

# 원전 발전기 디지털 제어시스템 개발 I (1차년도 중간보고서 요약)

신만수\*, 임익현\*, 이주현\*, 류호선\*, 이병구\*\*, 정태원\*\*\*  
한전전력연구원\*, 맥스파워(주)\*\*, 충남대학교\*\*\*

## Development of digital excitation system in nuclear power plant I

Shin Man-su\*, Lim Ick-hun\*, Lee Ju-hyun\*, Ryu Ho-seon\*, Lee Byeong-gu\*\*, Jeong Tae-won\*\*\*  
KEPRI\*, Maxpower\*\*, Chung-nam National University\*\*\*

**Abstract** - The core control equipment is made by multi redundancy at present, as advanced digital techniques appear. Especially MMI(man to machine interface) is developing the availability and diagnostics of the control system. This project is aim to retrofit nuclear power plants operated more than 15 years or to apply newly built nuclear power plants.

### 1. 서 론

선진 외국의 발전기 제어시스템 제작사인 GE, Siemens-Westinghouse, BaslerElectric 등에서는 1990년대 중반부터 디지털 제어시스템을 개발 및 상용화하였으며, 국내에서는 GE사 또는 지멘스웨스팅하우스사가 신규로 건설한 발전소를 중심으로 디지털 발전기 제어시스템이 설치되어 운전 중에 있다. 이들 시스템은 모두 제작사의 고유 모델로 하드웨어 및 소프트웨어가 개방형 구조와는 거리가 멀고 유지정비 기술까지도 제작사에 전적으로 의존적이다.

한편 국내에서도 1994년 5월에 300MW급 아날로그형 발전기 제어시스템을 자체 개발 및 실증적용하였으며 2001년 6월에는 3중화 디지털 발전기 제어시스템을 개발하여 400MW급인 화력발전소에 적용하여 현재까지 성공적으로 운전 중에 있다. 그 뒤로 5기가 추가로 현장에 적용되어 운전 중에 있다. 그런데 아직 원자력의 까다로운 품질요건 등으로 현장 적용하지 못하고 있어 그러한 요건을 갖추기 위한 일환으로 본 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 1차년도에 진행되었던 내용을 정리하여 수록하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 적용 예정 원전 발전기 제어시스템

계자 회전형 교류여자 형식으로 1977년에 GEC에서 제작한 시스템으로 제어카드 사용 연산 회로는 연산증폭기 중심의 아날로그 회로를 사용하여 이중 채널 상시 운전 형식을 취하고 있으며, 모델 형식은 GEC ZVA이다.

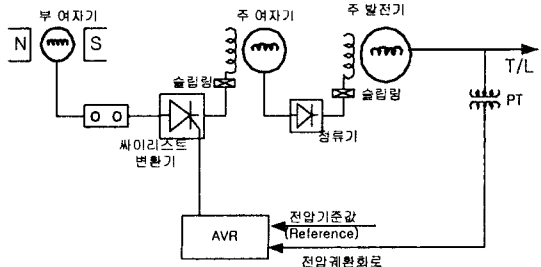


그림 1. 회전 계자형 교류 여자 형식  
그림 1은 적용 예정인 발전기 제어시스템의 개략도이며 주요 기능은 다음과 같다. 자동전압설정기(90R)의

제어 범위는 발전기 단자전압의 0.85-1.1[p.u.]이며 전압 제한 신호는  $\Delta-\Delta-Y$  변압기를 사용하여 12 필스(6상 bridge)로 만들어진다. 전 계통은 양 채널로 똑같은 제어·보호 및 지시기능을 가진 설비이며, 만약 한 채널이 상실되었을 때 나머지 한 채널이 독자적으로 발전기 소 부하운전할 수 있는 용량으로 되어 있다. 어떤 이유에 의해서 양 채널 모두 자동기능이 상실되었을 때에는 수동제어가 가능하도록 되어 있다. 자동운전모드와 수동운전모드간 전환시 양 제어부간의 편차 신호에 의해 발전기 단자전압 동요를 방지하기 위하여 수동추종회로가 설치되어 있으며 발전기 출력을 측정하여 유효출력에 따른 저역자 무효전력제한신호를 발생시켜 자동전압조정부에 제한신호로 입력이 되어 이 신호에 의해 발전기 여자가 떨어지는 것을 방지하게 된다.

#### 2.2 발전기 제어시스템 제어·제한·보호 알고리즘 기능블록 개발

여기서는 기존에 개발된 기본적인 제어·제한·보호 알고리즘을 제외한 본 연구에서 새롭게 개발 중에 있는 알고리즘 등에 대해서 기술하겠다.

##### 2.2.1 다중 입력을 갖는 디지털 트랜스듀서 소프트웨어 설계

먼저 발전기 제어시스템의 입력부의 신호를 검출하는 변환기로 사용될 디지털 알고리즘과 이들 알고리즘의 구현방법은 지금까지 널리 알려진 3상 순시전압값을 이용하여 DQ0 변환을 이용한 방법과 디지털 계전기 알고리즘으로 사용되고 있는 DFT(Discrete Fourier transformation) 알고리즘을 들 수 있다. 본 연구에서 채용될 방법은 DQ0 방법보다 정확도는 다소 떨어지지만 고조파에 대한 영향이 없고 시스템의 불확실성에 다소 강건한 DFT 방법이 약간의 기법을 가미하여 사용될 예정이다.

##### 2.2.2 발전기 계자 과전류의 지능적인 억제 방안

과여자 제한기는 비례·적분기로 구성된 제어기로써 과전류 제한기로 동작하며 발전기가 계통 병해된 오프라인 상황에서는 발전기와 발전기에 연결된 각 변압기에 과자속이 발생하는 것을 방지하고 계통 병입된 온라인 상태에서는 과열에 의한 계자 권선의 손상을 방지하는데 그 목적이 있다. 과여자 제한기는 두 개의 설정값을 갖고 계자 전류를 일정값 이하가 되도록 상황에 따라 적당한 값을 선택하여 적용하는데 두 개의 설정값들은 오프라인 과전류 제한치와 온라인 과전류 제한치이다.

과여자 보호기능은 온라인과 오프라인 상태에서 각각 동작하는 디지털 보호계전기 알고리즘으로 구현되어 있다. 오프라인 상황 하에서 동작하는 과여자 보호기능의 주목적은 계자 과자속으로부터 발전기를 보호하는데 있고 V/Hz 보호 기능이 우선하여 동작한다. 따라서 오프라인 과여자 보호기능은 I2t 기능을 갖도록 설계되어 있으며 제한치와 트립치를 갖고서 동작한다. 온라인 과여자의 목적은 보호기능의 목적은 과전류로 인하여 발생하

는 과열로부터 발전기의 계자를 보호하는데 있다. 온라인 보호 기능의 보호 특성은 ANSI C50.13-1989 계자 단시간 열적 과부하에 명시된 값을 따랐다.

### 2.2.3 수동 전압설정기 제한 운전

시스템이 수동모드로 전환되었을 때 안정 운전 여유를 넘어서서 부속여자가 될 수 있는데 수동 전압설정기는 이것을 제한할 필요가 있다. 만약 어떤 이유에서든지 자동모드에서 수동모드로 전환되었을 때 수동 전압설정기의 대기상태 신호 수준이 안정 한계나 혹은 그 이상으로 되어 있을 수 있다. 이때 수동 전압설정기의 설정값이 유효출력이 우세한 제한신상에 있게 되면 수동 전압설정기를 증가시키고 안정영역에 도달하면 그 값을 유지한다. 역으로 만약 유효출력이 상대적으로 적은 영역에서 추종이 필요하면 제한한계까지 수동 전압설정기 값을 작아진다.

### 2.2.4 발전기 고정자 전류 제한

발전기 고정자 제한기(Stator current limiter)는 고정자 전류를 감지하고 고정자의 과열을 막기 위해서 고정자 전류를 제한한다. 고정자 제한기는 FCR(Field current regulator) 모드를 제외하고 모든 모드에서 작동된다. FCR 모드에서는 시스템은 고정자 전류가 과전류 상태가 되었을 때 경보만 발생시킬 뿐 고정자 전류 제한을 하지 않는다. 두개의 고정자 전류 제한기 수준은 높은 수준과 낮은 수준이 있다. 발전기는 낮은 수준의 고정자 전류 제한기 수준에서는 연속적으로 운전되지만, 높은 제한기 레벨에서는 프로그램된 시간동안만 운전된다.

### 2.2.5 과전압 제한기

과전압 제한기는 동기기 단자전압을 안전한 값으로 제한하기 위해서 사용될 수 있는데 이미 V/Hz 등의 보호 기능에서 보호협조가 이뤄질 수 있기 때문에 수동 모드 (FCR 모드 등)에서 운전될 때만 이 제한기를 사용할 것인지는 좀더 검토가 필요한 부분이라고 할 수 있겠다. 만약 적용된다면 이 제한기는 동기기 정격전압의 110-113[%]에서 동작되도록 하고 대응되는 과전압계 전기는 보통 정격전압의 130[%]의 순시 정정치를 갖고 정격전압의 115[%] 정도에서는 반한시 특성을 갖도록 할 예정이다.

### 2.2.6 지능형 진단 및 경보시스템 알고리즘 개발

정상운전 유형을 벗어난 운전 및 제어 변수의 비교 종합을 통한 지능형 발전기 제어시스템 진단 결과 알고리즘을 개발한다. 발전기 운전을 감시하기 경보시스템 구성은 현장의 입출력을 처리하는 시스템과 전기적인 신호와 현장의 식위치류, 차단기류와 보호계전기로부터 입력되는 접점을 실시간으로 처리하는 것으로 구현된다. 이러한 방식으로 취득된 데이터를 바탕으로 운전원에게 정상적인 운전조건에서 벗어나는 조건에 대해 정보를 줄 수 있게 된다. 이러한 감시 시스템은 시스템 내에서 정의된 절차에 따라 다수 입력 신호에 대해서 건전성을 자동적으로 비교·평가함으로써 이루어진다.

### 2.2.7 지능형 계자접지 감시회로 개발

발전기 접지의 목적은 인축의 안전 뿐만 아니라 기기의 손상을 방지하는데 있으며, 고장동안에 과과전압을 제한하고 기기 내에서 지락을 감지하기 위한 수단을 제공하기 위한 것이다. 모든 접지와 접지보호에 방법에 관한 모든 것은 IEEE Std C62.92-1989와 IEEE Std C37.101-1993에 근거를 두고 있다. 발전기의 계자회로는 일반적으로 600[V]의 접지되지 않은 직류시스템이다. 계자회로 내의 한 지점의 접지는 발전기의 운전에 영향을 주거나 즉각적으로 발전기 시스템에 손상을 유발하지는 않지만 첫 번째 지점의 접지는 두 번째 지점의

지락을 유발할 가능성을 크게 한다. 그 이유로는 계자회로 축의 절연이 나빠졌으며 첫 번째 접지로 인해 접지전위를 확립하였기 때문이다.

일반적으로 발전기 계자 접지에 의한 트립은 잘 사용되지 않으며 일부 사용자들이 트립으로 사용할 뿐 대다수는 경보로써 사용하는 것을 선호한다. 그러므로 첫 번째의 계자 접지 경보를 해소한 이후 두 번째의 계자접지의 위험을 감수하고 운전하는 경우가 생기게 된다. 그렇다 보니 안전하고 위험이 없는 계자 접지 검출방식을 고려하게 되어 그림 3과 같은 삼입방식을 검토하게 되었다. ±15V의 구형파 신호가 coupling network를 통해서 계자로 인가되게 되며 인가된 신호는 계자의 커패시턴스 성분으로 인해 원래의 구형파에서 변형이 되어 왜곡된다. 주사신호의 주파수 조정은 발전기 계자의 커패시턴스 성분을 보상하기 위하여 0.1-1[Hz] 정도로 설정되며 입력된 주사신호와 왜곡되어 받아들여진 신호를 분석하여 계자의 절연저항을 계산하게 된다. 접지저항의 정정치는 저항단위를 기준으로 설정되는데 일반적으로 20[kΩ]을 경보로 사용하며 5[kΩ]을 트립이나 위험수준 경보치로 사용한다. 삼입방식을 이용한 기술은 전통적으로 사용되었던 전압을 이용한 기술보다 감도와 안정성 면에서 우수한 수준이며, 부가적으로 디지털 기술을 적용하게 되면 계자의 절연저항을 실시간으로 감시할 수 있게 된다. 그래서 시간에 따라서 절연이 나빠지는 상태를 감시할 수 있게 된다.

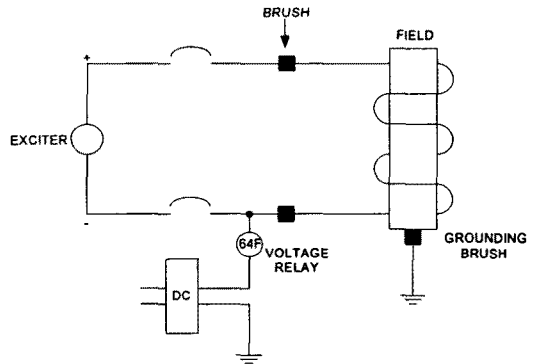


그림 2. 계자 접지 감시회로(기존)

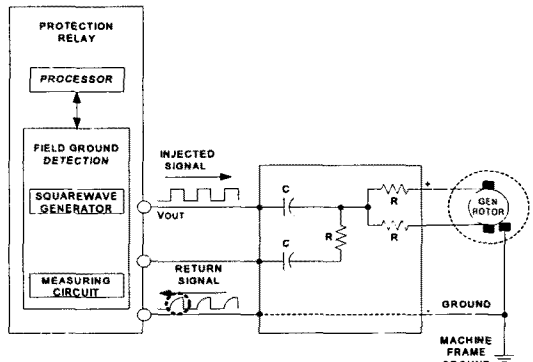


그림 3. 삼입방식의 계자 접지 감시회로

### 2.3 8,000시급 위상제어정류기 기본 설계

정지형 발전기 제어시스템의 정류기 각 부분의 설계시 주요 고려할 사항은 여자변압기 규격, 싸이리스터 규격, 스너버·교류측 필터, 직류 필터를 겸한 축전압 억제기, 계자 방전저항, 초기 여자용 변압기 등이다. 주요 구성은 Bridge 당 2000A를 정격으로 하고 원전의 특수성을 감안하여 3개 브리지가 모두 병렬 운전되는

N+2 구조로 설계되었다.

### 2.3.1 여자 변압기

여자 변압기의 정격 용량은 여자시스템 용량에 여유를 고려하여 설계한다. 변압기의 정격전압은 여자시스템의 과도특성을 고려하여 설정하는데 변압기 2차 전압을 결정하는 인자 중에는 여자시스템 頂上電壓이 있다. 이는 여자시스템이 과도 상태에서 발전기 계자회로에 공급할 수 있는 최대 계자전압을 말하며 수초 이하의 단시간 정격이다. 여기서는 일반 속용 여자시스템에 적용하는 배수인 무부하 계자전압의 5배를 기준으로 하였다.

### 2.3.2 싸이리스터 규격

여자시스템의 용량이 결정되면 스윗칭 소자에 대한 정격이 결정되어야 한다. 변압기의 용량과 규격이 결정되어 있으므로 정격전압과 정격전류에 여유를 두어 스윗칭 소자를 선정하게 되고 전압정격은 교류입력전압의 최대치의 3배 이상으로 하는 것이 일반적이다. 다음으로 싸이리스터 소자의 정격 전류를 결정한다. 정류기를 N+2 방식으로 3개 브릿지가 상시 운전되고 2개가 예비로 운전하는 구조로 설계하는데, 정류기에 발생하는 열은 평균전류와 관련이 있으므로 그에 따라서 방열판 열용량을 선정한다.

### 2.3.3 스너버 · 교류측 필터 선정

최악의 경우 선간전압이 최대일 때 전류현상이 일어나는 경우이므로 이때를 기준으로 설계한다. 정상적으로는 선간 최대전압의 1.4~1.6배 정도로 스너버 설계를 하지만 적용예정인 원전의 경우는 3배로 설계하여 과전압으로부터 싸이리스터를 보호할 수 있다. 나머지는 교류측 필터에서 완충하기로 한다. 교류측 필터는 스너버와 똑같은 원리이나 고려해야 할 점은 정류기가 병렬로 연결되어 있다는 것이다. 따라서 역회복 전류에 대한 충분한 검토가 필요하다.

### 2.3.4 직류 필터를 겸한 축전압 억제기

축전압은 자기회로의 비대칭 등 여러 가지 원인에 의해서 발생되고 있다. 특히 직접여자방식의 common mode 전압에 의한 축전압을 제거하기 위해 축전압억제기를 설치하는데 직렬로 저항과 커패시턴스를 연결하여 접지를 기준으로 대칭으로 연결하므로 이는 직접 계자 접지계전기와 직접적 관련을 갖는다.

### 2.3.5 계자 방전저항

ANSI/IEEE C37.18-1979에 따라서 방전저항 및 차단기를 선정한다. 보통 계자 방전저항은 계자저항의 1~3배 정도로 설계하는 것이 보통이다. 적용 대상 원전의 경우 Torsional Torque를 고려하여 계자저항의 3배로 설계하였다.

### 2.3.6 초기 여자용 변압기

발전기 정격전압의 30% 정도를 공급할 수 있도록 초기 여자변압기를 설계한다. 이때의 계자전류는 발전기 제작자가 제공한 무부하포화곡선을 참고한다.

### 2.4 3중화 제어기 하드웨어 제작 사양 및 선정

선정된 제어기는 외국에서 개발 · 생산한 고장 허용 제어장치로써 하나의 시스템 속에 3개로 분리된 병렬 제어시스템과 광범위한 자기진단 기능을 집적화하고 있으며, 단일 부품의 고장으로 인한 고장파급 확산을 방지도록 설계된 것이 그 특징이다.

### 2.4.1 디지털 신호처리 시스템 제작 사양

본 시스템은 기존 개발품(KDR-2000)의 느린 속도를 해결하기 위해 실효치, 주파수와 위상을 측정하고 유 · 무효전력을 연산하며 전력계통안정화장치 알고리즘을 실

행하여 제어기로 아날로그 신호를 보내는 기능을 한다. 별도로 사용한 신호처리용 프로세서에서는 태스크가 신호처리 1개 부분이기 때문에 RTOS를 사용하지 않고 firmware로 작성되었다. 주요 기능은 아날로그 입력신호인 발전기 단자전압, 발전기 전기자 전류, 계자 전압과 계자 전류 신호를 받아서 주 제어 프로세서에 단위법으로 보내는 역할을 하고 1,800[Hz]로 데이터를 샘플링하여 연산하게 되어 있다.

### 2.5 연구개발 품질문서 개발

본 연구에서 생산되어야 하는 각종 문서는 사업계획서에 명기된 문서를 대상으로 작성한다. 또한 모든 설계 문서는 설계관리절차서에 따라 작성, 검토, 승인한다. 원자력분야에서 적용하고 있는 품질관리 관련 코드와 규격을 만족할 수 있도록 계획을 수립하고 품질활동을 수행한다. 고장 또는 결함 발생시 전력설비의 운영에 영향을 주거나 대규모의 복구 작업이 필요한 품목 또는 용역이 신뢰성 등급인 "R"에 해당된다. 본 과제의 결과물이 바로 그 "R" 등급에 해당되어 그에 맞게 품질관리 및 문서를 개발하고 있다.

### 3. 결 론

기존에 전력연구원에서 개발하여 상용화한 KDR-2000 기능을 향상시키고 원전에 적용가능하게 품질관리 문서를 개발하기 위한 것이 본 연구의 핵심이다. 그래서 1차년도에는 국내 가동 중인 원전 아날로그 발전기 제어시스템에 관한 자료를 조사하여 분석하였으며, 각종 학술논문 등에 발표된 발전기 제어시스템 제어 · 제한 · 보호 알고리즘 자료 등을 수집하여 분석하였다. 그것을 근간으로 하여 그 알고리즘(발전기 계자 과전류 억제 방안, 수동 전압설정기 제한 운전, 발전기 고장자 전류 제한, 과전압 제한기 등)을 기능블록화하였다. 기존 개발품에서는 임출력 처리를 아날로그 방식으로 하였는데 본 개발품에서는 많은 검증을 거쳐서 디지털 신호 처리 방식(DSP:digital signal processing)을 채용할 예정인데, 시스템 연산속도를 높이는데 크게 기여할 것으로 사료된다.

향후 2차년도에는 1차년도에 구매선정된 3중화 제어기와 1차년도에 기본설계가 완료된 8,000[A]급 정류기를 제작하여 성능평가 및 검증작업을 수행할 예정이다. 향후 발표되는 논문에서는 그러한 내용들이 수록될 수 있을 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 임익현 외, "원전 발전기 디지털 제어시스템 개발 1차년도 중간보고서", p69 95, p115-135, 2004
- [2] 노백식, "자동전압조정시스템", 한국수력원자력(주) 원자력 교육원 교육교재, p131-153, 1995
- [3] ANSI C50.13-1989, "Rotating Electrical Machinery Cylindrical Rotor Synchronous Generators", p9, 1989
- [4] IEEE Std C37.102 1995, "IEEE Guide for AC Generator Protection", p46-50, 1995
- [5] Charles J.Mozina, "Advances In Generator Field Ground Protection Using Digital Technology", 0-7803 7482-7/02/\$17.00 © 2002 IEEE, p126-130, 2002
- [6] ANSI/IEEE C37.18 1979, "IEEE Standard Enclosed Field Discharge Circuit Breakers for Rotating Electric Machinery", p20 21, 1979

본 연구는 산업자원부 전력기반조성사업 지원으로 수행되었음.