시험을 실시한 후 현장에 적용하였다. 각종 성능시험을 IEEE 421.4 기준에 따라 실시하여 만족스런 결과를 취득하였다. 본 논문에서 지면상의 한계 때문에 모든 설계 알고리즘을 모두 기술하지 못한 점이 아쉬움으로 남는다.

### (참 고 문 헌)

- [1] P. Kundur, " Power System Stability and Control," McGraw-Hill Inc., 1994.
- [2] IEEE 421.4-1990 Guide Specification for Excitation Systems
- [3] IEEE Guide for Identification, Testing and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control System. IEEE Standard 421.2-1990
- [4] H. Herzog, J. Eeak, Barden "Protecting the Static Excitation Equipment and Rotor Windings of Synchronous Machines Against Overvoltages" Brown Boveri Rev 6-82.
- [5] "동기계 여자계의 사양과 특성" 일본전기학회기술보고 제536호 1995.2
- [6] "싸이리스터 직접여자형 자동전압조정장치 연구개발 최종보고서" TR.96YS03.S1998.72, 전력연구원
- [7] 류효선, 김수열, 김장목, 임인현, "인천화력 4호기 발전기용 주/부 제어기를 갖는 정지형 여자시스템 개발". 전력전자학회지, 논문 4-6-3, 1999, 12