

하나의 인덕터를 가지는 연료 전지 전기 자동차를 위한 연료전지·배터리 전력 변환 시스템

이운재, 김재국
INHA

Power Conversion System with One Inductor for Fuel Cell Battery Electric Vehicle

Yun-Jae Lee, Jae-kuk Kim
INHA

ABSTRACT

본 논문에서는 연료 전지 전기 자동차에 맞는 새로운 전력 변환 시스템을 제안한다. 연료 전지 전기 자동차의 전력 변환 시스템은 배터리와 같이 구성하여 에너지 저장 불가능, 느린 응답 속도, 낮은 전력 밀도와 같은 연료 전지의 단점을 해결할 수 있다. 하지만 기존의 연료 전지 전기 자동차의 전력 변환 시스템은 두 개의 DC/DC 컨버터를 사용하여 연료 전지와 배터리를 함께 구성함으로써 두 개의 인덕터 개수로 인해 비용이 증가하고 전력 밀도가 낮다는 단점이 있다. 제안하는 전력 변환 시스템은 한 개의 인덕터, 추가적인 스위치와 다이오드를 사용하여 연료 전지와 배터리를 하나의 컨버터로 구성한다. 따라서 기존에 비해 인덕터 개수가 감소함으로써 경제적이고 높은 전력 밀도 달성할 수 있으며, 스위치의 on/off 동작에 따라 승, 강압 동작이 가능하기 때문에 더 많은 연료전지와 배터리의 전압 조건 상황에서 동작할 수 있다.

1. 서론

전 세계적으로 대기 오염에 관하여 자동차의 배기가스에 대한 규제가 강화되고 이에 따라 전기 자동차에서도 연료 전지를 도입하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 연료 전지를 이용한 전력 시스템은 기존의 화석 연료를 이용한 전력 시스템에 비하여 고효율을 달성할 수 있고, 영에 가까운 배기가스를 달성할 수 있으며 충분한 주행 거리 달성의 장점이 있다^[1]. 하지만 연료 전지 자동차에서 비용 문제는 큰 부분을 차지한다. 따라서 인덕터의 개수를 줄이는 것은 연료 전지 자동차의 비용 문제를 해결하는데 도움이 될 수 있다.

연료 전지 전력 변환 시스템은 배터리를 이용함으로써 에너지 저장 불가능, 연료 전지의 느린 전달 응답속도, 낮은 전력 밀도, 콜드 스타트가 어려운 문제들을 해결할 수 있다. 이러한 이유로 연료 전지 전력 변환 시스템에서 연료전지는 배터리와 함께 결합되어 구성한다^[2]. 기존의 전력 변환 시스템은 그림 1과 같이 연료 전지와 배

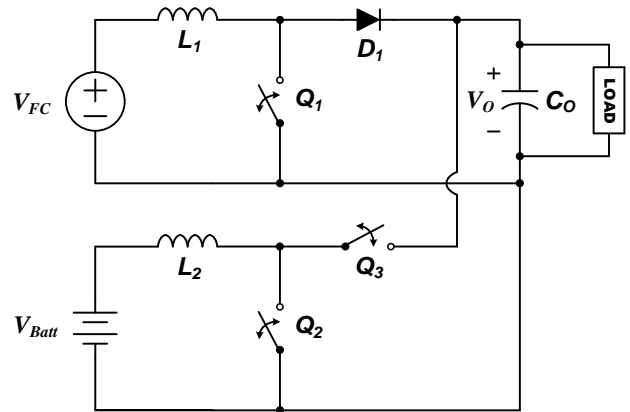


그림 1. 기존의 배터리가 포함된 연료 전지 전력 변환 시스템

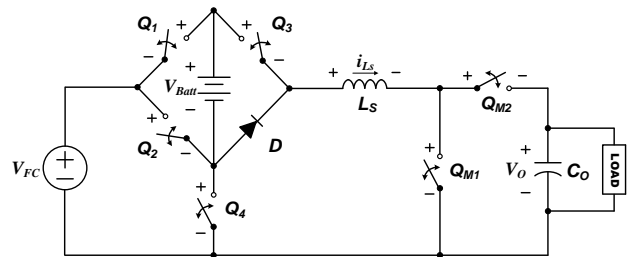


그림 2. 제안하는 연료 전지 전력 변환 시스템

터리가 각각 독립적인 DC/DC 컨버터에 의해 출력에 병렬로 연결되어 있다. 이 회로는 배터리의 충전 상태와 동작 알고리즘에 의해 배터리의 충/방전 전류의 제어가 가능하다. 이러한 이유로 효율적인 동작이 가능하고 다양한 상태로 동작할 수 있다. 더욱이, 연료 전지 자동차의 회생 제동 에너지를 배터리에 저장할 수 있는 동작을 할 수 있다는 장점이 있다^[3]. 하지만 DC/DC 컨버터가 두 개이므로 인덕터가 두 개 사용되고 배터리의 전류 제어를 추가로 구성해야 하기 때문에 비용이 증가하고 전력 밀도가 감소한다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는, 인덕터 한 개를 사용하여 연료 전지 전력 변환 시스템을 구성한 회로를 제안한다. 이로 인해 제안하는 회로는 낮은 비용과 높은 전력 밀도를 달

성할 수 있으며 기존 회로의 여섯 가지 동작 모드를 모두 동작할 수 있다.

2. 제안하는 회로 분석

제안하는 회로는 그림 2와 같이 인덕터 L_S 한 개와 메인 스위치 Q_{M1} , Q_{M2} 와 네 개의 스위치 Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 와 다이오드 D 로 구성되어 있다. 스위치와 다이오드 Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , D 는 연료 전지와 배터리 전압에 영향을 받아 기존의 회로보다 낮은 전압 스트레스 특성을 갖는다. 따라서 더 좋은 특성의 스위치를 사용하여 설계할 수 있다. 또한 제안하는 회로는 벅/부스트 컨버터의 동작을 기본으로 동작한다.

2.1 회로 동작 모드

이번 절에서는 제안하는 전력 변환 시스템의 특징을 동작 모드 분석을 통해 확인한다. 제안하는 회로의 동작 분석을 위해 다음과 같은 조건을 가정한다. 1) 스위치와 다이오드는 이상적이며, 그림 2에 표시되지 않은 소자들의 기생 성분들은 무시한다. 2) 한 스위칭 주기 동안 연료 전지 전압과 배터리 전압 그리고 출력 전압은 일정하다. 3) 스위칭 동작 사이의 데드 타임은 무시한다. 제안하는 전력 변환 시스템의 동작 모드는 6가지로 나뉘며, 제안하는 전력 변환 시스템의 동작 파형은 그림 3과 같다.

Mode 1은 연료 전지에서 출력으로 전력을 전달하는 모드이다. 따라서 배터리에는 전류가 흐르지 않는다. Mode 2는 배터리가 방전하며 연료전지를 도와 출력으로 전력을 전달하는 모드이다. Mode 3은 연료 전지가 배터리와 출력에 동시에 전력을 전달하는 모드이다. Mode 4는 배터리에서 출력에서 전력을 전달하는 모드이다. Mode 5는 회생제동 시 발생하는 회생 제동 에너지를 배터리에 전달하여 에너지를 저장하는 모드이다. Mode 6는 스타트 업 상황에서 연료 전지와 배터리가 동시에 출력으로 전력을 전달하는 모드이다.

2.2 인덕터 설계

제안하는 전력 변환 시스템은 하나의 인덕터로 구성되어 있다. 기존의 회로와 타당한 비교를 위해 인덕터 설계 기준을 통일한다. 첫 번째로 전류 리플을 50%로 같게 하고 여섯 가지의 모드 중 worst case를 기준으로 인덕터를 설계한다. 두 번째로 최대 자속 밀도(B_{max})는 0.45 T로 같게 설계한다. 세 번째로 인덕터 코어의 총전력(K_u)는 0.22 로 같게 설계한다. 인덕터 코어의 단면 넓이(A_c)와 코어의 창 면적(W_a)의 영향을 받는 인덕터 코어의 총 면적(A_p)는 다음과 같이 나타낸다.

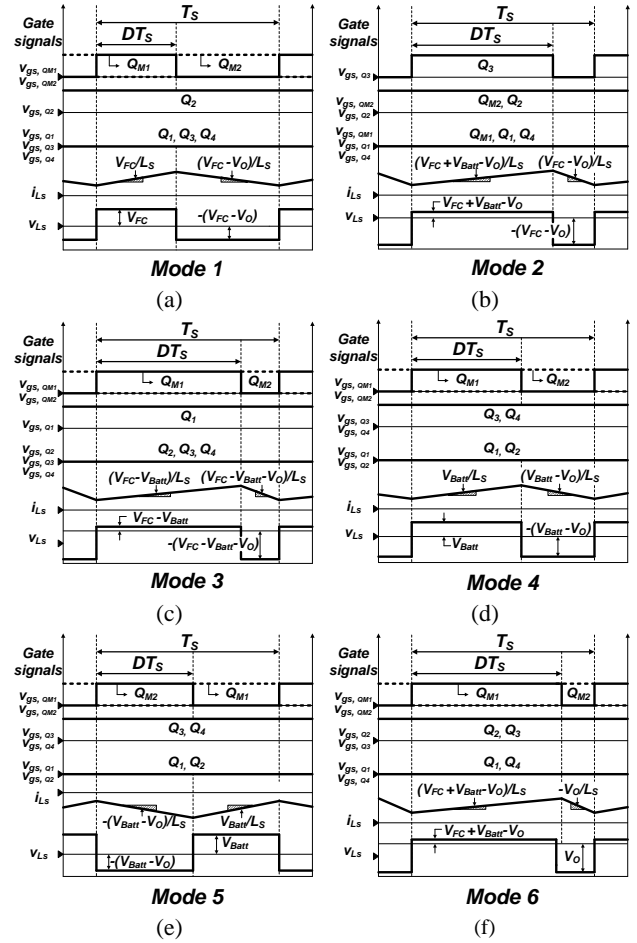


그림 3. 제안하는 전력 변환 시스템의 동작 파형.

$$A_p = A_c W_a = \left(\frac{I_{L_s, peak}}{B_{max}} \right) \times \left(\frac{I_{L_s, rms}}{J \times K_u} \right) \quad (1)$$

L_s 는 인덕터의 인덕턴스, $I_{L_s, peak}$ 는 인덕터 전류 스트레스, $I_{L_s, rms}$ 는 인덕터 RMS 전류, K_u 는 인덕터 코어의 총전력이다.

2.3 비용 및 전력 밀도

제안하는 전력 변환 시스템은 하나의 인덕터를 줄여 낮은 비용과 높은 전력 밀도를 달성할 수 있다. 하나의 컨버터로 회로를 구성하기 위해 스위치 3개를 추가하였다. 하지만 전기 자동차의 전력 변환 시스템의 비용 측면에서 인덕터가 스위치보다 차지하는 비중이 크기 때문에 인덕터의 개수를 줄이는 것이 비용 감소에 더욱 효과적일 수 있다. 또한, 4개의 스위치와 1개의 다이오드의 정격 전압이 연료 전지와 배터리 전압에 클램핑되기 때문에 낮은 전압 스트레스를 갖는다. 따라서 저렴한 비용의 소자를 선택할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 전력 변환 시스템을 시뮬레이션을 통해 검증한다. 스위칭 주파수는 75kHz, 연료 전지의 전압 범위는 250V~450V, 배터리의 전압은 250V, 출력 550V/400W의 조건에서 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 5는 모드 별 주요 시뮬레이션 파형을 나타내었다. 시뮬레이션 파형은 모드 별 스위칭을 하는 스위치의 게이트 신호 파형 과 인덕터 전류 그리고 인덕터 전압을 나타내었다. 그림 6은 기존의 시스템과 제안하는 시스템의 효율을 비교한 그래프이다. Mode 2, 3, 6는 제안하는 시스템의 효율이 기존 시스템의 효율보다 높고, Mode 1, 4, 5는 기존 시스템의 효율이 제안하는 시스템의 효율보다 낮다. 이와 같은 효율 데이터가 관측된 이유는 기존의 시스템에서 Mode 1, 4, 5가 동작할 때 병렬로 연결되어 있는 두 개의 컨버터 중 하나의 컨버터만 동작하여 손실이 발생하는 소자의 개수가 줄어들기 때문이다. 제안하는 시스템의 Mode 2, 3, 6이 효율이 더 높은 이유는 낮은 전압 스트레스로 인해 낮은 $R_{ds(on)}$ 을 갖는 스위치를 선정할 수 있고, 두 개의 인덕터에 전류가 흐르는 기존 시스템과 달리 제안하는 시스템은 하나의 인덕터로만 전류가 흘러 인덕터에서 발생하는 손실을 줄일 수 있기 때문이다.

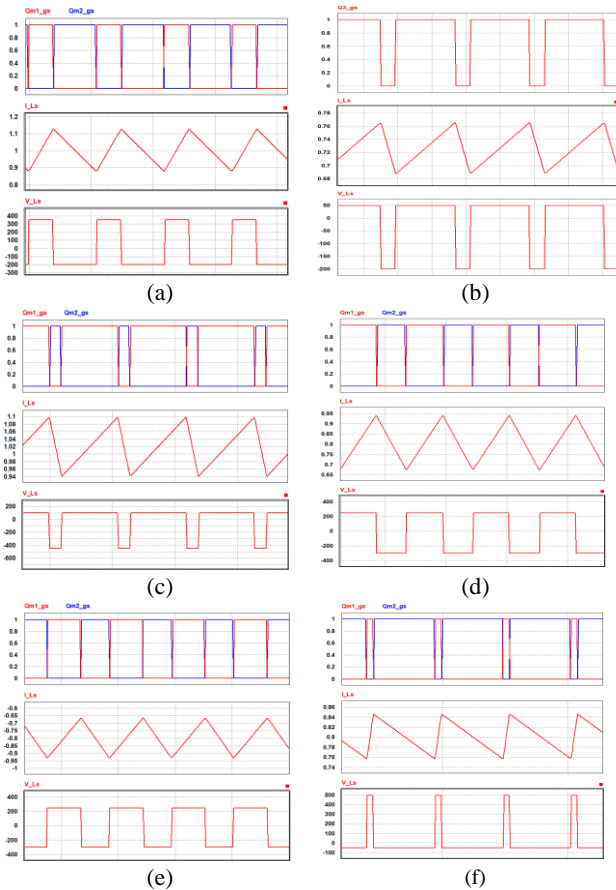


그림 5. 제안하는 전력 변환 시스템의 주요 시뮬레이션 파형 (a) Mode 1. (b) Mode 2. (c) Mode

3. (d) Mode 4. (e) Mode 5. (f) Mode 6

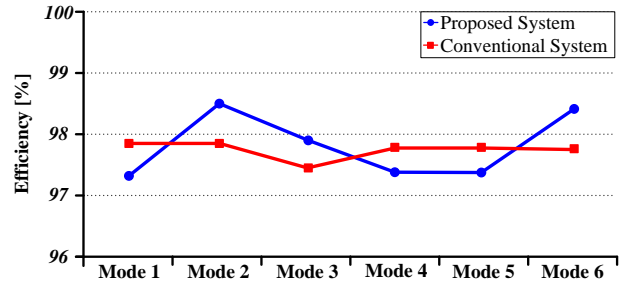


그림 6. 측정 효율 비교

4. 결론

제안하는 전력 변환 시스템은 기존 회로에 비해 하나의 인덕터를 줄여 낮은 비용과 높은 전력 밀도를 달성할 수 있다. 또한, 제안하는 시스템이 하나의 인덕터로 구성되어 있지만 기존의 시스템과 같이 여섯 개의 모드로 동작하며 연료 전지와 배터리의 다양한 조건하에서 동작할 수 있다. 이러한 특징으로 인해, 제안하는 전력 변환 시스템은 연료 전지 전기 자동차의 비용적인 측면에서 더 큰 효과를 가질 수 있다.

본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구 (개별과제)에 의해 지원되었음 (과제번호 : R18XA06-70)

참고 문헌

- [1] Jih-Sheng Lai, "Fuel Cell Power Systems and Applications ", Proceedings of the IEEE, Vol. 105, No. 11, pp. 2166-2190, 2017, Nov.
- [2] Ke Jin, "Power Management for Fuel-Cell Power System Cold Start", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 10, pp. 2391-2395, 2009, Oct.
- [3] Saleh Ziaeinejad, "Fuel Cell-Based Auxiliary Power Unit: EMS, Sizing and Current Estimator-Based Controller", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 65, No. 6, pp. 4826-4835, 2016, June.