

연료전지를 이용하는 비도로용 자동차를 위한 전력변환시스템에 관한 연구

강호현, 김왕래, 최우진, 전희종
 숭실대학교

A Study on the Power Conditioning System for the Fuel Cell Powered Off-Road Vehicle

Hohyun Kang, Wang-Rae Kim, Woojin Choi, Hee-jong Jeon
 Soongsil University

ABSTRACT

In this paper a power conditioning system suitable for the fuel cell powered off-road vehicle is proposed. The proposed system employs a Proton Exchange Membrane Fuel Cell stack combined with boost converter, a super capacitor module combined with bi-directional buck-boost converter, a 4-quadrant DC chopper and a permanent magnet DC motor. The momentary overload condition occurring during the motor starting is handled by the energy stored in the supercapacitor module. Also, the regenerative energy can be stored in the supercapacitor module by operating the system in either buck or boost mode. This capability gives the system designer the higher flexibility in designing the system and assures the lower cost of the system. The validity and feasibility of the proposed system is proven by the computer simulation.

1. 서 론

화석연료의 고갈과 기후변화라는 인류에게 당면한 두 가지의 중요한 과제를 해결하기 위해 선진국을 중심으로 신재생에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 수소를 이용하는 연료전지는 특별한 입지조건을 요구하지 않으며, 효율이 높고, 요구되는 응용에 따른 용량의 변경이 용이하여 휴대용 전자기기의 전원에서 대형 발전소에 이르는 다양한 분야에서 그 응용이 기대되고 있다.^[1] 자동차는 지구온난화를 유발하는 온실가스를 발생시키는 주요 원인으로 분류되고 있으며 이에 내연기관을 연료전지로 대체하고자 하는 노력이 전 세계적으로 기울여지고 있다. 그러나 연료전지가 자동차에 적용되기 위해서는 고도의 내구성 및 신뢰성을 확보하여야 하기 때문에 그의 상용화에는 상당한 시간이 걸릴 것으로 예측

된다.^[2] 통계에 의하면 현재 지게차, 골프카, 씨저리프트와 같은 비 도로용 차량이 발생시키는 온실 가스의 양은 자동차에 의해 발생하는 전체 온실가스의 14% 정도를 차지하는 것으로 집계되고 있다.^{[3][4]} 따라서 이러한 비 도로용 차량에 연료전지를 적용하여 기존의 비 도로용 차량을 대체할 경우 온실가스의 발생을 경감시킬 수 있으며, 배터리의 교체 비용 등을 감안하면 경제성에서도 뒤지지 않게 된다.

본 논문에서는 연료전지를 비도로용 차량에 적용할 경우 적용이 가능한 전력변환기의 토폴로지를 제안한다. 제안된 토폴로지는 연료전지와 결합된 Boost 컨버터와 연료전지의 과부하를 방지하기 위한 슈퍼커패시터와 결합된 양방향 DC/DC 컨버터 그리고 영구자석형 직류 전동기 및 4상한 초퍼로 이루어져 있다. 연료전지와 결합된 Boost 컨버터는 부하에 따라 넓게 변화하는 연료전지의 출력전압을 전동기 기동용 초퍼가 요구하는 직류전압으로 승압하며, 연료전지의 과부하를 막기 위해 슈퍼커패시터와 양방향 DC/DC 컨버터를 채용하여 전동기의 기동시 요구되는 큰 기동전류를 보상한다. 또한, 정지시 전동기에서 회생되는 에너지를 슈퍼 커패시터에 충전함으로써 시스템의 효율을 증대시킨다. 전동기의 기동시 기동전류의 보상 방법과 에너지의 회생을 위한 컨버터의 제어 방법이 소개되며, 제안된 시스템의 실현 가능성과 우수성은 컴퓨터 모의실험을 통해 증명된다.

2. 본 론

2.1 전체 시스템

2.1.1 전체시스템의 구성

그림 1은 전체 시스템의 구성도를 나타내고 있다. 설계에 사용된 전동기는 2[kW], 영구 자석형 직류 전동기이며, 연료전지 스택은 2.4[kW] 용량의 양자 교환막형 연료전지(PEMFC) 스택이다. 출력 전압의 변동범위는 44-100[V]이며 최대 출력전류는 46[A]이다. Boost 컨버터의 제어기는 입력전압

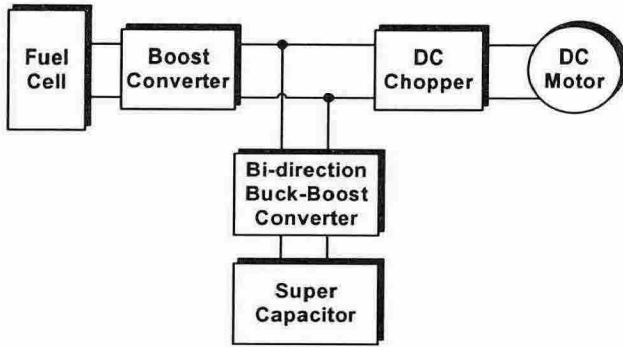


그림 1 전체 시스템의 블록선도
Fig. 1 Block diagram of the system

의 변동에 대해 스위치의 듀티비를 제어하여 직류 전동기를 위한 DC-Link 전압(140[V])을 유지한다. DC-Link에는 슈퍼커패시터와 결합된 양방향 컨버터가 연결되어 평상시 Buck모드로 슈퍼커패시터를 충전하며, 기동시 전동기가 요구하는 큰 값의 전류를 분할 담당하여 연료전지 스택에 과부하가 걸리지 않도록 한다. 슈퍼커패시터 모듈의 전압은 상시 충전이 가능하도록 연료전지의 최소 출력전압보다 낮은 전압으로 설계한다.

2.2 모드별 동작

2.2.1 정상상태 운전

그림 2는 제안된 시스템의 세부 구조를 나타낸다. 정상 운전시 연료전지는 Boost 컨버터를 통해 DC-Link에 전력을 공급함과 동시에 Buck 모드로 동작되는 양방향 컨버터를 통해 슈퍼 커패시터를 충전한다. 4 상한 초퍼는 회전방향 및 속도 지령에 따라 스위치 S4, S7 또는 S5, S6를 온/오프 하여 전동기를 제어한다.

2.2.2 전동기 기동

직류 전동기의 기동시 역기전력이 없으므로 전동기에는 큰 전류가 흐르게 된다. 따라서 전동기의 기동시 전기자에 직렬로 기동 저항을 삽입하여 기동 전류의 값을 정격의 125-200%로 제한하는 것이 보통이다. 그러나 이 경우에도 이러한 기동전류를 공급할 수 있도록 연료전지의 용량을 산정하는 것은 경제적이지 않으므로, 연료전지의 용량은 전동기의 정격과 컨버터의 효율에 맞추어 산정하고, 전동기의 기동시 투입 되어야 하는 큰 전류 중 연료전지 스택의 정격을 넘어서는 부분은 정상상태 운전시 슈퍼 커패시터에 저장한 에너지를 방출하여 보상하는 것이 경제적이다.

연료전지 스택은 내부 제어회로에 의해 고부하시 자동으로 시스템을 정지하여 시스템을 보호하도록 설계되어 있으므로, 연료전지 스택에 결합된 Boost 컨버터의 전류 제어기는 출력 최대 전류값을 넘지 않도록 리미터를 사용하여 연료전지에 과부하가 걸리지 않도록 제어한다. 그리고 Boost 컨버터의 전압제어기의 출력인 전류 지령치 중 연료전지 스택의 정격을 초과하는 부분은 슈퍼커패시터와 연결된 양방향 DC/DC 컨버터의 전류 제어기의 지령치로 보내지고, 양방향 컨버터는 스위치 S2를 제어하여 Boost 모드로 작동시켜 전동기에 필요한 전류가 공급되도록 한다.

2.2.3 회생제동

감속이나 제동시 관성으로 인해 전동기는 일정시간동안 회전력을 유지하게 된다. 내연기관을 동력원으로 사용하는 자동차는 이러한 운동에너지를 마찰을 통해 열로 소모함으로써 제동을 하였다. 그러나 전기 자동차에서는 이러한 운동 에너지를 회생시켜 저장함으로써 보다 높은 효율을 구현할 수 있다.^{[2][5]}

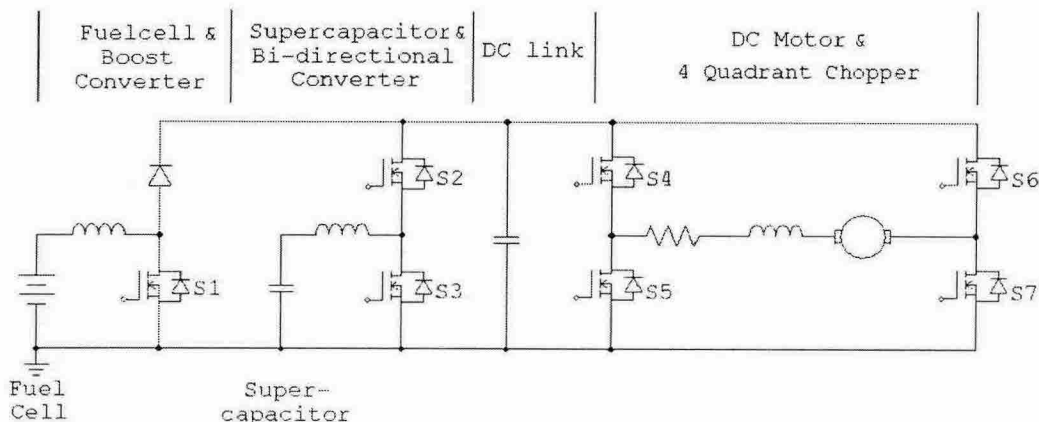


그림 2 제안된 연료전지를 이용하는 비도로용 차량의 전력변환기
Fig 2 Power Conditioning System of the Proposed Fuel Cell Powered Off-Road Vehicle

참고 문헌

- [1] Larminie Dicks, "Fuel Cell Systems Explained", John Wiley & Sons Ltd Publishing Company, Inc. 2003.
- [2] James Larminie, John Lowey " Electric vehicle technology Explained", John Wiley & Sons Ltd Publishing Company, Inc. 2003.
- [3] Alexander Communication Group, Inc., "Fuel Cell Industry Report", May 2004, Vol 5, No. 5
- [4] Internet website "http://www.cellexpower.com/"
- [5] Caricchi, F., Crescimbeni, F., Noia, G., Pirolo, D., "Experimental study of a bidirectional DC-DC converter for the DC link voltage control and the regenerative braking in PM motor drives devoted to electrical vehicles", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1994. APEC '94. Conference Proceedings 1994., Ninth Annual, 13-17 Feb. 1994 Page(s):381 - 386 vol.1
- [6] Choi, W.; Enjeti, P.N.; Howze, J.W., "Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE, Volume 1, 2004 Page(s):355 - 361 Vol.1
- [7] Choi, W.; Enjeti, P.; Howze, J.W., "Fuel cell powered UPS systems: design considerations", Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC '03. 2003 IEEE 34th Annual Volume 1, 15-19 June 2003 Page(s):385 - 390 vol.1

그림 5는 회생제동의 모의 실험결과를 보여주고 있다. 초기에 전동기는 정격속도인 3000[rpm] 으로 운전되고 있었고, $t=1[\text{sec}]$ 에서 제동이 시작되며 에너지를 회생하기 시작한다. 이때 양방향 컨버터를 통해 충전되는 에너지에 의해 슈퍼 커패시터의 전압이 약 3[V] 상승하는 것을 볼 수 있다. 초기 전동기의 속도가 높아 역기전력의 값이 슈퍼커패시터의 전압보다 큰 경우 양방향 컨버터는 Buck 모드로 동작하여, 스위치가 흘릴 수 있는 최대값의 충전 전류가 흐르도록 제어되며, 운동에너지의 감소로 인하여 역기전력이 슈퍼 커패시터의 전압과 등전위가 되어 감에 따라 전력의 전송이 되지 않는 상태가 되면, 4 상한 초퍼를 Boost 모드로 동작시켜 계속하여 전동기의 운동에너지를 전기에너지로 바꾸어 슈퍼 커패시터를 충전하게 된다.

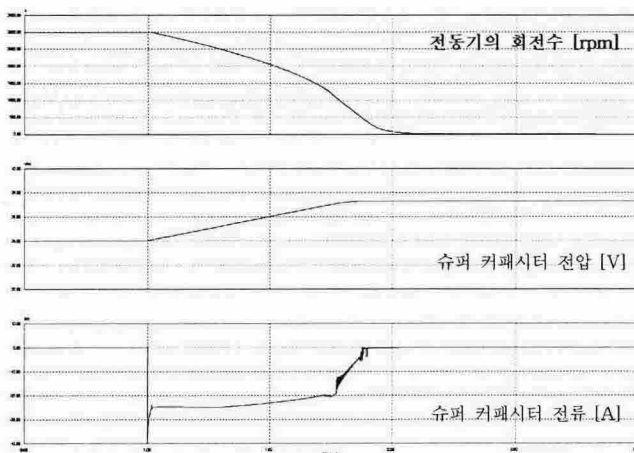


그림 5 회생제동의 모의실험결과
Fig 5 Simulation Result of the Regenerative Braking

4. 결 론

본 논문에서는 연료전지를 동력원으로 이용하는 비도로용 차량의 전력변환기의 토폴로지를 제안하였고, 그의 효율성을 시뮬레이션을 통해 증명하였다. 제안된 시스템은 구조와 제어가 간단하면서도 전동기의 기동시 연료전지의 과부하를 방지하고, 또 전동기의 정지시 발생하는 에너지를 효율적으로 회생시킬 수 있는 구조를 갖고 있다. 따라서 제안된 시스템으로 배터리를 주에너지원으로 이용하는 비도로용 차량을 대체할 경우 환경친화적이고 효율적이며 가격 경쟁력도 있는 시스템을 구성할 수 있을 것으로 판단된다.

이 논문은 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00497-0(2004))지원으로 수행되었음