

## PCS 회로 및 PWM 방식에 따른 저주파 리플전류 분석

신동건, 김종수, 강현수, 이병국

성균관대학교 정보통신공학부

## Analysis of the Low Frequency Ripple according to Power Conditioning System Topology and PMW Strategy

Dong-gun Shin, Jong-Soo Kim, Hyun-Soo Kang, Byoung-Kuk Lee

School of Information &amp; Communication Engineering, Sungkyunkwan University

**Abstract** - 본 논문에서는 연료전지 시스템에서 발생하는 저주파 리플 전류의 발생 및 전달과정을 분석하고, PCS 회로 및 PWM 방식에 따른 저주파 리플 영향을 비교 분석한다. 전압형 풀브리지 컨버터와 전류형 풀브리지 컨버터에서의 저주파 리플 전류 발생 양상을 시뮬레이션을 통하여 비교 분석한다.

## 1. 서 론

최근 연료전지는 다양한 기기의 전력수요를 충족시키기 위한 신에너지로 각광받고 있다. 화학에너지로 전기 에너지로 직접 변환하기 때문에 고효율이고 온실가스 등의 대기오염물질을 배출하지 않는 청정에너지 원이기 때문이다. 그러므로 연료전지 시스템은 휴대용 전자제품에서 대용량 발전시설까지 다양한 수요를 충족시키는 에너지원으로 이용이 확대되고 있다.[1].

연료전지 직류 출력전압은 인버터의 스위치 동작을 통해 상용주파수 AC 출력으로 변환되고, 이때 인버터의 정류효과로 인해 불가피하게 저주파 리플성분이 발생된다. 이 성분은 단상 시스템의 경우 펄스를 포함한 120Hz 리플로 나타난다.[3] 저주파 리플전류는 연료전지 스택의 성능과 수명을 감소시키며 특히, 120Hz 리플은 연료소모를 10%이상 증가시키기 때문에 Ballard Nexa (1.2kW) 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC)의 경우 120Hz 전류 리플을 35% peak-peak로 제한한다 [2]-[4].

본 논문에서는 저주파 리플전류의 발생과정과 전달과정을 이론적으로 분석하였다. 또한 전압형과 전류형 소스를 모두 가지고 있는 풀브리지 컨버터에 대한 동작모드를 분석하고, 두 컨버터에서 발생되는 리플 전류 양상을 비교 분석하였다.

## 2. 본 론

## 2.1 저주파 리플 전류 분석

그림 1은 풀브리지 컨버터와 단상 SPWM 인버터가 적용된 전력변환시스템 (Power Conditioning System, PCS)의 블록 다이어그램을 나타낸다.

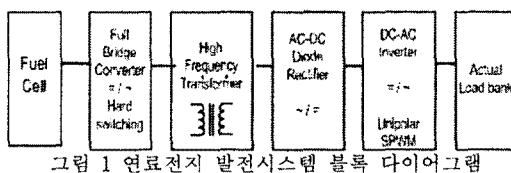


그림 1 연료전지 발전시스템 블록 다이어그램

단상 인버터의 120Hz 저주파 리플전류 발생과 전달은 에너지 보전의 법칙에 의해 설명될 수 있다. 인버터의 전압과 전류는 식 (1)과 (2)와 같다.

$$v_o(t) = V_m \cos(\omega t + \theta) \quad (1)$$

$$i_o(t) = I_m \cos(\omega t + \Phi) \quad (2)$$

여기서,  $\theta$ 와  $\Phi$ 는 위상차를 나타낸다.

출력전압과 전류의 주파수는  $\omega t$ 로 같고, 전압과 전류의 곱인 출력 전력은  $2\omega t$ 로 2배의 주파수를 갖게 된다. 출력전력은 식 (3)과 같다.

$$p_{out}(t) = \frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t + \theta + \Phi) - \cos(\theta - \Phi) \quad (3)$$

일반적으로 인버터 효율은 95% 이상이기 때문에, 인버터의 손실을 무시한다면 DC 링크 전력과 인버터 출력전력은 동일하며 식 (4)와 같다.

$$V_d I_d^*(t) = v_o(t) i_o(t) \quad (4)$$

따라서 DC 링크 전류 역시 2배의 주파수를 가지며 식 (5)과 같이 나타난다.

$$I_d^* = \frac{V_m I_m}{2 V_d} \cos(2\omega t + \theta + \Phi) - \frac{V_m I_m}{2 V_d} \cos(\theta - \Phi) \quad (5)$$

같은 원리로, 컨버터의 손실을 무시하면 연료전지 출력전력과 컨버터 출력 전력은 동일하다. 비록 연료전지 출력전압,  $V_{Fc}$ 가 비선형 특성을 갖는 전원이지만 DC 전압이기 때문에 연료전지 출력전류,  $I_{Fc}$  역시 2배 주파수인 120Hz를 갖는다. 식 (6)은 연료전지 출력 전류를 나타낸다.

$$\begin{aligned} I_{Fc} &= \frac{V_d I_d^*}{V_{Fc}} = \frac{V_d}{V_{Fc}} I_d^* \\ &= \frac{V_d}{V_{Fc}} \left[ \frac{V_m I_m}{2 V_d} \cos(2\omega t + \theta + \Phi) - \frac{V_m I_m}{2 V_d} \cos(\theta - \Phi) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

## 2.2 풀브리지 컨버터 고조파 분석

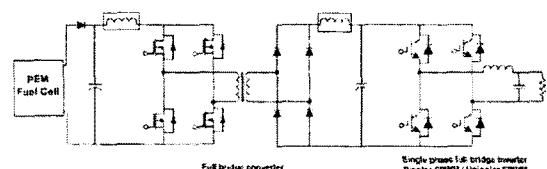


그림 2 전압, 전류형 풀브리지 컨버터

그림 2에서 1차측 인덕터를 사용하지 않고 2차측만 사용하면 전압형, 1차측을 사용 2차측을 사용하지 않으면 전류형 풀브리지 컨버터이다.

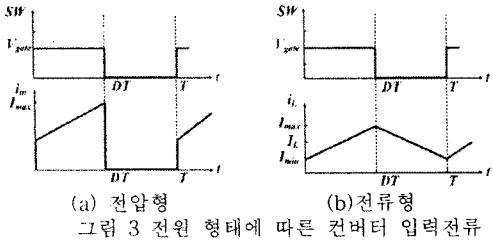


그림 3 전원 형태에 따른 컨버터 입력전류

전압형 컨버터의 정상상태 입력전류 패형을 푸리에 분석하면 식 (7)과 같다.

$$f(t) = a_0 - \frac{2V}{\pi} \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} \sin n\omega_0 t \quad \text{where, } n = \text{even} \quad (7)$$

고조파 분포는 기본파와 전압형 컨버터의 스위칭 주파수의 홀수차수 고조파로 나타난다.

전류형 컨버터는 식 (8)과 같이 2차측 정류단의 영향으로 짹수차수 고조파가 발생한다.

$$f(t) = a_0 + \frac{8A}{n^2 \pi^2} \sum_{n=1}^N \sin \frac{n\pi}{2} \sin n\omega_0 t \quad \text{where, } n = \text{odd} \quad (8)$$

### 2.3 단상 인버터의 고조파 분석

그림 4는 바이풀라 SPWM의 PWM 생성과정과 출력전압을 나타낸다. 삼각 반송파와 기준파를 비교해서 PWM을 출력하는 방법이며, 출력전압을 푸리에 분석하면 식 (9)와 같다.

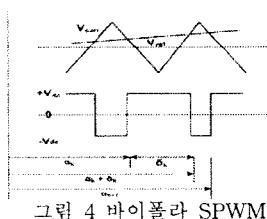


그림 4 바이풀라 SPWM

$$V_n = \frac{V_{dc}}{n\pi} \sum_{k=1}^p (\cos n\alpha_k + \cos n\alpha_{k+1} - 2\cos n(\alpha_k + \delta_k)) \quad (9)$$

유니풀라 SPWM은 바이풀라 SPWM에서 기준파의 180위상차를 갖는 기준파와 함께 반송파를 비교하며 그림 5와 같다. 출력전압은 삼각파의 2배수 주파수로 나타나고 푸리에 분석하면 식 (10)과 같다.

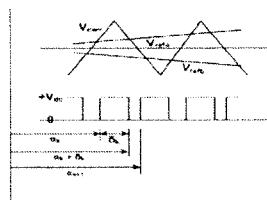


그림 5 유니풀라 SPWM

$$V_n = \frac{V_{dc}}{n\pi} \sum_{j=1}^p (\cos n\alpha_j + \cos n\alpha_{j+1} - 2\cos n(\alpha_j + \delta_j)) \quad (10)$$

즉, 컨버터와 인버터의 스위칭 동작은 저주파 리플주파수에 관여하지 않는다.

### 2.4 시뮬레이션

전압형 풀브리지 컨버터와 전류형 풀브리지 컨버터를 각각 단상 유니풀라 SPWM 인버터와 연계하여 시뮬레이션 하였다.

그림 6은 전압형 풀브리지 컨버터와 단상 SPWM 인버터의 컨버터 입력전류 시뮬레이션 패형을 나타낸다. 패형에서 보는 것처럼 인버터 정류작용으로 인한 120Hz 리플이 컨버터 입력단으로 전달된다. 전압형 컨버터의 스위칭 작용으로 인해 입력전류 모양이 펄스형태로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

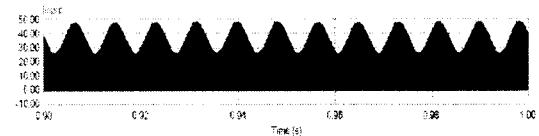


그림 6 전압형 풀브리지 컨버터 입력전류

그림 7은 전류형 풀브리지 컨버터와 단상 SPWM 인버터의 컨버터 입력전류 시뮬레이션 패형을 나타낸다. 전압형 풀브리지 컨버터와 같이 120Hz 리플 성분이 입력단으로 전달되는 것을 확인할 수 있다. 전류형 컨버터는 입력 전류소스로 동작하는 인덕터의 영향으로 연속적인 전류 형태를 나타낸다.

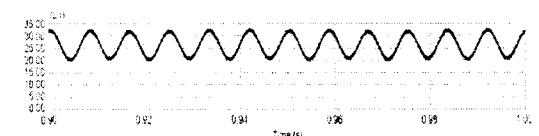


그림 7 전류형 풀브리지 컨버터 입력전류

### 3. 결 론

본 논문에서는 연료전지용 PCS에서 발생되는 저주파 리플 전류를 이론적으로 분석하였다. 컨버터 특성에 따른 컨버터 입력전류의 양상을 확인하였고 단상 유니풀라 SPWM 인버터와 연계하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 저주파 리플 전류 발생 및 전달, 컨버터 특성에 따른 입력전류 형태 그리고 단상 인버터 정류작용으로 인한 120Hz 리플 발생 및 전달을 확인했고 분석된 이론이 타당함을 검증하였다.

### [참 고 문 현]

- [1] W. J. Choi, J. W. Howze, P. 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
- [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] C. Liu, J. S. 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
- [4] Ballard Nexa Power module user's manual
- [5] J. S. Kim, H. S. Kang, "Analysis of low frequency current ripples of fuel cell systems based on a residential load modeling", 대한전기학회 학계학술대회, pp. 197-198, 2007