

# 회생형 이중화 PWM 방식의 디지털 여자시스템에 관한 연구

(A Study on the Dual PWM Digital Excitation System of Regeneration Type)

류호선\* · 이주현 · 임익현

(Ho-Seon Ryu · Joo-Hyun Lee · Ick-Hun Lim)

## Abstract

This paper discusses the control of generator field using dual IGBT PWM regeneration method to target brushless synchronous generator. If one of PWM bridges happens to fault, it transfers automatically and can be in charge of full load. Also it has an advantage of the operation which UPS connected in parallel with PWM bridge can supply power to excitation system in condition of main power loss. This PWM system supplies field current to generator in one quadrature operation, regenerates field coil energy to main power supplier in four quadrature operation. We designed, manufactured and applied the first trial product at J-power plant.

Key Words : PWM(Pulse Width Modulation) Converter, Excitation System, Regeneration Mode, Brushless Synchronous Generator

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적 및 방법

최근 첨단 디지털 기술의 발전으로 아날로그 제품이 디지털 시스템으로 교체되고 있으며, 또한 발전소 핵심 제어 설비를 이중화 하여 수년간 무고장 운전을 달성하는 발전소들이 증가하고 있다. 이러한 추세에도 불구하고, J-발전소는 중요한 제어설비중의 하나인 발전기 전압제어용 여자시스템을 단일 디지털 제어기

로 운용중에 있었으며, 정류기 또한 싱글로 구성되어 잦은 고장으로 발전소가 정지되는 경우가 종종 발생하고 있었다[3]. 이런 문제점을 개선하고 싶어하는 발전소의 요청으로 새로운 이중화 여자시스템을 설계하게 되었다. 새롭게 설계된 시스템은 계자전류를 제어하는 여자시스템 전력 변환부를 이중함은 물론 지금까지의 여자시스템 제어 정류기는 통상의 싸이리스터 위상제어 정류기를 사용하고 있었으나, IGBT(Insulated Gate Bi-polar Transistors)를 사용한 PWM 방식으로 동기 발전기 계자전류를 제어함으로써 회전형 여자시스템의 속응성을 향상시킬 수 있었다[5-6].

새롭게 설계된 여자시스템의 PWM 전력 변환부는 입력 전원부, 직류링크 그리고 변환 출력부로 이루어져 있는데, PWM 출력 전압은 직류링크 전압을 가지고 펄스(Pulse) 폭으로 IGBT를 통해 조정된다. IGBT

\* 주저자 : 전력연구원 선임연구원  
Tel : 042-865-5647, Fax : 042-865-5944  
E-mail : hsryu@kepri.re.kr  
접수일자 : 2010년 5월 12일  
1차심사 : 2010년 7월 5일  
심사완료 : 2010년 7월 7일

스위칭 주파수는 대략 1~2[kHz]이다. 이 출력은 조절된 전압은 회전 여자기 계자로 공급되고 이를 통해 발전기 출력전압을 제어하게 된다.

## 2. 시스템의 구성

### 2.1 발전기 전압 제어를 위한 여자시스템

대상발전소인 국내 J-발전소의 발전기 여자시스템은 브러시리스 방식의 간접 여자시스템으로 주제어기는 내고장성을 갖고 있는 삼중화로 구성하였으며, 전력 변환부는 PWM 컨버터로 이중으로 설계하였다. PWM 컨버터 전력 변환부는 입력 전원부(480/220[V]), 직류링크 그리고 변환 출력부로 이루어져 있는데, 컨버터 출력 전압은 직류링크 전압을 가지고 펄스(Pulse) 폭으로 IGBT를 통해 조정된다. IGBT 쉘핑 주파수는 1[kHz]로 설계하여 출력전류가 리액터에 의해 거의 직류로 평활될 수 있게 하였다. 이 출력 조절 전압은 회전 여자기 계자로 공급되고 이를 통해 발전기 출력전압을 제어하게 된다[5].

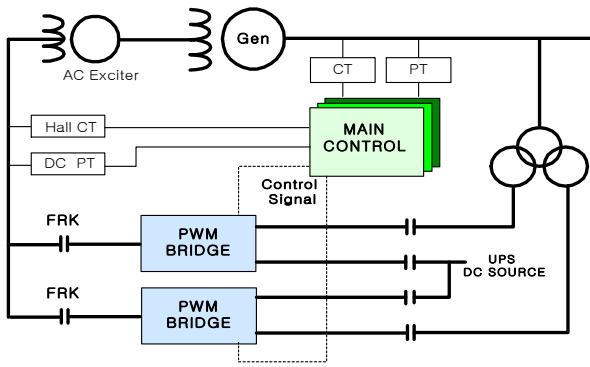


그림 1. 회생형 이중화 PWM 방식의 디지털 여자시스템 간략도

Fig. 1. Single diagram of the dual PWM digital excitation system with regeneration type

### 2.2 회생형 PWM 이중화 컨버터

그림 2는 회생형 이중화 PWM 컨버터를 나타내고 있다. 발전기 계통운전 중에 1, 2 PWM 정류기에서 고장이 발생하면, 제어기는 고장 개소를 갖고 있는 정류

부를 차단하여 온라인 수리가 가능하도록 설계되었다. 제어기는 고장개소를 파악하기 위하여 과전압, 과전류, 과온도, 퓨즈 등을 검출하여 PWM 정류부의 이상 유무를 실시간 감시한다. 입력변압기 2차전압은 다이오드 전파정류기로 AC-DC 변환되고 계자 전류에 직류 전류를 공급하기 위하여 4개의 스위칭 소자가 아닌 2개의 스위칭 소자와 2개의 다이오드로 구성된 형태를 갖고 있는 특징이 있으며, 1, 4상한 운전이 가능하도록 설계 되었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 2개의 PWM 브릿지가 서로 간섭을 주지 않게 하기 위하여 입력 전원이 변압기에 의해서 서로 절연되어 있고, 계자권선에는 각각 비상시 차단할 수 있게 차단기가 설치되어 있다. 또한 발전소의 상시 백업 UPS 전원인 배터리 직류 전원을 병렬로 연결하여 계통입력 전압 상실시에도 발전기 전압을 제어할 수 있는 장점을 갖고 있다. 입력 변압기에는 여러 탭이 있어 현장 여건에 맞추어서 전압조절이 가능하도록 설계하였다. 변압기 2차전압은 다시 다이오드 전파정류기로 직류로 변화되어 Q1, Q2의 스위칭 모드에 따라서 계자에 파워를 공급하게 된다. Q3의 역할은 직류 링크단의 과전압 억제 보호기로 동작된다. 과전압 보호 전압은 정격 직류 전압의 2~3배 정도로 설계 되며, 에너지가 거의 없는 순간 서지 전압에는 동작하지 않도록 하였다.

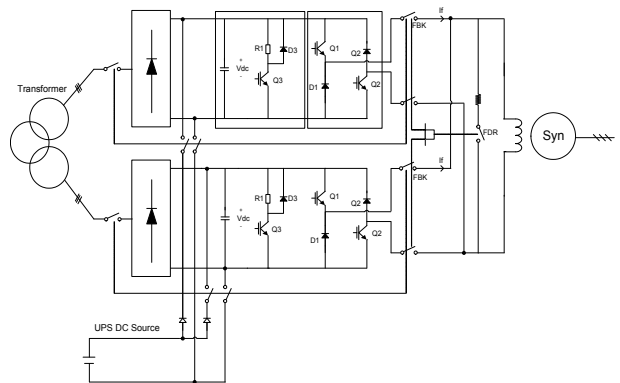


그림 2. 이중화 PWM 방식의 디지털 여자시스템  
Fig. 2. Dual PWM digital excitation system

그림 3은 자동 회생형 이중화 PWM 방식의 디지털 여자시스템을 나타내고 있다. 보통의 그림 2 방식과는 달리 다이오드가 추가로 계자에 연결되어 있다. 이 방

식의 특징은 발전기 정지시 운전 모드를 4상한 운전으로 하여 계자코일 에너지를 전원측으로 회생함으로써 별도의 계자 방전 저항(FDR : Field Discharge Resistor)이 필요하지 않는 장점을 지니고 있어 제품의 부피가 크게 줄어드는 효과도 지니고 있다. 그림에서와 같이 발전 정지시 계자 차단기를 개방하면 코일에 있던 에너지를 자동적으로 입력측 콘덴서에 저장되는 형태이며, 동시에 입력 차단기 및 UPS측 차단기도 개방되는 구조이다.

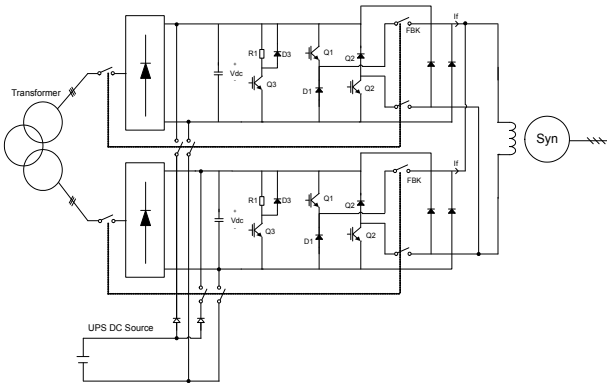


그림 3. 자동 회생형 이중화 PWM 방식의 디지털 여자시스템  
 Fig. 3. The dual PWM digital excitation system with auto regeneration type

### 2.3 자동 회생형 이중화 PWM방식 운전 모드

계자전류 제어를 위한 PWM 컨버터 운전모드별 파형은 초퍼형 컨버터와 유사한 파형을 나타낸다. 그림 4는 Q1과 Q2 소자가 동시에 ON 되었을 때의 계자전압과 계자전류 파형을 나타내고 있다. 계자전압은 직류 링크 전압의 초핑 파형이 되며, 전류는 발전기 계자의 리액터 성분 때문에 평활된 직류 전류가 된다. 그림 5와 그림 6은 프리휠링 모드로 Q1 또는 Q2 중 하나의 소자만 ON 되었을 때 다이오드를 통하여 계자에는 순환 전류가 공급된다. 이때 입력단에서 파워가 공급되지 않기 때문에 계자 전류는 감소하게 된다. 그림 7은 발전기의 계자차단기를 개방하였을 때 다이오드 통하여 회생모드가 동작되는 파형을 나타내고

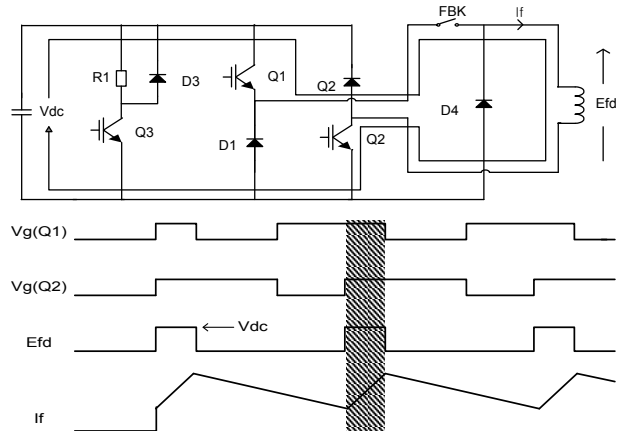


그림 4. 순방향 전력모드(Q1 and Q2 ON)  
 Fig. 4. Forward Power Mode(Q1 and Q2 ON)

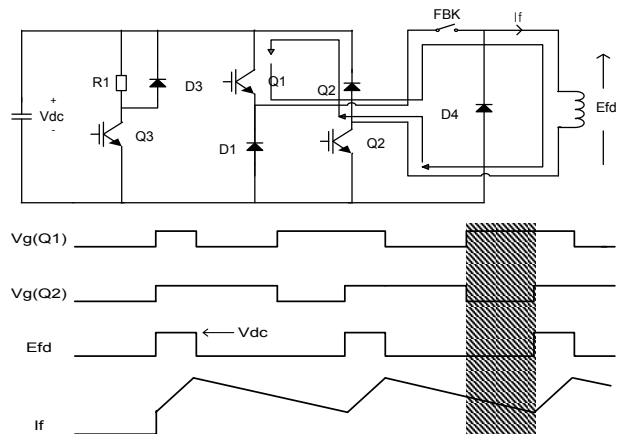


그림 5. 프리휠링 모드(Q1 ON and Q2 OFF)  
 Fig. 5. Freewheeling Mode(Q1 ON and Q2 OFF)

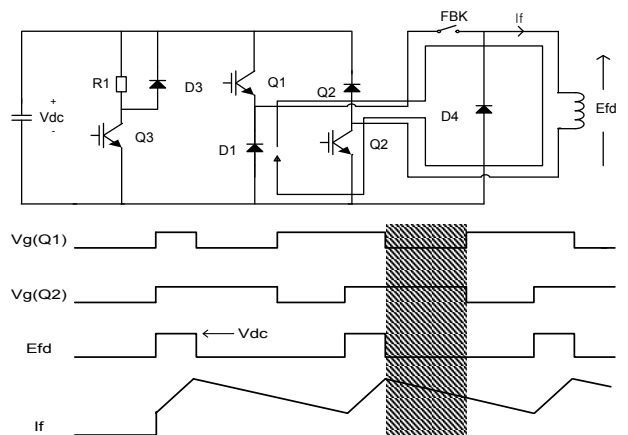


그림 6. 프리휠링 모드(Q1 OFF and Q2 ON)  
 Fig. 6. Freewheeling Mode(Q1 OFF and Q2 ON)

있다. 계자차단기 직류 양단을 개방하는 형태가 아니라 직렬로 연결된 부분만 개방되므로 혹시 차단기가 오동작으로 개방되지 않았을 때도 IGBT 게이트 신호를 OFF 시키면 에너지가 회생하여 발전기 계자전류가 감소됨을 알 수 있다. 그림 8은 계자차단기가 필요 없는 형태를 갖고 구조이다. 물론 현장 적용시에는 시스템의 안전성을 고려하여 계자 차단기를 사용하였다. 그림에서 처럼 Q1, Q2 OFF 시 다이오드를 통하여 계자에 축적된 에너지는 입력 측으로 회생하는 것을 볼 수 있다.

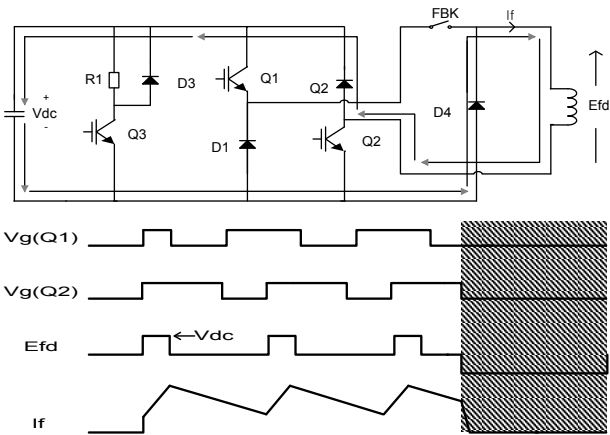


그림 7. 회생 모드-1(Q1 OFF and Q2 OFF)  
Fig. 7. Regeneration Mode-1(Q1 OFF and Q2 OFF)

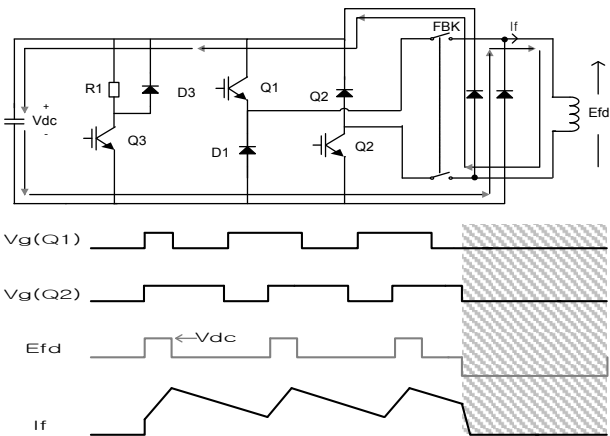


그림 8. 회생 모드-2(Q1 OFF and Q2 OFF)  
Fig. 8. Regeneration Mode-2

## 2.4 삼중화 제어기 출력에 따른 계자전압 실측파형

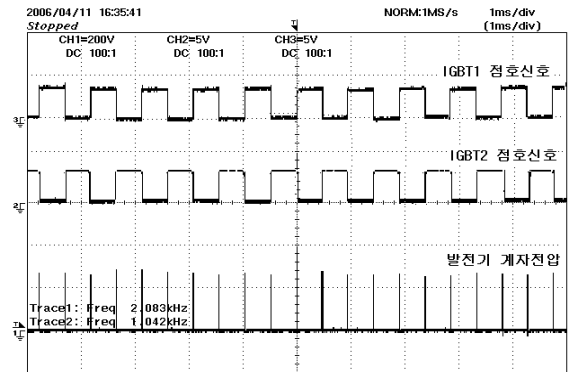


그림 9. Q1, Q2 점호신호와 계자전압  
(제어 신호 : 4[mA])  
Fig. 9. Q1, Q2 Firing waveform and Field Voltage  
(Control signal : 4[mA])

그림 9는 삼중화 디지털 여자시스템의 제어신호 (4[mA])에 따른 Q1, Q2 IGBT 게이트 파형과 계자전압( $E_{fd}$ )을 나타내고 있다. 위 그림에서 알 수 있듯이 이때 계자 전압의 실효치는 거의 제로가 된다.

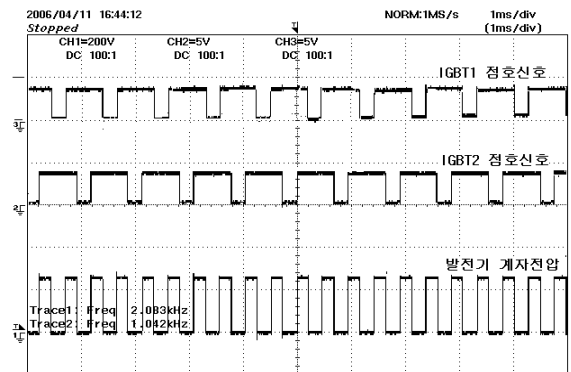


그림 10. Q1, Q2 점호신호와 계자전압  
(제어신호 20[mA])  
Fig. 10. Q1, Q2 Firing waveform and Field Voltage (Control signal : 20[mA])

그림 10은 삼중화 디지털 여자시스템의 제어신호 (20[mA])에 따른 Q1, Q2 IGBT 게이트 파형과 계자전압( $E_{fd}$ )를 나타내고 있다. 20[mA]일 때 계자 전압이 완전 직류 전압이 되지 않게 게인 값과 리미트 값을

표 1. J-발전소 발전기 사양  
Table 1. Generator spec of J-power plant

정격용량	100[MVA]
정격전압 및 주파수	13.8[kV], 60[Hz]
정격계자전압 및 전류	136[V], 846[A]
역률	0.85

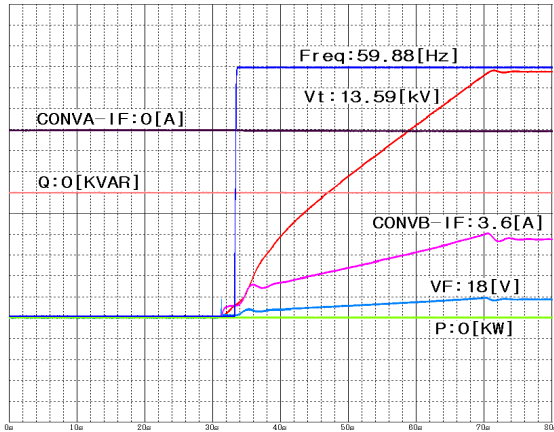


그림 11. 발전기 전압 초기기동시의 단자 전압, 계자전압, 계자전류, 주파수 파형(X축 : 1[Sec])  
Fig. 11. Terminal voltage, field voltage, field current, frequency when generator builds up

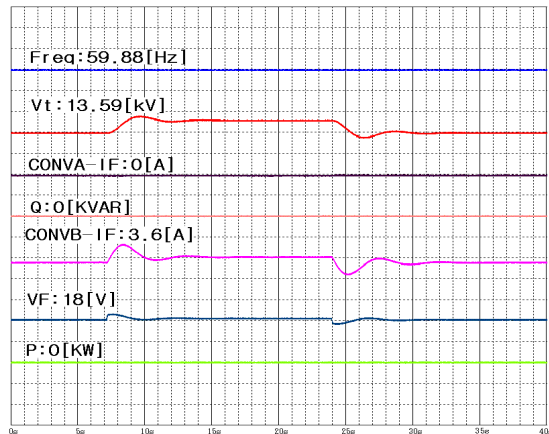


그림 12. 무부하 스텝 시험시 발전기 전압, 계자전압/전류, 주파수 파형(X축 : 1[Sec])  
Fig. 12. Terminal voltage, field voltage, field current, frequency during step test

설정하여 입력 직류 링크전압에 대하여 50~60[%]를 넘지 않게 설계하였다. 또한 제어신호와 별도로 발전

기 정지시 사용하는 Q1 ,Q2 Inhibit 신호를 추가로 하드웨어에 설치하였다.

### 3. 시작품 제작 및 시운전

#### 3.1 J-발전소 시운전 결과

J-발전소를 대상으로 시작품이 제작 되었으며, 성능 시험을 위하여 시운전이 실시되었다. 그림 14에서 보는 것과 같이 삼중화 제어기 판넬 그리고 PWM 컨버터 이중화 브릿지 판넬로 구성되어 있다. PWM 컨버터는 평상시 1대로 운전되며, A 브릿지 고장시 B 브릿지로 자동 절환되어 운전되도록 설계되었다. 그림 11은 발전기 초기 여자확립 시험으로 여자시스템 제어기의 소프트 전압확립 프로그램에 따라서 자동기동되어 13.59[kV]까지 상승된 파형이다. 시운전 당시 B 컨버터로 운전되어 A 컨버터 전류는 0을 나타내고 있다. 그림 12는 여자시스템 소신호 시험 항목 중 가장 중요한 스텝 시험 파형이다. 여자시스템 제어기 게인 값은 (Kp : 1.0. Ki : 0.5)로 조정된 후 시험을 실시하였고, 발전기 전압의 5[%] 스텝 시험 파형은 나타내고 있다. 그림 13은 계통 병입시의 파형이다. 발전기가 계통에 병입되면, 가버너 제어기에서 출력을 상승하게

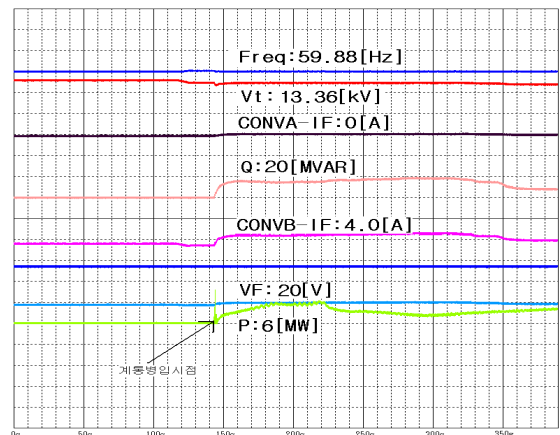


그림 13. 계통 병입시 발전기 전압, 무효/유효 전력, 계자전압/전류, 주파수 파형(X축 : 10[Sec])  
Fig. 13. Terminal voltage, active/reactive power field voltage, field current, frequency when generator was connected with grid line

되어 유효전력이 증대되며, 만일 무효전력이 작을 경우 운전원이 발전기 전압을 상승시켜 지상 무효전력을 계통에 공급한다.



그림 14. 회생형 이중화 PWM 디지털 여자시스템 사진  
Fig. 14. The picture of dual PWM digital excitation system with auto regeneration type

#### 4. 결 론

J-화력발전소에 적용된 PWM 컨버터형 디지털 여자시스템은 선진 외국 제작사 기술에 전적으로 의존하고 있는 것을 순수 국내 기술로 개발하였다는데 의의가 있다. 그리고 국내 최초로 브러시리스 타입의 발전소에 적용된 PWM 컨버터 방식은 속응성도 싸이리스터 방식보다 3[ms]가량 빠른 결과를 얻을 수 있었다. 무고장 운전을 위하여 디지털 여자시스템의 구성을 삼중화 제어기와 이중화된 컨버터 시스템으로 구성하여 설비의 신뢰도를 높였으며, 운전의 편의성과 기능개선으로 현장 직원들로부터 많은 관심과 좋은 반응을 받았다. 적용된 발전기 제어시스템의 현장적용을 통하여 확보한 기술은 외국 기술의 의존도가 높은 여타 제어시스템의 국산화 및 제작 기술향상과 향후 전력수용의 증가에 따른 국내 발전소 증설과 장기 사용 발전소의 개체시에 외산대비 투자비 절감에 기여할 것으로 기대된다.

#### References

- [1] P.Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc, 1994.5.
- [2] "동기기 여자계의 사양과 특성" 일본 전기학회 기술보고 제536호 1995.2.
- [3] General Electric, EX-2000 Digital Exciter User Manual, 1997.
- [4] KDR-2000 Digital Excitation System Manual, 전력연구원, 2000.7.
- [5] 류호선, 이주현, 임익헌 외 "ICBT를 이용한 승강함형 디지털 다중화 발전기 제어시스템 개발 최종보고서", 전력연구원, 2004.10.
- [6] 류호선, 이주현, 임익헌 "대형 동기기 발전기 계자제어를 위한 PWM 인버터에 관한 연구", 대한전기학회학술대회, 2006.7.

#### ◆ 저자소개 ◆



##### 류호선(柳皓善)

1970년 7월 21일생. 1993년 충남대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년~현재 KEPCO 전력연구원 선임연구원.  
Tel : (042)865-5647  
E-mail : hsryu@kepri.re.kr



##### 이주현(李柱鉉)

1964년 2월 1일생. 2000년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 충남대 대학원 박사과정. 1993년~현재 KEPCO 전력연구원 책임연구원.  
Tel : (042)865-5643  
E-mail : jhlee@kepc.co.kr



##### 임익헌(林翼憲)

1958년 7월 25일생. 1980년 건국대 전기공학과 졸업. 2002년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979년~현재 KEPCO 전력연구원 수석연구원.  
Tel : (042)865-5640  
E-mail : imikhy@kepc.co.kr