

3상 매트릭스 컨버터 입력필터 설계 및 분석

김우중, 임현주, 차한주
충남대학교

Design and analysis of input filter for 3 Phase Matrix Converter

Woojung Kim, Hyunjoo Lim, Hanju Cha
Chungnam National University

Abstract - 본 논문에서는 매트릭스 컨버터의 입력 필터를 설계하고 실험을 수행한 후 입력 파형 비교를 통하여 타당성을 검증하고 분석한다. 매트릭스 컨버터는 18개의 양방향 스위치로 구성되어 있으며, 출력 전압을 합성하기 위해 각각의 스위치가 실시간으로 빠르게 온-오프 한다. 이러한 스위칭 과정에서 고차 고조파가 발생하고, 이 고조파는 매트릭스 컨버터 주위에 연결된 각종 기기에 영향을 미친다. 이러한 영향을 줄이기 위해 설치한 것이 입력필터이다. 본 논문에서는 적절한 입력필터의 소자값을 계산해 내는 과정을 설명하고 이를 구현한 후, 실험을 통해 필터의 설치 전후의 입력 전류 고조파 왜곡율(THD) 등 파형의 변화를 비교하여 설계 값의 타당성과 필터의 적정성을 알아본다.

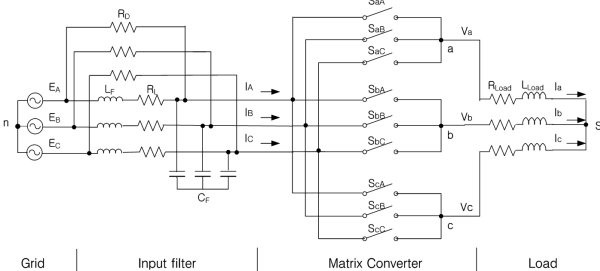
1. 서 론

AC-AC 직접 변환 장치인 매트릭스 컨버터는 고속으로 스위칭하는 과정에서 원치 않는 신호가 생기며, 이는 다른 전력 시스템에 영향을 미치게 되어 입력 필터의 필요성이 요구된다. 매트릭스 컨버터의 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.

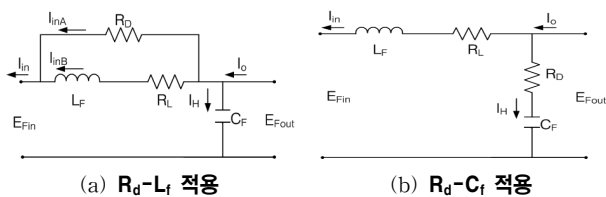
2. 매트릭스 컨버터 전압 변조 방법

매트릭스 컨버터는 3상의 임의의 출력 전압과 출력 주파수로 실시간 변환할 수 있는 전력 변환 장치이다. 매트릭스 컨버터 전력회로 모델은 그림 1과 같으며, 구성은 크게 계통과 입력필터, 매트릭스 컨버터, 출력 부하로 나눌 수 있다.

매트릭스 컨버터의 여러 가지 변조 방법 중 입력 역률 1.0과 낮은 입력 전류 THD, 전압원의 왜곡과 불평형에 강한 운전 특성을 보인 육상 전압 PWM 변조 방법을 이용한다[1]. 육상전압 PWM 방법은 출력 지령전압과 캐리어의 비교를 통해 출력 전압을 합성하며, 육상 전압을 더해 출력 지령 전압이 입력 선간 전압 안에 위치하도록 하여 0.866의 최대 전압 변조율을 나타낸다.



〈그림 1〉 매트릭스 컨버터 전력회로



(a) R_d-L_f 적용 (b) R_d-C_f 적용

〈그림 2〉 입력 필터의 회로도

3. 입력 필터 설계

매트릭스 컨버터는 고속 스위칭에 의한 고차 고조파가 발생되므로 LC 저역통과 필터만으로도 일정 수준의 스위칭 고조파가 제거된 입력 전류 파형을 만들 수 있다. 그림 2는 매트릭스 컨버터 입력 단에 들어가는 LC 필터이고, R_D는 LC 공진주파수에서의 댐핑을 줄여주기 위해 주위 조건에 따라 L에 병렬로 연결하거나 C에 직렬로 연결한다. E_{Fin}은 필터 입력단 전압이고 E_{Fout}은 필터 출력단 전압, I_{in}은 계통과 입력 필터사이의 전류이다. 필터 설계시 필터의 C_F가 입력 역률이 간섭하지 않고, L_F가 큰 전압강하에 관계하지 않게 구현되어 될 뿐만 아니라, 필터의 L_F, C_F의 공진 주파수에 의한 영향도 최소화해야 한다.

3.1 C_F값의 설정

매트릭스 컨버터는 출력부하의 역률과 관계없이 매트릭스 컨버터 입력단에서는 역률 1이라는 장점이 있다. 다시 말하면 출력단 전동기의 무효전력과 유효전력을 합한 피상전력이 매트릭스 컨버터의 입력단에서 전부 유효전력으로 나타나는 것이다. 매트릭스 컨버터의 주용도는 전동기 구동이며, 실험실 보유중인 1.7kVA 전동기 구동을 하기위한 필터이기 때문에 부하를 1.7kVA 로 설정하였다. 계통의 입력 선간전압 220V_{rms} 에서 역률 0.95에 맞추고 여유를 두어 계산한다면, C_F 1개당 29uF의 값이 구해지고 이 보다 적은 값인 20uF를 사용한다.

3.2 L_F값의 설정

C_F의 값이 정해져 있으므로 리액터의 크기로 차단 주파수가 결정되고, 차단 주파수는 스위칭 주파수에 의해 결정된다. 스위칭 주파수는 5kHz로 정하였으므로 차단 주파수를 2kHz부근으로 L_F값을 구한다. 식 (1)을 이용하여 구한 L_F는 약 0.3mH 이며 필터 설계시 고려해야 할 L_F전압강하를 계산하여 이 값을 점검하여야 한다. 1.7kVA 의 상 전류는 4.46Arms 이고 이 값으로 인한 전압강하는 입력상전압 127Vrms 중 약 0.5V으로 미미한 값이므로 0.3mH 를 사용한다.

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

3.3 R_D값의 설정

댐핑 저항 R_D 는 필터의 공진주파수 이득값을 낮게 조절하기 위하여 L에 병렬로 연결하거나 C에 직렬로 연결한다. R_D가 회로에 없으면 차단주파수에서 공진에 의해 큰 이득값을 갖게 되고, 결과적으로 고차 고조파는 차단하였지만 공진주파수의 고조파를 형성하게 되어 60Hz의 원하는 입력 전류파형이 만들어지지 않는다. 이 값을 구하기 위해 우선 입력필터의 전달함수를 구하여 예상되는 R_D값의 적절한 범위를 찾아야 하며 그림 2 (a)와 (b)의 입력-출력관계를 식으로 표현하면, 식 (2), (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{I_{in}(S)}{I_o(S)} = \frac{1}{s C_F} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{s C_F + (R_D || (s L_F + R_L))} \\ &= \frac{s L_F + (R_D + R_L)}{s^2 C_F L_F R_D + s (C_F R_D R_L + L_F) + R_D + R_L} \end{aligned} \quad (3)$$

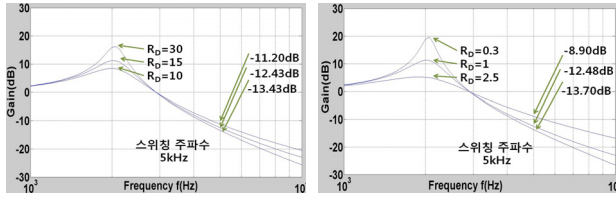
$$\frac{I_{in}(S)}{I_o(S)} = \frac{R_D + \frac{1}{s C_F}}{\frac{1}{s C_F} + R_D + R_L + s L_F} = \frac{s C_F R_D + 1}{s^2 C_F L_F + s (R_D + R_L) C_F + 1}$$

그림 3은 식 (2), (3)의 전달함수에서 예상되는 R_D값을 대입하여 그린 보드 선도이다. 공진주파수와 5kHz 스위칭 주파수의 차

단 능력면에서, R_d-L_f 는 15Ω 근처, R_d-C_f 는 0.5Ω 이하에서 0.3Ω 정도사이가 적당함을 알 수 있다. 다음으로 고려해야 할 점은 저항에서 전력 소모로 인한 효율 감소이고, 위에서 정한 범위의 R_d 값으로 실험하여 요코가와 WT230 전력 측정기로 측정하여 표 1에 나타내었다. 실험은 1.2kVA PL부하로 하였고, 1.2kVA 기준 $R_d-L_f(10\Omega)$ 0.33W는 약 0.03%, $R_d-C_f(0.3\Omega)$ 4.5W는 0.375%로 R_d-C_f 는 컨버터 효율에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 공진 주파수, 스위칭 주파수 이득값과 소비전력까지 고려하여 R_d-L_f 는 10Ω, R_d-C_f 는 0.3Ω을 선택하였다.

〈표 1〉 R_d-L_f 와 R_d-C_f 의 3상 소비 전력비교

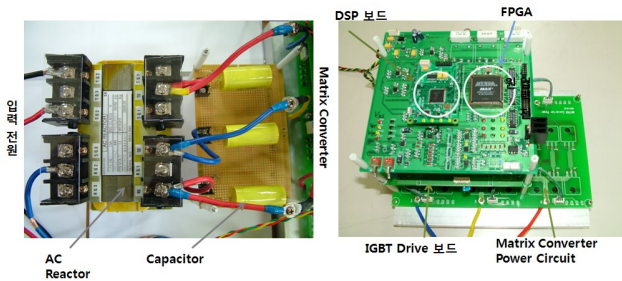
| $R_d-L_f(\Omega)$ | 전력(W) | $R_d-C_f(\Omega)$ | 전력(W) |
|-------------------|-------|-------------------|-------|
| 30 | 0.15 | 1 | 15 |
| 15 | 0.24 | 0.5 | 7.5 |
| 10 | 0.33 | 0.3 | 4.5 |



(a) R_d-L_f 의 보드선도 (b) R_d-C_f 의 보드선도

〈그림 3〉 R_D 값 설정에 따른 보드선도

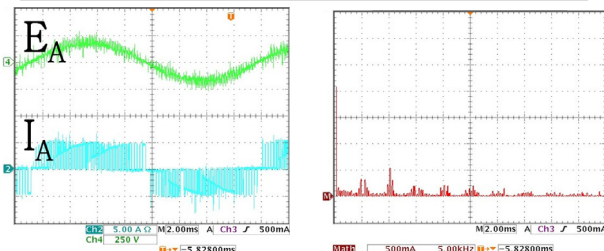
4. 실험 결과



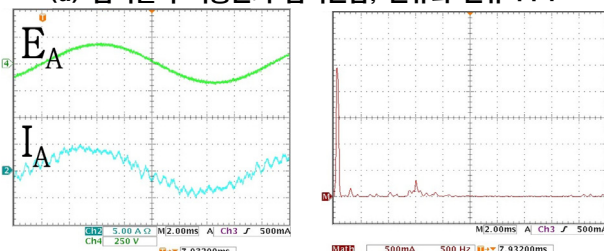
〈그림 4〉 매트릭스 컨버터와 입력 필터

〈표 2〉 실험 조건

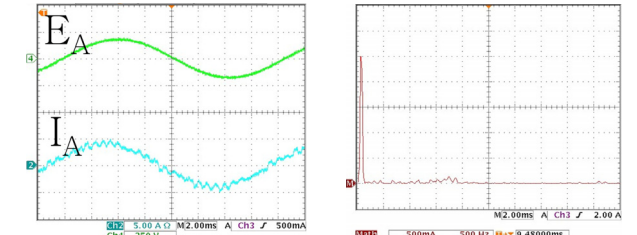
| | |
|-----------------------------|-------------|
| 입력 선간 전압 | 220Vrms |
| 입력 주파수 | 60Hz |
| 스위칭 주파수 | 5kHz |
| 출력 주파수 | 60Hz |
| 차단 주파수 | 2kHz |
| $L_f(R_L)$ | 0.3mH(0.1Ω) |
| C_f | 20μF |
| $R_D(L_f$ 에 병렬, C_f 에 직렬) | 10Ω, 0.3Ω |
| 전압 전달율 | 0.866 |
| 출력 R_L 부하 | 1.2kVA |



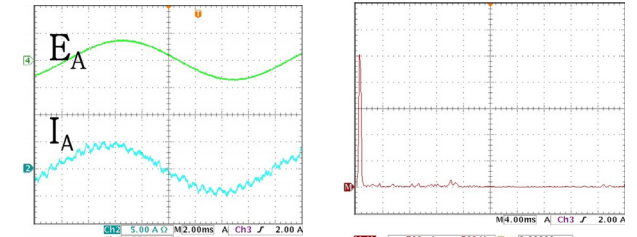
(a) 입력필터 적용전의 입력전압, 전류와 전류 FFT



(b) 입력필터 적용후의 입력전압, 전류와 전류 FFT (R_d 비적용)



(c) 입력필터 적용후의 입력전압, 전류와 전류 FFT (R_d-L_f 적용)



(d) 입력필터 적용후의 입력전압, 전류와 전류 FFT (R_d-C_f 적용)

〈그림 5〉 입력 필터 적용 전후의 입력전압, 전류

| HARMONICS TABLE | | | | HARMONICS TABLE | | | | HARMONICS TABLE | | | |
|-----------------|------|------|------|-----------------|------|------|------|-----------------|------|------|------|
| Amp | A | B | C | Amp | A | B | C | Amp | A | B | C |
| THD% | 11.4 | 13.0 | 13.8 | THD% | 9.3 | 9.5 | 9.8 | THD% | 9.7 | 10.2 | 10.6 |
| H1% | 98.8 | 98.0 | 98.8 | H1% | 99.1 | 98.5 | 99.4 | H1% | 99.0 | 98.3 | 99.3 |
| H3% | 2.2 | 2.2 | 2.2 | H3% | 2.4 | 1.4 | 0.5 | H3% | 2.1 | 2.2 | 2.2 |
| H5% | 1.9 | 1.0 | 2.1 | H5% | 2.0 | 1.2 | 2.1 | H5% | 2.1 | 1.2 | 2.4 |
| H13% | 1.7 | 1.7 | 1.7 | H13% | 1.7 | 1.6 | 1.8 | H13% | 1.7 | 1.7 | 1.8 |
| H19% | 1.0 | 1.2 | 1.0 | H19% | 1.1 | 1.2 | 1.0 | H19% | 1.3 | 1.4 | 1.2 |
| H25% | 4.2 | 5.0 | 3.2 | H25% | 3.1 | 3.4 | 2.6 | H25% | 3.4 | 3.4 | 2.5 |
| H35% | 1.1 | 1.1 | 1.3 | H35% | 1.0 | 0.9 | 1.1 | H35% | 1.0 | 0.9 | 1.1 |

(a) R_d 비적용 (b) R_d-C_f 적용 (c) R_d-L_f 적용

〈그림 6〉 입력필터 적용후의 입력 전류 고조파 측정

그림 4는 자체 제작한 매트릭스 컨버터와 입력필터이고, 표 2의 조건으로 실험하였다. 그림 5 (a)는 필터의 성능 비교 대상으로 필터 적용전의 입력전류와 전압파형을 측정하여 역률 1로 잘 제어되고 있다. 그림 5 (b)는 댐핑저항 R_D 의 위치에 따른 성능 비교 기준으로 R_D 를 제외한 필터를 사용한 후의 파형이고, 1.5kHz 부근에 고조파가 보인다. 그림 5 (c), (d)는 각각 R_D 를 연결한 것으로 1.5kHz 부근 고조파가 댐핑저항으로 인해 감소하였고, 전반적으로 입력전류 파형이 개선되었다. 역률 면에서는 전부 0.95 근처의 값이 계산되어 원하는 값이 나왔다. 정확한 비교를 하기 위해 Fluke 434 전력 품질측정기를 사용하여 각각의 3상 입력전류의 THD (고조파 왜곡률)를 측정하여 그림 6에 나타내었다. 고조파 면에서 R_d-C_f 필터가 약간 좋은 면을 보였지만 R_d-L_f 와 큰 차이가 없다.

5. 결 론

정해진 부하 용량으로 입력 필터의 C_f 값을 설정하였고, 스위칭 주파수를 고려하여 L_f 값을 계산하여 정하였다. 그리고 L_f 값이 미치는 전압강하정도를 계산하여 적합한 값인지 확인하였고, 다음으로 댐핑저항값을 구하였다. 댐핑저항 R_D 값을 구하기 위해서 입력 필터의 전달함수를 구해 Matlab을 사용하여 보드선도를 그려 R_D 값을 찾고 실험을 통해 각각의 소비 전력을 측정하였다. 다음으로 1.2kVA 용량의 실험으로 필터 적용 전후의 입력전류를 측정하여 실제한 값을 검증하였다. 측정 결과 2가지 경우다 입력전류 THD 등의 기본적인 필터 성능은 비슷하였으나, R_d-C_f 의 전력 소모 비율 0.375%는 컨버터 효율에 큰 영향을 미침으로 R_d-L_f 를 적용한 입력 필터를 선택하였다.

추후 설계한 입력 필터 값으로 구현하고, 입력필터까지 적용한 매트릭스 컨버터로 1.7kW 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", Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 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, 1151~1159
- [3] Saul Lopez Arevalo, " Matrix Converter for Frequency Chnging Power Supply Applications", Submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, January, 2008 pp.45-48