

440V, 500KVA IGBT Type 인버터의 개발

김 중구·최 옥돈·정 명길·김 명찬·윤 재학·손 진근*
현대중전기(주) 기술연구소

The Development of 440V, 500KVA Inverter System using the IGBT Devices.

Kim J.K.·Choi U.D.·Jung M.K.·Kim M.C.·Yun J.H.·Son J.G.

HYUNDAI ELECTRICAL ENGINEERING CO.,LTD. R&D CENTER

ABSTRACTS - This paper deals with the development of three phase 440[V], 500[KVA] Inverter system using the IGBT Devices. IGBT's have been used very successfully in variable frequency induction motor drive equipment. Problems associated with power devices characteristics when power devices are operated in parallel, such as balanced switching behavior and thermal stability, can be solved by using NPT type IGBT's.

By Experimental results, it is confirmed that the voltage overshoot and reverse recovery current was very low. The equipment had proved to be reliable and short circuit proof. In addition, the performances in term of thermal characteristics, protection functions and stability are satisfactory.

1. 서 론

산업계에서 에너지 절감을 위한 인버터 적용이 일반화됨에 따라 최근에는 대용량 플랜트와 발전소용의 중·대용량의 인버터 적용이 증가 추세에 있다. 그러나 지금까지는 중·대용량의 경우 거의 고압인버터를 사용하여 왔으나 최근 고압인버터에 비해 더욱 경제적인 저압인버터의 적용이 늘고 있다.^[1]

그러나 이는 고내압·대전류화된 반도체 소자의 적용이 필수적이며 이를 위해 소자 자체를 대용량화하는 것은 제작기술 문제 뿐만 아니라 스위칭 특성의 저하 및 가격의 상승을 초래하므로 중용량의 파워 소자를 병렬로 접속하여 대용량화하면 경제적이다.^{[2][3]}

지금까지 스위칭 소자의 병렬운전에서는 BJT가 주로 사용되어 왔으나 정격경감 및 스위칭 손실의 불균형 등 많은 문제점이 대두되어 왔다. 따라서 본 논문에서는, MOSFET의 고속성과 BJT의 저포화 전압특성을 겸비한 IGBT를 채택하였으며, 특히 IGBT의 구조상 PT(punch-through)와 NPT(Non punch-through)의 두 타입중 턴-오프 손실이 온도 상승과 독립적인 NPT타입 IGBT를 채택하여 병렬운전시 나타나는 열폭주 현상등을 방지하였고, 아울러 기존의 BJT타입 300

[KVA]인버터 보다도 외형이 줄어든 500[KVA]인버터 시스템의 개발에 대하여 논하였다.

또한, 게이트 구동회로의 설계시 Ron, Roff 저항값의 최적 선정으로 스위칭 손실 및 파형 변화를 최적화하였으며 과부하 시험, 단락시험, 온도 상승시험등은 물론 각각의 보호기능등을 갖춘 우수한 인버터 시스템을 입증하였다.

2. IGBT의 특징

2-1. IGBT의 종류

IGBT는 기술적으로 BJT와 MOSFET의 장점을 결합한 것으로 입력특성은 MOSFET 특성과 유사한 전압 구동형 소자이고, 출력특성은 BJT의 특성과 유사하다. 이 구조는 MOSFET의 드레인쪽에 p⁺층을 부가한 구조로 되어있으며 이에 따라 IGBT는 기생성(parasitic) 4층 다이오드 구조로 되어있다.

이로 인하여 게이트 전압에 의하여 콜렉터 전류를 제어할 수 없는 Latch-up현상이 발생하게 되는데 이는 트랜지스터의 Current gain을 현저히 줄임으로써 가능하게 되며 이를 기술적으로 처리하기 위해서는 두 가지 방법이 있다. 첫째로는 Buffer 층(n⁺)의 주입이고, 둘째로 p-Zone을 low doping 처리 하는 방법이 있으며, n⁺ Buffer 층을 갖는것을 PT(punch-through) 타입이라 부르고 n⁺ Buffer 층이 없는것을 NPT(non punch-through) 타입이라 부른다.

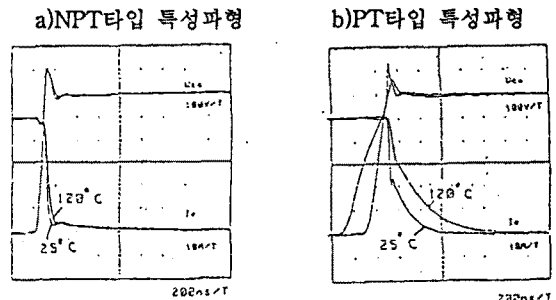


그림1. 온도상승에 따른 턴-오프 파형

따라서, PT타입은 n⁺ Buffer 층의 불순물농도 최적화에 의한 h_{FE}를 제어하는 것이며, NPT타입은 래치업 현상은 물론이고 온도의 증가에 따른 턴오프 스위칭 손실이 일정한 (W_{off}(150°C) ≈ W_{off}(25°C)) 정온도 특성 (V_{ce(sat)}(150°C) > V_{ce(sat)}(25°C))을 가지고 있으므로 병렬운전에 특히 유리하다.

그림1에서는 온도상승에 따른 IGBT의 턴-오프 특성파형을 나타낸 것이며 본 연구에서는, 병렬운전 특성이 우수한 NPT 타입 IGBT를 적용하여 시스템을 구성하였다.

2-2. Gate Drive

그림2는 IGBT의 드라이브 회로를 간략히 나타낸 것으로서 IGBT는 전원전압 V_s(13~15[V])가 게이트에 연결될때 Turn-On 된다. 또한 IGBT의 Turn-Off는 게이트에 (-)전원을 인가할 필요없이 게이트에 충전된 전하를 방전하기만 하면된다. IGBT의 Turn-On, Turn-Off 속도는 resistor R_{on}, R_{off} 값에 따라 조절될 수 있으며, 이값은 IGBT의 총 허용손실, 최대 스위칭 주파수 및 dv/dt 값을 제어할 수 있다. 참고문헌 [4]에서는 이들 값의 증감에 따른 파형변화를 고찰한 바 있다.

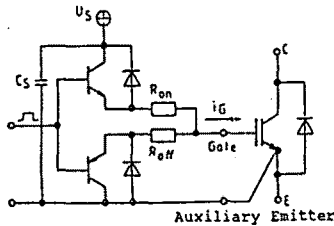


그림2. IGBT의 간략화한 구동회로

IGBT의 병렬운전시 Gate 구동회로는 시스템의 신뢰성과 안전에 직접적인 관계가 있으므로 특히 유의할 필요가 있다. 그림2는 본연구에 적용된 IGBT 구동회로의 구조를 나타낸다. 한개의 IGBT 구동회로내에 Halfbridge 즉, 2개의 IGBT를 구동할 수 있는 회로가 내장되어 있으며 그림3에는 그 중 1개에 대해서만 나타냈다.

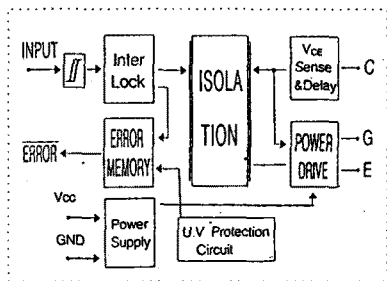


그림3. Gate 구동부의 개략도

Gate구동회로의 구성은 크게 Interlock부, Error 메모리부, 전원부, 제어전원 감시부(u.v검출), Isolation부, V_{CE} 검출과 Delay 및 구동부로 나눌 수 있으며, 기능은 Interlock부에서는 2개의 IGBT가 동시에 ON되는 것을 막기위한 deadtime 설정부로 내부적

으로 2.7[μsec] 설정되어 있다. Error 메모리는 제어전원의 부족전압, Interlock, 파진류및 IGBT 파괴시 이를 검출하여 Latch하고 ERROR 신호를 출력한다.

전원회로는 Isolation전단과 후단에 필요한 전원을 공급하며 전체시스템 구성시 +15[V]의 단일전원으로 제어가 가능하므로 전원회로가 간단하며 한개의 Gate Driver로 1 ARM 즉 16개의 IGBT(200A, 1200V)를 구동할 수 있도록 설계하였다.

2-3. IGBT의 병렬운전

전류정격을 높이기 위한 power 스위칭 소자의 병렬 운전시에는 a). 스위칭 소자의 Pairing b). 라인 인덕턴스의 저감 c). Derating (정격경감)을 충분히 고려하여야만 한다. 특히 스위칭 소자에 있어서의 Pairing은 다음 사항의 조건을 고려하지 않으면 안된다.

- ① ON상태의 손실 균형
- ② 스위칭 손실 균형
- ③ 온도의 안정성

또한, 소자의 병렬운전시 라인 인덕턴스 L_σ에 기인한 스파이크 전압에 의하여 소자의 파괴를 방지하기 위해 전력회로의 배선및 DC BUS의 설계에 유의해야 한다. 운전중 DC BUS단에 발생하는 스파이크 전압은 식(1)과 같다.

$$\Delta V = L_{\sigma} \cdot \frac{di}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

3. 시스템의 구성

3-1. 시스템의 개요

그림4는 개발제품에 적용한 3상 440[V] 입력, 500 [KVA] 범용 인버터에 대한 전 시스템의 구성도이다. 3상 440V 입력을 다이리스터의 트리거 모듈에 의한 세미 컨버터부에서 소프트 스타트 정류하여 DC Link 단을 거친 후 IGBT의 스위칭 조합에 의하여 원하는 3상 교류 출력을 얻는다. 이때의 IGBT는 1200[V], 200[A]용량의 모듈 타입을 각 상당 8개를 병렬접속하여 사용하였다.

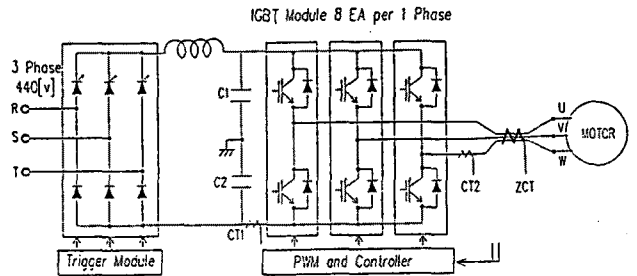


그림4. 전 시스템의 구성도

그림5는 제어회로의 블럭 다이어그램을 나타낸 것이다. 제어프로그램과 Memory는 PSD를 통하여 CPU와 인터페이스하며 Digital Operator와 I/O 인터페이스는 운전 파라메타와 제어명령을 CPU에 전달한다.

Sensing 회로는 모터의 위상 및 이상상태를 검출하여 Analog 처리와 보호회로를 거쳐 CPU에 정보를 전

달한다. PWM 출력파형은 EPLD에 의해 집적화된 Gate Array를 통하여 출력된다.

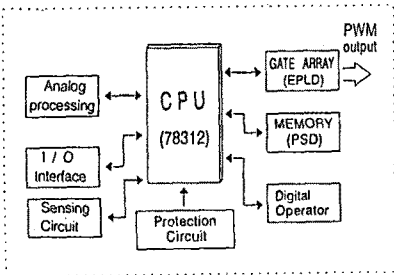


그림5. 제어회로 블럭 다이어그램

3-2. 전력회로 설계

IGBT 병렬운전시 전력회로의 LAYOUT은 스위칭 회로와 캐패시터를 연결하는 BUS BAR의 구조와 설계가 무엇보다 중요하다. IGBT의 동특성과 정상상태 전류분담율을 좋게하기 위해 IGBT의 에미터와 콜렉터사이의 BUS는 적층구조로 하였다.

특히 도체는 대형구조의 격자형회로를 구성하여 Parasitic 및 Stray 인덕턴스를 극소화하기 위해 IGBT와 캐패시터를 BUS BAR를 통해 직접 연결하므로써 스파이크 전압을 최소한 줄일 수 있었다. 그림7에서 정상 운전시 스파이크 전압은 46[V]로 극히 적음을 알 수 있다.

3-3. 표시기능

표시기능은 사용자의 편의를 위해 가능한한 상세하게 제공하였으며 Digital Operator부분에 16자 2 Line LCD를 사용하여 설계하였다. 특히 유지보수의 편의를 위해 다양한 자기진단 기능을 두었으며 고장 표시기능에는 가속, 감속시 과전류, 운전시 과전류, 과전압, 인버터 과열, 과부하운전, 부족전압, CPU ERROR, 순시정전, 지락류즈 용단등이 있다.

또한 인버터의 IGBT파괴시 고장난 ARM을 각각 표시하는 기능이 있어 고장시 고장파악이 간단하여 보수기간을 단축할 수 있는 장점을 가지고 있다.

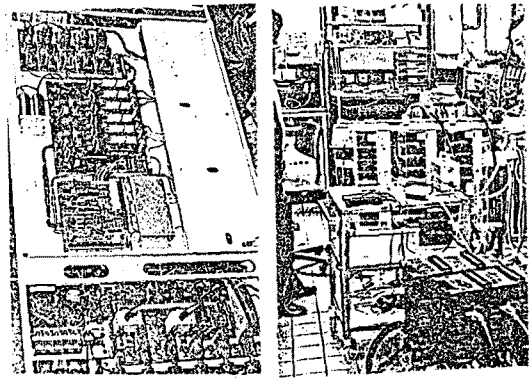
4. 실험의 결과

4-1. 실험파형

그림6은 기존의 BJT타입 300[KVA] 인버터[H社]와 당사에서 개발한 500[KVA] IGBT타입 인버터의 외형을 취부한 것이다. 기존의 (800^W × 1500^L × 450^H)의 형 사이즈 대비 약 20[%]를 감소시켰다. 그림7은 인버터의 출력단에 대한 부하시험 장치 및 Dynamometer를 취부한 그림이다.

그림8은 본 시스템에서 구성한 IGBT의 Turn-off시 소자 1개에 인가되는 전압·전류파형을 나타낸 것이다. 622[V]의 DC 입력전압에 대한 스파이크는 668[V]로서 아주 적게 나타남을 볼수 있다.

그림9는 리액터부하 300[μH]에 대한 부하시험의 결과파형으로서, 정격부하에 대한 150[%]의 과부하를 (1000[A]) 1분간 시험한 것이다.



[a]. BJT 타입 300[KVA] [b]. IGBT 타입 500[KVA]
그림6. 인버터의 외형비교

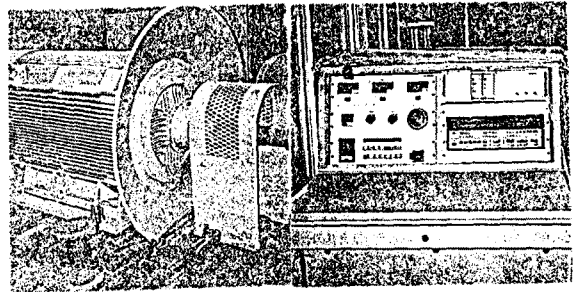


그림7. 인버터의 부하시험 장치
(500[KW] Dynamometer)

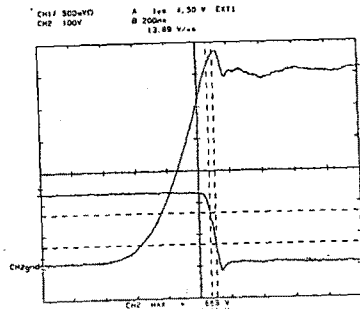


그림8. 턴-오프시 전압 및 전류파형

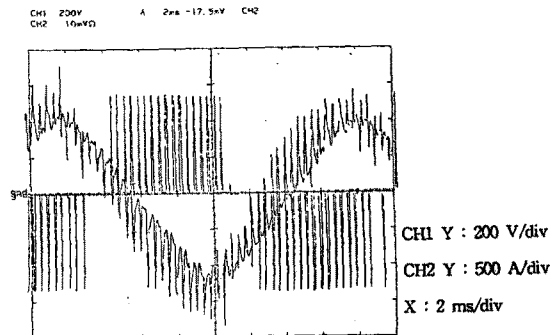


그림9. 1분간 150[%]의 과부하시험 결과파형

표.1은 440[V], 500[KVA]의 IGBT타입 인버터 구성 시 A상의 스위치 S1에 대한 8개의 소자 각각에 대한 전류 분담율을 측정된 결과로 우수한 전류분담율을 보이고 있다. 그림10은 그중 A1,A2 의 전류파형이다.

Table 1. 전류분담 측정결과 (Unbalance Ratio : 1.9%)

A Phase	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	Total
Test result.	75	75	75	75	75	73	72	73	RMS 590[A]

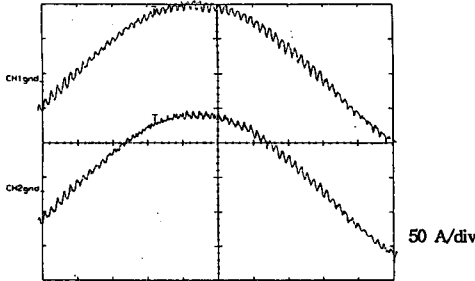


그림10. 출력전류의 분담측정(1A,2A)

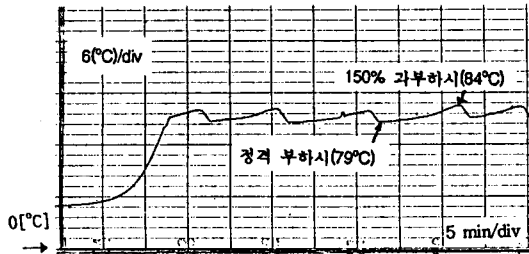


그림11. 연속정격 및 과부하시의 온도상승 시험

그림11은 인버터의 운전에 의한 Heatsink의 온도상승 시험 결과를 나타낸 것이다. 연속 정격부하시에 및 1분간 150[%]의 과부하 운전시에는 주위온도 25[°C] 포함하여 각각 79[°C], 84[°C]의 온도특성을 나타내었다. 그림12는 인버터 단락 시험을 나타낸 것으로서 ARM단락시 과전류 보호회로의 동작특성을 나타낸다.

표2. 개발품 사양 개요

종류	표준 사양
입력전압	440[V]
정격용량	500[KVA]
최대적용 모터	355[KW]
정격 출력전류	657[A]
제어방식	정현파 PWM제어, 전압제어 방식
출력 주파수 제어 범위	1-120[Hz] (0.5Hz시동)
전압/주파수 특성	V/F제어 36종류 절체(저감특성 포함)
가감속 시간	직선 및 곡선 가감속시 1-2,999[sec], 가감속 개별설정
과부하 전류정격	150[%] 1분간(10분간 1회)
토크 부스트	수동부스트 / 자동부스트 절체, 병용가능
입력 신호	블연속(Jogging) 운전
	프리런 스톱
	강제차단신호
	주파수 도달신호
출력 신호	주파수 모니터
	모니터 기능
보호기능	

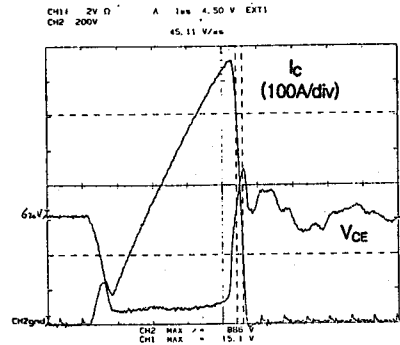


그림12. 인버터 ARM단락 시험 결과

5. 결론

본 연구에서는 기존의 BJT나 PT타입의 IGBT에 비하여 병렬운전이 용이하고, 정저항 특성을 가진 NPT 타입의 IGBT를 적용한 440[V], 500[KVA] 인버터 개발에 대하여 논하였다. 그 특징으로서는

- ①. Ron-Roff 값 및 DC BUS BAR의 최적설계로 NPT IGBT의 넓은 S.O.A 특성에 의해 BJT 인버터와 같이 소자개별 및 총괄 R.C.D 스너버 없이 DC 링크단의 C만으로도 안정된 특성파형을 얻을 수 있었고, 기존 BJT타입 300[KVA] 보다 외형이 오히려 줄어들었으며,
- ②. 각종 보호기능 및 전원회로가 한개의 Gate 구동회로로 1ARM의 병렬 IGBT를 구동할 수 있게하여 시스템의 간략화 및 안정화 실현,
- ③. 150[%]의 과부하 시험, 온도상승 시험, 단락시험 등을 통한 고신뢰성의 입증,
- ④. 다양한 표시기능 제공으로 최대한의 사용자 편의성 제공 및 유지보수의 간편화 실현,
- ⑤. 시스템의 부품 수를 극소화하여 제작 및 보수용이
- ⑥. 기존 동급 BJT 인버터 보다 더욱 경제적인 시스템 개발등을 들 수 있다.

또한, 이번의 기 개발기술을 바탕으로 향후 전동차용 SIV, TRACTION용 VVVF 및 다양 응용분야에 적용이 가능하리라 사료되며, 향후 계속 냉각기술 개발과 용량증대를 위한 시리즈화 연구를 추진할 계획이다.

***** 참고 문헌 *****

- [1]. Roger G. Lawrence, "Parall Operation of Darlington Transistor in a Large 480V, 700HP Induction Motor Drive", IEEE Trans., VOL. 21., 1991, pp210-214.
- [2]. SEMIKRON Application News, "IGBT Modules Application and Control". 1992.
- [3]. Remeo Lator, "Static and Dynamic Behavior of Parralleled IGBT'S," IEEE Trans., IAS., VOL.28, NO.2, pp 95-402, 1992.
- [4]. 김 중구, 최 옥돈의 4인, "IGBT 병렬운전에 의한 중용량 인버터의 POWER 회로 개발", 전력전자 연구회 춘계학술대회 논문집, pp9-12, 1993.