

전기자동차용 전력변환 제어기 개발

(Development of the Power Conversion Controller for Electric Vehicle)

오용승* · 김희준 · 이상택**

(Yong-Seung Oh · Hee-Jun Kim · Sang-Taek Lee)

Abstract

Recently, the depletion of fossil fuel carbon dioxide emissions due to limitations in the internal combustion engine vehicles is rising concern about electric vehicle. Neighborhood Electric Vehicle(NEV) is maximum speed 60km/h and one day driving distances less than 80km. In this paper, Power Conversion Controller is proposed for Neighborhood Electric Vehicle. To verify the developed Power conversion Controller, Test performed integration test, max load, power density, efficiency. Confirmed that the vehicle can be applied.

Key Words : Neighborhood Electric Vehicle, PCU, MCU, Converter, Inverter, Vector Control Algorithm, PSIM, Digital Control, DSP

1. 서 론

급격하게 늘어나는 석유 소비량과 지구 환경 보존에 대한 인식이 커짐에 따라 세계 각국에서는 자동차에 대한 저연비 및 배출가스 저감에 대한 요구가 커지고 있으나 현재의 내연기관 기술로는 이러한 요구를 충족시키기가 점점 어려워지고 있다. 따라서 대안으로 전기자동차(Electric Vehicle : EV), 하이브리드 자동차(Hybrid Electric Vehicle), 연료전지 자동차(Fuel

Cell Electric Vehicle)등이 제시되고 있다. 이들은 자동차의 구동에너지를 기존의 자동차와 달리 화석연료가 아닌 전기를 동력원으로 하여 달리는 자동차를 말하며 친환경 전기자동차 또는 그린카라고 총칭한다. 이러한 친환경 전기 자동차들이 정부의 정책과 부합하여 현재 다양한 차종, 용량 및 적용분야로 개발이 이루어지고 있는 실정이다[1].

전기자동차의 한 부류로 속하는 근거리 전기자동차는 도시형 전기자동차로서 출퇴근용, 근거리 용 운행에 적합하도록 설계되며 통상 1일 주행거리 80km 이하, 최대속도 60km/h 이하를 가지게 된다[2-3]. 이러한 주행패턴 및 차량제원의 구성으로 가격부분, 배터리 용량부분, 인프라 구성부분, 소형 경량화 고성능화부분, 고신뢰성 부분등 현재 전기자동차의 문제점들이 일부 극복이 가능하며 틈새 시장의 창출이 가능할 것이다. 본 논문에서는 이러

* 주저자 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과
** 교신저자 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과
* Main author : Hanyang University Ph.D Course
** Corresponding author : Hanyang University Ph.D Course
Tel : 062-975-7071, Fax : 062-975-7039
E-mail : stlee@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2012년 3월 7일
1차심사 : 2012년 3월 9일
심사완료 : 2012년 9월 3일

한 근거리 전기자동차용에 적합하도록 전력변환 제어기를 개발하였고 제작된 시제품의 구성, 사양, 설계근거를 제시하고 모의실험의 결과와 실부하 조건에서 수행한 시험결과를 제시함으로써 개발된 전력변환 제어기가 근거리 전기자동차에 적합함을 확인하였다.

2. NEV 전기자동차

2.1 근거리 전기자동차

전기자동차는 주행속도와 안전성등에 따라 저속전기자동차에서 일반 전기자동차까지 다양하게 분류되고 있다. 미국도로교통안전국 기준에 의하면 근거리 전기자동차는 최고속도 70km 이하의 전용도로를 최고속도 32~40km 이하로 주행할 수 있는 차량으로 골프카트보다 한등급 위의 차량으로 정의한다. 2006년 한국교통연구원(The Korea Transport Institute, KOTI) 통계에 따르면 한국의 경우 승용차 1일 평균 주행거리는 40.8km, 미국 37.5km, 영국 39.5km, 이탈리아 34.2km, 일본 26.9km로 나타나 주로 짧은거리를 운행하고 있으며 서울의 경우 도심 평균 주행속도는 시속 14km/h로 저속에서 운행하는 것을 알 수 있다[4].



그림 1. 개발된 4인용 근거리 전기자동차
Fig. 1. NEV developed for 4 people

이렇듯 주행거리, 운용패턴, 현재 기술적 사항, 경제성등을 고려하면 근거리 전기자동차의 시장성은 충분히 있다고 판단된다. 그림 1은 본 논문에서 개발된 전

력변환 제어기가 적용된 4인용 근거리 전기자동차의 디자인 사진을 나타내며, Prototype 차량에 전력변환 제어기를 탑재하여 최대속도 및 운전시험을 수행하였다. 표 1은 개발된 4인용 근거리 자동차의 차량제원 및 상세 사양을 나타내고 있다[5].

2.2 NEV용 전력변환기 및 시스템구성

전기자동차는 엔진의 구동력을 이용하는 방식이 아니며 차량에 탑재된 에너지 저장시스템만을 이용하여 모터를 통해 구동력을 발생시키는 시스템으로 전력변환 제어기는 필수적이다. 그림 2는 개발된 NEV 차량의 전력변환 제어기 및 전장 시스템의 구성도를 나타내며 고전압 배터리 충전을 위한 차량 탑재형 3.3kW 급 충전기, 72V 150Ah급 Ni-MH 고전압(HV) 배터리, 72V 배터리의 전압을 300V로 변환시키는 컨버터, 300V 전압으로부터 모터를 구동하는 인버터, 그 외 차량 전장부하를 위해 72V에서 12V 저전압 (LV) 배터리를 위한 DC-DC 컨버터로 구성된다.

차량의 전장 및 전력변환 제어기를 제어하기 위해서는 차량 상위제어기와 전장 인터페이스는 매우 중요한 부분이다. 통상 차량의 상위제어기를 따로 두어 인버터, 컨버터와 각종 전장부품을 통합하여 제어한다. 그러나 본 연구에서는 상위제어기를 별도로 두지 않고 인버터, 컨버터, 상위제어기를 일체화하여 하나의 제어기로 구성함에 따라 전력/동력제어, 시스템 제어가 통합적으로 제어 되도록 전력변환 제어기를 구성하였다.

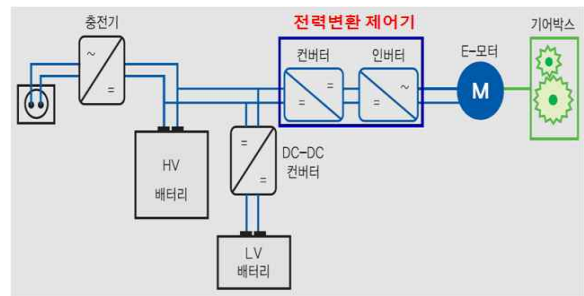


그림 2. NEV용 전력변환 제어기 및 전장 시스템 구성
Fig. 2. Power Conversion Controller and Power System Composition for NEV

표 1. 개발된 4인승 근거리 전기자동차 사양
Table 1. 4-person NEV specifications

구분	T10	
탑승인원(인)	4	
전장(mm)	3,150	
전폭(mm)	1,595	
전고(mm)	1,500	
최저지상고(mm)	165	
윤거(mm)	전	1,410
	후	1,405
축거(mm)	2,150	
최소회전반경(m)	4.5	
중량(kg)	총중량	950
	공차중량	530 (배터리 제외)
최고속도(km/h)	STD	60
	OPT	85
주행거리(km)	STD	80
	OPT	110
등판능력(%)	25	
타이어	전륜/후륜	155/65 R13
현가장치	전륜	더블위시본 타입
	후륜	토션빔 타입
제동장치	전륜	유압 디스크 브레이크
	후륜	유압 드럼 브레이크 핸드파킹
구동방식	전륜구동(in-line motor)	
	신개념 다단 변속장치	
배터리	LiFePO4 / Ni-MH	
충전기	Onboard Charger AC 220V	
램프	LED	
기타	7" 모니터	
	에어컨 / 히터	
	Jog Shuttle Change Lever	

3. NEV용 인버터 및 컨버터

3.1 목표 사양

근거리 전기자동차의 차량제원을 근거로 하여 기어비, 모터 요구토크, 인버터용량, 컨버터용량, 배터리 사양등을 고려하여 인버터, 컨버터의 설계를 수행하였다. 그림 3은 차량 요구사양을 근거로 하여 요구되는 모터 운전속도, 토크특성 곡선을 나타낸 것으로 차량의 최대속도 60km/h 및 최대토크를 기준으로 역산출을 통해 7.5kW 정격출력, 최대 5,000rpm의 목표 사양

을 가지는 전동기를 선정하였다.

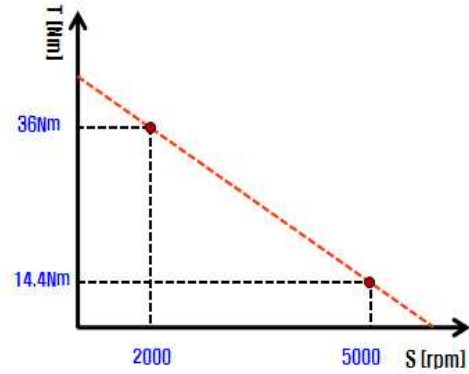


그림 3. 전동기의 속도 대비 토크특성 곡선
Fig. 3. Torque plot according to motor speed

표 2. 모터, 인버터 및 컨버터 목표사양
Table 2. Target Specification of Motor, Inverter and Converter

항목	사양	비고	
모터	상/극수	3 상/12 극	
	상저항	9.62mΩ	
	상인덕턴스 Ld/Lq	0.28/0.41mH	
	역기전력상수	0.216Vpk/rad/s	
	최대속도	5,000rpm	
	모터 정격출력	7.5kW	
	효율	90%	
인버터	인버터 정격출력	8.5kW	
	입력 전압	300V ± 10%	
	목표 효율	95%	
	전력밀도	2.2kW/L	
컨버터	컨버터 정격출력	9.0kW	
	입력전압	72V ± 20%	
	출력전압	300V	
	효율 (순/역)	93/93%	
	전류리플	0.1%	
	전력밀도	2.0kW/L	

표 2는 인버터 구동을 위한 시험용 모터, 인버터, 컨버터의 목표 사양이며 선진사 전력변환 제어기와 성능사양의 비교 검토 및 차량 제작사와 협의를 통해 모

터 효율 90%, 인버터/컨버터 효율 95/93%, 인버터/컨버터 정격 8.5/9.0kW로 설정하였다. 또한 차량에서 크기 및 무게에 대한 기준은 중요하므로 실 차량에 탑재 가능한 수준의 전력밀도로서 인버터 2.2kW/L, 컨버터 2.0kW/L로 목표치를 설정하였다.

3.2 인버터 및 컨버터 설계

컨버터, 인버터의 고효율, 고전력 밀도의 구현을 위해서는 수동소자의 크기, 전력회로의 손실, 발열소자의 분포 및 기구 구성이 큰 비중을 차지한다. 컨버터의 경우 수동소자의 적절한 배분, 리플전류의 저감, 전력소자의 용량저감 및 열발생원 분포 효과등 고전력 밀도의 구현을 위해 IGBT(600V, 200A) Stack 2개를 사용하여 인터리브드 방식의 컨버터 회로를 구성하였다. 인버터의 경우 IGBT(600V, 200A) Stack 3개를 사용하였고 전력소자 최적화 배치를 통하여 인버터 컨버터 전력변환 제어기의 고전력 밀도를 달성하였다. 그림 4는 NEV용 인버터 및 컨버터 전력변환 제어기의 전력회로 구성도이다. 비절연 인터리브드 방식의 컨버터를 통해 수동소자의 소형경량화, 발열부의 분산, 효율적 회로 구성 및 배치를 달성하였다. 컨버터 회로에 있어 고전력 밀도를 구현하기 위해 가장 큰 비중을 차지하는 것은 수동소자의 최적 설계이다. 컨버터 동작모드 및 인터리브 동작을 고려하여 순방향, 역

방향 모드에 대해 표 3의 기본 설계 식을 참조하여 인덕터 L(1mH), 커패시터 CC(3,600uF), 커패시터 CD(9,680uF)의 값을 가지도록 선정하였다. 실제 그림 4의 회로에 적용된 수동소자의 경우 기생 회로성분 및 마진을 고려하여 소자 값을 설정하였다.

표 3. 컨버터의 수동소자 기본식(6)
Table 3. Passive Component Basic Equation of Converter

	정방향모드 (순압)	역방향모드 (강압)
인덕터	$L \geq \frac{V_D D(1-D)^2 T_s}{2I_{omin}}$	$L \geq \frac{V_C(1-D) T_s}{2I_{omin}}$
커패시터	$C_D = \frac{DT_s}{R} \times \frac{V_D}{\Delta v_D}$	$C_C = \frac{(1-D) T_s^2}{8L} \times \frac{V_C}{\Delta v_c}$
설명	D : 시비율, T _s : 시간, I _{omin} : 인덕터전류 ΔVD : CD 커패시터 리플전압 ΔVC : CC 커패시터 리플전압	

3.3 인버터 및 컨버터 제어 알고리즘

NEV 구동용 모터의 경우 매입형 영구자석 동기모터를 사용하며 식 (1)과 같은 토크출력(Te)을 발생한다. 매입형 영구자석 동기모터의 경우 최대토크 제어를 위해 d축 인덕턴스(Ld), q축 인덕턴스(Lq), 자속(∅), 지령전류(Is)를 통해 식 (2)와 식 (3) 같이 d축 전류(I_d)와 q축 전류(I_q)를 지령하며 최적의 동작 점에서 운전 되도록 알고리즘을 구현하였다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \{ (L_d - L_q) I_d I_q + \phi I_q \} \tag{1}$$

$$I_q = \sqrt{I_s^2 - I_d^2} \tag{2}$$

$$I_d = - \frac{2(L_q - L_d) I_s^2}{\phi + \sqrt{\phi^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_s^2}} \tag{3}$$

그림 5는 NEV용 IPMSM을 구동하기 위한 벡터 제어 알고리즘 블럭도를 나타내고 있다. 차량특성 및 신뢰성을 고려하여 Resolver로부터 위치정보를 입력받아 인버터의 속도제어를 수행하며 모터 상전류를 입력받아 전류제어를 수행하도록 하였다. 컨버터의

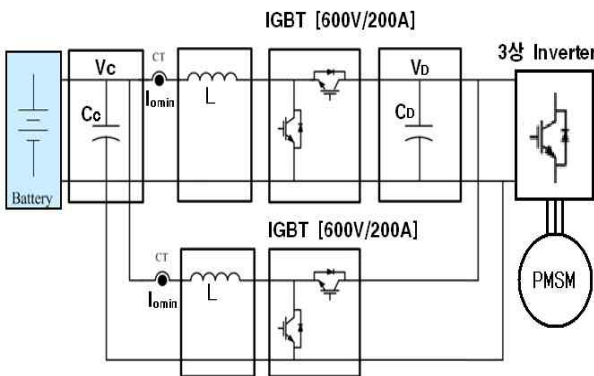


그림 4. NEV용 인버터 및 컨버터의 전력회로 구성
Fig. 4. Inverter and Converter Power Circuit for NEV

경우 제어알고리즘을 수행하기 위해서는 연산시간의 제약이 따르게 된다. 따라서 전압과 전류 제어를 위한 제어주기는 스위칭 주기보다 느리게 하여 빠른 스위칭 효과를 달성함과 동시에 전압 및 전류제어가 잘 수행되도록 구성하였다. 그림 6은 컨버터의 리플저감을 위한 제어 알고리즘 개념도이며 제어주기 100us, 스위칭 동작주기 25us 제어를 통해 연산시간의 확보와 4배 빠른 스위칭에 따른 주파수 상승효과로 전류리플 저감 및 수동소자 용량 저감의 효과를 달성하였다.

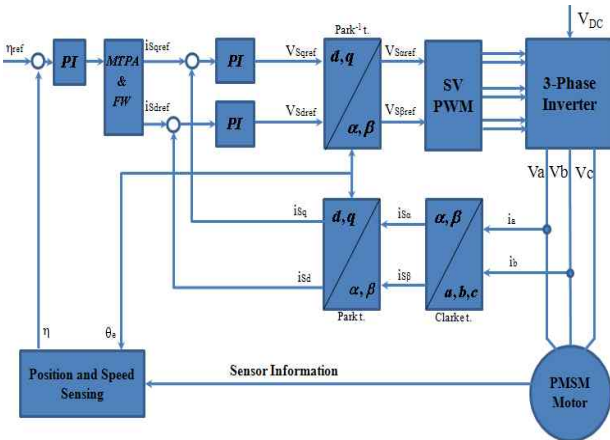


그림 5. NEV용 인버터 벡터제어 알고리즘
Fig. 5. Inverter Vector Control algorithm for NEV

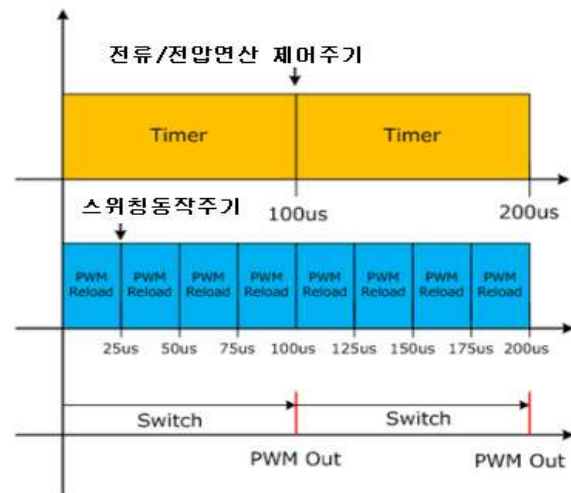
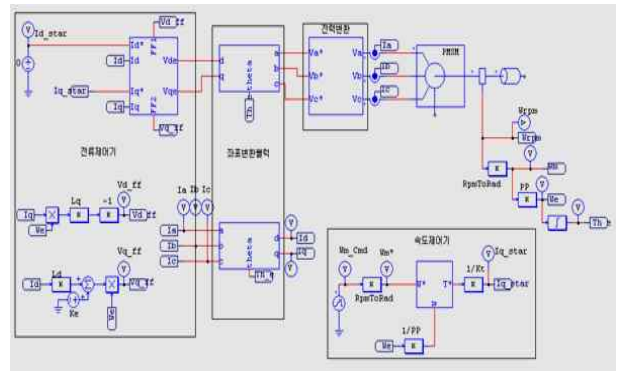


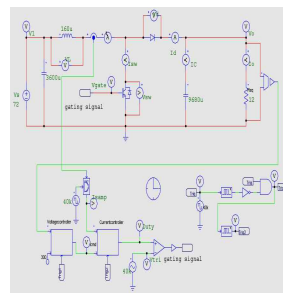
그림 6. 컨버터의 리플저감 제어 알고리즘
Fig. 6. Control algorithm to reduce ripple of Converter

3.4 인버터 및 컨버터 모의실험

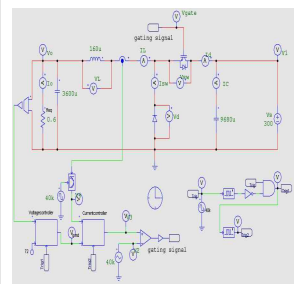
NEV용 인버터와 컨버터의 알고리즘을 검증하기 위해 모의실험을 수행하였다. 그림 7은 PSIM으로 수행한 인버터, 컨버터의 모의실험을 위한 회로이다. 인버터의 경우 모터 부하에 따른 인버터 상전류, 속도 상관관계, 내부제어기 정수 등을 검증하여 설계에 반영하였고 컨버터의 경우 정방향 및 역방향모드를 따로 구분하여 모의실험을 수행하여 수동소자의 회로정수, 스위칭 소자 정격, 전도특성, 스위칭특성을 고려하여 컨버터 설계에 반영하였다.



(a) 인버터 모의실험 회로



(b) 정방향모드 (승압)

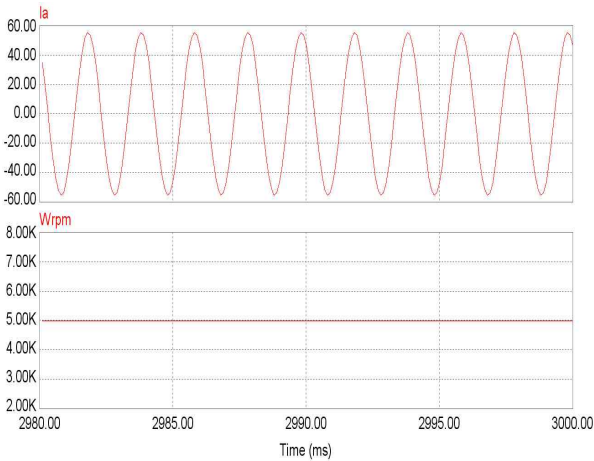


(c) 역방향모드 (강압)

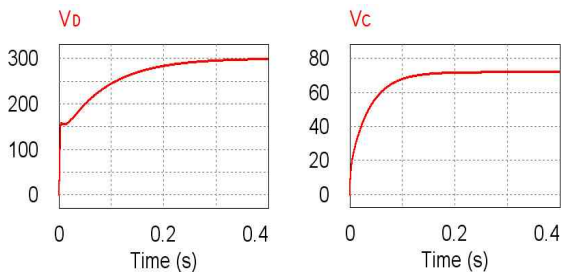
그림 7. 인버터, 컨버터 모의실험 회로
Fig. 7. Inverter and Converter Simulation Circuit

그림 8은 NEV용 인버터와 컨버터의 모의실험 결과이며 (a) 인버터의 경우 모터 정격출력 7.5kW, 토크 14.4Nm, 운전속도 5,000rpm 조건에서 모터 상전류가 37Arms로 안정된 운전 특성이 나타남을 확인하였다.

(b) 컨버터 정방향 모드의 경우 전압 300V, 전류 25/12.5A 조건으로 출력전압이 안정화됨을 확인하였다. (c) 컨버터 역방향 모드 조건의 경우 전압 72V, 전류 104/52A 조건으로 출력전압이 안정화됨을 확인하였다.



(a) 인버터 경우 모의실험



(b) 정방향모드 모의실험 (c) 역방향모드 모의실험

그림 8. NEV용 인버터와 컨버터의 모의실험 결과
Fig. 8. Inverter and Converter Simulation Result for NEV

4. 인버터, 컨버터 제작 및 시험

4.1 인버터, 컨버터 제작

NEV용 인버터, 컨버터의 경우 고효율, 대전력 밀도를 요구한다. 그림 9는 NEV용 전력변환 제어기의 제작 도면을 보여주고 있다. 제작된 전력변환기는 가로 330mm, 세로 170mm 높이 165mm의 크

기를 가지며, 체적으로는 9.25L이다. 본 전력변환기는 정격의 120% 이상 운전이 가능하며 이러한 측면에서 인버터 10.2kW, 컨버터 10.8kW로 운전이 가능하다. 따라서 전력밀도 측면에서 2.27kW/L의 수치를 가지므로 목표사양을 만족함을 알 수 있다. 본 시제품은 인버터, 컨버터, 차량제어를 위한 제어 기능까지 포함된 일체형의 전력변환 제어기로서 근거리 전기자동차용 전력변환기로 적합한 구성이라 하겠다.

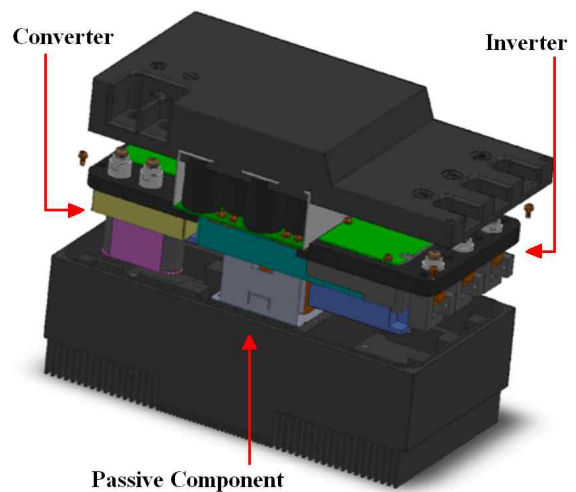
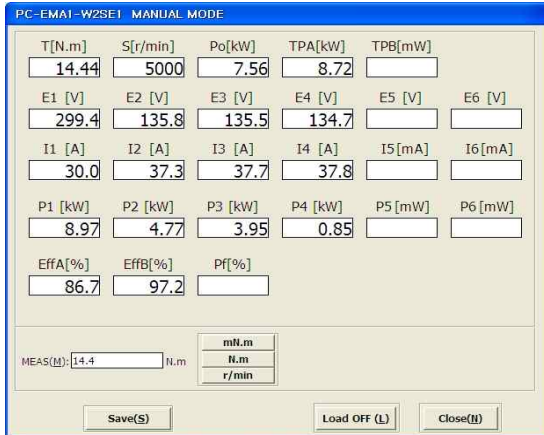


그림 9. NEV용 전력변환 제어기 제작 구성
Fig. 9. Power Conversion Controller drawing for NEV

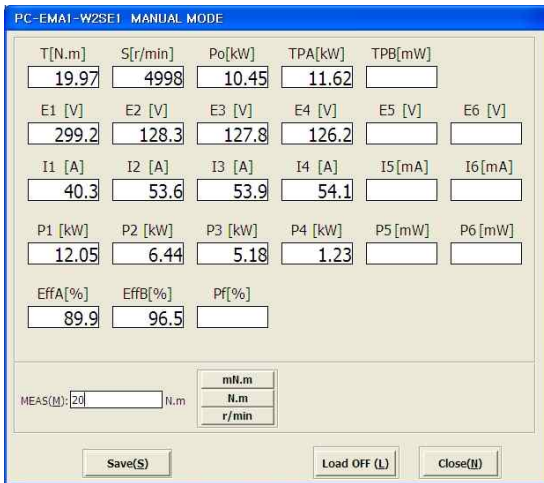
4.2 인버터, 컨버터 시험

그림 10은 NEV용 인버터 부하시험 결과를 나타낸다. (a) 14.4Nm 정격부하의 경우, 운전속도 5,000 rpm, 조건에서 인버터 효율 97.2%가 달성됨을 확인하였고 (b) 20Nm 최대부하의 경우 96.5%의 고효율이 달성됨을 확인하였다. 그림 11은 인버터 운전시의 실험 파형을 나타낸다. (a) 14.4Nm 부하의 경우 상전류 37.10Arms, (b) 20Nm 부하의 경우 상전류 53.37Arms로 파형에서 볼 수 있듯이 정현파 형태의 전류제어, 속도 및 부하변동에도 제어동작이 잘됨을 확인하였고 또한 THD는 속도 및 부하변화에 대해 3.7~5.2%로 벡터제어가 잘 이루어짐을 확인하였다.

전기자동차용 전력변환 제어기 개발



(a) 14.4Nm 부하

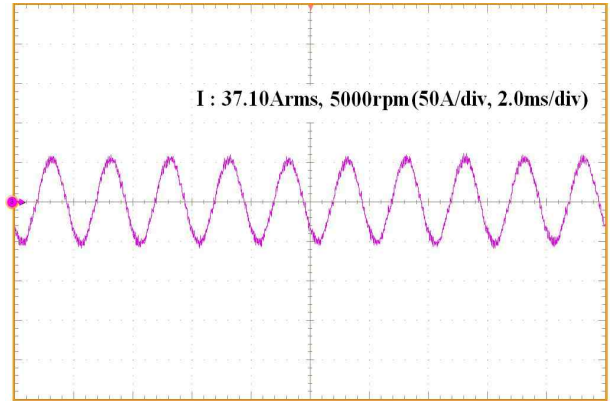


(b) 20Nm 부하

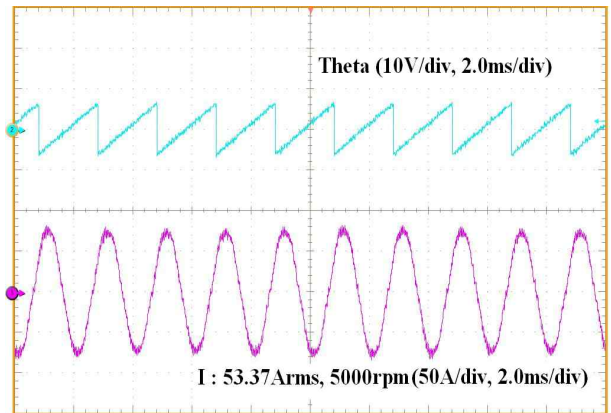
그림 10. NEV용 인버터 부하시험 결과
Fig. 10. Inverter Load Test Result for NEV

컨버터의 경우 수동소자의 크기와 무게가 고전력 밀도 및 고효율에 큰 영향을 미친다. 그림 12는 컨버터의 리플저감 알고리즘을 비교 실험한 파형으로 전류 리플 저감효과를 확인하였다. (a) 알고리즘 적용전 출력전류의 리플은 139mApk-pk이며 (b) 알고리즘 적용후 출력전류의 리플은 48.8mApk-pk로서 약 2.8배 정도의 개선 효과가 있음을 확인하였다. 그림 13은 전력변환제어기에 대해서 정격부하 7.5kW 동작 시 온도 시험 결과이다. 외부온도 24.4°C 조건에서 1시간 40분간 동작 시험을 진행하였으며 1시간 10분 이후부터 온도포화가 일어남을 확인하였다. 컨버터 IGBT Base

부분의 온도가 73.5°C로 최대임을 확인하였고, 그 외 Vc커패시터가 41.8°C로 나타남을 확인하였다.

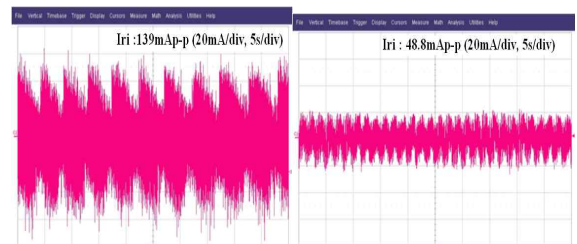


(a) 14.4Nm의 경우 실험파형



(b) 20Nm의 경우 실험파형

그림 11. NEV용 인버터 부하시험 파형
Fig. 11. Inverter Load Test Waveform for NEV



(a) 알고리즘 적용 전 (b) 알고리즘 적용 후

그림 12. 컨버터 리플저감 알고리즘 비교 실험파형
Fig. 12. Algorithm comparison waveform to reduce ripple of Converter

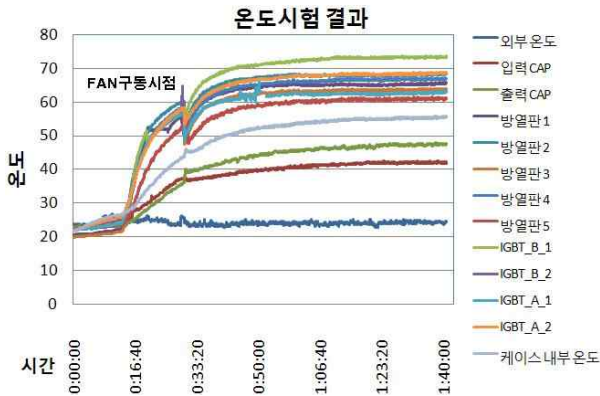


그림 13. 전력변환기 온도시험 결과
Fig. 13. Power Converter temperature Test Result

5. 결 론

본 연구에서는 근거리 전기자동차용의 인버터와 컨버터에 대한 설계, 제어 방식 및 그 개발 결과에 대한 사항을 서술하였다. 현재 인버터, 컨버터, 제어기가 요구하는 부품의 기능 및 동작 사양은 만족하였으며 전력변환 제어기의 제품화를 위한 신뢰성 시험을 진행 중에 있다. 본 논문에서 개발한 전력변환 제어기의 경우 근거리 전기자동차에 적합하도록 인버터, 컨버터, 제어기 일체형 타입으로 개발된 전력변환 제어기로서 기존 근거리 전기차용 제어기 대비 전력밀도 및 효율 측면에서 우수하다. 따라서 이러한 장점을 살려 사업화 수행 시 확대 적용이 가능할 것이라 판단된다. 향후 근거리 전기자동차 개발을 위해 차량측면에서 신뢰성 시험을 수행하고 제품화, 사업화에 성공할 수 있도록 최적화 및 개선작업을 지속적으로 진행하고자 한다.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (2010201010100420-12-2-300)

References

- [1] I. K. Yeo, "Industrial Strategic Technology Road Map Report (Vehicle)", Korea Institute for advancement of Technology, 2010.
- [2] J. R. Soares, et. al., "Design and Development of New Controller Suitable to Neighbourhood Electric Vehicle Propulsion Control" IEEE Industrial Electronics, IECON, pp. 67~72, 2006.
- [3] D. J. Yoo, "EV New Technology Trend Seminar", KETI - Vehicle Electric Center, Feb, 2010.
- [4] Y. Lee, Traffic, The Korea Transport Institute, Vol.103, p.6, 2006.
- [5] Y. K. Kwon, "Development Practices of Neighborhood electric vehicle(NEV)", The Journal of the Korean Institute of Power Electronics Vol. 16, No.2, pp. 38~43, 2011.
- [6] H. J. Kim, "Basic Design of Switching Power Supply", Sungandang, 2002.

◇ 저자소개 ◇



오용승 (吳龍繩)

1976년 10월 12일생. 2001년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2003년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 2010년 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사수료. 2003년~현재 (주)윌링스 기술연구소 수석연구원.



김희준 (金熙峻)

1954년 11월 16일생. 1976년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1986년 일본 큐슈대학 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1987년~현재 한양대학교 전자시스템공학과 교수.



이상택 (李尙澤)

1977년 2월 19일생. 2009년 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사수료. 2003년~2009년 삼성전자 DA연구소 책임연구원. 2009년~현재 전자부품연구원 디지털 컨버전스 연구센터 선임연구원.