

매트릭스컨버터의 입력필터 설계기법에 대한 검토

모동영, 이상철, 최창영, 조춘호, 이건설, 김태웅, 박귀근*, 최재호**
경상대학교, *LG전자, **충북대학교

Study on Input Filter Design Method for Matrix Converter

Dong-Yeong Mo, Sang-Cheol Lee, Chun-ho Cho, Gun-Sik Lee, Tae-Woong Kim,
Gwi-Geun Park*, Jae-Ho Choi**
Gyeongsang National University, *LG Electronics, **Chungbuk National University

ABSTRACT

매트릭스컨버터는 부하이외에 시스템의 에너지 저장소자가 없다. 이에 시스템의 스위칭에 의한 고조파 잡음도 계통으로 직접적으로 유입되기 쉬운 시스템이기에 이에 적합한 입력필터 설계가 필요하다. 본 논문에서는 기존에 제시되어 있는 LC필터 및 LCL필터에 대하여 고찰한 후, 매트릭스컨버터에 적합한 필터 설계기법 및 수동댐핑저항에 대한 손쉬운 선정기법을 제안하였다. 그리고 제안한 기법에 대한 타당성을 시뮬레이션에 의해 검증한다.

1. 서론

전력변환시스템은 스위칭절환 기법에 의한 고조파 발생과 시스템의 외란에 의한 잡음이 계통으로의 유입을 억제하는 것이 중요하다. 이러한 잡음을 억제하기 위해서 일반적으로 인덕터를 이용한 입력필터를 사용해 왔지만, 스위칭리플에 의해 계통에 연계된 다른 장비에 EMI 문제를 야기 할 우려가 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 큰 용량의 인덕터를 사용할 경우에 시스템의 동특성이 떨어지며, 크기와 가격이 증가하게 된다. 따라서 인덕터 L과 커패시터 C를 조합한 필터를 사용하게 되면, 동특성이 고려된 L을 선정할 수 있지만 LC필터에 의한 공진문제가 발생하게 된다. 최근에 L과 C에 의한 공진문제를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있으며, 일반적으로 수동소자인 저항을 삽입하여 공진을 억제하고 있다.

매트릭스 컨버터는 직접형 전력변환시스템으로 부하이외에는 유도성 및 용량성 소자가 없는 구조를 가지고 있다. 따라서 고조파 및 시스템의 외란에도 큰 영향을 받으며, 시스템에서 발생한 잡음을 계통으로 그대로 유입되기 때문에 필터는 큰 역할을 하게 된다. 따라서 매트릭스컨버터에 맞는 필터설계를 위해 본 논문에서는 기존 연구에서 제시된 필터설계기법을 검증하여, 매트릭스컨버터에 대한 입력필터용 수동소자 용량 선정기법을 제안하고, 특히 공진 억제 저항 값의 선정에 대하여 다른 각도에서 제안하고, 타당성을 시뮬레이션으로 검증하고자 한다.

2. 매트릭스컨버터의 입력필터 설계

2.1 LC필터와 LCL필터의 선정기준

일반적으로 인덕터는 높은 주파수에서 임피던스가 크고, 낮

은 주파수에서 작아지는 특성을 가진다. 이와 반대로 커패시터는 높은 주파수에서 임피던스가 작아지고 낮은 주파수에서 커지게 된다. 이와 같은 특성에 의해 저주파수인 기본과 입력전류 성분은 L로 유입되며, 고주파수인 고조파 및 잡음은 C로 흐르게 된다.

대용량 L부하를 지닌 전류형 전력변환시스템의 입력단에 LCL필터를 설치할 경우, 입력필터의 L과 부하측의 L 사이에 스위칭소자 S가 삽입된 L-S-L 형태의 등가회로로 구성된다. 높은 주파수의 스위칭절환에 의해 전력변환시스템의 입력 및 출력 양단에 매우 큰 임피던스가 형성되어 고조파 성분에 의해 시스템의 동특성이 매우 나빠지게 된다.

반대로 대용량 C부하를 지닌 전압형 전력변환시스템의 입력단에 LC필터를 설치할 경우, 입력필터의 C와 부하측의 C 사이에 스위칭소자 S가 삽입된 C-S-C 형태의 등가회로로 구성된다. 높은 주파수의 스위칭절환에 의해 전력변환시스템의 입력 및 출력 양단에 매우 낮은 임피던스가 형성되어 고조파에 의해 시스템이 단락되어 과전류에 의해 파괴된다.

LC필터와 LCL필터는 기존 L필터 혹은 C필터의 문제점을 개선할 수 있지만, 시스템에 적합한 선정기준이 필요하다. 일반적인 부하는 유도성이기에 매트릭스컨버터와 같은 직접형 전력변환시스템인 경우, LCL필터가 아닌 LC필터를 선정해야 하며 필터를 설계할 때에 부하특성을 반드시 고려해야 한다. 이는 유도성 부하로써 필터의 L과 부하의 L이 직렬접속이 되는 등가회로상의 특성을 가지는 것을 방지하기 위함이다.

2.2 LC필터와 LCL필터의 전달함수

LC필터는 L과 C의 병렬연결로, LCL필터는 LC필터에 L을 추가한 구조이며, 이에 대한 전달함수와 감쇄율계수 ζ와 공진주파수는 표 1에 보여준다.^{[1][2]} 전달함수에서 알 수 있듯이 LC필터와 LCL필터의 차이점은 반공진점의 존재여부에 있다. 이러한 공진문제는 필터를 설계할 때에 가장 큰 비중을 차지하게 되는 영역이고 공진을 억제하기 위한 기법이 기존에 많이 제시되어 왔지만, 본 논문에서는 수동저항을 이용한 감쇄기법을 사용한다.

표 1. 필터구조에 따른 전달함수, 감쇄율계수, 공진주파수

구조	전달함수	감쇄비	공진주파수
LC 필터	$G(s) = \frac{I_g}{I_c} = \frac{2\zeta\omega_{res} + \omega_{res}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{res} + \omega_{res}^2}$	$\zeta = \frac{\sqrt{C_f}}{2R_d\sqrt{L_f}}$	$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$
LCL 필터	$G(s) = \frac{I(s)}{V(s)} = \frac{1}{L_g s^2 + R_d C_f Z_{LC}^2 s + Z_{LC}^2}$		$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_g + L_c}{L_g L_c C_f}}$ $\omega_{ant-res} = \frac{1}{\sqrt{L_c C_f}}$

2.3 필터설계 과정

상기의 절에서 언급하였듯이 우선적으로 전력변환시스템의 구성에 따라 LC 필터 혹은 LCL필터를 선택한 후, 다음과 같은 설계과정을 통해 필터의 파라미터를 계산한다.

step 1 : 전원주파수와 스위칭주파수 고려한 기준주파수 선정

입력필터를 설계할 때에 수동댐핑저항의 값을 손쉽게 계산하기 위해 기준주파수 f_{std} 를 도입한다. 전력변환시스템의 스위칭주파수 f_{sw} 와 필터 기준주파수 f_{std} 와의 비 f_{sw}/f_{std} 에 따라 스위칭주파수에서의 감쇄도 AF는 아래의 식에 의해 결정되며, 일반적으로 $f_{sw}/f_{std} = 10$ 의 관계를 유지하도록 기준주파수를 선정한다. 공진주파수 f_{res} 가 기준주파수 f_{std} 에 근접할 수 있도록 설계한다. 본 논문에서는 기준주파수를 스위칭 주파수의 1/10배로 설정하였다.

$$AF = \frac{I_y}{I_c} = \left[\frac{f_{sw}}{f_{std}} \right]^2 \quad (1)$$

step 2 : 시스템의 정격용량 및 입력전원(전압/주파수) 고려

시스템 정격용량에 따라 전압, 전류, 임피던스 등의 상관관계가 결정되기 때문에, 실제로 수동소자를 사용하는 필터에 있어서 임피던스가 시스템에 영향을 주게 된다. 따라서 시스템의 기저임피던스 Z_b 와 기저커패시터 C_b 는 아래와 같이 구하게 된다.^[2]

$$Z_b = \frac{V_{L,rms}^2}{P}, \quad C_b = \frac{1}{\omega_b Z_b}, \quad \omega_b = 2\pi f \quad (2)$$

where $P = \frac{V^2}{R}$, f : 전원주파수, f_b : 기저전원주파수

step 3 : 고조파왜형률(THD과 역률(PF) 고려

필터 인덕터는 기저임피던스와 입력전류 고조파왜형률을 기반으로, 필터 커패시터는 기저커패시터와 입력역률을 기반으로 다음 식에 의해 각각 계산된다.^[2]

$$X_L = Z_b \times \Delta i_{conv}, \quad L_{f,conv} = \frac{X_L}{\omega_b}, \quad C_f = PF \times C_b = \frac{L_{f,conv}}{Z_b^2} \quad (3)$$

step 4 : 기준주파수와 공진주파수 L의 관계기반 R_d 선정

수동댐핑저항 R_d 은 공진전류를 억제하기 위해 적절히 설정해야 한다. 공진주파수에서 L과 C의 임피던스는 동일하기 때문에 공진이 발생하게 된다. 따라서 L에 병렬로 R_d 을 사용하게 되면 입력 측의 임피던스가 작아지게 되며, 공진 전류가 입력 측의 수동댐핑저항으로 흘러가기 때문에 공진을 억제 할 수 있게 된다. 이때 기준주파수 f_{std} 이상의 고조파전류를 R_d 에서 소모해 주기 위해서 아래와 같은 식을 만족되어야 한다.

$$X_{L,res} < R_d < X_{C,std} \quad (4)$$

step 5 : LCL필터인 경우에만 고조파 감쇄비(HAR) 고려

HAR에 따라 L_y 와 L_{conv} 을 다음 식에 의해 계산한다.^[2]

$$L_y = r \times L_{conv}, \quad \frac{i_y(h_{sw})}{i_{(h_{sw})}} = \frac{1}{|1+r(1-ax)|}$$

$$a = L_{conv} \times C_b \times \omega_{sw}^2, \quad x = \frac{L_c \times \omega_b}{Z_b}, \quad r = \frac{1+i(h_{sw})/i_y(h_{sw})}{ax-1}$$

where L_{conv} : 컨버터 입력단에 설치된 L(= L_f), L_y : 계통측에 설치된 L

3. 시뮬레이션 해석

3.1 시스템 구성

유도성 부하를 가진 매트릭스컨버터에 대해 설계된 LC형 입력필터를 설치하였으며, 필터의 공진을 억제하기 위해 L에 대해 병렬로 수동댐핑저항을 연결하도록 설계하였다. 그리고

시뮬레이션 조건 및 상기의 필터설계 과정을 통해 계산된 필터 설계 파라미터는 표 2에 보여준다.

3.2 시뮬레이션 결과 및 분석

1kW급 매트릭스컨버터에 설계된 LC필터의 주파수 응답을 그림 1에 보여주며, 707Hz의 공진주파수에서 수동댐핑저항의 값에 따라 공진성분이 저감됨을 보여준다. 그림 2는 RL부하를 가진 매트릭스컨버터에 대한 계통측 전류, 컨버터측 전류, 그리고 출력전류 파형을 보여주고 있으며 그림 2의 (a)는 수동댐핑저항을 설정하지 않은 경우, 그림 2의 (b)는 수동댐핑저항을 6.09Ω로 설정하였을 때 시뮬레이션 파형이고, 수동댐핑저항에 의해 고조파전류에 의한 공진전류를 억제할 수 있어 좋은 계통측 전류를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

표 2. 시뮬레이션 조건 및 계산된 필터설계 파라미터

정격용량	1000 W	왜형률	4%
전압	100 V _{rms}	역률	82%
전원주파수	60Hz	스위칭주파수	5kHz
L_f	1.06mH	C_f	47.7 μF
f_{res}	707Hz	R_d	6.09Ω

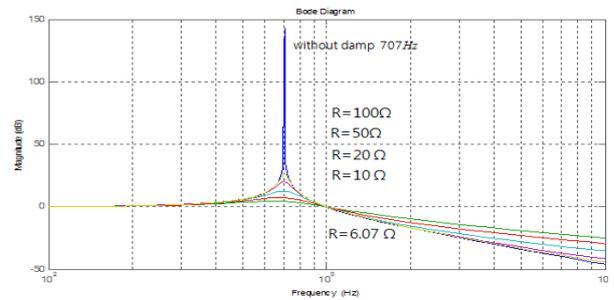
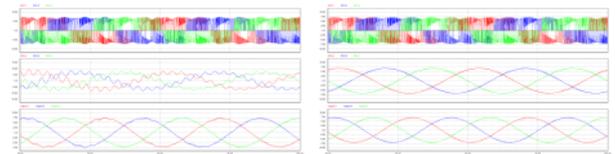


그림 1. 댐핑계수에 따른 LC 필터의 보드선도



(a) without damping resistor (b) with damping resistor

그림 2. 매트릭스컨버터의 LC필터설계에 따른 전류파형; (상) 매트릭스컨버터의 입력측 전류, (중) 계통측 전류, (하) 출력전류

3. 결론

본 논문에서는 기준에 제시된 LC필터와 LCL필터를 기반으로 매트릭스컨버터의 입력필터 설계기법에 대해 고찰하였다. 특히, 전력변환시스템의 구조에 따른 필터 구조를 선정하는 이유, 그리고 시스템의 정격용량, 스위칭주파수, 전원전압 및 전원주파수, 입력전류 왜형률, 입력역률 등을 고려하여 필터의 파라미터를 손쉽게 계산하고 공진을 억제하기 위해 사용되는 수동댐핑저항 설정에 대하여 고안하였으며, PSIM에 의해 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Tae-wong Kiim, Hyo-sung Kim, Jae-ho Choi. "Input Filter Design for Current Source PWM GTO Converter" Power Conversion Conference, Yokohama, pp. 32-37, 1993
- [2] M. Liserre, F. Blaabjerg, and A. Dell'Aquila, "Step-by-Step Design Procedure for A Grid-connected Three-Phase PWM Voltage Source Converter," Int. J. Electron., vol. 91, no. 8, pp.445-460, Aug. 2004.