

특집 : 전기 추진 시스템(I) - 전기자동차

1인승 전기자동차 개발 사례

신규재*, 차현록**, 서영주***

(*순천제일대학 교수, **한국생산기술연구원 선임연구원, ***에스알시 대표이사)

전기자동차 산업은 석유고갈과 지구환경 문제에 대한 해결 방안으로 국내외에서는 전기차량의 개발에 매진하고 있다. 특히 1인승 전기자동차는 현대사회의 복잡한 도심과 개인용 이송수단으로 유럽에서 주목 받고 있으며, 배터리 가격과 충전 인프라 구축 등의 문제로 인하여 근거리용 전기자동차의 상용화 개발이 적극적으로 추진되고 있다. 본 고에서는 호남 광역경제권 선도산업지원단 지원으로 추진중인 에스알시(주) 1인승 전기자동차의 개발 현황과 원천기술에 대해서 소개하고자 한다.

1. 서론

지구의 온난화 및 대기 환경 보호와 화석연료 부족 등과 같은 문제에 대한 대안으로 전기자동차의 필요성이 대두되고 있다. 복잡한 도심에서의 이송수단과 노령 및 여성 운전자들의 증가 추세로 인하여 편리성과 안정성이 향상된 전기자동차에 대한 연구개발 및 상용화가 추진되고 있다.^{[1]-[3]} 또한 운전의 안전성과 도심주행의 편리성을 확보하기 위하여 1인승 전기자동차 구조에 대한 연구가 진행되고 있다. 3륜 전기차량은 정3륜과 역3륜 구조로 분류되고, 정3륜 차체는 급선회 운전 시에 차량전복이 될 수 있으며 급제동 시에는 후륜의 미끄러움이 발생할 수 있다. 역3륜 차체는 전륜 톨딩 조향장치로 선회 시에 안정적인 조향이 가능하며 급제동 시에 4륜과 동일한 안정된 제동이 가능하다.

본 고에서는 이러한 신개념의 역3륜 차체구조와 톨딩기능을 가지는 조향장치, 인휠 형태의 주행용 BLDC 전동기와 CRPWM-VSI(Current Regulated Pulse Width Modulation Voltage Source Inverter)에 대한 개발현황 및 원천기술을 소개한다. 주행용 전동기와 인버터 설계기술은 전기차량을 설계하는데 있어서 중요한 역할을 수행하게 된

다. 전기자동차의 전력전자기술은 부품의 출력밀도 향상과 악천후의 운전환경 속에서도 내구성 확보를 위하여 매우 중요한 요구사항이며, 이를 만족시키기 위하여 기존 산업계에 적용되고 있는 전력전자기술과 함께 새로운 측면에서의 기술적 성능향상에 대한 연구가 필요하다.^{[4][5]}

2. 1인승 전기자동차

2.1 1인승 전기자동차 구성

설계된 1인승 전기자동차는 주행속도 80Km/H, 1회 충전 주행거리는 100Km이며 등판각도는 20° 이내이다(표 1). 또한 최소 회전반경과 선회운전 시에 안정성을 제공하기 위한 역3륜 차체 구조와 톨딩 조향장치 및 현가장치, 전기차량의 필요 전원을 공급하는 DC/DC 컨버터, 운전자 조작판넬 동작과 주행모터의 속도제어를 구현하는 MCU, 인휠형태의 주행용 BLDCM과 유압식 브레이크 및 배터리 등으로 구성되어 있다(그림 1).

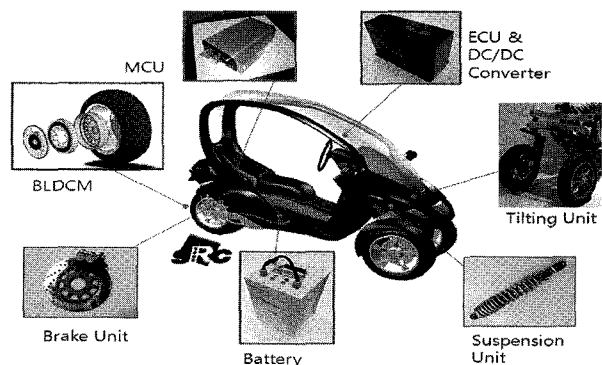


그림 1 1인승 전기자동차 구성도

표 1 BLDCM 설계목록표

항 목	목표성능
주행속도	80 Km/h
주행거리(1회 충전시)	100 Km
최소회전반경	5 m 이내
차량 등판각도	20°
최대적재량	100 Kg
제동방법	유압식(보조:기계식)
주행모터 정격출력	BLDCM 3KW
기본 배터리	72V, 80Ah
충전시간(80%충전)	4시간이내

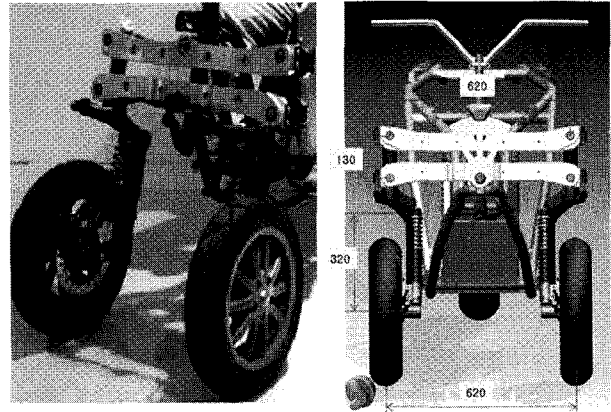


그림 2 틸팅기능을 가지는 조향장치

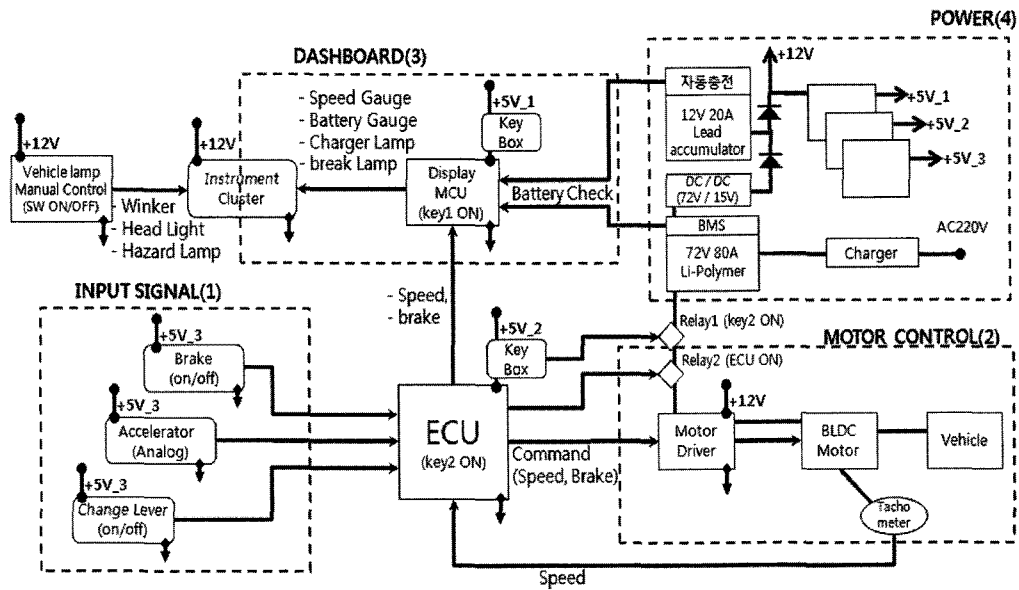


그림 3 전기제어장치 구성

2.2 조향장치

1인승 전기자동차의 에너지 효율은 주행모터와 인버터의 동력전달장치와 함께 차량중량 및 운전저항 등과 같은 차량 측면의 요소에 대해서도 영향을 받는다. 또한 차량 중량 저감을 위해 차체, 사시, 전장 부품, 후드, 휠, 시트 등의 제작 시 알루미늄과 경량 소재가 적용되었다. 특히 조향장치는 선회 운전 시에 운전자의 안전을 보장하기 위하여 틸팅 기능을 가지는 조향장치 설계에 의하여 구현될 수 있으며 추차적으로 차체 중심축에 대한 동적 해석이 필요하다(그림 2). 설계된 차량은 전폭 620mm, 링크 서스펜션 가변제어방식의 틸팅장치를 설계하였고, 틸팅 고정장치는 유압 디스크를 적용하여 정차 시에는 자동 잠김 기능을 수행하게 된다. 설계 제작된

조향장치를 이용하여 회전반경을 시험할 결과, 최소 회전반경 5m를 만족하고, 급선회 운전 시에도 안정된 코너링 운전이 가능하다.

2.3 전기 제어장치

ECU는 차량, 운전자, 엔진, 배터리 등으로부터 신호를 입력받아 차량에 탑재된 전장장치인 대쉬보드, 가속 페달, 브레이크의 입력장치와 전원공급장치 전반을 통합제어한다. 또한 가속페달의 속도명령 신호에 의하여 운전 동작모드를 결정하고 모터 제어기(MCU)로 주행속도지령을 전달함으로써 전기차량의 안정되고 고효력의 주행속도를 제어하게 된다(그림 3).

전원공급장치는 AC/DC 충전기를 탑재하여 72V, 80A 리튬-폴리머 배터리에 급속 충전이 가능하며, 충전전류를 계측하여 과충전 또는 과전류를 제어하여 전기차량 의 전장장치 및 ECU와 MCU에 필요한 전력을 공급하게 된다.

MCU는 16비트 마이크로프로세서이며 ADC 8채널과 DAC 4채널을 기반으로 설계되었으며, 3KW 주행용 BLDCM의 상전류검출에 의한 속도제어 알고리즘 구현함으로써 속응성과 고토크 응답이 가능한 벡터 제어기법이 적용된다. 또한 상전류 검출에 의하여 회전자 의 위치각을 산출하고 d-q변환기의 D축과 q축 전류제어기에 의하여 상전류지령을 발생하고 PID 히스테리시스 제어기를 이용하여 상전류 지령값을 추종함으로써 다양한 도로와 노면 조건에서도 안정된 속도제어가 가능하다.

3. 주행 장치기술

3.1 고성능/고효율 주행용 BLDCM

1인승 전기자동차는 제한된 공간에서 고출력을 요구하기 때문에 고성능 및 고효율 전동기 설계가 필수적이다. 본 연구에서 진행된 주행용 BLDC 모터에 대한 제작 설계사양은 표 2와 같다.

특히 BLDCM은 In Wheel형 구조로이 휠내부에 장착되는 외전형 구조로써 디스크 형태의 제동장치와 타이어 일체형

표 2 BLDCM 제작 설계 사양

Number of slot		27
Number of poles		32
Power Supply	Excitation	Three-Phase DC
	Voltage	72 V
	Current	80 A
Coil	Winding	Concentrated winding
	Turns	14 Turn/Slot X 7
	Resistance	2e-3 ohm/phase
Connection pattern	Wye connection	
Coil heat resistance	180 °C	
Rotation speed	Constant : 900 rpm	
Stator core (Outer size)	Diameter 227.6 mm, stack length 70 mm	
Rotor core (Outer size)	Diameter 272 mm, stack length 70 mm	
Material	electrical sheet	S-18 0.35t
	Magnet	NdFeB 45SH
Gap length	0.7 mm	

동력장치를 구성할 수 있다(그림 4). 또한 높은 기동토크, 향상된 정출력 구간, 높은 운전속도 등의 특성으로 인하여 1인승 전기자동차의 설계 요구조건을 충족시킬 수 있도록 설계된다. 또한 저속도 구간에서 고토크 출력을 얻기 위하여 외전형 BLDCM을 설계하고 32극 27슬롯으로 제작함으로써 0.113(Nm)로 토크리플 저감할 수 있다. 특히 고정자와 회전자 설계 시 코깅 토크 및 토크리플에 영향을 주는 요소를 분석하여 고정자의 슬롯오픈과 슬롯치, 로터 자석길이와 공극간 자석위치를 최적화 설계가 진행된다.

BLDCM의 고정자 설계 주요인자로써 그림 5(a)에서 슬롯오픈과 슬롯치 두께를 선정함에 있어 슬롯 오픈과 슬롯치 두께가 증가할수록 출력이 증가하고 그림 5(b)에서 슬롯 오픈이 클수록 코깅토크가 증가하며 슬롯치 두께가 증가 할수록 코깅토크가 감소함을 확인할 수 있다. 또한 BLDCM의 회전

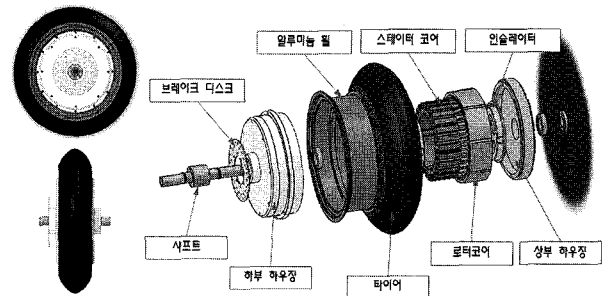


그림 4 인휠형 BLDCM를 탑재한 동력장치

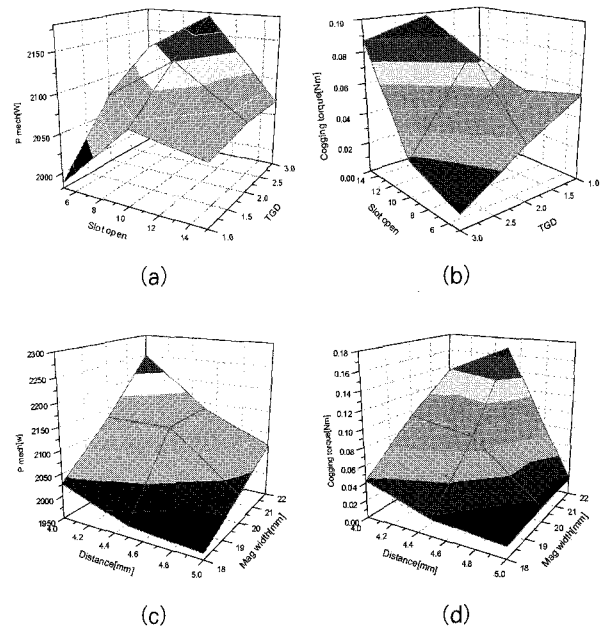


그림 5 BLDCM의 최적화설계

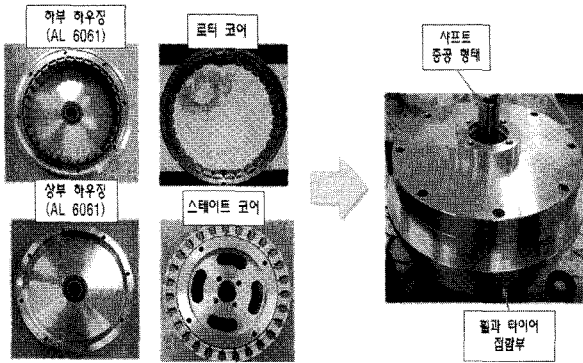


그림 6 제작된 BLDCM(32극 27슬롯)

표 3 BLDCM 설계결과

설계 항목	설계 목표	설계 결과
정격 속도	900[rpm]	900[rpm]
구동 토크	15[Nm]	34.404[Nm]
효율	82[%]	88[%]
출력	2[kw]	3.24[kw]
코깅토크	- [Nm]	0.1132[Nm]
토크리플	- [%]	1.87[%]

자 설계 주요인자로서 그림 5(c)(d)에서 공극간 자석길이가 증가할수록 출력 및 코깅토크가 감소하고 자석길이가 증가할수록 출력 및 코깅토크가 감소하므로 코깅토크와 토크리플 감소를 위해 탐색된 인자의 최적화를 통하여 3KW 주행용 BLDCM이 설계 제작되었다(그림 6).

특히 과전류에 의하여 제한된 공간내에서 발생할 수 있는 전동기 절연 파괴 등의 문제에 대한 온도 안정성을 보장하기 위해서 냉각 운전 설계도 필요하다.

3.2 3상 CRPWM VSI

인버터는 주행 속도제어 시스템의 전력 변환부(Power conversion part)를 구성하고, 배터리에서 공급된 DC 입력 전압을 주행속도의 주파수와 토크 전류를 제어하여 3상 AC 출력전압으로 변환하여 BLDCM 부하에 공급해 주는 역할을 담당한다.

인버터는 전원의 형태에 따라 전압원 인버터(Voltage Source Inverter)와 전류원 인버터(Current Source Inverter)로 분류할 수 있는데, 전류원 인버터는 전류를 직접 제어함으로써 토크 제어가 용이하고 단락사고에 대해 안전한 장점이 있으나, 큰 인덕턴스를 사용하므로 부피가 크고 제어회로가 복잡한 단점이 있으며, 이에 비해 전압원 인버터는 부피가 작고 구조가 간단하여 제어가 쉬운 장점이 있다.

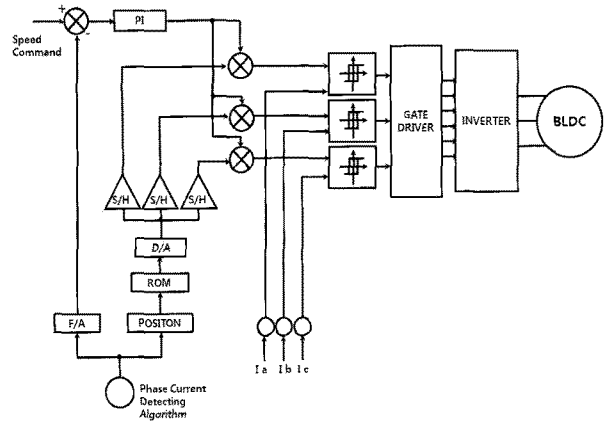


그림 7 3상 CR PWM VSI 블록다이아그램

표 4 인버터 설계 사양

Type	Voltage source inverter
Rated. Power	3KW @900rpm
Operating voltage	72Vdc
Cooling	Forced air
Size[mm]	265×205×170

주행용 BLDCM은 자계 해석에 의한 벡터제어에 의하여 직접 전동기의 상전류를 제어함으로써 원하는 토크 특성을 이끌어 낸다. 따라서 전류원 인버터를 사용하여 상전류를 제어할 수 있다. 그러나, 종래의 직류 전동기와 마찬가지로 응답특성이 빠른 BLDCM의 드라이버는 무엇보다도 속응성이 요구되므로 인덕턴스에 흐르는 전류의 통로를 바꾸어 전류를 제어하는 전류원 인버터는 속응성에 제한을 받는다. 그러므로 본 연구개발의 BLDC 드라이버는 CRPWM-VSI를 채택한다.^{[6], [7]}

그림 7과 같은 CRPWM-VSI의 기본적인 구조는 전압원 인버터이면서 상전류를 계속하여 실시간으로 전류의 오차분에 대하여 전력용 MOSFET를 적절히 스위칭함으로써, 속도지령값에 추종하는 전류를 부하에 공급함으로써 속응성이 우수하다. 작은 오차범위 내에서 상전류가 기준 전류명령을 추종하기 위하여 스위칭 주파수는 높아지므로 CRPWM-VSI의 전력용 스위칭 소자는 동작 스위칭 주파수는 높은 자가 소호형 스위칭 소자이어야 한다. 여기에는 GTO, BJT, MOSFET, IGBT등의 소자들이 있으며, 본 연구에서는 가장 스위칭 특성이 양호한 MOS-FET를 전력용 스위칭 소자로 선정한다. MOSFET 인버터는 스위칭시간이 다른 형태의 인버터에 비하여 무시할 수 있을 만큼 작고, 고속 구간에서 상전류를 펄스변조 제어를 수행함으로써 다양한 속도제어 알

고리즘을 적용하기가 용이하다.

1인승 전기차량의 주행 구동모터 정격은 3KW, 900rpm이며, 모터의 역행 및 회생을 위하여 2상한 운전제어가 구현된다. 출력 토크의 상전류 순시제어를 위하여 BLDCM 내부에 홀센서가 적용되었고 안정된 속도제어를 위하여 고신뢰성과 강인성을 가진 타코미터가 적용되었다. 또한 인버터 보호를 위하여 전력용 스위칭 모듈 및 인버터 온도를 실시간으로 감시하여 강제 공기 순환형태의 냉각을 실시한다.

4. 결론

본 고에서는 에스알시(주)의 1인승 전기자동차 개발에 있어 핵심인 차량설계 기술과 주행용 BLDCM 및 전력전자기술에 대하여 개발사례를 기술하였다. 설계제안된 1인승 전기자동차는 운전자의 안전을 보장하고 승차감 향상을 위하여 역 3륜형태의 차체와 틸팅기능을 가지는 조향장치가 적용되었고, 차량의 주행력 확보를 위한인휠형 BLDCM 및 3상 CRPWM형 전압제어형 인버터와 DC/DC 컨버터 등이 연구개발되었다. 에스알시(주)는 본 전기차량 연구 개발을 통하여 성능 향상 및 시장 경쟁력 확보에 노력을 경주하고 있으며, 생산 원가 절감과 양산 기술 확보에 주력하고 있다. ■

참고 문헌

- [1] 최전, "국산 전기자동차 개발현황과 전망," 대한전기협회, 전기저널, 2010. 11.
- [2] 이기상, "Present and Future Technology of Green Car In Korea," Electric Vehicle International Symposium, pp. 1-14, Sep. 2010.
- [3] HEV Market Report 2005.
- [4] 이상준, "Introduction of Development Status for Electric Vehicle Inverter and Its key Components," Electric Vehicle International Symposium, pp. 111-126, Sep. 2010.
- [5] 정후용, 이형석, "Control Strategy Development for Belt-Driven ISG(Integrated starter generator)

System applied to the Parallel Hybrid Vehicle," 한국 자동차공학회 Symposium, pp. 24-36, 2007.

- [6] 이재혁, 이정효, 원충연, "2 Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter for Inverter of Variable DC-Link Voltage using on Electric Vehicle," 전력전자학술대회 논문집, pp. 25-26, 2010. 7.
- [7] 안성찬, 송중환, "A New Voltage Control Method in CRPWM for Improving Distortion and Efficiency at Load Side," 대한전기학회 학술대회 논문집, Vol. 1992, No. 7, pp. 1104-1107, 1992.

〈필자 소개〉



신규재(申奎宰)

1962년 12월 7일생. 1985년 원광대 공과대학 졸업. 1988년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년~1997년 동명중공업 기술연구소 선임연구원. 1997년~현재 순천제일대학 전기자동차과 교수.



차현록(車賢錄)

1974년 4월 25일생. 1998년 전남대 공과대학 졸업. 2000년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동경공업대학 물리정보응용 졸업(공학박사). 2000년~2004년 삼성광전자 기술연구소 선임연구원. 2007년 동경공업대, 정밀공학연구소 준객원연구원. 2004년~현재 한국생산기술연구원 선임연구원.



서영주(徐泳柱)

1968년 2월 13일생. 1993년 인하대 공과대학 기계공학과 졸업. 1993년 삼성항공 연구원. 2006년~현재 에스알시(주) 대표이사. 2008년~현재 한국로봇산업협회 이사.