

신재생에너지를 위한 DC-DC 컨버터의 Cascade 보상 저주파 리플 제거 기법

권민호, 정현주, 최세완
서울과학기술대학교

Low Frequency Ripple Cancellation Method of DC-DC Converter using Cascade Compensation for Renewable Energy Sources

Minho Kwon, Hyoenju Jeong, Sewan Choi
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

단상 계통연계 인버터는 직류측에 계통주파수의 2배로 낮은 주파수의 전류리플을 발생시킨다. 이 저주파리플은 태양광, 풍력, 연료전지 같은 신재생에너지원의 수명 및 안정성을 저하시킨다. 본 논문에서는 이러한 저주파리플을 신재생에너지원으로 전달되지 못하게 차단하는 제어 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 주 제어기(전압제어)의 성능 및 안정도에 영향을 주지 않으며 계통주파수 변동에 강인한 특성을 갖는다. 또한 별도의 파라미터 설계가 없어 구현이 용이하다. 본 논문에서는 3kW급 시제품의 실험결과를 통해 제안하는 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 신·재생에너지 보급사업으로 인한 가정용 태양광, 풍력, 연료전지 발전시스템, 그리고 ESS 등의 대한 관심이 증가함에 따라 이를 위한 전력변환 시스템의 중요성이 대두되고 있다. 가정용 전력변환 시스템은 그림 1과 같이 단상 인버터와 DC-DC 컨버터로 구성된 2단 방식 전력변환 구조가 주로 사용된다. 특히 독립운전시에는 그림 1과 같이 DC-DC컨버터가 DC링크 전압(V_{dc})을 일정하게 제어하고 인버터는 계통전류를 제어하거나 독립운전시에 교류전압을 제어한다. 단상 인버터의 직류측에는 전력변환 구조상 계통주파수의 2배의 해당하는 저주파 전류리플이 발생하게 되는데 이 저주파리플은 신·재생에너지원의 수명 및 안정성을 저하시킨다.

i_{dc} 의 저주파 성분은 V_{dc} 에 작은 저주파리플을 만들고 전압제어 루프의 PI보상기는 e_V 를 0으로 만들기 위하여 저주파 리플을 갖는 전류지령치 I_L^* 을 만들어 결국 입력전류의 저주파리플을 발생시킨다. 여기서 만약 C_d 가 매우 클 경우 또는 전압제어기의 대역폭이 매우 작을 경우에는 저주파리플이 DC-DC컨버터를 통과하지 못해 입력전류에 저주파리플이 제거된다. 하지만 큰 캐패시터가 필요하거나 전압제어 성능을 크게 저하시키는 문제가 있다.

입력전류의 리플을 제거하기 위해서는 V_{dc} 에 리플이 존재하더라도 I_L^* 의 리플성분을 제거하고 직류성분만 통과시켜야 한다. 낮은 차단주파수의 저역통과필터를 이용하면 간단하지만 전체 시스템의 대역폭을 크게 감소시키는 문제를 야기한다. 좁은 차단폭을 갖는 대역차단필터를 이용하는 방법 또한 완벽한 리플 제거가 어렵다.

기존의 저주파리플 제거 알고리즘으로는 DC-DC 컨버터 제어기에 추가로 공진(PR)제어기를 병렬로 구성하여 주 제어기 출력과 더하는 방식이 있다[1]. 이 방법은 주 제어기의 성능 및 안정성을 저하시키며 공진제어기의 제어파라미터 설계가 어려울 뿐

만 아니라 특정 주파수 성분만 보상하기 때문에 계통주파수의 변동에 취약하다.

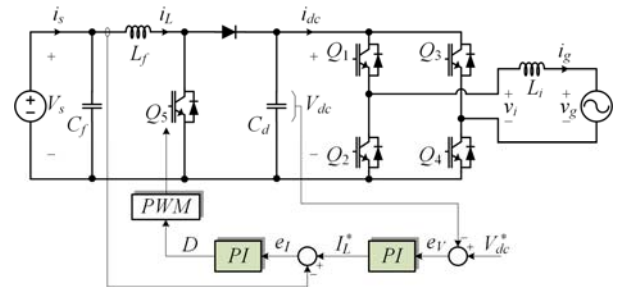


그림 1. 2 단 DC-AC 전력변환 시스템 및 DC-DC 컨버터 전압제어 제어 알고리즘

본 논문에서는 DC-DC 컨버터가 DC링크 정전압 제어를 위한 일반적인 이중루프 방식에서 외부루프와 내부루프 사이에 Cascade 구조로 저주파리플을 제거하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 추가 제어파라미터 설계 없이 간단한 방법으로 구현 가능하며 주 제어기의 성능 및 안정도에 영향을 주지 않는다. 또한 공진제어방식에 비하여 계통주파수 변동에 강인한 장점을 갖는다.

2. 제안하는 알고리즘

그림 1에서 역률이 1일때 스위칭성분을 제외한 인버터 직류측 전류는 다음과 같다[2].

$$i_{dc}(t) = \frac{V_g I_g}{V_{dc}} - \frac{V_g I_g}{V_{dc}} \cos(2\omega_g t) \quad (1)$$

여기서 ω_g 는 계통의 각주파수이다. 내부 전류제어기가 잘 동작하여 $e_V = 0$ 이라면 입력전류 i_s 와 I_L^* 는 서로 같으며 다음과 같다.

$$i_s(t) = I_L(t) = \frac{V_g I_g}{V_s} - \frac{V_g I_g}{V_s} \cdot \cos(2\omega_g t) \quad (2)$$

따라서 I_L^* 의 저주파성분을 제거함으로써 입력전류의 저주파리플을 제거할 수 있다.

그림 2은 제안하는 저주파리플 제거 알고리즘으로 외부 전압제어기와 내부 전류제어기 사이에 Cascade 구조로 보상되며 외부 전압제어루프의 출력을 180° 위상지연 시킨 신호와 합하여 저주파성분을 제거하는 방법이다. 여기서 180° 위상 지연을 구현하기 위하여 90° 위상 지연 해주는 APF(All pass filter)를 두 번 사용하였고 APF 하나의 전달함수는 다음과 같다.

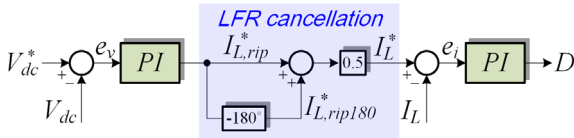


그림 2. 제안하는 저주파 리플 제거 알고리즘

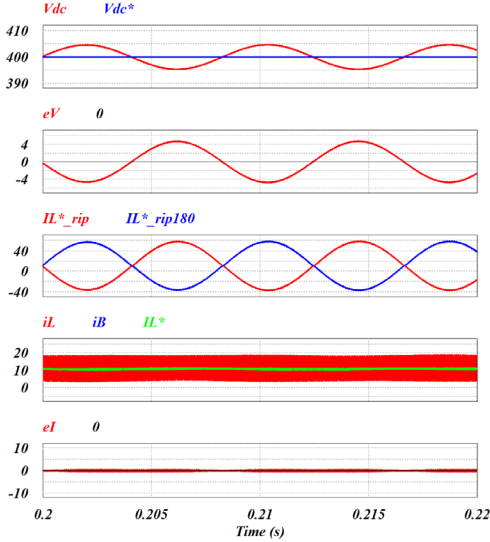


그림 3. 제안하는 저주파 리플 제거 시뮬레이션 결과

$$APF(s) = \frac{-s + \omega_c}{s + \omega_c} \quad (3)$$

여기서 ω_c 는 APF의 90° 위상 지연 주파수이다. APF의 저주파 리플의 주파수 응답특성의 크기는 1이고 위상은 다음과 같다.

$$\phi = \angle APF(j2\omega_g) = \tan^{-1} \left(\frac{4\omega_c\omega_g}{\omega_c^2 - 4\omega_g^2} \right) \quad (4)$$

따라서 APF를 두 번 지난 출력은 다음과 같다.

$$I_{L,rip180}(t) = \frac{V_g I_g}{V_s} - \frac{V_g I_g}{V_s} \cdot A \cos(2\omega_g t - 2\phi) \quad (5)$$

여기서 A 는 전압제어기의 이득과 C_d 의 값으로 결정된다. 그리고 그림 2에서 제안하는 알고리즘의 전류지령치 I_L^* 는 다음과 같다.

$$I_L(t) = \frac{1}{2} (I_{L,rip}(t) + I_{L,rip180}(t)) \quad (6)$$

식(2), (5), (6)으로부터 I_L^* 는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

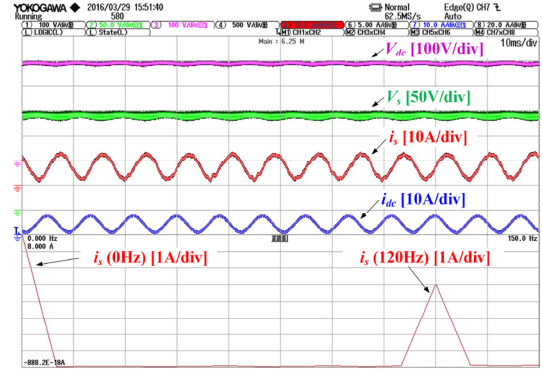
$$I_L(t) = \frac{V_g I_g}{V_s} - \frac{V_g I_g}{V_s} \cdot A \cdot \cos(2\omega_g t - \phi) \cdot \cos \phi \quad (7)$$

식 (4)로부터 $\omega_c = 2\omega_g$ 라면 $\phi = \pi/2$ 이므로 식 (7)에서 I_L^* 의 저주파 성분은 완벽히 제거되며 직류성분만 남게 된다.

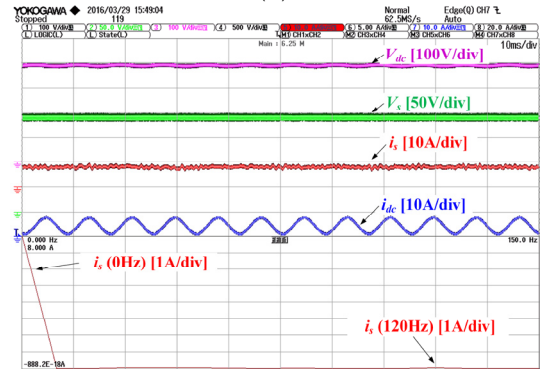
3. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림3은 제안하는 알고리즘의 시뮬레이션 결과이다. V_{dc} 의 작은 전압리플은 저주파성분의 오차를 만들어 전류지령치에 저주파리플을 발생시키지만 180° 위상 지연 성분과 더하여 저주파리플이 제거되는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 제안하는 알고리즘을 검증하기 위한 시작품의 실험 결과이다. 보상 알고리즘 적용 전 입력전류의 직류성분은 8A이고 120Hz 성분의 크기는 약 5A로 63%의 저주파리플이 존재하는 것을 FFT파형을 통해 확인할 수 있다. 동일한 실험 조건에서 보



(a)



(b)

그림 4. 제안하는 저주파 리플 제거 실험 결과 (a) 보상 전, (b) 보상 후

상 알고리즘을 적용 후 직류성분 변동 없이 120Hz 성분만을 약 0.1A(1.3%)로 감소시켰다. 동등한 알고리즘 비교를 위하여 제어 파라미터 및 시작품 사양은 동일한 값으로 실험하였으며 실험 사양은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \bullet P_o = 1.6 \text{ kW} & \bullet V_{dc} = 400 \text{ V} & \bullet V_s = 200 \text{ V} & \bullet V_g = 220 \text{ V} \\ & \bullet L_f = 812 \mu\text{H} & \bullet C_d = 3 \text{ mF} & \bullet f_s = 10 \text{ kHz} & \bullet \omega_g = 2\pi 60 \text{ rad/sec} \end{aligned}$$

4. 결론

본 논문에서는 DC-DC 컨버터의 저주파리플 제거 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘은 APF기반으로서 별도의 파라미터 설계가 필요 없고 계통주파수 변동에 강한 장점을 갖는다. 3kW급 시작품을 통해 제안하는 알고리즘을 검증하였으며 입력전류의 120Hz 성분을 63%에서 1.3%로 크게 감소시켰다.

참고 문헌

- [1] X. Liu, H. Li, and Z. Wang, "A fuel cell power conditioning system with low-frequency ripple-free input current using a control-oriented power pulsation decoupling strategy," *IEEE Trans. on, Power Electron.*, vol. 29, no. 1, pp. 159–169, Jan. 2014.
- [2] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, "Power electronics : media enhanced 3rd edition," John Wiley & Sons, Inc., pp. 212–215, 2003.