

연료전지차용 전기구동시스템 개발

김 재광¹⁾, 이 현동²⁾, 유 기호³⁾, 임 태원⁴⁾

Development of Electric Drive system for Fuel Cell Electric Vehicle

Jaekwang Kim, Hyeoundong Lee, Kiho Yoo, Taewon Lim

Key words : Fuel cell electric vehicle(연료전지차), Electric drive system(전기구동시스템), Motor(모터), Inverter(인버터), DC/DC Converter(직류변환장치)

Abstract : Hyundai Motor Company has made an effort to develop fuel cell electric vehicle and its subsystem in recent years. This paper deal with the development of electric drive system applied to Hyundai's fuel cell electric vehicle. This system is composed of three main components such as motor, inverter and DC/DC converter. The specifications of each system is introduced briefly and experimental result of its main components is presented. In addition, we introduce the development status of power semiconductor device, film capacitor, inductor and permanent magnet.

subscript

FCEV : Fuel cell electric vehicle

1. 서 론

기후협약에 따른 온실가스 감축 규정을 담은 교토의정서 등의 예에서도 볼 수 있듯이 친환경 사회구축을 위한 세계 각국의 노력이 이어지고 있으며 자동차 분야도 예외일 수 없다. 이러한 요구에 부응하여 선진 자동차업체들과 유수의 연구기관들은 친환경자동차의 최종 목표로 인식되고 있는 연료전지차 개발을 진행하고 있으며 주요 구성 요소인 연료전지시스템, 보조전원시스템 등과 더불어 전기구동시스템에 대한 연구에도 박차를 가하고 있다. 현대자동차도 1990년대부터 시작되었던 전기자동차 개발을 시초로 친환경 자동차 개발을 추진 중에 있으며 2000년대에 들어서 주요 시스템 및 부품에 대한 국산화 개발 등을 통해 친환경자동차 개발에 적극적으로 대응하고 있다. 연료전지 스택, 운전자용, 수소저장, 전기구동 시스템 등과 같은 연료전지차용 주요 시스템을 국내외 공동연구, 자체개발 등의 방법을 병행하여 개발 진행함으로써 국내 기술 경쟁력을 강화하고 관련 부품기술 육성에 기여하고 있다. 또한, 국내

및 해외 시범운행사업에 주도적으로 참여하고 운영함으로써 다양한 기술교류활동의 성과와 연료전지차 및 관련 기술개발의 성과를 가시화하고 있다. 본 논문에서는 현대자동차에서 개발한 연료전지차의 주요 사양 및 전기구동시스템의 개발 현황 등을 간략히 소개하고 지속적인 성능 향상을 위해 요구되는 추가 개발 현안들에 대하여 살펴보자 한다.

2. 본 론

2004년 현대자동차는 최대출력 80kW급 연료전지와 20kW급 배터리를 이용해 80kW급의 전기구동시스템을 운용하는 연료전지차를 개발하였고

-
- 1) 현대자동차, 연료전지개발 2팀
E-mail : belight@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3132 Fax : (031)899-3332
 - 2) 현대자동차, 연료전지개발 2팀
E-mail : dong@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3146 Fax : (031)899-3332
 - 3) 현대자동차, 연료전지개발 2팀
E-mail : k.u@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3166 Fax : (031)899-3332
 - 4) 현대자동차, 환경기술연구소
E-mail : twlim@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3200 Fax : (031)899-3332

Table 1 연료전지차 주요 시스템 사양

구분	사양
연료전지시스템	최대 출력 100kW 출력 전압 240~450V
전기구동시스템	최대 출력 100kW, 최대 토크 300Nm 최대 회전수 12,000rpm
보조전원시스템	수퍼캐패시터 용량 10F
수소저장시스템	최대 압력 350bar 부피 150 liter

2007년에는 최고속도, 가속성능, 추월가속성능 등과 같은 동력성능을 대폭 개선시킨 최대 출력 100kW급의 연료전지차 개발을 추진하였다. 본 연료전지차는 100kW급 연료전지와 1MJ 용량의 수퍼캐패시터를 채용하고 100kW급 전기구동시스템을 적용하였으며, 간략한 사양은 표 1에 제시한 바와 같다. 본 연료전지차의 경우 정지상태에서 100kph 속력까지의 발진가속성능과 60kph에서 100kph 속력까지의 추월가속성능이 이전 차량에 비하여 10% 이상 개선되는 효과를 보였다. 연료전지 및 보조전원(수퍼캡)의 성능 향상과 더불어 모터구동시스템의 저속영역 토크 및 고속영역 출력 증가, 직류변환장치의 출력 증가, 전기구동부품의 효율 향상 등이 차량동력성능 개선에 기여하였다.

2.1 구동모터

연료전지차용 구동모터 개발에 있어서 동작특성의 안정성, 부품의 신뢰성과 더불어 차량에서 요구되는 동력성능을 만족시키기 위하여 고출력화, 차량연비개선을 위하여 고효율화가 중요하다. 연료전지차에 적용된 구동모터의 외관을 Fig. 1에 보이고 있으며, 주요 사양은 표 2와 같다. 전술한 바와 같이 연료전지차용 구동모터는 넓은 속도영역 특성을 확보함과 동시에 저속영역에서는 고토크, 중속 및 고속영역에서는 고출력, 주 사용영역에서는 고효율화가 필수적이다. 이러한 운전조건에 따른 사양을 만족시키는 구동모터 설계를 위하여 고정자 및 회전자의 국부자기포화를 고려하여 비선형 전자계 해석을 실시하였으며, 차량냉각장치 설계를 위한 최대 및 정격출력에 대한 모터의 열해석, 고속 영역에서의 안전성 및 신뢰성 확보를 위한 기계적 강도 해석 등을 수행하였다.

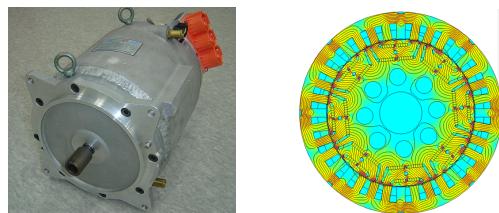


Fig. 1. 연료전지차용 100kW 영구자석 동기모터

Table 2 구동모터 사양

항목	단위	사양
출력(최대/정격)	kW	100/50
토크(최대/정격)	Nm	300/150
최대 회전수	rpm	12,000
평균효율	%	> 92

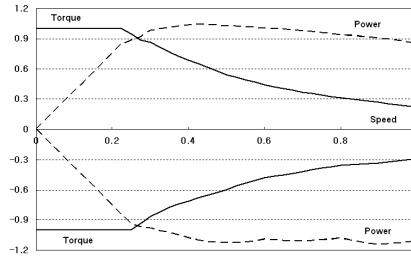


Fig. 2. 구동모터 토크특성곡선

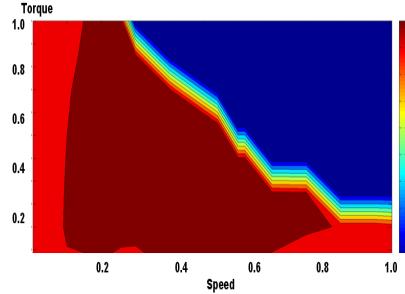


Fig. 3. 구동모터 효율측정시험 결과

저속영역의 누설자속과 고속영역의 철손 계산을 위하여 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 고정자 치 및 회전자 철심 부분의 국부 포화를 고려한 비선형 전자계 해석을 수행하였다. 또한, 최대속도 부근에서의 응력분포해석을 통하여 기계적 안전계수를 확보할 수 있도록 하였다. 이러한 설계결과는 정격출력 및 최대출력시 열시험, 토크특성곡선 추출시험 및 효율측정 등을 통하여 검증하였으며, 각각의 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 모터제어기

모터제어기는 구동모터의 제어 알고리듬을 수행하는 제어부, 차량의 운전 조건에 따른 냉각 및 차량 패키징에 따른 하우징, 그리고 모터제어기의 출력을 좌우하는 파워부로 구분된다. 연료전지차용 모터제어기는 고출력, 고효율화 및 소형화 개발이 추진되고 있으며, 기존의 모터제어기 대비 20%이상의 출력밀도 향상을 목표로 하고 있다. 모터제어기는 연료전지로부터 고전압의 직류전원을 직류 링크단을 통하여 인가받아 고속 스위칭(8kHz)에 의하여 3상 교류전원으로 변환하여 구동모터에 교류 전원을 공급한다. 목표로 하고 있는 출력밀도 20% 향상을 위하여



Fig. 4. 모터제어기 외관 및 출력밀도

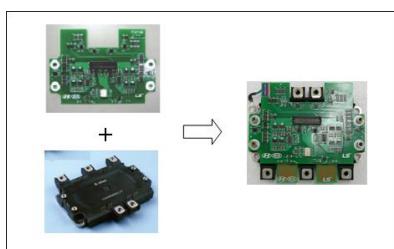


Fig. 5. IGBT 및 게이트 구동보드 통합모듈

- 차량용 고출력 IGBT 파워소자 개발
- DC link 커패시터용 필름커패시터 개발
- IGBT와 게이트구동보드의 모듈화

등을 추진하였으며, 모터제어기의 외관과 주요 사양은 각각 Fig. 4 및 표 3과 같다. Fig. 5에서와 같이 연료전지차용 모터제어기에서는 IGBT와 게이트 구동부를 모듈화함으로써 기존 모델 대비하여 20% 사이즈 축소 효과를 가져올 수 있었다. 게이트 구동부에는 IGBT의 보호기능 및 모니터링 기능이 내장되어 있으며, 게이트 구동보드와 IGBT 간의 신호 연결선을 삭제하여 시스템의 신뢰성을 향상시켰다. 주요 부품으로서 IGBT 및 필름 캐패시터는 다음 절에 상세히 기술되어 있다.

2.3. 직류변환장치

연료전지차에서 차량전장에 전원을 공급하고 보조배터리를 충전하기 위하여 연료전지의 고전압을 차량전원전압으로 강압 변환하는 직류변환장치가 필요하다. 당사 연료전지차에 적용된 직류변환장치의 주요 사양을 표 4에 기술하였다. 수백 V에 달하는 연료전지의 고전압을 차량전원용 저전압, 14V로 강압할 때, 입출력 전압차이가 매우 크므로 시스템의 안정성이 무엇보다도 중요하다. 또한, 연료전지 고전압 시스템과 차량전장 전원시스템 사이의 절연이 필수적이다. 이러한 조건들을 만족시키기 위하여 비절연형 컨버터와 절연형 컨버터를 직렬로 연결하여 큰 전압차이에서도 원활하게 동작하도록 하였으며, 저전압측에 절연형 컨버터를 채용하여 고전압측과 저전압측간의 절연 확보를 꾀하였다. 또한 Soft switching, 병렬회로 구성 및 다상스위치 구성 등을 통하여 고효율화를 추진하였다.

Table 3 모터제어기 사양

항목	단위	사양
출력	kW	100
동작전압	V	240~450
냉각방식	-	수냉식
효율	%	>95

Table 4 직류변환장치 사양

항목	단위	사양
출력(최대/정격)	kW	2.5/3.5
출력전압	V	10~16V
제어방식	-	전압제어
최대효율	%	93

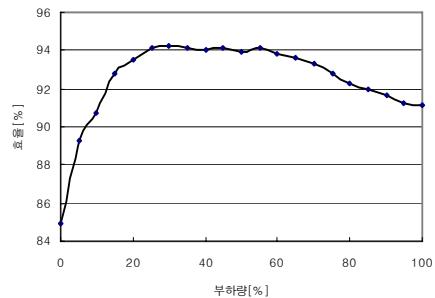


Fig. 6. 직류변환장치 효율 측정결과

차량 보조전원의 활용도를 높이기 위하여 양방향 제어가 가능한 토플로지 구조로 구성하였으며, 주 발열소자들을 방열판에 밀착 배치하여 방열이 용이한 구조로 설계하였다. 차량 내 패키지 및 파워넷 구성 등을 용이하도록 하기 위하여 인버터 통합모듈로 구성하였다.

이러한 설계 결과는 정전압제어시험, 부하과도시험, 효율 측정 등을 통해 검증되었으며, 효율시험 결과를 Fig. 6에 제시하였다.

2.4. 핵심요소부품

연료전지차용 전기구동시스템의 핵심요소부품들은 전기구동시스템의 출력밀도 향상에 기술적으로 큰 영향을 미치는 부품들을 의미하며, 구동모터의 영구자석과 모터제어기 및 전력변환장치에서의 전력반도체 및 필름콘덴서 등을 들 수 있다.

2.4.1 전력반도체

당사 연료전지차용 모터제어기에 적용된 전력반도체는 600V 400A급으로서 전기구동시스템의 출력용량을 고려하여 3병렬 적용하였다. 적용된 전력반도체는 3세대 IGBT로써 non-punch through 타입으로 트렌치 게이트 기술이 적용함으로써 도통손실을 저감시키고 턴-오프 특성을 개선하였다. 하이브리드차 및 연료전지차와 같이 자동차 환경

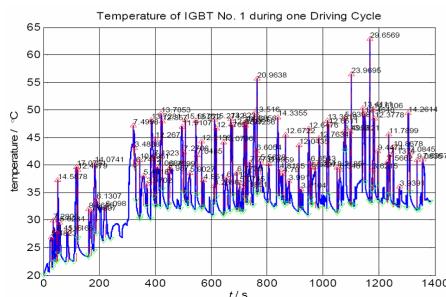


Fig. 7. 전력반도체 접합부 온도상승

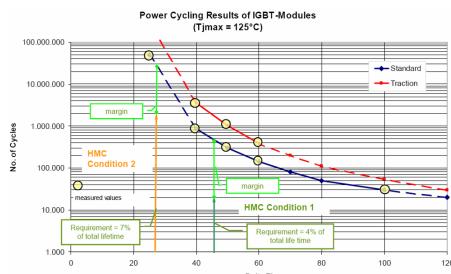


Fig. 8. 전력반도체 수명 예측



a) 400A급 소자 b) 800A급 소자
Fig. 9. 전력반도체(IGBT) 외관

및 내구조건에 부합하도록 자동차 전용으로 설계되었다. 또한 Fig. 7에 보이는 것과 같이 연료전지 차의 모드운행 조건에 따른 IGBT 칩의 접합부 온도 상승 시뮬레이션을 통하여 IGBT의 수명예측 시뮬레이션을 수행하였다(Fig. 8). 현재 적용중인 600V 400A급의 IGBT를 Fig. 9(a)에 보이고 있으며, 차세대 전력반도체로서 Fig. 9(b)의 600V 800A급 IGBT를 공동개발 중에 있다.

2.4.2 필름 콘덴서

모터제어기 DC 링크용 캐패시터로 기존의 전해 캐패시터 대신 온도 및 내부저항 특성이 우수한 필름 캐패시터를 적용하였다. DC 링크 캐패시터로 필름 캐패시터를 적용함으로써 동일 리플전류 내량에 대하여 부피를 획기적으로 저감시킬 수 있었다. Fig. 10에 보이고 있는 것과 같은 필름 캐패시터는 2,000uF의 용량을 가지며, 150Arms의 고주파수 전류리플에 대하여 6,000시간 이상의 내구수명을 보장할 수 있도록 설계되었다.



Fig. 10. 필름 캐퍼시터 외관

2.4.4 영구자석

구동모터에 적용된 영구자석은 NdFeB 자석으로서 에너지적이 39~44MGoe이다. 최근 구동모터의 고출력밀도화를 위하여 희토류 영구자석의 에너지적을 증대시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 연료전지차용 희토류 영구자석으로 중요하게 고려되어야 할 사항은 온도상승에 따른 영구자석의 감자 방지이며, 자동차 OEM과 자석 메이커가 공동으로 고온 특성이 우수한 고보자력 영구자석 재료에 대한 연구개발에 주력하고 있다.

3. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 현대자동차에서 개발한 연료전지차용 100kW급 전기구동시스템 및 핵심요소부품들에 대한 개발 현황을 소개하였다. 기존 80kW급 시스템에 비하여 출력밀도와 성능을 개선하여 부피나 중량을 감소시키면서도 고출력, 고효율의 전기구동시스템을 구현하여 차량동력성능 향상에 기여하였다. 더불어 친환경 자동차 시장에서 경쟁력을 갖춘 연료전지차량 및 전기구동시스템을 구현하기 위해서는 구동모터, 모터제어기, 직류변환장치 등의 단품뿐만 아니라 전력반도체, 필름 콘덴서, 영구자석과 같은 요소 부품에 대한 지속적인 개발이 요구된다.

References

- [1] Soonil Jeon, et. al, "Development of Tucson Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle," Spring Conference of KSNRE, pp. 357-360, 2005.
 - [2] Saehoon Kim, et. al, "Development of Hyundai's Tucson FCEV," SAE world congress, 2005.
 - [3] Sangkwon Kim, et. al, "Development of Fuel Cell Hybrid Vehicle by Using Ultra-Capacitors as a Secondary Power Source," SAE world congress, 2005.