

## 4MW급 고압 인버터 시스템 개발

朴英珉, 韓基俊, 崔世卿\*, 鄭明吉, 李世鉉

## Development of 4MW Class High Voltage Inverter System

Young-Min Park, Ki-Joon Han, Se-Kyong Choi, Myung-Kil Jung, and Se-Hyun Lee

## 요 약

본 연구는 새로이 개발된 3.3KV 4MW급의 3레벨 NPC구조의 전압형 대용량 인버터에 대한 것으로 Web 기반의 인버터 정보 관리 시스템(Inverter Information Management System)과 가상 운전 시뮬레이터가 부가된 것이다. 사용된 전동기 제어 알고리즘은 속도 센서없이 동작 가능한 DTC(Direct Torque Control)기법으로 빠른 응답특성을 갖고 있다. IIMS는 운전상태 모니터링 및 Data 관리기능을 가지고 있으며 가상 운전시뮬레이터는 주 전원을 공급하지 않은 상태에서 시스템의 특성 검증 및 Tuning이 가능하다. 현재 이 제품은 신뢰성 검증을 위해 현장 시험 중에 있다.

## ABSTRACT

This paper describes a new developed 3.3KV/4MW class three-level Voltage Source Inverter(VSI), which is equipped with IIMS(Inverter Information Management System) based on the world wide web and with the Virtual operation simulator. The algorithm for motor control is the stator oriented Direct Torque Control(DTC), which works without speed sensor and gives the physically fastest dynamic response. The IIMS have the functions of operation monitoring and data managements. Virtual operation simulator can analyze and tune the system characteristics without main power. Now, this system is under the field test to verify the confidence.

**Key Words** : 3 Level NPC Voltage Source Inverter, web, IIMS(Inverter Information Management System), Virtual Operation Simulator, IGCT, DTC, 이중열교환 방식, VME

## 1. 서 론

대용량 전동기의 가변속 구동은 1970년대부터 서서히 관심을 끌여오고 있는 분야로써, 대용량 전동기의

Soft-starting에 의한 유지·보수 경비의 절약 또는 부하특성에 의한 전기에너지 절감을 위해서 대용량 Pump, Fan, Blower, Compressor 등 유체이송장치와 육·해상 교통 수단의 대용량 추진전동기 또는 Mill이나 대형 Hoist 등의 구동 장치 등 많은 응용분야에서 적용되고 있다. 세계적으로 ABB, Siemens, GE 등이 기술발전을 주도하며 신제품을 지속적으로 출시하고 있지만 국내의 경우, 산. 학. 연의 미진한 연구력과 생산력으로 기술개발이 부진하여 수입 자유화 정책으로 인한 외국 제품의 대량 유입이 예상되므로 이 장치의

\*현대중공업 기전연구소 책임연구원

E-mail : csk@hhi.co.kr

접수일자 : 2001. 7.28

1차심사요청일 : 2001. 7.30

심사완료일 : 2001. 9.12

연구 개발은 시급한 과제라고 할 수 있다. 특히 대형 Plant에 적용된 가변속 구동장치는 보수 및 감시 시스템이 결합된 상위시스템과 연계되어 Data를 공유할 수 있는 통합 Monitoring 기능이 요구되어 왔다.

본 연구에서는 IGBT와 GTO의 장점만을 채택한 차세대 고압 대전력용 반도체소자인 IGCT를 사용하여 3.3KV 4MW급의 3레벨 구조의 전압형 대용량 인버터 시스템을 개발하여 기존의 2레벨 인버터 보다 출력 특성이 우수하면서도 고압 전동기를 직접 구동할 수 있도록 하였고, 속도센서 없이 DTC 기법을 이용함으로써 응답 특성을 향상시켰다. 또한 기존의 인버터는 운전 상태 모니터링 기능 구현이 대부분이었으나 개발된 시스템은 TCP/IP통신에 의한 원격 감시제어 기능, 시뮬레이터에 의한 제어 알고리즘 검증, 원격지 현장 설비에 대한 최적 운전 정보 제공 등의 On-line 유지보수 지원 체계 구축으로 사용자의 편의성을 향상 할 수 있게 되었다. 본 논문은 4MW급 고압 대용량 인버터 시스템 개발 내용에 대해서 소개하고자 한다.

## 2. 개발품의 최종목표 사양

표 1 시스템 개발 사양  
Table 1 System Specifications

항 목	내 용
1. 정격용량	3,300V, 4,000KW
2. 출력주파수	0-120Hz
3. 주파수안정도	±0.01% at Max.Frequency
4. 속도제어정도	Below ±0.1% at Normal Speed
5. 시스템 구성방식	3 Level PWM 컨버터/인버터 (Using IGCT)
6. 인버터 제어방식	DTC (Direct Torque Control)
7. 과부하 내량	120% 60Sec
8. 보호방식	OC, OV, OH 등
9. 냉각방식	강제 수냉식
10. 적용 규격	KS, IEC, NEMA
11. 인버터정보관리	상위시스템연계 Networking, 가상운전

## 3. 전력스택 개발

전력회로에 사용된 소자는 그림 1의 IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor)로써 스너버 회로 없이 대전력을 스위칭 할 수 있으므로 회로의

단순화 및 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다.

표 2는 IGCT소자의 특성을 나타낸다.

본 연구에서 개발된 스택은 그림 2와 같이 1상분의 스택을 저 인덕턴스 형의 모듈화 구조로 설계하였고 이 모듈화 된 1상분의 스택을 6개 병렬 사용하여 3상 컨버터 및 인버터의 구성을 손쉽게 할 수 있었을 뿐만 아니라 향후의 용량증대 및 A/S 유지보수에 편리한 구조로 설계하였다.



그림 1 대전력용 반도체 스위칭 소자  
Fig. 1 IGCT for Switching Device

표 2 IGCT소자 특성 데이터  
Table 2 IGCT data sheet

항 목	사 양
품 명	5SHY35L4503
$V_{DRM}$	4500 V
$I_{TORM}$	4000 A
$I_{TRMS}$	2200 A
$I_{AVM}$	1400 A
$V_{TM}$	2.7 V
$di / dt$	1000 A/ $\mu$ S
$R_{thjc}$	0.012 $^{\circ}$ C/W
$T_j$	115 $^{\circ}$ C



그림 2 IGCT 1상분 전력 스택  
Fig. 2 IGCT 1Phase Power Stack

### 4. 전력회로 설계

전력회로는 그림 3과 같이 입력 정류부를 3레벨 PWM 컨버터로 구성하여 전원 계통의 역률을 향상시키고 고조파 함유율을 기존의 인버터 방식에 비해 대폭 저감시킬 수 있게 하였으며 그림 4와 같이 인버터 측도 컨버터부와 동일한 구조로 설계하여 전력스택의 구조를 단순화하였다.

IGCT를 적용한 전력회로는 전력소자 개별로 스너버 회로가 존재하지는 않지만 IGCT의 턴 오프시 직류단 기생 인덕턴스에 의해 직류단에 과전압이 발생하게 되는데 이를 억제하기 위해 R,C,D로 구성된 전압 클램프 회로가 직류단 상, 하단에 일괄로 구성되어 있다<sup>[1]</sup>.

그림 5는 전력회로 설계를 토대로 제작된 고압 대용량 가변속 구동장치의 실물 사진이다.

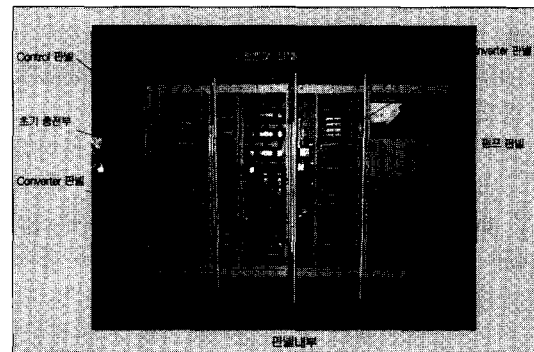


그림 5 고압 대용량 가변속 구동장치  
Fig. 5 High voltage Large capacity Inverter

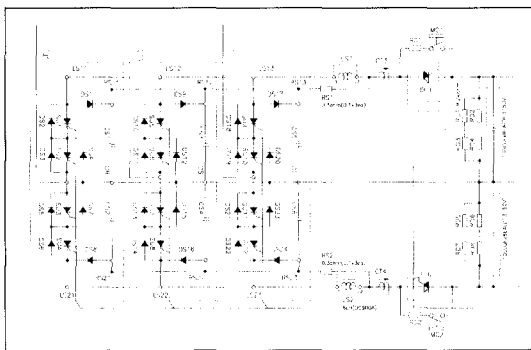


그림 3 컨버터부 전력회로 구성도  
Fig. 3 Diagram of Converter Power Circuit

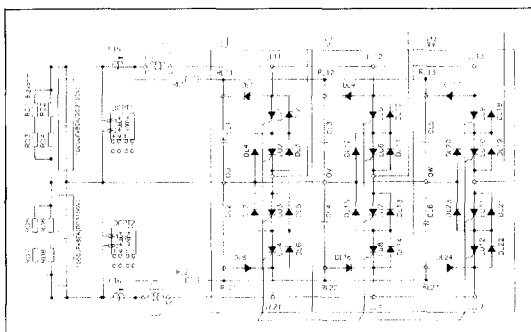


그림 4 인버터부 전력회로 구성도  
Fig. 4 Diagram of Inverter Power Circuit

### 5. 냉각시스템 설계

스위칭소자에 의해 많은 열량이 발생하는 전력 변환 장치는 시스템의 성능 및 수명이 소자의 온도 상승과 직접적인 영향을 받기 때문에 경제적이면서 효과적인 냉각능력 확보가 요구되며, 본 연구에서는 컨버터 및 인버터 Panel을 통과하여 온도상승된 냉각수가 외부 열교환기 냉매에 의해 냉각되어 순환하는 2중 열교환 방식의 냉각시스템을 채택하였다. 그림 6은 수냉 냉각 시스템의 열전달해석 프로그램으로써 대용량 인버터 수냉시스템의 사용환경에 따른 요소별 냉각수 온도, Heat Sink 온도 및 열교환기 용량 등을 계산하는 것을 목적으로 자체 개발된 것이다.

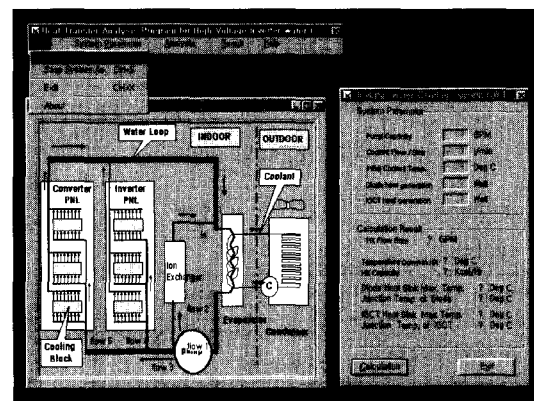


그림 6 수냉시스템 열전달해석 프로그램  
Fig. 6 Thermal Design and Analysis Program

### 6. 제어시스템 설계

그림 7과 같이, 본 연구에서는 설계된 제어기 H/W는 호환성, 확장성 등이 뛰어난 VME Bus 표준구조를 사용하였다. VME Master 보드(KVME-041)는 VME Bus를 사용하는 시스템의 관리와 주변 장치의 제어, 그리고 상위 Device (SCADA, DCS 등)와의 통신을 담당하고 있으며, 시스템 프로그래밍의 효율을 높이기 위하여, Real-Time OS를 사용하였다. 또한 컨버터/인버터용 DSP보드를 개별 구성하여 전력소자와의 시그널 인터페이스를 편리하게 설계하였다.

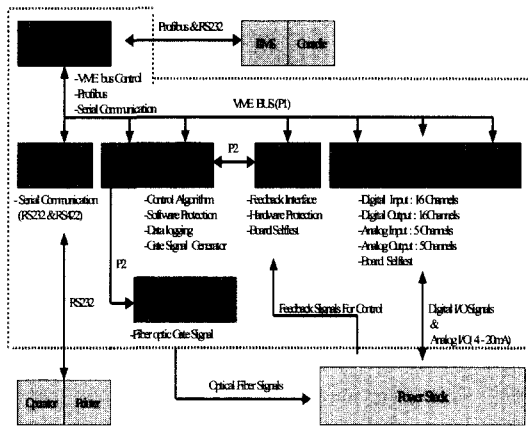


그림 7 제어시스템 구성도  
Fig. 7 Configuration of Control System

### 7. 인버터제어 알고리즘

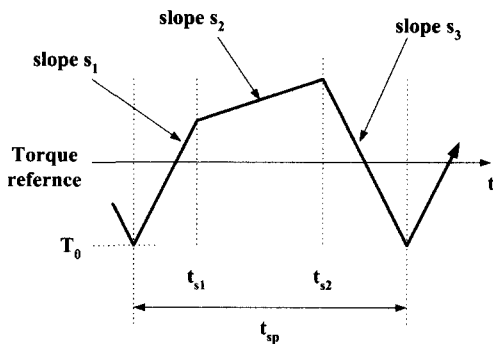


그림 8 토크 기울기  
Fig. 8 Torque Slope

대용량 인버터의 제어 알고리즘을 설계할 때 가장 큰 제약점은 반도체 소자의 스위칭 주파수 제약으로

고정자 전류의 정현파적인 원활한 제어가 쉽지 않게 된다. 따라서, 고성능 제어 알고리즘을 구현하기 위하여 이미 Sensorless 벡터 제어를<sup>[2]</sup> 구현한 바 있으며, 본 연구에서는 상대적으로 낮은 스위칭 주파수(1KHz)에서도 제어응답특성이 뛰어난 DTC(Direct Torque Control)를 적용함에 있어<sup>[3]</sup>, Adaptive Observer 알고리즘을 이용한 속도제어를 구현하였다.

또한 전동기 토크 기울기를 이용한 토크 리플 저감 알고리즘을 개발하였다<sup>[4]</sup>.

3 level DTC의 토크 패턴은 그림 8과 같으며, 토크 리플 저감을 위한 토크 기울기는 다음과 같다.

$$s_1 = -\frac{T_e}{\sigma\tau_s} + \frac{3PL_m}{4\sigma L_s L_r} \cdot \{ -v_{ds}\lambda_{qs} + v_{qs}\lambda_{ds} - \omega_m(\lambda_{ds}\lambda_{dr} + \lambda_{qs}\lambda_{qr}) \}$$

$$s_2 = -\frac{T_e}{\sigma\tau_s} + \frac{3PL_m}{4\sigma L_s L_r} \cdot \left\{ -\frac{1}{2}(v_{ds}\lambda_{qs} - v_{qs}\lambda_{ds}) - \omega_m(\lambda_{ds}\lambda_{dr} + \lambda_{qs}\lambda_{qr}) \right\}$$

$$s_3 = -\frac{T_e}{\sigma\tau_s} - \frac{3PL_m}{4\sigma L_s L_r} \omega_m(\lambda_{ds}\lambda_{dr} + \lambda_{qs}\lambda_{qr})$$

토크 기울기 곡선에서 전압벡터가 바뀌는 시점,  $t_{s1}$ ,  $t_{s2}$ 는 토크 리플이 최소화 되도록 결정한다.

$$t_{s1} = \frac{1}{2(2s_1 - s_2)} (L_0 \pm \sqrt{L_2})$$

$$t_{s2} = \frac{2(T_{e,ref} - T_0) - 2(s_1 + s_2)t_{s1} - s_3 t_{sp}}{2s_2 - s_3} \text{ or } t_{sp}$$

여기서,

$$L_0 = 2\{(T_{e,ref} - T_0) + 2(s_1 - s - 2)t_{sp}\}$$

$$L_1 = s_2^2 t_{sp}^2 - s_3^2 t_{sp}^2 - s T_0 t_{sp} + 2 T_{e,ref} t_{sp} - 2 s_2 t_{sp} t_{sp} - 2 s_3 t_{sp} t_{sp} - s_3^2 t_{sp}^3$$

$$L_2 = L_0^2 - 4(2s_1 - s_2)L_1$$

그림 9는 DTC 제어기 블록도이고, 그림 10은 3레벨 DTC환경에서의 전동기 토크, 속도, 고정자 자속 및 전류의 실험 파형이다.

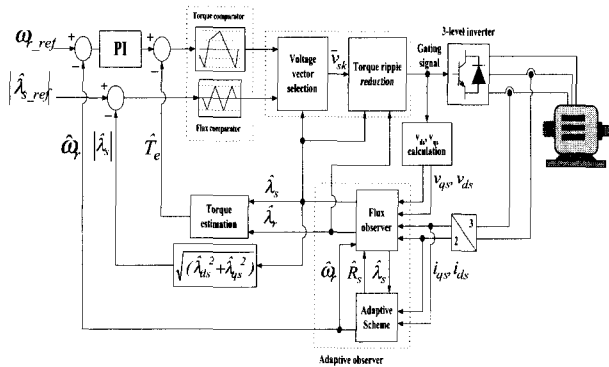


그림 9 DTC 블록도  
Fig. 9 Block Diagram of Direct Torque Control

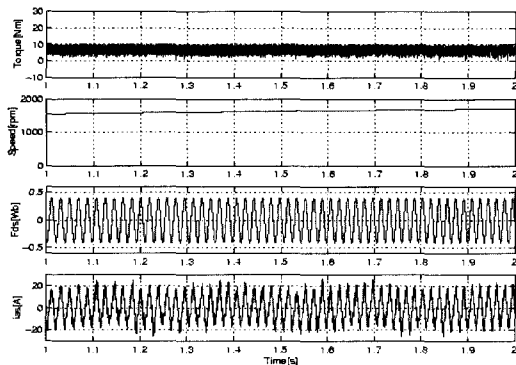


그림 10 실험 결과  
Fig. 10 Experimental Results

8. 인버터 정보관리 시스템(IIMS) 설계

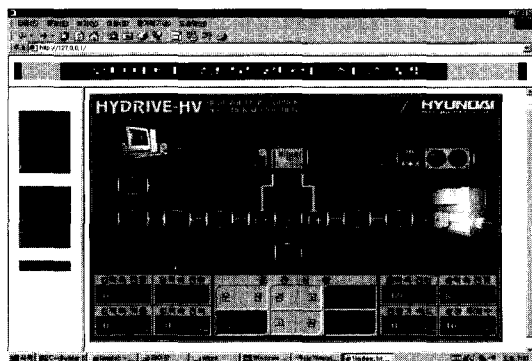


그림 11 인버터정보관리 홈페이지 예  
Fig. 11 Example of Home page in IIMS

인버터 정보관리 시스템은 인버터의 현재 운전상태를 실시간으로 사용자에게 보여주고 고장검지상태를

통보하는 등의 기능을 제공하는 GUI기반의 콘솔 기능과 현장설치전 제어기 전반에 대한 검증작업 및 부하에 따른 최적의 운전상수를 검출할 수 있는 가상운전 기능, 인버터시스템과 외부와의 통신을 위한 web 기반 통신 기능으로 구성되어 있다.

그림 11은 인터넷/인트라넷에 의한 IIMS 홈페이지에 접속했을 때 웹화면의 일부로써 인버터 운전상태정보 화면이다. 또한 상위 시스템과 연계운전이 가능하여 당사 SCADA 웹사이트에서 직접 인버터 운전조작을 구현하였다

9. 인버터 가상운전 시스템 개발

가상운전 시스템은 컨버터, 인버터, 유도전동기 및 제어 대상 플랜트를 모의 실험하는 일종의 시뮬레이터로 인버터 제어기의 기능 검증 및 인버터 시스템을 현장에 적용하기 위한 사전 엔지니어링 기능을 제공한다<sup>[5]</sup>. 즉 전력 변환장치, 전동기를 포함한 적용 대상 플랜트의 수학적 모델을 탑재하고 인버터 제어기로부터 입력된 스위칭 패턴에 대한 제어변수를 수학적인 해법을 통하여 계산하여 인버터 제어기에 반환 시킴으로써 인버터 제어기의 기능을 실제 시스템에 적용하기 전에 시험할 수 있다.

그림 12는 가상운전 시뮬레이션 결과이다.

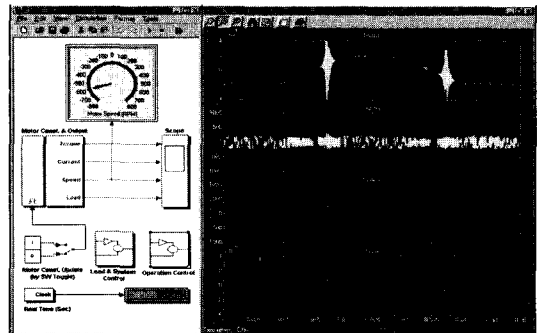


그림 12 가상운전 시뮬레이션 결과  
Fig. 12 Result of Running Simulation

10. 결 론

대형 유도 전동기의 속도 제어를 통해서 에너지 절약 및 생산공정 자동화 등을 실현시킬 수 있는 고압 대용량 인버터를 3년간에 걸쳐 연구 개발한 결과, 3레벨 전력 스택 구성 및 냉각, 절연 등 대용량 전력 변환 장치 설계 기술과 최신 제어 알고리즘 및 웹기반

원격 감시 기능과 같은 소프트웨어 기술 등 많은 기술적 성과를 달성하였다. 본 연구를 통해서 대용량 인버터 설계, 제조 및 운용기술의 자립화하는 계기가 되었으며 현장실증시험에 의해 이를 검증하고자 한다. 또한 시스템보호기술, IT시대에 대응하는 정보관리기술 개발 등 상품화 프로젝트가 본 궤도에 진입함에 따라 국내 시장 점유율 제고 및 해외시장 개척을 위한 발판을 마련하게 될 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Gruning, B. Odegard, "High Performance low cost MVA inverters realized with integrated gate commutated thyristors(IGCT)", *EPE*, Trondheim, Norway, 1997.
- [2] H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakano, "DSP Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor", *IEEE Trans. Industry Appl.*, Vol. 29, No. 2, , pp. 344~348, 1993.
- [3] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick response and high efficiency strategy of an induction motor", in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, pp. 495~502, 1985.
- [4] 윤재학, 한기준, 정명길, 이교범, 유지윤, 송중호, 최익, "3레벨 인버터로 구동되는 유도전동기 직접 토크 제어의 낮은 스위칭 주파수에서의 토크리플 저감법, 전력전자 학계학술대회, pp. 203~206, 2000. 7.
- [5] Herbert Hanselmann, "Hardware-in-the-Loop Simulation Testing and its Integration into a CACSD Toolset", *IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design*, Sep 15-18, Dearborn, Michigan, USA, 1996.



### 한기준(韓基俊)

1962년 9월 8일생. 1984년 전북대 전자공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년~현재 현대중공업 기전연구소 책임연구원.



### 최세경(崔世卿)

1961년 7월 6일생. 1984년 성균관대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년~현재 현대중공업 기전연구소 책임연구원.



### 정명길(鄭明吉)

1959년 1월 19일생. 1981년 중앙대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년~현재 현대중공업 기전연구소 책임연구원.



### 이세현(李世鉉)

1960년 5월 13일생. 1981년 충북대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년~현재 현대중공업 기전연구소 책임연구원.

## 저 자 소 개



### 박영민(朴英珉)

1969년 12월 8일생. 1996년 성균관대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 현대중공업 기전연구소 연구원.