

대용량 계통연계형 연료전지 PCS의 LCL필터 설계와 공진억제

명홍재*, 권준범*, 최세완*, 박가우**

* 서울산업대학교, ** (주)플라스포

LCL filter Design and Active Damping of High Power Utility Interactive Fuel Cell PCS

Hongjae Myung*, Junbum Kwon*, Sewan Choi*, Gawoo Park**,

* Seoul National University of Technology, ** Plaspo Company

ABSTRACT

계통연계형 인버터는 전류의 리플 저감을 위하여 필터를 사용하는데, 구조가 간단하여 많이 사용되던 기존의 L필터는 인버터의 정격이 증가함에 따라 필터의 크기도 증가되고 큰 인덕턴스 값으로 인하여 좋지 않은 동특성을 갖게 된다. 따라서 발전용 PCS등 대용량의 경우 작은 인덕턴스로 동일한 고조파특성을 가질 수 있는 LCL 필터를 사용하는 것이 유리하다. 그러나 LCL필터의 사용 시 공진이 발생할 수 있으나 이러한 문제에 관해서 다루어진 예가 많지 않다.

본 논문에서는 대용량 계통연계 인버터의 LCL 필터 설계 및 노치필터를 이용한 액티브댐핑의 원리를 제안한다. 제안한 방법은 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 타당성을 검증한다.

1. 서론

화석연료를 대체할 에너지원으로 연료전지, 태양광 및 풍력 등의 신·재생 에너지자원의 개발이 활발히 진행되고 있어 이에 대한 각 산업분야에의 응용이 요구된다^[1]. 특히 수소에너지를 이용하는 연료전지 발전시스템은 고효율과 다양한 연료를 이용할 수 있다는 장점 때문에 분산발전 시스템의 응용으로 각광 받고 있다.

이러한 분산발전시스템이 계통과 연계되기 위해서는 전력변환 장치를 필요로 한다. 전력변환장치는 연료전지의 낮고 불안정한 DC전압을 상승시켜주는 DC-DC컨버터부와, 상승된 DC전압을 AC전압으로 변환시켜주는 DC-AC인버터부로 구성되어진다. 계통과 연계되는 DC-AC인버터는 용량이 커지면 수 kHz 이내의 낮은 스위칭 주파수를 사용한다. 이러한 낮은 스위칭 주파수에 의한 고조파 특성을 향상시키기 위해서는 큰 인덕턴스를 가진 필터를 필요로 한다. 그러나 큰 인덕턴스를 가진 필터는 비용의 증가를 야기 시키고 시스템의 동특성을 나쁘게 하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 그림 1에서 보는 것 과 같이 계통과 연계되는 PCS의 필터로서 LCL필터를 사용하여 큰 전류리플감쇄효과와 작은 인덕턴스 값을 갖도록 한다^[2]. 그러나 LCL 필터는 그림 4에서 보는 것 과 같이 두 개의 공진점을 가지고 있다. 이러한 공진은 시스템의 불안정을 초래하기 때문에 이를 억제하기 위한 댐핑이 필요하다.

일반적으로 댐핑 방법은 패시브댐핑(Passive Damping)과 액티브댐핑(Active Damping)의 두 가지가 있다. 패시브댐핑은 저항을 필터커패시터에 직렬로 연결하거나 계통측 인덕터에

병렬로 연결하여 공진을 억제한다. 이 방법은 수 kW 이하의 소용량 응용에는 적합하나 용량이 커질수록 댐핑저항으로 인한 손실이 발생하여 효율을 떨어뜨리고 방열을 위한 추가 장치를 요구한다. 따라서 대용량에서는 손실이 거의 없는 액티브댐핑을 사용해야 한다. 기존의 액티브댐핑 방법으로는 Lead-Lag 보상기를 사용하는 방식^[3]이 있는데 이 방법은 댐핑을 위한 시정수를 선정하기에 어려운 문제가 있다^[4]. 또한 가상저항을 사용하는 방식^[5]과 멀티루프제어기를 사용하는 방식^[6]은 커패시터에 전류센서를 추가해야하는 단점이 있다.

그리고 추가적인 센서가 필요 없고 전류제어기에 직렬로 연결하기 때문에 파라미터 설정이 용이한 장점이 있는 노치필터를 사용하는 방법^[7]이 제시 되었으나 액티브댐핑의 원리 및 설계방법이 제시되어있지 않다.

따라서 본 논문에서는 대용량 LCL필터설계와 노치필터를 이용한 액티브댐핑의 원리를 제안한다.

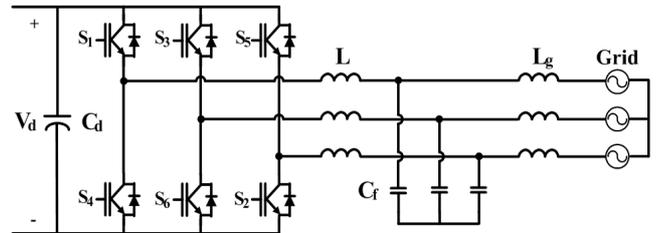


그림 1 3상 계통연계 인버터 시스템
Fig. 1 Three-Phase Utility interactive inverter system

2. LCL필터 설계

2.1. LCL필터 모델링

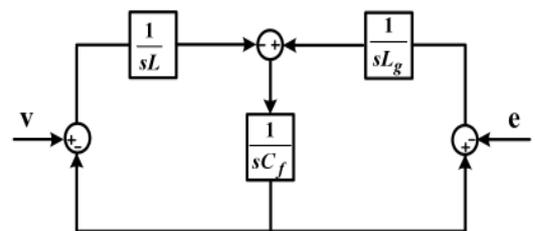


그림 2 LCL필터 모델
Fig. 2 LCL filter Model

그림 2는 그림 1에서 보여준 3상 계통연계 인버터의 LCL 필터의 모델이다. 이 모델로부터 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{i(s)}{v(s)} = -\frac{1}{sL} \frac{1 + s^2 L_g C_f}{(s^2 L_g C_f) + s(L + L_g)} \quad (1)$$

2.2. LCL필터 설계절차

소용량의 설계절차^[8]를 기반으로 한 대용량 계통연계형 인버터의 LCL필터 설계절차는 다음과 같다.

① 베이스 값 계산

$$Z_b = \frac{V_{LL}^2}{P}, \quad C_b = \frac{1}{\omega_b Z_b}, \quad L_b = \frac{Z_b}{\omega_b} \quad (2)$$

여기서 V_{LL} 은 선간전압의 실효값, $\omega_b = 2\pi \times 60$

② 인버터측 인덕터의 인덕턴스 값 선정

$$L = \frac{V(h)}{h \times \omega_b \times i(h)}$$

(3)

여기서 $V(h)$ 는 h 차 고조파 전압, $i(h)$ 는 h 차 고조파 전류

③ 커패시터 값 선정

$$C_f = x C_b$$

(4)

여기서 x 는 인버터에서 발생한 전력 중 커패시터에서 흡수하는 무효전력의 비중

④ 인버터 측 인덕터 에서 계통 측 인덕터의 전류감쇄율 선정

$$\frac{i_g(h_{sw})}{i(h_{sw})} = a \quad \text{여기서 } h_{sw} \text{는 스위칭 고조파 차수}$$

(5)

⑤ 계통측 인덕턴스 계산

$$L_g = rL \quad (6)$$

여기서 $r = \left| \frac{\frac{1}{a} + 1}{1 - xLC_b\omega_{sw}^2} \right|, \quad \omega_{sw} = 2\pi f_{sw}$

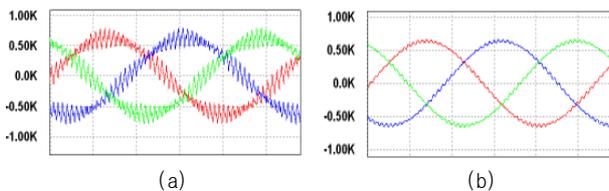


그림 3 (a)인버터측 인덕터 전류 (b)계통측 인덕터 전류
Fig. 3 (a)Inverter side inductor current (b)Grid side inductor current

위의 설계 절차대로 입력전압 $700 V_{dc}$, 계통전압 $380 V_{ac}$, 스위칭주파수 $3kHz$ 를 갖는 $300kW$ 급 계통연계형 인버터의

LCL필터를 설계하였다. LCL필터의 설계값은 다음과 같다.

$$\bullet L = 90\mu H, \quad C_f = 275\mu F, \quad L_g = 50\mu H$$

타당성을 입증하기 위해 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3에서 인버터측 인덕터의 전류THD는 12%이고 계통측 인덕터의 전류THD는 3%로 우수한 전류리플 감쇄효과를 얻을 수 있었다.

3. 제안한 액티브 댐핑 기법

3.1. LCL필터 주파수 특성

식(1)의 LCL필터의 주파수 특성을 보기위해 MATLAB을 이용하여 보드선도를 그려보면 그림 4와 같이 두 개의 공진점이 나타나는 주파수 특성을 볼 수 있다. 이러한 공진은 시스템을 불안정하게 만들기 때문에 적절한 댐핑을 필요로 한다.

$$\bullet \text{공진영점} : f_{res1} = \sqrt{\frac{1}{L_g C_f}} \quad (7)$$

$$\bullet \text{공진극점} : f_{res2} = \sqrt{\frac{L + L_g}{LL_g C_f}} \quad (8)$$

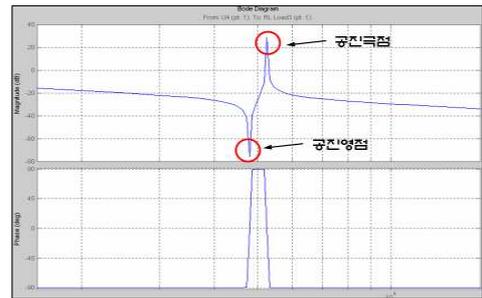


그림 4 LCL 필터의 주파수특성
Fig. 4 Frequency characteristic of LCL filter

3.2. 노치필터를 이용한 액티브 댐핑

액티브댐핑을 하기 위한 노치필터의 전달함수는 식(9)와 같다. 그림 5에서 보듯이 노치필터의 주파수 특성을 보기위해 MATLAB을 이용하여 보드선도를 그려보면 LCL필터와 같이 두 개의 공진 점이 나타나는 것을 알 수 있다. 노치필터의 이러한 주파수 특성을 이용하여 LCL필터의 공진을 상쇄시킨다.

$$G(s) = K_n \frac{s^2 + 2\zeta_z \omega_z s + \omega_z^2}{s^2 + 2\zeta_p \omega_p s + \omega_p^2} \quad (9)$$

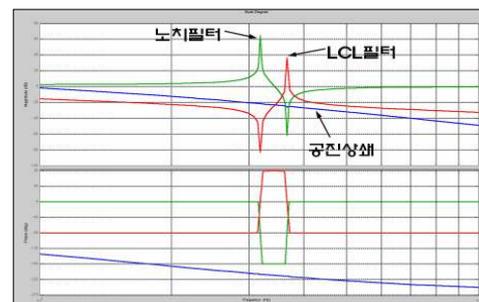


그림 5 노치필터를 이용한 액티브 댐핑의 보드선도
Fig. 5 Bode Plot of active damping using notch filter

그림 6은 노치필터를 포함하는 전류제어기를 나타낸다. PI 제어기 뒷단에 직렬로 노치필터를 연결하여 시스템의 공진성분을 상쇄시킨다.

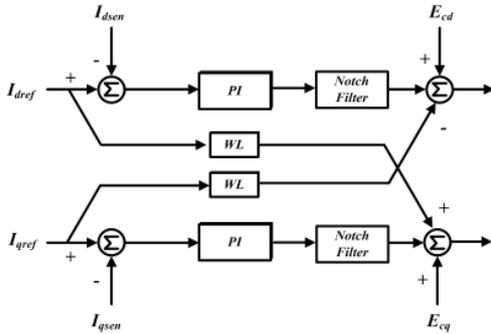


그림 6 액티브댐핑 제어기를 포함한 전류제어기
Fig. 6 Current controller with active damping

그림 7은 액티브 댐핑을 위해 노치필터를 적용했을 경우의 계통측 인덕터 전류파형이다. 액티브댐핑을 동작시키지 않는 경우 공진으로 인한 큰 리플이 발생하며 액티브 댐핑을 동작시키면 리플이 저감되는 효과를 볼 수 있다.

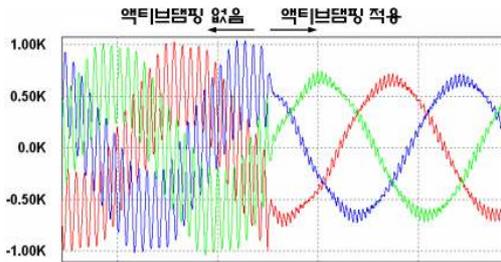


그림 7 액티브 댐핑효과
Fig. 7 Effect of active damping

4. 실험결과

제안한 설계절차의 타당성을 입증하기 위하여 1kW 시작품을 제작하였으며 본 실험에서 사용한 정수는 다음과 같다.

- 입력전압 : $200 V_{dc}$ • 계통전압 : $110 V_{ac}$
- 정격전력 : $1kW$ • 스위칭주파수 : $10kHz$
- $L = 2.8mH$, $C_f = 2.5\mu F$, $L_g = 1mH$

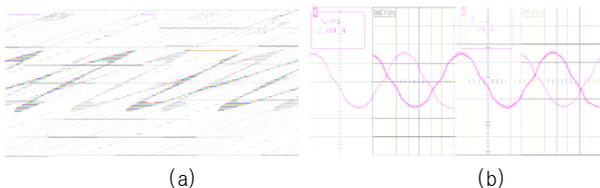


그림 8 (a)인버터측 인덕터 전류 (b)계통측 인덕터 전류
Fig. 8 (a) Inverter side inductor current (b) Grid side inductor current

그림 8은 제안한 필터설계 절차에 따라 설계한 LCL필터의

실험 파형이다. 인버터측 인덕터전류의 THD는 15%이고 계통측 인덕터 전류의 THD는 5%로 측정되었다. 3.5A의 작은전류임에도 우수한 전류리플 감쇄효과를 확인 할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 대용량 계통연계형 연료전지 PCS의 LCL필터를 설계하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 또한 LCL필터로 인한 공진현상을 억제하기 위해 노치필터를 이용한 액티브댐핑 방법을 적용하고, 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 제안한 방법으로 기존 L필터만 사용할 때 보다 작은 인덕턴스 값을 가지고 큰 리플저감 효과를 얻을 수 있다. LCL 필터의 공진문제 역시 노치필터의 주파수 특성을 이용하여 효과적인 액티브댐핑을 할 수 있었다. 향후에는 계통의 임피던스 값을 측정하여 LCL 필터설계에 반영하고 계통의 임피던스 변동을 고려한 액티브댐핑에 관한 연구를 진행하고자 한다.

이 논문은 에너지관리공단의 "고효율 300kW급 내부개질형 MCFC 스택 및 시스템 국산화 기술 개발" 과제 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Sangmin Jung, Youngsang Bae, Taesik Yu, Sewan Choi, Hyosung Kim, "A low cost utility interactive inverter for residential fuel cell generation", *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 22, pp. 2293-2298 Nov. 2007.
- [2] M. Lisserre, A. Dell'Aquila, F. Blaabjerg, "Genetic algorithm-based design of the active damping for an LCL-filter three-phase active rectifier", *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 19, pp. 76-86, Jan. 2003.
- [3] V. Blasko and V. Kaura, "A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three-phase voltage source converter," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 33, pp. 542-550, Mar.-Apr. 1997.
- [4] M. Liserre, A. Dell'Aquila, and F. Blaabjerg, "Stability improvements of an LCL-filter based three-phase active rectifier," in *Proc. IEEE PESC'02*, Vol. 3, pp. 1195-1201, June 2002,
- [5] P. A. Dahono, "A control method for DC-DC converter that has an LCL output filter based on new virtual capacitor and resistor concepts," in *Proc. IEEE PESC 04*, Vol. 1, pp. 36-42
- [6] E. Twining and D. G. Holmes, "Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter," in *Proc. IEEE PESC'02*, Vol. 3, pp. 1189-1194, June 2002,
- [7] M. Liserre, F. Blaabjerg, and R. Teodorescu, "Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values," *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 21, pp. 263-272, Jan. 2006.
- [8] M. Lisserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and control of an LCL-filter based active rectifier," *IEEE Ind. Applicat.*, Vol. 1, pp. 297-307, oct. 2001,