IPM 소자를 사용한 추진제어장치 개발 및 상용화
Development and Revenue Service of Propulsion System Using IPM

이광국* 김동명** 권일동***
K.K. LEE D.M. KIM I.D. KWON

ABSTRACT

In this paper, Development of propulsion system using IPM(Intelligent Power Module) for DC electric vehicle is proposed. Designed propulsion system is comprised of inverter stack which includes 6 IPM, BCH(Breaking Chopper) unit, FC(Filter Capacitor), Control unit. IPM can compose propulsion system simple by including gate drive circuit and protection circuit. Inverter stack is designed as a simple structure using IPM and non clamp capacitor. VVVF Inverter control is used the vector control strategy at low velocity region and slip frequency-control strategy at high velocity region. Designed propulsion system proves the performance through test and revenue service.

1. 서 론

직류 전동차 구동을 위한 추진제어장치는 직류전원으로부터 3상 유도전동기를 구동하기 위하여 교류로 변환하는 인버터이다. 전력전자 기술의 발달로 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)의 대용량화가 가능하게 되어 최근 전동차 추진제장치의 주 전력용 반도체 소자로 많이 사용되고 있다[1]. IGBT는 고주파 스위칭을 통해 저소음의 시스템 구현이 가능하고, 인버터의 출력 파형을 거의 정현파화 할 수 있으며 전압 구동형 소자이기 때문에 구동회로를 간단하게 구성할 수 있다. 그러나 IGBT의 경우에는 별도의 구동회로가 필요하고, 외부에 보호회로 구현이 필요하다. IPM(Intelligent Power Module)은 모듈내부에 전력반도체 소자 및 구동회로 보호회로를 포함하고 있으며, OC(Over Current), OT(Over Temperature), UV(Supply Circuit Under Voltage)의 세 가지 보호동작 기능을 포함하고 있는 것이 특징이다. 그리고 구동회로를 모듈내부에 포함하고 있어 IGBT의 경우 발생되는 별도의 구동회로상의 문제로부터 벗어 날 수 있고, 시스템 구성을 단순화 할 수 있다.

국내에서 IPM을 이용한 추진제어장치의 개발 적용은 이미 지난 2000년 서울시 6호선의 MELCO 추진제어시스템에 적용되었으나 당시 국내의 전장품 제작사는 IGBT로 개발하여 국내 전동차에 탑재하여 시운전을 하고 있었으며 이후 2004년 광주 1호선에 적용되었다. 국내 제작사에 의한 IPM적용은 교류전동차용 추진제어장치(Converter/Inverter)로 1대가 개발되어 분당선에 적용하여 3개월간 영업 운전을 성공적으로 마친바 있다. 본 논문은 양산용 개발은 처음이자 선행연구인 'IPM 스위칭 소자를 적용한 AC 전동차 추진제어장치'의 연속선상으로써 시스템의 구조를 보완, 개선하여 제안하였다. 설계된 추진제어장치는 인버터 스텍의 구조를 단순화 하였고, 구성품 시험, 현차 시험 및 영업시운전을 통해 나타난 문제점을 보완하여 개발된 추진제어장치의 성능을 입증한다.

* (주)로템 기술연구소 전장품개발팀 연구원, 비회원
** (주)로템 기술연구소 전장품개발팀 주임연구원, 비회원
*** (주)로템 기술연구소 전장품개발팀 연구원, 비회원

2. 추진제어장치의 설계

2.1 추진제어장치의 구성

그림 1.은 본 논문에서 제안한 추진제어장치 회로도를 나타낸다. 추진제어장치는 가선 전류 및 귀선 전류에 포함된 고조파 전류 성분을 억제하고 인버터 장치에 입력되는 가선 전압을 안정화 시키는 FC(Filter Capacitor), 전력반도체 소자인 IPM이 각 상당 2개씩 6개 포함되어있고, 회생제동시 FC의 과전압을 방지하기위한 DBRE(제동저항), BCH(Braking Chopper) 그리고, FC 전압을 측정하기 위한 DCPT(DC Potential Transformer), 인버터에서 Motor로 출력되는 전류를 측정하기 위한 CT(Current Transformer)로 구성된다.

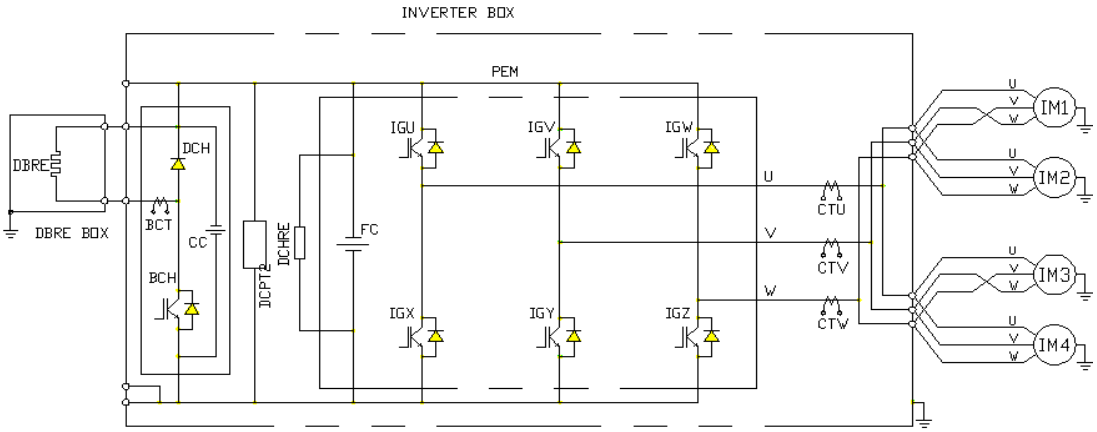

그림 1. 추진제어장치 회로도

2.2 전력반도체소자의 선정

전력반도체소자(IPM)의 전압정격은 Turn Off시 예상되는 Spike 전압 2,340V의 120% 여유를 고려하여 2,808V 이상인 3,300V 급으로 선정하였다. 전류정격은 인버터 역행 최대 출력용량 및 출력최대 전압을 산정하여 역행 시 IPM에 흐르는 최대 전류를 산정하면 911A이고, 전류정격을 최대전류 이상인 1,200A 급으로 선정하였다. 그림 2.및 표 1.은 추진제어장치에 적용된 전력반도체소자의 Block Diagram 및 특성을 나타낸다.

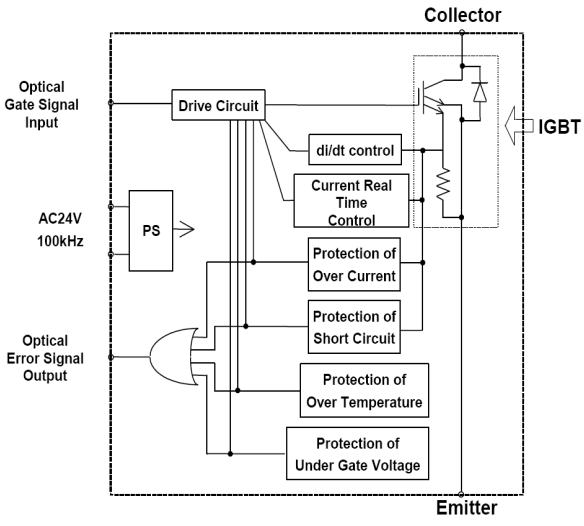

그림 2. IPM Block Diagram

표 1. IPM 특성[3]

Symbol	Item		Conditions	Ratings			Unit
				Min	Typ	Max	
Vces	Collector-Emitter Voltage		Tj = 25℃		3,300		V
Ic	Collector Current		Tj = 25℃		1,200		A
Icp	Peak Collector Current		Tj = 25℃		2,400		A
OC	Over Current Trip		Tj = 25℃ ~ 125℃	2,200	-	-	A
OT	Over Temperature Protection	Trip		103	113	123	℃
OTr		Reset		88	98	108	℃
UV	Supply Circuit Under Voltage Protection	Trip	Tj = 25℃ ~ 125℃	19.2	20.0	20.8	V
UVr		Reset		-	20.5	-	V

2.3 인버터 스텍 설계

그림 3.는 종전에 사용되는 인버터 스텍 구조 및 회로도를 나타내고, 인버터 스텍은 전력반도체 소자, 클램프 커패시터, 게이트 구동장치, Busbar, 스텍으로 구성되어있다. 그림 3.에서 클램프 커패시터는 전력반도체 소자의 On/Off 스위칭 시에 발생하는 surge 억제용으로 사용된다.

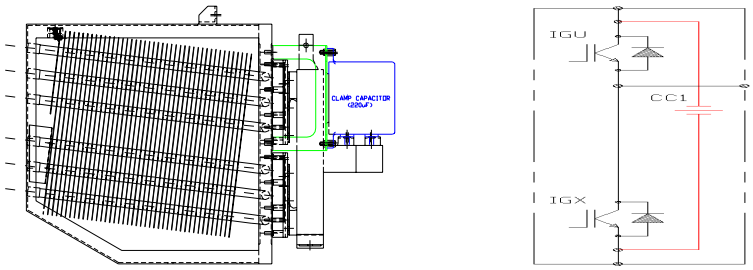

그림 3. 종전의 인버터 스텍 구조 및 회로도

본 논문에서 제안한 추진제어장치 인버터 스텍은 Busbar의 길이를 최소화하여 클램프 커패시터를 제거하고 FC가 clamping 기능을 가능하게 하였고, 냉각장치(Heat Pipe)의 Base를 일체화하여 그림 4.과 같이 6개의 IPM을 취부하는 구조로 설계하였다.

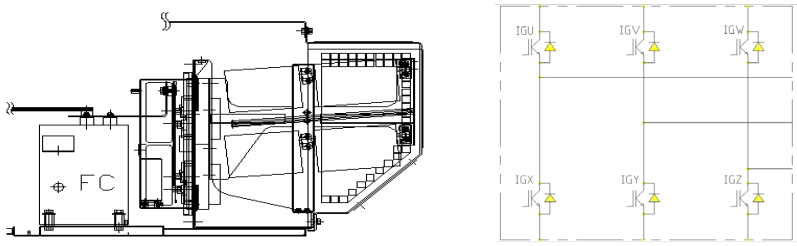

그림 4. 개선된 인버터 스텍 구조 및 회로도

스텍의 냉각 용량 설계는 그림 5. 열차모의주행 시뮬레이션과 그림 6.의 변조율 그래프 통하여 IPM 스텍 손실을 계산하여 표2.로 나타낸다. 설계된 스텍에 스텍과온 검지을 위하여 80℃로 설정된 2개의 온도센서를 취부하여 IPM의 과온 보호와 함께 이중으로 과온 보호를 하였다.

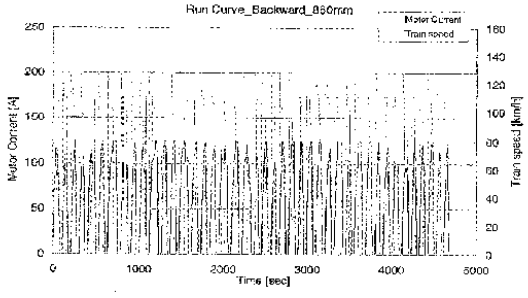

그림 5. 열차주행패턴(역정차30초)

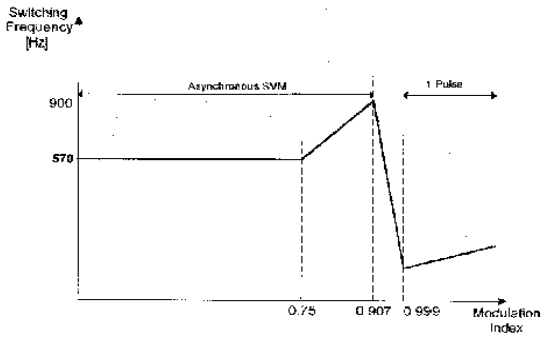

그림 6. 변조율 그래프

표 2. IPM 스텍의 손실

차륜경	차량의 주행방향	IPM stack 평균 손실
820mm	Forward	3886W
	Backward	3911W
860mm	Forward	4073W
	Backward	4074W

2.4 제어기와 IPM의 인터페이스

그림 7.는 제어기와 IPM 간의 인터페이스도를 나타낸다. 제어기와 IPM 간은 광신호를 통해 인터페이스 되어있고, 제어기를 통해 연산된 gate control signal는 광신호를 통해 IPM에 전달되고 IPM은 내부의 광신호 변환회로를 통해 전기신호로 변환하여 IPM 내부의 Gate Drive를 통해 스위칭을 한다. IPM에서 OT, OC, UV 검지시 Protection and Detection Unit을 통해 나온 신호를 광신호로 변환하여 제어기로 전달하는 구조로 되어있다.

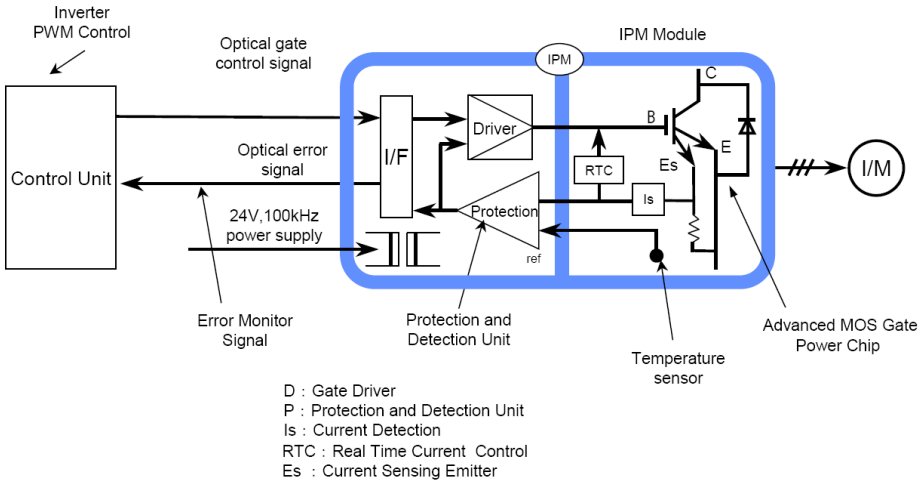

그림 7. 제어기와 IPM의 인터페이스

제어기는 출력전압의 선형제어가 가능한 저속영역에서는 벡터제어를 사용하여 정밀한 순시 토크 제어가 가능하도록 하였다. 회전자 자속각을 얻기 위해 전류 모델과 전압 모델을 결합한 자속 추정 방법을 사용하는 직접벡터제어를 적용하였으며 저속에서는 회전자 전류 모델로부터 추정된 자속이 선정되며 고속에서는 전압 모델로부터 추정된 자속이 선정되도록 한다. 전류제어를 위해서는 역기전력을 전향보상한 동기 좌표계 PI 전류제어기와 공간전압벡터 PWM 기법을 사용하였다[2]. 고속영역에서는 슬립주파수 제어를 사용하였다. 벡터제어에서 슬립 주파수제어로 제어방법 변화 시 과도현상 없이 부드럽게 전환될 수 있도록 제어하였다.

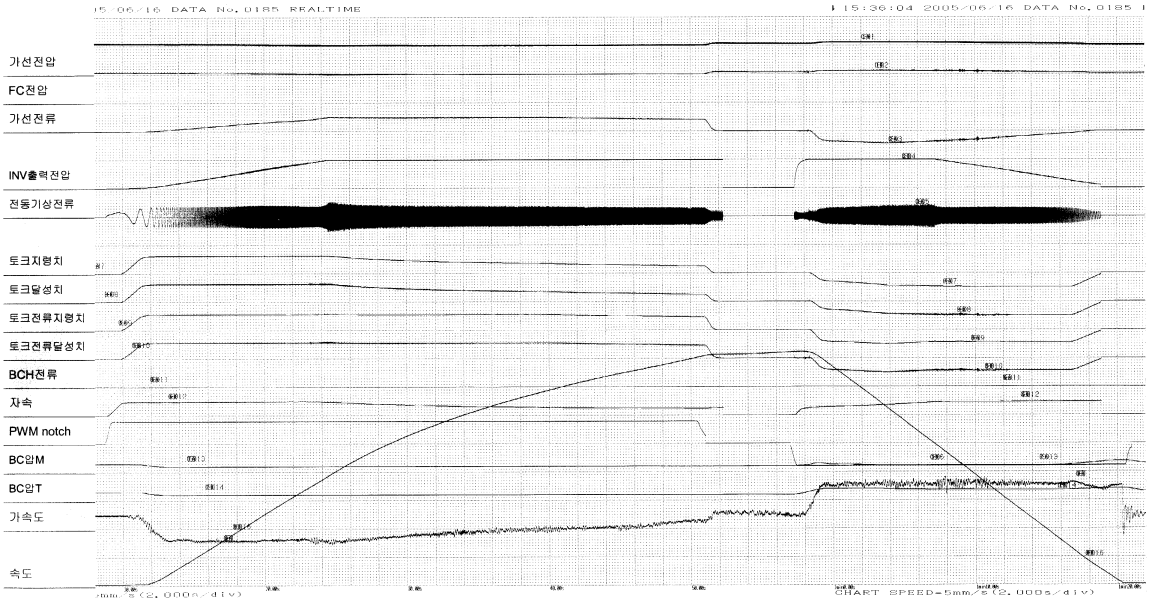

그림 8. 본선 시운전 파형

3. 본선시험 및 시운전

3.1 시스템의 성능

설계된 추진제어 장치는 단품시험 및 완성차 시험, 본선시운전을 통해 설계된 추진제어장치의 타당성을 입증하였다. 그림 8.은 본선시운전 시험 파형으로 토크 지령치 및 토크 달성치 데이터를 통하여 가속 및 감속 전 구간에 걸쳐 토크제어가 잘 이루어짐을 알 수 있다.

그리고 출발 시 또는 벡터제어에서 슬립주파수제어 전환구간, 제동초기 및 제동 Blending 구간에서 큰 충격 없이 가속도 변화가 이루어짐을 알 수 있다. 초기 가속구간의 가속도는 설계 목표치인 3.0km/h/s 이상을 만족하고, 감속구간 역시 설계 목표치인 3.5km/h/s 이상을 만족한다.

3.2 본선 시운전 시 발생한 문제점 및 해결

만차하중(20톤)으로 본선 2회 순환 뒤 스택 과온이 발생하였으며 문제점 검토결과 스택 과온의 원인은 스택의 온도상승 설계 시 차량의 영업 운전 패턴을 기준으로 냉각설계 설계를 하였으나, 형식시험 진행을 위해 기준이 된 운전패턴에 비해 가혹하게 정차시간의 적용없이 역행(P4) 및 제동(B7) 패턴을 빈번하게 반복하여 스택 과온이 발생된 것으로 추정되었다. 이런 문제점 해결을 위해 그림 9.에 나타난 온도센서 TH1, TH2를 'AND' 조건으로 설정하고, 스택 과온 검지시 추진제어장치 출력을 저감하여 온도상승을 방지하고, 스택 온도가 60℃이하로 떨어져 과온 검지가 해제되면 추진제어장치 출력을 100% 재 출력 하도록 수정하여 운행한 결과 문제가 없었다.

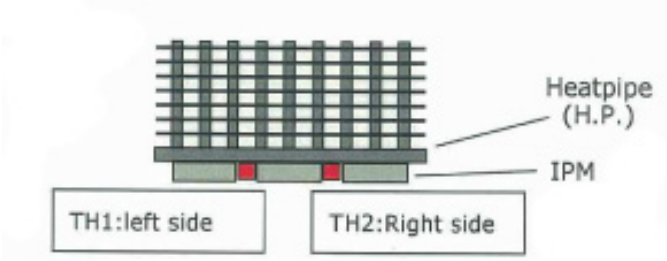

그림 9. 인버터 스택의 구조

4. 결론

본 논문에서는 IPM 소자를 이용한 직류전동차용 추진제어장치를 설계하였고, 설계된 추진제어장치는 전력반도체 소자 스위칭 시 발생하는 surge 억제용 클램프 커패시터를 제거하여 인버터 스택 구조를 단순화하였다. 설계된 추진제어장치는 시운전을 통해 성능을 입증하였고, 현재까지 약 3개월간 성공적으로 영업 운행되고 있으며, 이 후 제작되는 추진제어장치에 많이 적용될 것으로 사료된다. 앞으로는 스택이 일체화 되면서 HEAT PIPE의 냉각핀 배열에 의한 주행풍의 방해를 줄이기 위한 노력과 함께 IGBT의 장점인 고속 스위칭을 하면서 냉각장치의 크기를 최적화 할 수 있는 노력이 계속되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] J. Holtz (1992.), "Adaptive Optimal Pulse-Width Modulation for the Line-Side Converter of Electric Locomotives", IEEE Trans. power electronics., vol. 7, no. 1, pp. 205-211.

[2] 김태윤, 노애숙 (2005), "IPM 스위칭 소자를 적용한 AC 전동차 추진제어장치" 전력전자학회논문지, 제10권, 제3호, PP.223-240.

[3] "PM1200HCE330-1, High Voltage Intelligent Power Module Specification", Data sheet, Mitsubishi Electric.

[4] Takamasa Kanzaki, Ikuo Yasuoka and Gorge Yamamoto (1983), "Direct Digital Controlled PWM GTO Inverter for DC 1500V Electric Cars", in proc. IPEC-Tokyo. pp. 1587-1598.

[5] Mikio Ohta, Atsushi KAGA, Mitsuo Muneyuki and Eiji Akagawa (1983), "AC Propulsion System for Kumamoto Municipal Transportation Bureau.", in proc. IPEC-Tokyo. pp. 1575-1586.