

전기자동차 추진시스템 개발

최 욱 돈

(현대중공업(주) 기전연구소 산업전자연구실 책임연구원)

1. 서 론

최근 내연기관 자동차에 의한 환경문제와 지구 온난화 현상 등 화석연료의 사용에 의해 발생하는 문제의 해결을 위한 대책의 일환으로 차세대 대체교통수단인 전기자동차 및 하이브리드 자동차의 시장 선점을 위한 실용화 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있으며 현재 일부에서는 생산, 판매단계에 접어들고 있다. 특히, 미국과 유럽은 대기보존법 제정에 의한 무공해 자동차와 저공해자동차의 보급이 의무화되고 있는 추세이며, 이에 대한 실용화 연구가 활발히 진행되고 있다.

전기자동차는 새로운 경량차체와 높은 에너지밀도의 경제성이 있는 추진용 전지와 이를 충전하기 위한 충전장치, 전지의 잔존량을 정확히 계속할 수 있는 전지관리장치, 차량 내의 각종 전원을 공급하는 보조전원장치, 내연기관 자동차의 엔진에 해당하는 구동장치인 전동기와 제어기, 감속기, 그리고 전자식 제동장치 등이 조합된 전자제어 시스템으로 여러 가지 복합적인 기술의 결정체로 그 사용목적과 용도에 따라 다양하게 분류할 수 있다. 전기자동차의 장점은 내연기관에 비해 대기오염, 소음 공해, 진동이 없고 구조가 간단하며, 조작이 용이하고, 수명이 긴 장점이 있다. 구동방식으로는 1모터 구동방식, 2모터 구동방식, 4모터 구동방식으로 나누어지며, 대개의 경우 1모터 구동방식을 적용하고 있으나, 특히 공해가 심한 도시용 승용차의 경우 출발과 정지가 빈번하므로 저속, 고토크의 소 용량 다극 영구자석형 전동기를 사용한 4모터 구동방식으로 회생효율을 높일 수 있다. 이 경우 전동기를 바퀴에 장착한 바퀴일체형 전동기(Wheel-in Motor)가 적용되고 있다. 그러나 대부분의 경우는 하나의 전동기를 사용하는 1모터 구동방식이 가장 보편적으로 사용되고 있으며, 대형버스나 셔틀버스 또는 RV의 경우 2모터 방식의 적용이 주로 사용되고 있고, 일부에서는 감속기를 사용하지 않은 1모터 직접구동방식을 적용하기도 한다.

전기자동차 추진시스템의 가장 핵심 부분이라고 할 수 있는 모터와 제어기는 일반 산업용과 달리 그 사용 환경과 운전조건이 매우 가혹하고 특히 진동과 온도 등의 변동이 심하고, 노이즈 등에 대한 내량이 커야 하며, 제어기는 전기자동차의 효율적인 운전을 위해 감속 시 회생 에너지를 추진용 전지에 충전할 수 있는 4상한 운전 특성과 정지토크 발생, 저속 운전에서부터 고속운전 영역까지 전 운전영역에서의 원활한 제어특성이 요구된다. 본 원고에서는 당사에서 개발한 전기자동차용 추진시스템의 구성과 기능별 특성을 중심으로 간단히 소개하고자 한다.

2. 전기자동차 시스템 구성

전기자동차 추진시스템은 크게 나누어 전동기, 제어기, 감속기 등으로 구성되며, 제어기의 기능으로는 구동용 전동기의 토크를 제어하는 전동기 제어장치와 전지의 충전을 위한 충전기, 충전기의 제어 및 전지잔존량(State Of Charge) 계측을 위한 전지관리장치, DC/DC컨버터, Power Steering

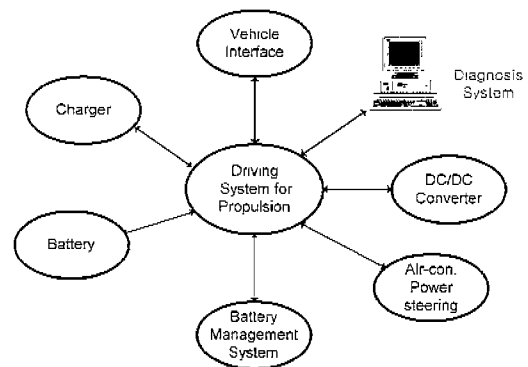


그림 1 EV 추진시스템 구성도

및 공조시스템, 고장진단장치인 모니터링 시스템 (Monitoring System) 등으로 분류되며, 제어기내 이들은 CAN통신방식에 의해 통합되어 있고 제어기와 모니터링 시스템과는 RS232C통신으로 구성되어 있다. 그림 1은 전기자동차용 추진 시스템의 구성도를 나타낸다.

2.1 전기자동차 구동시스템 개발사양

표 1은 당사에서 개발한 전기자동차용 구동시스템의 개발 사양으로 유도전동기와 제어기의 냉각방식은 수냉식이며, 전동기의 출력비가 1.0 kW/kg 이상이다. 정격용량 대비 최대출력이 4배정도로 높고 최고속도도 정격의 약 3배 정도 고속이며, 효율 또한 90% 이상으로 일반적인 산업용 전동기보다 높은 고효율을 목표로 하고 있다.

2.2 전기자동차용 전동기의 조건 및 특징

전기자동차용 전동기의 요구조건은 한번 충전으로 주행 가능한 거리를 확대하기 위해 저속에서 고속까지 전 운전 영역에서 효율이 높아야 하고, 소형, 경량으로 출력밀도가 높을 것, 넓은 속도범위에서 정출력특성을 가질 것, 고속운전이 가능할 것, 진동에 강한 기계적 구조로 수명이 길고 저속시 고토크 특성을 가질 것 등이다.

특징으로는 고속회전이 뛰어나고 정격속도와 고속에서 효율이 높고 저가이며, 기계적으로 견고하고 경량화가 가능하지만 회생효율과 저속시 효율이 떨어지므로 기계적으로 가혹

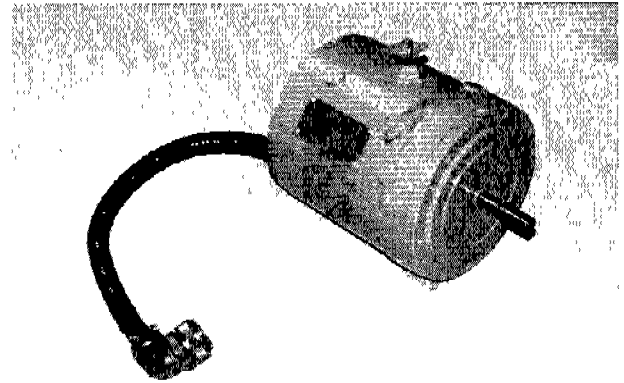


그림 2 EV 추진용 전동기

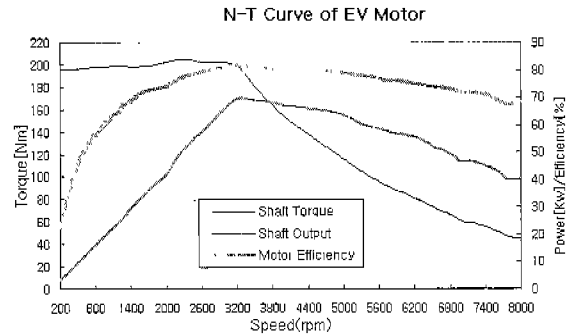


그림 3 EV용 전동기의 N-T특성

표 1 EV 구동시스템 사양

항 목	단 위	사 양	
전동기	용 량	kW	정격15 / 최대60
	출력비	kW / kg	1.0 이상
	속 도	RPM	3,600 / 10,000
	효 율	%	90 이상
	전 압	V	195
모터 제어기	용 량	kW	60
	효 율	%	95 이상
	출력비	kW / kg	1.7 이상
	입력전압	V(DC)	270~405
	냉각방식	-	수냉식
f_s	kHz	10 이상	
DC/DC Converter		kW	1.35 (13.5V 100A)
BMS	전지 수	Modules	28
	정밀도	%	Accuracy<5
충전기	용 량	kW	6.6
	출력전압	V(DC)	250~405
	충전시간	h	4
	입력전압	V(AC)	220

한 환경이나 고속운전이나 일정속도 이상의 주행에 적합한 것이다. 그림 2는 개발된 전기자동차 추진용의 수냉식 전동기로 용량 60kW, 무게 55kg 이다. 그림 3은 개발된 전동기 제어기를 이용하여 다이내모에서 측정한 구동시스템의 속도-토크 특성을 나타낸 것으로 효율, 출력, 토크가 표 1의 사양과 일치함을 알 수 있다.

2.3 전동기 제어

2.3.1 시스템 구성

전기자동차는 운전자의 가속지령에 의해 빠른 응답이 요구되므로 제어방식도 범용 인버터의 전압과 주파수 일정비 제어방식은 사용되지 않고 전동기의 고정자 전류를 자속각을 기준으로 자속성분과 토크 성분 전류로 분리하여 독립적으로 제어함으로써 순시토크 제어가 가능한 벡터 제어방식을 적용하고 있다.

그림 4는 전기자동차 구동시스템 구성도를 나타낸 것으로 공간전압 벡터PWM방식을 적용한 IGBT 인버터와 유도전동기로 구성되어 있으며, 제어기는 32비트 DSP와 Gate Array를 이용한 전 디지털방식에 의한 자속추정과

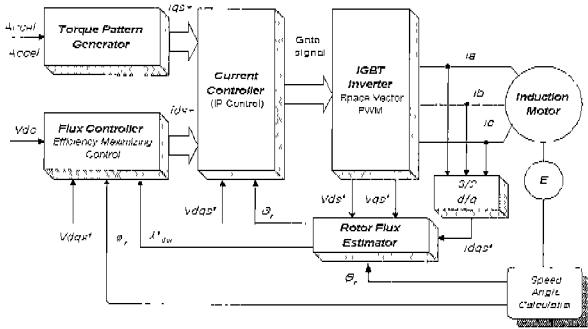


그림 4 EV 구동시스템 구성도

전류 및 자속 제어기로 구성되어 있다. 또한 PRNDL위치에 따른 회생제동 범위 설정과 가속지령에 의한 가감속시 토오크 패턴발생 알고리즘 연산, 전지의 전압에 의한 자속량과 고속운전 시 최대 토오크 출력가능 등을 구현하게 된다.

2.3.2 전동기 구동방식

전동기제어에는 직접 자속을 이용하지 않고 고정자의 토오크분 전류와 자속분 전류로부터 슬림 각속도를 계산하고 여기에 회전자 속도 센서에 의해 검출된 전동기의 회전속도를 더하여 간접적으로 자속 각도를 구하는 전향보상(Feed forward) 방식인 간접 벡터제어와 자속 센서에 의해 직접측정한 자속을 이용하거나 고정자 전압, 전류, 회전자의 속도 정보를 이용하여 간접적으로 자속을 추정하여 제어하는 직접 벡터 제어방식으로 나눌 수 있다.

간접 벡터 제어방식은 저속에서 정지토오크의 발생이 용이하고 시스템 구성이 간단한 장점이 있으나, 회전자 시정수의 변동에 영향을 받기 쉬우므로 이들에 대한 보상이 제대로 되지 않을 경우 시스템이 불안정하게 된다. 반면 직접 벡터 제어방식은 전동기의 시정수 오차에 대해 비교적 안정적이며 고성능 마이크로 프로세서에 의해 실시간으로 전동기의 모델로부터 정확한 자속을 연산 할 수 있다.

유도전동기의 모델로부터 자속에 관한 수식은 고정자 전압 방정식을 이용한 전압 모델식과 회전자의 전류 방정식을 이용한 전류모델 식으로 나타낼 수 있다. 전동기의 전압과 전류 모델에 의해 자속을 연산하는 전압모델은 전동기 상수와 독립적인 반면 저속 영역에서는 역기전력이 적은 관계로 정확성이 떨어진다. 저속 운전 영역에서는 전동기에 인가되는 전압이 작으므로 회전자속도와 고정자 전류로부터 자속을 연산하는 방법이 유용하다. 따라서 원활한 운전을 위해 전동기의 속도에 따라 두 모델을 적절히 선택하는 방법이 바람직하다. 본 연구에서는 전압과 전류모델의 이용한 페루프 자속 추정기를 적용하였다.

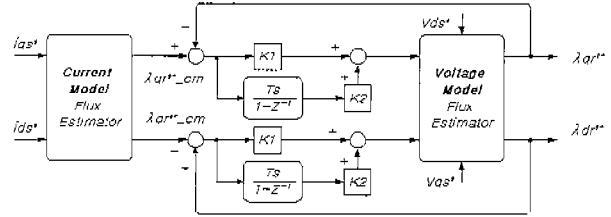


그림 5 페루프 자속 추정기

2.3.3 자속 추정

전압과 전류모델을 PI제어기로 구성하여 저속운전영역에서는 전류 모델 자속 추정기를 이용하고 고속운전영역에서는 전압모델 자속 추정기를 적용하였다. 그림 5는 페루프 자속추정기의 구성을 나타낸 것으로 간섭을 일으키는 커플링성분이 존재하지 않는 장점이 있다. 이때 설정된 PI제어기의 이득에 따라 전동기의 운전주파수가 제어기의 대역폭 보다 낮을 경우는 전류모델에서 연산된 자속이 제어기를 통과하게 되고 운전주파수가 제어기의 대역폭보다 높을 경우는 전압모델에서 연산된 자속이 우세하게 되어 자속추정기의 출력을 결정하게 된다. 자속추정기의 샘플링 주기는 100μsec로 하였으며, 두 모델간의 천이주파수의 결정은 제어기의 이득 k1, k2의 대역폭에 의해 정해진다. 개발품의 천이주파수는 60Hz로 하였다.

2.3.4 전력회로의 구성

구동장치의 전력회로는 전동기의 용량과 효율, 과부하율, 리플을 등을 고려하여 소자의 용량을 선정하였다. 그림 6은 전기자동차용 수냉식 IGBT 인버터 전력회로로 소자의 과열 보호와 전류검출기능을 가지고 있으며, 그림 7은 그림 6의 IGBT의 게이트 구동부로 과전류 보호회로, 제어전원 감시회로와 6개의 독립된 IGBT구동용 전원회로로 구성된 게이트 구동용 보드이다.

그림 7은 개발된 IGBT 게이트 구동회로인 GDU(Gate

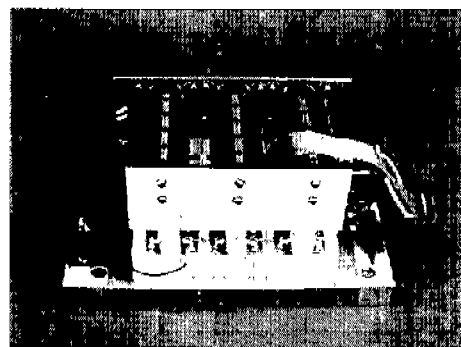


그림 6 IGBT Stack

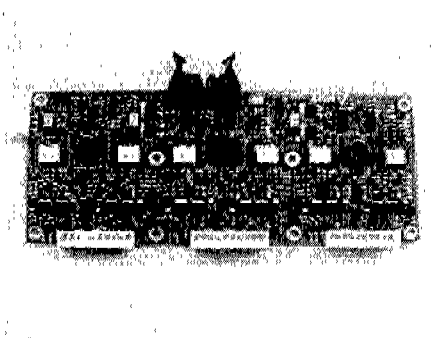


그림 7 Gate Drive Unit

Drive Unit)보드이며, 그림 8은 전동기 제어용 MCU(Motor Control Unit)로 전동기 제어 알고리즘과 엔코더 인터페이스 그리고 MCU의 상위인 차량 제어장치인 VCU(Vehicle Control Unit)와의 CAN통신 기능이 구현되어 있고 DSP와 Gate Array 로 구성된 전동기 제어기능을 가지고 있다. 그림 8은 차량과의 인터페이스와 차량 제어기능을 구현하고 RS232C 통신과 PC에 의해 차량의 고장정보와 제어기내의 파라미터등을 감시하고 정보를 저장할 수 있는 기능을 가진 VCU(Vehicle Control Unit)이다.

2.4 충전 시스템

2.4.1 충전기 전력회로 구성

전기자동차용 탑재형 충전기는 급속충전 용이 아니라 가정이나, 상용전원을 이용하여 전지를 충전하는 것이 주목적이다. 따라서 충전시간의 단축 측면보다는 탑재형이기 때문에 장치의 소형 경량화, 저소음화, 고효율화가 가장 중요한 요구 조건이다. 이를 충족시키기 위한 충전기의 제어 topology는 고주파 스위칭에 의한 경량화와 이에 따른 전자파 장애를 동시에 해결할 수 있는 방법으로 역률보정기능(Power Factor Correction)을 가지고 입력전원과 전지간의 절연이 가능한 무손실 스너버를 이용한 승압형 AC/DC Full Bridge Boost 컨버터가 제안되고 있다. 그림 8은 개발된 충전기 전력회로 구성도이고 표 2는 충전기 사양이다.

입력 1차단은 다이오드 브리지와 승압 인덕터(Lb) , 무손

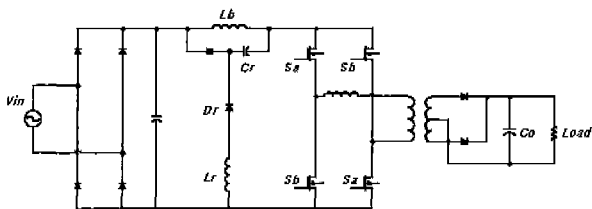


그림 8 EV용 충전기 전력회로

표 2 충전기 사양 및 설계 파라미터

항목	범위	비고
입력 전압	170 ~ 270 Vac	단상
출력 전압	300 ~ 450 Vdc	
용량	6.6kW	220V/30A
스위칭 주파수	92kHz	MOSFET
Design Parameters		
Boost Inductor (L _b)		220uH
Snubber Capacitor (C _s)		20nF
Snubber Inductor (L _r)		3.58uH
Output Capacitor (C _o)		2700μF

실 스너버로 이루어져 있고 절연 고주파 변압기를 거친 2차단은 캐패시터와 부하로 쓰이는 battery로 이루어져 있다. 여기서 무손실 스너버는 기존의 RCD 스너버대신 스너버 캐패시터 1개와 2개의 스너버 다이오드 그리고 1개의 스너버 인덕터로 구성되어 있다.

2.4.2 충전기 제어 구성

BMS에서 전지의 상태를 측정하면서 충전 기준전압을 발생하여 PWM제어기의 전압 오차보상기의 입력으로 쓰인다. 그리고 전압 오차보상기를 거친 신호를 입력전압과 동상인 정현파와 곱하면 입력 전류 기준신호가 생성이 된다. 따라서 이 신호는 입력전류와 비교하여 전류 제어를 거쳐 PWM신호를 생성하여 컨버터의 게이트 신호로 쓰이게 된다. 즉 본 제어기의 특징은 입력 전압과 전류를 동상으로 만들 수 있고 출력전압을 동시에 제어할 수 있는 장점이 있다. 그림 9는 충전기의 제어 구성도이다.

그림 10은 모의실험으로 장치의 역률보정결과를 보기 위해 입력 전압과 입력 전류를 나타내는 것으로 전압과 전류의 위상이 정확히 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 11은 시제품에서 실측한 입력전압과 전류의 파형으로 모의실험 결과와 동일하게 거의 단위 역률 제어가 됨을 볼 수 있고 전압과 전류의 파형이다. 모의실험과 마찬가지로 실험에서도 거의 단위역률을 이루는 것을 볼 수 있고 전

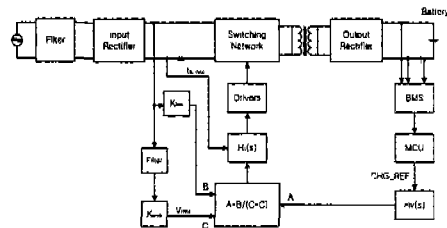


그림 9 충전기의 제어 구성도

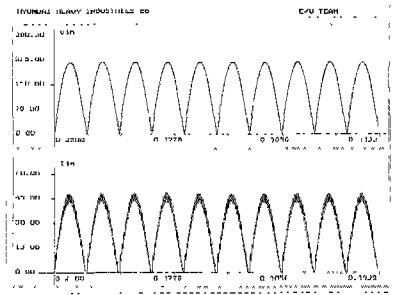


그림 10 입력전압과 전류파형 (모의시험 결과)

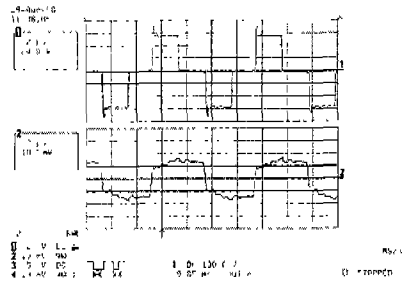


그림13 보조전원장치 특성

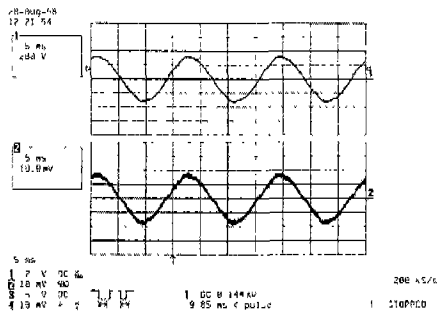


그림 11 입력전압과 전류파형 (충전기의 역을 측정결과)

류왜곡률(THD)은 7.8% 정도로 거의 정현파 임을 알 수 있다.

2.5 보조전원장치

보조전원장치는 전기자동차의 제어기와 power steering 등 시스템 제어 및 차량에 사용되는 전원을 공급하기 위한 전력 변환장치로 DC/DC 컨버터라고 한다.

그림 12는 개발된 13.5V/100A 용량의 전기자동차 보조전원장치이며 그림 13은 보조전원 장치의 동작 시 변압기의 전압과 전류 파형을 나타낸 것으로 소형 경량화를 위해서 고주파 스위칭 방식의 손실저감을 위한 제어기법을 적용하였다.

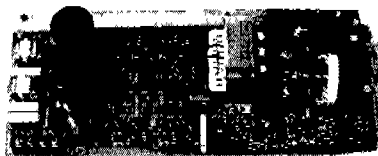


그림 12 보조전원장치

2.6 전지관리장치

2.6.1 전지관리장치의 기능

전기자동차용 전지의 잔존량을 측정하는 전지관리장치는 물리적으로 측정 가능한 전지의 전압, 전류, 온도 등을 측정하여 전지의 충전과 방전 시 잔존량 계측과, 온도제어, 상태 감시를 통해 전지의 수명을 연장하고 제어장치 및 충전기와 통신을 통하여 충, 방전 시 전지보호, 주행거리 예측 등 시스템의 안전한 운전환경을 제공하는 장치로 요구조건은 실시간 SOC 연산과 전지보호기능을 가지며, 고정도(Accuracy)일 것, 소형 경량이며, 온도, 습도, 진동에 견디고, 설치가 용이할 것, 전력소모가 적고, 수명이 길며 전지의 History 저장 기능과 전압, 전류의 Calibration기능, 전지 Parameter 저장이 가능, PC와 제어기, 충전기와의 통신기능을 가질 것 (CAN, RS232C) 등이며 주요 기능은 다음과 같다.

- Charging Control(CP, CC, CV, Equalization)
- Calculation of SOC(State-of-Charge)
- Battery Thermal Control(Cooling Control)
- Battery Power Limiting Control(Protection)
- Battery Diagnosis(Battery Failure Sensing)
- Battery Operating History Management

Standard Information			
Task1	0 Fail2	0 Fail3	0
Warn1	0 Warn2	0 Warn3	0
Mode_Combat	0 Mode_Operation	10 SOC_avg	57.79
SOC_max	52.24 SOC_max_number	0.00 SOC_min	52.24
Tavg	25 Tavg1	25 Tavg2	25
Temp_number	0 Tmax	25 Tmin_number	0
Tmax	25 T10	25 T11	25
T12	25 T13	25 T14	25
T15	25 T16	25 T17	25
T18	25 T19	25 T110	25
T111	25 Vavg	15.48 Vmax_number	191
Vmax	15.52 Vmin	15.45 J_Battery	0.0/6
Vmax1	418.52 V10	15.47 V11	15.48
V12	15.47 V13	15.47 V14	15.48
V15	15.45 V16	15.52 V17	15.50
V18	15.51 V19	15.48 V110	15.48
V111	15.48 V112	15.48 V113	15.48
V114	15.47 V115	15.52 V116	15.45
V117	15.47 V118	15.45 V119	15.53
V120	15.48 V121	15.45 V122	0.00
V123	0.00 V124	0.00 V125	0.00
V126	0.00 ap_time	25 HBMS_Stat	1001010100110010
HT1_Stat	0 Motor_Temperature	0 Motor_RPM	0
Voltage_Speed	0 T_Chg_Ah	0 T_Disch_Ah	0
Counter	0	SOC_max_number	6

그림 14 BMS 모니터링 화면

- Communication(CAN, RS232C)

3. 시험결과

그림 14는 BMS의 상태를 감시할 수 있는 display 화면이다. 전지의 S.O.C, Ah, 모돌간 전압과 전류 표시 그리고 전지 온도를 표시하는 기능이 포함되어 있다.

2.6.2 전지관리장치의 구조

그림 15는 BMS H/W 구성도이고, 제어기는 AD컨버터가 내장된 16비트 마이크로프로세서를 이용하였으며 CAN과 RS232C 통신이 가능하도록 구성되어 있다.

그림 16은 개발된 전기자동차용 전지관리장치의 실물 사진이며, 그림 17은 개발된 BMS의 환경시험 결과로 온도변화가 큰 항온조에서 시험한 결과로 28개 전지모듈의 전압 검출시험 결과를 나타낸 것으로 온도의 변화에 관계없이 전지의 각 모듈 전압이 약 12.5V로 일정하게 검출되고 있음을 볼 수 있다.

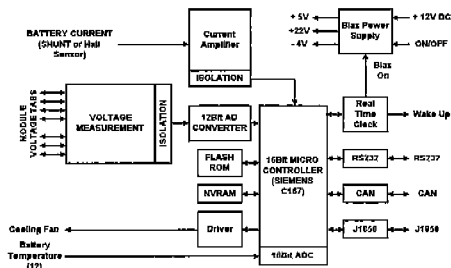


그림 15 BMS H/W 구성도

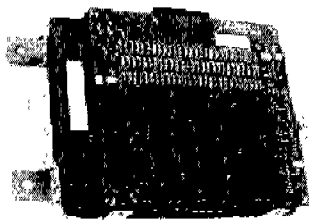


그림 16 BMS 개발품 사진

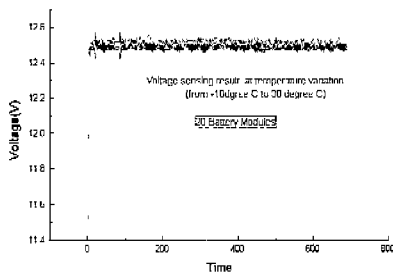


그림 17 BMS 전압검출 시험결과

3.1 추진시스템의 가감속 특성

개발된 추진 시스템은 전동기와 제어기 및 추진용 전지를 이용하여 부하 시험과 차량의 특성에 맞는 각종 특성 시험을 실시하였다.

그림 18은 가감속시 전지의 전압(Ch1)과 전류(Ch2)를 측정 한 것으로 가속시는 전지의 전압이 감소하고, 감속시는 회생제동에 의해 전지의 전압이 상승함을 알 수 있다. 이때 전지의 잔존량과 회생제동의 량에 따라 전압과 전류의 크기가 달라지게 된다. 그림 19는 개발된 전기자동차용 제어기를 보 이고 있다.

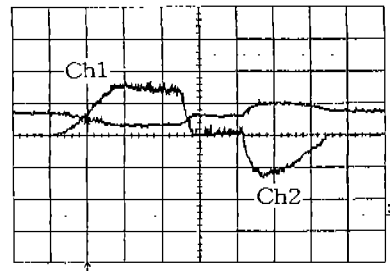


그림 18 가감속시 전지전압 및 전류파형

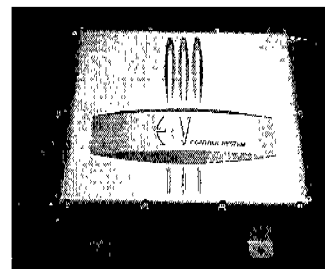


그림 19 개발된 제어기

3.2 주행성능 시험

그림 20은 당사에서 개발된 추진시스템을 장착한 전기자동차

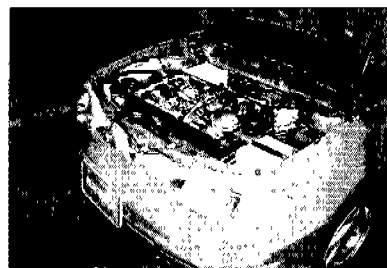


그림 20 개발된 전기자동차

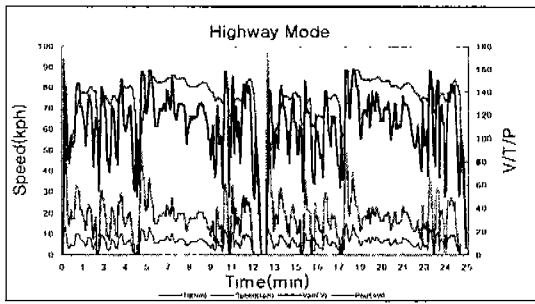


그림 21 EV주행시험결과(개발시스템 적용)

차의 실물사진으로 엔진룸에 개발된 추진시스템이 장착되어 있음을 볼 수 있다.

그림 21은 제작된 전기자동차를 Chassis Dynamo를 이용하여 고속주행모드로 시험한 결과를 나타낸 것이다.

3.3 자기진단 시스템

그림 22는 전기자동차용 추진시스템의 고장진단과 제어기의 각종 파라미터 설정 및 운전 중 측정된 정보를 RS232C통신으로 PC를 통해 저장 및 실시간으로 차량의 속도, 전지의 전압, 전류, 토오크, SOC, Ah 등 여러 가지의 기능을 그래픽과 문자로 감시할 수 있는 자기진단 시스템의 화면을 나타내고 있다.

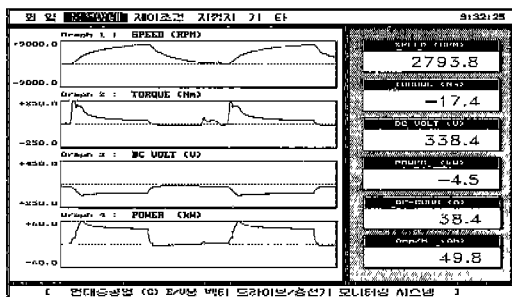


그림 22 자기진단 시스템의 그래픽 화면

4. 결 론

본 원고에서는 지금까지 당사에서 개발한 전기자동차용 추진시스템의 구성과 기능별 특성을 중심으로 간단히 소개하였다. 특히 전기자동차용 추진시스템에는 고효율 경량화가 필수적이므로 이를 위해 반도체의 고속 스위칭 기술과 손실저감을 위한 영전압 스위칭 기술, 전동기의 고효율 운전, 전지의 정확한 잔존량 예측을 위한 기술 등 다양하고 복잡한 기술

들이 적용되었다. 향후 무공해 자동차나 초 저공해 자동차인 하이브리드 전기자동차와 같은 환경 친화적인 자동차의 개발이 시장 경쟁력의 척도가 되고 있으며, 따라서 이들 관련 기술은 날로 발전할 것으로 예상된다. 또한 전기자동차의 핵심 부분인 추진시스템의 기술개발이 새로운 시장창출을 위한 열쇠가 되고 있다. 국내에서도 이러한 세계적인 추세에 맞게 꾸준한 기술개발이 필요할 것으로 생각되며 앞으로 당사에서 개발된 기술을 바탕으로 신뢰성 있는 제품이 될 수 있도록 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 최옥돈 외 Proceedings of KIEE. Vol. 47, No.5, May 1998 "전기자동차용 전동기의 기술개발 동향"
- [2] 최옥돈 외 "경량모터 및 제어기 개발" Nov. 1998 년차 보고서
- [3] U.D. Choi Proceedings of EVS13. Vol. II, pp 537-543 Oct. 1996
- [4] 최옥돈 외 "전기자동차 충전기용 단상 AC/DC Full Bridge Boost Converter 기술적용" 추계전력전자학술대회, pp 57-60, 1999
- [5] 今井孝二 외, "전기자동차용 파워일렉트로닉스의 現況과 動向", 電學論 D,116卷 3, pp 233-244, 1996
- [6] 高橋 勳 외, "전기자동차용 전동기와 구동시스템의 現況", 電學論 D,116卷 11, pp 1091-1102, 1996
- [7] C.C.Chan, and K.T. Chau, "An overview of power electronics in electric vehicles", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.44, No. 1, pp. 3-13, Feb., 1997

< 저 자 소 개 >



최옥돈(崔旭惇)

1955년 1월26일생. 1983년 영남대 공대 전기공학 학과 졸업. 1985년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 박사 수료. 1985년 ~현재 현대중공업 기전연구소 산업전자연구실 책임연구원. EV전장 팀장. 당 학회 평의원.