

# 발전소용 여자제어시스템 기술

김국현\*, 이종무\*\*, 윤재용\*\*\*

(\* 한국전기연구소 발전제어사업팀장, \*\*한국전기연구소 선임연구원, \*\*\* 한국중공업 발전기설계실 과장)

## 1. 서 론

여자제어시스템이라는 용어는 IEEE Std 421.2 (1990)에서 기술하는 바와 같이 여자시스템 단독의 성능과 발전기, 전력계통 및 여자시스템이 조합된 성능을 구별하기 위하여 사용한다. 필자도 가끔 용어의 적용을 혼동하는 여자시스템과 여자제어시스템의 차이점을 그림 1의 여자제어시스템 블록도에 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 여자시스템은 일반적으로 자동전압조정장치(AVR : Automatic Voltage Regulator)라고 부르는 조절기(Regulator)와 이 조절기의 출력을 입력받아 발전기의 계자회로에 필요한 여자전류를 공급하여 주는 장치인 여자기(Exciter)로 구성되며, 여자제어시스템은 위에서 설명한 바와 같이 발전기, 전력계통 및 여자시스템이 조합된 시스템을 말한다.

여자제어시스템의 형태는 발전소 운용 방법에 따라 여러 형태가 있으나 여기서는 대표적인 두 가지 방식에 대해 나타내고 그 외의 방식들은 IEEE Std 421.1(1986)을 참조하기 바란다.

그림 2에 나타난 방식은 정지형 방식으로서 자기 자신이 발전한 발전기의 전압을 전력용 변압기를 통하여 제어정류기의 입력으로 하여 그 출력을 발전기의 계자회로에 연결하여 발전기에 필요한 여자전류를 공급하여 주는 방식으로 정정시간(settling time)이 빠르다는 장점을 지니고 있다. 그림 3에 나타난 방식은 Brushless Type의 간접여자방식으로서 영구자석 발전기(PMG)의 전압을 제어정류기의 입력으로 받아 그 출력을 교류여자기(AC Exciter)의 계자회로

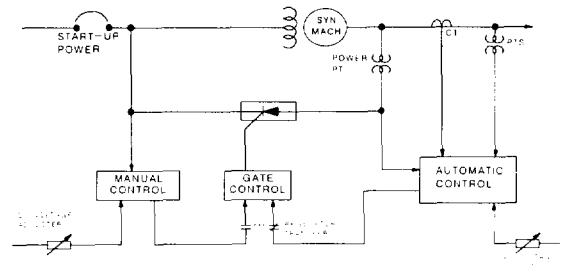


그림 2. Potential Source-Rectifier Exciter Employing Controlled Rectifiers

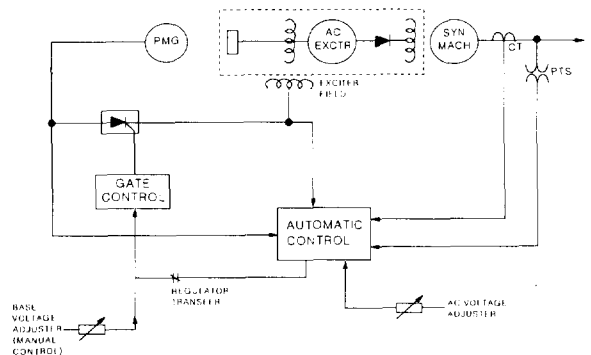


그림 3. Alternator-Rectifier Exciter Employing Rotating Noncontrolled Rectifiers (Brushless)

로 연결하여 교류여자기에 필요한 여자전류를 공급하고 이 교류여자기의 출력을 정류기로 정류하여 발전기의 계자회로에 필요한 여자전류를 공급하여 주는 방식으로서 그림의 점선부분이 회전하고 있는 회전체이며, 발전기에 필요한 여자전력을 영구자석으로부터 교류여자기를 거쳐서 공급하는 2단 증폭을 행하고 있기 때문에 정정시간이 비교적 느리다. 여자제어시스템이 원리적으로는 단순히 회전하고 있는 발전기의 여자전류 혹은 여자전압을 제어함으로서 발전기의

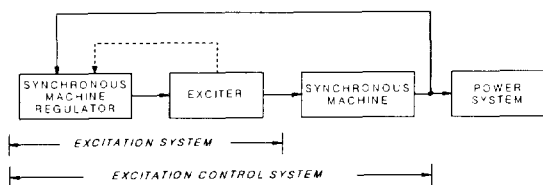


그림 1. 여자제어시스템의 블록도

단자전압을 제어하는 기능을 하고 있지만, 이것이 터빈(원동기)의 기계적인 입력을 전기적인 출력으로 변환시켜주는 발전소의 기계-전기 에너지 변환 및 전기에너지 전송의 문제와 결부될 때는 전력계통 상태의 과도적/정상적 상태 변화 이외에도 예측할 수 없는 발전소 내부의 고장 및 여자제어시스템 자체의 부분적 고장에 대해서도 여자제어시스템은 제어성능, Fault Tolerant System, Fail Safe System 등을 보장할 수 있어야 한다.

발전기의 여자기(Exciter)는 발전기 정격출력의 0.5~0.6% 전력을 필요로 한다.

Brushless Type과 같은 간접여자방식의 경우에는 교류여자기 여자전력은 교류여자기 정격출력의 2~3% 전력이 필요하며 보통 영구자석 발전기 등을 이용함으로써 취급하기는 용이하나 발전기 제작단가의 상승과 전압제어의 속도성 상실이라는 문제가 발생된다.

발전기의 구조는 이론적으로는 계자가 회전하는 회전계자형과 전기자가 회전하는 회전전기자형이 있으나 실용상 회전계자형이 대부분이다.

## 2. 여자제어 시스템의 요구성능

발전소에 설치·운용되는 여자제어시스템의 요구성능은 크게 제어기능, 보호 및 제한기능, 감시 및 진단기능으로 구분된다.

### 2.1. 제어기능

여자제어시스템에는 다음과 같은 제어기능들이 있다.

- 자동전압 조정기능(AVR:Automatic Voltage Regulator)
- 수동전압 조정기능(MVR:Manual Voltage Regulator)
- 자동 무효전력 조정기능(AQR:Automatic Reactive Power Regulator)
- 자동 역률 조정기능(APFR:Automatic Power Factor Regulator)

자동전압 조정기능은 발전기의 단자전압을 Feedback 받아서 발전기의 부하에 관계없이 발전기 단자전압을 일정하게 유지하는 기능이며 수동전압 제어기능은 운전자가 발전기의 단자전압을 보고 수동으로 조작하여 단자전압을 일정하게 유지하는 기능으로서 이 경우 여자전압이나 혹은 여자전류를 Feedback 받아서 폐회로를 구성한다.

자동제어 루프에서의 이상, 예를 들면 발전기 단자전압 Feedback용 PT의 고장 등이 발생하면 여자제어시스템의 운전모드가 자동에서 수동으로 절체되고 또한 이때 Bumpless 제어가 되어야 하기 때문에 자동 및 수동 지령치들이 자동으로 상호 추종되어 자동에서 수동으로 혹은 수동에서 자동으로의 절체시에 Bump가 발생하지 않아야 한다.

표 1. Range of Excitation Control System Small Signal Dynamic Performance Indexes

Performance Index	Range of Expected Values
Excitation system gain	30pu to 800pu
Gain margin	2dB to 20dB
Phase margin	20° to 80°
M <sub>p</sub>	1 to 4 (0 to 12dB)
Bandwidth	0.3Hz to 12Hz
Overshoot	0 to 80%
Rise time	0.1s to 2.5s
Settling time	0.2s to 10s
Damping ratio	0 to 1

자동 무효전력 조정기능은 발전기가 전력계통에서 분담해야 할 무효전력을 일정하게 유지하는 것이고 자동역률 조정기능은 발전기의 유효전력과 무효전력의 비를 일정하게 제어하는 기능으로서 거의 비슷한 개념을 가지고 있다.

여자제어시스템에 요구되는 소신호 동특성 지수들의 값은 IEEE Std 421.2(1990)에서 표 1과 같이 권고하고 있다.

### 2.2. 보호 및 제한기능

발전기의 보호 및 제한기능을 알기 위해서는 발전기의 구조 및 원리, 발전기와 전력계통간의 상호 미치는 영향 등에 관한 최소한의 이해가 필요하며 발전기 구조, 전력계통, 발전기 능력곡선과 관련하여 살펴본다.

#### 2.2.1. 구조 관련 보호 및 제한기능

대형 발전기의 계자권선에는 수백 Volt의 직류전압이 인가되고 수천 Ampere의 직류전류가 흐르며 전기자 권선에는 약 20KV의 교류전압이 유기되고 정격 출력시 수천에서 수만 Ampere의 교류전류가 흐른다. 따라서 발전기의 계자와 전기자는 권선에 유기되는 전압에 대한 절연설계가 이루어져야 하며 또한 대전류를 흘릴 수 있도록 충분한 냉각설계가 뒷받침되어야 한다.

계자와 전기자 철심은 수소가스에 의해 냉각되고 전기자 권선은 도체 내부에 순수(H<sub>2</sub>O)를 흘려서 냉각시키고 있으며, 냉각성능은 정격운전 범위에서 약간의 여유를 가지도록 설계되어진다.

그러므로 과도한 계자전류 또는 전기자 전류의 흐름은 발전기의 손상을 초래한다. 한편, 계자전류가 너무 적어서 발전기가 진상운전될 경우에도 전기자 철심의 양단에 와전류가 발생하여 부분적 과열에 의한 발전기 손상을 가져올 수 있다.

2.2.2. 계통관련 보호 및 제한기능

발전기와 부하단 사이의 유효전력에 관한 관계식은 다음과 같다.

$$P = \frac{EV \sin \delta}{X_S} \quad [W]$$

여기서,

- P : 유효전력 [W]
- E : 발전기 내부 유기 기전력 [V]
- V : 발전기 단자전압 [V]
- X<sub>S</sub> : 발전기의 동기 임피던스 [ $\Omega$ ]
- $\delta$  : 발전기 내부 유기 기전력과 단자전압 사이의 위상차 [ $^{\circ}$ ]

이다.

터빈에서의 기계적 입력을 전기적으로 송전하기 위해서는 발전기의 내부 유기 기전력 E가 단자전압 V에 비해서 어느 정도 커야 하며 그렇지 않으면 내부상차각  $\delta$ 가 커야 하므로 이런 경우에는 발전기의 과도 안정도가 극히 저하하게 된다. 그러므로 진상범위에서의 운전은 발전기 및 전력계통의 안정도 측면에서 제한되어야 한다. 실제 운용 상태에서 계통전압 혹은 발전기 단자전압이 어느정도 변화되는 값이라는 관점에서 볼 때 내부 유기 기전력 E값을 어느 일정값 이상으로 유지하는 형태의 제한은 바람직하지 않다는 것을 알 수 있다.

2.2.3. 발전기 능력곡선 관련 보호 및 제한기능

발전기의 능력곡선과 각종 보호 및 제한 영역들을 그림 4에 나타낸다.

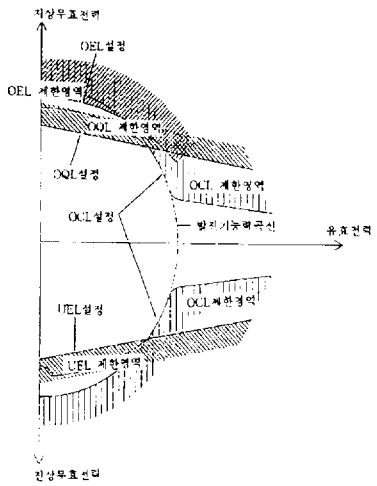


그림 4. 발전기의 능력곡선과 보호 및 제한영역

그림에서 횡축은 유효전력의 크기를 나타내고 종축은 무효전력의 크기를 나타낸다. 그림에서 OCL(Over Current Limit) 설정은 전기자 권선의 전류 능력이며 따라서 원점에서 정격 출력 상태와의 차를 반지름으로 하는 반원으로 한다. OQL (Over Reactive Power Limit)은 과도한 지상 영역에서의 운전을 제한하고 UEL(Under Excitation Limit)은 과도한 진상 영역에서의 운전을 제한하여 전기자 철심 보호 및 과도상태에서의 안정도 저하를 제한하고 있다. OEL (Over Excitation Limit)은 과도한 계자전류를 제한하는 값이므로 P-Q 평면에 표시하는 것이 이상하지만 등가적으로 나타내었다.

2.3. 감시 및 진단기능

여자제어시스템의 감시 및 진단기능은 보호 및 제한 기능과는 별도로 발전기 및 여자시스템의 운전영역 및 상태를 파악하고 보호 및 제한기능을 지원하는 기능 그리고 여자시스템 자체를 보호하는 기능들이 있으며 열거하면 다음과 같다.

- 발전기 단자전압
- 발전기 전류
- 계자전압
- 계자전류
- Main GCB status
- 계자 지락상태
- Power Supply 상태
- 냉각팬 상태
- Thyristor Temperature
- 전력용 Fuse 상태
- 계자회로 차단기 상태
- V/Hz 제한
- 여자상실(Loss of Excitation) 보호
- 여자용 변압기 상불평형 보호
- 발전기 과전압 보호
- 계자온도

3. 여자제어시스템의 설계

3.1. 전반적 설계

여자제어시스템의 구성방안이 여러 가지가 있으므로 여기서는 그림 2와 같은 정지형 여자제어시스템을 대상으로 한다. 발전소의 3대 제어설비 즉, 보일러, 터빈, 발전기중 하나인 발전기의 제어설비인 여자제어시스템은 높은 신뢰도를 요구한다. 따라서 시스템의 전반적인 설계를 하기 위해서는 발전기의 용량, 전력계통에 미치는 영향 등을 고려하여 시스템을 단일화 할 것인가, 2중화할 것인가, 아니면 3중화 할 것인가를 결정하여야 한다. 이러한 Fault Tolerant

System의 개념은 시스템의 일부 고장이 전체 시스템의 성능에 영향을 미치지 않고 운용될 수 있어야함을 의미하며 Fail Safe의 개념은 시스템의 일부가 고장나서 기본적인 성능을 달성하지 못할 때 제어대상기기 및 자기자신에 대한 사고 과급의 방지 및 안전성을 확보하기 위한 개념으로서 일반적인 접근방식보다는 제어대상기기 및 자체 기기의 특성에 따라 설계하는 기술적 측면이 강조된다. 여자제어시스템에의 적용예로서는 제어정류기의 Redundancy 운용, 제어기의 2중화 혹은 3중화 등이 Fault Tolerant System의 설계 개념이고, 자체기기의 보호를 위한 Field Braker Trip이나 사고시 터빈의 Shutdown 등은 Fail Safe 설계 개념이라 할 수 있다.

### 3.2. 상세 설계

여자제어시스템을 상세하게 설계하기 위하여 앞에서 설명한 전반적인 설계를 기본 개념으로 하여 아래와 같은 사항들을 고려해야 한다.

#### 3.2.1. 발전기 관련 자료수집

발전기의 무부하 포화곡선, V곡선, 능력곡선, 동기 임피던스, 개로 시정수 등 제정수, 그리고 발전소의 현장조건(온도, 습도, 해발)등의 자료를 수집하여 분석하여야 한다.

#### 3.2.2. SPEC. 결정

발전기 관련 자료로부터 환경조건을 결정하고 운전모드(자동, 수동), 자동 및 수동의 경우 운전범위, 제어 정밀도, 응답비등을 결정한다.

#### 3.2.3. 여자용 변압기 용량 산정

응답비로부터 여자용 변압기의 전압 정격을 결정하고, 또한 정격 계자 전류와 고조파 성분을 고려하여 정격 용량을 결정하고 % 임피던스를 선정한다. 또한 전력용 변압기이므로 상불평등 보호시스템에도 충분한 배려를 한다.

#### 3.2.4. Power Bus 설계

발전기의 여자전류가 수천 Ampere에 달하므로 이 전류를 충분히 흘릴 수 있도록 Bus를 설계하고 또한 Busway를 고려하여야 한다. 제어정류기가 다수대 병렬운전될 경우 Busway를 적절히 선정함으로써 제어정류기간 불평형을 어느정도 해소할 수 있다.

#### 3.2.5. 계측용 PT/CT

제어정밀도를 만족할 수 있는 정밀급과 변환비, 부담등을 결정한다.

#### 3.2.6. 제어정류기 설계

제어정류기의 출력전류가 수천 Ampere에 달하고 또한 시스템의 신뢰성을 높이기 위하여 제어정류기의 운전방법

을 결정하고 단위 용량을 결정하여야 한다.

단위 용량으로부터 Thyristor cell 선정, 냉각방식 선정, 냉각팬, Heatsink, Thyristor 보호용 Fuse의 용량을 선정하고 또한 제어정류기를 보호하기 위한 방안을 강구하여야 한다.

#### 3.2.7. 제어기 설계

여자제어시스템의 운전방법이 자동 및 수동으로 결정되면 자동제어루프 및 수동제어루프를 선정하고 수동운전 모드시 제어루프를 계자 전압으로 할 것인지 아니면 계자전류로 할 것인지를 결정하여야 한다. 또한 Fault Tolerant System을 구현하기 위하여 제어기를 2중화 할 것인지 3중화 할 것인지를 결정하여 다수대 제어기의 운용에 따른 문제점이 없도록 설계하여야 한다.

#### 3.2.8. 보호시스템 설계

여자제어시스템을 UEL, OEL, V/Hz, 지락, 여자상실, PT Failure, 여자용 변압기 상불평형등에 대한 보호시스템을 설계하여야 하며 어떠한 고장시 여자제어시스템을 자체적으로 Trip시킬 것인지 아니면 Trip을 요청할 것인지를 결정하여야 한다.

#### 3.2.9. 종합검토

앞에서 서술한 항목들이 설계가 되면 시스템 전체적으로 신호의 연동관계 등을 고려하여 종합적인 검토가 요구된다.

### 3.3. 여자제어시스템 다중화 설계 예

여러 형태의 여자제어시스템과 다중화 방안이 있으나 대표적으로 순수 국내기술로 한전 전력연구원과 한국전기연구소가 공동으로 국산개발하여 국내발전소에 적용하여 상업운전중인 아날로그형 2중화 제어시스템과 현재 최고의 성능과 기술력으로 높은 신뢰성을 가지고 있는 선진외국의 디지털형 제어시스템에 대하여 간략하게 설명한다.

#### 3.3.1. 국내 개발품

국산개발품을 설치하여 상업운전중인 국내 발전소는 300MW급의 간접여자방식을 채택하고 있어서 터빈에 의해서 회전자가 회전하면 영구자석 발전기(PMG)에 의하여 3상 교류전압이 발생되고 이 교류전압을 제어정류기로 입력하여 그 출력을 교류여자의 여자전류로 하며, 이때 발생된 교류여자의 3상 교류 전압을 3상 전파 정류기로 입력하여서 그 출력을 주 발전기의 여자전류로 취하는 구조로 되어 있다.

따라서 제어할 여자전류의 양은 교류여자의 여자전류만 제어하면 되기 때문에 제어정류기의 정격이 약 30KW 정도이면 되므로 제어정류기를 2중화하여 신뢰성을 높이고 있다. 자동 및 수동 운전모드를 제어하는 제어루프도 2중화 되어 있으며 제어기와 제어 정류기가 일대일로 연결이 되

면서 2중화되어 있다. 따라서 시스템이 정상적으로 운전될 때는 2중화된 제어시스템 모두 동작을 하여 발전기에 필요한 여자전류를 공급하며 어느 한쪽의 제어시스템에 이상이 발생하더라도 다른쪽 제어시스템으로 넘겨서 전체시스템의 운전이 지장이 없도록 설계되어 있다. 아날로그형으로 2중화하여 위에 기술한 바와 같이 동작하도록 하기 위해 각각의 제어기는 자기쪽에 연결된 제어정류기의 출력전류와 다른쪽의 제어기에 연결된 제어정류기의 출력전류를 Feedback 받는다. 이것이 아날로그형 2중화 제어시스템의 신뢰도를 높이기 위한 핵심적인 설계 개념이다.

3.3.2. 외국 개발품

최근, 여자제어시스템의 세계적인 추세는 정지형 방식과 디지털 방식으로 급속히 전환되고 있는 추세이다. 국내 신규발전소에도 이러한 방식으로 시스템 도입이 이루어지고 있으며 500MW 급 표준화력발전소에 많이 채택되고 있는 여자제어시스템에 대한 설계 개념을 살펴보면 다음과 같다. 500MW급 발전기의 계자정격은 약 2.4MW이므로 국산개발품의 경우와 같이 제어정류기를 2중화하기가 어렵다. 그러므로 제어정류기를 3+1의 개념으로 설계를 하여 3대가 계자정격을 감당할 수 있도록 하여 1대의 Redundancy를 가지도록 한다. 제어기는 제어정류기마다 설치되어 있으나 이중 2대가 Master가 될 수 있으며 나머지 한 대는 Protection을 담당하고, 또 한 대는 단순히 Follower로서 Master의 지령만 받도록 되어 있다. 전체시스템이 정상적으로 동작할 때는 Master 1이 필요한 모든 계산을 행하여 Master 2, Protection, Follower에게 제어 출력값을 지령하며, 만약 Master 1이 고장이 나면 Master 2가 Master가 되고 Master 1과 제어정류기가 시스템에서 분리되는 구조이다. Master의 고장관별을 Protection이 담당하고 있어서 이 부분에 병목현상이 있다. 여자제어시스템의 보호시스템은 Master 1, Master 2, Protection 3대의 제어기가 다중화되어 있다. 이 시스템의 특징은 제어정류기의 병렬운전 대수가 늘어나면 단순히 Follower만을 제어정류기에 추가하는 것으로서 시스템을 확장하는 것이 가능하다는 점이다.

참 고 문 헌

[1] 한국전력공사 기술연구원, "발전소용 자동전압조정장치 국산개발", KRC-91I-J01, 1994.  
 [2] IEEE COMMITTEE REPORT, "EXCITATION SYSTEM MODELS FOR POWER SYSTEM STABILITY STUDIES", POWER APPARATUS AND SYSTEMS, VOL. PAS-100, NO.2, PP.494-509, FEB. 1981.  
 [3] IEEE COMMITTEE REPORT, "EXCITATION SYSTEM DYNAMIC CHARACTERISTICS", PP.64-75, MAY. 1972.  
 [4] IEEE STANDARD, "TEST PROCEDURES FOR SYNCHRONOUS MACHINES", IEEE NO.115, MAR. 1965.  
 [5] IEEE STANDARD, "IEEE GUIDE FOR IDENTIFICATION, TESTING AND EVALUATION OF THE DYNAMIC PERFORMANCE OF EXCITATION CONTROL SYSTEMS", IEEE STD. 421.2, 1990.

[6] IEEE STANDARD, "IEEE STANDARD DEFINITIONS FOR EXCITATION SYSTEMS FOR SYNCHRONOUS MACHINES", IEEE STD. 421.1, 1986.  
 [7] IEEE STANDARD, "IEEE STANDARD FOR HIGH-POTENTIAL-TEST REQUIREMENTS FOR SYNCHRONOUS MACHINES", IEEE STD. 421B, 1979.  
 [8] JEC STANDARD, "SYNCHRONOUS MACHINES", JEC 114, 1979.  
 [9] EDWARD WILSON KIMBARK, "POWER SYSTEM STABILITY: SYNCHRONOUS MACHINES", DOVER PUBLICATIONS INC. NEW YORK, 1965.  
 [10] IEEE STANDARD, "IEEE GUIDE FOR THE PREPARATION OF EXCITATION SYSTEM SPECIFICATIONS", IEEE STD. 421.4, 1990.  
 [11] 關根泰次 著, "電力系統 解析論", オーム社, 1984.  
 [12] 三菱電機株式會社, "同期機", 東京電機大學 出版局, 1973.  
 [13] 일본전기학회 기술보고, "동기기 여자계의 사양과 특성", 제536호, 1995.

저 자 소 개



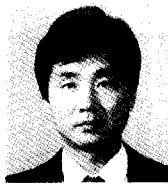
김국헌(金國憲)

1957년 3월 28일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~88년 영국 Oxford 대학교 Self-Tuning Lab. Post Doctor. 현재 한국전기연구소 발전제어사업팀장.



이종무(李鍾武)

1960년 2월 11일생. 1983년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 선임연구원.



윤재용(尹在鏞)

1955년 11월 26일생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 한국중공업 입사. 터빈 발전기 및 여자제어 계통 설계 및 제작 분야에 17년간 근무. 미국 GE사 여자제어 계통 연수. 현재 발전기 설계실 과장 재직중.