

# PWM 컨버터의 교류 전원 인터페이스를 위한 LCL 필터 설계

조병극, 이학준, 설승기  
서울대학교

## LCL Filter Design for AC Source Interface of PWM Converter

Byung-Geuk Cho, Hak-Jun Lee, Seung-Ki Sul  
Seoul National University

### ABSTRACT

본 논문에서는, PWM 컨버터의 교류 전원 인터페이스를 위한 LCL 필터 설계에 대해 기술한다. 새로운 형태의 LCL 필터 전류 제어기를 소개하고 기존의 전류 제어 방식을 통한 필터 설계 값에 제안된 제어 기법을 적용 시켜 전류 제어 결과를 분석한 후, 제안된 제어기를 통한 필터 설계 측면에서의 유연성 및 용이함에 대해 언급한다. 분석의 타당성을 입증하기 위해 모의 실험 결과를 첨부하였다.

### 1. 서론

신재생 에너지원의 3상 계통 연계를 위하여 PWM 승압 컨버터가 폭넓게 이용 되고 있다. PWM 컨버터 구동에 있어서 수동 소자를 최소화하는 것은 전체 시스템의 가격대 성능 비를 향상시키기 위한 매우 중요한 설계 요소이다. 직류단 캐패시터의 크기는 전원 전압 불균형 및 정전동에 대비한 직류단 전압 유지 조건에 의해 그 값이 결정되나 교류 전원과의 연계에 이용되는 인덕터 필터는 그 크기가 스위칭 주파수와 허용 되는 전원 맥동 전류에 의해 결정된다. 통상 수백 KVA급의 PWM 컨버터의 경우 인덕터의 % 임피던스 값은 10%에서 20%에 이르러 그 크기와 가격이 전체 시스템에서 큰 비중이 차지하게 된다. 이를 대체하기 위해 그림 1과 같이 크기 및 비용 감소가 가능한 LCL 형태의 필터가 사용되고 있으며 현재 산업계에서도 많이 이용되고 있다. LCL 필터를 사용할 경우 인덕터의 크기는 10% 이내로 줄일 수 있으나, 부가된 캐패시터와 함께 인덕터는 공진회로를 구성하기 때문에 전류 제어의 안정성이 보장되지 못하여, 별도의 수동 저항 소자를 이용하거나 제어기 내부의 능동 댐핑을 이용하여 안정성을 확보하여야한다.

본 논문에서는 새로운 형태의 LCL 필터 전류 제어기를 소개하고 제안된 전류 제어기를 이용해 필터 설계 측면에서의 유연성 및 공진 억제에 대한 용이함에 대해 언급한다. 모의 실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 입증한다.

### 2. 제안된 전류 제어기

제안된 전류 제어기는 필터 캐패시터의 전압 및 전류 정보를 이용해 계통 전류 지령에 대한 실제 전류의 전달함수가 저역 통과 필터의 형태가 되도록 한다. 식(1) ~ 식(4)는 동기 좌표계에서의 전압 및 전류 식을 나타낸다. 그림 2는 모델링 된

식을 토대로 필터를 모델링 한 블록도를 보여준다. 모델링에서 확인할 수 있듯이 전류 제어기를 세 부분으로 나눌 수 있으며 각 부분의 전향 보상값이 정확하다면 최종 계통 전류 성분을 원하는 형태로 제어할 수 있게 된다. 그림 3 ~ 그림 5는 설계된 각 부분의 전류 제어기를 보여주며, 식 (5) ~ 식 (12)는 최종 계통 전류 전달함수가 식 (13)과 같은 3차 저역 통과 필터 형태가 되기 위한 각 부분 전향 보상 성분 및 각 부분 전달함수를 나타낸다. 그림 6은 참조 논문[1]에서 설계된 필터에 대한 제안된 전류 제어기 성능을 보여주며, 그림을 통하여 교류 전력계통 전류의 고조파 성분이 적절히 제한됨을 확인할 수 있다.

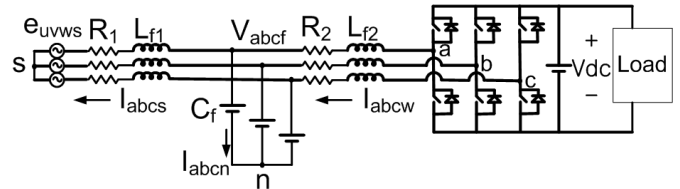


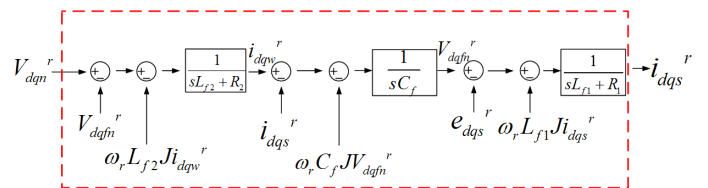
그림 1 LCL 필터 형태의 PWM 컨버터  
Fig. 1 PWM converter with LCL filter

$$V_{dqnr}^r = L_{f2} \frac{di_{dqwr}^r}{dt} + R_2 i_{dqwr}^r + V_{dqfn}^r + \omega_r L_{f2} J i_{dqwr}^r \quad \dots(1)$$

$$V_{dqfn}^r = L_{f1} \frac{di_{dqsr}^r}{dt} + R_1 i_{dqsr}^r + e_{dqsr}^r + \omega_r L_{f1} J i_{dqsr}^r \quad \dots(2)$$

$$i_{dqnr}^r = C_f \frac{dV_{dqfn}^r}{dt} + \omega_r C_f J V_{dqfn}^r \quad \dots(3)$$

$$i_{dqwr}^r = i_{dqsr}^r + i_{dqnr}^r \quad \dots(4)$$



LCL Filter Model

그림 2 LCL 필터 모델링  
Fig. 2 Modeling of LCL filter

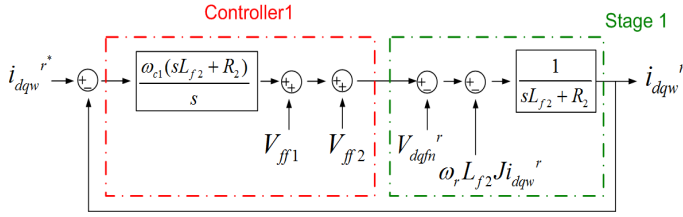


그림 3 제안된 전류 제어기 부분 1  
Fig. 3 Part 1 of proposed current controller

$$\frac{i_{dqw}^{r*}}{i_{dqw}^r} = \frac{w_{c1}}{s + w_{c1}} \quad \dots(5)$$

$$V_{ff1} = V_{dqfn}^r \quad \dots(6)$$

$$V_{ff2} = w_r L_{f2} J i_{dqw}^r \quad \dots(7)$$

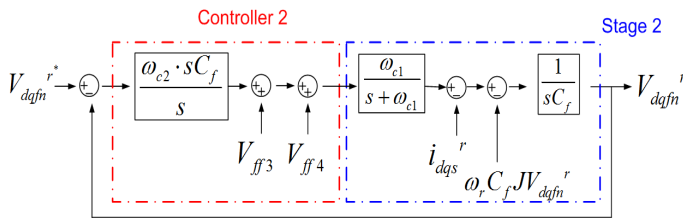


그림 4 제안된 전류 제어기 부분 2  
Fig. 4 Part 2 of proposed current controller

$$\frac{V_{dqfn}^{r*}}{V_{dqfn}^r} = \frac{w_{c1} w_{c2}}{s^2 + w_{c1} s + w_{c1} w_{c2}} \quad \dots(8)$$

$$V_{ff3} = \frac{s + w_{c1}}{w_{c1}} i_{dqs}^r \quad \dots(9)$$

$$V_{ff4} = \frac{s + w_{c1}}{w_{c1}} w_r C_f J V_{dqfn}^r \quad \dots(10)$$

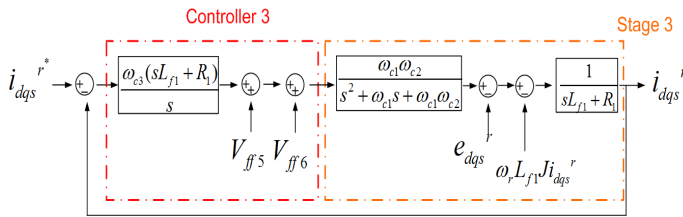


그림 5 제안된 전류 제어기 부분 3  
Fig. 5 Part 3 of proposed current controller

$$V_{ff5} = \frac{s^2 + w_{c1} s + w_{c1} w_{c2}}{w_{c1} w_{c2}} e_{dqs}^r \quad \dots(11)$$

$$V_{ff6} = \frac{s^2 + w_{c1} s + w_{c1} w_{c2}}{w_{c1} w_{c2}} w_r L_{f1} J i_{dqs}^r \quad \dots(12)$$

$$\frac{i_{dqs}^{r*}}{i_{dqs}^r} = \frac{w_{c1} w_{c2} w_{c3}}{s^3 + w_{c1} s^2 + w_{c1} w_{c2} s + w_{c1} w_{c2} w_{c3}} \quad \dots(13)$$

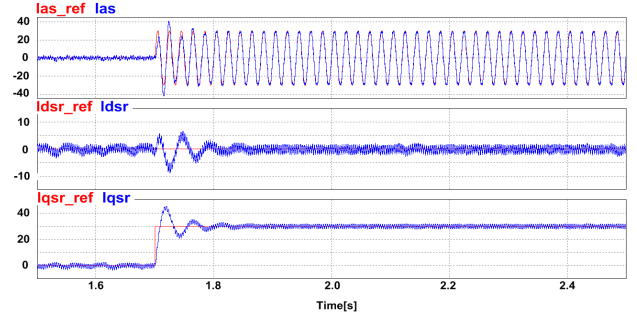


그림 6 제안된 전류 제어기 모의 실험 결과  
Fig. 3 Waveforms of proposed current control results

제정수	Lf1/R1	Lf2/R2	스위칭 주파수	샘플링 주파수
값	0.4[mH]/ 0.05[Ω]	1[mH]/ 0.05[Ω]	2[kHz]	4[kHz]

< 표 1. 모의 실험 제정수 >

### 3. 결론

본 논문에서는 3단 직렬 형태의 전류 제어기를 제안하여 LCL 필터 설계 측면에서의 새로운 가능성을 제시하였다. 기존의 전류 제어 방식에서는 궤환 성분에 대한 이득 결정이 매우 난해하고 특정 규칙이 존재하지 않기 때문에 필터 설계 방식도 복잡해진다. 제안된 전류 제어기를 이용할 경우에는 모의 실험을 통해 확인할 수 있듯이 공진 주파수에 대한 제어 주파수 최소 비율에 대한 제한만 존재하므로 필터 제정수 선정에 있어서 기존 방식보다 용이하고 유연성 또한 증가함을 알 수 있다. 향후에는 제어기 구현에 필요한 필터 캐패시터 전압 및 전류 성분을 직접 측정하지 않고 컨버터 측 전류 혹은 계통 전류만을 측정 하여 제안된 제어기와 동일한 성능을 보여줄 수 있는 방법 모색에 대한 연구가 필요하다.

이 논문은 (주)삼성중공업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고 문헌

- [1] J.Dannehl, C. Wessels and F.Wilhelm, "Limitations of Voltage-Oriented PI Current Control of Grid-connected PWM Rectifiers with LCL Filters ", IEEE Trans, Industrial Electronics., vol 56. No. 2
- [2] J.Dannehl, F.Wilhelm and P.B. Thogersen, " PI State Space Current Control of Grid-connected PWM Converters with LCL filters", IEEE Trans, Power Electronics., vol 25, no.9, 2010