

표면 부착형 영구자석 동기 전동기를 이용한 20kW급 실험용 전기자동차 파워트레인 개발

박성환¹, 이정주¹, 손종열¹, 이영일[†]

Development of a Powertrain for 20kW Experimental Electric Vehicle Using Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor

Sung-Hwan Park¹, Jeong-Ju Lee¹, Jong-Yull Son¹, and Young-Il Lee[†]

Abstract

This paper describes the development of a powertrain for a 20 kW experimental electric vehicle using a surface-mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM) and its application to a test vehicle. Two 10 kW SPMSMs are used in the powertrain, and two-level inverters are developed by using IGBTs to derive these motors. To control the SPMSM, a control board based on a TMS320F28335 DSP module, which has fast arithmetic function and floating point operator, is used. We develop a 100 V/40 A battery pack, which includes 32×4 LiFePO4 battery cells using commercial BMS. A commercial on-board charger with 220 V (AC) input and 100 V (DC) and 18 A output is used to charge the battery pack. The performance of the developed vehicle, such as acceleration availability, maximum speed, and maximum power, is estimated based on vehicle dynamics and verified through experiments.

Key words: Surface mounted permanent Magnet synchronous motor, 2-Level inverter, Battery, Electric vehicle

1. 서 론

최근 대기오염의 대부분이 자동차 배기가스에 의해서 이루어지고 있다는 인식에 따라 전기자동차에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. [1]에서는 전기자동차의 기계적 모델을 이용하여 시뮬레이션 도구인 matlab/simulink로 전기차의 동적특성과 성능을 분석하고 기존 연소기관 자동차와 비교하였다. [2]에서는 전기차 실험을 위한 테스트벤치 디자인을 제안하고 테스트 벤치를 사용하여 소형 전기차의 견인능력과 회생제동능력을 테스트 하였다. 그리고 [3]에서는 실제 전기차인 Peugeot iOn과 Ford Transit Connect을 이용하여 여러

가지 실험을 실시하였다. 이 실험에는 차대 동력계를 이용하여 각각 다른 토크와 속도로 운전 시, 전기에너지에서 기계에너지로 변환하는 성능을 테스트 하였다. 또한 실제 도로주행을 실시하여 운행 시 소비되는 에너지에 대한 효율을 분석하였다.

최근에는 여러 나라 제조사들의 다양한 신차모델 출시, 가격인하, 소비자들의 관심도 증가로 전기자동차 판매량이 급증하고 있는 추세이다. [4]를 살펴보면 전기자동차의 최근 국내외 동향과 정책적 시사점에 대하여 살펴볼 수 있다.

전기자동차는 친환경적이라는 장점뿐만 아니라 내부구조가 내연 기관 자동차에 비해 훨씬 단순하다는 장점이 있다. 엔진과 변속을 위한 수많은 장치가 인버터와 모터, 특히 AC모터로 대체되기 때문에 내부구조가 훨씬 단순해진다. 따라서 개발하는 과정의 복잡성이 훨씬 적고 정비성이 매우 뛰어나다.

이에 따라 현재 전기자동차 AC모터 효율 개선에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며^{[5][6]}, 여러 AC모터 중 영구자석 동기전동기(PMSM)는 고효율 밀도를 가지고 있어 전동기 무게에 대한 출력 토크의 비가 크고, 속응성이 좋으므로 순시 토크 제어가 요구되는 전기자동차

Paper number: TKPE-2017-22-3-8

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: yilee@seoultech.ac.kr, Dept. of Electrical and Information Eng., Seoul Nat'l Univ of Science and Technology

Tel: +82-2-970-6544 Fax: +82-02-972-1237

¹ Dept. of Electrical and Information Eng., Seoul Nat'l Univ of Science and Technology

Manuscript received Nov. 19, 2016; revised Dec. 19, 2016; accepted Feb. 28, 2017

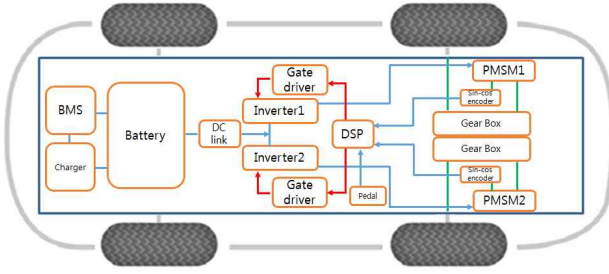


Fig. 1. Electric vehicle components.

차 분야에 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 표면 부착형 영구자석 동기전동기 (SPMSM)을 이용한 20kW급 실험용 전기자동차 파워트레인 개발의 결과를 보인다. 본 연구의 목적은 대학에서의 실험에 적합한 실험용 전기차 개발을 위해서 모터 제어기를 직접 제작하고 모터제어 알고리즘을 구현하는 것이며 이를 검증하기 위해서 배터리를 포함하는 파워트레인을 구성하고 실험용 차에 장착하였다.

파워트레인 구성을 위해 2개의 10kW급 100V,100A 정격의 표면 부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)을 사용하고, 모터 정격에 맞는 IGBT와 Gate driver를 선정하여 모터 제어를 위한 2레벨 인버터를 구성하였다. 모터 토크제어 알고리즘 구현을 위해 빠른 연산이 가능하며 부동소수점 연산을 지원하는 DSP TMS320F28335 프로세서 모듈을 사용하여 2개의 모터를 한 번에 제어할 수 있는 제어보드를 구성하였다. 모터 정격에 맞는 배터리 구성을 위해, 한 셀 당 3.3V, 10Ah 리튬인산철 배터리 셀을 4개씩 병렬로 연결하고 이들을 32개 직렬 연결하고 상용 BMS(Battery Management System)를 사용하여 100V의 40A 정격의 배터리 팩을 구성하였다. 또한 배터리 충전을 위해 가정용 전원 220V(AC)를 입력으로 받아 100V(DC), 18A를 출력으로 내주는 상용 충전기를 on board charger로 이용 하였다. 배터리 잔여량과 전기자동차의 속도 그리고 각종 Technical Data는 CAN통신을 사용하여 제어보드를 통해 수집할 수 있도록 하였다

2장에서는 모터 제어기 개발을 위한 2레벨 인버터 구성과 모터제어 알고리즘에 관해 설명하고 3장에서는 모터 구동을 위한 배터리와 BMS구성에 관해 설명한다. 4장에서는 개발한 모터제어기와 파워트레인 성능검증을 위한 실험결과를 제시하며 5장에서 본 논문에 대한 결론을 제공한다.

2. 모터제어 시스템 개발

2.1 전기자동차 파워트레인 개요

파워트레인이란 동력장치에서 생산한 동력을 실제로 구동하는 바퀴까지 전달하는 과정에서 연결 되는 모든

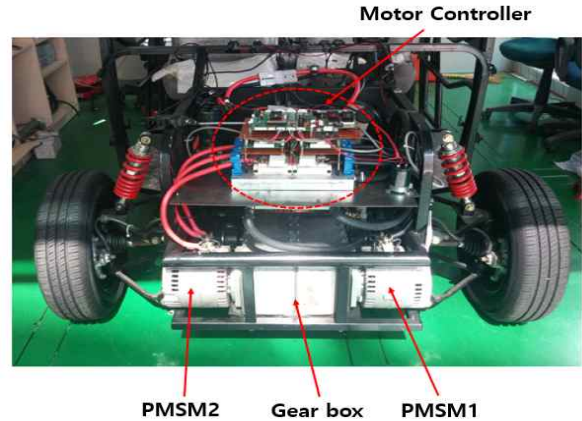


Fig. 2. 2 SPMSM and gear box.

기관을 가리키는 것이다. 구동방식 별로 차이는 있지만 일반적인 차량은 기본적으로, 엔진에서 동력을 생산하고, 클러치, 변속기, 출력축, 종감속기어, 차동기어장치를 거쳐 바퀴로 구동력이 전달된다. 이때 동력전달을 위해 거치는 장치들을 통합적으로 파워트레인이라고 하게 된다.

전기자동차의 경우 엔진의 역할을 모터가 맡고, 가솔린 대신 배터리로부터 에너지를 전달받게 된다. 전기자동차의 파워트레인 구성은 내연기관 자동차보다 간단하며 크게 배터리, 인버터, 모터, 감속기를 거쳐 바퀴로 구동력이 전달된다. 본 논문에서 소개할 파워트레인의 전체 구성도는 그림 1과 같다. 차량 앞쪽은 2개의 모터와 모터 제어기로 구성되어 있으며 뒤쪽은 배터리, BMS 그리고 on board charger로 구성되어 있다.

최대시속 60Km 정도의 실험용 차를 구성하기 위해서 필요한 모터의 용량인 20kW급 전기자동차 파워트레인 개발을 위해 10kW급 SPMSM 2개를 그림 2와 같이 구성하였다. 2WD(이륜 구동)의 전륜 구동 방식이며 기어 박스는 고정 기어로써 4 : 1로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용된 모터는 Motenergy사의 표면 부착형 영구자석 동기전동기 ME1115이다. 이 모델은 용량 대비 가격이 저렴하며 회전자 위치측정을 위한 sin-cos 인코더를 갖추고 있다. 보통 전기자동차에는 구조적으로 튼튼한 매립형 영구자석 동기전동기가 많이 들어가지만, 실험용 전기자동차 제작을 목적으로 구매하기에는 가격이 매우 높다. 그러므로 비교적 저렴한 10kW급 표면 부착형 영구자석 동기전동기 2개를 사용하여 20kW급 파워트레인을 구성하였다.

2.2 2레벨 인버터 구성

2개의 SPMSM을 제어하기 위해 2개의 2레벨 인버터를 그림 3과 같이 구성하였다. 3상 모터 전류 구동 범위를 각 상당 최대 300A(AC)까지 되도록 하기 위해 Infineon사 제품인 450A 정격의 IGBT와 Gate Driver를 선정하여 다소의 마진을 보장하였다. 또한, 인버터의 방

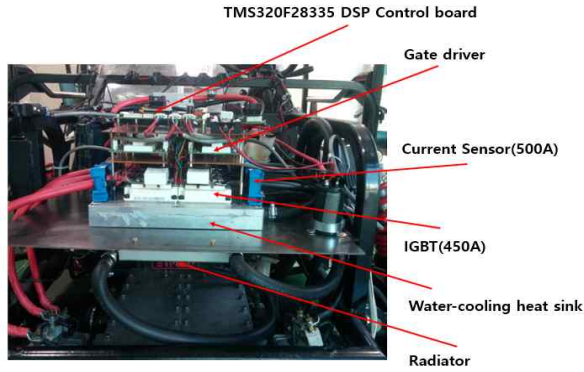


Fig. 3. 2 level inverter and cooling system.

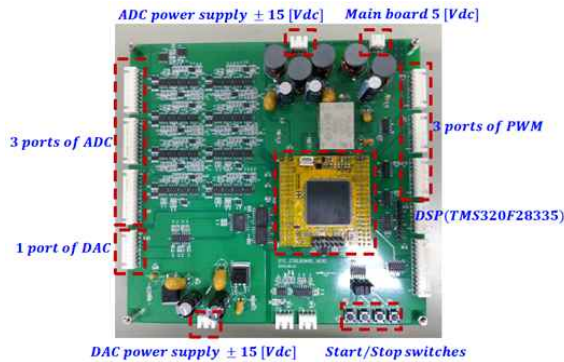


Fig. 4. Control board based on DSP module.

열을 위해 수냉식 방열판과 수냉 펌프 그리고 라디에이터 팬을 이용하여 냉각 시스템을 구성하였다. 두 개의 SPMSM 토크 제어 알고리즘 구현을 위해 빠른 연산이 가능하며 부동소수점 연산을 지원하는 DSP TMS320F28335 프로세서 모듈을 사용하여 제어 보드를 구성하였다. 제어 보드는 그림 4와 같다. 이때 인버터를 구성하는 모든 배선은 EMI 효과를 최대한 줄이기 위해 가능한 짧게 하였다. 알고리즘을 구성 할 때 사용되는 모터의 3상전류 값은 LEM사의 전류센서를 사용하여 측정하였다.

2.3 토크 제어알고리즘 구현

두 개의 SPMSM을 위한 토크 제어 시스템의 블록도는 그림 5와 같다. 전류센서를 통해 모터의 3상 고정자 전류 값을 측정하고 모터에 장착된 Sin-Cos encoder를 사용해서 모터의 회전자 위치를 측정한다. 모터의 회전자 위치를 기준으로 회전자 전류를 dq 변환하여 d축, q축 전류 값을 얻어서 토크 제어를 실시한다. 이때 표면 부착형 영구자석의 동기전동기는 자속 발생을 위한 d축 자속 성분 전류가 필요하지 않으며, 또한 토크 발생에 아무런 기여를 하지 않기 때문에 d축 고정자 전류의 설정치를 0으로 둔다. 두 개의 PI 제어기를 사용해서 d축 및 q축 전류를 각각 제어한다. 이렇게 얻은 제어 입력을 SVPWM 방식으로 2레벨 인버터를 스위칭 하여

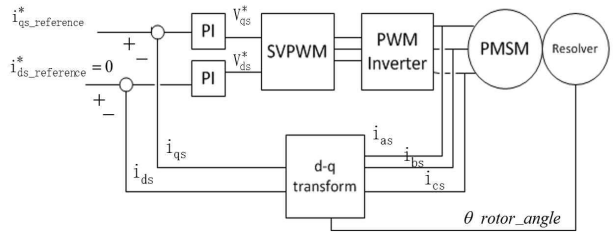


Fig. 5. Torque control block diagram.

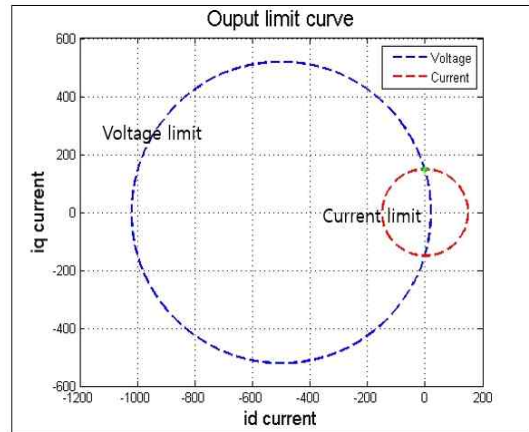


Fig. 6. Voltage/current limit circles at 4400RPM.

SPMSM을 구동한다. 이때 q축 지령에 따른 토크 식은 식 (1)과 같다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} \lambda_m i_{qs} \tag{1}$$

이때 P는 모터의 극 수 그리고 λ_m 은 영구자석의 자속이다. SPMSM이 고속 영역에서 동작하면 역기전력 증가에 따라 전압 여유분이 줄어들게 된다. 따라서 고속 영역에서는 적절히 역기전력을 제한하는 약자속 제어를 적용하여야 필요로 하는 전류/토크 출력을 낼 수 있게 된다. SPMSM의 전압 제한 원은 전류 제한 원은 각각 식 (2), (3)과 같다.

$$(w_r L_s i_{ds} + w_r \lambda_m)^2 + (w_r L_s i_{qs})^2 \leq V_{smax}^2 \tag{2}$$

$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq i_{smax}^2 \tag{3}$$

이때 w_r 는 동기 속도 그리고 $L_s (=0.05mH)$ 는 모터의 인덕턴스이다. 만약 정격 토크(22Nm, $i_{smax} = 150$)로 일정 토크 운전을 한다면, 가능한 최대속도는 4400RPM이다. 4400RPM에서의 전압 제한 원과 전류 제한원은 그림 6과 같다.

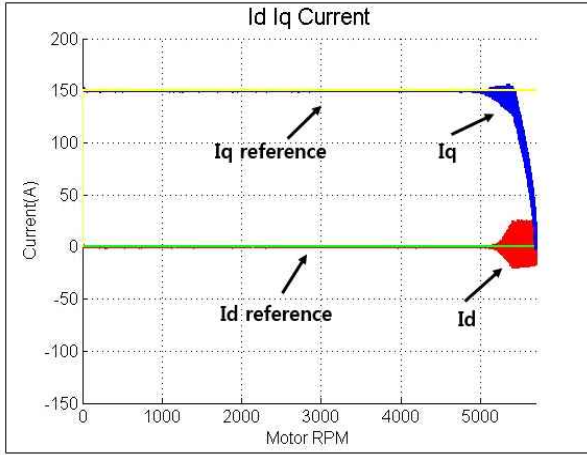


Fig. 7. d-q axis currents without field weakening control.

식(2)와(3)에 따라 전압 제한 원과 전류 제한 원은 모두 d축 q축 전류에 관한 식으로 표현된다.

정격 토크(22Nm)로 운전할 때 4400RPM 이상 부터 약자속 제어를 시작해야 한다. 4400RPM 이상에서 가능한 높은 토크 출력을 내기 위해선 전압 제한 원과 전류 제한원의 교점 부분을 d축과 q축 전류 지령으로 사용하여야 한다. 4400RPM 이상에서 d축과 q축 전류 지령은 다음과 같다.

$$i_{ds}^* = \frac{r^2 - i_{s\max}^2 - k^2}{2k} \quad (4)$$

$$i_{qs}^* = \sqrt{i_{s\max}^2 - i_{ds}^{*2}} \quad (5)$$

이때 $k = \frac{\lambda_m}{L_s}$, $r = \frac{V_{s\max}}{\omega_r \cdot L_s}$ 이다.

Psim 시뮬레이션을 통해 약자속 제어의 성능을 검증하였다. 그림 7에서 4400RPM 이후부터 d축과 q축 전류가 지령 값을 따라가지 못하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 그림 8과 같이 약자속 제어 후에는 지령치를 잘 따라가는 것을 확인 할 수 있다. 그림 8은 식(4)와 식(5)에 따라 지령 값을 변화시켜 가면서 제어하고 있다.

그림 9에서 4400RPM 이후부터 전압 여유분이 부족하여 토크의 크기가 급격하게 감소하는 것을 확인 할 수 있고, 5700RPM 이상으로 출력을 낼 수 없었다. 이에 약자속 제어를 적용함으로써 그림 10과 같이 가능한 최대의 토크 출력을 낼 수 있었고, 6400RPM 이상의 출력을 낼 수 있었다.

3. 배터리 팩 구성 및 운용

3.1 배터리 셀 구성

본 연구에서는 폭발에 대한 안정성이 높고, 소량으로 쉽게 구매가 가능한 리튬인산철(LiFePO4) 배터리를 선정

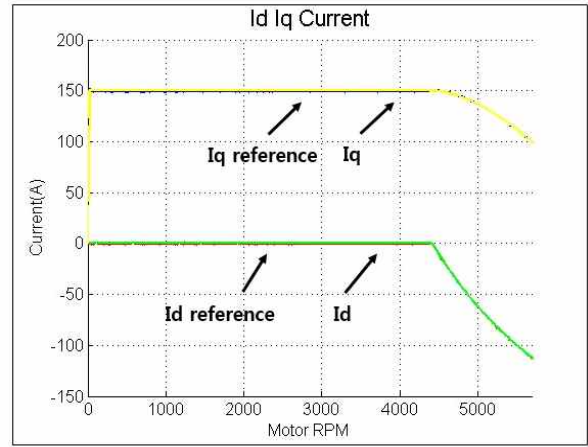


Fig. 8. d-q axis currents with field weakening control.

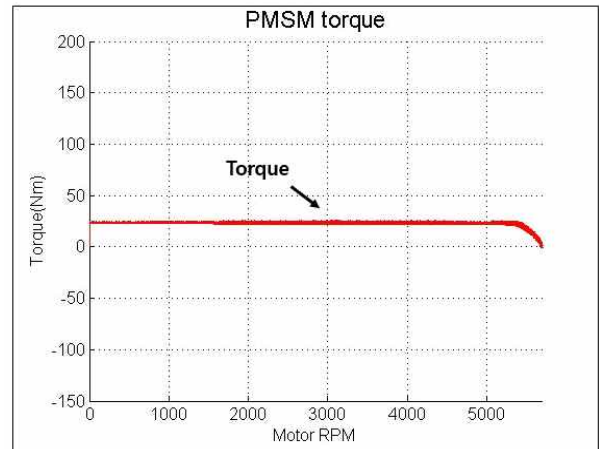


Fig. 9. Torque response without field weakening control.

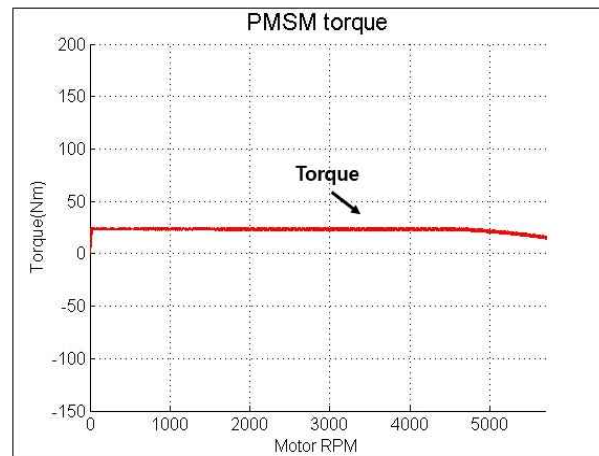


Fig. 10. Torque response with field weakening control.

하였다. 제품은 Headway 사의 제품을 선택하였다. 3.2V 10Ah 리튬인산철(LiFePO4) 셀들을 4개씩 병렬연결하고, 그것들을 다시 32개씩 직렬연결 하여 약 100V, 40Ah의

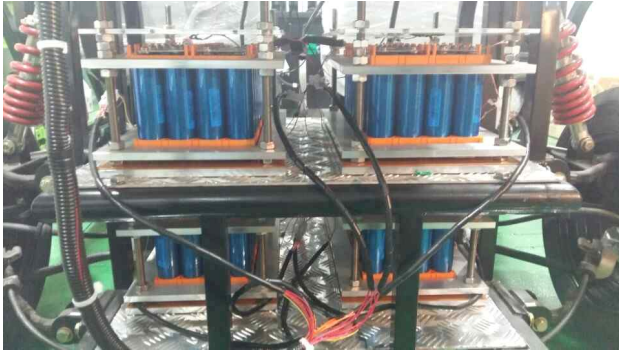


Fig. 11. LiFePO4 battery pack.

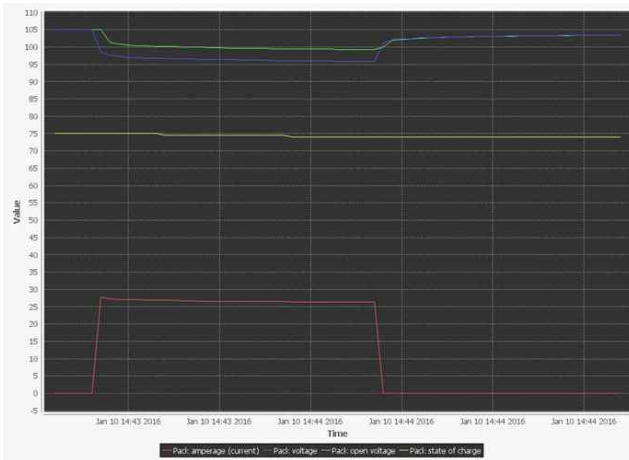


Fig. 12. Battery voltage(upper), SOC(middle) and current when the battery pack is connected to a load.

배터리팩을 구성하였다. 또한 배터리에서 인버터로 들어가는 입력전압을 일정하게 유지하기 위해 직류링크(DC Link)측에 4700uF의 커패시터를 사용하였다. 배터리팩 구성은 그림 11과 같다.

그림 12는 제작한 배터리 팩의 내부저항을 측정하기 위한 실험결과를 보여주고 있다.

SOC가 75%로 추정되고 배터리팩의 개방전압이 105.1V인 상태에서 약 26.8A의 전류를 배터리로부터 부하에 흐르게 하였을 때 배터리 전압은 96.7V로 떨어진다. 따라서 배터리 팩의 내부저항이 약 0.31Ω임을 알 수 있다. 26.8A의 전류를 약 1분 30초 정도 계속 흘렸을 때 BMS에서 계산한 SOC는 약 1% 감소하였다.

3.2 BMS 연결

배터리와 BMS를 포함한 파워트레인 구성도는 그림 13과 같다. 그림 7에서 배터리팩 충전 시 smps에서 BMS에 전원공급을 하고, 방전 시 dc/dc를 통해 BMS에 전원공급을 하도록 하였다. 또한 직류링크(DC Link)의 초기충전회로 구성을 위해 컨택터(S)를 추가하여 직류링크(DC Link)의 방전 및 초기충전이 가능하도록 하였고, 750Ω의 저항(R)을 사용하여 시정수를 3.525s로 설정하였다. 이 저항은 BMS가 방전을 갑자기 차단할 경우 저

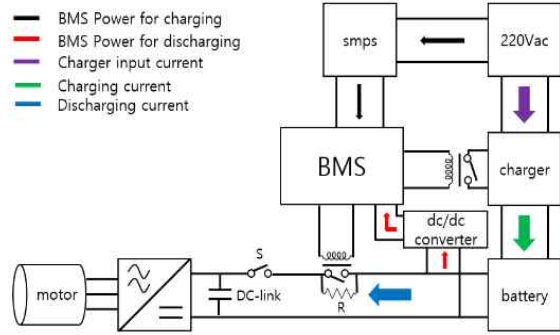


Fig. 13. Powertrain block diagram including BMS.

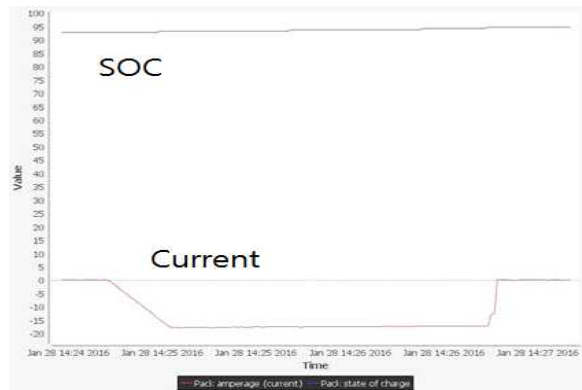


Fig. 14. Battery charging current & SOC.



Fig. 15. BMS & Charger.

전류 흐름을 만들어 주는 역할을 수행한다.

배터리 충전을 위해서 가정용전원 220V(AC)를 받아 100V, 18A를 출력으로 내보내는 on board charger를 사용하였다. 충전기의 경우 Elcon사의 2500W HF/PFC LiFePO4 모델을 사용하였다. 배터리 충전상태는 BMS를 통해 확인 할 수 있으며, 배터리의 충전상태(SOC)가 95% 일 때 BSM에서 충전을 차단하고 셀밸런싱을 실시한다. 그림 14에서 배터리 충전상태 그래프를 확인할 수 있고 SOC이 95%에 도달했을 때 충전을 차단하는 것을 확인할 수 있다. BMS와 충전기의 구성은 그림 14와 같다.

TABLE I
SPECIFICATION OF COMPONENTS OF POWERTRAIN

	Inverter	Battery	Motor
Rated voltage [V]	1200	100	100
Rated current [A]	450	40	125[AC]
Maximum current [A]	900	400	420[AC]
Rated torque [Nm]	.	.	22
Maximum torque [Nm]	.	.	81
Rated speed [RPM]	.	.	5000
Switching frequency [Hz]	10k	.	.

TABLE II
CONSTANTS OF EV

Parameter	Symbol	Value
Vehicle mass [kg]	M_{veh}	330
Radius of wheel [m]	R_w	0.265
Ratio of gearbox	K_g	4
Frontal area of vehicle [m^2]	S_f	1.34
Aerodynamic coefficient	C_d	0.4
Rolling resistance coefficient	V_f	0.013
Efficiency of transmission	η_τ	0.9
Air density [kg/m^3]	ρ	0.13
Grading of the road	α	0

BMS는 Ewert Energy사의 Orion BMS 36 cell 모델을 사용하였다. 따라서 SOC 알고리즘과 셀 밸런싱 및 보호 회로 기능은 자동으로 탑재되어 있다.

마지막으로 개발한 파워트레인의 인버터, 배터리, 모터의 사양을 표 1에 나타내었다.

4. 전기자동차 성능검증

4.1 전기자동차 성능 분석

개발한 전기자동차의 최대 가속도, 최대주행거리, 최대속력과 최대출력 등의 제반 성능을 파워트레인의 제반 사양을 가지고 계산하고 이를 실험을 통해서 검증한다.

먼저 차량의 가속도를 분석해 본다. 실제 도로 주행 시 인가되는 저항력은 식 (6)과 같다.

$$F_t = F_g + F_{ady} + F_{roll} + F_{acc} \quad (6)$$

이때 F_g 는 중력, F_{ady} 는 공기 저항, F_{roll} 는 구름저항 그리고 F_{acc} 는 가속으로부터 생기는 힘이다. 식(6)은 세부적으로 식(7)와 같이 쓸 수 있다.

$$F_t = M_{veh} \cdot g \cdot \sin\alpha + \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot S_f \cdot v_{veh}^2 + M_{veh} \cdot g \cdot V_f \cdot \cos\alpha + M_{veh} \frac{dv_{veh}}{dt} \quad (7)$$

이때 M_{veh} 는 탑승자 3명을 포함한 차체 중량, g 는 중력 가속도, α 는 도로 기울기, ρ 는 공기 밀도, C_d 는 공력 계수, S_f 는 차량 앞면 넓이, v_{veh} 전기차 속도 그리고 V_f 는 구름 계수이다. 이를 통해 차량의 가속도는 식(8)과 같다. 수식에 사용된 전기차의 각종 상수들은 표 2과 같다.

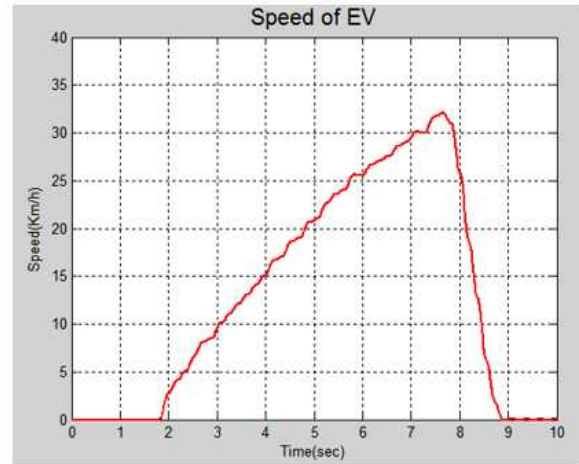


Fig. 16. Acceleration plot.

$$\frac{dv_{veh}}{dt} = \frac{F_t - (F_g + F_{ady} + F_{roll})}{M_{veh}} \quad (8)$$

모터 정격토크 22Nm으로 구동했을 때 (8)에 따라 계산된 차량의 가속도는 $1.6809m/s^2$ 이다. 현재 구성된 배터리는 4kWh로, SOC 100%에서 배터리의 권장 사용량인 SOC 20%까지 약 3.2kW로 주행했을 때 1시간을 주행할 수 있다. 또한 차량 최대출력은 모터 용량에 따라 20kW로 예상된다.

4.2 가속도 테스트

그림 16은 실제 정격 토크인가 시 가속도 그래프를 나타낸다. 실제로 정격 토크가 완벽히 인가되는 시간을 고려하여 4초부터 6초까지의 가속도를 계산하였다. 실제 가속도는 대략 $1.5277m/s^2$ 으로 나타났다. 이론값 $1.6089m/s^2$ 과 유사하게 나옴을 확인하였다.

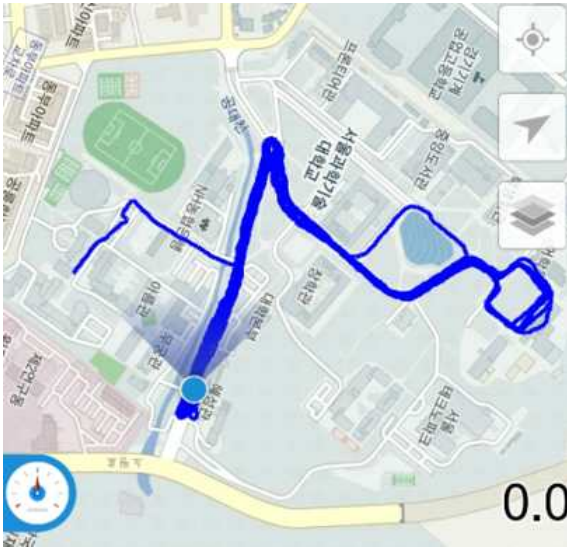


Fig. 17. EV test route.

TABLE III
TEST RESULT OF DRIVE DISTANCE

Total driving time	01 : 09 : 17
Total distance [km]	18.12
Average speed [km/h]	15.7
Maximum speed [km/h]	33.3
Total weight including passenger [kg]	440
Average output power [kW]	3

4.3 주행거리 실험

그림 17과 같이 학교 캠퍼스를 주행 사이클로 지정하고 완전 충전 시 최대 주행 거리 테스트를 실시하였다. SOC 95%를 시작으로 최대 허용 가능 범위 20%까지 구동 하였다. 평균 3kW 출력으로 구동 하였고, 테스트 결과는 표 3과 같다. 총 01: 09 : 17동안 18km를 주행 하였다. 이때 평균 속도는 15.7km/h고 최대 속도는 33.3km/h였다. 차량 주행 시 배터리 상태(Pack voltage, Pack current, Pack state of charge)는 그림 18과 같다.

개발한 차량과 상용 전기차(Soul EV)를 비교해 보았을 때, 상용 전기차는 에너지 밀도가 더 높은 리튬 이온 폴리머 배터리를 사용하며 배터리 용량은 27kWh로 개발 차량 3.2kWh 보다 8.5배 정도 높았다. 개발 차량의 배터리 출력을 27kWh까지 높인다면 배터리 무게가 늘어나지만 에너지 밀도가 더 높은 리튬이온 배터리 사용한다고 가정할 때 대략 150km정도 주행 가능할 것이라고 예측할 수 있다. 상용 전기차와 개발 차량의 주행거리를 비교한 내용은 표 4와 같다. 이때 무게는 탑승자를 제외한 무게다.

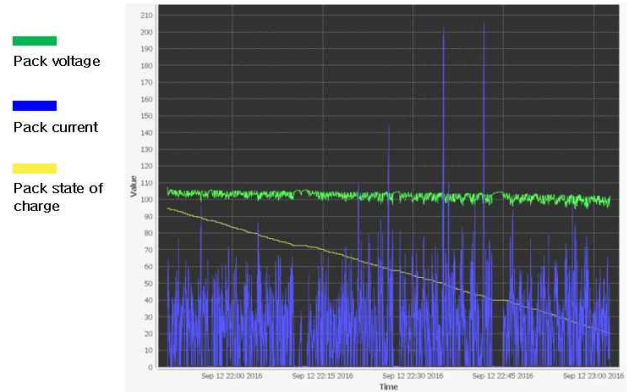


Fig. 18. Battery status during driving.

TABLE IV
COMPARING WITH COMMON ELECTRIC VEHICLE

Specifications	Commercial EV (Soul EV)	Development EV
Weight	1542 [kg]	280 [kg]
Driving distance	148 [km]	20 [km]
Battery capacity	27 [kWh]	3.2 [kWh]
Battery type	Li-Polymer	LiFePO4



Fig. 19. Maximum power/speed test using dynamo meter.

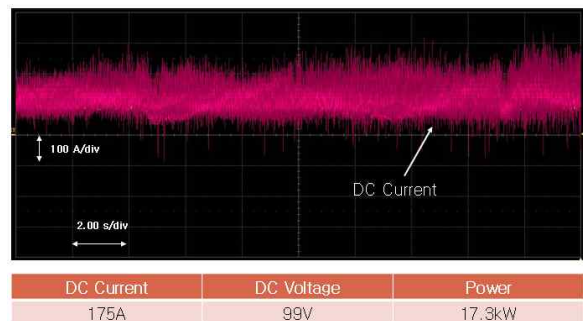


Fig. 20. Maximum power.

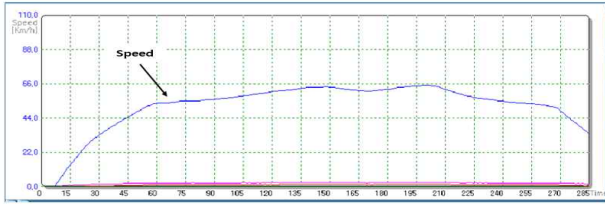


Fig. 21. Speed trajectory.

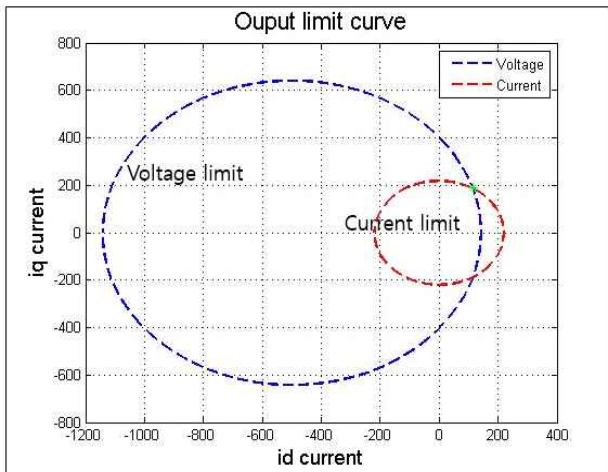


Fig. 22. Voltage/current limit circles at maximum power.

4.4 최대출력 및 최대속도 실험

차량의 최대 출력과 최대 속력을 측정하기 위해 그림 19와 같이 차대동력계를 구성하였다. 차대동력계에서는 5마력을 일정과위로 부하가 인가된다. 실험 결과 차량의 최대 출력은 그림 20과 같이 17.3kW, 최대 속력은 그림 21과 같이 61.42km/h의 성능을 보였다.

차량의 최대 출력일 때 예측한 전압 제한 원과 전류 제한 원은 그림 22와 같다. 전압 제한 원과 전류 제한 원을 고려할 때 어느 정도 여유분이 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 모터의 방열이 되지 않는 부분과 속도가 증가하면서 파라미터가 변하는 부분을 고려할 때, 예측한 제한 원보다 전압 여유분이 부족해서 출력에 제한이 있다고 예측할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 10kW급 표면부착형 SPMSM 2개를 사용한 전기자동차용 파워트레인을 제작하고 실험용 차에 적용하여 그 성능을 검증하였다. 모터를 구동하기 위하여 레벨 인버터 시스템을 구성하고 PI 기반의 토크제어 알고리즘을 DSP TMS320F28335 프로세서 모듈을 사용하여 구현하였다. 또한 리튬인산철 배터리 셀 128개를 직병렬로 연결하고 상용 BMS(Battery Management System)를 사용하여 100V 40A의 배터리 팩을 구성하였다.

모터와 배터리 사양 및 차체 무게 등을 고려하여 제작된 전기자동차의 가속능력, 최대 속력 그리고 최대 주행거리를 이론적으로 산출해보고 실험치와 비교 검증해 보았다. 그 결과 최고시속 60km, 가속능력 $1.5277m/s^2$, 주행거리 20km로 대체로 계산된 사양과 비슷한 실험치를 얻을 수 있었다.

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었음

References

- [1] J. M. Terras, D. N. Sousa, A. Roque, and A. Neves, "Simulation of a commercial electric vehicle: Dynamic aspects and performance," *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on 30 Aug.-1 Sep. 2011*.
- [2] M. E. Baghdadi, L. D. Vroey, T. Coosemans, J. V. Mierlo, W. Foubert, and R. Jahn, "Electric vehicle performance and consumption evaluation," *Electric Vehicle Symposium and Exhibition(EVS27), 2013 World*.
- [3] M. Silva, A. P. Goncalves, J. Sousa, U. Nunes, "Modelling an electric vehicle powertrain on bench," *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*.
- [4] S. K. Kim and K. E. No, "Current domestic and foreign electric vehicle's trend and policy implication," *Science and Technology Policy*, Vol. 25, No. 3, pp. 28-37, Mar. 2015.
- [5] Y. K. Chin, and J. Soulard, "A permanent magnet synchronous motor for traction applications of electric vehicles," *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International*.
- [6] D. Fodorean, M. M. Sarranzin, C. S. Martis, J. Anthonis, and H. V. D. Auweraer, "Electromagnetic and structural analysis for a surface-mounted PMSM used for light-EV," *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 52, No. 4, pp. 2892-2899, Mar. 2016.
- [7] J. P. Trovao, P. G. Pereirinha, F. J. T. E. Ferreria, "Comparative study of different electric machines in the powertrain of a small electric vehicle," *Electric Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on 6-9 Sep. 2008*.



박성환(朴聖煥)

1991년 8월 20일생. 2015년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2017년 동 대학원 전기정보공학과 졸업(석사). 2017년~현재 (주)비츠로시스 연구원.



이정주(李政周)

1991년 2월 20일생. 2016년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2016년~현재 동 대학원 석사과정.



손종열(孫鍾烈)

1989년 4월 11일생. 2015년 서울과학기술대학교 전기정보공학과 졸업. 2015년~현재 동 대학원 석사과정.



이영일(李榮逸)

1963년 5월 16일생. 1986년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1988년 서울대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공박). 1994년~2001년 경상대 제어계측공학과 부교수. 2001년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수.