SVM를 적용한 매트릭스 컨버터의 설계 및 구현

양천석, 윤인식, 김경서
LS산전 중앙연구소

A Design and Implementation of Matrix Converter Based on Space Vector Modulation

Chun-Suk Yang, In-Sik Yoon, Kyung-Seo Kim
LSIS R&D Center

ABSTRACT

This paper describes the design, construction and implementation of matrix converter based on space vector modulation technique. The matrix converter provides sinusoidal input and output wave forms, bidirectional power flow, controllable input power factor and a compact design, compared to the VSI with diode rectification stage at the input. The implemented prototype of matrix converter is built using the exclusive IGBT module and has an input filter, overvoltage protection circuit and commutation means for overcoming practical issues. The good results tested using an induction motor are also presented.

1. 서 론

상용전원을 받아 가변 교류출력을 내는 전력변환장치에 대한 응용분야와 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 이러한 전력변환장치로서 다이오드 정류회로를 갖는 VSI가 가장 널리 사용되고 있으나 입력전류에 많은 고조파가 포함되어 있고 에너지가 회생되지 않은 단점을 지니고 있다. 또한 중간 에너지 저장장치로 커패시터를 사용해 전체 시스템의 수명이 제한된다.[1] 이에 반해 매트릭스 컨버터는 순수 전력소자 변환기로써 중간에 직류링크 회로를 가지고 있지 않으므로 크기가 작고 수명제한이 없으며 입력 역률의 직접 제어가 가능하고 부가회로 없이 에너지 회생이 가능하여 상대적으로 우수한 특성을 가진다.[1][3][5] 이러한 매트릭스 컨버터를 상용화하기 위한 Issues로써 최적 입력필터 설계, 입출력 단의 과전압 보호, 양방향 스위치의 Commutation 제어 등이 있으며, Ride-through 대책과 낮은 전압이용률 등은 극복해야 할 난제이다.[2][3][4]

본 논문에서는 매트릭스 컨버터를 유도전동기 구동시스템으로 적용하기 위해 입력전류 고조파 저감을 위한 입력필터와 과전압 보호 및 Freewheeling을 위한 클램프 회로의 설계기법을 제시한다. 또한 고속 DSP를 사용한 공간벡터변조 제어기와 4-step Commutation을 위한 전용 로직회로(CPLD) 및 Common-Collector방식의 18개의 양방향 스위치 구동회로를 설계하고 입력필터와 클램프 회로를 갖는 최적 구조의 전력회로를 제안한다.

2. 매트릭스 컨버터의 구조

매트릭스 컨버터 시스템의 블록도는 그림 1과 같다. 매트릭스 컨버터부는 9개의 양방향 스위치로 구성되며 각각의 양방향 스위치는 입력과 출력을 연결하고 있다. 입력전류의 고조파를 저감시키기 위해 입력측에 LC 저역통과필터가 설치되며 입출력에서의 과전압을 보호하기 위해 클램프 회로를 입출력에 연결한다. 클램프 회로는 12개의 고속 다이오드와 커패시터로 구성된다.

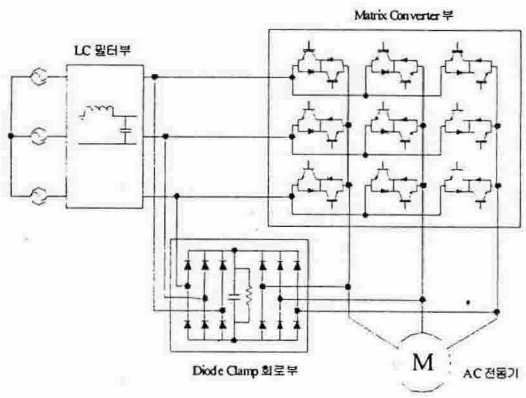


그림 1 매트릭스 컨버터의 블록도
Fig. 1 The block scheme of a matrix converter

3. 전력회로의 설계

3.1 입력필터

입력필터는 소자의 무효에너지를 최소로 하면서 입력전류의 리플을 줄이도록 설계해야한다. 대부분 LC회로를 사용하며 더 높은 감쇄율이 필요할 때는 다단 필터를 사용하기도 한다. 그러나 이는 부피가 커지고 비용이 많이 드는 단점이 있다.

입력필터의 차단주파수 ω_o는 스위칭 주파수보다 낮아야 하며, 컨버터의 출력이 작을 때라도 입력역률을 최대로 유지해야 하고 정격전류가 흐를 때 인덕터에서 전압강하가 작도록 입력필터를 설계해야 한다. 입력필터의 차단주파수는 스위칭 주파수에서 정해진 감쇄률을 갖도록 설계하며 입력필터의 인덕턴스는 정격전류에서의 전압강하에 의해 결정된다.

입력필터의 차단주파수는 식(1)에서 얻을 수 있으며, 입력필터의 인덕턴스는 정격전류에서 식(2)의 관계를 만족하는 값으로 선정되어야 한다.

$$L_{in} \cdot C_{in} = \frac{1}{\omega_o^2} \tag{1}$$

$$\frac{\Delta U}{U_n} = 1 - \sqrt{1 - (\omega \cdot L_{in})^2 \cdot \left(\frac{I_n}{U_n}\right)^2} \tag{2}$$

여기에서 ω는 전원주파수며, L_{in}, C_{in}은 입력필터의 커패시턴스와 인덕턴스이다. 또한 U_n, I_n는 입력정격전압과 정격전류이고, $\triangle U$ 는 인덕턴스에서 최대 전압 강하이다.

3.2 클램프 회로

클램프 회로는 매트릭스 컨버터의 입력 및 출력측에서 발생하는 과전압을 제한함으로써 매트릭스 컨버터를 안전하게 동작하도록 한다. 클램프 회로의 커패시터 용량은 다음과 같이 선정한다.

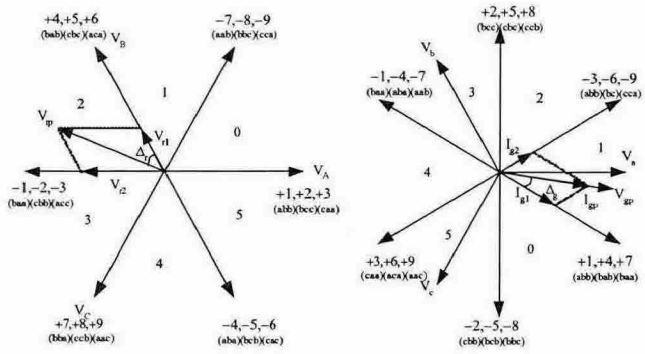
$$\frac{3}{4} i_{\max}^2 (L_{\sigma s} + L_{\sigma r}) = \frac{1}{2} C_{damp} [U_{\max}^2 - (\sqrt{2} U_{line})^2] \tag{3}$$

여기에서 $i_{\max}$는 실효치로 나타낸 과전류 보호레벨 전류이며 $L_{\sigma s} + L_{\sigma r}$은 전동기의 총 누설인덕턴스이다. 또한 C_{damp}은 클램프 회로의 커패시터의 용량이며 $U_{\max}$와 U_{line}은 과전압 보호레벨 전압 및 선간전압이다. Ride-through를 동작을 위해 클램프 회로의 커패시터에 저장된 에너지를 제어전원으로 사용하는 경우, 클램프 회로 커패시터 용량은 Ride-through 동작특성을 좌우한다.

4. 매트릭스 컨버터의 제어

4.1 매트릭스 컨버터의 변조기법

매트릭스 컨버터에 공간벡터 변조방식을 적용할 때 그림 2와 같이 출력상전압과 입력상전류의 섹터를 구분한다. 일반적으로 매트릭스 컨버터는 입력측을 단위역률로 동작시키기 위해 그림 2(b)와 같이 매트릭스 컨버터의 입력상전류와 입력상전압의 위상을 동상이 되도록 입력전류를 제어해야 한다.



(a)출력상전압벡터 (b)입력상전압벡터

그림 2 공간벡터변조를 위한 전압 및 전류벡터와 섹터

Fig. 2 The Sectors and vectors of voltage and current for space vector modulation

그림 2(a)에서 V_{r1}, V_{r2}은 출력전압벡터의 두개의 인접한 벡터성분을 나타낸 것이다. 입력 상전압 벡터 V_{gp}가 섹터 1에 존재할 때 입력선간전압 V_{ab}와 V_{ca}가 다른 입력선간전압에 비해 큰 값을 가진다. V_{r1}을 얻는데 사용되는 스위칭 조합은 +4와 -6이다. 스위칭 조합 +4는 V_{ab}의 값에 의해 결정되며, 스위칭 조합 -6은 입력전압 $-V_{ca}$에 의해 결정된다. 이와 유사하게 V_{r2}을 얻는데 -1와 +3이 이용된다. 이 4개의 스위칭 조합은 입력전류의 방향을 결정하는데도 이용된다. 공간벡터 변조기법을 적용할 때 각 스위칭 조합의 턴온 시간 δ는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\delta_1 = \frac{2 \cdot |V_{rp}|}{\sqrt{3} \cdot |V_{gp}|} \cdot \sin(\Delta_g) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta_r\right) \tag{4}$$

$$\delta_2 = \frac{2 \cdot |V_{rp}|}{\sqrt{3} \cdot |V_{gp}|} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta_g\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta_r\right) \tag{5}$$

$$\delta_3 = \frac{2 \cdot |V_{rp}|}{\sqrt{3} \cdot |V_{gp}|} \cdot \sin(\Delta_g) \cdot \sin(\Delta_r) \tag{6}$$

$$\delta_4 = \frac{2 \cdot |V_{rp}|}{\sqrt{3} \cdot |V_{gp}|} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta_g\right) \cdot \sin(\Delta_r) \tag{7}$$

$$\delta_0 = 1 - \delta_1 - \delta_2 - \delta_3 - \delta_4 \tag{8}$$

4.2 양방향 스위치의 Commutation

매트릭스 컨버터는 일반적인 VSI 인버터와 달리

Freewheeling 패스가 없기 때문에 입출력 전류의 Commutation을 안전하게 하는 게 어렵다. 전류의 Commutation은 다음과 같은 규칙을 지키면서 매 순간 이루어져야 한다. 첫번째는 어떠한 스위칭 조합이라도 하나의 출력상에 대해 두 개의 양방향 스위치가 동시에 턴온이 되어서는 안 된다. 이는 입력상의 단락이 발생하며 상간 단락전류로 인해 스위칭 소자의 파손을 가져오기 때문이다. 두번째는 하나의 출력상에 대해 하나의 양방향 스위치라도 턴온이 되어야 한다. 이는 부하가 유도성일 경우 모든 스위치가 오프되어 전류의 패스가 없어져 소자의 양단에 과전압을 일으키게 된다. 그런데 실제적으로는 스위칭 소자는 Recovery 타임 등 게이팅 지연시간을 갖기 때문에 이상적으로 스위칭을 할 수 없으며 따라서 두 개의 스위치가 서로 교번할 때 상간 단락의 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로는 여러 가지 방법이 있으나 가장 많이 사용하는 방법은 4-단계 Commutation 기법이다.

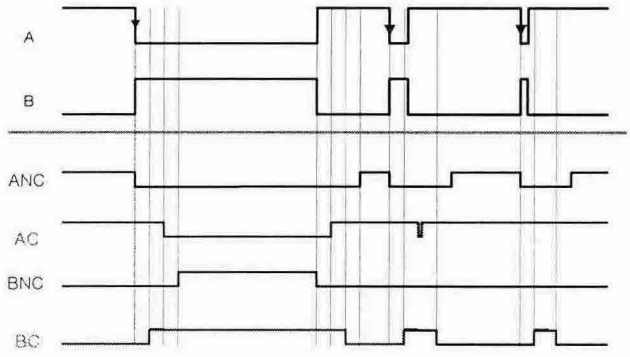


그림 3 매트릭스 컨버터의 4단계 Commutation기법
Fig. 3 4-step commutation of matrix converter

그림 3에 양방향 스위치 A와 스위치 B 사이의 4단계 Commutation의 과정을 나타낸 것이다. AC와 BC는 전류가 흐르고 있는 스위치를 나타내며, ANC와 BNC는 전류가 흐르지 않고 있은 스위치를 나타내고 있다. 이러한 4단계 Commutation방법은 입력단의 단락이나 출력단의 개방을 발생하지 않고 스위치간의 Commutation을 가능케 한다.

5. 전체 시스템

매트릭스 컨버터의 전체 시스템은 그림 4와 같이 구성하였다. 매트릭스 컨버터의 스위칭 소자는 시스템의 크기와 스위치간의 내부 인덕턴스를 줄이기 위해 EUPEC의 FM35R12KE 모듈을 사용하였다. 이 모듈은 CC(Common-Collector) 구조로 이루어져 있다. 전력선 배선을 파워 PCB상에 하여 컴팩트한 전력회로를 구현하였다. 파워PCB에는 입력전압과 출력전류를 검출하기 위한 PT와 Hall CT가 설치되었으며 매트릭스 컨버터의 입력전류 고조파를 저감하기 위한 LC필터의 커패시터와 입력 및 출력에서 발생하는 과전압으로부터 매트릭스 컨버터를 보호하기 위해 클램프 회로가 구성되어 있다.

제어보드에는 공간벡터 제어 및 V/F 등의 운전 제어를 위해 고속 DSP인 Motorola DSP 56F807를 사용한 제어부가 구성되며 DSP에서 발생된 9개의 스위치 신호를 받아 Commutation 제어를 하여 18개 게이팅 신호를 생성시키는 CPLD 회로를 Xinlix 사의 XCR3128를 이용하여 구현하였다.

제어보드 및 드라이브 전원을 위한 SMPS와 CC 타입의 IGBT 모듈을 구동하기 위한 전용 드라이브 회로가 하나의 보드로 구성되어 있다.

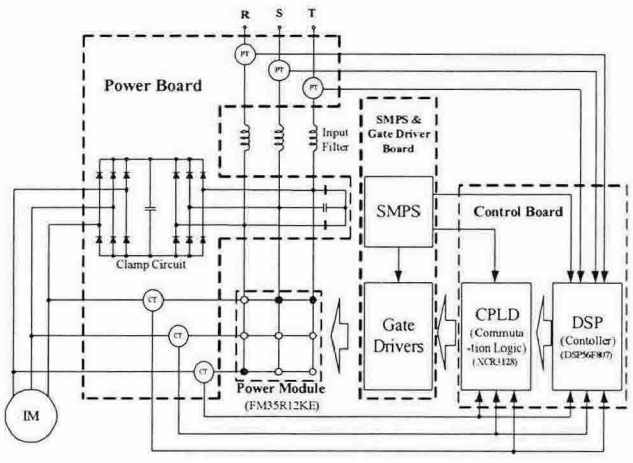


그림 4 구현된 매트릭스 컨버터의 전체시스템
Fig. 4 The system of matrix converter implemented.

6. 실험 결과

실제 구현된 매트릭스 컨버터는 그림 5와 같다.

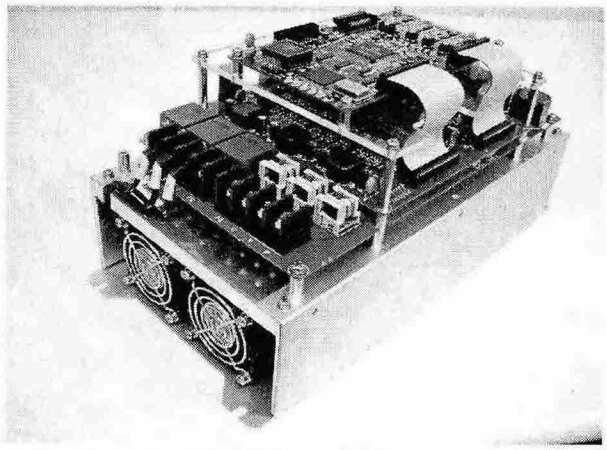


그림 5 실험에 사용된 매트릭스 컨버터
Fig. 5 The matrix converter used in the test

제작된 매트릭스 컨버터의 스위칭 주파수를 5[kHz]로 설정하여 유도전동기를 구동하였다.

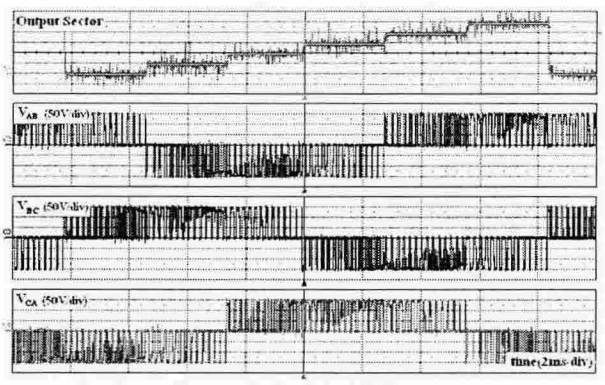


그림 6 매트릭스 컨버터의 출력선간전압
Fig. 6 The output line-to-line voltages of The matrix converter

그림 6은 매트릭스 컨버터를 60Hz로 운전시킬 때 출력선간전압을 측정한 결과이다. 그림 5의 가장위의 파형은 출력에 대한 섹터를 나타낸 것이다.

그림 7은 매트릭스 컨버터를 30Hz로 운전시킬 때 입력상전압과 입력상전류 및 출력전류를 측정한 것이다. 그림 7에서 보듯이 입력상전압과 입력상전류가 거의 동상임을 알 수 있다.

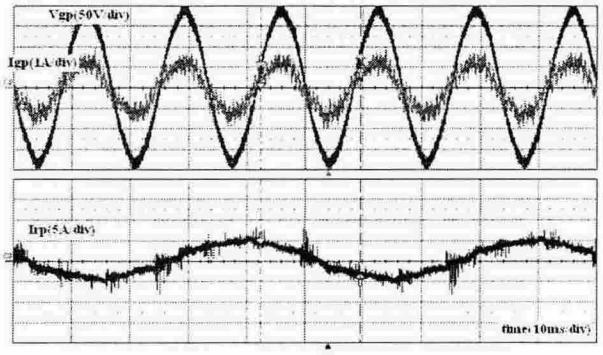


그림 7 매트릭스 컨버터의 입력상전압, 입력상전류, 출력전류
Fig. 7 The input phase voltage, input phase current, and output current of the matrix converter

그림 8은 매트릭스 컨버터의 출력주파수를 30Hz로 설정하고 V/F운전했을 때 매트릭스 컨버터의 속도 지령치와 출력전류를 측정한 결과이다.

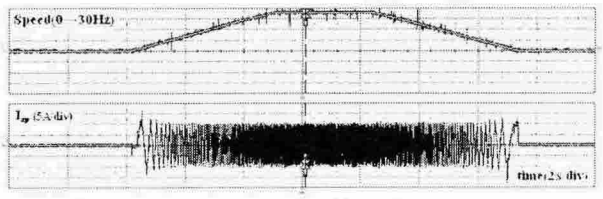


그림 8. 매트릭스 컨버터의 V/F제어(30Hz)
Fig. 8 The V/F control of the matrix converter (30Hz)

7. 결 론

본 논문에서는 입력전류의 고조파와 입출력 과전압 문제를 해결하기 위해 입력필터와 클램프 회로를 설계하고 양방향 스위치들의 Commutation를 원활하게 동작시키기 위한 CPLD 로직회로를 설계하여 매트릭스 컨버터를 구현하였다. 또한 전체 시스템의 크기를 줄이기 위해 매트릭스 컨버터용 전용 IGBT 모듈을 사용하였으며 매트릭스 컨버터의 시스템을 파워보드와 SMPS 및 구동회로 보드 그리고 제어보드로 나누어 구성하고 전력선 배선을 파워 PCB 상에 하고, 여기에 전압 전류 센서와 클램프 회로를 설계하는 최적의 전력구조를 제안하였다. 입력전류와 출력전압을 동시에 제어하는 SVM 제어기를 고속 DSP를 사용하여 구현함으로써 매트릭스 컨버터 구현의 난제 중 하나인 제어의 복잡성을 해결하였다. 또한 구현된 매트릭스 컨버터를 유도전동기에 적용하여 유용성을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] L. Huber and D. Borojevic, "Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction," IEEE Trans. Ind. Application, vol. 31, pp. 1234-1246, 1995, Nov./Dec..

[2] P. Nielsen, F. Blaabjerg, J.K. Pedersen, "Novel solution for Protection of Matrix Converter to Three Phase Induction Machine", IEEE IAS Annual Meeting, vol. 2, pp. 1447-1454, 1997.

[3] P.W. Wheeler, J. Rodriguez, J.C. Clare, and L. Empringham, "Matrix converter, A technology review," IEEE Trans. Ind. Electron,, vol. 49, no. 2, pp. 276-289, 2002, Apr..

[4] Lars Helle, Kim B. Larsen, Allan Holm Jorgensen, Stig Munk-Nielsen, and Frede Blaabjerg, "Evaluation of Modulation Schemes for Three-Phase to Three-Phase Matrix Converters", IEEE Trans., Ind. Electronics, Vol. 51, No. 1, pp.157-171, 2004, Feb..

[5] Klumpner, C.; Nielsen, P.; Boldea, I.; Blaabjerg, F, "A new matrix converter-motor (MCM) for industry applications", Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, Vol. 3, 8-12, pp. 1394-1402, 2000, Oct..