

# 순시전력이론을 통한 계통연계 PWM 인버터 시스템의 능동댐핑 기법

정해광\*, 이교범\*, 강신일\*\*, 이현영\*\*, 권오정\*\*, 송승호\*\*\*

\* 아주대학교 전자공학부

\*\* (주) 플라스포

\*\*\* 광운대학교 전기공학과

## An active damping method of a grid-connected PWM Inverter using an instantaneous power theory

Hea-Gwang Jung\*, Kyo-Beum Lee\*, Sin-Il Kang\*\*, Hyen-Young Lee\*\*, Oh-Joeng Kwon\*\*, and Seung-Ho Song\*\*\*

\*School of Electrical and Computer Engineering AJOU University

\*\*PLASPO Co., Ltd.

\*\*\*Department of Electrical Engineering Kwangwoon University

### ABSTRACT

The demand of a three phase PWM inverter for the purpose of power control or grid-connecting is increasing. This inverter is connected to a grid through an L-filter or LCL-filter to reduce the harmonics caused by switching. An LCL-filter can reduce the harmonic of a low switching frequency and generate a satisfactory level of grid side current with a relatively low-inductance than an L-filter. But the additional poles caused by the LC part affects a stability problem due to induced resonance of the system. This paper presents a compensation method using a power theory to improve performance, the designed LCL-filter system and to reduce the stability problems caused by resonance. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by simulations.

Keyword - three phase PWM-inverter, harmonics, LCL-filter, resonance, power theory

### 1. 서론

최근 신재생 에너지의 개발이 가속화되면서 풍력이나 태양광 등에 의한 발전 시스템의 전력변환장치의 중요성이 대두되고 기술의 개발도 활발히 이루어지고 있다. 전력변환장치의 스위칭으로 인한 고조파는 민감한 부하나 장비에 장애를 일으키는 요인이 되고 있으며, 특히 수 kW 용량의 시스템에서는 필터의 가격과 THD(전고조파왜율)가 시스템 설계 시 매우 중요하게 고려된다<sup>[1]</sup>. 이러한 고조파의 저감을 위해 기존에는 전력변환 장치의 입력이나 출력의 인덕턴스를 사용하여 왔다. 하지만 설비의 용량이 커짐에 따라 매우 큰 인덕턴스가 필요하게 되고 이로 인한 가격의 상승 및 동적응답의 저하로 인해 필터 구현의 어려움이 발생한다.

앞서 언급한 대용량 설비에서의 L필터의 구현에 따르는 문제점은 LCL필터를 사용함으로써 모두 해결할 수 있다<sup>[2]</sup>. 기존

의 L필터에 LC부분을 추가함으로써 결과적으로 수백kVA의 용량에서도 비교적 적은 인덕터와 커패시터 값으로도 효과적으로 고조파를 저감하는 필터의 구현이 가능하기 때문이다. 게다가 기존의 시스템에 LCL필터를 추가하는 것은 전체 시스템의 가격변동이 거의 없으며, 센서의 추가가 없어 쉽고 효과적으로 이루어진다<sup>[3]</sup>.

필터의 각 파라미터가 적절하게 선택되지 않으면 고조파의 효과적인 저감이 어렵고 LC부분의 추가로 생기는 공진 극점에 의하여 안정성에 문제가 발생한다. 이러한 공진 극점에 의한 안정성 문제의 개선에는 병렬 커패시터에 저항을 접속하는 수동댐핑 방식과 추가적인 저항의 접속 없이 공진을 억제하는 능동댐핑 방식이 있다. 수동댐핑 방식은 간단하게 시스템의 안정성을 보장할 수 있으나 저항성분에 의한 추가적인 손실이 발생한다. 수동 댐핑으로 인한 이러한 손실 없이 공진에 의한 안정성 문제를 해결하기 위해 능동 댐핑에 관한 많은 논문들이 발표되었다<sup>[4-6]</sup>. M. Liserre, V. Blasko는 진-지상 보상기를 사용한 능동댐핑 시스템을 제안하였다.<sup>[4]</sup> 진-지상 보상기를 사용한 능동 댐핑 알고리즘은 진-지상 보상기의 적절한 이득설정이 이루어져야 만족할만한 성능을 낼 수 있으며, 전압측정을 위한 센서를 필요로 한다. 그리고 P. K. Dahono가 제안한 가상저항을 이용한 능동 댐핑기법<sup>[5]</sup> 역시 추가적인 전압 센서를 필요로 한다. 또한 M. Liserre는 대역저지 필터를 이용한 능동댐핑 제어기법을 제안했다. 이 기법은 대역저지 필터의 설계에 따라 댐핑성능의 영향이 크다는 단점이 있다<sup>[6]</sup>.

본 논문에서는 전력이론을 이용한 보상기법을 제안한다. 제안된 보상 기법은 추가적인 센서 없이 구현이 가능하며 그 알고리즘도 간단하고 적용이 용이하다. 시뮬레이션 결과는 제안하는 알고리즘의 성능과 유용성을 나타낸다.

### 2. LCL 필터

LCL 필터는 두 개의 인덕턴스와 병렬 연결된 커패시터로 이루어지며 필터의 각 파라미터 설계는 파라미터가 시스템에 미치는 영향에 따라 설계되어진다.<sup>[2]</sup> LCL 필터는 그림 1과 같은 단상 등가회로로 나타 낼 수 있고 전달함수는 식(1)과 같이

표현된다.

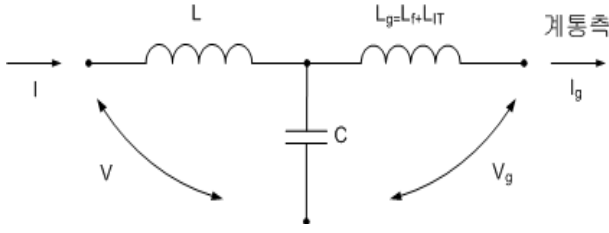


그림 1 Lq 필터 단상 등가회로  
Fig. 1 Equivalent single-phase Lq filter

$$G(s) = \frac{i(s)}{v(s)} = \frac{1}{Ls} \frac{(s^2 + R_d C_f z_{LC}^2 s + z_{LC}^2)}{(s^2 + R_d C_f \omega_{res}^2 s + \omega_{res}^2)} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } z_{LC}^2 = \frac{1}{L_g C_f}, \omega_{res}^2 = \frac{L_r z_{LC}^2}{L}$$

식(1)의 추가된 LC파트에 관련한 2차항의 분모와 분자가 있다. 공진 보상을 위한 댐핑 저항을 연결하지 않는다면 추가된 LC파트로 인한 극점과 영점 극좌표상의 허수축에 위치하여 공진 주파수 ( $\omega_{res}$ )에서 공진을 일으킨다. 이것은 시스템 안정도에 문제를 일으키는 요인이 된다.

### 3. 전력이론을 통한 공진보상

#### a. 전력이론

일반적으로 3상 순시 무효전력은 식 (2)과 같이 정의된다.

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2)$$

순시 유효, 무효전력을  $\alpha - \beta$  고정 좌표계에서의 순시 유효전력  $p, q$ 로 나타내면 식 (3)와 같다.

$$\begin{aligned} p &= v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \\ q &= v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \end{aligned} \quad (3)$$

순시 유효, 무효전력을 직류성분과 교류성분으로 나누어  $\bar{p}, \tilde{p}, \bar{q}, \tilde{q}$ 라 하면 전류는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (4)$$

순시 유효, 무효전력의 직류성분을 기본과라고 하고 교류성분을 공진이나 스위칭에 의한 고조파라 정의하면<sup>[7]</sup>, 유효전력은 직류로 무효전력은 0으로 제어되어야 한다. 이러한 보상성분을 식 (4)를 통하여  $\alpha - \beta$  좌표계의 전류로 정리하면 식 (5)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha,comp}^* \\ i_{\beta,comp}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\bar{p} \\ -\bar{q} \end{bmatrix} \quad (5)$$

보상전류  $i_{\alpha}^*, i_{\beta}^*$ 는 순시 유효, 무효전력의 직류나 교류값을 통해 선택적으로 결정되어 질 수 있다.

#### b. 공진 보상

제어 입력 전류는  $\alpha - \beta$  고정좌표계로 변환되고, 추정된 각속도를 통해  $d - q$  동기 좌표계로 변환된다<sup>[7]</sup>. 전류  $i_d, i_q$ 는 직류 성분( $\bar{i}_q, \bar{i}_d$ )과 교류 성분( $\tilde{i}_q, \tilde{i}_d$ )으로 나눌 수 있다.

입력 전류의 교류성분, 즉 스위칭과 공진에 의한 고조파 성분을 보상해 주기 위하여 본 논문은 전력이론을 통한 보상기 (P-Q 보상기)를 적용하였다. 제안된 P-Q 보상기의 구조는 그림 2와 같다.

추가적인 전압 센서의 사용을 배제하기 위하여 알고리즘에 사용되는 전압은 인버터의 통유율  $D_a, D_b, D_c$ 와 직류단 전압 Vdc-link를 통하여 추정하였다<sup>[9]</sup>.

$$\begin{aligned} v_\alpha &= \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc-link} D_a - \frac{1}{2} (D_b + D_c) \\ v_\beta &= \frac{1}{\sqrt{2}} V_{dc-link} (D_b - D_c) \end{aligned} \quad (6)$$

추정된 전압과 측정된 전류를 통하여 식 (3)와 같이 순시 유효, 무효전력이 계산되고, 계산된 순시 유효, 무효전력은 고역 통과 필터를 통하여 직류성분과 교류성분으로 나누어진다.

전류의 공진과 스위칭에 의한 고조파성분을 보상하기 위하여 순시 유효전력의 교류성분과 무효전력을 선택하여 식 (5)과 같이 시스템 보상전류를 결정한다. 결정된 보상전류  $i_{\alpha,comp}^*, i_{\beta,comp}^*$ 는  $\alpha - \beta$  고정좌표계의 값으로 이것을  $d - q$  동기좌표계로 변환하면 제안된 알고리즘의 보상전류  $i_{d,comp}^*, i_{q,comp}^*$ 가 얻어지고 이것은 제어 입력에 보상되어 전류의 공진 및 스위칭에 의한 고조파를 저감한다.

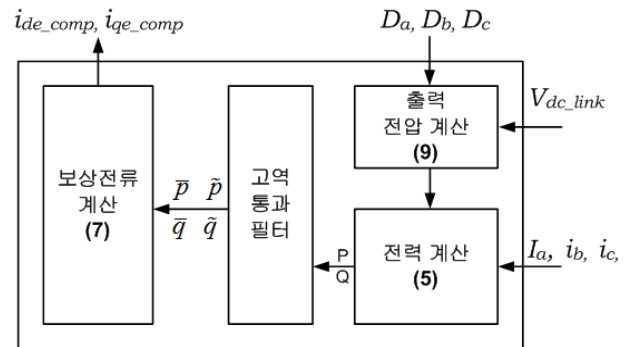


그림 2 제안된 전력이론을 통한 보상기의 블록도  
Fig. 2 Block diagram of proposed compensator with a power theory.

### 4. 시뮬레이션

제안된 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 PSIM을 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 표 1과 같은 조건에서 필터설계 순서에 따라 LCL필터를 설계<sup>[2]</sup>하여 실시되었으며, 시뮬레이션은 정격의 50%에서 이루어 졌다.

표1 시뮬레이션 조건

Table 1 Rated condition of simulation

정격 전력	10kW
정격 선전압	220Vrms
정격 전류	26.2Arms
허용전류 리플	10%(정격조건)
스위칭 주파수	3.5kHz
변압기 인덕턴스	0.4mH
계통 측 인덕터	1.0mH
인버터 측 인덕터	2.0mH
필터 커패시터	25uF

공진주파수에서의 필터 커패시터와 비슷한 수준의 임피던스를 가지는 수동저항소자를 연결하였을 시는 LCL필터로 인한 공진 극점이  $z$ -영역에서 단위원 안으로 이동하여 안정성을 보장할 수 있다<sup>[2]</sup>. 하지만 별도의 댐핑을 하지 않았을 때는 그림 3과 같이 시스템이 공진을 일으키게 된다.

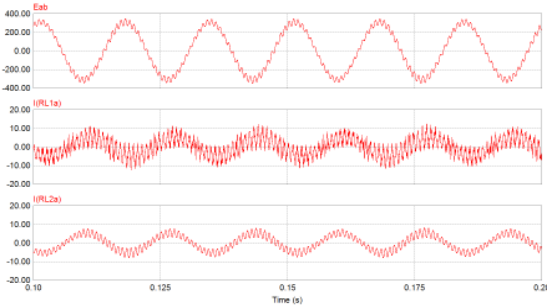


그림 3 선간전압과(상) 인버터측전류(중), 그리고 계통측 전류(하)의 시뮬레이션 파형

Fig. 3 Simulated waveform of line-to-line voltage (upper), inverter side current (middle) and grid side current (lower).

그림 4는 0.15초에 제안된 공진 보상전류를 투입한 선간전압과 상전류의 파형이다. 제어입력에서 공진에 의한 맥동성분을 제거하고 전류의 기본과 성분만을 입력하여 공진에 의한 맥동이 저감되었다.

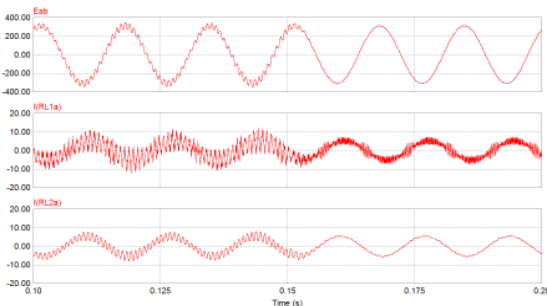


그림 4 공진보상 알고리즘이 0.15초에서 적용되었을 때의 선간전압과(상) 인버터측전류(중), 그리고 계통측 전류(하)의 시뮬레이션 파형

Fig. 4 Simulated waveform of line-to-line voltage (upper), inverter-side current (middle) and grid-side current (lower) (The compensation starts after 0.15 s).

## 6. 결론

본 논문에서는 풍력발전설비의 계통연계 인버터 시스템에 LCL필터를 적용할 시에 발생하는 공진문제를 해결하고 LCL필터의 성능개선을 위한 알고리즘을 제안하였다. LCL필터를 조건에 맞도록 설계하였고, 전력이론을 기반으로 한 보상기를 이용하여 공진에 의한 전류 및 전압파형의 왜곡을 보상하였다. 10kW급의 실험실 모델을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였고, LCL 필터설계와 제안한 공진보상기법의 타당성을 검증하였다.

## 참고 문헌

- [1] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Control in Power Electronics, New York Academic, 2002.
- [2] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1284-1285, Sept./Oct.2005.
- [3] 노재석, 최재호, "전압형 PWM 컨버터의 교류입력측 LCL 필터 설계," 전력전자학술대회논문지, 제 7권 5호, pp. 490-498, 2002년 10월.
- [4] M. Liserre, A. Dell'Aquila, F. Blaabjerg, "Stability improvements of an LCL-filter based three-phase active rectifier," in Proceedings of PESC'02, pp. 1195-1201, June 2002.
- [5] P.K. Dahono, "A controp DC-DC converter that has an LCL output filter based on new virtual capacitor and resister concept," in Proceedings of PESC'04, pp. 36-42, June 2004.
- [6] M. Liserre, A. Dell'Aquila, and F. Blaabjerg, "Genetic algorithm based design of the active damping for a LCL-filter three-phase active rectifier," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 1, pp. 76-86, Jan. 2004..
- [7] K. B. Lee and F. Blaabjerg, "A Simple Sensorless Scheme for Induction Motor Drives Fed by a Matrix Converter Using Constant Air-Gap Flux and PQR Transformation," International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 5, no. 6, pp. 652-662, December 2007.
- [8] 이교범, "PQR 순시전력이론을 이용한 Matrix Converter 구동장치의 비선형 특성 보상," 전기학회논문지, 53B권 12호, pp. 751-758, 2004년 12월
- [9] M. Malinowski, M. P. Kazmierkowski, S. Hansen, and F. Blaabjerg, "Virtual-flux-based direct power control of three-phase PWM rectifiers," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 4, pp. 1019-1027, July/Aug. 2001.