

PSIM을 이용한 매트릭스 컨버터의 시뮬레이션

박기락, 최재호, 김태웅*
충북대학교, 경상대학교*

Simulation of Matrix Converter Using PSIM

G.L. Park, J.H. Choi, and T.W. Kim*
ChungBuk National University, GyeongSang National University*

ABSTRACT

In the paper, a three-phase-in three-phase-out Matrix Converter(MC) for the PMSM is simulated by the PSIM simulator. A lighter L-C filters are installed at the input side of the Converter to remove the current harmonics around the switching frequency. In modelling the Matrix Converter, the PSIM is the powerful tool that the basic researches can be quickly performed within the given periods, because the simulation calculation by PSIM is very fast, compared to other simulators such as Matlab, Saber, and Pspice.

1. 서론

오늘날 AC모터에 대한 구동시스템의 이용은 점점 증가하고 있고 산업 응용에 광범위하게 사용되고 있다. 일반적으로 DC/AC전력변환시스템을 통하여 AC모터를 구동하고, DC/AC전력변환시스템의 입력전원은 AC/DC전력변환시스템을 통해 정류하여 얻게 된다. 이때 두개의 전력변환시스템사이에는 전해콘덴서와 직류리액터로 구성된 DC-Link회로가 필요하다. DC-Link회로는 전력변환시스템의 소형화, 저가격화, 수명의 크기를 저해하고 있다. 또한 AC/DC전력변환시스템은 그림1과 같은 고조파전류의 발생원으로써 작용하며, 이러한 고조파전류가 전력계통을 따라 전원까지 역류하게 되며 입력전원측의 전력품질(Power Quality)을 저하시키게 된다.

전력품질향상을 위한 방안으로써, 최근에는 DC-Link회로가 없이 제어가능한 전력변환시스템인 매트릭스컨버터(Matrix Converter, AC/AC Direct Converter)에 관한 연구 및 개발이 진행되고 있다. 매트릭스 컨버터는 종래의 전력변환시스템에 비해서 입력전류의 고조파 저감, 4상한 동작, 높은 동적능력, 역률 제어능력 등의 장점을 가지고 있다. 그러나 매트릭스 컨버터는 종래의 전력변환장치와 달리 9개의 양방향 스위칭소자를 제어하기 위해

서는 고성능 제어회로가 필요하고 스위칭기법이 매우 복잡하기 때문에 종래에는 실현이 어려웠지만 반도체 스위칭소자와 마이크로컴퓨터의 계산능력의 발달에 힘입어 실현이 가능하게 되었다.^[1]

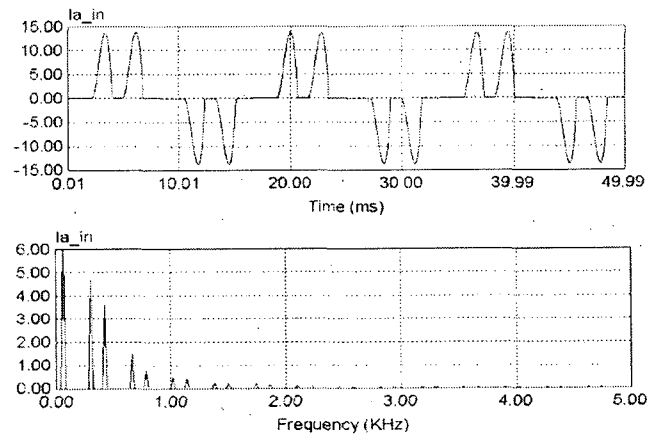


그림 1 AC/DC전력변환장치 입력측 전류파형과 FFT
Fig. 1 Current waveform and FFT at the input side of AC/DC converter

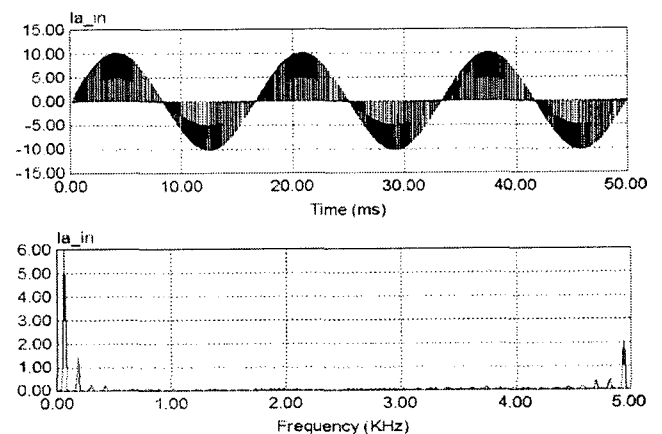


그림 2 매트릭스 컨버터의 입력측 전류파형과 FFT
Fig. 2 Current waveform and FFT at the input side of Matrix Converter

그림 3에서 보여주는 매트릭스 컨버터는 9개의 양방향 스위치로 구성되어있으며 그림 2와 같은 입력전류의 스위칭 고조파를 제거하기 위해서 입력측에 교류용 LC필터를 설치하지만, 교류용 리액터와 커패시터의 용량은 종래의 전력변환시스템과 비교하면 매우 작다.

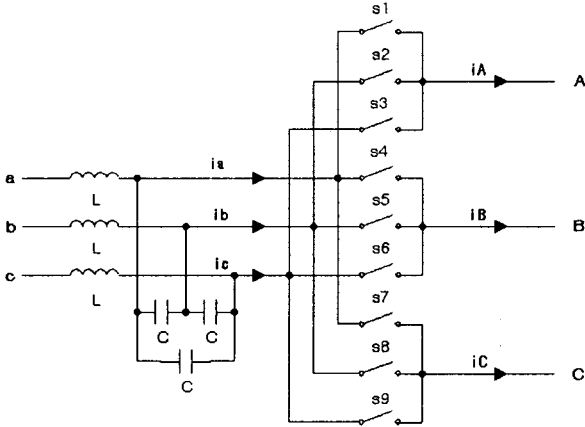


그림 3 3상 매트릭스 컨버터 구조
Fig. 3 Construction of 3-phase Matrix Converter

본 논문에서는 매트릭스 컨버터에 의한 PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor)의 4상한 운전을 PSIM을 이용하여 모델링하였으며, PSIM에 의한 모델링 및 설계는 간단하여 적은 노력으로 매트릭스 컨버터의 기본적인 특성을 연구할 수 있음을 보여 줄 것이다.

2. 매트릭스 컨버터

2.1 매트릭스 컨버터의 공간벡터

매트릭스 컨버터의 입력과 출력의 선간전압은 식(1)과 (2)와 같이 표현된다.

$$\vec{v}_i = \frac{2}{3} (v_{ab} + v_{bc} e^{j2\pi/3} + v_{ca} e^{j4\pi/3}) = V_i e^{j\alpha_i} \quad (1)$$

$$\vec{v}_o = \frac{2}{3} (v_{AB} + v_{BC} e^{j2\pi/3} + v_{CA} e^{j4\pi/3}) = V_o e^{j\alpha_o} \quad (2)$$

또한, 매트릭스 컨버터의 입력과 출력의 선간전류는 식 (3)과 (4)와 같이 표현된다.

$$\vec{i}_i = \frac{2}{3} (i_a + i_b e^{j2\pi/3} + i_c e^{j4\pi/3}) = I_i e^{j\beta_i} \quad (3)$$

$$\vec{i}_o = \frac{2}{3} (i_A + i_B e^{j2\pi/3} + i_C e^{j4\pi/3}) = I_o e^{j\beta_o} \quad (4)$$

매트릭스 컨버터의 입력은 전원과 직접 연결되기 때문에 입력측은 단락회로가 되어서는 안 되고, 출력측은 부하에 연속적인 전력을 공급해야 하기 때문에 개방회로가

되어서는 안 된다. 이러한 조건을 만족하기 위해서는 27 가지의 스위칭 조합이 필요하며, 이러한 스위칭 조합에 의해 만들어진 출력전압벡터 및 입력전류벡터는 표 1과 같이 된다.

그림 I의 출력 공간벡터는 입력 공간벡터에 의존하므로 공간벡터 변조방식에 사용될 수 없다^[1]. 그림 II(A, B, C)의 18개 배열은 공간 벡터의 6개 위치를 결정하고 그림 III는 영 벡터를 결정한다. 표 1에 대응되는 출력전압과 입력전류 공간벡터 다이어그램은 그림 4와 그림 5에 도시되어있다.

표 1. 스위칭 조합에 따른 전압과 전류 벡터

Table 1. Voltage and current vector according to the switching combination

| 그룹 | 이름 | ABC | V_o | α_o | I_i | β_i |
|-----|----|-----|----------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| I | | abc | v_i | α_i | i_o | β_o |
| | | acb | $-v_i$ | $-\alpha_i + 4\pi/3$ | i_o | $-\beta_o$ |
| | | bac | $-v_i$ | $-\alpha_i$ | i_o | $-\beta_o + 2\pi/3$ |
| | | bca | v_i | $\alpha_i + 4\pi/3$ | i_o | $\beta_o + 2\pi/3$ |
| | | cab | v_i | $\alpha_i + 2\pi/3$ | i_o | $\beta_o + 4\pi/3$ |
| | | cba | $-v_i$ | $-\alpha_i + 2\pi/3$ | i_o | $-\beta_o + 4\pi/3$ |
| IIA | 1P | abb | $2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $\pi/6$ | $2/\sqrt{3} i_A$ | $-\pi/6$ |
| | 1N | baa | $-2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $\pi/6$ | $-2/\sqrt{3} i_A$ | $-\pi/6$ |
| | 2P | bcc | $2/\sqrt{3} v_{bc}$ | $\pi/6$ | $2/\sqrt{3} i_A$ | $\pi/2$ |
| | 2N | cbb | $-2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $\pi/6$ | $-2/\sqrt{3} i_A$ | $\pi/2$ |
| | 3P | caa | $2/\sqrt{3} v_{ca}$ | $\pi/6$ | $2/\sqrt{3} i_A$ | $7\pi/6$ |
| | 3N | acc | $-2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $\pi/6$ | $-2/\sqrt{3} i_A$ | $7\pi/6$ |
| IIB | 4P | bab | $2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $5\pi/6$ | $2/\sqrt{3} i_B$ | $-\pi/6$ |
| | 4N | aba | $-2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $5\pi/6$ | $-2/\sqrt{3} i_B$ | $-\pi/6$ |
| | 5P | cbc | $2/\sqrt{3} v_{bc}$ | $5\pi/6$ | $2/\sqrt{3} i_B$ | $\pi/2$ |
| | 5N | ccb | $-2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $5\pi/6$ | $-2/\sqrt{3} i_B$ | $\pi/2$ |
| | 6P | aca | $2/\sqrt{3} v_{ca}$ | $5\pi/6$ | $2/\sqrt{3} i_B$ | $7\pi/6$ |
| | 6N | cac | $-2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $5\pi/6$ | $-2/\sqrt{3} i_B$ | $7\pi/6$ |
| IIC | 7P | bba | $2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $3\pi/2$ | $2/\sqrt{3} i_C$ | $-\pi/6$ |
| | 7N | aab | $-2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $3\pi/2$ | $-2/\sqrt{3} i_C$ | $-\pi/6$ |
| | 8P | ccb | $2/\sqrt{3} v_{bc}$ | $3\pi/2$ | $2/\sqrt{3} i_C$ | $\pi/2$ |
| | 8N | bbc | $-2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $3\pi/2$ | $-2/\sqrt{3} i_C$ | $\pi/2$ |
| | 9P | aac | $2/\sqrt{3} v_{ca}$ | $3\pi/2$ | $2/\sqrt{3} i_C$ | $7\pi/6$ |
| | 9N | cca | $-2/\sqrt{3} v_{ab}$ | $3\pi/2$ | $-2/\sqrt{3} i_C$ | $7\pi/6$ |
| III | 0 | aaa | 0 | - | 0 | - |
| | 0 | bbb | 0 | - | 0 | - |
| | 0 | ccc | 0 | - | 0 | - |

2.2 스위칭 벡터의 인가시간 계산^{[2], [3], [4]}

공간벡터 변조방식에 있어서 스위칭벡터의 선택에 관한 기본적인 원리는 출력전압과 입력 전류를 동시에 제어하는 것에 있다. 예를 들어 설명하면, 그림 3과 4에서 보여주듯이 출력전압 지령치와 입력전류 지령치가 임의의 위치에 존재할 때 상대적으로 큰 입력측 선간전압이 v_{ab} 와 $-v_{ca}$ 라고 가정한다면 섹터 2에 존재하는 출력전

압벡터 지령치와 섹터 1에 존재하는 입력전류벡터 지령치를 동시에 만들어 내는 스위칭 벡터로써 1P, 3N, 7N, 9P가 존재하게 된다.

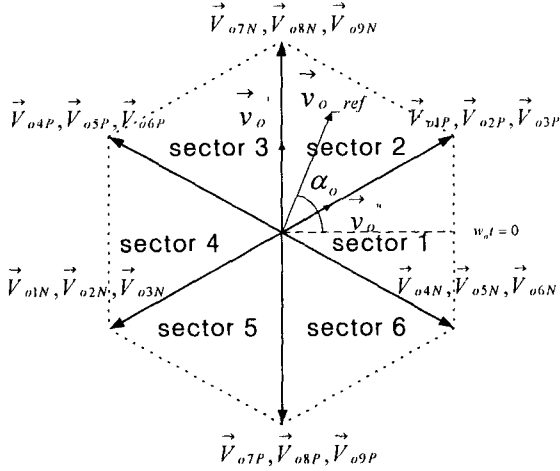


그림 4 출력전압 벡터
Fig. 4 Output voltage vector

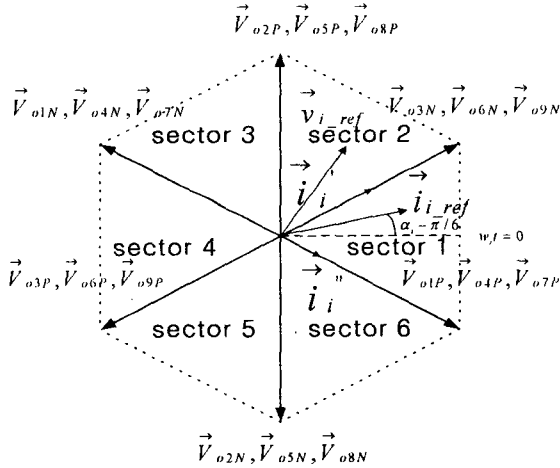


그림 5 입력전류 벡터
Fig. 5 Input current vector

우선적으로 벡터 7N과 9P를 이용하여 v'_o 와 입력전류 벡터를 만들면 다음과 같다

$$T_{7N} \frac{2}{\sqrt{3}} v_{ab} - T_{9P} \frac{2}{\sqrt{3}} v_{ca} = v'_o = |v'_o| \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\alpha_o - \frac{13}{6}\pi) \quad (5)$$

$$T_{7N} \frac{2}{\sqrt{3}} i_A = I'_i = |I'_i| \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\frac{4}{3}\pi - \alpha_i) \quad (6)$$

$$T_{9P} \frac{2}{\sqrt{3}} i_A = I''_i = |I''_i| \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\alpha_i + \pi) \quad (7)$$

식 (5)~(7)를 정리하면 다음과 같다.

$$T_{7N} = MI \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\alpha_o - \frac{\pi}{6}) \cos(\alpha_i + \frac{\pi}{6}) \quad (8)$$

$$T_{9P} = MI \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\alpha_o - \frac{\pi}{6}) \cos(\alpha_i - \frac{\pi}{2}) \quad (9)$$

단, MI 는 변조지수(Modulation Index)이다.

같은 방법으로 1P와 3N에 대한 스위칭 벡터 인가시간은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_{1P} = MI \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(-\alpha_o + \frac{\pi}{2}) \cos(\alpha_i + \frac{\pi}{6}) \quad (10)$$

$$T_{3N} = MI \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(-\alpha_o + \frac{\pi}{2}) \cos(\alpha_i - \frac{\pi}{2}) \quad (11)$$

식 (8)~(11)은 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$T_{7N} + T_{9P} + T_{1P} + T_{3N} \leq T_s \quad (12)$$

단, T_s 는 샘플링 시간이다.

3. 시뮬레이션

3.1 PSIM을 이용한 매트릭스 컨버터 모델

매트릭스 컨버터모델에 사용한 스위치는 이상적인 양방향 스위치이고, 입력실제전압과 출력지령전압은 스위칭 벡터를 계산하는 데에 이용된다. 입력측의 주파수와 출력측의 주파수가 서로 다른 경우, 입력전압과 출력전압의 공간벡터 섹터는 주파수가 서로 다르기 때문에 36개의 섹터 조합이 존재한다. 스위칭 조합은 2차원 Look-Up 테이블에 미리 저장하고, 스위칭 벡터의 인가시간은 식 (8)~(11)을 이용하여 모든 샘플링 주기마다 계산한다.

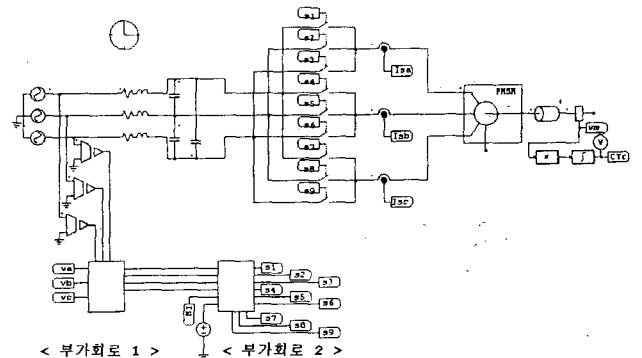


그림 6 매트릭스 컨버터의 전체모델
Fig. 6 Overall block diagram of Matrix Converter

그림 6은 PSIM을 이용한 시뮬레이션의 전체 회로도이고, 부가회로 1은 입력과 출력의 전압을 입력받아 dq변환하여 각각의 공간벡터 섹터를 검출하는 기능을 갖고 있

다. 부가회로 2는 부가회로 1의 출력을 입력받아 스위칭 벡터 인가시간을 계산하고 스위칭 벡터를 선택하여 스위치 점호신호를 발생시키는 기능을 갖고 있다.

3.2 시뮬레이션 결과

스위칭주파수는 5kHz이고 변조지수(MI)는 0.8로 설정하였을 때, 65.3ms의 시간에 출력주파수를 30Hz에서 60Hz로 변화시켰을 때의 출력 선간전압파형은 그림 7과 같다.

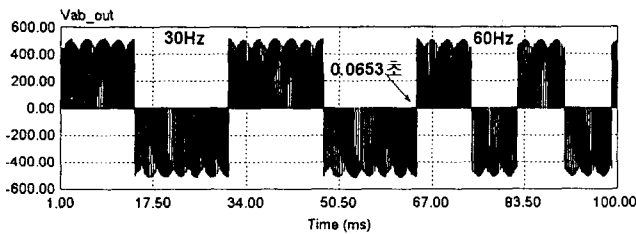


그림 7 출력주파수의 스텝변화(30Hz → 60Hz)시의 선간전압
Fig. 7 Output line voltage waveform for a step change of output frequency (30Hz → 60Hz)

PMSM 구동에 사용된 매트릭스 컨버터의 LC필터는 각각 2.4mH, 9μF로 설정되었다. 10kHz의 스위칭 주파수, 60Hz의 입력 주파수, 380Vrms의 입력선간전압, 무부하($T_{load}=0$)라는 조건하에서 가감속 및 일정(900rpm) 속도지령치를 인가하였을 때의 출력속도, 지령토크 및 출력전류의 파형은 그림 8에 나타나 있으며 속도가 잘 추종되고 있음을 알 수 있다. 본 그림에 있어서 속도단위는 rpm, 토크단위는 Nm, 전류단위는 A이다.

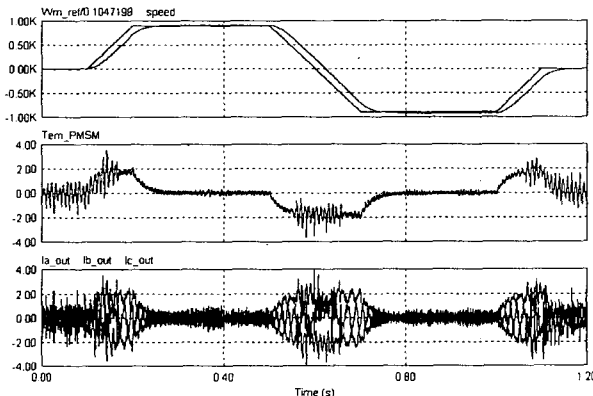


그림 8 매트릭스 컨버터의 속도, 토크, 전류파형
Fig. 8 Speed, Torque and current waveforms of Matrix Converter

그림 9는 2.5[Nm]의 부하가 연결되었을 때 정상상태에서의 입출력의 상전류 파형이고 고조파가 거의 없음을 알 수 있다.

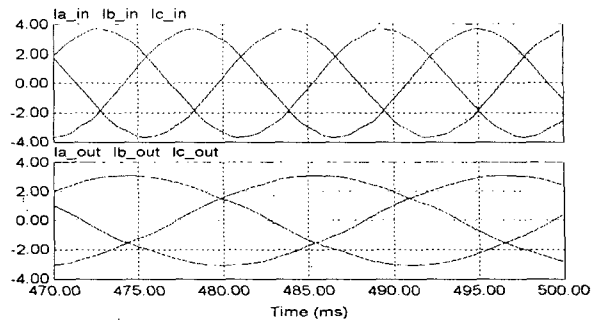


그림 9 매트릭스 컨버터의 입력 상전류와 출력 상전류
Fig. 9 Input phase current and output phase current of Matrix Converter

4. 결론

본 논문에서는 PMSM구동용 3상 매트릭스 컨버터의 시뮬레이션을 PSIM을 이용하였고, 모델링 설계가 간단하여 주어진 시간 내에 적은 노력으로 매트릭스 컨버터의 기본적인 특성을 연구할 수 있음을 보여주었다. 매트릭스 컨버터에 관한 PSIM 모델링은 공간벡터 변조방식이고, 출력주파수의 제한은 없다. 또한 출력주파수 변동에 대해서 빠른 동적능력을 보이고 PMSM의 4상한 운전이 가능함을 본 시뮬레이션을 통해 증명하였다.

참고 문헌

- [1] P.W. Wheeler, J. Rodriguez, J.C. Clare, L. Empringham, A. Weinstein, "Matrix Converters: a Technology Review", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 2, pp. 276-288, April 2002.
- [2] L. Zhang, C. Watthanasarn, "An Efficient Space Vector Modulation Algorithm for AC-AC Matrix Converters: Analysis and Implementation", *Power Electronics and Variable Speed Drives*, 1996, no. 429, pp. 108-113, September 1996.
- [3] D. Casadei, G. Grandi, G. Serra, A. Tani, "Space Vector Control of Matrix Converters with Unity Input Power Factor and Sinusoidal Input/Output Waveforms", *Power Electronics and Applications, 1993, Fifth European Conference on*, vol.7, pp. 170-175, September 1993.
- [4] L. Huber, D. Borojevic, "Space Vector Modulation with Unity Input Power Factor for Forced Commutated Cycloconverters", *Industry Applications Society Annual Meeting, 1991, Conference Record of the 1991 IEEE*, Vol. 1, pp. 1032-1041 1991.