

하이브리드 전기자동차 구동용 전력변환장치

이지명¹⁾, 이재용, 박래관, 장서건, 최경수
(주) 에이디티

Power Conversion Unit for Hybrid Electric Vehicles

Jimyoung Lee, Jaeyong Lee, Raekwan Park, Seogwon Chang, Kyungsoo Choi
ADT co., Ltd.

ABSTRACT

This paper describes design procedure and control strategy of HDC(High side DC/DC Converter) and MCU(Motor Control Unit) for diesel hybrid electric vehicle. In designing HDC and MCU for HEV high power density and reliability is strongly needed to meet the demand of automotive industry. In order to achieve the high performance of a controller, MPC5554 based control board is developed. An optimized film capacitor and inductor are also developed for high efficiency driving. Skim 63 IGBT module of SEMIKRON for automotive is used for power switching device. The most efficient cooling model for optimal size and reliability were verified by simulation. These procedures are verified by bench or driving test and the results are present in this paper

1. 서론

1990년대 CO2 배출량 저감, 연비 향상을 목적으로 하이브리드 자동차의 개념이 소개된 이후 내연 엔진에 하이브리드 추진 체계를 접목한 전기 자동차가 널리 확산되고 있다. 2000년대에 접어들어 도요타를 비롯한 일본과 미국의 몇 개 자동차 제조사가 양산 단계에 접어들었고, 최근에는 국내 자동차 제조사에서도 양산을 목표로 가솔린 하이브리드 자동차의 개발을 서두르고 있다.

디젤하이브리드 자동차의 경우 그 시장 규모가 가솔린 자동차보다 작아 하이브리드 차량 개발이 다소 늦어진 2005년 이후 본격적인 개발이 시작되었다. 그러나 디젤엔진의 특성상 동급의 가솔린 엔진에 비해 연비가 높다는 점, 비교적 연료소모가 많은 대형 차량, 또는 운행거리가 많은 영업용 차량에 사용된다는 점, COx 및 NOx의 배출량이 많다는 점에서 하이브리드 구동시스템의 개발을 통한 경제적, 환경적 이득이 가솔린엔진에 비해 작지 않을 것으로 판단되며, 이러한 배경에서 디젤엔진에 특화된 전기모터와 인버터의 개발이 시급하다 하겠다.

본 논문에서는 디젤 하이브리드 추진 체계에 대한 연구 중 모터제어기(MCU)와 부스트 컨버터(HDC)에 대한 개발의 결과

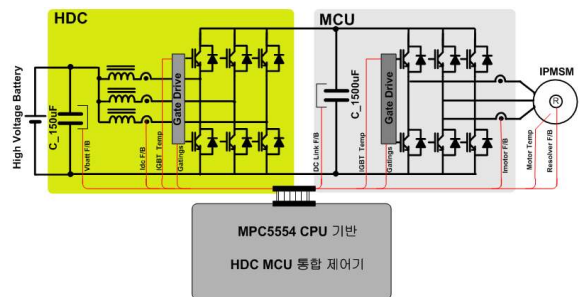


그림 1 하이브리드 자동차용 Power converting unit의 구성
Fig. 1 A configuration of power converting unit for HEV

표 1 HDC 컨버터의 사양
Table 1 Rate Values of HDC

항 목	내용	
최대 출력/주 동작 전력 범위	49 kW /25 ~ 35 kW	
입력	동작전압	240 ~ 280, 260 Vdc
	최대전류	204 A @ 240 V
출력	동작 전압	400 ~ 600 V
	동작 전류	50A@600V 66.67A@450V
동작온도	-30 ~ 105 °C	
IGBT 전류 정격	357A/289A @25/70 °C	
IGBT switching Frequency	15 kHz	
컨버터 손실	5 %, 1726W	
유량 및 Coolant 온도 상승	6 Liter/min,4.1 °C	
유입/토출 온도 (요구치)	70.0 /74.1°C	

를 소개하고자 한다. 2장에서는 HDC와 MCU의 설계 사양과 제어 토폴로지 및 동작 알고리즘을 설명하고, 3장에서는 주요 부품의 개발 결과와 그 특징을 서술한다. 4장에서는 개발 시제품의 단품 평가 결과와 차량 운행 시험결과를 설명한다.

2. 전력변환장치

그림 1은 하이브리드 자동차의 전력변환 장치인 HDC와 MCU의 구성을 보인다. MCU는 HCU(Hybrid control unit)로부터 수신한 지령 토크를 모터에 인가하는 전압형 인버터로 구성되고, HDC는 고압 배터리의 전압을 승압하여 MCU와 전기 모터의 효율을 높이는 부스트 컨버터로 구성된다. 파워스택은 3상 부스트 인덕터부, 입-출력 직류단의 필름 커패시터부, 2조의 3상 풀-브리지 IGBT 모듈부로 구성된다. MPC5554 CPU를

* 이지명, jmlee@adtech21.com

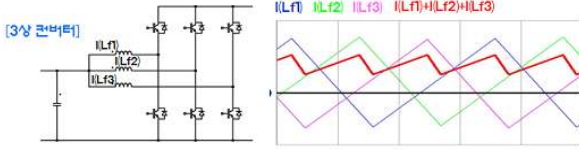


그림 2 3상 인터리빙 동작
Fig. 2 3 Phase inter leaving operation

기반으로 하는 제어보드는 HDC와 MCU의 전압과 전류 제어, 동작 및 고장상태 판단, 상위제어기와의 통신 등을 담당한다.

2.1 HDC의 토폴로지

HDC는 고압 배터리 측의 전압으로부터 인버터 직류링크전압의 가변제어가 가능한 양방향 DC-DC 부스트 컨버터이다. 표 1은 HDC의 주요 사양을 보인다. 입·출력단의 전압차를 고려하여 비 절연형으로 설계가 이루어졌으며 제한된 배터리로 구동된다는 점을 감안하여 단상, 2상, 3상의 부스트 컨버터의 효율을 비교·분석한 후 최적의 토폴로지를 선정하도록 하였다.

기존의 하드 스위칭에서 발생하는 스위칭 손실을 줄이기 위해 인덕터 전류의 불연속 모드를 이용하는 영전압 스위칭 방식 (Zero Voltage Switching-ZVS)을 적용하였다^{[1],[2]}. 이때 인덕터 전류가 불연속으로 동작하기 위해서는 부스트 인덕터의 인덕턴스를 작게 설계하여야 한다. 따라서 인덕터의 전류 리플이 증가하여 스위치의 도통 손실과 입·출력단 커패시터의 리플전류 내량도 커지게 된다. 이와 같은 불연속 모드의 단점은 그림 2와 같이 3개의 단상 컨버터를 병렬로 연결한 후 각상에 120°의 위상차를 주어 동작시키는 3상 인터리빙 방식으로 해결할 수 있는데 실제 스위칭 주파수의 증가 없이 스위칭 주파수를 3배 높이는 효과를 얻을 수 있어 소자의 전류 정격과 커패시터의 용량 감소를 기대할 수 있다.

2.2 MCU

표 2는 MCU의 사양을 나타낸다. MCU와 전동기의 효율 향상을 고려하여 400 ~ 600V의 동작전압을 갖는다. 출력전류 사양은 모터의 사양에 정합하고, 고속회전에서의 전류제어가 용이하도록 스위칭 주파수를 15kHz로 설정하였다. 속도 피드백을 위해 Resolver 인터페이스 회로를 내장하였으며, 통신회로로써 CAN 1채널과 RS232 1채널을 갖는다.

그림 3은 MCU의 구성을 나타낸다. 제어보드는 HDC와 동일 CPU로 제어되도록 플랫폼을 구성하였으며, 상위제어기인 HCU로부터 CAN을 통하여 토크, 속도 지령 등을 받아 모터를 제어하는 역할을 수행한다. 또한 IGBT의 온도검출, IGBT 압단락 보호, 출력 과전류, DC 링크 과전압 등의 보호동작을 수행한다.

표 2 MCU의 사양
Table 2 Rate Values of MCU

항 목	사 양
Input Voltage	400 ~ 600 Vdc
Max Out Power	156 Arms, 43.2 kW, 10sec
Max Motor Speed	6000 rpm
Efficiency	95 %
Fsw	15 kHz
Speed Sensor F/B	Resolver
Communication	CAN 1ch, RS232 1ch

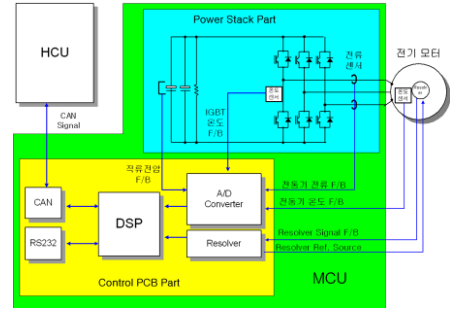


그림 3 MCU의 구성
Fig. 3 System configuration of MCU

2.3 출력 최대화 전략

IPMSM은 식(1)에서 본 바와 같이 전류와 토크의 관계가 비선형을 갖고 사용가능한 전압과 전류의 제한치를 갖는다^{[3],[4]}. 이러한 문제를 해결하고 전류 당 토크의 밀도를 최대화하기 위해 본 논문에서는 전류벡터에 따른 역자속(Inverse Flux)과 토크를 구한 후 역자속 기준치와 토크지령에 상응하는 최소의 전류벡터를 역으로 찾아 테이블 화하여 제어에 반영하는 방법을 적용하였다.

$$T_e = \frac{3P}{2} [\Lambda_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1)$$

이를 위해 토크지령-순시속도-직류전압의 상관관계를 자속으로 표현하고, 각 직류전압과 속도에 대응되는 자속의 크기를 식(2)로, 해당 토크를 발생시킬 수 있는 전류의 벡터를 식(3)로 계산한 후 그 역관계로부터 전류 지령치를 얻도록 하였다.

$$|\lambda| = V_{dc} / (\sqrt{3}\omega_r) \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda \times \bar{I}) \quad (3)$$

그림 4는 MTPA를 구현하는 방법을 나타낸다. 먼저, 일정속도로 회전하는 전동기에 전류를 인가하여 인버터의 출력전압을 측정하여 자속과 출력토크를 계산한다.

다음 순서는 위의 과정으로 얻은 전류-자속, 전류-토크의 테이블을 바탕으로 그 역관계인 자속-전류, 토크-전류의 역테이블을 구성한다. 그 결과는 그림 5와 같다.

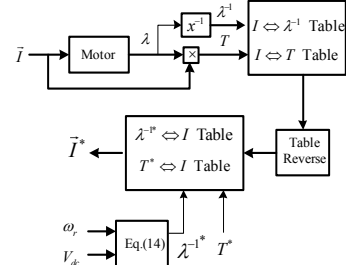
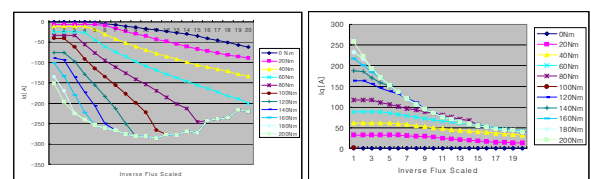


그림 4 전류기준치의 발생
Fig. 4 Generation of motor current references



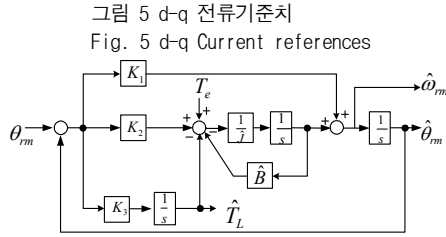


그림 5 d-q 전류기준치
Fig. 5 d-q Current references

그림 6 전 차원 위상 관측기
Fig. 6 Full order angle state observer

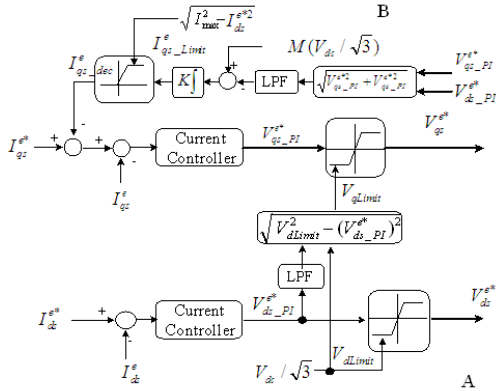


그림 7 전류제어기의 포화 방지
Fig. 7 Non-saturable PI regulator

한편, 고속영역에서의 안정된 속도를 얻기 위해 그림 6과 같이 전 차원 상태관측기로부터 재구성한 속도와 위치를 제어에 반영하였다^[5]. 아울러 전류 제어기의 포화를 방지하기 위해 그림 7과 같이 q축 전류 제어기의 기준치(B)와 제어기의 출력 제한치(A)를 조정하도록 하여 비정상적인 토크입력에 대해 제어 안정도를 높였다^{[4][6]}.

3. 전력변환장치의 제작

3.1 주요 부품의 개발 결과

본 절에서는 HDC와 MCU의 주요 부품의 설계 및 그 결과에 대하여 설명하고자한다. 그림 8-(a)는 HDC와 MCU의 전력용 반도체를 보인다. SEMIKRON의 1200V급 차량용 소자인 Skim63을 사용하였는데 전류정격은 357A/289A@25/70 °C이다^[7]. 그림 8-(b)는 입력 배터리단과 직류링크단에 사용되는 필름 커패시터의 패키지를 보인다. 그 내부에는 입력 배터리에 연결되는 150uF의 커패시터와 MCU의 직류단에 연결되는 1500uF의 커패시터가 단일 패키지에 조립된다. 표 3은 필름 커패시터의 주요 사양을 보인다. 그림 8-(c)는 부스트용 3상 인덕터 패키지를 보인다. 3상 제어를 위해 3병렬 회로로 구성되며 사양은 표 4와 같다. 그림 8-(d)는 8-(c)패키지 내부 인덕터 소자의 열적 분포를 보인다. 상당분의 누설 자속이 코일의 단면을 쇠교한 것으로 보이며 현재 재설계가 진행 중이다.

그림 9는 본 시체에 적용한 제어보드를 보인다. CPU로는 Freescale사의 MPC5554를 사용하였다. MPC5554는 e200 Core를 사용하여 Power Architecture™ technology를 기반으로 만들어진 32bit microcontroller로 engine management, advanced driver assistance, central body등을 위해 설계된 소자이다^[8]. MPC5554의 주요 기능은 A/D Conversion을 통한 전압, 전류

및 인버터 온도 검출 수행, 제어 알고리즘 연산, 시스템 보호

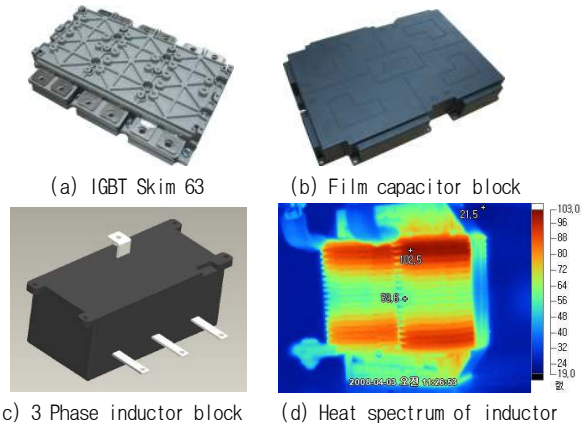


그림 8 HDC의 주요 수동 소자
Fig. 8 Main passive components in HDC

표 3 필름커패시터의 사양
Table 3 Rate Values of film capacitor

전기적 정격	1500uF: 900Vdc, 132Arms 150uF: 400Vdc, .32Arms
동작/온도	-40°C ~ 85°C
Dissipation Factor	1% @ 1kHz, 25°C
ESR	2.5mΩ @ 1kHz, 25°C
Film Material	Polypropylene 3.1um
Case Material	PPS

표 4 부스트 인덕터의 사양
Table 4 Rate Values of boost inductor

구분	사양
인덕턴스	72 uH
최대(리플)전류	132 Amax
동작주파수	15 kHz
동작온도	200 °C
코어제질	High-Flux PQ55
코어 단면적	12.56 cm ²

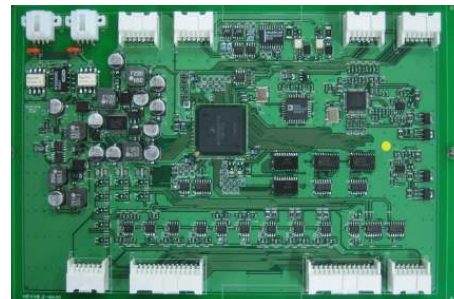


그림 9 제어보드
Fig. 9 Control board

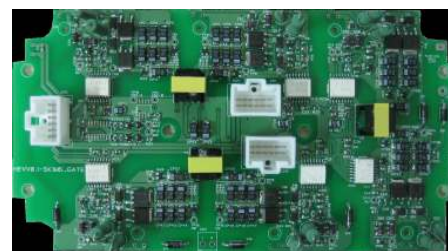


그림 10 게이트 드라이브 보드

Fig. 10 Gate drive board

신호 검출, HDC와 MCU의 PWM 발생, 외부와의 CAN, RS232 통신 등이 있으며, 단일 CPU로 MCU와 HDC의 동기 제어가 가능하다.

그림 10은 IGBT의 드라이브 회로를 보인다. Gate Drive회로는 HCPL-316J를 사용하였다. HCPL-316J는 암단락과 under voltage 보호 기능이 내장된 Photo Coupler로 1200V/700A까지는 구동이 가능하다. Gate Drive를 위한 전원으로는 Push-Pull dc/dc컨버터를 구성하여 사용하였다.

3.2 방열 설계

본 과제에서 설계한 HDC와 MCU는 수랭식 Heat sink를 공유하는 단일 패키지로 설계되었다. 따라서 시뮬레이션을 통한 방열 구조의 최적화가 설계과정에서 요구된다. 표 5는 방열 기준을 나타내며, 그림 11은 시뮬레이션에 사용된 Heat sink의 유로형상과 전력용 반도체의 배치를 보인다. 시뮬레이션은 StarCD를 사용하였고 그 결과는 그림 12와 같다. 최대 부하시 IGBT Chip온도가 118°C로 IGBT 제조사의 최대 수명을 위한 권고치인 120°C내에서 소자가 사용될 수 있으나 냉각수 유입구에 역류현상이 발생하여 재설계가 진행 중이다.

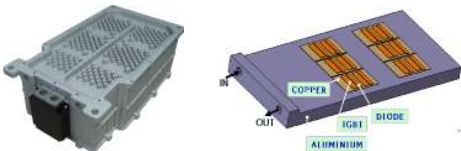


그림 11 방열구조와 발열체 배치
Fig. 11 Coolant model

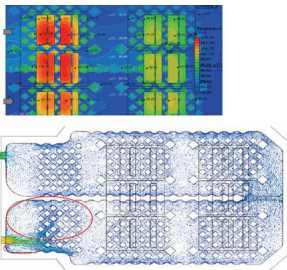


그림 12 방열 시뮬레이션 결과
Fig. 12 Heat simulation



그림 13 패키지 설계
Fig. 13 Package design

3.3 패키지 설계

그림 13은 최종적으로 디자인된 패키지를 보인다. 좌측 상단으로부터 완제품 형태, 필름커패시터부, 제어보드부, IGBT게이트부와 인덕터부의 조립상태를 보인다. 입력 부분에 HDC 블록이 있고 DC링크 커패시터를 공유한 MCU부가 있다. 방수가 가능한 밀폐구조이며, 바닥면에는 수랭을 위한 유로가 형성되어 있다. HDC를 포함한 MCU 전체의 부피는 15.4 liter이다.

4. 실험결과

그림 14는 본 연구를 위해 제작한 M-G 부하 테스트 벤치를 보인다. 부하장치로는 4극 6000rpm, 60kW급의 스피들 전동기가 사용되었으며 고압배터리를 모사하기위해 별도의 50kW급 직류전원 공급 장치를 두었다.

그림 15는 HDC의 ZVS동작과 인터리빙 동작을 보인다. 각상의 인덕터에 흐르는 전류가 120도 천이되어 있으며, 인덕터의 전류가 음인 구간에서 스위칭이 발생하여 ZVS가 이루어지는 것을 보인다. 참고로, ZVS동작은 70%부하까지 ZVS가 되도록 인덕턴스를 설계하였다.

그림 16은 MCU에 적용한 포화 방지 제어기의 효과를 보인다. 반포화제어기를 적용한 경우 d-q전류가 그 기준치를 잘 추종함을 보인다.

그림 17은 전동기의 토크-속도 특성을 보인다. 최대토크는 전압별로 다르나 450V 입력에 220N.m까지 출력되며, 기어 천이가 발생하는 4500rpm에서 65N.m의 토크가 출력됨을 보인다.

그림 18은 HDC와 MCU의 효율맵을 보인다. HDC의 경우 주 동작영역인 20~35kW영역에서 최대 효율 96.5%를 보이고, MCU의 경우 기저속도영역의 20~33kW영역에서 최대 효율 96%를 보인다.

그림 19는 차량 주행상태시험인 FTP75에서 CAN data로부터 취득된 MCU의 전기적 특성을 보인다. 시험 전 과정에서 엔진 토크 어시스트 및 회생 충전이 원활하게 이루어짐을 알 수 있다.



그림 14 부하시험 장치
Fig. 14 Load test bench

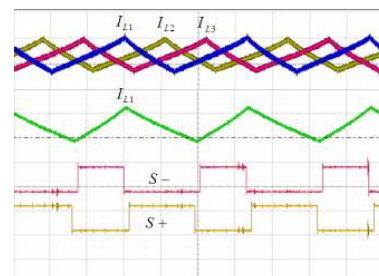


그림 15 HDC의 ZVS 동작과 3상 인터리빙 동작
Fig. 15 ZVS and interleaving operation of HDC

5. 결론

본 논문에서는 하이브리드 자동차용 모터제어기(MCU)와 전력변환장치(HDC)에 대한 설계 사양과 제어 토폴로지 및 알고리즘을 설명하고, 주요부품의 개발 결과 및 그 특징을 서술하였다. 이와 더불어 개발 시제품의 단품 평가 결과와 차량 운행 시험결과를 나타내었다.

본 연구의 현 단계는 단위 부품의 성능 평가 및 제어 알고리즘의 차량 적용성 검증 단계에 있으며 향후 신뢰성 및 양산성 재고를 위한 최적화 설계가 진행 될 예정이다.

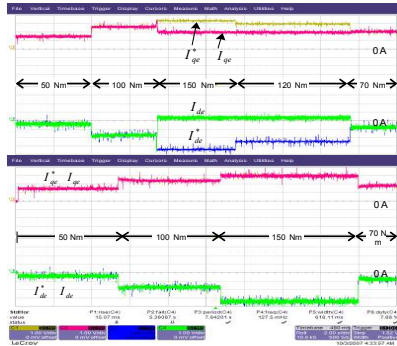


그림 16 MCU 전류제어기의 포화방지 제어(50A/div)
Fig. 16 Non-saturable current controller of MCU

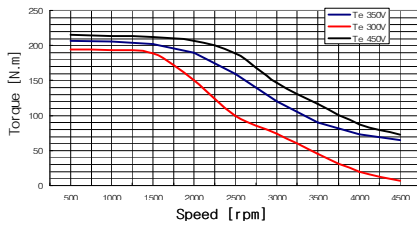


그림 17 전동기의 Torque-Speed 특성
Fig. 17 T-N capacity of electric motor

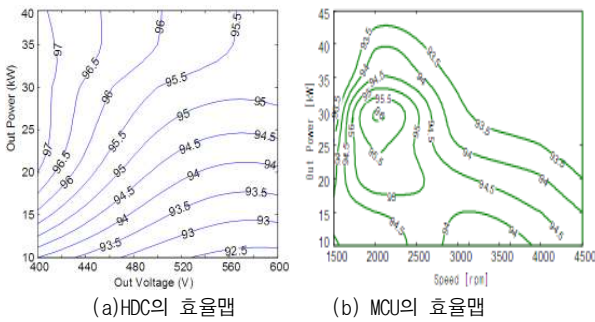


그림 18 HDC와 MCU의 효율 맵
Fig. 18 Efficiency map of HDC and MCU

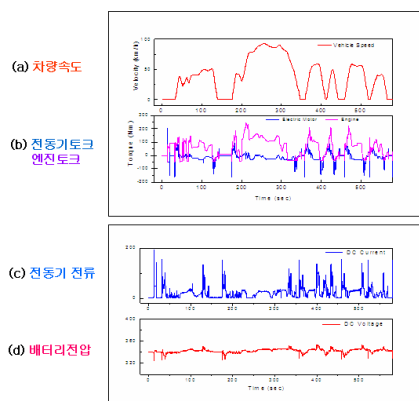


그림 19 FTP75 주행시험
Fig. 19 Driving test FTP75

이 논문은 에너지관리공단의 연구비 지원에 의하여 연구되었음 (관리번호:2006-E-TR11-P-11-0-000)

참고 문헌

- [1] R.Y. Kim, J. S. Lai, "High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional dc-dc converter", IEEE Trans. on PE, vol 4, July 2007, pp.1 - 7
- [2] Fred C. Lee, Cho, B.H. "zero-voltage-switching bi-directional battery charger/discharger for the NASA EOS satellite", IEEE APEC '92, pp. 614 - 621
- [3] S. Morimoto, Y. Takeda, T. Hirasaka, K. Taniguchi and M. Sanada, "Expansion of Operating Limits for Permanent Magnet Motor by Current Vector Control Considering Inverter Capacity", IEEE Trans. on IA, vol. 26, no. 5, pp. 866-871 (1990)
- [4] S. Morimoto, M. Sanada and Y.Takeda, "The Effects and Compensation of Magnetic Saturation in Field Weakening Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. on IA, vol. 30, no. 6, pp. 1632-1637, 1994.
- [5] 설승기, 전기기기제어론-제 2장, 브레인 코리아, 2002
- [6] B. K. Bose " High Performance Inverter-Fed Drive System of an IPMSM", IEEE Trans. on IA, vol. 24, no. 6, pp. 987-997, 1988.
- [7] <http://www.semikron.com/>
- [8] <http://www.freescale.com/>