

다중화 디지털 여자 시스템 개발과 발전소 적용에 관한 연구

(A Study on the Development and the Application of Redundant Digital Excitation System for the Power Plants)

김경철* · 임익현**

(Kim, Kyung-Chul · Lim, Ik-Hyun)

요 약

화력 발전소, 수력발전소, 그리고 펄프 및 제지 산업분야 발전 프랜트들은 노후화된 발전기 여자시스템으로 인해서 많은 보수 정비업무에 직면해 있다. 이러한 노후 발전설비의 수명 연장을 위해 한전 전력연구원 3중화 디지털 정지형 여자시스템을 개발하였다. 이 논문에서는 3중화 정지형 여자시스템을 구성하는 전력전자 제어 소자(싸이리스터, GTO), 여자변압기, 3중화 제어시스템의 설계개념과 현장 적용 결과에 대해서 기술하고자 한다.

Abstract

Many power plants in the thermal and hydraulic utilities, the pulp and the paper industry are faced with high maintenance and down time due to the aged excitation system. For the life extension of the aged power plants, the static excitation system of triple module redundancy type had been developed by KEPRI(Korea Electric Power Research Institute). This paper will discuss the design conception and the application results of system which includes the power control devices(thyristors, GTO), power potential transformer(excitation transformer) and triple module redundancy controller(voltage regulator).

1. 개 요

본 논문에서는 대용량 정지형 여자시스템을 구성하는 3중화 디지털 연산제어시스템, N+1 방식의 다병렬 싸이리스터 위상제어 정류기, 여자변압기, 그리고 여자시스템을 구성하는 각종 주변 장치를 설계하고 적용하는 데에 필요한 기술을 정리한 것이다.

또한 기존 고가의 대용량 직류 계자 차단기를 대신해서 저가의 교류차단기를 사용하는 방법, GTO(Gate Turn on/Turn off) 반도체 소자를 사용한 폐속 감자 회로(Solid State Fast De-excitation System)와, 고속 연산용 다중화 디지털 분산제어 시스템(DCS : Distribute Control System)을 자동전압 조정 연산기로 사용하여 여자시스템을 구성하였다.

2. 3중화 정지형 여자시스템 설계

3중화 디지털 정지형 여자시스템의 주요 연산제어 기능 블록을 구성하는 알고리즘은 기존의 Single

* 정회원 : 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수
** 정회원 : 홍익대학교 대학원 전기공학과 박사과정
E-mail : ihlim@kepri.re.kr
접수일자 : 2001년 9월 5일
최종완료 : 2001년 9월 24일

Channel형 여자시스템과 동일한 기능을 갖고 있다. 그러나 여자시스템에서 필요로 하는 입력 신호를 다중화 해서 2개의 신호를 상실했을 경우에도 정상적인 운전이 가능토록 설계되었다. 발전기 출력 전압과 출력전류, 계자전압, 계자전류 등을 3중화해서 입력 처리 하였고, 디지털 연산기는 3중화된 디지털 분산 제어 시스템을 사용해서 3개중 최대 2개의 연산기가 고장이 발생 되도 정상운전이 가능하다. 여자시스템 제어기는 자동운전 모드에서 발전기 출력전압 신호를 제한 받아 설정기와 비교해서 제어 신호를 싸이리스터 위상제어 연산기에 보내서 발전기 출력단 교류를 직류로 정류해서 발전기 계자에 보내 자속의 크기를 조정해서 발전기 전압을 조정하는 일차적인 제어임무를 수행하며, 둘째로 제어 대상인 발전기를 안전하게 운전하기 위해 발전기 과전압 제한, 저주파 제한, 과도 진상운전제한, 과도 계자 전류 제한, 최소 동기화력 확보 등의 각종 발전기 보호, 제한 기능을 수행하며, 셋째로 발전기에서 생성되는 전기 에너지 증/감을 통해서 댐핑 효과를 주어 발전기 축 회전의 난조를 방지하는 기능을 수행한다. 기타 작용으로는 시스템 자체의 전기적 열적 보호를 위한 각종 보조 장치들로 구성되어 있다. 여자시스템의 운전기능으로는 발전기 가능 유/무효 출력 폭선내에서 발전기 전압을 일정하게 제어하는 AVR(Automatic Voltage Regulator)기능, 자동전압 조정이 불가능할 경우를 대비한 MVR(Manual Voltage Regulator)기능, 전력 계통 전압에 무관하게 발전기 전압을 추종시켜 일정 역률로 운전하는 APFR(Automatic Power Factor Regulator)기능, 그리고 제한된 출력전압 범위 내에서 일정 무효 전력운전인 AQR(Automatic Quadrature Regulator)기능, 병렬 운전중인 발전기간 무효전력을

균등히 분담하는 무효회류 보상기능인 RCC(Reactive Current Compensation) 기능 알고리즘이 내장되어 있다[1][2]. 그림 1은 본 논문에서 제시한 울산화력 5호기 정지형 여자시스템 블록도이다.

2.1 여자 변압기(Power Potential Transformer)

Bus Fed 방식, 정지형 또는 싸이리스터 직접 여자형은 여자 전원을 발전기 출력 고전압측에서 여자변압기를 통해서 공급받는다. 여자변압기는 일반 전력용 변압기와는 다르게 설계 되어 하는데 그 이유는 정류용 변압기이기 때문에 고조파 함유율이 고려된 충분한 용량이어야 한다. 또한 여자 변압기는 발전기 전부하 연속 정격출력을 담당해야 하며, 단시간 동안에 발전기 과도 과부하 요구 조건(Ceiling voltage 또는 Field Forcing)을 만족시킬 수 있는 정격 kVA 용량과 2차 전압을 갖추어야 한다[2]. 부가적으로, 여자 변압기는 NEMA 규격 ST.20 또는 ANSI C57.13을 만족시키는 BIL(Basic Impulse Insulation Level)정격을 가져야 한다. 이는 발전기 단락 사고에 의해서 유기 되는 과도전압이나 선로를 통해서 내습되는 뇌 썩지에 견딜 수 있는 전기 절연등급을 보장해야 한다. 여자 변압기의 용량은 발전기 정격용량의 0.5~0.6[%] 용량이며 정류기 쪽의 충분한 전류(轉流) 효과를 고려하여 % 임피던스는 6~8[%] 내외로 설계된다.

여자변압기 2차 전압은 여자시스템의 Ceiling Voltage를 고려해서 아래와 같이 결정한다.

$$V_2 = \frac{\pi (V_p \times V_{FB} + V_{FD})}{3\sqrt{2} (\cos \alpha - 0.5 I_z)} \quad (1)$$

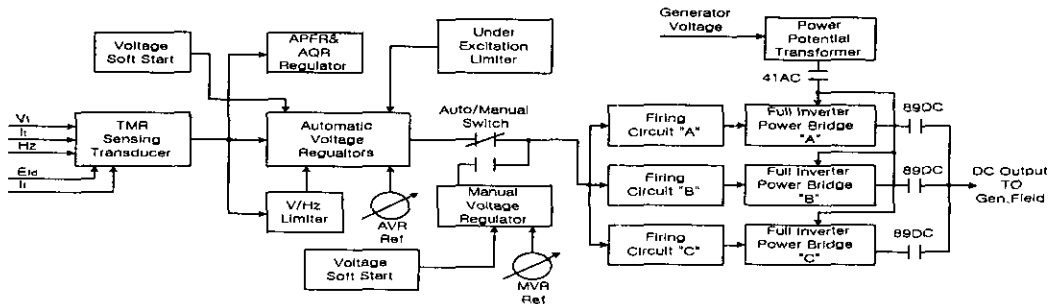


그림 1. 울산화력 #5 정지형 여자시스템 블록도
Fig. 1. Block Diagram of Static Exciter System in ULSAN T/P #5

여기서

- V_2 : 여자변압기 2차 선간 전압
- V_b : Ceiling Voltage 지정 상수
- V_B : 무부하 또는 정격부하시의 계자전압
- V_M : 각 회로간, 정류기의 전압강하
- α : 최대 전상 점호각(10~20° 전기각)
- I_Z : 여자변압기 임피던스(pu)

2.2 교류 계자 차단기

여자 변압기 2차와 정류기 브릿지 중간에 교류 계자 차단기를 설치해서 발전기 여자시스템 입력 전원을 차단함으로써 발전기 전압을 소멸시키는 것이다. 그런데 기존의 방식은 정류기 브릿지 출력단과 발전기 계자 중간에 직류 계자 차단기를 설치하였다. 직류 차단기 대신에 교류 차단기를 사용함으로써 시스템 경제성 및 공간성 등에서 유리할 뿐 아니라 내구성과 전기적 특성 등에서 장점이 많다. 교류 계자 차단기를 개방 할 때는 발전기 계자 코일 내에 저장되어 있는 큰 에너지 방전이 필수인데 일차적으로 개방 전에 2~3초 동안 싸이리스터 게이트 펄스를 뒤로 밀어서 인버전(Inversion)영역으로 하여 코일내의 에너지를 변압기 쪽으로 되돌려서 에너지를 뽑아낸다(그림3과 그림6). 인버전이 정상동작하지 못해서 회로에 과전압이 유기되면 후비보호로 계자 코일과 직렬로 GTO 와 직렬 방전 저항을 이용한 Crowbar 회로에서 충분한 전류가 흐르도록 통로를 제공함으로써 계자 코일 내에 축적된 $\frac{1}{2} LI^2$ [여기서 I : 계자 전류, L : 계자코일의 인덕턴스] 에너지로 인해서 발생하는 고 전압 상승을 억제하고 발전기 전압을 신속히 소멸시킨다. 과부하 차단 전류 설정치는 정류기와 변압기의 과부하 내량을 고려해서 설정한다.

2.3 초기 여자

정지형 방식의 여자시스템은 초기 발전기 전압을 확립시켜 주는 설비가 있어야 한다. 대부분 발전소는 축전지를 이용한 직류 전원 설비가 있기 때문에 이를 이용하기도 하는데, 축전지 전원이 접지 방식이기 때문에 비접지 계자 회로에서는 초기여자 공급 중

은 계자접지 검출 계전기 기능을 잠시 정지시키는 방안이 필수이다. 초기 여자 전류의 크기 결정은 발전기 무부하 포화 특성곡선 상에 나와 있는 발전기 전압과 계자 전류 크기로 결정한다. 초기 여자 전류를 작은 값으로 설계할수록 시스템 제작상 유리하나 싸이리스터 정류기 입력단의 교류 전압이 얼마 이상 되어야 싸이리스터 게이트 점호 펄스 해제가 시작되는데, 일반적으로 발전기 전압기준 0.2[PU] 이상이다. 따라서 초기 여자 전류 공급장치는 발전기 전압 0.2[PU] 이상을 확립시킬 수 있는 전류 공급 능력을 가져야 하며 최대 시간 정격은 10초 이내이다. 10초 이내에 발전기 전압이 80[%] 이상 확립되면 자동으로 초기 여자 정류 공급이 중단되도록 설계한다. 이 시간 동안 발전기 전압이 확립되지 못하면 여자시스템은 정지된다.

보통 발전소에는 125[Vdc] 소내 축전지 설비가 있어서 소내 축전지를 직류전원으로 사용하는데 이 때는 정극성 회로에 적절로 다이오드를 연결해서 싸이리스터 정류기로부터 축전지 쪽으로 전류가 흐르지 못하도록 하고, 125Vdc 전압과 계자 코일 저항과의 상관관계 속에서 계자 전류가 클 경우는 직렬로 전압강하용 저항을 연결해서 계자 전류 크기를 조정한다. 최근에는 발전소 축전지 설비와는 독립적으로 소내 교류 전원을 변압기로 강압시켜 이를 정류해서 계자전류를 공급하는 것이 일반적 추세이다. 금번 프로젝트에서는 그림 2와 같은 교류 전원공급방식 시스템으로 설계했다.

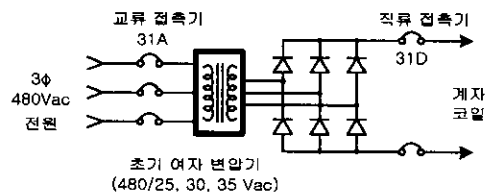


그림 2. 초기 여자 회로
Fig. 2. Initial Flashing Circuit

교류 전원공급 방식 설계시 고려할 점은 큰 초기 투입 전류 및 차단 직류 전류로 인해서 31[D] 직류 축 접촉기 점접 손상을 방지하기 위해서 투입시에는 31[D]를 먼저 투입시키고 교류 접촉기 31[A]를 나중에 투입시키며, 차단시는 전류가 작은 31[A]를 먼저 개방후 31[D]를 개방한다. 초기 여자 전원변압기는

절연 변압기로 2차측에는 절한 탭을 두면 편리하다.
 발전기 무부하 개방 전압 시정수 Tdo' 에 따라서 초기 여자 공급후 수초 이상의 시간이 경과해도 목표 이상의 발전기 전압이 확립되지 않을 경우 변압기 2차측 권수비를 변경해야만 한다.

2.4 정류기 브릿지

정류기 브릿지의 구성품은 Heat Sinks, 전력용 싸이리스터 반도체 소자, 반도체 보호용 패속 단선 특성 휴즈, 이중화된 냉각용 송풍기, Snubber, Pulse Transformer, 싸이리스터 점호 펄스 발생용 동기 변압기, 점호 펄스 발생 인쇄회로기판, 전원공급장치, 전력용 교류 계자 차단기, 직류 개폐기, 전류측정용 Hall CT, 전압측정용 PT, 그리고 발전기 계자 코일에서 유기 되는 높은 전압을 억제·제한시키는 과전압 억제기(Surge Suppressor), 여자 변압기로부터 내습하는 과전압을 억제시키는 과전압 억제기, 누설자속 및 자속 불평형으로부터 유기 되는 발전기 축전압 억제용 Shaft Voltage Suppressor, 정류기 점호 과정에서 발생하는 고조파를 개선하는데 필요한 직류 및 교류 필터 등이 설치되어 있다.

2.4.1 3상 전파 정류 싸이리스터 브릿지

여자기 용량이 10~20[MVA] 이상이거나 여자 전류 크기가 200~300[A] 이상이면 3상 전파 정류 브릿지를 사용하는 것이 일반적인 추세이다[1]. 계자코일 내의 에너지를 전원 쪽으로 회생시키기 위해서는 3상 전파 브릿지를 써서 3상 반파 브릿지에서 할 수 없는 Inversion Mode 운전을 한다. 반파 브릿지의 경우 비록 동작 시간은 매우 빠르지만 계자 코일에 영에서부터 정방향 천장 전압을 공급하는 출력 특성이 3상 전파 브릿지 보다는 제한적이다. 그리고 급속하게 발전기 전압을 감소시켜야 하는 상황에서, 3상 전파 브릿지는 Inversion Mode로 점호 신호를 뒤로 밀쳐서 계자 코일 내의 에너지를 전원측으로 빼냄으로써 전압 감소 속도를 빠르게 해준다. 3상 반파에서는 계자 코일에 병렬로 Free Wheeling Diode를 연결해서 감소시키는데 3상 전파에서 Inversion 하는 것보다 속도가 늦다.

그림 3은 3상 전파 싸이리스터 정류기의 구성도이며, 그림 4는 싸이리스터 점호각 α 를 변경시켰을 때

정류기 출력단의 전압 파형을 나타낸 것이다.

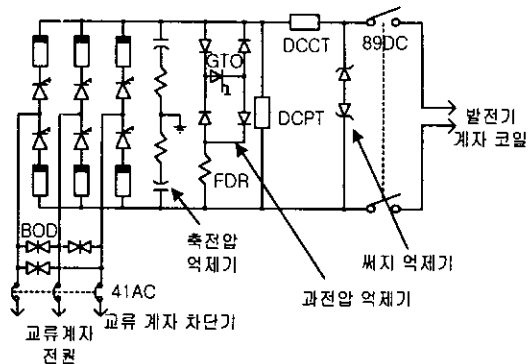


그림 3. 위상제어 정류기 및 계자 회로
 Fig. 3. 6 Thyristor Rectifier Bridge & Field Circuits

3상 전파 정류 브릿지에서 실제 사용하는 점호 지연각(정류각)의 최소/최대 값은 100[Adc] 미만의 소전류와 고주파수(420[Hz]) 정류기는 $\alpha_{min}=30^\circ$, $\alpha_{max}=150^\circ$ 이고, 수천 암페어의 대전류와 상용 주파수(60[Hz]) 정류기는 $\alpha_{min}=15^\circ$, $\alpha_{max}=165^\circ$ 로 설계하면 싸이리스터가 Commutation(轉流) 실패 없이 안정적인 운전이 된다. 이는 정류기 주변 Reactance, di/dt, SCR 특성 등에 따라서 고려된다.

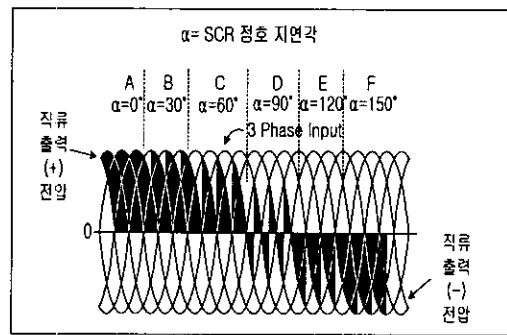


그림 4. 싸이리스터 출력 파형
 Fig. 4. Thyristor Output Waveform

전력계통에서의 순간 고장으로 발전기 전압이 떨어지면 싸이리스터 점호각을 최대로 열어서 계자 코일에 전류를 흘려 떨어진 발전기 출력단 전압을 회복시킨다. 여기서 A, B, C 영역은 정류각이 0°에서 60°까지 변화하는 정 정류 영역이고, 정류각이 0°에서 계자 전류를 최대로 공급한다. 여자시스템 정류

기에서는 계자전류를 강화시키는 영역이 A, B, C 영역이고 정상적인 발전기 부하에서는 정류각이 90° 부근인 영역 D에서 운전된다. 발전기 전압이 높을 때는 계자 자속의 급격한 감소가 필요한데 이 때는 정류각을 뒤로 밀어서 직류 전압을 음의 전압으로 만든다. 이 영역은 E, F 구간으로 정류각 α 가 120° ~ 150° 이다.

2.4.2 점호 펄스 발생회로

점호 펄스 발생회로에는 싸이리스터 점호를 위한 동기 신호 검출부(그림5), 60° 위상 천이부, 저 전압 시 점호펄스 발생을 금지하는 정류기 입력단 저전압 검출부, 제어 신호와 동기 신호를 비교하는 COSINE 비교부, 정류각의 최대/최소를 제한하는 부분과, 정류기 입력단상 불평형 및 과전압 검출부 등으로 구성된다. 검출부에서 연산 처리된 신호는 EPLD(Erasable Programmable Logic Device)에서 로직 연산 처리하여 최종 점호 신호를 출력한다.

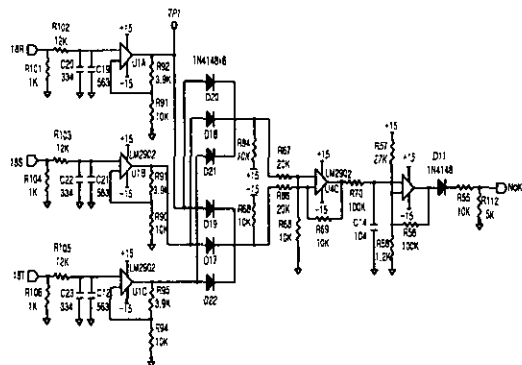


그림 5. 동기신호 및 저전압 검출부 회로도
Fig. 5. Synchronizing & Low Voltage Monitoring Circuit

2.5 과속 감지회로

동기 발전기 출력측의 3상 단락, 동기 탈조 등으로 발전기 계자 코일에는 큰 과전압이 발생된다. 이를 효과적으로 제한하지 못할 경우에는 계자 코일의 소손과 전력용 반도체인 싸이리스터와 다이오드에 과도한 역전압이 인가되어 손상을 입을 수 있다. 과전압 보호 형식은 정류기 정류 방식에 종속적이다. 3 싸이리스터 브릿지 시스템에서는 써지 보호책으로 MOV(Metal Oxide Varistors)나 Seleniums 또는

Thyrites를 보통 사용하고, 6 싸이리스터 브릿지 시스템에서는 과전압 검출 및 전압 감쇄회로(SCR 또는 GTO, FDR : Field Discharge Resistor)를 써서 과도 전압을 억제시킨다[1]. 이 회로를 Crowbar라고 한다. 싸이리스터를 역방향 병렬로 하고 직렬 방전 저항을 연결한 것이 보통이나, 싸이리스터 게이트에 의한 차단 능력이 없기 때문에 한번 과전압이 발생되면 과전압 소멸시까지 계속 도통하게 된다. 그러나 GTO를 사용할 때는 정류기 반도체가 견디지 못하는 과전압 레벨에서만 동작했다가 다시 차단해서 정상운전이 가능하다[7].

크로바가 동작 할 때는 정류 브릿지 6 싸이리스터는 블로킹 된다. 크로바 동작시에 걸리는 시간 지연 때문에 초기 150[μ sce] 동안에는 MOV를 사용해서 써지를 감소시킨다.

크로바 동작 전압 설정은 계자 코일 절연 등급과 반도체 최대 반복피크 역전압중 낮은 값을 정한다[3][4].

$$V_{CRmax1} = 0.8 V_{pref} \tag{2}$$

V_{CRmax1} : 계자 권선 절연 등급을 고려한 크로바 동작 최대 전압

V_{pref} : 회전계자 절연 시험 전압의 실효치

$$V_{CRmax2} = 2(K_s \cdot V_{RRM} - \frac{V_{vo} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}) \tag{3}$$

V_{vo} : 여자 변압기의 2차 상전압

V_{RRM} : 싸이리스터 최대 반복 피크 역전압

K_s : 싸이리스터 전압 분배 계수

V_{CRmax2} : SCR 최대 반복 피크 역전압을 고려한 크로바 동작 최대 전압

2.6 전압 조정 및 제한

전압 조정 및 제한, 제어 알고리즘 연산을 수행하는 디지털 하드웨어는 3중화 제어 모듈(TMR : Triple-Modular Redundant)을 채용하였다. 10[MHz] Intel80C152 프로세서를 사용한 3중화 주 연산 프로세서 모듈은 전체 연산 스캔 시간이 18[msec]로 여

자시스템으로서는 다소 느린 연산속도를 가지고 있으나 발전기 여자시스템 시정수가 3초 이상으로 제어상에 문제점은 없었다.

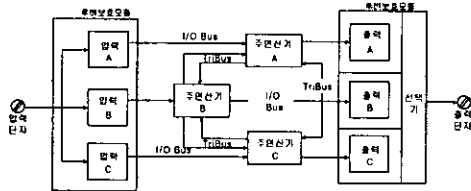


그림 6. 삼중화 제어기 구성도
Fig. 6. Triplicated Architecture of the TMR Controller

그림 6은 디지털 제어기의 Architecture 와 3중화 제어기의 기본 구성도이다. 3개의 주 프로세서 A, B, C가 Tri-Bus를 통해서 동기 신호 통신을 하면서 디지털 입력 데이터를 선택하고 출력 데이터를 비교하여 전송한다. 아날로그의 경우 입력 데이터는 중간값을 선택하고 연산을 수행 후 개별 출력을 내고 이는 다시 최종 출력 모듈에서 중간 값을 선택해서 제어 명령 신호를 발생시킨다. 3중화 디지털 연산기의 연산 수행 부하를 줄이기 위해서 발전기 출력 전압과 출력 전류 아날로그 연산 소자를 사용해서 발전기 유효전력, 무효전력, 주파수 전압 신호를 만들고 다시 필터링 해서 표준화된 아날로그 신호를 만든 다음 3중화 디지털 아날로그 입력 모듈에 뿌려 주어서 주 연산기가 입력받도록 하였다. 시스템의 신뢰도를 극대화시키기 위해 신호처리, 전원처리 어느 한 곳에서도 병목 현상이 발생되지 않도록 전기적으로나 물리적으로 분리 독립시켰다.

2.6.1 전압 및 전류 검출

전압 및 전류 검출 방식을 기존의 전압 변성기와 전류 변성기를 거친 다음 정류하거나 벡터 합성하는 대신에 Hall CT와 정밀 저항을 사용해서 발전기 전압을 아날로그 차동 증폭기 신호 레벨로 맞추어서 이를 정류, 필터링 해서 전압 제한 신호로 사용했으며, 주파수와 유효/무효 전력은 집적회로 소자를 사용해서 연산처리 함으로써 회로를 단순화시켰다.

2.6.2 제어 연산 알고리즘

디지털 제어의 장점을 극대화시켜 표준화된 입력 신호를 디지털 입력 모듈에서 받아서 여자제어 시스템에 필요한 모든 기능을 수행할 수 있도록 처리하였다. 3중화된 분산제어 시스템이 내부 기능 블럭을 메모리상에 불러다가 배치시켜서 주소로 연결하는 방식이다.

그림7은 울산화력 #5 여자시스템의 기본 제어의 전체 알고리즘 블록도이다

● 자동 전압 조절기(Automatic Voltage Regulator)

자동 전압 조절기는 자동 전압 조절기 참조값 발생기의 최종 출력과 발전기 단자 전압을 이용하여 편차의 크기를 계산하고, 편차는 고전적인 비례적분 (PI : Proportional and Integral) 제어기와 상한/하한 제한 기능을 거쳐 자동 전압 조절기의 최종 출력이 된다. 적분 제어기는 Anti-Windup 방식으로 최대와 최소값이 제한되며, 자동 전압 조절기의 최종 출력 역시 위상 제어 정류기(Phase Controlled Rectifier)의 특성을 고려하여 최대와 최소값이 제한된다[6].

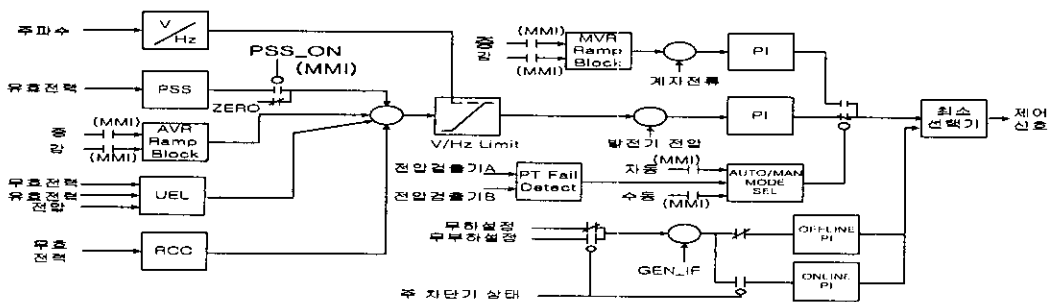


그림 7. 울산화력 #5 여자시스템 블록도
Figure 7. Block Diagram of Static Exciter System in ULSAN T/P #5

여차 시스템 운전 모드가 수동 전압 조절 모드일 경우 자동 전압 조절기의 적분기는 수동 전압 조절기의 출력을 추종하게 되는데 이는 수동에서 자동으로 전환 할 때 발생할 수 있는 충격(Bump)을 최소화하기 위한 것이다. 자동전압조절기의 고전제어 비례(Kp) 적분(Ki) 제어기를 사용한 전달함수는 아래와 같다.

$$AVR_{OUT} = AVR_{ERROR} \times (Kp + \frac{Ki}{S}) \quad (4)$$

그림 8은 위에서 설명한 자동전압 조절기 블록도 로 이다

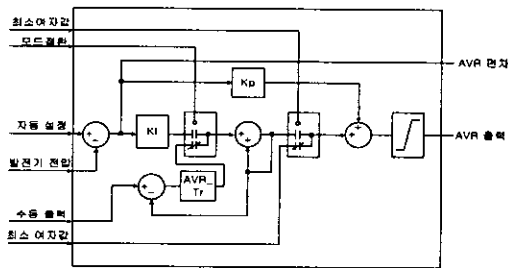


그림 8. 자동전압조절기 블록도
Fig. 8. Block Diagram of Automatic Voltage Regulator

- 무효 전력 보상 : 발전기가 계통에 병렬 운전 시 적정하게 무효전력을 균등 부담하기 위한 Voltage Droop 기능을 수행토록 하였으며 필요에 따라서는 송전선 전압강하 보상기능도 수행 가능하다.

- 발전기 유연 전압(완 기동) 확립 조절기 : 초기 여자에서부터 발전기 정격 전압 확립시까지 10초 이상의 충분한 시간에 Overshoot 없이 발전기 전압을 상승시킴으로써 발전기 본체 및 주변 전기 회로에 전기 자기적인 과도 현상을 최소화시켰다. 완기동 없는 발전기의 경우 초기여자 후 발전기 전압이 안정되기 전에 15~20[%] Overshoot가 있을 수 있는데, 이 과전압으로 권선에 큰 응력이 가해지거나 코로나 원인이 되기도 한다. 그림 9는 완기동 전압 확립기의 블록도이다. 발전기 주차단기가 개방 상태에서 계차 차단기 폐되면 AVR 초기 설정값이 1차 지연 지수함수로 상승하면서 발전기 전압을 완기동 시킨다.

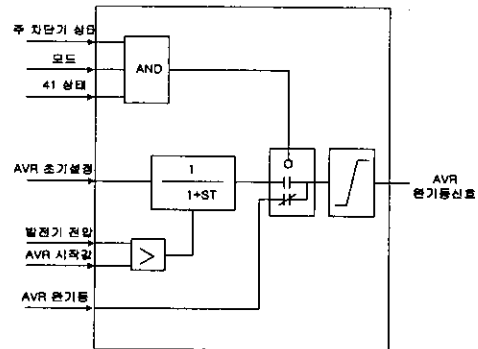


그림 9. 완기동 전압 확립기 블록도
Fig. 9. Block Diagram of AVR Soft Start

- 수동 전압 조절기 : 발전기 출력 전압 신호를 3중화했기 때문에 거의 일어나지 않겠지만 혹 제한신호 상실시 자동으로 불가능하기 때문에 정류기 출력 계차전류를 제한 받아서 페루프 제어하는 수동 조절기를 두어서 자동전압 조절기를 후비 보호 하도록 하였다.

- [V/Hz] 제한기 : Off-Line 상태에서 발전기 계차에 과도한 전류가 흐를 경우 발전기의 모선에 연결된 주 승압변압기 및 보조 변압기는 과자속이 된다. 이러한 과자속 현상은 기기의 철심에 과열을 초래한다. 손상은 부하 때 보다 무 부하 때에 더욱 커지게 되고 과자속의 크기와 인가 시간 역시 제한되어야 하는데 이와 같은 목적으로 사용되는 기능이 [V/Hz] 제한기이다. [V/Hz] 제한기는 발전기 단자 전압에 대한 설정 값과 발전기의 주파수를 비교하여 동작하는데 일정한 단자 전압에서 주파수가 감소하는 경우 그에 비례하여 단자 전압 설정 값을 감소시켜 결국 발전기 단자 전압을 감소시키는 방향으로 동작한다.

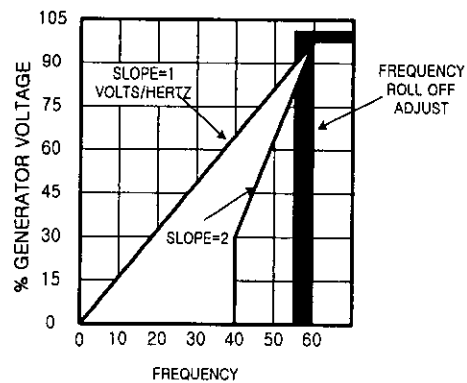


그림 10. 전압/주파수 제한 조정 특성
Fig. 10. Regulator [V/Hz] Characteristic

[V/Hz] 제한기가 갖고 있는 정수는 단자 전압과 주파수 비(V/Hz Ratio)로서 이 정수는 결국 비례 제어기의 비례이득과 동일한 역할을 한다. 그림10는 저주파수 제한기의 전압/주파수 특성을 나타낸 것이다. 기율기 1선은 가스터빈, 증기터빈, 수력터빈, 발전기에 사용되며 기율기 2선은 터보 충전 디젤 발전기에 사용한다.

● 부족 여자 제한기(Under Excitation Limit) :

발전기 능력곡선상에서 무효전력을 흡수하는 영역이 부족여자 영역이고 공급하는 쪽이 과여자 영역이다. 계통 병입된 발전기를 능력 곡선상의 부족여자 지역에서 연속으로 운전 할 때는 두 가지의 문제점을 고려해야 하는데 전기가 철심 단부의 과열과 정태 안정도에 관련된 것입니다. 먼저 발전기 고정자 철심 단부의 과열은 부족 여자 상태에서 계자 전류의 크기가 작기 때문에 유지환은 포화되지 않은 상태이고 그 결과 고정자 권선 단부의 누설 자속이 커지게 되서 고정자 철심의 적층 방향에 대하여 수직으로 입사되는데 이에 의해 철심 단부에는 와류(Eddy Current)가 형성되고 국부적인 과열이 발생하게 된다. 정상 상태 안정도 문제는 고정된 계자 전압 상태에서 계통으로 공급할 수 있는 최대 유효 전력의 크기가 한정된다. 속응형 자동 전압 조절장치를 적용했을 경우 이 제한치를 실질적으로 상당히 증가시킬 수 있으나 수동 전압 조절장치의 경우 자동 전압 조절장치에 비하여 응답성이 떨어지게 설계하므로 운전 중 자동 운전에서 수동 운전으로 절체 될 때를 대비하여 발전기의 운전 점을 언제나 안정한 영역 내에 유지되도록 하여야 한다. 부족여자 상태의 운전(진상 영역에서의 운전)으로 발생하는 위의 두 문제 중 발열에 의한 문제가 정태 안정도의 확보보다 더 심각한 문제라고 볼 수 있다. 부족 여자 제한기의 제한 영역은 발전기 능력 곡선을 참조하여 설정하는데 전기가 철심 단부 과열을 방지하기 위하여 곡선상의 진상 영역 제한선에서 5~15[%] 정도의 여유를 두고 설정하는 것이 안전하다. 한편 정태 안정도의 문제는 전력 계통의 특성에 따라 제한치 설정은 현장에서 시험을 통해 얻을 수 있다. 부족 여자 제한기의 구현방식은

$$K_p \times P \pm Q - K_i \times V_t^2 > 0 \quad (5)$$

- P : 유효전력
- Q : 무효전력(+ : 진상, - : 지상)
- V_t : 발전기 단자전압
- K_p : 기율기 상수
- K_i : 절편 상수

위 식이 0보다 크게 되었을 경우에 부족여자제한기의 비례/적분기 입력값이 0보다 크게 되어 발전기 단자전압을 상승시키는 역할을 하게 된다.

그림 11은 부족 여자 제한기 블록도 인데 식(5)와 관련된 무효전력, 전압 연산 결과가 비례적분되어 부족 여자 제한기 출력이 된다.

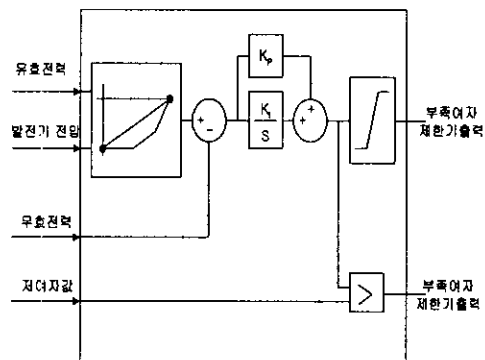


그림 11. 부족 여자 제한기 블록도
Fig. 11. Block Diagram of Under Excitation

● 과여자 제한기(Over Excitation Limit)

과여자 보호기는 비례/적분기로 구성된 제어기로서 과전류 제한기로 동작하며 발전기가 전력계통에서 병해된 Off-Line 상황에서는 발전기와 발전기에 연결된 각 변압기에 Over-Flux가 발생되는 것을 방지하고 계통 병입된 On-Line 상태에서는 과열에 의한 계자 권선의 손상을 방지한다.

과여자 제한기는 두개의 설정 값을 갖고, 계자 전류를 일정 값 이하가 되도록 상황에 따라 설정 값 중 적당한 값을 선택하여 적용하는데 두개의 설정 값은 Off-Line 과전류 제한치, On-Line 과전류 제한치이다. 과여자 제한기는 정상 운전 중일 경우 항상 최대 값을 발생시키며, 과여자 상태가 되면 최대 값보다 낮아지게 되는데 그 크기가 자동조절기 또는 수동조절기 출력에 비하여 작을 경우 경보가 발생되며 위상제어신호는 과여자 제한기의 출력에 의하여

결정된다. 그림 12는 과여자 제한기로 발전기가 부하 상태(계통병입)나 무부하(계통병입)나에 따라서 설정 값이 다르게 입력되고 이것과 제한된 계자 전류가 비례 적분 연산되어 출력된다.

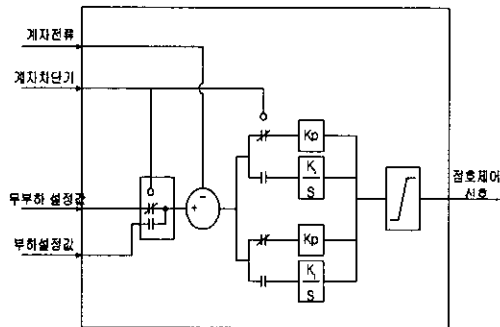


그림 12. 과여자 제한기 블록도
Fig. 12. Block Diagram of Over Excitation Limit

- 무효 전류 보상기 : 무효 전류 보상기는 병렬 운전중인 발전기 사이에 존재하는 리액턴스가 너무 작거나 또는 너무 클 경우 발생하는 발전기간 무효 전류의 분담 불균형을 해소하는 것이 목적이다. 보상기는 마치 발전기의 단자에 일정한 크기의 리액턴스 성분이 있는 것처럼 가정하는데 리액턴스의 크기는 현장에서 시험을 통해 설정하게 된다. 리액턴스 보상 값은 4[%]에 설정되나 필요에 따라 10[%] 정도까지도 보상한다. 한편 무효 전류 보상기의 리액턴스 값을 음의 수로 설정하면 ARCC(Active Reactive Current Compensation)로 동작하는데 이는 무효 전류의 크기에 비례하여 발전기의 출력전압을 강제로 상승시켜 주 변압기 및 계통선로에 의하여 발생하는 전압강하를 보상함으로써 발전기와 멀리 떨어진 지점의 전압을 일정하게 유지하는 역할을 수행한다.

- 자동 무효전력/역률 조절기 : 주로 산업 단지와 같은 단독 부하에 전력을 공급 또는 양수발전소에 사용되는 기능으로 유효전력의 크기에 상관없이 일정한 크기의 무효전력을 출력하고자 할 때 또는 일정한 역률을 유지하고자 할 때 사용하는 기능이다. 이들의 동작은 사실상 동일하며 모두 비례 제어기의 형태를 갖고 자동전압 조절기의 설정값을 조정하여 무효전력 또는 역률을 일정하게 유지한다. 자동무효전력 조절기능과 역률 조절기능은 서로 배타적으로 작용한다. 즉 무효전력 조절기능이 동작 중일 때는 역률 조절기능을 사용하는 것을 불가능하고 반대 경

우에도 동일하다.

2.6.3 여자기 및 발전기 보호기능

- 과여자 보호기능(Over Excitation Protection) : 과여자 보호기능은 On-Line과 Off-Line상황에서 각각 동작하는 디지털 보호계전기 알고리즘으로 구현되어 있다. Off-Line 상황하에서 동작하는 과여자 보호기능의 주목적은 계자회로가 과자속으로부터 발전기가 과전압 되는 것을 보호하는데 있고, V/Hz 보호동작에 우선하여 동작한다. 따라서 Off-Line 과여자 보호기능은 I^2t [여기서 I : 계자전류, t : 시간]기능을 갖도록 설계되어 있으며 제한치, 정지치 나누어 동작한다.

On-Line 과여자 보호기능의 목적은 과전류로 인하여 회전자에서 발생하는 과열로부터 발전기의 계자를 보호하는데 있다. On-Line 과여자 보호기능의 보호 특성은 ANSI C50.13 Field Short Time Thermal Over Load에 [5]명시되어 있는 값을 바탕으로 하여 동작하도록 설계되어 있다.

- [V/Hz] 보호 동작 : 제어 루프내에 포함된 [V/Hz] Limiter Regulator의 후비 보완책으로 [V/Hz] 보호 기능을 포함한다. [V/Hz] 보호 기능은 한시 보호계전기와 반한시 보호계전기의 특성을 함께 보유하고 있어 각 순간에서의 [V/Hz] 비에 따라 적절한 Alarm 또는 Trip 신호를 발생시킨다. [V/Hz] 보호에 사용되는 한시 및 반한시 보호계전기 특성 곡선은 일반적인 발전기 및 변압기의 [V/Hz] 곡선을 가장 유사하게 모의하였다. 보호 특성은 [V/Hz]의 비가 1.1[PU]에서는 연속 운전이 가능하도록 하고 1.10[PU]에서 1.18[PU]까지는 1.15[PU]에서 2초동안 운전이 허용되며, 1.18[PU]에서는 500[m]초만에 순시 Trip이 되도록 하였다.

- 발전기 과전압 보호기능(Generator Over Voltage Protection) : 발전기 과전압 보호기능은 Off-Line 상태에서만 동작하도록 설계되어 있다. 일반적으로 선정된 값은 발전기 단자전압의 130[%]로 설정되어 있으며 한시 보호계전기 알고리즘을 이용한다.

3. 3중화 여자시스템의 성능시험 결과

그림 13 초기 전압 확립 과정을 나타낸 것이다.

다중화 디지털 여자 시스템 개발과 발전소 적용에 관한 연구

전압 확립시 일차 놀림목이 있는 곳은 초기 여자 전류(Initial Flashing) 공급과 주 정류기 사이에서 과도적으로 나타난 현상이다.

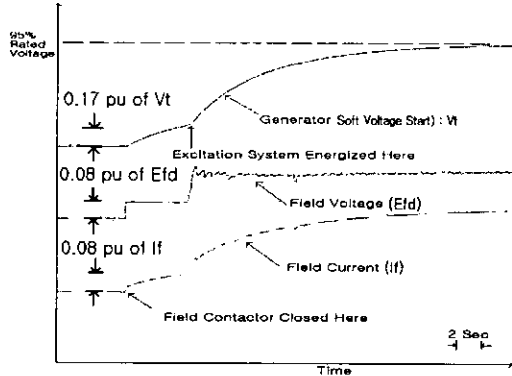


그림 13. 발전기 전압 확립 특성
Fig. 13. Generator Voltage Buildup Characteristic

그림 14는 시스템 정지 명령후 교류 계자 차단기가 개방 될 때까지의 발전기전압 감소특성을 나타낸 것이다. Inversion Mode에서 계자 전압(Efd)이 부의 극성으로 급격히 변화하면서 발전기 전압이 떨어진다.

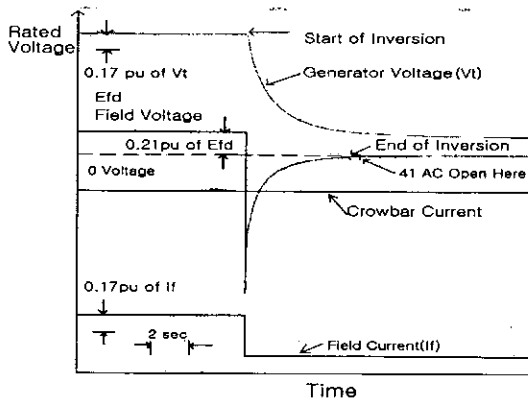


그림 14. 정지명령 후 교류 계자차단기 와 발전기 전압 감소 특성
Fig. 14. Fast De-excitation versus AC Field Breaker Operating Time after initiation of Shut down

그림 15와 16은 400[MW] 울산화력 5호기 발전기 출력전압 계단응답 시험 특성을 나타낸 것이다. 자동 전압 조정기 전압 설정치를 3[%] 계단으로 상승했을 때 계통에 병입 안 된 무부하 상태에서의 발전기 전

압 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 0.33[%] 이내이다(응답 지연시간 : 120[mSec], 상승시간 255[mSec]). 반대로 발전기 전압 설정값을 3[%] 계단으로 낮출 경우에는 6-짜이리스터 브릿지 출력 계자전압이 순간적으로 부극성 전압이 되어 계자코일 내에 남아 있는 에너지를 전원측으로 빠르게 회생시킴으로써 발전기 전압을 하강시킨다. 이 경우에도 발전기 전압 Overshoot는 0.2[%] 미만이며 응답 지연시간은 160[mSec]이고 하강시간은 230[mSec] 이내에 회복된다.

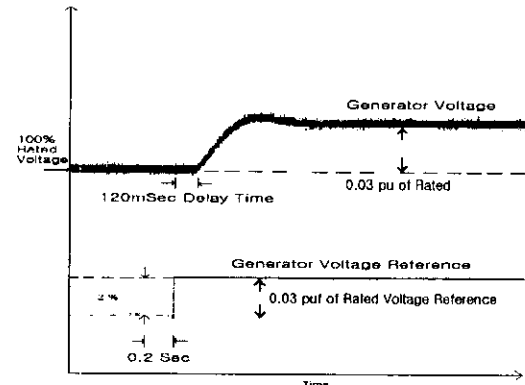


그림 15. 3% Step Up 응답시험 결과
Fig. 15. 3% Step Up Response Test Results

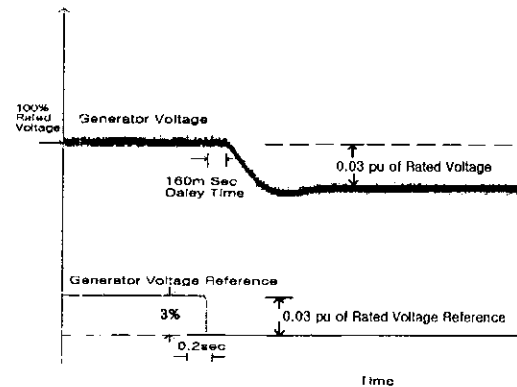


그림 16. 3% Step Down 응답시험 결과
Fig. 16. 3% Step Down Response Test Results

4. 결 론

본 논문은 한전 전력연구원이 99.7월부터 2년에 걸쳐 연구개발과 현장 실증 적용 결과를 기술한 것으로 제어기 부분을 3중화 디지털 방식으로 설계하고 사이리스터 위상제어정류기는 N+1 방식으로 1개의 예비 용량을 갖도록 설계해서 모의 실증 시험을 필한후 현장에 적용하였다. 각종 성능시험을 IEEE 421.4 기준에 따라 실시하여 만족스런 결과를 취득하였다[6]. 명실공히 선진국과 어깨를 나란히 하는 발전기 여자시스템이 국산 개발된 것이다. 본 논문에서 지면상의 한계 때문에 모든 설계 알고리즘을 모두 기술하지 못한점이 아쉬움으로 남고 실증 적용 모델에 대한 현장 주파수 응답 특성 분석이 이루어지지 못했는데 다른 논문에서 보완이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] R.C. Schaefer, "Application of Static Excitation Systems for Rotating Exciter Replacement," IEEE Industry Applications Magazine November/December 1998.
 [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control," McGraw-Hill Inc., 1994.

[3] I.M. Canay, "Investigation of the rotor overvoltage in synchronous machines with rectifier excitation," Electric Machines and Electro Mechanics, Vol. 3, pp. 21-38, 1978.
 [4] I.M. Canay, J.-J. Simond, "Rotor overvoltage and inter-tum voltages in the field winding of synchronous machines. Brown Boveri Rev. 67 1980(9) 516-523.
 [5] ANSI C50.13-1965 Cylindrical Rotor Synchronous Generators.
 [6] IEEE 421.4-1990 Guide Specification for Excitation Systems.
 [7] 류호선, 임익헌, "여자시스템과 동기발전기의 회전자 권선에 발생하는 과전압에 대한 보호회로 연구", 전력전자학술대회 논문집 1997.188~192..

◇ 저자소개 ◇

김 경 철 (金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982 국방과학연구소 연구원. 1982~1984 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991 한국전기연구소 선임연구원. 1991~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터 공학부 부교수.

임 익 헌 (林翼憲)

1958년 7월 25일생. 1980년 건국대학교 전기공학과 졸업. 1979~1988년 한전서천화력근무. 1994~1996 홍익대학교 전기공학과 석사. 1996~현재 동 대학원 박사과정. 1988~현재 한전 전력연구원 발전연구실 I&C그룹 책임연구원.