특집 전기차 산업의 전망과 기술 및 기반구축 현황

전기차용 인버터 기술

양천석 (LS산전(주) 수석연구원/EV Control 연구팀장)

1. 개 요

최근 Global 환경문제의 극복과 화석연료 고갈에 따른 유가상승의 문제를 해결하기 위하여 전세계적으로 전기차 개발이 경쟁적으로 진행되고 있다. 유럽, 북미 그리고 아시아의 모든 글로벌 자동차 업체들은 전기차를 개발 중이며, 일본의 미쯔비시와 닛산은 이미 전기차를 양산하기 시작하였다. 특히 닛산의 전기차인 Leaf는 상용화의 핵심 걸림돌 중 하나인 가격 측면에서도 경쟁력을 보유하고 있다. 물론 Battery의 성능과 가격에 기인하는 주행거리의 한계를 극복해야 하고 충전인프라 구축 등 선결과제가 산재하지만, 기술적으로 전기차는 더 이상 미래차가 아니라는 판단이다. 이러한 전기차에 있어, 배터리와 인버터 그리고 모터는 전기차용 Electric Power Train의 핵심부품이다. 전기차용 인버터는 모터를 구동 및 제어하기 위한 장치로써, 고신뢰성 H/W, 고속/고효율 모터제어 성능, High Power Density, 보호/진단수단의 특성을 가져야 하며, Vehicle 제어기와 연계하여 차량의 구동력을 최적으로 제어해야 한다.

2. 전기차용 인버터 기술의 특징

표 1은 승용차급을 기준으로 한 전기차용 인버터 사양의 예이다. 이러한 사양은 산업용 인버터와 비교하여 전기차용 인버터가 갖추어야 할 기능과 성능을 함축적으로 보여준다. 50[kW]부터 100 [kW]까지의 인버터 출력범위는 소형승용차부터 SUV까지의 승용차량을 커버하며, 인버터 구동전원으로는 DC 200~400[V]이며, 이것은 리튬이온 등의 배터리 SOC를 감안한 DC전원 입력범위이다. 제어전원으로는 엔진차량과 같이 12[V]급 납축전지 배터리를 사용한다.

전기차의 Electric Power Train에 있어서, 구동력은 엔진대신에 모터를 이용하는데, 모터의 구동력을 Transmission을 통하여 휠에 전달한다. 그런데, 모터의 토크-속도 최대능력곡선이 엔진과 다르게 속도에 따라 연속적이기 때문에 전기차에서 사용하는 Transmission은 엔진차량과 같이 다단일 필요가 없으며, 보통 일정한 하나의 고정 감속비를 갖는다. 이러한 감속 특징과 차량에서 필요한 속도 및 토크 특성을 감안하여 전기차용 인버터는 ~12,000[rpm] 정도까지 모터를 고속 제어해야 하며, 이는 산업용보다 4배 이상의 범위이다. 또한 전기차의 연비 측면에서 가능한 동일 배터리 에너지로 보다 먼 거리를 주행할 필요가 있으므로, 전기차용 인버터는 고효율 특성을 가질 것이 요구된다. 또한 전기차용 인버터는 가혹한 자동차 내환경에서 고신뢰성을 보장해야 한다는 것이다. 표 1은 대표적으로 온도, 진동, EMC특성 및 외함보호등급 측면에서 전기차용 인버터가 보장해야 할

기본 사양인 데, 이를 달성하기 위한 회로 및 구조 설계가 요구된다. 뿐만 아니라 자동차라는 한정된 공간 특성과 고연비 달성측면에서 전기차용 인버터는 높은 Power Density를 가질 것이 요구된다. 덧붙여 자동차는 운전자의 안전이 중요하므로 자동차용 인버터는 자체 및 차량제어기(VCU)와 연계하여 철저한 보호/진단 수단을 확보하고 예방적 고장조치 기능을 가져야 한다. 그림 1은 고신뢰성 및 High Power Density를 갖는 수냉구조의 자동차용 인버터 외관이다.

표 1. 승용급 전기차용 인버터 사양의 예

출력 정격	출력[kW]	50~100[kW]
	과부하내량	200[%] / 2분
입력 정격	입력 전원	Battery
	입력 전압	DC 240~400[V]
제어전원		Battery DC 12[V]
외함 보호 등급		IP65 이상
운전속도		~12000[rpm]
냉각 방식		강제 수냉
냉각조건		8 LPM, 65 [℃]
동작온도		-40[℃]~+85[℃]
진동조건		~5g
EMC		단품/차량 조건만족
수명		완성차 업체별

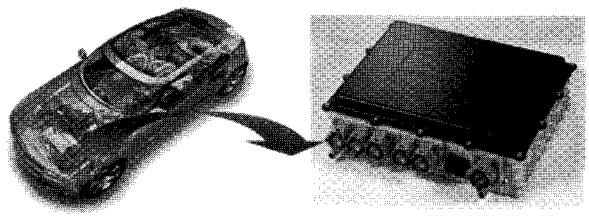


그림 1. 수냉구조의 자동차용 인버터 외관

2.1 고신뢰성 회로 기술

전기차용 인버터가 자동차 내환경에서 고신뢰성을 가지려면 인버터의 모든 부품이 Automotive Spec.을 가져야 하는 것이 출발점이다. 그림 2의 전기차용 인버터 전력회로에서 IGBT 모듈은 DC입력전원을 모터 구동을 위한 교류 전원으로 변환하기 위한 전력용반도체 스위치로써 전기차용 인버터의 H/W 신뢰성에 가장 큰 영향력을 끼치는 핵심소자이다. 따라서 자동차 내환경을 만족하는 인버터 구현을 위해 온도/진동/수명 측면에서 Automotive Qualified 특성의 IGBT를 적용해야 한다. Infineon의 자동차용 IGBT 모듈의 주요 특징은 다음과 같다.

- Low Power Loss Technology
- TC rugged Al203 DBC
- Enhanced Wire Bonding
- DBC Soldering Using Ball Bump
- Flat Copper Base Plate
- High Reliability

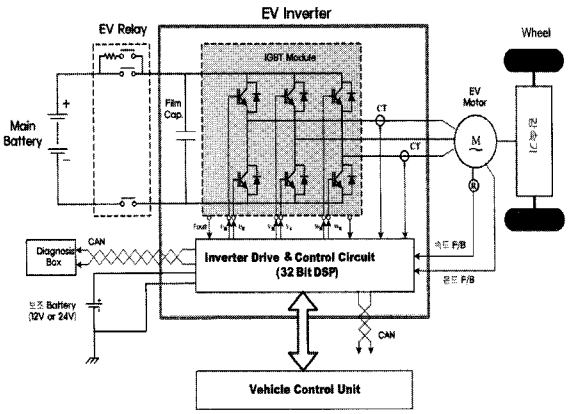


그림 2. 전기차용 인버터의 Power 회로

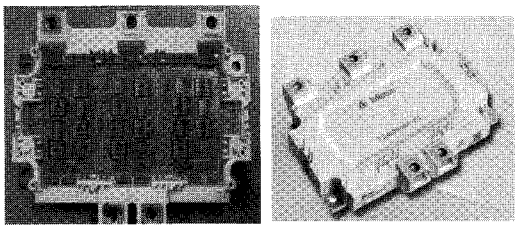


그림 3. 전기차용 인버터의 IGBT 모듈

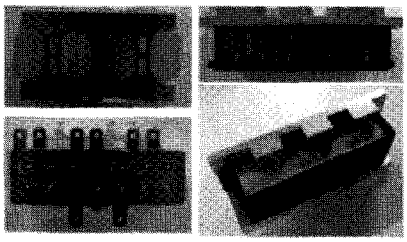
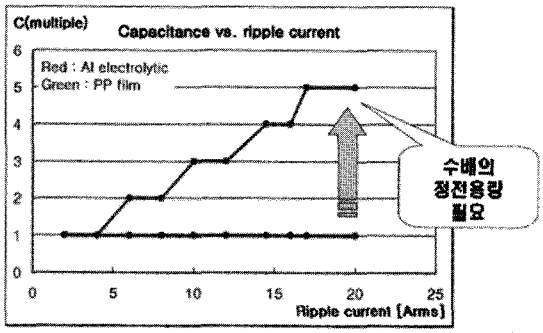


그림 4. 전기차용 인버터의 Film Capacitor



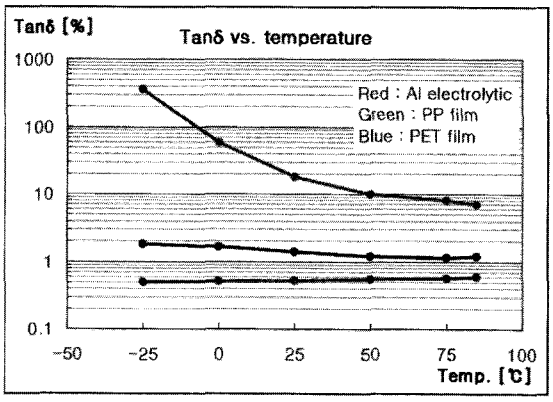


그림 5. Capacitor 종류에 따른 ripple 전류 및 손실 특성

전기차용 인버터의 DC-link Capacitor는 입력전원이 DC이므로 전압평활이 아니라 전류 ripple을 감당하는 것이 핵심기능이다. 그런데 ripple 전류와 Capacitor의 ESR 성분에 의한 손실로써 Capacitor의 온도가 상승하게 된다. 또한 Capacitor의 수명은 온도에 영향을 받는다. 그러므로 따라서 전기차용 인버터의 DC-link Capacitor는 전해 Capacitor를 사용하는 산업용 인버터와 다르게 고전류 Ripple/저손실/장수명 확보를 위해 Film Capacitor를 적용한다. 또한 동일 재질의 Film Capacitor라 하더라도 병렬로 구성된 cell의 전기적 결선구조에 따라 등가 ESR이 달라지는 만큼 내부 회로의 최적구조 설계를 위한 know-how가 요구된다. 한편 Film Capacitor는 fuse 기능을 갖도록 작은 격자로 패턴화 되어 증착되고, 단위영역에서 전류 balancing 문제라든가의 이유로 소손되면, 해당 영역을 회로에서 절연시키는 Self-Healing 기능을 가진다.

그 밖에 모터제어를 위한 전류센서와 인버터의 제어회로에 사용되는 모든 부품은 또한 Automotive Qualified 특성을 가져야 한다. 이를 위해 AEC-Q100 및 AEC-Q200 인증 부품을 적용해야 한다.

2.2 최적 구조설계 기술

■ High Power Density 구조

차량의 경량화 및 소형화는 내연기관뿐만 아니라 전기차에서도 연비 저감 효과를 위해 필수적으로 수행되어야 하는 과제이다. 전기차용 인버터의 경우도 체적 및 중량 최적화를 통해 High power density를 실현할 필요가 있다. 이를 위해서는 각 부품들을 공간 효율성이 극대화될 수 있도록 배치해야 하며, 부품 간의 절연거리, 전자파 특성, 최소 power path 등이 동시에 고려되어야 한다. 또한 내진성 및 냉각 성능 역시 lay-out 설계에 있어 중요 설계 인자이며, 다양한 trade-off 관계에 있는 이러한 설계 인자들의 최적화를 통해 High power density를 확보할 수 있다. 그림 6은 100[kW]급 인버터의 기능 별 package와 각 부품의 형상에 대해 나타낸다. 보여지는 바와 같이 Function별 모듈화를 통해 부품의 체적을 감소시키고, 구조를 단순화하여 조립성 향상을

도모하였다. 이러한 package 설계는 설계 초기단계에서부터 검토되어야 하며, 전체적인 concept 설계 완료 시 부품 별 신뢰성 확보를 위한 최적 설계가 수반된다.

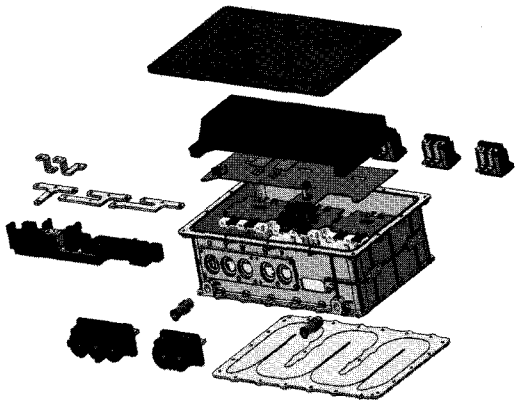


그림 6. 최적구조를 갖는 전기차용 인버터

■ 강성해석

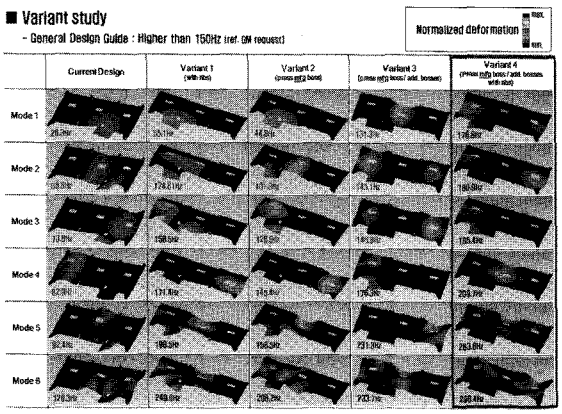


그림 7. 인버터 차폐판의 내진성능 해석결과

초기 concept 설계에서 일정 부분이 결정된 후, 앞서 언급한 바와 같이 제품의 신뢰성를 위해 제품 내의 단품들에 대한 Variant study를 수행한다. 이를 통해 부품 별 진동, 강성, 경량화를 확보할 수 있도록 한다. 그림 7은 PCB간의 차폐 성능을 위한 차폐판의 모델별 내진 성능을 해석을 통해 수행한 결과이며, 동등 수준의 중량과 고정부에서 형상에 대한 설계 변경을 통해 내진성을 확보한 경우이다. 차폐판 뿐만 아니라 기타 부품들도 동일한 과정을 거쳐 설계되며, 실증적 test와 병행하여 제품의 신뢰성을 확보하고 있다.

■ 열유동 해석

냉각구조의 경우, 인버터의 고출력으로 인한 발열로 부품의 수명 및 오작동을 줄이기 위해 설계 시 필수적으로 고려되어야 하는 사항이다. 특히 차량용 인버터의 전력용 반도체의 경우, 효율적인 냉각구조를 구현하는 것은 매우 중요하며, 최대 65[℃] 이상의 부동액 inlet 환경에서도 정상적으로 동작할 수 있도록 수냉식 냉각 구조를 채택하고 있다. 이를 위해서는 열유동해석을 통해 인버터의 온도분포, 냉각수의 유동 등에 대한 예측이 필수적으로 수행되어야 한다. 그림 8은 전기차용 인버터에 장착된 전력용반도체의 냉각성능확보를 위한 cooling system의 열유동성능 해석 결과이다.

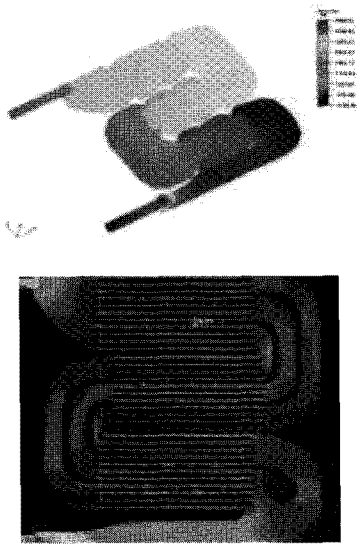


그림 8. 수냉구조를 갖는 인버터의 열유동성능 해석결과

2.3 고속/고효율 EV전동기 제어 기술

■ EV 유도 전동기 고속/고정밀 토크 제어 기술

변속기를 사용하지 않는 전기 자동차의 경우 폭넓은 속도로 주행을 하기 위해서는 고속 전동기 제어 기술이 필요하다. 또한 가속 페달의 입력에 따라 정확히 토크를 발생해야 한다. 이에 기존의 수식에 기반한 제어로는 토크 제어 정밀도를 만족할 수 없어 참조표를 사용하여 토크 제어를 수행한다. 그림 9 및 그림 10과 같이 토크 지령 및 현재 속도에 따른 전류 지령을 참조표를 사용하여 생성하고, 이 지령에 의해 전류제어를 수행한다. 이와 같은 방법으로 오차 범위 ±5[%] 이내로 토크 제어를 수행할 수 있다.

■ EV 유도 전동기 고효율 제어 기술

전기차는 배터리의 에너지만으로 운전을 하며, 배터리의 용량은 제한되므로 고효율 운전이 필요하다. 기존의 유도 전동기 제어 방법은 d축 전류를 일정하게 제어하고 q축 전류를 변화하여 토크를 변경하였다. 이러한 방법은 같은 토크를 발생하기 위하여 더 큰 전류를 필요로 하는 경우가 대부분이므로 손실이 증가하게 된다. 임의의 토크를 발생하기 위하여 d축 전류의 크기를 변화하면서 가장 작은 전류 크기를 인가하는 MTPA(Maximum Torque Per Ampere) 운전을 하면, 전류 크기에 따른 손실을 줄일 수 있다. 이때 d축 전류에 따른 Lm의 포화 또한 고려한다.

또한 고속 운전시 제한된 전압 내에서 가능한 큰 토크를 발생할 수 있도록 MTPV(Maximum Torque

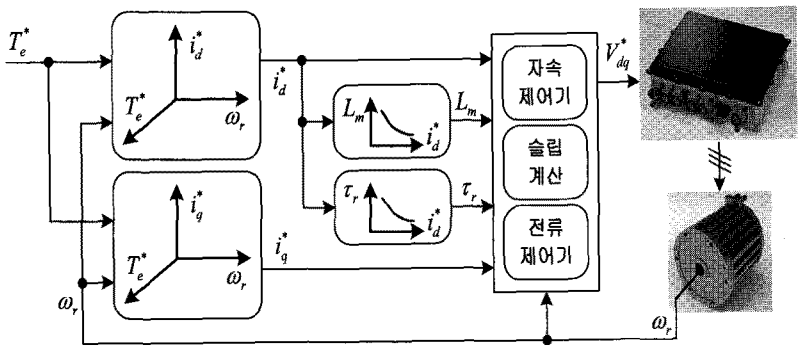
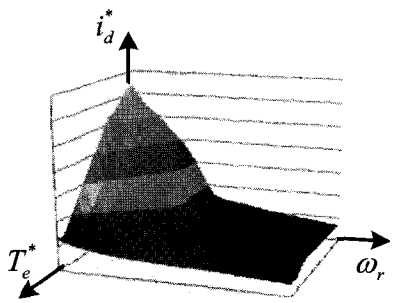
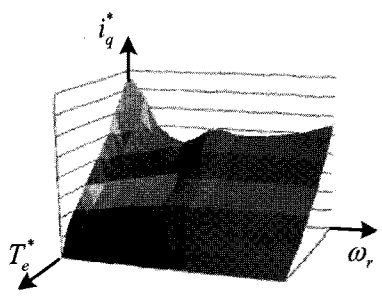


그림 9. 전기차용 인버터의 모터제어 블록도



(a) d축 전류지령 참조표



(b) q축 전류지령 참조표

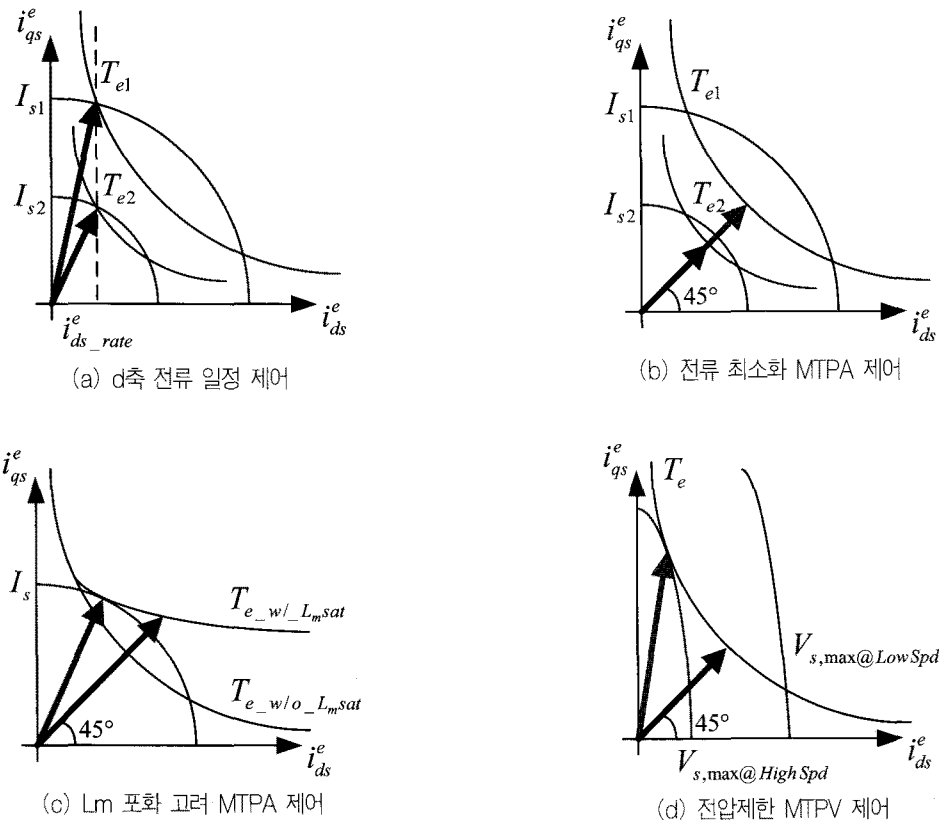
그림 10. 인버터의 벡터제어를 위한 전류지령 참조표

Per Voltage) 운전을 한다. 이와 같이 전동기 제정수의 변동을 고려한 MTPA 및 MTPV 운전을 통하여 전동기 제어 효율을 높일 수 있다.

2.4 진단통신 및 보호 기술

전기차의 주행 안정성 확보는 매우 중요한 이슈이다. 따라서 전기차의 구동력을 제어하는 인버터는 운전상태의 모니터링, 예방적 고장진단 그리고 비상시 보호수단을 가질 것이 필수적으로 요구된다. OBD(On Board Diagnostics)는 엔진자동차의 배가스에 직접적 영향을 끼치는 Power Train 부품에 대한 자기진단 및 보호대책에 관한 Standard이나 전기차의 Electric Power Train 부품에도 동일하게 적용된다. 그림 12는 OBD-II Standard에 의한 전기차용 인버터의 진단통신 기능이다. 전기차용 인버터는 CAN 기반의 진단통신 기능을 내장하고 GDS장비를 통해 인버터 상태진단, 고장이력 Data 전송, S/W 업데이트 등의 기능을 수행할 수 있어야 한다. 진단모드 수행 시 고장내용에 대한 정보는 DTC (Diagnostic Trouble Code) 규격으로 정해져 있다.

전기차용 인버터 구현 시에는 DTC로 정의 된 각각의 고장진단 기능을 구현하는 방법, 즉 고장검출회로와 고장진단 S/W알고리즘이 Know-how이며, 제품의 신뢰성 제고를 위해 중요한 사항 중 하나이다. 이를 위해 전기차용 인버터는 DSP 기반의 제어회로와 전압, 전류 및 온도센싱회로, 연산회로 그리고 보호회로를 내장하고, CAN 통신 기반의 OBD 진단 알고리



(a) d축 전류 일정 제어

(b) 전류 최소화 MTPA 제어

(c) Lm 포화 고려 MTPA 제어

(d) 전압제한 MTPV 제어

그림 11. 전기차용 인버터의 벡터제어

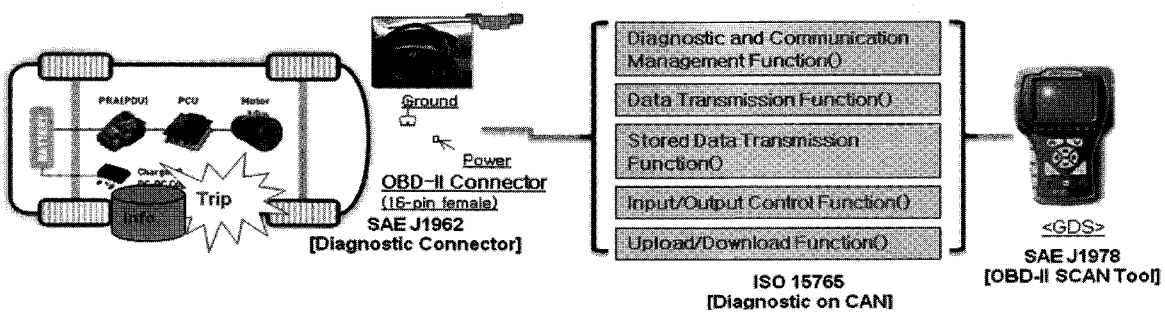


그림 12. OBD-II에 의한 전기차용 인버터의 진단통신 기능

표 2. SAE J2012 Diagnostic Trouble Code의 예

DTC Number	DTC Naming
P0A3C	Drive Motor "A" Inverter Over Temperature
P0A3D	Drive Motor "B" Inverter Over Temperature
P0A3E	Generator Inverter Over Temperature
P0A3F	Drive Motor "A" Position Sensor Circuit
P0A40	Drive Motor "A" Position Sensor Circuit Range/Performance
P0A41	Drive Motor "A" Position Sensor Circuit Low
P0A42	Drive Motor "A" Position Sensor Circuit High

즘을 통해 Driving Cycle마다 전기차용 인버터의 물리적 및 전기적 고장을 감지, 판단 및 조치해야 한다. 이를 통해 Electric Power Train 시스템과 인버터를 보호할 수 있으며 전기차의 Safety를 확보할 수 있다.

■ 인버터에 내장된 보호기능의 예

- 구동전원 과전압/저전압
- 인버터 출력 과전류
- 인버터 과온
- 전동기 과온
- IGBT Arm-short
- 제어전원 과전압/저전압
- 과부하시 Derating
- 전류센서, 속도센서 등 센서류 고장
- CAN 통신 오류
- 출력 Cable 단선 외

3. Design Validation

전기차의 주행 Performance와 고신뢰성 확보는 매우 중요한 이슈이다. 따라서 전기차의 핵심부품인 인버터는 엄격한 기준의 단품시험 및 실차시험을 통해 Desigh Validation을 실시한다. 단품측면의 고속/고효율 제어성능 시험은 전기차 환경을 모사한 Motor 다이나모에서 실시한다. 전속도 영역에서 모터링 및 회생시 모두 모터 토크 제어 Accuracy가 오차 범위 ±5[%] 이내로 들어와야 한다. 또한 가혹한 자동차 내환경의 온도, 진동, 보호등급 등 신뢰성 검증시험을 통해 설계의 정합성을 확인하고 시험기준을 완벽히 통과해야 한다. 또한 수명가속시험을 통해 내구성을 확인한다. 전기차에 있어서 EMC기준은 엔진 자동차와 동일하다. 그런데 인버터는 대전류/고전압을 스위칭하여 전력변환을 하는 장치이므로 EMS도 문제지만 높은 EMI 발생을 피할 수 없다. 따라서 전

기차용 인버터는 필터, 차폐 및 접지 수단을 강구해야 하며, PCB설계도 EMC를 저감할 수 있도록 다층기판으로 제작되고 제어전원과 Ground Pattern을 설계해야 한다.

■ 전기차용 인버터 모터제어 성능검증 항목의 예

- SOC 한계 내 전전압 및 전속도 영역에서 출력 성능시험
- T-N 능력곡선 전영역에서 토크 제어정밀도 성능 검증
- 효율 성능 검증
- 보호기능 검증 외

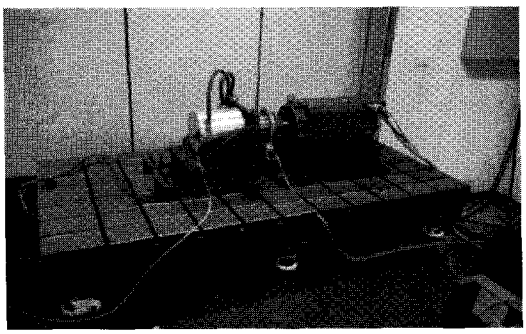
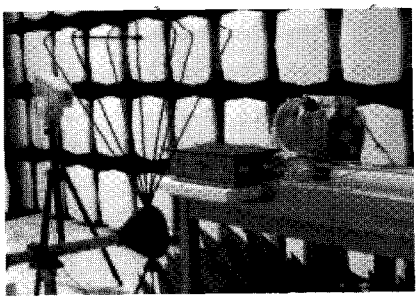


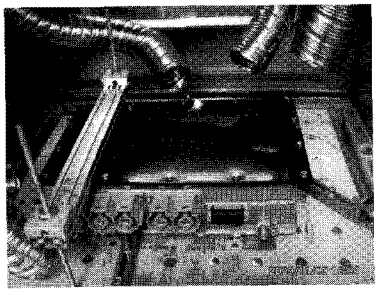
그림 13. 전기차용 인버터의 다이나모 시험

■ EV 인버터 신뢰성 성능검증시험 항목의 예

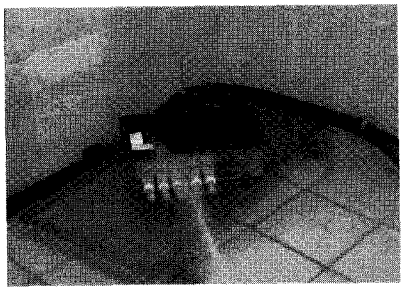
- 한계동작 온도 시험
- 한계동작 진동 시험
- 온도/진동 복합 시험
- 방진/방수 성능시험
- 내전압 및 절연시험
- 제어 전원 특성 시험
- 부하사이클 운전시험
- EMC 성능 시험
- HALT 시험 외



(a) EMC 시험



(b) 온도/진동복합시험



(c) 방진/방수시험

그림 14. 전기차용 인버터의 내환경 시험 예

4. 실차적용 및 개발사례

전기차용 인버터에 대한 단품측면의 Design Validation이 완료되면, 실차장착시험을 실시한다. 전기차의 VCU(Vehicle Control Unit)가 CAN 통신수단에 의해 Electric Power Train의 각 부품들과 전체 차량 System을 제어하게 되며, 다양한 운전조건 별 전기차의 구동, 정지 및 보호 동작 성능시험

을 실시한다. 전기차 실차시험 시 Battery SOC를 포함하여, 운전제어 및 환경 측면에서 최악의 운전조건에 따른 시험기준으로 전기차용 인버터 성능을 검증한다. 또한 차량진단 및 성능 upgrade를 위한 진단통신 OBD 기능의 검증과 실차환경의 EMC 성능 검증을 부품별로 진행한다. 이를 통해 실차환경의 인버터 목표 성능을 확보한다.

국내 최초의 전기차인 블루온의 인버터는 모터 제어를 통해 50[kW]의 Power, 11500[rpm]의 속도, 167[Nm]의 토크를 출력한다. 블루온 전기차는 고정 감속비를 갖는 Transmission을 통해 휠을 구동하며, 최고속도 130[km/h]와 제로백 13.1초의 뛰어난 성능을 구현하였다.

그림 15. 블루온 전기차 및 인버터

5. 맺음말

전기차용 인버터를 구현하기 위한 기술은 신기술이 아니라 차별화된 기술이다. 산업용 인버터와 비교하였을 때, 모든 요소기술 측면에서 Break-through가 요구된다. 즉 전기적 Hardware 설계기술, 기계적 구조설계 및 냉각기술, 모터의 고속/고효율 제어기술, 고장 진단/보호 기술, 차량 system과의 통신기술, EMC 특성확보 등 모든 요소기술 영역에서 어렵고 높은 수준을 만족해야 한다. 더불어 이러한 높은 Quality를 유지하면서도 전기차의 본격 상용화를 위해서 큰 폭의 Cost 저감도 필요하다. 이를 위해 핵심부품과 연계한 구조설계 최적화 등의 노력도 기울여야 하며, 새로운 Power Topology도 개발할 필요가 있다. 최근에는 인버터로써만 접근하지 않고, On-Board Charger와 연계한 Electric Power Train 전체 시스템 측면에서 신뢰성을 올리고 Cost도 저감하는 새로운 인버터 구현 아이디어들이 시도되고 있다.

◇ 저 자 소 개 ◇

양천석(梁千錫)

1964년 12월 11일. 1983년 3월~1987년 2월 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1987년 3월~1992년 2월 중앙대학교 대학원 전기공학과/전력전자(석사). 1992년 1월~현재 LS산전(주) / 수석연구원 / EV Control 연구팀장.

- 2005년~현재: 전기차용 인버터 및 전원장치 개발
  - EV, HEV 및 FCEV용 인버터 개발(블루온 프로젝트 외)
  - EV 및 FCEV용 전원장치(On Board Charger, HDC, LDC) 개발
- 1987~ 2005년: PMSM 전동기 제어기술 및 IPC 전원장치 기술 개발
  - Matrix Converter 개발
  - 전력용 반도체 기반 고압/대전류 Hybrid Switch 개발
  - Pulse Power(Non-Thermal Plasma Application) 기술 개발
  - Industrial Power Supply 개발
  - PMSM 고속 제어 알고리즘 개발
  - 인버터 EMC 기술 연구