매트릭스 컨버터 입력 LC 필터 설계 및 분석

차한주, 김우중
충남대학교

Design and analysis of input filter for 3 Phase Matrix Converter

Hanju Cha, Woojung Kim
Chungnam National University

Abstract - 본 논문에서는 매트릭스 컨버터의 입력 필터 설계를 하고, 시뮬레이션하여 타당성을 검증하고 분석한다. 매트릭스 컨버터는 18개의 양방향 스위치로 구성되어 있으며, 출력 전압을 합성하기 위해 각각의 스위치가 빠르게 온-오프 한다. 이러한 스위칭 과정에서 고차 고조파가 발생하고, 이 고조파는 매트릭스 컨버터 주위에 연결된 각종 기기에 영향을 미친다. 따라서 고차 고조파를 줄이기 위해 계통과 매트릭스 컨버터 사이에 입력 필터를 설치하여 이러한 영향을 줄여야 한다. 입력 필터의 L과 C, 그리고 공진 주파수 근처의 값을 줄이기 위한 댐핑 저항 값을 계산하는 방법을 소개하고, 타당성을 검증한다.

1. 서 론

AC-AC 직접 변환 장치인 매트릭스 컨버터는 많은 양의 스위치를 온오프하고, 이 과정에서 다른 전력 시스템에 영향을 미치는 원치 않은 신호가 발생하며, 결과적으로 언제나 컨버터에 입력 필터가 포함되길 요구된다. 입력 필터는 컨버터 입력 전류 파형에 나타나는 스위칭 고조파를 줄이고, 스위칭 고조파 규정에 적합하게 한다. 또한 입력전압에 나타나는 과도 전류로부터 컨버터와 부하를 보호하여, 시스템의 신뢰성을 증가시킨다.

정류기입력 AC-DC-AC 변환 장치와는 다르게 매트릭스 컨버터는 저차 고조파가 발생하지 않는 이점이 있으므로 일반적인 LC 저역통과 필터를 선택하였다. 필터의 값 설정에 있어서도 이러한 이점이 작용하며 그 설계 과정을 소개한다.

2. 매트릭스 컨버터 전압 변조 방법

매트릭스 컨버터는 3상 AC 전압에서 임의의 전압과 주파수로 바로 변화할 수 있는 전력 변환 장치이고, 그림 1은 매트릭스 컨버터 회로 모델이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 계통과 입력필터, 매트릭스 컨버터, 출력 부하로 구성되어 있다. 매트릭스 컨버터의 출력 전압은 9개의 양방향 스위치에 의한 입력전압의 조합으로 만들어지며, 출력 전압은 아래 식(1) 과 같이 나타낸다.

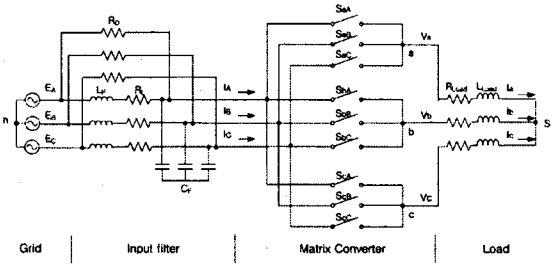

그림 1. 매트릭스 컨버터 전력 회로

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{aA} S_{bA} S_{cA} \\ S_{aB} S_{bB} S_{cB} \\ S_{aC} S_{bC} S_{cC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

매트릭스 컨버터는 에너지 저장 장치가 없어서 입력과 출력이 서로 강하게 영향 받는다. 하지만 제어방법에 따라 출력이 입력에 독립적으로 될 수 있으며, 본 논문에서는 옵셋전압 PWM 전압 변조 방법[1]으로 제어한다. 이 방법은 입력 역률1.0과 낮은 입력전류 THD를 보이고, 전압원의 왜곡과 불평형에 강한 운전 특성을 보인다.

옵셋전압 PWM 방법은 출력 지령전압과 캐리어의 비교를 통해 출력 전압을 식 (2)의 등식이 성립하도록 합성하며 그림 2와 같이 나타낸다. T_1과 T_2의 배분은 입력 전력과 출력 전력의 관계식에서 유도된다.

$$V_{an1} \times T_1 + V_{an2} \times T_2 = E_{\min} \times T_{1a} + E_{\max} \times (T_{2a} + T_{3a}) + E_{mid} \times T_{4a} \quad (2)$$

$$T_s = T_{1a} + T_{2a} + T_{3a} + T_{4a}$$

T_{1a}: T_1 구간에서 min 상이 온 되는 시간
T_{2a}: T_1 구간에서 max 상이 온 되는 시간
T_{3a}: T_2 구간에서 max 상이 온 되는 시간
T_{4a}: T_2 구간에서 mid 상이 온 되는 시간

식 (2)에서 알 수 있듯이, 출력 전압은 각 입력전압이 온 되는 시간에 의해서 결정되고, 이 시간은 그림 2에서 쉽게 구할 수 있다. 그림 2의 T_c를 2개로 나눠서 T_1, T_2라고 하고, T_1 동안에는 입력 선간 전압이 가장 큰, 입력전압이 최대인 상 전압(E_{max})와 입력전압이 최소인 상 전압(E_{min}) 사이의 선간 전압을 이용한다.

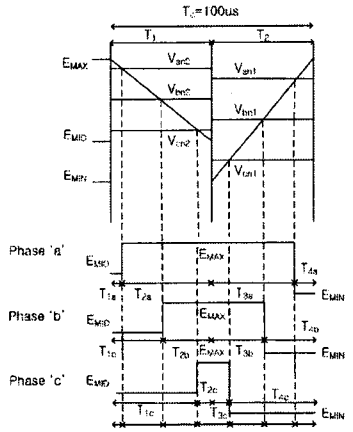

그림 2. 캐리어와 출력 전압에 따른 스위칭

T_2기간에는 입력 선간 전압이 중간인 것을 이용하고, 전압 이용률을 높이기 위해 $E_{max} - E_{mid}$ 와 $E_{mid} - E_{min}$ 중 절대값의 크기가 더 큰 구간을 사용한다. $E_{max} - E_{min}$ 과 $E_{max} - E_{mid}$ 사이의 각 끝점을 대각선으로 이어 출력 극전압 V_{an1}, V_{an2} 와의 비교를 통해 입력전압이 온 되는 시간을 결정하고, V_{an1}, V_{an2} 은 식 (3) 과 같이 구한다. 여기서 V_{sn1} 은 T_1 구간에서의 옵셋 전압이고, V_{sn2} 는 T_2 구간에서의 옵셋 전압이다.

$$V_{an1} = V_{as} + V_{sn1}$$
$$V_{an2} = V_{as} + V_{sn2} \quad (3)$$

3. 입력 필터 설계

매트릭스 컨버터는 고차 고조파가 발생되므로 LC 로우 패스 필터만으로 일정 수준의 입력 전류 파형이 만들 수 있으며, 추가 토폴로지의 사용을 필요로 하지 않는다. 그림 3은 매트릭스 컨버터 입력단에 들어가는 LC 필터이고, R_D 는 LC 공진주파수에서의 댐핑을 줄여주기 위해 달아 주었다. E_{Fin} 은 필터 입력단 전압이고 E_{Fout} 은 필터 출력단 전압, I_F 는 계통과 입력 필터사이의 전류이다.

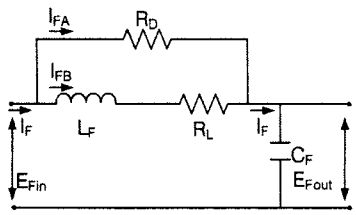

그림 3. 입력 필터의 회로도

3.1 입력 필터 설계

매트릭스 컨버터 입력 필터는 고조파 주파수를 차단해야 하며, 필터의 C_F 가 입력 역률에 영향을 미쳐서는 안되며, L_F 가 큰 전압강하를 일으키면 안된다. 또한 L_F, C_F 에 의한 공진 주파수에 의한 영향도 줄여야 하며, 위와 같은 점을 고려하여 필터 설계를 한다.

매트릭스 컨버터의 주 용도는 전동기 구동이며 출력부하의 역률과 관계없이 매트릭스컨버터 입력단에서는 역률 1이라는 장점이 있다. 다시 말하면 출력단 전동기의 무효전력과 유효전력을 합한 피상전력이 매트릭스 컨버터의 입력단에서 전부 유효전력으로 나타나는 것이다. 현재 실험실 보유 전동기는 1.7kW 이며 이 용량에 맞춰 입력 필터 값을 설정하여 추후 전동기 구동에 설계한 입력필터를 적용해 나갈 것이다.

매트릭스 컨버터 입력단 전력을 1.7kW 이고, 1.7kW 에 필터전력이 더해져 계통에서 공급받게 될 것이다. 이 때 필터의 C_F 에 의해 입력 역률이 결정된다. 현재 한국전력에서는 역률 0.95 까지 요금 감면을 해주고 있어, C_F 값도 역률 0.95에 맞춰 정하면 된다. 1.7kW를 역률 0.95로 환산한 피상 전력은 1.8kVA 이고, 이 역률까지 정할 수 있는 무효전력은 567.6var 이다. 입력 필터에 총 3개의 캐패시터가 들어가니 개당 소요할 수 있는 무효전력은 189var 이고, 이를 C_F 값으로 환산하면 약 29uF 이란 값이 나오며 여기에 역률 여유를 두어 C_F 값을 20uF 를 설정한다. 물론 추후 실험에서 차단주파수를 더 높여야 한다면 30uF 으로 바꿀 수 있다.

다음으로 설정해야할 값이 L_F 이다. C_F 값이 이미 정해져 있으므로 L_F 값으로 인해 차단 주파수가 결정되고, 이 차단 주파수는 스위칭 주파수에 의해 결정된다. 위 전압 변조 방법의 스위칭 주파수는 5kHz 이고, 그림 4에 시뮬레이션으로 입력전류 I_A의 FFT 변환하여 차단 주파수를 결정하는데 필요한 자료로 활용하였다. 약 5kHz 고조파를 차단하여야 하므로 임시로 차단 주파수를 2kHz 부근으로 정하고 L_F 값을 구한다.

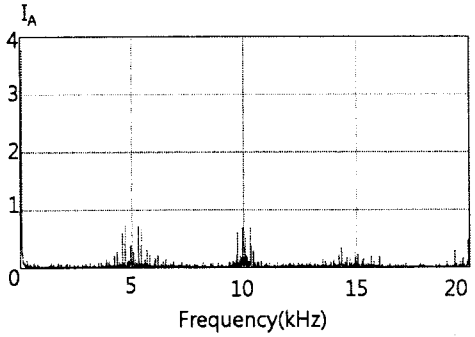

그림 4. 입력 전류 I_A의 FFT - 출력 1.7kW

$$2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{L_F C_F}} \quad (4)$$

$$L_F = \frac{1}{C_F (2\pi f_c)^2} \quad (5)$$

식 (4), (5) 의 과정을 거쳐 구한 L_F 는 0.3mH 이며 필터 설정 시 고려해야 할 L_F 전압강하를 계산하여 이 값을 점검하여야 한다. 1.7kW 부하를 위해 필요한 계통 입력은 1.8kVA 이며 상전류는 4.7Arms 이고 이 값으로 인한 전압강하는 입력 상전압 127Vrms 중 약 0.5V 로 미미한 값이므로 0.3mH 를 사용한다.

L_F, C_F 값을 정하였고 마지막 남은 변수인 R_D 값을 정하기 위해서 그림 3 의 입력필터의 전달함수를 구해야 하고, 식 (6)부터 식 (9)까지로 구하였다.

$$TF = \frac{E_{Fout}}{E_{Fin}} \quad (6)$$

$$E_{Fout} = V_{C_F} = \frac{1}{C_F}\int I_F dt = \frac{1}{C_F}\int (I_{FA} + I_{FB}) dt \quad (7)$$

$$E_{Fin} = L_F \frac{dI_{FB}}{dt} + R_L I_{FB} + \frac{1}{C_F}\int I_F dt \quad (8)$$
$$= L_F \frac{dI_{FB}}{dt} + R_L I_{FB} + \frac{1}{C_F}\int (I_{FA} + I_{FB}) dt$$

$$TF = \frac{\frac{L_F s + R_L + R_D}{R_D L_F C_F}}{S^2 + (\frac{R_L}{L_F} + \frac{1}{R_D C_F})s + (\frac{R_L}{L_F R_D C_F} + \frac{1}{L_F C_F})} \quad (9)$$

그림 5는 식 (9)에서 정해진 값을 대입하고 R_D를 조정하여 Matlab 으로 입력 필터 전달함수를 보드선도로 그린 것이다. 그림 5에서 알수 있듯이 설정한 차단 주파수 2kHz 부근에서 높은 이득값을 갖으며 댐핑 저항 R_D 로 어느 정도 선까지 줄일 수 있다. 이 R_D 가 회로에서 없어지면 차단주파수에서 공진에 의해 큰 이득값을 갖게 되고, 결과적으로 고차 고조파는 차단하였지만 공진주파수의 고조파를 형성하게 되어 60Hz의 원하는 입력 전류 파형이 만들어지지 않는다.

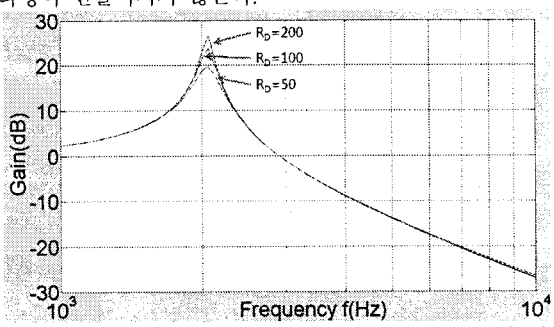

그림 5. R_D 변화에 따른 차단 주파수 2kHz 부근의 입력 필터 보드선도

R_D에서 한가지 더 고려해야 할 점은 저항에서 전력 소모로 인한 효율 감소이다. R_D는 50Ω에서 소모되는 전력 P_{R_D}는 Powersim 으로 구해진 I_A 한주기 시간동안의 I_{FA} 데이터를 바탕으로 식 (10) 으로 구할 수 있다. 식 (10) 으로 구해진 P_{R_D}는 출력 부하 1.7kW 기준 약 0.5W 이고, 출력 대비 약 0.03% 손실을 가져오지만 미미함으로 적합한 값이다.

$$P_{R_D} = \frac{1}{T}\int_0^T (I_{FA})^2 R_D dt \qquad (10)$$

3.2 시뮬레이션 결과

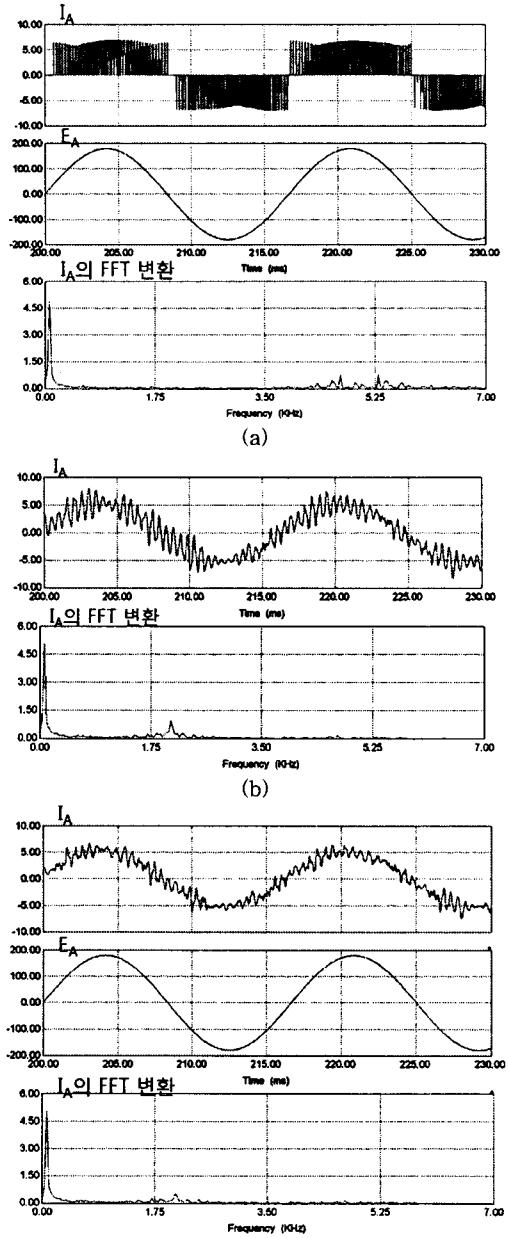

그림 6. 입력 필터 적용 전후의 시뮬레이션 결과
(a) 입력 필터 적용 전의 I_A, E_A와 I_A 의 FFT 변환
(b) 입력 필터(L_FC_F) 적용 후의 I_A와 I_A의 FFT 변환
(c) 입력 필터($L_FC_FR_D$) 적용 후의 I_A, E_A와 I_A의 FFT 변환

표 1. 시뮬레이션 조건

입력 선간 전압	220Vrms
입력 주파수	60Hz
스위칭 주파수	5kHz
차단 주파수	2kHz
$L_F(R_L)$	0.3mH(0.1Ω)
C_F	20uF
R_D	50Ω
전압 전달율	0.866
출력 전력	1.7kW

표 1 은 시뮬레이션 조건이고, Powersim 을 사용하여 그림 1 의 계통 입력부터 입력필터, 매트릭스 컨버터, 1.7kW 출력 부하를 설정하고 동작하였다. 시뮬레이션 한 결과를 그림 6 (a) ~ (c) 까지 첨부하였고, 입력 필터 적용 전후의 입력전류와 입력전류의 FFT 변환한 결과이다. 그림 6 (a) 에서 알 수 있듯이 입력 필터 적용전의 입력 전압과 입력 전류는 동상으로 계통에서 본 역률은 1이다. 그림 6 (b) 는 R_D를 제외한 입력필터를 적용한 것이고 그림 6 (c) 는 R_D까지 포함한 입력 필터이다. 그림 6 (b) 와 (c)의 I_A 파형에서 고조파가 크게 줄어든 것이 보이고, FFT 변환한 부분에서 설계한 입력필터의 효과를 알 수 있다. 더불어 차단주파수 2kHz 부근에서 고조파 값이 그림 6 (c) 가 (b) 에 비해 크게 줄어 R_D 의 유용성도 알 수 있었다.

그리고 그림 6 (c) 에서는 입력 전류의 위상이 입력 전압의 위상보다 약간 앞서고, 이는 입력 필터의 C_F 값 때문이지만 설계한 대로 역률 0.95 이상임으로 문제없다.

4. 결 론

시스템의 신뢰성을 증가시키기 위해, 입력 필터는 때때로 부하의 순간 또는 주기적인 방해가 계통 전원에 적용될 때 동작되길 요구되고, 입력 필터 공진을 줄이기 위한 정확한 설계는 필터나 컨버터에 과전류나 과전압을 발생하지 않게 한다. 이를 위해 계통 전원의 특성이나, 부하의 용량, 부하 특성등을 입력 필터 값을 설정하기 전에 측정하거나 정해야 한다. 정해진 부하 용량으로 C_F 값을 설정하였고, 스위칭 주파수를 고려하여 L_F 값을 계산하여 정하였다. 그리고 L_F 값이 미치는 전압강하정도를 계산하여 적합한 값인지 확인하였고, 다음으로 댐핑 저항값을 구하였다. 댐핑 저항 R_D값을 구하기 위해서 입력필터의 전달함수를 구해 Matlab을 사용하여 보드선도를 그려 R_D 값을 찾고 효율 저하여부도 검증하였다. 이렇게 설계한 1.7kW 용량에 맞는 입력 필터를 시뮬레이션으로 필터 적용 전후의 입력전류를 측정하여 설계한 값이 적합한지 검증하였다. 추후 설계한 입력 필터 값으로 구현하고, 입력필터까지 적용한 매트릭스 컨버터로 1.7kW 유도 전동기를 구동할 것이다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

[1] Y. Yoon, S. Sul, "Carrier-Based Modulation Technique for Matrix Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, Issue 6, Nov. 2006 pp. 1691 - 1703

[2] H. Cha, P. N. Enjeti, "An approach to reduce common mode voltage in matrix converter" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 4, July/August 2003, pp. 1151~1159

[3] Saul Lopez Arevalo, " Matrix Converter for Frequency Chnging Power Supply Applications", Ph.D dissertation, University of Nottingham, January, 2008 pp.45-48