

수소연료전지 차량용 연료전지-슈퍼 커패시터 직렬 구조 기반 DC-DC 컨버터 설계 및 각 동력원 최적 용량 비율 선정 방안

고관영*, 김현수*, 황윤성*, 강승현*, 권만재*, 이용휘**, 이병국†

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과*

현대자동차 FC선행기술개발팀**

Design of DC-DC Converter for FCEV with Fuel Cell - Super Capacitor Serial Structure and Optimal Configuration Method of Power Source Capacity

Kwan Young Ko*, Hyeon Soo Kim*, Yun Seong Hwang*, Sung Hyun Kang*,
Man Jae Kwon*, Yong Hwi Lee**, and Byoung Kuk Lee†

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University*

Advanced Fuel Cell Technology Development Team, R&D Division, Hyundai Motor Company**

ABSTRACT

본 논문에서는 수소연료전지 차량용 연료전지 (Fuel cell, FC) - 슈퍼 커패시터 (Super Capacitor, SC) 직렬 구조 기반 DC-DC 컨버터 및 각 동력원 용량 설계를 제안한다. 기존 구조의 부피 저감 및 직렬 접속을 통한 추가 동력원 부피 저감을 위한 통합형 컨버터 구조와 차량 주행 및 직렬 접속 동작 고려시의 최적 용량 비율 설계를 진행한다. 120 [kW] 급 FDC 시스템 설계 및 차량 주행 동작을 고려한 시뮬레이션을 통해 제안한 토폴로지의 유효성을 검증하고 각 동력원의 용량 비율에 따른 손실 분석을 통해 최적 전력 분배 비율을 선정한다.

1. 서론

최근 수소연료전지 차량 (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV)에는 배터리 대비 높은 전력밀도 및 빠른 응답특성을 가진 슈퍼 커패시터 (Super Capacitor, SC) 적용 연구가 진행되고 있다^[1]. SC 적용 방안은 일반적으로 그림 1(a)와 같이 FDC (Fuel cell DC-DC converter)가 탑재되지 않은 FC 및 SC의 병렬 구조를 적용한다. 하지만 그림 1(a)와 같은 구조의 경우 FC 전압 범위에 대해 SC 가용 전압 범위가 결정되어 SC 전압 이용률이 제한된다. 또한 DC-link 출력 전압 (V_{dc})을 만족하기 위해 FC stack과 SC 셀의 직렬 구성 개수가 증가해야 하므로 각 동력원의 부피 상승이 야기되어 동력원 소형화 측면에서 불리하다. 이때 FC 측에 승압형 FDC를 적용하는 경우 동일 V_{dc} 조건에서 필요한 FC stack 수를 저감할 수 있어 동력원 소형화 측면에서 유리하다. 또한 그림 1(b)와 같이 FC-SC 직렬 구조 전환이 가능한 통합형 DC-DC 컨버터를 적용하는 경우, 각 동력원 정격 전압 감소로 인한 추가적인 동력원 부피 저감이 가능하며, 동일 출력 전력 (P_{out}) 기준 입력 전압 (V_{FC+SC}) 상승 및 컨버터의 도통 전류 감소에 따라 고효율 동작이 가능하다. 이를 위해 차량 주행 동작 모드를 고려한 통합형 DC-DC 컨버터 설계가 필요하며 각 동력원 용량 설계에 따른 컨버터 효율 및 부피 분석을 통한 최적 설계가 요구된다.

따라서 본 논문에서는 120 [kW] 급 FC-SC 직렬 구조 전환이 가능한 통합형 DC-DC 컨버터를 제안하고 동력원 최적 용량 비율을 선정한다. 이를 위해 다양한 차량 주행 상황에 대응

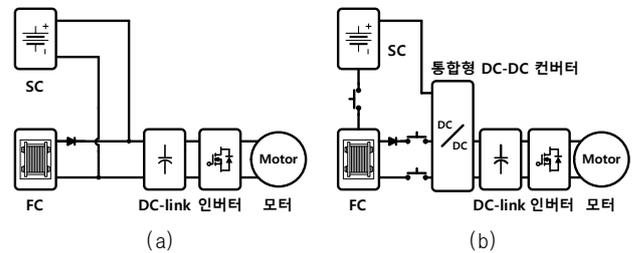


그림 1 SC 적용 수소연료전지 차량 토폴로지
(a) FC 및 SC 병렬 구조 (b) FC-SC 직렬 구조
Fig. 1 FCEV topology with Super Capacitor.
(a) Parallel structure (b) Serial structure

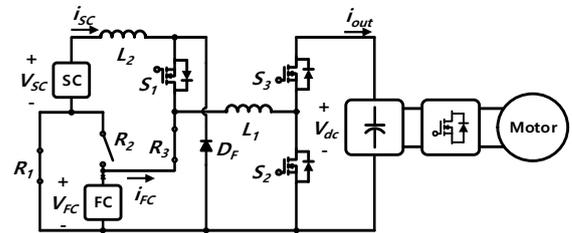


그림 2 제안하는 FC-SC 직렬 구조 기반 통합형 DC-DC 컨버터
Fig. 2 Proposed DC-DC converter with FC-SC serial structure.

가능한 통합형 DC-DC 컨버터의 각 동작 모드 분석을 진행한다. 또한 각 동력원의 용량 비율에 따른 효율과 동력원 부피 비교를 통해 제안하는 FC-SC 직렬 구조 기반 통합형 DC-DC 컨버터의 최적 용량 비율을 선정한다.

2. 통합형 DC-DC 컨버터 동작 모드 분석

그림 2는 FCEV 시스템의 직렬 구조 전환이 가능한 통합형 DC-DC 컨버터 구조를 나타내며 차량 주행 동작을 고려한 각 동작 모드는 그림 3과 같다. 주행 상황 및 전력 반도체 스위치 동작 상태에 따라 6가지의 동작 모드로 구분하며 동작 모드 스위치 ($R_1 - R_3$)의 절체를 통해 구현한다.

1) SC 단독 동작 모드 : 그림 3(a)와 같이 R_1 의 turn-on 및 R_2 와 R_3 의 turn-off 동작을 통해 SC 단독 동작을 구현한다. Boost 컨버터의 전류 도통 경로를 확보를 위해 스위치 S_1 를 fully turn-on하며 스위치 S_2 및 S_3 의 상보 스위칭을 통해 boost 컨버터의 전압 제어 동작을 수행한다.

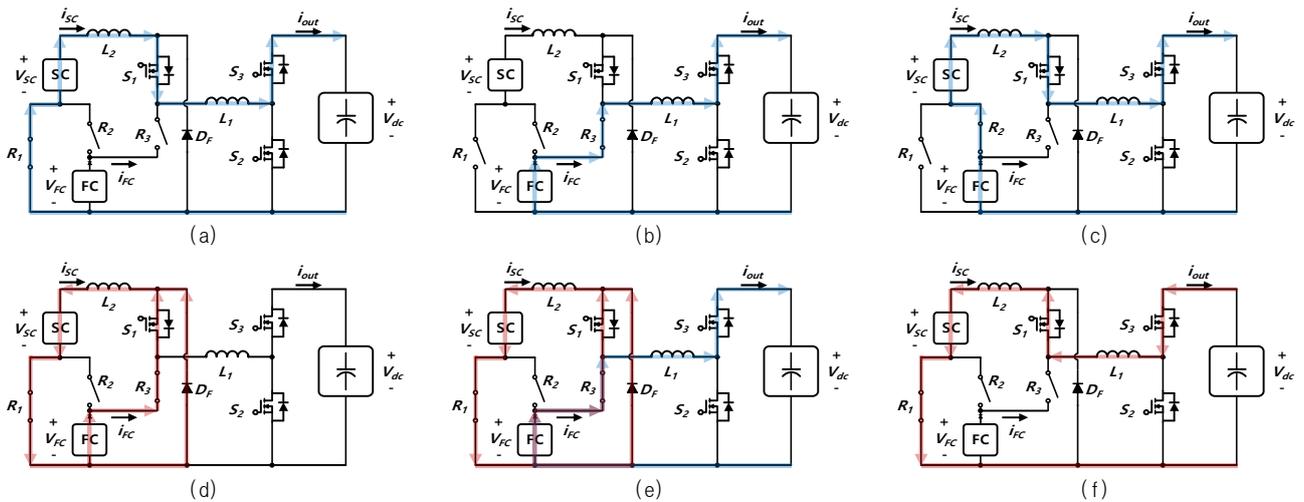


그림 3 통합형 DC-DC 컨버터 회로 동작 모드 (a) SC 단독 동작 모드 (b) FC 단독 동작 모드 (c) FC-SC 직렬 동작 모드 (d) 프리차지 동작 모드 (e) FC 동작 및 SC 충전 모드 (f) 회생제동 동작 모드

Fig. 3 Equivalent circuit for each circuit mode of DC-DC converter. (a) SC operation mode (b) FC operation mode (c) FC-SC serial operation mode (d) Pre-charge operation mode (e) FC operation & SC charge mode (f) Regenerative braking mode

2) FC 단독 동작 모드 : 그림 3(b)와 같이 R_3 의 turn-on 및 R_1 과 R_2 의 turn-off 동작을 통해 FC 단독 동작을 구현하며 SC 단독 동작 모드와 같이 S_2 , S_3 상보 스위칭을 통한 boost 컨버터 동작을 수행한다.

3) FC-SC 직렬 동작 모드 : 차량의 급가속/감속 및 고출력 요구 시 그림 3(c)와 같이 FC-SC 직렬 접속 동작 모드로 전환한다. FC-SC 직렬 동작 모드의 경우 R_2 의 turn-on 및 R_1 과 R_3 의 turn-off 동작을 통해 구현하며 boost 컨버터의 동작은 SC 및 FC 단독 동작 모드와 같다.

4) 프리차지 (Pre-charge) 동작 모드 : 차량 시동 및 운행 중 SC 방전 시 SC를 충전하기 위해 그림 3(d)와 같이 프리차지 동작 모드로 전환한다. R_1 과 R_3 의 turn-on 및 R_2 의 turn-off 동작을 통해 구현하며, S_1 및 환류 다이오드 (D_f)를 통해 buck 컨버터의 전류 제어를 수행하여 SC를 최대 전압까지 충전한다.

5) FC 동작 및 SC 충전 모드 : 그림 3(e)와 같이 R_1 과 R_3 의 turn-on 및 R_2 의 turn-off 동작을 통해 구현하며 FC는 V_{dc} 를 일정하게 유지하기 위한 전압 제어와 SC 충전을 위한 전류 제어를 동시에 수행한다.

6) 회생제동 동작 모드 : 차량 제동 및 감속 시 그림 3(f)와 같이 전류 제어를 통해 SC를 충전하는 회생제동 동작 모드로 전환한다. 그림 3(a)와 같이 R_1 의 turn-on 및 R_2 와 R_3 의 turn-off 동작을 통해 구현하며, 회생제동 동작을 고려하여 S_2 및 S_3 의 상보 스위칭 동작을 통해 buck 컨버터 동작을 수행한다.

3. 통합형 DC-DC 컨버터 동력원 용량 비율 설계 및 검증

3.1 통합형 DC-DC 컨버터 동력원 용량 비율 설계

본 절에서는 각 동력원의 최적 용량 비율을 선정하기 위해 FC 및 SC의 용량 비율에 따른 운전 조건 별 컨버터 효율을 비교 분석한다. FC 설계 시 정격 전압의 경우 FC의 직렬 stack 수에 영향을 받으며 정격 전류의 경우 병렬 stack 수에 영향을 받는다. 따라서 병렬 stack 증가 시 동일 전력 대비 도통 전류 증가로 인해 시스템 효율 측면에서 불리하므로 단일 직렬 stack 구조를 적용하여 FC 전압 (V_{FC}) 범위 설계를 진행

표 1 통합형 DC-DC 컨버터 시스템 사양

Table 1 Design specifications of integrated DC-DC converter

Parameters	Value
정격 출력 전력 (P_{rated})	120 [kW]
출력 전압 (V_{dc})	400 [V]
스위칭 주파수 (f_{sw})	30 [kHz]

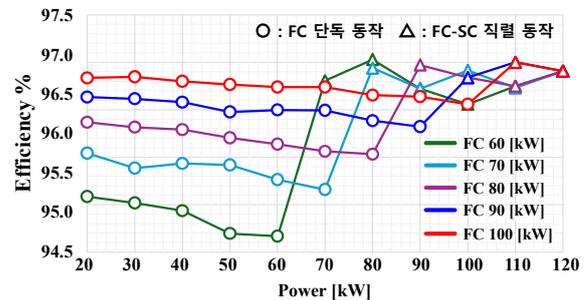


그림 4 10 [kW] 단위 부하 조건에 따른 효율 그래프

Fig. 4 Efficiency analysis for 10 [kW] unit power rate.

한다. FC 및 SC는 다양한 용량 비율 설계가 가능하며 각 동력원 용량에 따른 전압 범위 고려가 필요하다. SC 전압 범위의 경우 각 동력원의 직렬 접속 상황에서 V_{FC+SC} 가 V_{dc} 를 초과할 경우 boost 컨버터 동작 수행이 불가능하다. 따라서 동력원의 직렬 접속 동작을 고려하여 V_{FC+SC} 가 V_{dc} 를 초과하지 않는 380 [V] 조건에서의 효율을 비교 분석하여 동력원의 최적 용량 비율을 선정한다. 이때 표 1의 시스템 사양을 기반으로 손실 분석을 진행하며 컨버터에서 발생하는 주요 손실로 스위치 도통 손실 (P_{cond}), 스위칭 손실 (P_{sw}), 다이오드의 도통 손실 (P_{diode}), 인덕터의 철손 ($P_{L,core}$) 및 동손 ($P_{L,copper}$)을 고려하였다^[2].

따라서 FC 및 SC의 설계 용량 비율 및 10 [kW] 단위의 부하 조건에 따른 컨버터 효율 분석 결과는 그림 4와 같다. 이때 FC의 경우 주 동력원으로서 동작하기 위해 60 [kW] 이상의 설계 조건만을 고려하였다. 하지만 FC를 110 [kW] 이상 조건으로 설계하는 경우 V_{FC} 가 V_{dc} 이상으로 증가하게 되어 boost 컨버터 동작이 제한된다. 또한 SC의 50 [V] 이하 수준의 낮은 전압 범위로 인해 경부하 운전이 불가능하므로 FC의 용량 설계 조건은 60 - 100 [kW]로 선정한다. 이때 FC 설계 용량 중

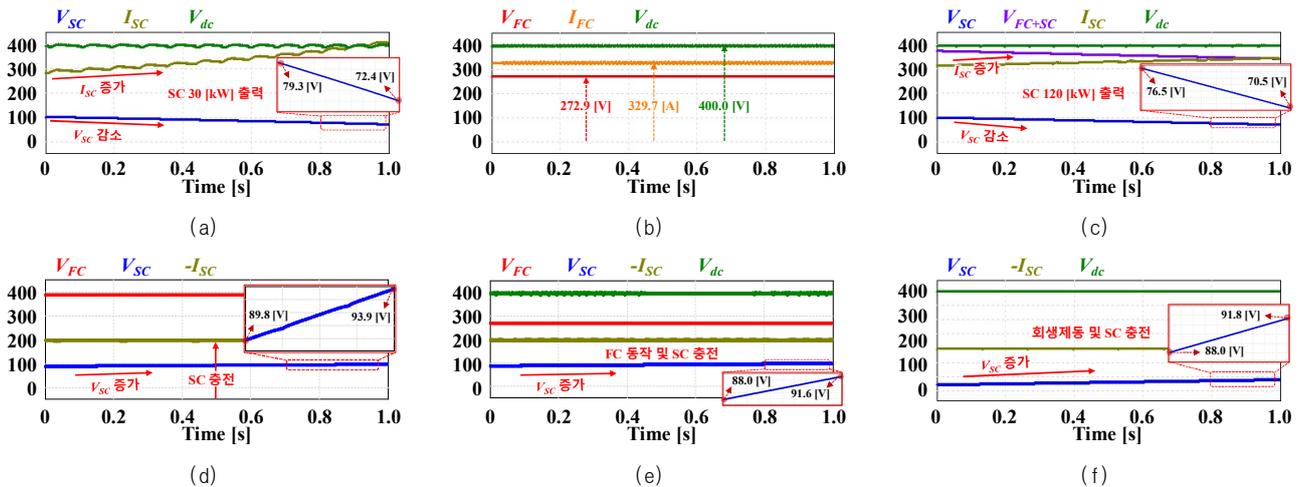


그림 5 통합형 DC-DC 컨버터 회로 동작 모드에 따른 시뮬레이션 파형 (a) SC 단독 동작 모드 (b) FC 단독 동작 모드 (c) FC-SC 직렬 동작 모드 (d) 프리차지 동작 모드 (e) FC 동작 및 SC 충전 모드 (f) 회생제동 동작 모드

Fig. 5 Simulation waveforms for each circuit mode of DC-DC converter. (a) SC operation mode (b) FC operation mode (c) FC-SC serial operation mode (d) Pre-charge operation mode (e) FC operation & SC charge mode (f) Regenerative braking mode

표 2 통합형 DC-DC 컨버터 설계 결과

Table 2 Design result of integrated DC-DC converter

Parameters	Value
V_{FC} 범위	273 - 388 [V]
V_{SC} 범위	62 - 106 [V]

60, 70 [kW] 조건에서 설계하는 경우 경부하 영역의 컨버터 효율이 96% 이상을 만족하지 못하므로 모든 부하 영역에서 96% 이상의 효율을 만족하는 80 - 100 [kW] 조건에서 설계된 FC를 비교한다. 100 [kW] 조건 FC 설계 시 평균 효율의 경우 96.77%로 가장 높은 효율을 보이며 90 [kW] 및 80 [kW] 조건으로 설계하는 경우의 평균 효율은 각각 96.61%와 96.44% 수준이다. 하지만 FC를 100 [kW] 조건으로 설계하는 경우 FC 직렬 stack 수 증가에 따라 기존 병렬 구조 토폴로지 대비 FC의 부피 측면에서 불리하다. 따라서 부하에 따른 효율 및 동력원의 부피를 고려하여 90 [kW]의 FC 및 30 [kW]의 SC를 선정한다.

3.2 동력원 설계 결과 검증 및 부피 비교/분석

본 절에서는 3.1절에서 선정된 각 동력원의 용량 비율을 기반으로 시뮬레이션을 통해 각 동작 모드의 정상 동작을 검증한다. 설계된 FC 및 SC의 전압 범위는 표 2와 같으며 차량 주행 동작을 고려한 각 동작 모드의 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같다. 그림 5(a), (b)는 각 동력원의 단독 동작 시 boost 컨버터의 정상상태 파형을 나타낸다. SC 단독 동작의 경우 30 [kW] 출력 및 SC 방전에 따른 V_{SC} 감소를 확인할 수 있으며 FC 단독 동작의 경우 90 [kW] 출력 및 V_{FC} 범위 만족을 확인할 수 있다. 그림 5(c)는 FC-SC 직렬 접속 모드 전환 시 boost 컨버터의 정상상태 파형을 나타내며 부하에 120 [kW]의 전력 공급 및 SC 방전에 따른 V_{FC+SC} 의 감소를 확인할 수 있다. 그림 5(d)는 프리차지 동작 시 buck 컨버터의 정상상태 파형을 나타내며 SC 충전에 따른 V_{SC} 증가를 확인할 수 있다. 그림 5(e)는 FC 동작 및 SC 충전 모드의 시뮬레이션 결과를 나타내며 FC를 통한 출력 측 전압제어 및 SC 측 전류제어가 동시에 수행된다. 그림 5(f)는 회생제동 동작 시 전류 제어를 통한 SC 충전 동작을 나타내며 이를 통해 V_{SC} 의 증가를 확인할 수 있다.

또한 90 [kW]의 FC 및 30 [kW]의 SC 설계 시 기존 병렬 구조 토폴로지의 각 동력원과 부피를 비교한 결과는 그림 6과

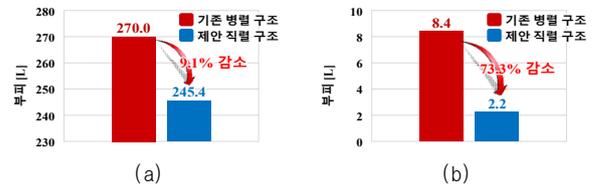


그림 6 FC 및 SC 설계 부피 비교 (a) FC 부피 (b) SC 부피
Fig. 6 Comparison of FC, SC designed volume. (a) FC volume (b) SC volume

같다. FC 부피의 경우 기존 토폴로지 대비 270.0 [L]에서 245.4 [L]으로 약 9.1% 부피가 저감되며 SC의 경우 8.4 [L]에서 2.2 [L]으로 약 73.3%의 부피 저감이 가능함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 FCEV용 120 [kW] 급 FC-SC 직렬 구조 전환이 가능한 통합형 DC-DC 컨버터 시스템을 제안하고 동력원 최적 용량 비율을 선정하였다. 각 동력원의 용량 비율에 따른 운전 조건 별 효율 분석을 통해 90 [kW] FC 및 30 [kW] SC를 선정하였다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 DC-DC 컨버터의 정상 동작을 확인하였으며 동력원의 부피 비교 분석 결과 기존 병렬 구조 대비 FC의 경우 9.1%, SC의 경우 73.3% 수준의 부피 저감을 확인하였다.

이 논문은 현대자동차의 지원을 받아 수행된 연구임 (수소전기차의 동력원 소형화를 위한 연료전지-슈퍼캐프 직렬 응용 통합형 전력변환기 개발)

참고 문헌

- [1] H. Zhao and A. F. Burke, "Fuel Cell Powered Vehicles Using Supercapacitors: Device Characteristics, Control Strategies, and Simulation Results", *Fuel Cells*, vol. 10, no. 5, pp. 879-896, 2010.
- [2] M. K. Kim, D. G. Woo, B. K. Lee, N. J. Kim, and J. S. Kim, "Loss Analysis of Power Conversion Equipment for Efficiency Improvement", *The Trans. Korean Inst. Power Electron.*, vol. 19, no. 1, pp. 80-90, Feb. 2014.