

2상 DM 커플드 수소연료전지 컨버터 DCM 동작에서의 전향 보상 제어법

정성욱¹⁾, 이동인¹⁾, 권경현¹⁾, 장동혁²⁾, 최인석²⁾, 윤한신¹⁾
 인천대학교 전기공학과¹⁾

A Forward Compensation Control Method In DCM Operation Of 2 Phase DM Coupled Fuel Cell DC-DC Converter

Seong-Wook Jeong¹⁾, Dong-In Lee¹⁾, Gyeoung-Hyun Kwon¹⁾,
 Dong-Hyuk Jang²⁾, In-Seok Choi²⁾, Han-Shin Youn¹⁾
 Department of Electrical Engineerin, Incheon National University¹⁾

ABSTRACT

본 논문에서는 수소연료전지 자동차용 2상 DM 커플드 Fuel Cell DCDC Converter(FDC)의 DCM 동작 시 제어 방법에 대해서 다룬다. FDC를 Closed Loop Control 할 경우, DCM동작과 CCM동작에서의 제어 동특성이 매우 상이하다는 문제점이 발생한다. 일반적인 Boost 컨버터의 경우 정상상태 시비율을 전향보상기법을 통해 동특성 개선이 가능하나, DM 커플드 Boost컨버터의 경우 DCM 동작 영역에서 정상상태 시비율 도출 및 전향 보상이 매우 어렵다. 본 논문에서 제안하는 제어방법은 3차원 Look-Up Table을 적용해 시비율 전향 보상을 하여, DCM 영역에서의 제어 성능을 개선하고자 한다.

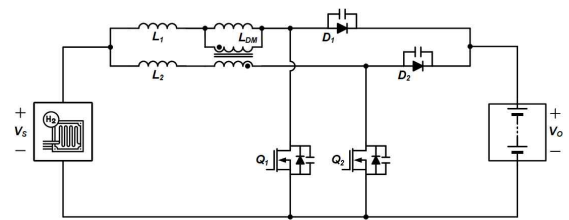


그림 1. 제안하는 제어 기법이 적용되는 FDC 회로도
 Fig. 1. FDC topology for proposed control technique

2. 본 론

1. 서 론

최근 친환경 자동차 시장이 확장됨에 따라 전기자동차와 더불어 수소연료전지 자동차 (Fuel Cell Electric Vehicle) 연구가 활발히 진행되고 있다. 수소연료전지 자동차의 고전압 배터리 충전을 위한 전력변환장치로 수소연료전지용 DC-DC 컨버터 (Fuel Cell DC-DC Converter, FDC)가 있고 FDC Topology 경우, 주로 Boost Converter를 채택하는데, 그림 1과 같이 연료 전지 측의 전류 리플을 저감하기위해 2상 인터리빙 방식을, 고주파 노이즈 저감을 위해 DM 커플드 인덕터를 적용한다. 해당 컨버터를 전류 제어기를 통해 폐루프 제어를 할 경우, DCM 동작과 CCM 동작에서의 제어 동특성이 매우 상이하다는 문제점이 발생한다. CCM 동작 시 응답성이 빠르는데 비해, DCM 동작 시 지령 추종이 매우 느리다. 일반적인 부스트 컨버터의 경우 정상상태 시비율을 전향 보상을 통해 동특성 개선이 가능하나, DM 커플드 부스트의 경우 DCM 영역에서 정상상태 시비율 도출 및 전향보상이 매우 어렵다는 단점이 있다¹⁾. 이를 보완하기 위해 별도의 3차원 Look-Up Table을 적용해 전향 보상을 할 수 있지만, FDC의 경우 입력측 전압의 변동 범위가 커 3차원 Look-Up Table이 필요하고, 이로 인해 MCU의 연산 시간에 부담이 된다. 본 논문에서는 2상 DM 커플드 FDC DCM 동작에서의 제어 동특성 향상과 MCU 연산량을 저감을 위해 간단한 보정을 통해 2차원 Look-Up Table을 3차원 Look-Up Table 화하여 전향 보상을 한 제어 기법을 제안한다.

2.1 시비율 전류제어기 설계

제안하는 제어 기법이 적용되는 FDC 폐루프 제어 방식은 인덕터전류 제어 방식이며, 전류 PI제어기 플랜트 모델 설계는 누설 인덕턴스 기반으로 설계하였다. 일반적인 부스트 컨버터의 소신호 모델링을 통한 듀티 변화에 따른 인덕터 전류의 전달함수의 식은 식 (1)과 같이 유도될 수 있다.

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L}{d} = \frac{2V_o}{R_o(1-D)^2} \times \frac{1 + \frac{sR_oC_o}{2}}{1 + \frac{sL}{R_o(1-D)^2} + \frac{s^2LC}{(1-D)^2}} \approx \frac{V_o}{sL} \quad (1)$$

2상 DM 커플드 FDC 의 사양 및 식(1)에서 전개한 전달함수를 통해 도출된 제어기 이득값은 표 1과 같다.

표 1. 2상 DM 커플드 FDC parameter.
 Table 1. 2 Phase DM Coupled FDC parameter

항목	파라미터
입력 전압 (V_S)	150-620V
출력 전압 (V_O)	150-828V
출력 전력 (P_O)	55kW
DM 커플드 인덕턴스 (L_{DM})	70μH
누설 인덕턴스 (L_{lkg})	20μH
스위칭 주파수 (f_{sw})	50kHz
K_p	0.00015
K_i	0.01
K_a	1 / 0.0001

2.2 Look-Up Table 전향 보상법

부스트 컨버터의 시비율 제어 문제점은 DCM (불연속 전도 모드) 동작과 CCM (연속 전도 모드)의 동특성이 상이하다는 점이다. 이는 DCM 동작과 CCM 동작의 듀티비를 구하는 과정이 다르기 때문인데, CCM 동작의 듀티비는 입력 전압과 출력 전압만이 관여하는데 비해, DCM 동작의 듀티비는 입력전압과 출력전압뿐만 아니라 출력전류도 관여하기 때문이다. DM 커플드 부스트 컨버터의 경우 DCM 동작에서 정상상태 시비율 도출 및 전향 보상이 매우 어렵다는 단점이 있어 이를 개선하기 위해 전류 제어기에 Look-Up 테이블을 통해 시비율 전향 보상한다. Look-Up 테이블의 경우 입력전압, 출력전압, 출력전류를 변수로 하는 3차원 Look-Up 테이블이나, 간단한 보정 방법을 통해 2차원 Look-Up 테이블을 3차원 Look-Up 테이블로 보정 가능하다.

$$K_{DFFGAIN} = V_{out} / V_{OSEN} \quad (2)$$

$$V_{INCORR} = V_{INSEN} \times K_{DFFGAIN} \quad (3)$$

$$i_{LCORR} = i_{LSEN} \times K_{DFFGAIN} \quad (4)$$

V_{OSEN} , i_{LSEN} 은 각각 출력전압 센싱값과 한 상의 인덕터 전류 센싱값을, V_{INCORR} , i_{LCORR} 은 보정된 입력전압과 보정된 한 상의 인덕터 전류 센싱값을 의미한다. 식 (2)와 같이, 테이블의 기준 출력 전압과 실제 출력 전압의 비를 도출한다. 식 (3), 식(4)와 같이, 입력전압 및 인덕터전류를 $K_{DFFGAIN}$ 을 곱하여 보정하고 전향 보상 듀티값을 그림 2 와 같이 기존 전류 제어기에 적용한다.

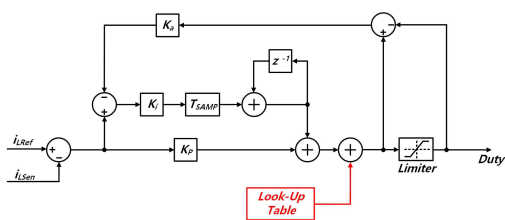


그림 2. 제안하는 제어 기법이 적용되는 제어기 블록도
Fig. 1. Block Diagram for proposed control technique

3. 시뮬레이션

보정된 3차원 Look-Up 테이블을 통해 전향 보상이 되지않고 입력전압이 저전압일 경우 듀티값이 변화해도 인덕터 전류는 변화하지않는 현상이 일어난다. 그림 3 (a),(b) 과 같이 입출력 전압 전달비가 2보다 작은 구간에서 발생하며, 10A 이하의 경부하 동작 시 시비율 제어가 불가능하다. 시뮬레이션 전류 지령은 실제 동작에서 돌입전류가 발생하는 것을 방지하기 위해 Soft Start 기법을 사용하였다.

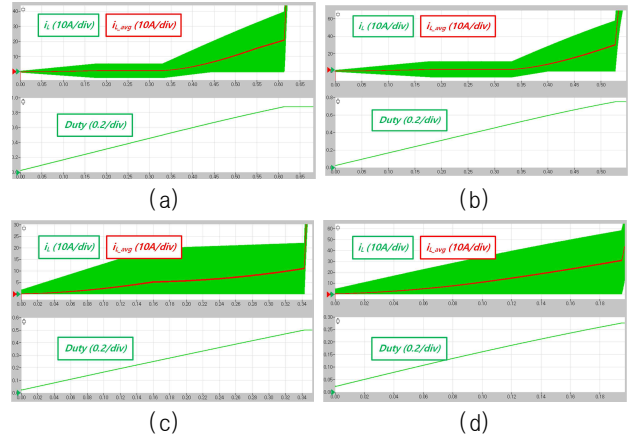


그림 3. (a) $V_{in}=100V/V_{out}=828V$, (b) $V_{in}=207V/V_{out}=828V$, (c) $V_{in}=414V/V_{out}=828V$, (d) $V_{in}=550V/V_{out}=828V$ DCM 동작특성
Fig. 3 (a) $V_{in}=100V/V_{out}=828V$, (b) $V_{in}=207V/V_{out}=828V$, (c) $V_{in}=414V/V_{out}=828V$, (d) $V_{in}=550V/V_{out}=828V$ DCM Operating Characteristic

Look-Up 테이블을 통해 개선된 시비율 제어 성능 검증은 아래 그림 4와 같이 검증하였다.

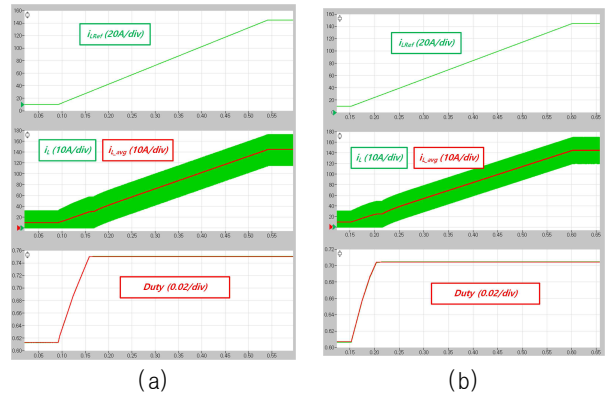


그림 4. (a) $V_{in}=207V/V_{out}=828V$, (b) $V_{in}=207V/V_{out}=700V$,
Fig. 4. (a) $V_{in}=207V/V_{out}=828V$, (b) $V_{in}=207V/V_{out}=700V$,

4. 결론

본 연구는 2상 DM 커플드 Fuel Cell DC-DC Converter의 DCM 동작에서의 시비율 제어 개선을 위해 3차원 Look-Up 테이블을 활용하여 듀티를 전향 보상하는 제어 기법을 제안한다. 이를 통해 DCM 동작에서 듀티가 변화해도 전류가 변하지 않는 현상을 해결 할 수 있고 간단한 보정을 통하여 2차원 테이블을 3차원화하여 Microcontroller의 연산시간을 저감 시킬 수 있다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-002451481218210382000). 이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20019386)

참고 문헌

- [1] Kim, Dong-Hee, Choe, Gyu-Yeong, Lee, Byoung-Kuk, "Analysis of Interleaved Boost Converter at DCM for Fuel Cell Applications" Proceedings of the KIEE Conference, 2009.07a pp. 1035 - 1036, July. 2009.