

# IGBT를 이용한 디지털 다중화 발전기 제어시스템 개발



한전전력연구원  
발전연구실 I&C그룹  
책임연구원/공학박사  
임익헌  
Tel : (042)865-5385

## 1. 서론

### 1. 연구 목표

첨단 디지털 기술의 발전으로 발전소 핵심제어 설비를 다중화하여 내 고장 설비로 구축하고 있는 것이 최근 기술의 추세이나, 제주지역 전력공급의 핵심발전소인 제주화력발전소 여자시스템은 최근에 설치된 디지털 제어시스템임에도 불구하고 후비보호 시스템이 취약하여 일부 제어카드 내부에서 1개회로 고장으로 인한 과급 효과가 크게 발생되어 발전소가 정지되는 경우가 발생하고 있다. 본 연구과제에서는 이러한 단일 채널 시스템의 문제점을 해결하여 설비의 신뢰도 향상을 통한 제주지역의 안정적인 전력공급을 위해 "IGBT를 이용한 승강압형 디지털 다중화 방식의 발전기 제어시스템"의 개발과 발전소 현장 적용을 목표로 하였다.

### 2. 연구의 필요성

대부분의 디지털 방식의 제어기술은 고 부가가치 기술로서 선진국에서 기술이전을 회피하고 있고, 비개방형 소프트웨어 구조로 인해 내부 제어 및 통신 알고리즘에 대한 해석이 불가능하며, 이러한 이유로 인해서 국내에서 운용중인 상당수의 제어기술이 선진국에 종속적이었던 것이 사실이다. 외국 기술에 의존한 시스템 도입 시 고가이며, 외화 손실이 많고 유지

보수에도 많은 시간과 경비가 소요되고 있다. 이러한 문제점 극복을 위해서는 기술 개발을 통한 시스템 국산화로 투자비 절감, 외국 제품가격 인하 유도 및 국내 기술진에 의한 유지보수 체제 구축으로 전력산업에서의 기술 및 제품의 가격 경쟁력 확보가 필요할 실정이었다.

또한 지금까지의 발전기 제어시스템의 제어 정류기는 통상의 강압형 컨버터 방식인 싸이리스터 위상 제어 정류기를 사용하고 있고, 최근에는 일부 선진국을 중심으로 대용량 전력제어용 반도체 소자와 제어 기술의 발달로 인해 IGBT(Insulated Gate Bi-polar Transistors) 등을 사용한 강압형 컨버터 방식으로 동기발전기 계자전류를 제어하는 특이한 정류기 모델이 발전기 출력전압을 제어하고 있다. 그러나 전력연구원은 이러한 강압형의 컨버터에서는 발전기 출력단의 선로고장과 같은 상황에서 효과적으로 Field Forcing을 할 수 없다는 단점을 보완해서 승강압형 컨버터를 사용해서 여자전원공급을 효과적으로 극대화시킴으로써 해서 발전기 과도 안정도를 확보함은 물론, 3중화 디지털 제어시스템을 채용하여 일부분의 고장은 허용하되 발전기 무정지 운전이 가능토록 하는 설비를 개발해야 된다는 절실한 필요성에 직면하게 되었다. 제주화력2-3호기는 90년대 후반에 준공된 발전소로 여자시스템은 미국 GE사가 제작한 EX-2000 디지털 여자시스템으로 IGBT를 이용한 강압형 컨버터가 단일 채널로 설치되어 있었다.

### 3. 연구개발 추진계획

제주화력에서 운전 중인 강압형 컨버터를 사용한 여자시스템의 제반 문제점 검토, 기술의 Reverse Engineering을 통한 기술 해석, 내부 제어 및 순차논리 알고리즘 블록의 해석은 물론, 디지털 터빈제어시스템인 Mark V와 통신연계 기술 해석을 실시하였다. 여기에서 취득한 기술을 참조로 해서, 전력연구원이 특허 취득한 승강압형 컨버터 기술을 탑재하고, 10여

년동안 전력연구원이 축적한 여자시스템의 개발 경험 기술을 활용하여 3중화 발전기 제어시스템의 제어 알고리즘에 반영하고 시스템 설계 및 제작을 수행하였다. 발전소 현장적용을 목표로 하기 때문에 신뢰성 확보가 무엇보다 중요함으로 시스템 구성에 필요한 하드웨어와 소프트웨어의 기본 구성 요소들은 이미 신뢰성이 입증된 제품을 사용하며 응용프로그램과 엔지니어링 설계 수행하고, 전력연구원이 보유하고 있는 발전기 모의 제어설비를 이용하여 제작된 연구시작품에 대한 기능 검증 실험을 실시하여 신뢰성 확보를 통한 시스템의 개발로 실용화와 국산화를 동시에 추진하였다.

## II. 본론

### 1. 대상발전소 발전기 제어시스템

대상발전소인 제주화력 발전소의 발전기 제어시스템은 Brushless 방식의 간접 여자시스템으로 제어기와 IGBT 전력 변환부 모두 단일 채널 시스템으로 구성되어 있다. 전력 변환부는 입력 전원부, 직류 전압단(DC link) 그리고 변환 출력부로 이루어져 있는데, 변환 출력부는 DC Link 전압을 가지고 펄스(Pulse) 폭으로 IGBT를 통해 출력전압을 조정하며, 출력 전압은 다음 식에 의해 결정된다.

$$V\_Output = V\_Input \times [Time\ on / (Time\ on + Time\ off)]$$

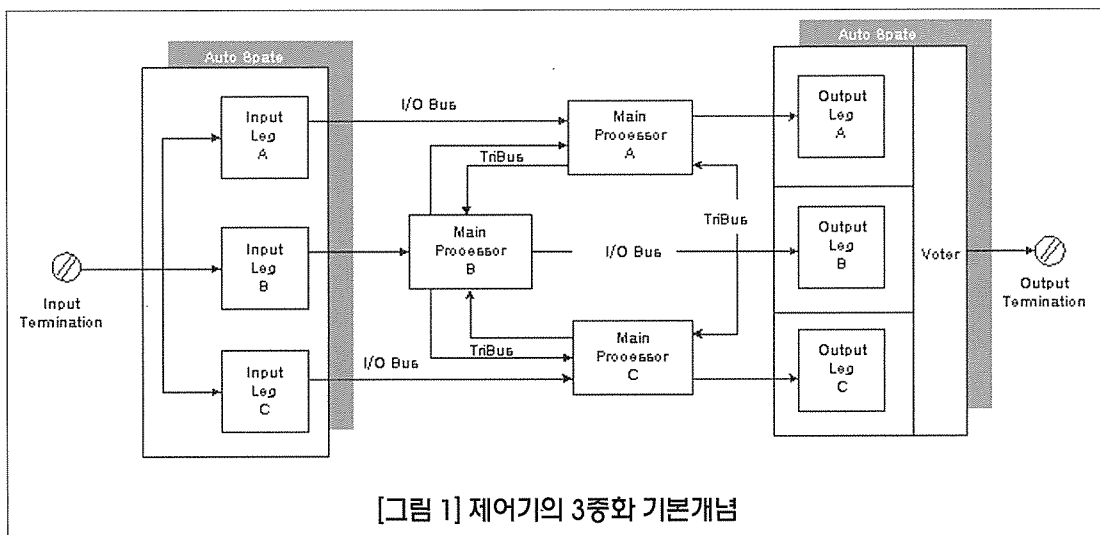
여기서 V\_Input은 DC Link 전압이고, Time은 IGBT의 도통시간이며, IGBT Chopping 주파수는 대략 1000Hz이다. 이 출력은 조절된 전압과 전류로서 회전 여자기 계자로 공급되고 이를 통해 발전기 출력전압을 제어하게 된다.

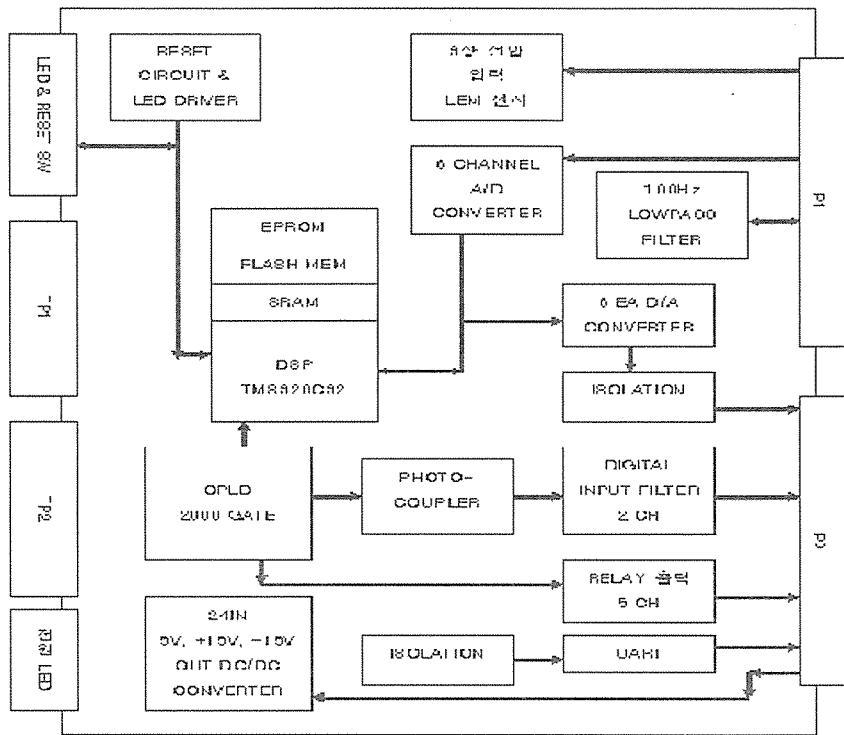
### 2. 개발시스템 구성 및 주요 연구내용

개발시스템의 구성은 여자시스템의 제어 및 제한, 보호 기능을 수행하는 3중화 디지털 제어기와 발전기 전압 및 전류 신호를 입력받아 유효, 무효전력 연산과 신호처리를 위한 신호처리 보드(Signal Conditioning Board), IGBT Converter 정류기 그리고 운전원용 MMI(Man Machine Interface) 시스템으로 구성되어 있다.

#### 2.1 3중화 디지털 제어기

제어부는 3중화 디지털 제어기[TMR(Triple Modular Redundant)]로서 제어 연산은 완전 3중화로 처리되어 2개의 채널이 동시에 고장이 나는 최악의 상황에서도 안정적으로 운전되며, 여자시스템의 제어, 제한 및 보호기능과 각종 자기진단 기능을 수행하는 CPU 모듈, 현장의 각종 입출력 신호들을 위한 아날로그 및 디지털 입출력 모듈 그리고 MMI 시스템과의 통신을 위한 통신모듈로 구성되어 있으며, 디지털 제어기의 3중화 구성도는 아래의 [그림 1]과 같다.





[그림 2] 3중화 SCB(Signal Conditioning Board) 모듈 내부 구성도

## 2.2 신호처리 시스템 및 PWM 보드

신호처리 시스템은 이중화된 전원공급 카드와 모니터링 카드, 신호처리를 위해 DSP(Digital Signal Processing)로 개발된 3중화 SCB(Signal Conditioning Board) 모듈로 구성되어 있으며, 발전기 전압과 전류 등의 신호를 입력받아 제어기에 필요한 표준 신호(0~10V)로 변환되며, 유효 및 무효전력의 연산과 전력계통 안정화 장치인 PSS (Power System Stabilizer)의 제어 프로그램이 내장되어 있다. 모니터링 카드는 전원공급 출력을 감시하며 발전기 전압입력(PT) 신호 상실시 릴레이로 출력하는 기능을 함께 내장하고 있다. PWM 보드는 TMR 주제어기로부터 최종 제어 신호를 공급받아 A, B 채널의 컨버터에 PWM 펄스를 발생시키며, 계자회로에 과전압 발생을 검출하는 역할을 한다.

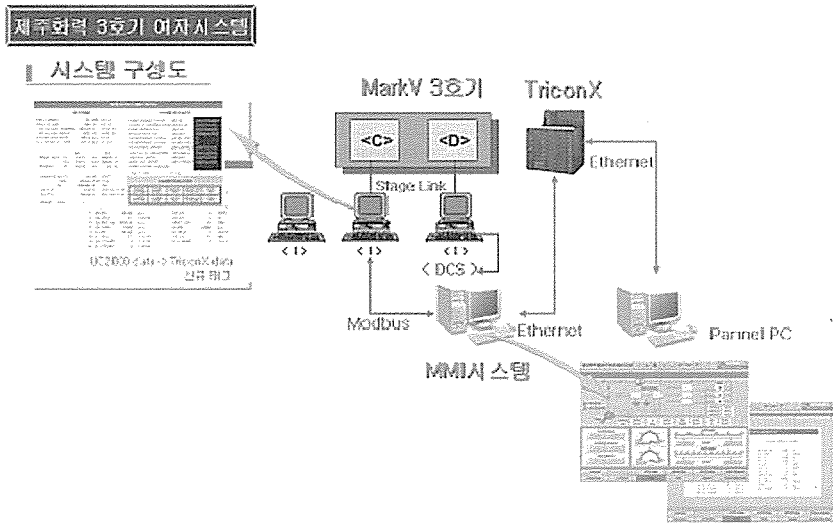
## 2.3 IGBT 승강압 Converter

IGBT 승강압 Converter는 크게 전원부와 정류부 및 차단부로 이루어져 있으며, 전원부는 여자용 변압기(PPT)로부터 강압되어 입력되는 240V 교류(AC) 전압, 비상용 Battery에서 입력되는 직류(DC) 125V 전압과 UPS전원을 조합하여 시스템 전원, 각종 계전

기 공급전원 그리고 IGBT Gate Driver 전원 등으로 사용하고 있으며, 완벽한 이중화된 전원으로 공급하게 된다. 정류부는 여자용 변압기(PPT)로부터 강압된 전압을 이중화된 IGBT Converter에서 다이오드 전파 정류하여 계자전원으로 사용된다. 정류된 직류전원은 IGBT Converter부에서 두개의 IGBT 초퍼에 의해 강압되어 발전기 전압조정에 필요한 여자기의 계자전류를 형성한다. 차단부는 입력 교류(AC) 전원 측에 NFB와 직류 출력 측에 계자차단기가 설치되어 있으며, IGBT 승강압 Converter의 주요 구성품으로는 여자변압기, AC Filter와 정류용 다이오드, DC Link단의 커패시터, 강압용 IGBT Module, 출력전류 감지용 Shunt와 Hall CT 그리고 디지털 신호 입출력을 위한 릴레이들로 구성되어 있다.

## 2.4 MMI 시스템과 제어시스템간의 통신연계

제어시스템과 운전자(Operator)사이에 Interface 역할을 수행하는 MMI 시스템은 운전원들이 여자시스템의 운전상태 감시와 조작을 GUI(Graphic User Interface)에 의해 가능토록 해준다. Windows 2000을 운용체제로 하며 GUI를 위한 프로그램은 Intellution사의 iFIX Dynamics 소프트웨어 프로그램을 사용하였



[그림 3] 제주화력 통신연계 Network 구성도

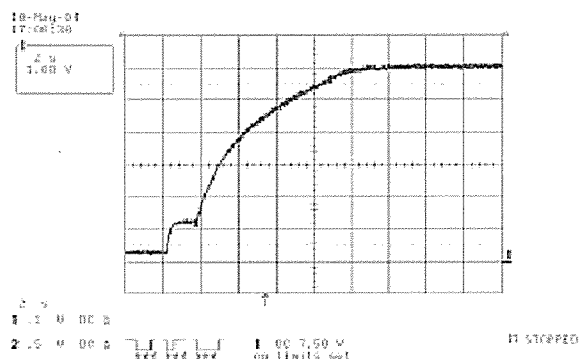
다. 현재 운전 중인 발전기 여자시스템 (GE사 EX-2000)을 교체하게 됨에 따라 현재 제주화력에 구성되어 있는 터빈제어 시스템(GE사 Mark-V)과 발전기 여자시스템 간의 이 기종 제어 시스템에 통신 연계를 위해 통신 Network의 체계와 설정되어 있는 System Configuration 등 현장 자료들을 통해 명령 송수신 통신 프로토콜에 대한 연구를 수행하였다. 현재 터빈제어 시스템의 운전원용 <I>컴퓨터에서 발전기 여자시스템의 운전 데이터들을 감시 및 조작을 수행하고 있는데 개발 시스템의 현장 적용을 위해 서로 다른 통신 프로토콜(Arc-Net과 Mod-Bus)의 통신 연계방안들을 다각적으로 검토하고 통신시험들을 수행하여 성공적으로 이 기종 제어시스템 간에 통신을 연계하였으며, 아래의 [그림 3]은 운전 데이터들의 효율적인 감시와 조작을 위한 제주화력 통신연계 Network 구성도를 보여준다.

### 3. 개발시스템의 모의시험 및 현장적용 결과

전력연구원에서 발전기 제어시스템을 개발한 후에 발전 전동기(M-G Set)를 이용한 모의시험을 통해 시스템의 제어, 제한 및 보호기능들과 시스템의 건전성을 확인 한 후 기존 발전기 제어시스템을 전력연구원 에서 개발한 TMR 발전기 제어시스템으로 교체한 후 운전 가능 한계, 최적 제어 및 보호 제한 기능의 정확한 수행을 위한 각종 제어 및 보호 파라미터 설정하고 확인하였다.

### 3.1 발전기 전압확립

발전기 정격속도의 무부하 상태에서 발전기 계자에 초기 여자전류를 공급하고 발전기 전압이 정상적으로 생성되는지 또한 미리 설정해 놓은 전압 설정값까지 발전기 전압이 과도한 Overshoot 없이 안정적으로 확립되는 지 시험하여 자동(Auto) 및 수동(Manual) 운전모드에서 정상적으로 발전기 전압이 확립됨을 확인하였으며, 아래 [그림 4]는 발전기 전압 확립 결과를 그래프로 보여주고 있다.

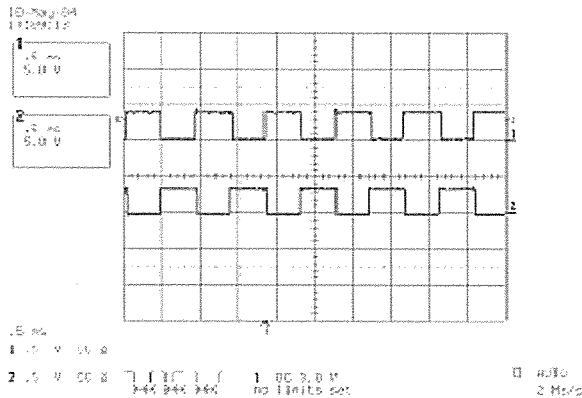


[그림 4] 발전기 전압확립 결과

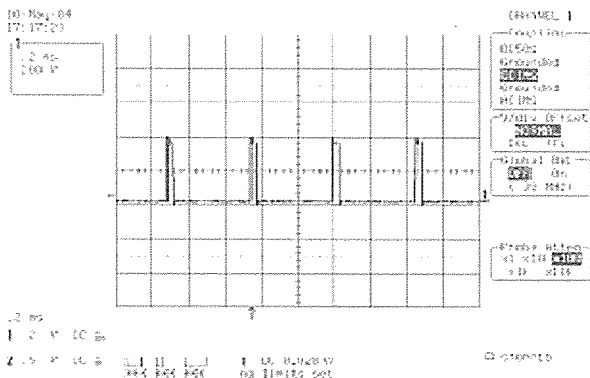
### 3.2 IGBT 승강압 Converter 동작 특성

발전기 전압제어를 위한 전압원 정지형 여자시스템이 입력전압의 저하 시 계자강화가 이루어지지 않았던 문제점을 해결하기 위해 계통의 3상 단락이나 지락과 같은 선로 고장으로 인한 단자전압의 강하로

여자전류의 확보가 곤란한 경우 승압 컨버터를 이용하여 여자 입력전압을 승압시키도록 동작한다. 또한 IGBT Converter에서 다이오드 전파 정류된 직류 계자 전원은 두개의 IGBT 초퍼에 의해 강압되어 발전기 전압조정에 필요한 여자의 계자전류를 형성하게 되는데, 아래의 [그림 5]는 두개의 IGBT 초퍼의 Gate Pulse 파형과 [그림 6]은 최종 점호신호(Firing Signal)의 펄스파형이다.



[그림 5] IGBT Q3/Q4의 Gate Pulse 파형



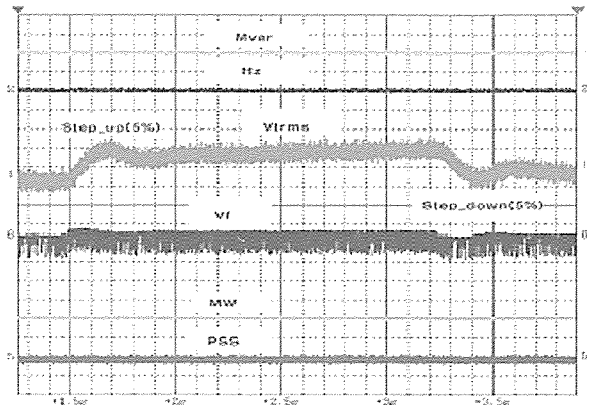
[그림 6] 점호신호(Firing Signal) Pulse 파형

### 3.3 계단응답 시험을 통한 특성시험

발전기 정격전압의 5%에 해당하는 계단응답 시험(Step Up/Down)을 실시하여 응답 특성 확인하였으며, 그 결과를 가지고 AVR 제어기의 PI 파라미터(KP, KI)값 설정 및 조정하였다. 아래의 [그림 7]은 계단 응답 시험의 결과를 나타내며, 결과 그래프에서 보듯이 발전기 정격전압의 5%에 해당하는 계단 응답 신호를 주었을 때 계자전압과 발전기 전압이 속응성 있게 응답함을 확인할 수 있었다.

여기서  $V_{trms}$  : 발전기 전압

$V_f$  : 계자 전압을 나타낸다.



[그림 7] 계단 응답 시험 결과

## III. 결론

금번에 개발 적용된 발전기 제어시스템은 선진 외국 제작사 기술에 전적으로 의존하고 있는 발전소 제어시스템을 순수 국내기술로 개발하였다는 데 의의가 있다. 시스템의 구성을 3중화 제어기와 이중화된 컨버터 시스템으로 구성하여 설비의 신뢰도를 한층 더 높였으며, 운전 편의성과 기능개선으로 현장 직원들로부터 많은 관심과 좋은 반응을 받았다. 금번 발전기 제어시스템의 개발과 현장 적용을 통해 확보한 기술을 바탕으로 외국 기술의 의존도가 높은 여타 제어시스템의 국산화 및 국내 제작사의 설계 제작 기술향상과 향후 전력수요의 증가에 따른 국내발전소 증설과 장기사용 발전소의 기존 시스템의 개체 시에 투자비 절감뿐만 아니라 외화 절감에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

### ※ 참고문헌

1. General Electric, EX-2000 Digital Exciter User Manual, 1997
2. KDR-2000 Digital Excitation Systems Manual, 전력연구원, 2000
3. 임익현, 이주현 류호선 외 “발전기용 다중화 정지형 디지털 여자시스템 개발” 최종보고서, 전력연구원
4. 임익현, “동기발전기 디지털 여자시스템 개발에 관한 연구”, 전력연구원, 2001
5. 류호선, 이주현, 임익현 외 “화력발전소용 디지털 여자시스템 개발에 관한 연구”, 전력전자학회, 2002