

전기 자동차용 고성능 및 고신뢰성 인버터 개발

김일한* · 이선우 · 홍찬욱 · 양천석 · 김경서
LS 산전 EV-PCU CFT

Development of Inverter for Battery Powered Electric Vehicle

Ilhan Kim* · Seonwoo Lee · Chanook Hong · Chunsuk Yang · Kyungseo Kim

EV-PCU CFT, LS Industrial System, 533, Hoge-dong, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do 431-749, Korea

요약 : 인버터(inverter)는 고전압 배터리(battery)로부터 에너지를 공급받아 전동기를 제어하는 장치로써, 전기자동차 구동력 제어를 위한 전기 동력전달장치(electric powertrain)의 핵심장치이다. 이러한 전기 자동차용 인버터는 가혹환경 조건에서 고신뢰성을 보장하여야 하며, 차량의 최적 구동을 위하여 전동기를 고속 및 고효율로 제어할 필요가 있다. 본 논문에서는 전기 자동차용 인버터의 출력밀도(power density) 향상, 고신뢰성 확보 및 전동기 최적 제어를 위한 최적 수냉기구 개발 결과와 자동차용 사양(automotive spec.)의 고신뢰성 하드웨어 개발 결과 그리고 전동기의 고효율/고속 제어 기술 개발 결과를 소개한다. 또한 본 논문의 인버터 개발 결과를 적용한 유럽 전기 자동차 전문 메이커의 성공적인 NEV(Neighborhood Electric Vehicle) 개발 사례에 대하여도 다룬다.

Key words : Electric Vehicle(전기 자동차), Inverter(인버터), Power Control Unit(파워 컨트롤 유닛), Powertrain(동력전달장치), Power Density(출력밀도)

1. 서 론

최근 자동차의 배기가스로 인한 대기오염 및 지구온난화와 같은 지구환경보호와 에너지 자원의 고갈대책으로 에너지 절약정책이 추진되고 있다¹⁾. 이러한 문제를 해결하기 위해 공해 배출이 없고, 연료 의존성이 없으며, 운영비가 저렴한 전기 자동차에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

인버터(inverter)는 직류전압(전류)을 교류전압(전류)으로 변환하는 DC-AC 전력변환장치로, 직류

인 배터리를 사용하여 교류 전동기를 구동해야 하는 전기 자동차의 중요한 동력전달장치이다. 전기 자동차용 인버터는 기존의 산업용 인버터에 비해 가혹한 조건에서 동작해야 하며, 고속 주행에 따른 전동기의 고속 제어 알고리즘이 필요하다. 또한 제한된 공간에 설치되어야 하므로 인버터의 소형화 또한 중요하다.

이러한 요구 조건에 따라 본 논문에서는 개발된 자동차용 인버터의 사양을 회로, 구조 및 제어적인 관점에서 제안한다. 또한 인버터가 실제 NEV(Neighborhood Electric Vehicle)에 적용된 사례도 언급한다.

2. Power Control 부

* 김일한 , E-mail: ihkim@lisis.biz

본 논문에서 제한하는 인버터는 fig. 1 과 같은 회로로 구성되어 있다. 교류 전동기 1대를 구동할 수 있는 IGBT 모듈과 각종 신호를 주고 받아 전동기를 제어하는 제어보드로 구성되어 있다.

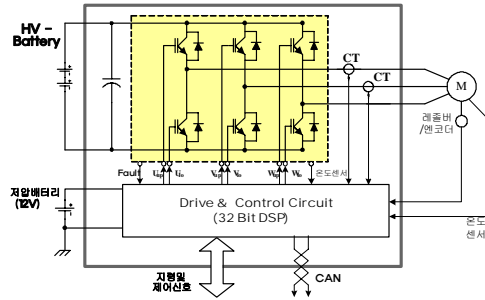


Fig. 1 PCU circuit layout.

2.1 Power 부

3상 교류 전동기를 구동할 수 있도록 하기 위하여 IGBT 모듈을 이용하여 3상 전압형 인버터를 구성하였다. IGBT 모듈은 자동차 사양의 온도 범위에서도 동작할 수 있는 모듈을 선정하였다. 구동 대상이 중성점이 없는 3상 교류 전동기로 한정되어 있으므로 전류 센서(CT)는 두 개를 사용하였다.

직류단 커패시터는 전해 커패시터를 사용하는 산업용 인버터와 달리 필름 커패시터를 사용하였다. 필름 커패시터는 전해액을 사용하지 않으므로 전해 커패시터에 비해 긴 수명을 보장하며, 허용리플 전류 또한 크기 때문에 큰 리플 전류가 발생하는 인버터에 적합하다.

2.2 제어부

제어부 IGBT를 구동하여 차량 운전자의 요구에 맞게 전동기를 제어하는 역할을 한다. 전동기 제어를 위해 각 상의 전류 및 전동기 회전자 위치를 측정한다. PCU 이외의 다른 장비와의 통신을 위해 CAN 통신이 가능하다. 또한 과전압, 과전류 등 각종 고장 상황을 검출하여 안정된 동작을 하도록하였다.

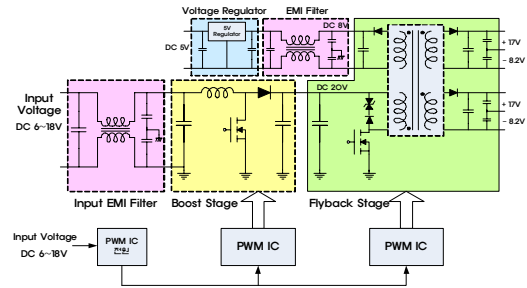


Fig. 2 제어보드 전원회로.

제어보드의 전원은 기존의 자동차에서 사용하던 12V 배터리를 사용하는 것을 목표로 하였다. 배터리의 전압 변동 가능 범위인 6~18V에서도 안정된 전원을 공급 받아 제어 보드가 동작할 수 있도록 전원단을 Fig. 2 와 같이 구성하였다. 또한 EMI 필터를 구성하여 노이즈에 강인하도록 설계하였다.

3. 기구부

차량의 제한적인 공간에 설치할 수 있도록 수냉식 구조를 택하여 소형화 하였다. 부피는 동일한 용량 대비 산업용 인버터의 18.3~25.5% 이며, 이에 따라 출력 밀도는 산업용 인버터의 약 3.8~5.4배로 크게 향상 되었다. Fig. 3 에 출력 밀도의 비교치를 나타내었다.

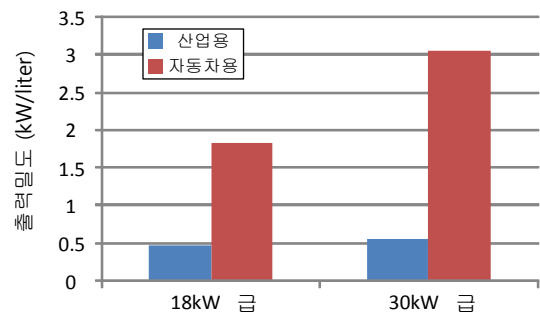


Fig. 3 산업용 및 자동차용 인버터의 출력 밀도 비교.

본 인버터는 내진동 및 내충격 설계 개념을 반영하여 PCB는 6점 또는 최소 4점 볼트 체결 지지 방식을 채택하였으며 기타 터미널 블록(terminal block)등은 최소 3점 볼트 체결 지지 방식을 채택하였다. 하우징의 재질은 EMC 및 주변 공기 온도

(최대 105℃)에 대한 Thermal Isolation을 구현한 다이 캐스팅(die-casting)방식으로 성형하였다. 인버터의 외관은 Fig. 4 에 나타내었다.

냉각 핀(fin)은 냉각 성능을 최우선적 고려 대상으로 하고, 금형의 수명 및 성형성을 고려하여 최적화하여 설계하였다. 유속 및 방열판의 온도 해석 결과는 Fig. 5 과 같다.

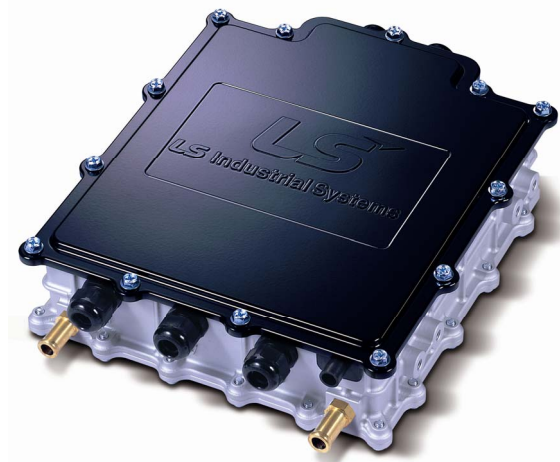


Fig. 4 인버터의 외관.

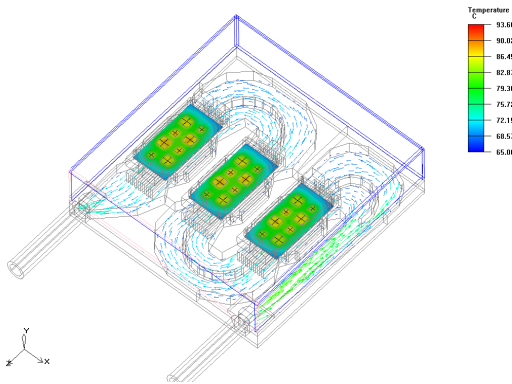


Fig. 5 유속 및 방열판 온도 해석.

4. 전동기 제어³⁾

자동차의 구동을 위하여 전동기는 토크를 제어해야 하고, 운전 특성상 고속 영역에서도 구동이 가능하여야 한다. 따라서 벡터 제어를 적용하여 토크 제어를 하였으며, 약자속 제어 알고리즘을 적용하여 고속 제어가 가능하도록 하였다.

4.1 벡터 제어

벡터 제어는 회전자 자속의 크기와 위치를 제어하고 그로부터 전기각으로 90° 떨어진 곳에 토크 발생분 전류가 위치하도록 하고 그 크기를 원하는 토크의 크기에 따라 제어하는 것이다. 유도기의 벡터 제어 기법은 간접과 직접의 두 가지로 나눌 수 있으며, 본 논문에 제시한 인버터에는 간접 벡터 기법을 적용하였다.

4.2 약자속 제어

인버터는 이용 가능한 직류단 전압이 한정되어 있고, 반도체 소자의 정격으로 인하여 출력 전압과 전류 용량이 제한 된다. 이와 같은 인버터 정격의 제한으로 인해 전동기의 입력 전압과 전류는 제한 받게 된다. 특히 정격 속도 이상의 고속 운전을 하는 경우 역기전력으로 인해 전압의 제한을 받게 된다. 이를 해결하기 위해 전동기의 자속을 줄여서 운전하는 약자속 제어를 구현하였다. 자속의 크기는 기저 주파수 이상의 속도에서 주파수에 반비례 하도록 하였으며, 출력 전압이 제한되는 것을 고려하여 출력 토크를 제한하였다.

5. 적용 사례

본 논문에서 제안한 인버터를 이용하여 유럽 전기 자동차 전문 메이커에서 실제 차량을 개조하여 NEV(Neighborhood Electric Vehicle)를 개발하였다. 수냉식 농형 유도 전동기를 동력원으로 사용하였으며, 리튬 이온 폴리머 전지를 에너지원으로 사용하였으며, 고정비인 기어를 사용하였다. 30kW PCU 가 장착된 차량 제원과 사진은 Table 1 과 Photo. 1 에, 18kW PCU 가 장착된 제원과 사진은 Table 2와 Photo. 2 에 나타내었다.

Table 1 30kW 인버터 적용 차량 제원

L x H x W(mm)	3864 x 1721 x 1684
중량(kg)	1700
최대출력(kW)	30 (@ 2500rpm)
최대토크(Nm)	116.24 (@ 0~2500rpm)
최고속도(km/h)	90
Battery 전압(V)	205



Photo. 1 30kW 인버터 장착 차량.

Table 2 18kW 인버터 적용 차량 제원

L x H x W(mm)	2940 x 1770 x 1460
중량(kg)	800
최대출력(kW)	18 (@ 2500rpm)
최대토크(Nm)	69 (@ 0~2550rpm)
최고속도(km/h)	50
Battery 전압(V)	205



Photo. 2 18kW 인버터 장착 차량.

6. 결 론

본 논문은 고성능 및 고신뢰성의 전기 자동차용 인버터를 제시하였다. 제시한 인버터는 자동차 규격에 부합하며, 소형으로 높은 출력 밀도를 갖는다. 전동기의 고속 제어를 위하여 벡터제어 및 약자속 제어 알고리즘을 사용하여 넓은 속도 범위에서 안정된 동작을 할 수 있도록 하였다. 끝으로 개발한 인버터를 NEV에 장착하여 시험함으로써 그 성능을 검증하였다.

References

- 1) 조주희, 이현용, 오홍석, 조상욱, 윤중석, 김덕근, “하이브리드 전기자동차용 구동 전동기의 기술동향,” 한국자동차공학회 2005년 추계 학술대회논문집 Vol.Ⅱ, 2005.11, pp.1449 - 1452.

- 2) Ryoji Hironaka, Hironobu Kusafuka, “Development of small size Power Control Unit,” EVS 22 Proc., 2006.10, pp.1655-1662.
- 3) 설승기, 전기기기제어론, 5장, 홍릉과학출판사, 2007.