

추가적인 센서가 필요없는 LCL 필터 MRAS의 능동댐핑 해석

유 정 선, 이 혁 진, 김 학 원[†], 조 관 열
한국교통대학교

Analysis of MRAS Active Damping LCL Filter without Additional Hardware Sensors

Jeong Seon Yu, Hyeok Jin Lee, Hag Wone Kim[†], Kwan Yuhl Cho
Korea National University of Transportation

ABSTRACT

3상 계통에 연결되어 사용하는 정류기는 스위칭에 의한 고조파 성분을 저감하기 위한 필터로 일반적으로 L 필터보다 고조파 성분 저감 성능이 우수한 LCL 필터가 사용된다. 그러나 LCL 필터는 공진으로 인한 문제가 발생하여 공진을 억제하기 위한 가상저항기법을 포함 능동댐핑기법이 제안되었으나 추가적인 센서를 필요로 한다. MRAS(Model Reference Adaptive System)를 이용한 추가적인 센서가 필요 없는 능동댐핑기법이 제안되었으나 수학적 모델에 대한 해석이 진행되지 않았다. 본 논문에서는 MRAS를 이용한 추가적인 센서가 필요 없는 능동댐핑기법에 대한 수학적 모델을 도출하고, 모의해석을 통해 제어기를 통한 능동댐핑 효과의 타당성을 검증한다.

1. 서 론

계통과 연결된 전원공급장치는 계통에 연계되는 타 장비에 영향을 일으킬 수 있는 고조파에 대한 영향으로 인해 계통 운영자가 정한 규제를 만족해야 한다. 일반적으로 PWM(Pulse Width Modulation) 컨버터는 입력 전류에 고조파를 포함하게 되며, 이를 저감하기 위한 필터를 사용한다. 전류 고조파를 저감하기 위한 LCL 필터는 L 필터보다 고조파 저감 효과가 우수하지만, 특정 주파수에서 임피던스가 0이 되는 공진 현상이 발생하게 되므로 공진현상을 해결하기 위해 댐핑이 필요하다. 공진 현상을 해결하기 위해 저항을 추가하는 수동댐핑(Passive Damping)이 있으나, 손실을 증가시키는 단점으로 인해 능동댐핑(Active Damping)에 관한 연구가 진행되고 있다. 가상저항(Virtual Resistor)을 이용하는 방식과 진상-지상(Lead-Lag) 보상기의 경우 추가적인 전압 또는 전류 센서가 필요한 단점이 있으며, 노치 필터(Notch Filter)의 경우 추가적인 센서가 필요하지 않지만 제어 안정성이 낮은 단점을 가지고 있다.^[1] 추가적인 센서가 필요없는 MRAS(Model Reference Adaptive System) 관측기를 이용한 능동 댐핑이 제안되어 그 효과에 대해 입증되었다.^[2] 그러나 능동 댐핑에 관한 수학적 모델링과 해석이 진행되지 않았다.

본 논문에서는 MRAS 관측기를 이용하여 추가적인 센서가 없는 능동댐핑기법에 대한 수학적 모델링을 통해 도출된 전달함수를 통해 감쇠비 변경이 가능한 알고리즘을 제안한다.

2. LCL 필터 모델링

2.1 LCL 필터의 수학적 모델

그림 1은 LCL 필터 회로이다. LCL 필터의 전압 및 전류 방정식을 통해 그림 2와 같이 블록선도로 나타낼 수 있다. LCL 필터의 키르히호프의 전압 및 전류 방정식과 블록선도를 통해 LCL 필터의 전달함수를 구하면 식 (1)과 같다.

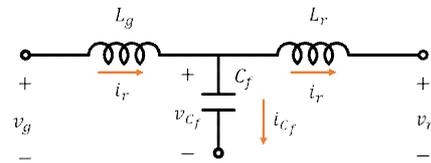


그림 1 LCL 필터의 회로도
Fig. 1 Circuit diagram of LCL filter

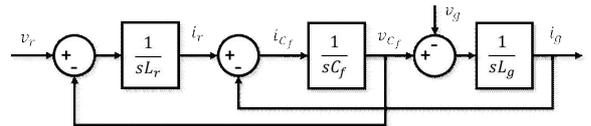


그림 2 LCL 필터의 블록 다이어그램
Fig. 2 Block Diagram of LCL filter

$$\frac{i_g(s)}{v_r(s)} = \frac{1}{sL_r} \frac{Z_{LC}^2}{s^2 + \omega_{res}^2} \quad (1)$$

v_g 와 i_g 계통측 전압 및 전류, L_g 는 계통측 인덕터, v_r 와 i_r 는 컨버터 측 전압 및 전류, L_r 는 컨버터측 인덕터, C_f 는 커패시터이며 v_{C_f} 와 i_{C_f} 는 커패시터의 전압 및 전류이며,

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_r + L_g}{L_r L_g C_f}}, \quad Z_{LC} = \sqrt{\frac{1}{L_g C_f}} \text{ 이다}$$

2.2 MRAS 관측기를 이용한 능동 댐핑 기법 구조

LCL 필터의 커패시터에서 발생하는 공진 성분을 MRAS 관측기를 통해 관측하고 이를 전향 보상하여 공진을 억제하는 방식이다. 다음 식 (2)은 LCL 필터를 모델링 한 식이며, 식 (3)는 커패시터 공진성분이 없는 이상적인 시스템을 모델링 한 식이다. 식 (2)과 (3)를 통해 식 (4)와 같이 커패시터의 공진 성분을 관측하며, 공진 성분은 그림 3과 같이 전향 보상한다.

$$v_{C_f}^{dq} = L_r \frac{d}{dt} i_r^{dq} \mp \omega L_r i_r^{dq} + v_r^{dq} \quad (2)$$

$$v_{C_f M}^{dq} = L_r \frac{d}{dt} i_{rM}^{dq} \mp \omega L_r i_{rM}^{dq} + v_r^{dq} \quad (3)$$

$$\Delta v_{C_f} = v_{C_f}^{dq} - v_{C_f M}^{dq} = -L_r \frac{d}{dt} (i_r^{dq} - i_{rM}^{dq}) \quad (4)$$

2.3 MRAS 관측기를 이용한 능동 댐핑 기법을 포함한 LCL 필터 모델링

그림 3은 MRAS 관측기를 이용하여 커패시터 전압의 공진 성분을 전향보상하는 구조를 나타낸 블록선도이다. 실제 커패시터의 전압인 v_{C_f} 과 공진 성분이 없는 이상적인 커패시터 모델 전압인 $v_{C_f M}$ 의 차를 통해 커패시터의 공진 성분을 관측하게 된다. 이때 커패시터 모델 전압은 이상적인 계통 전압과 동일하다면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 그림 4의 블록선도를 통해 전달함수를 도출하게 되면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다. MRAS 관측기를 이용한 능동댐핑의 전달함수는 댐핑이 없는 LCL 필터에 없는 식 (7)과 같은 감쇠 성분이 추가되며, 이득 K_M 을 추가하여 감쇠비를 조절 할 수 있다.

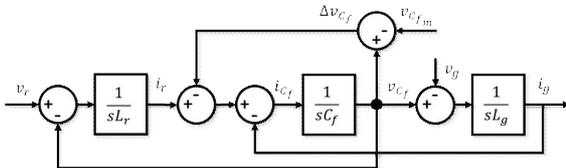


그림 3 MRAS 관측기를 이용한 능동 댐핑의 블록선도
Fig. 3 Block diagram of active damping using MRAS observer

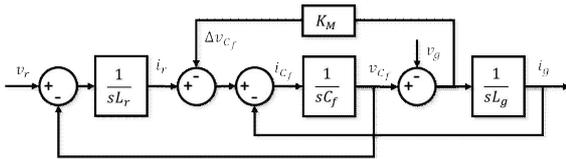


그림 4 이상적인 계통 전압을 이용한 블록선도
Fig. 4 Block diagram using ideal grid voltage

$$\frac{i_g(s)}{v_r(s)} = \frac{1}{sL_r} \frac{Z_{LC}^2}{s^2 + s \frac{K_M}{C_f} + \omega_{res}^2} \quad (6)$$

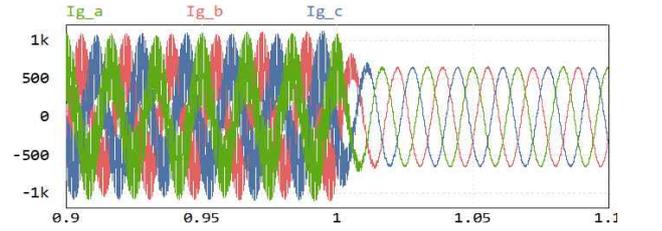
$$\zeta = \frac{K_M}{2C_f \omega_{res}^2} = \frac{K_M}{2C_f} \sqrt{\frac{L_r L_g C_f}{L_r + L_g}} \quad (7)$$

3. 모의해석 결과

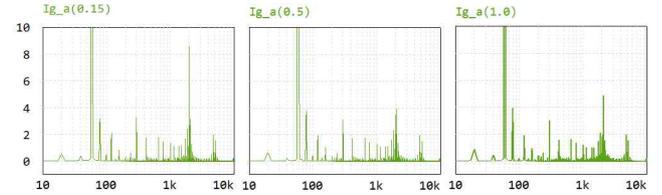
본 논문에서 모의해석에 사용한 PWM 정류기의 정격전력은 300kW, 계통전압은 220V/60Hz, PWM 주파수는 5kHz이다. LCL 필터의 계통측과 정류기측의 인덕턴스는 각각 30uH, 100uH, 필터 커패시턴스는 274uF, 공진주파수는 2kHz이다.

그림 5(a)는 MRAS 관측기를 이용한 능동 댐핑의 모의해석 결과이다. 1초 이후에 MRAS 관측기를 이용하여 커패시터 전압의 공진 성분을 보상하여 공진 성분이 제거된 결과를 볼 수 있다. 그림 5(b)는 이득 K_M 을 조절하여 감쇠비 ζ 를 0.15, 0.5, 1.0으

로 조절하여 계통 전류를 FFT 분석한 결과이며 감쇠비가 증가할 수록 공진주파수 대역의 성분이 감쇠됨을 확인할 수 있다. 표 1은 감쇠비에 따른 계통 전류의 THD를 분석한 결과이다. 감쇠비가 증가할수록 공진 성분 저감 효과가 상승하여 계통 전류의 THD가 감소하는 결과를 확인할 수 있다.



(a) 시간영역에서의 계통 전류



(b) 감쇠비에 따른 주파수영역에서의 계통 전류

그림 5 MRAS 관측기를 이용한 능동댐핑의 모의해석 결과

Fig. 5 Simulation Analysis Results of Active Damping Using MRAS Observer

표 1 이득 K_M 을 통한 감쇠비에 변경에 따른 계통 전류의 THD
Table 1 THD of grid current according to change of attenuation ratio through gain K_M

ζ	0.15	0.5	1.0
계통 전류 THD	1.75%	1.57%	1.42%

4. 결론

본 논문에서는 MRAS 관측기를 이용한 능동댐핑기법의 수학적 모델을 분석하고, 이득을 추가하는 방법을 제안하였다. LCL 필터의 블록선도를 통해 MRAS 관측기를 이용한 능동 댐핑 기법의 수학적 모델을 도출하고, 이득을 통해 감쇠비가 조절 가능하며, LCL 필터의 공진 성분을 감소함에 따라 계통 전류의 THD가 낮아짐을 300kW급 PWM 정류기 모의해석을 통해 입증하였다.

이 논문은 한국교통대학교의 2024년 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Camilo C. Gomes, Allan F. Cupertino, Heverton A. Pereira, Damping techniques for grid-connected voltage source converters based on LCL filter: An overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 81, Part 1, 2018,
- [2] 안병웅, 신희근, 김학원, 조관열, 한병문. 추가적인 센서가 필요 없는 3상 PWM 인버터의 LCL 필터 능동댐핑. 전력 전자학회논문지, 18(1), 10-17. 2013.