

수소연료전지 차량용 연료전지-슈퍼 커패시터 통합형 DC-DC 컨버터의 동력원 직렬 운전을 고려한 제어 방안

이상민*, 김현수*, 황윤성*, 강승현*, 권만재*, 이용휘**, 이병국†
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과*
 현대자동차 FC선행기술개발팀**

Control Method of Fuel Cell-Super Capacitor Integrated DC-DC Converter for Fuel Cell Electric Vehicle Considering Serial Operation of Power Source

Sang Min Lee*, 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 차량 (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)용 연료전지 (Fuel Cell, FC) - 슈퍼 커패시터 (Super Capacitor, SC) 통합형 DC-DC 컨버터의 직렬 접속 운전을 고려한 제어 방안을 제안한다. FC-SC 통합형 DC-DC 컨버터의 경우 FC-SC 직렬 접속 전환 시 입력 전압 상승에 따른 출력 전압 및 전류의 과도 상태 특성 개선을 위한 제어 방안이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 동력원 직렬 접속을 고려한 제어 방안을 제안한다. 차량 주행 동작을 고려한 PSIM 시뮬레이션을 통해 제안하는 제어 방안의 유효성을 검증한다.

1. 서론

일반적으로 수소연료전지 차량 (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)의 경우 수소연료전지 (Fuel Cell, FC) 및 배터리의 병렬 구조로 구성된다. 하지만 이러한 구조는 차량의 급가속 시 순간적인 출력 변화에 대한 대응이 제한된다. 따라서 FCEV의 동특성 문제를 해결하기 위해 단시간 높은 전력 출력이 가능한 슈퍼 커패시터 (Super Capacitor, SC) 사용이 요구되며 이를 적용한 FC, SC 병렬 구조의 연구 개발이 진행되고 있다.^[1]

하지만 FC, SC 병렬 구조의 경우 DC-link 커패시터 전압 범위를 만족하기 위해 FC의 부피가 증가하게 되며, SC 또한 FC 전압 범위에 의해 가용 SC 전압 범위가 결정되므로 동력원 부피가 증가하게 되는 단점을 갖는다. 동력원 부피 저감 방안으로 동력원별 DC-DC 컨버터 적용이 가능하지만 시스템 부피 측면에서 추가적인 저감 효과를 위해 동력원 직렬 운용 통합형 DC-DC 컨버터가 요구된다.

이에 따라 그림 1과 같은 DC-DC 컨버터 적용을 통해 동력원 소형화뿐만 아니라 동력원 직렬 접속 시 입력 전압 상승에 따른 컨버터 효율 증가의 장점을 가질 수 있다. 하지만 그림 1과 같은 구조의 경우 동력원 단독 출력 중 직렬 운전으로 출력 전환 시 PWM 동작 및 입력 전압 상승에 따른 출력 전압 (V_{dc})의 과도한 Overshoot가 발생할 수 있다. 이러한 동력원 직렬 접속 시 발생할 수 있는 문제 사항은 소자 정격의 최적화 설계 측면에서 불리하며, 제어기의 불안정한 동작을 유발할 수 있으므로 이를 보완하기 위한 제어 방안이 요구된다.

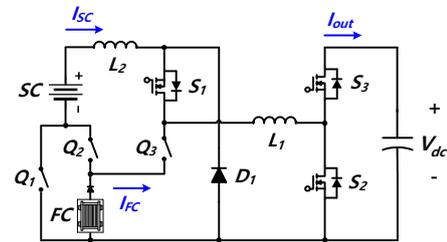


그림 1 FC-SC 통합형 DC-DC 컨버터 회로
 Fig. 1. Circuit of FC-SC integrated DC-DC converter.

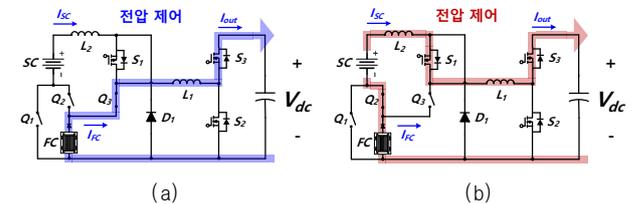


그림 2 FC-SC 통합형 DC-DC 컨버터의 모드별 동작
 (a) FC 단독 동작 (b) FC-SC 직렬 동작
 Fig. 2. Mode-specific operation of FC-SC integrated DC-DC converter.
 (a) FC operation (b) FC-SC serial operation

따라서 본 논문은 동력원 직렬 접속 전환 시 컨버터에서 발생할 수 있는 문제 사항을 보완하기 위해 소자 추가 구성을 통한 과도 상태 소프트 제어 기법 (Soft Serial Operation Control for Transient State, SSOC)을 제안한다. 차량 주행 동작을 고려해 120 [kW]급 FC-SC 통합형 DC-DC 컨버터 PSIM 설계 및 시뮬레이션을 진행하며, 제어 방안 적용 전/후 결과 비교를 통해 동력원 직렬 접속 전환 시 제안하는 제어 방안의 유효성을 검증한다.

2. SSOC 제어 시스템 설계

2.1 동력원 직렬 접속 전환을 고려한 시스템 설계

그림 2는 FC-SC 통합형 DC-DC 컨버터의 주 동력원인 FC 단독 동작 및 FC-SC 직렬 동작을 나타낸다. 동력원 직렬 접속 시 컨버터 입력 전압 상승 및 승압 동작에 의해 출력 전압이 과도하게 상승하게 된다. 이때 전류 동통 경로는 인덕터 L_1 과

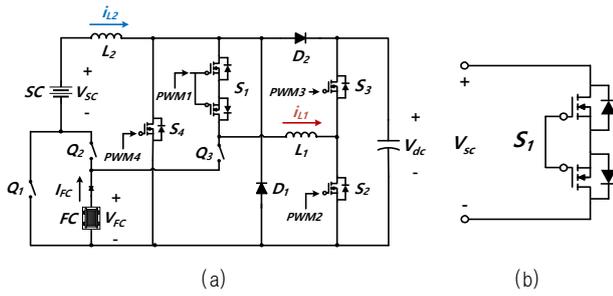


그림 3 SSOC 적용을 위한 FC-SC 통합형 DC-DC 컨버터 회로
 (a) 스위치 및 다이오드 추가 회로
 (b) Back to back 구조 스위치
 Fig. 3. Circuit of FC-SC Integrated DC-DC converter for SSOC.
 (a) Switch and diode added circuit
 (b) Back to back structural switch

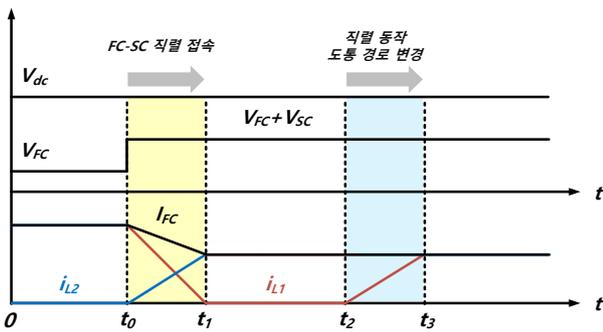


그림 4 SSOC 적용 시 동력원 직렬 접속에 따른 동작 과정
 Fig. 4. Operation process by power source series connection when applying SSOC.

L_2 가 직렬 연결됨에 따라 SC 측 전류 (I_{SC})가 급격하게 상승하게 된다. 하지만 컨버터는 동력원 직렬 접속 과정에서 스위치 S_2 및 S_3 의 상보 동작을 통한 전압 제어를 수행하므로 전류 변화에 대한 신속한 대응이 어렵다.

따라서 본 논문에서 제안하는 SSOC를 적용하기 위해 그림 3(a)와 같이 스위치 및 다이오드 추가를 통한 컨버터 구조 설계를 진행한다. 스위치 S_1 의 경우 컨버터의 동력원 직렬 접속 과정에서 역병렬 다이오드에 의한 폐회로 구성을 방지하기 위해 그림 3(b)와 같이 Back to back 구조를 적용한다. 또한 S_4 및 D_2 의 경우 직렬 모드 동작 시 전류 도통 소자가 아닌 직렬 접속 전환을 위한 전력반도체 소자이므로 낮은 정격의 소자를 적용할 수 있다.

2.2 제안하는 SSOC 동작 과정

그림 4는 제안하는 SSOC 적용 기반 그림 3의 FC-SC 통합형 DC-DC 컨버터의 동력원 직렬 접속에 따른 동작 과정을 나타낸다. 컨버터의 입·출력 전압 및 각 인덕터 전류를 표시하였으며 컨버터 동작에 사용되는 스위치에 따라 총 4가지 과정으로 구분할 수 있다.

i) 구간 $0 \sim t_0$ 는 FC 단독 동작 모드 구간이다. FC 특성을 고려한 I-V Curve에 따라 FC 전압이 결정되며 그림 3의 S_2 및 S_3 의 상보 동작에 따른 전압 제어를 통해 승압 동작을 수행한다. 이를 통해 DC-link 커패시터 및 부하에 일정한 출력 전압을 유지한다.

ii) 구간 $t_0 \sim t_1$ 은 FCEV의 동력원 직렬 접속 전환 과정을 나타낸다. SC 측으로 전류가 도통 되기 위해 인덕터 L_1 도통 전류 (i_{L1}) 크기를 감소하고 L_2 도통 전류 (i_{L2}) 크기를 증가시

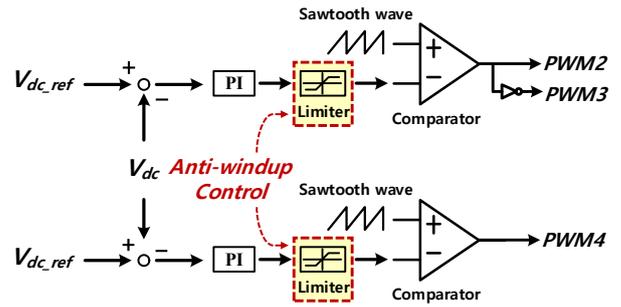
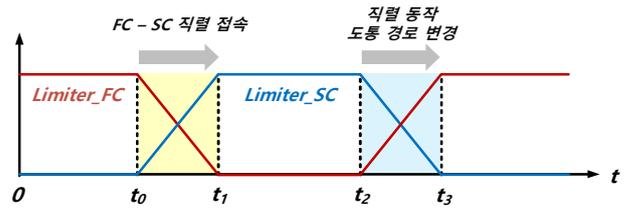
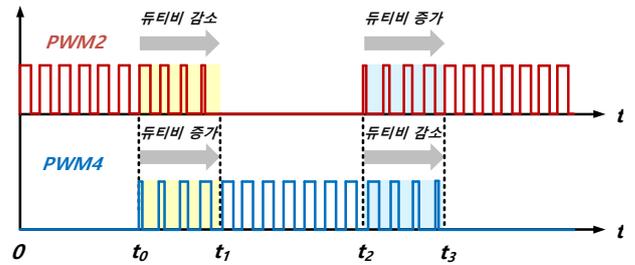


그림 5 SSOC를 적용한 전압 제어 블록도
 Fig. 5. Voltage control block diagram applying SSOC.



(a) SSOC 적용 시 제어 오차 상한

(a) Upper control error limit when applying SSOC



(b) 제어 오차 상한 제한에 따른 PWM 변화

(b) PWM change due to upper control error limit

그림 6 SSOC 적용에 따른 전압 제어 과정
 Fig. 6. Voltage control process according to SSOC.

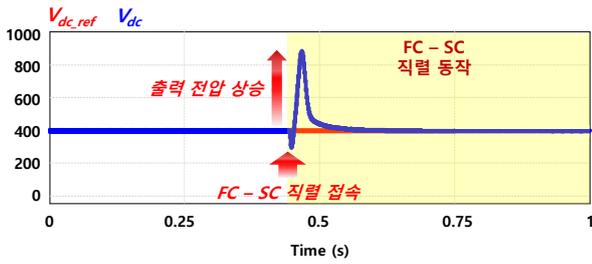
킨다. 이 과정에서 S_2 및 S_3 의 상보 동작을 통한 컨버터의 전압 제어를 비활성화하므로 일정한 출력 전압을 유지하는 것이 불가능하다. 따라서 S_4 및 D_2 를 이용한 전압 제어를 통해 승압 동작 및 일정한 출력 전압 유지를 수행한다.

iii) 구간 $t_1 \sim t_2$ 는 FC-SC 직렬 동작 모드를 나타낸다. 그림 3(a)의 S_4 및 D_2 의 상보 동작에 따른 전압 제어 및 승압 동작을 통해 DC-link 커패시터에 일정한 출력 전압을 유지한다. 하지만 2.2절에서 언급한 바와 같이 S_4 및 D_2 는 직렬 접속 전환을 위한 소자이다. 따라서 동력원 직렬 접속 후 안정된 전압 및 전류가 출력될 경우 S_2 및 S_3 를 이용하는 승압 동작 회로도 도통 경로를 변경하는 과정이 요구된다.

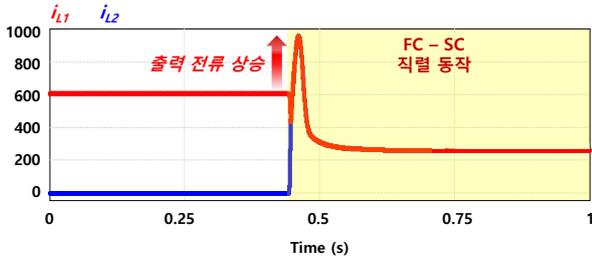
iv) 구간 $t_2 \sim t_3$ 는 S_4 및 D_2 를 통한 직렬 접속 전환 후 전류 도통 경로 변경 과정을 나타낸다. S_4 및 D_2 의 상보 동작에 따른 승압 동작을 비활성화하고 S_2 및 S_3 의 상보 동작에 따른 전압 제어 및 승압 동작을 통해 i_{L1} 크기를 증가시키며 DC-link 커패시터에 일정한 출력 전압을 유지한다.

2.3 SSOC를 통한 과도 상태 제어 방법

그림 5와 그림 6은 SSOC 적용에 따른 전압 제어 블록도와 제어 오차 상한 및 PWM 신호를 나타낸다. 구간 $t_0 \sim t_1$ 의 경우 2.2절에서 설명한 바와 같이 동력원 직렬 접속 전환 과정에서 i_{L1} 감소를 위해 그림 5와 같이 스위치 S_2 , S_3 제어기의 비활성

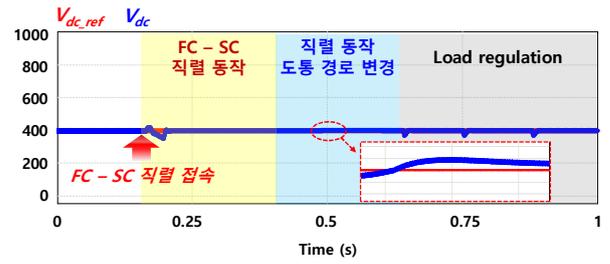


(a) SSOC 적용 전 출력 전압

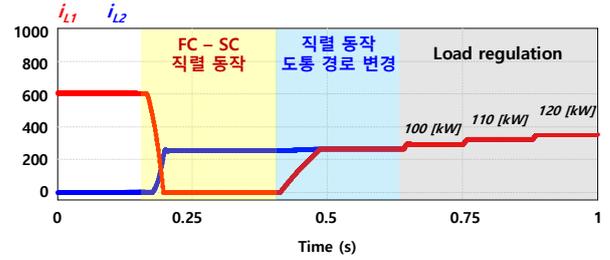


(b) SSOC 적용 전 인덕터 전류

그림 7 SSOC 적용 전 출력 전압 및 인덕터 전류 시뮬레이션 파형
Fig. 7. Simulation waveforms of output voltage and inductor current before SSOC.



(a) SSOC 적용 후 출력 전압



(b) SSOC 적용 후 인덕터 전류

그림 8 SSOC 적용 후 출력 전압 및 인덕터 전류 시뮬레이션 파형
Fig. 8. Simulation waveforms of output voltage and inductor current after SSOC.

표 1 FC-SC 통합형 DC-DC 컨버터 설계 사양
Table 1 Specifications of FC-SC integrated DC-DC converter.

Parameter	Value
출력 전력 (P_{out})	120 [kW]
출력 전압 (V_{dc})	400 [V]
FC 전압 (V_{FC})	150 [V]
SC 전압 (V_{SC})	200 [V]
인덕터 (L_1, L_2)	1.76 [mH]
DC-link 커패시터 ($C_{dc-link}$)	600 [μ F]
스위칭 주파수 (f_{sw})	30 [kHz]

화를 통해 S_2 의 듀티비를 감소시킨다. 또한 S_4 제어기의 지령 전압 (V_{dc_ref}) 만족을 위해 듀티비를 증가하여 V_{dc} 를 유지한다. 이때 각 제어기에 입력되는 값은 V_{dc} 로 동일하지만 V_{dc_ref} 가 서로 다르므로 각 적분 제어기의 오차 누적에 따른 제어기 포화 문제가 발생할 수 있다. 높은 초기 듀티비를 갖는 PWM 신호를 인가할 경우 출력 전압 Overshoot를 발생시킬 수 있으며, 적분 제어기의 누적된 오차가 감소할 때까지 전압 제어가 불가하여 과도 상태 동안 불안정한 출력을 유발한다. 따라서 이를 개선하기 위해 안티 와인드업 제어 기법 (Anti-Windup Control Method)을 적용한다. 전압 제어 과정에서 발생하는 적분 제어기의 오차 상한을 결정하며 시간 경과에 따라 상한의 크기를 감소 및 제한하여 과도한 오차 누적을 방지한다. 이에 따라 그림 6(b)와 같이 각 스위치의 정상적인 PWM 전환 동작 과정이 가능하다.

3. 시뮬레이션을 통한 SSOC 유효성 검증

표 1은 제안하는 SSOC 제어 방안 적용 및 유효성 검증을 위한 120 [kW]급 FC-SC 통합형 DC-DC 컨버터의 PSIM 시뮬레이션 조건을 나타낸다. 동력원 직렬 접속 시 SSOC 적용 전/후에 따른 시뮬레이션 결과는 각각 그림 7, 8과 같다. SSOC를 적용하지 않을 경우 그림 7과 같이 동력원 직렬 접속을 위한 스위치 Q_2, Q_3 의 턴 온/오프 시 V_{dc} 는 약 880 [V] 수준의 Overshoot가 발생함을 확인하였다. 이는 동력원 직렬

접속 시 SC 측으로 전류 도통 경로 변화로 인해 발생하며 전력반도체 소자의 소손을 유발할 수 있다. SSOC를 적용할 경우 그림 8과 같이 동력원 직렬 접속 전환 과정에서 SSOC 적용 전 대비 V_{dc} 변동 폭이 크게 개선되는 것을 확인할 수 있다. 또한 i_{L1} 및 i_{L2} 전류는 직렬 접속 전환에 따른 PWM 듀티비 변화에 의해 점진적으로 감소 및 증가하는 형태를 확인할 수 있다. 이를 통해 제안하는 SSOC 적용 및 FC-SC 직렬 모드 전환 시 과도 상태 Overshoot 특성 개선 효과를 검증하였으며, 이후 부하 가변에 따른 FC-SC 직렬 모드 동작 조건에서의 Load regulation 정상 출력을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 FC-SC 통합형 DC-DC 컨버터의 동력원 직렬 접속을 위한 제어 방안을 제시한다. 동력원 직렬 접속 과정에서 발생할 수 있는 컨버터의 고려 사항 분석을 통해 제어 방안의 필요성을 분석하였으며, 동력원 전환 시 안정적인 과도 상태 동작을 위한 SSOC 설계를 진행하였다. PSIM 시뮬레이션 결과를 통해 SSOC 적용 시 SC 측 전류의 급격한 변화를 방지하며 V_{dc} 의 변동 폭 개선을 확인하였다. 이를 통해 FC-SC 통합형 DC-DC 컨버터의 동력원 직렬 운전 시 제안하는 제어 방안 적용의 유효성을 검증하였다.

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

참고 문헌

[1] Afkar, Mohammad, et al. "Generalization of a DC-DC Modular Converter Topology for Fuel Cell Applications." *IEEE Transactions on Industry Applications* 58(2), pp.2255-2267, 2022.