

연료전지 시스템용 전력변환기(PCS) 회로 및 제어방식에 따른 저주파 리플 분석

김중수*, 강현수*, 이병국*, 이원용**
 성균관대학교 정보통신공학부*, 에너지기술연구원 고분자연료전지연구단**

Analysis of the Low Frequency Ripple according to a Power Conditioning System Topology and s Control Strategy for the Fuel Cell System Applications

Jong-Soo Kim*, Hyun-Soo Kang*, Byoung-Kuk Lee*, Won-Yong Lee**
 *School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University,
 **Polymer Electrolyte Fuel Cell Research Center, Korea Institute Energy Research (KIER)

Abstract - 본 논문에서는 연료전지 시스템에서 발생하는 저주파 리플의 전달과정을 분석하고, PCS 회로 및 인버터 제어방식에 따른 저주파 리플 영향을 비교 분석한다. 부스트 컨버터와 풀브리지 컨버터의 입력전류 고조파 분포와 인버터 PWM 스위칭 방식에 따른 입력전류에서의 영향을 고조파 분포 및 저주파 리플 측면에서 분석한다. 풀브리지 컨버터에서 전달되는 저주파 리플 크기가 상대적으로 작은 것을 확인하고, PWM 스위칭 방식은 저주파 리플에 영향을 주지 않는다는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

부스트 컨버터의 정상상태 입력전류 파형은 직류 항과 삼각주기파로 나눌 수 있다. 삼각파를 기함수 대칭으로 축이동하여 푸리에 급수 전개하면 식 (1)과 같다.

$$f(n) = \left(\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,5,9..} \frac{1}{n^2} \right) - \left(\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=3,7,11..} \frac{1}{n^2} \right) \quad (1)$$

여기서, $a_n = a_0 = 0; b_n = 0$ for even
 고조파 분포는 기본파와 부스트 컨버터의 스위칭 주파수인 f_{sw} 의 홀수 차수 고조파로 나타나며, 저주파리플은 존재하지 않는다.

풀브리지 컨버터는 2차측 정류단의 영향으로 $2f_{sw}$ 의 정류 리플을 가지며, 푸리에 급수 전개하면 짝수차수 고조파 분포를 갖는다. 부스트 컨버터와 같이 저주파 리플은 존재하지 않는다.

2.2 단상 풀브리지 인버터

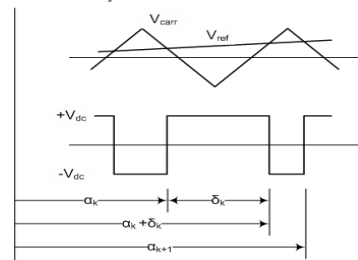
다양한 인버터 스위칭 방법 중 정현파 출력을 위해 SPWM 방식을 사용하였다. 출력 파형의 주파수 분포와 입력 DC링크 주파수 분포를 분석하였다.

2.2.1 바이폴라 PWM과 유니폴라 PWM의 고조파 분석

바이폴라 SPWM은 반송파와 기준파를 비교해서 PWM 출력하는 방법이며 그림 4와 같다. P개의 펄스에 대한 PWM출력 푸리에 급수는 식 (2)와 같다 [5].

$$V_n = \frac{V_{dc}}{n\pi} \sum_{k=1}^p (\cos n\alpha_k + \cos n\alpha_{k+1} - 2\cos n(\alpha_k + \delta_k)) \quad (2)$$

고조파의 크기는 크기 변조비 m_a 의 함수이며, 60Hz 기본파 후 첫 번째 고조파는 주파수 변조비 m_f 군으로 나타난다.



<그림 4> 바이폴라 PWM에 의한 출력 PWM 전압

유니폴라 SPWM은 바이폴라 SPWM에서 기준파의 180° 위상차를 갖는 또 다른 기준파가 반송파와 같이 비교된다. 유니폴라 PWM 방식은 독립된 폴전압의 차로 나타나기 때문에 기본파 60Hz 이후의 고조파는 두 배의 스위칭 주파수 효과를 갖는 m_f 의 2배수 주파수 군으로 구성된다.

2.2.2 DC 링크 리플

순수 저항 부하를 사용하므로, LC 필터를 통해 출력된 전압이 60Hz 정현파이면 출력전류 또한 동상의 정현파이다. 따라서 출력 전력은 120Hz의 정현파로 나타난다. DC 링크 전압은 일정하므로 전류 역시 인버터 스위칭 펄스가 포함된 60Hz의 전과정류 파형으로 나타난다. 식 (3)은 인버터 출력 전력을 나타낸다.

1. 서 론

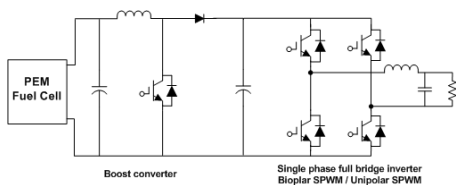
최근 PCS에서 전달되는 저주파 리플 전류가 연료전지에 미치는 영향을 분석하는 연구가 활발히 진행 중이다 [1]. 연료전지 직류 출력전압은 인버터의 스위치 동작을 통해 상용주파 AC출력으로 변환되고, 이때 DC링크 단에 정류 효과가 발생되기 때문에 저주파 리플성분은 불가피하게 발생된다. 이 성분은 단상 시스템의 경우 스위칭 펄스를 포함한 120Hz 리플로 [1], 3상 시스템의 경우 스위칭 펄스를 포함한 360Hz 리플로 나타난다. 저주파 리플전류는 연료전지 스택의 성능과 수명을 감소시키며 특히, 120Hz 리플은 연료소모를 10%이상 증가시키기 때문에 Ballard Nexa (1.2kW) PEMFC의 경우 120Hz 전류 리플을 35% peak-peak로 제한한다 [2]-[4]. 이와 같은 문제점을 해결하고자 저주파 리플을 저감시키기 위한 다양한 연구가 진행 중이다. 하드웨어적인 방법으로 저주파 리플을 제한하기 위해서 DC링크 커패시터를 크게 설계하는 방법과 소프트웨어적 방법인 능동제어기법 등이 제안되었다[1].

본 논문에서는 컨버터 회로 및 인버터 제어방식에 따른 연료전지의 출력 저주파 리플 영향을 비교 분석하였다. 비절연형 컨버터인 부스트 컨버터와 절연형 컨버터인 풀브리지 컨버터의 입력 저주파 리플을 비교하였고 400Hz 이상의 리플은 연료전지에 영향을 미치지 않으므로 본 논문에서는 400Hz 이하의 리플을 중심으로 분석하였다 [2]. 또한 바이폴라 SPWM과 유니폴라 SPWM이 저주파 리플에 미치는 영향을 비교하였다.

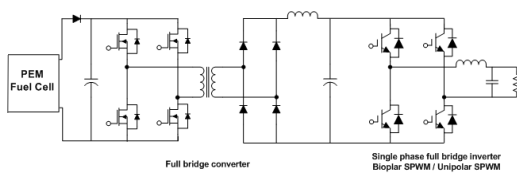
2. 본 론

2.1 부스트 컨버터와 풀브리지 컨버터의 고조파 분석

그림1과 그림 2는 연료전지의 전력을 상용계통에 공급하기 위한 승압용 컨버터가 적용되어진 PCS 구성도이다. 연료전지에 직접적인 영향을 미치는 컨버터 입력전류 고조파는 다음과 같이 분석할 수 있다.



<그림 1> 부스트 컨버터와 단상 풀브리지 인버터



<그림 2> 풀브리지 컨버터와 단상 풀브리지 인버터

$$P_{out} = \frac{V_m I_m}{2} (\cos 2\omega t - 1) \quad (3)$$

2.3 저주파 리플 전달

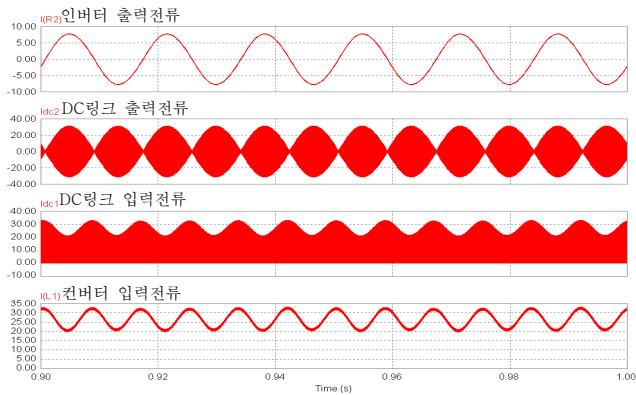
60Hz 인버터 출력에 의해 DC 링크 전류가 60Hz 전과정류 파형, 즉 120Hz 성분이 포함되게 된다. 저주파 리플은 DC 링크 커패시터를 크게 설계하더라도 완전히 저감시킬 수 없고 컨버터 입력단으로 전달된다 [1]. DC 링크 커패시터에 에너지 저장기 없다면, 커패시터 전류는 식 (4)와 같이 표현된다 [6].

$$i_{d,input}(t) = I_d - \sqrt{2} I_d^* \cos 2\omega t \quad (4)$$

여기서, $I_d = \frac{v_o i_o}{V_d}$, $I_d^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v_o i_o}{V_d}$

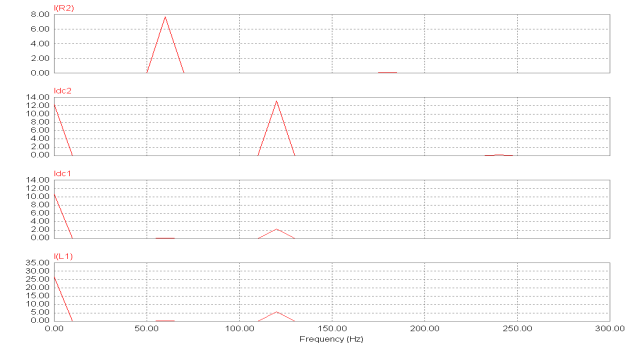
2.4 시뮬레이션 및 결과

승압용 컨버터에는 부스트 컨버터와 풀브리지 컨버터를 적용하였고, 인버터 스위칭 방식에 유니폴라와 바이폴라 SPWM을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 입력전류의 저주파 리플을 비교 분석하였다. 그림 5는 부스트 컨버터와 인버터의 입출력 파형을 나타낸다. 인버터 출력 주파수의 2배수 주파수 성분의 전류가 DC 링크에 흐르는 것을 확인할 수 있으며 컨버터 입력전류로 전달되는 것을 볼 수 있다.



<그림 5> 부스트 컨버터와 바이폴라 SPWM 인버터 파형

그림 6은 입력으로 전달된 저주파 리플에 대한 고조파 분석 결과이다. DC 링크 커패시터에 의해 120Hz 리플이 감소되었으나 입력으로 전달되었음을 확인할 수 있다.

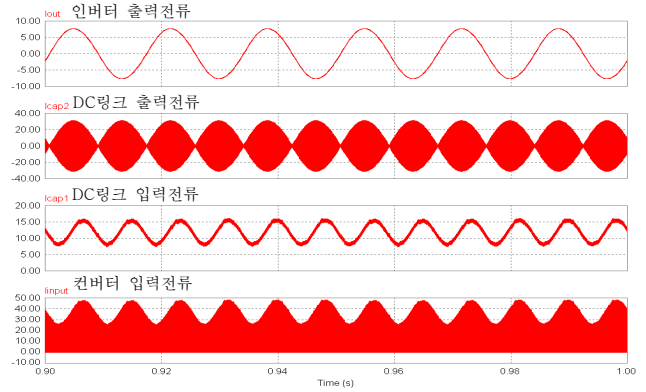


<그림 6> 부스트 컨버터와 바이폴라 SPWM 인버터 고조파 분포

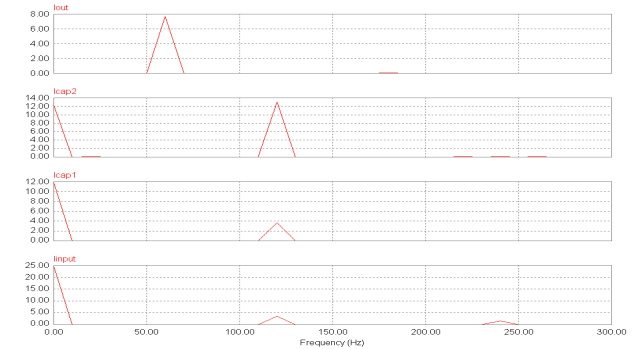
<표 1> 회로 및 스위칭 방법 별 저주파 리플 크기 비교

	바이폴라PWM		$I_{input,h1}$	유니폴라 PWM		$I_{input,h1}$
	기본파	120Hz		기본파	120Hz	
부스트	26.39A	5.74A	21.75%	26.38	5.75	21.79%
풀브리지	24.67A	3.55A	14.39%	24.79	3.65	14.72%

그림 7은 풀브리지 컨버터와 인버터의 입출력 파형을 보여준다. 그림 8은 출력 주파수에 의해 입력으로 전달된 저주파 리플에 대한 고조파 분석 결과이다. 입력이 전류원인 부스트 컨버터와 달리 입력단에 펄스형태의 전류가 흐르는 것을 볼 수 있고, 고조파 차수 및 분포는 커졌지만 최저차 고조파는 상대적으로 감소하였음을 확인할 수 있다. 표 1은 저주파 리플 결과값을 보여준다.



<그림 7> 풀브리지 컨버터와 바이폴라 SPWM 인버터 파형



<그림 8> 풀브리지 컨버터와 바이폴라 SPWM 인버터 고조파 분포

저주파 리플은 풀브리지 컨버터가 부스트 컨버터에 비해 최저차 고조파를 기준으로 하여 약 67% 작음을 확인하였다. SPWM의 바이폴라 방식과 유니폴라 방식은 저주파 리플에는 양음을 확인하였다. 그러나 유니폴라 방식이 두 배의 스위칭 효과를 가지기 때문에 출력 고조파 면에서는 유리하다.

3. 결 론

본 논문에서는 연료전지용 PCS에 의해 발생하는 저주파 리플의 전달 과정을 분석하였고, 컨버터 회로 및 인버터 스위칭 방식에 의한 저주파 리플 발생 추이를 분석하였다. 분석 결과는 연료전지 발전시스템용 PCS의 최적설계를 위한 회로 및 스위칭 방식 선정에 활용될 것이다. 향후 동특성이 포함된 연료전지 모델링과 실 부하 모델링을 통해 실제 시스템의 저주파 리플 분포를 분석할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Changrong Liu, Jih-Sheng Lai, "Low frequency current ripple reduction technique with active control in a fuel cell power system with inverter load", Conf. Rec. IEEE PESC'05, pp.2905-2911, 2005
- [2] R.S. Gemmen, "Analysis for the effect of inverter ripple current on fuel cell operating condition", *J. of Fluids Eng.*, vol.125, no.3, pp.576-585, 2003
- [3] Woojin Choi, Jo.W.Howze, Prasad Enjeti, "Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current", *J. of power sources*, 158, pp. 1324-1332, 2006
- [4] Ballard Nexa® Power module user's manual
- [5] Daniel W. Hart, "Introduction to power electronics", Prentice hall
- [6] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power electronics converter, application and design 3rd ed.", JOHN WILEY & SONS, INC., 2003