

연료전지 스택진단용 양방향 컨버터의 설계 및 제어기법

제갈준혁, 최봉연, 박정민, 박현석*, 원충연
성균관대학교, 현대오트론*

Design and Control Method of the Fuel Cell Stack Diagnostic Bi-Directional Converter

Jun Hyeok Jegal, Bong Yeon Choi, Jung Min Park, Hyun Seok Park*, Chung Yuen Won
Sungkyunkwan University, Hyundai-autron*

ABSTRACT

본 논문에서는 연료전지 스택진단용 양방향 컨버터의 설계 및 제어기법을 제안한다. 스택진단용 컨버터는 교류전류 제어를 위한 양방향 DC/DC 컨버터를 사용하였으며 컨버터의 전류를 교류로 제어하기 위한 전류 제어기법이 요구된다. 정확한 전류 제어를 위해 dq 변환을 통해 전류 제어를 수행하였다. 본 논문에서 사용한 제어기법을 통해 넓은 입력전압 범위에서도 충전, 방전으로 연료전지에 교류 전류를 공급하여 연료전지의 전압 변화를 확인함으로써 연료전지 스택의 상태를 진단할 수 있다. 제안하는 컨버터의 제어기법에 대한 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였으며 1.5kW급 스택진단용 양방향 DC/DC 컨버터의 설계 기법을 제안하였다.

1. 서론

연료전지 스택의 고장진단 방법으로는 스택의 전류와 각 셀의 전압 값을 측정하고 그 측정된 값을 계산함으로써 스택의 고장 여부를 판단하는 것이었다. 하지만 이러한 방법을 이용할 경우, 수백 개의 스택 셀 전압을 2~4개 단위로 측정하기 때문에 100개 이상의 측정 채널이 필요한 단점이 있다. 또한, 스택진단 시스템을 복잡하게 만들고 신뢰성을 저하시킬 뿐만 아니라 가격 상승의 요인이 된다.^[1]

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 THDA(전 고조파 왜율 분석) 방법이 있다. THDA 방법은 연료전지 스택에 깨끗한 교류전류를 주입하고 스택의 양단에 전압을 측정하여 주입된 교류전류의 THD를 구함으로써 연료전지 스택의 상태를 진단하는 방법이다.

본 논문에서는 이러한 방법을 수행하기 위해 그림 1과 같이 양방향 DC/DC 컨버터를 사용하여 전류를 교류로 제어함으로써 스택의 상태를 진단할 수 있다. 스택진단용 양방향 DC/DC 컨버터의 충전, 방전 제어를 위해 인덕터와 커패시터 값을 설계하고 인덕터에 흐르는 전류를 측정하여 교류로 제어함으로써 연료전지의 스택진단을 수행할 수 있다. 또한, 스택에 교류전류를 주입하기 위해 컨버터의 출력전류를 리플을 포함하고 있는 형태의 기존 전류에서 깨끗한 교류전류 형태로 제어 함으로써 큰 입력전압 범위에서도 안정적으로 전압이 제어되었다. 본 논문에서 제안하는 제어방식에 대한 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였으며, 1.5kW급 연료전지 스택진단용 양방향 DC/DC 컨버터의 설계 기법을 제안하였다.

2. 본론

2.1 시스템 구성

그림 1은 양방향 DC/DC 컨버터의 구성으로서 스위칭 주파수는 100kHz이고 출력단 커패시터 C_o 의 전압 V_{rated} 은 700V이며, 저전압 측의 연료전지(Fuel Cell) 전압은 450V이다. 인덕터의 전류를 측정하여 인덕터에 흐르는 전류를 교류전류의 형태로 제어할 수 있도록 구성한다.

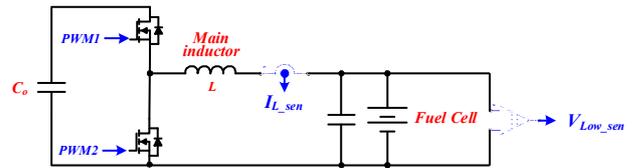


그림 1 양방향 DC/DC 컨버터의 구성
Fig. 1 The configuration of bi-directional DC/DC converter

표 1 설계 시 고려되는 변수
Table 1 Parameters for the design

Parameters	Value	Symbol
Capacitor rated voltage	700V	$[V_{rated}]$
Capacitor voltage ripple	5%	$[r]$
Fuel Cell output voltage	450V	$[V_{DC}]$
Inductor current	3.53A	$[I_{rms}]$
Inductor max current ripple	15%	$[r_i]$
Main inductance	2.84mH	$[L]$
Usable duty ratio	30%	$[\%P_{WDM}]$

2.2 양방향 컨버터의 제어기법

그림 2는 본 논문에서 제안하는 양방향 DC/DC 컨버터의 제어 블록도를 나타낸다. 먼저 인덕터에 흐르는 전류를 측정하여 APF(전역 통과 필터)와 dq 변환 과정을 통해 인덕터의 전류를 d 축과 q 축 성분으로 분해하였다. q 축과 d 축 전류는 인덕터에 흐르는 교류전류의 크기를 제어하기 위해 사용된다. 이 때, 영 전류 제어지점을 설정하기 위한 피드 포워드를 V_i/V_o 의 값

으로 보상하여 스위칭 신호를 발생함으로써 컨버터의 전류를 교류전류의 형태로 제어하도록 한다.

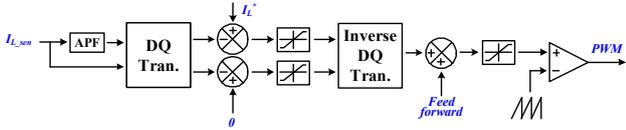


그림 2 제안하는 양방향 컨버터의 제어 블록도
Fig. 2 Proposed block diagram of bi-directional

2.3 양방향 DC/DC 컨버터의 설계

출력단 커패시터의 최소용량 설계를 위해 커패시터의 전압 방정식을 정리하여 식 (1)과 같이 인덕터 전류 I_{rms} , 연료전지 전압 $V_{DC-link}$, 정격전압의 변동 Δv , 인덕터 전류 주파수 f_i , 정격전압 V_{rated} 의 관계를 통해 산출할 수 있다.

$$C > \frac{1}{\Delta v} \int i_c dt = \frac{I_{rms} \cdot V_{DC-link}}{\frac{\Delta v}{2} \cdot f_i \cdot V_{rated}} = 43.5 \mu F \quad (1)$$

컨버터의 인덕터를 설계하기 위해서는 최대 전류 리플 Δi , 인덕터 전압 v_L , 최대 듀티 D_{max} 가 필요하다. 먼저 최대 전류 리플 Δi 은 인덕터 전류 I_{rms} 와 전류 리플 r_i 의 관계로부터 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta i = I_{rms} \sqrt{2} \cdot r_i = 0.749 A \quad (2)$$

인덕터 전압 v_L 은 정격전압 V_{rated} 과 전압리플 r 의 관계로부터 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_L = V_{rated} \left(1 + \frac{r}{2}\right) = 717.5 V \quad (3)$$

최대 듀티 D_{max} 는 연료전지 전압 $V_{DC-link}$, 정격전압 V_{rated} , 전압리플 r , 가용 듀티비 $\%P_{PWM}$ 를 통해 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{max} = \frac{V_{DC-link}}{V_{rated} \left(1 - \frac{r}{2}\right)} + \frac{\%P_{PWM}}{2} = 0.81 \quad (4)$$

인덕터 L 의 설계를 위해 인덕터 방정식을 전개하여 식 (5)로 나타낼 수 있으며 식 (5)을 인덕터에 관한 식으로 정리하면 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다. 설계된 인덕터 식 (6)을 이용하여 인덕턴스 값을 산출하기 위해 식 (2), (3), (4)의 값을 이용하면 2.84mH의 인덕턴스 값을 얻을 수 있다.

$$\Delta i = \frac{1}{L} \int V dt = \frac{1}{L} (V_{in} - V_{out}) \frac{D_{max}}{f_{sw}} \quad (5)$$

$$L = \frac{(v_L - V_{DC-link}) D_{max}}{f_{sw} \cdot \Delta i} = 2.84 mH \quad (6)$$

2.4 시뮬레이션

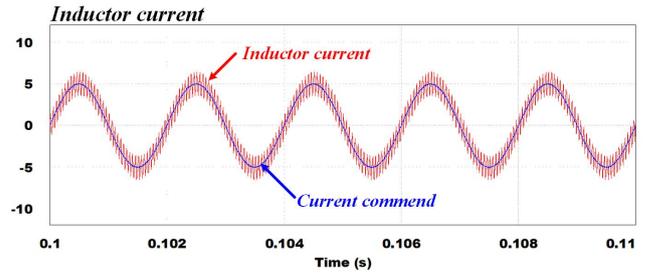


그림 3 스택진단기용 양방향 컨버터의 인덕터 전류 파형
Fig. 3 Inductor current waveform of the fuel cell stack diagnostic bi-directional converter

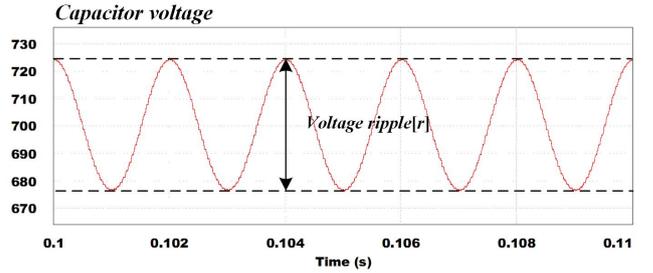


그림 4 커패시터 전압리플 파형
Fig. 4 Capacitor voltage ripple waveform

그림 3은 인덕터 전류 파형과 지령전류 값으로 설계 시 고려된 전류리플 내에서 전류제어가 수행되는 것을 확인하였다. 커패시터의 전압 또한 그림 4와 같이 700V를 기준으로 3.5%로 설계 시 고려한 5% 리플 이하로 동작하는 것을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 양방향 DC/DC 컨버터를 이용한 연료전지 스택진단 제어기법을 제안하였다. 제안하는 방식은 컨버터의 전류를 교류로 제어하기 위한 전류 제어기법이 필요하다. 전류 제어를 위해 d q 변환을 사용하여 전류제어를 수행하였다. 양방향 컨버터의 설계를 위해 수식적으로 분석하였고, 출력전압 리플과 인덕터 전류의 리플을 고려하였다. 제안하는 설계 방법과 사용한 전류제어 기법은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임
(No. 2014R1A2A2A05006744)

참 고 문 헌

- [1] H. Hu, S. Harb, J. Shen, and I. Batarseh, "A Review of Power Decoupling Techniques for Microinverters With Three Different Decoupling Capacitor Locations in PV Systems", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 6, pp. 2711-2726, Jun. 2013.
- [2] F. Carichhi, F. Crescimbeni, F. Giulii Capponi "Study of bi directional buck boost converter topologies for application in electrical vehicle motor drives," in Proc. IEEE Applied Power Electron., 1998, pp. 287-293.