

캐리어를 이용한 매트릭스 컨버터의 전압 변조 방법

운영두, 설승기

서울대학교 공과대학 전기컴퓨터공학부

Carrier-based Modulation Method for Matrix Converter

Young-Doo Yoon, Seung-Ki Sul

School of Electrical Engineering and Computer Science,

College of Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 캐리어(Carrier)를 이용한 매트릭스 컨버터(Matrix Converter)의 전압 변조 방법을 제안한다. 출력 상전압에 적절한 오프셋(Offset) 전압을 더하고, 캐리어 파형의 기울기를 적절히 제어 함으로써 입력 전류를 역율 1의 정현파로 제어하면서 동시에 출력 전압의 합성이 가능하다.

이 방법은 기존의 매트릭스 컨버터 전압 변조 방법인 SVPWM과 동일한 스위칭 패턴을 나타내지만, 그 구현은 훨씬 간단하다. 또한 기존의 전압형 인버터(Voltage Source Inverter, VSI)에서 발전된 2상/3상 변조, 과변조(Over Modulation) 등의 개념을 유사하게 적용할 수 있어 그 활용도가 매우 높다. Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

매트릭스 컨버터는 양방향 전력 전달이 가능하고, 입력 전류의 역율을 조절할 수 있으며, DC link 캐패시터가 필요가 없는 등의 많은 장점으로 인하여, 상용 삼상 교류 전원에서부터 가변 전압, 가변 주파수의 교류 출력을 얻는 회로 방식으로 많은 관심을 받고 있다. 입력과 출력에서의 정현파의 전류 특성이 중요하고, 고신뢰성, 소형화가 요구 되는 분야에서 그 응용 범위를 넓히고 있다.

그러나, 매트릭스 컨버터는 9개의 양방향 교류 스위치를 필요로 하고 이를 순서적으로 제어하여야 함으로 인하여, 변조 방법이 매우 복잡하다. 따라서, VSI의 변조 방법에 대한 주된 연구가 많이 완성된 것에 비해, 매트릭스 컨버터의 변조 방법에 대한 연구는 아직도 진행 중이라 할 수 있다.

역사적으로, 수학적 접근 방법을 통하여 몇 가지 변조

방법들이 제안되었다. 각각은 사이클 시간(cycle time)당 스위칭 횟수나 입력 전압의 최대 전달율(voltage transfer ratio, q)등에서 다른 특징을 보인다. 먼저, 1980년대 초반에 Alesina 와 Venturini이 매트릭스 컨버터의 원리^[1]를 제안하였다. 이에 따르면, 전압 전달율의 제한은 0.5였다. 나중에, 3 고조파를 주입한 최적 Alesina - Venturini 방법 (Optimum Alesina - Venturini method^[2])은 전압 전달율이 0.866으로 확대되었다. 이 값은 3상 평형 전원을 이용하는 3상 매트릭스 컨버터의 물리적 한계이다.

다른 접근 방법을 이용하여, 스칼라 제어 알고리즘^[3]이 제안되었으나, 그 성능과 복잡성은 앞의 방법과 유사하다.

그 후, 새로운 직관적인 접근 방법^[4]이 제안되었다. 이 방법에서는 매트릭스 컨버터를 가상의 DC link를 매개로 하여 두개의 PWM 컨버터와 인버터 조합의 상정하고 각각의 변조를 위한 스위칭 함수를 얻은 후 이를 다시 합성하여 최종적인 스위칭 함수를 얻는다. 이 방법은 VSI의 잘 정리된 공간 벡터 변조(Space Vector Modulation, SVM)방법을 그대로 적용할 수 있다는 장점이 있다^[5,6].

그러나, 이러한 방법들은 아직도 그 변조 방법들이 상당히 복잡하고, 많은 수식을 요구한다. 또한, 각각의 변조 과정에서 많은 테이블이 사용되며, 수식을 통해 구한 유효벡터의 인가 시간을 이용하여 다시 게이팅(Gating) 신호를 만들므로 그 구현이 어려우며, 매트릭스 컨버터의 변조 방법을 직관적으로 이해하기가 힘들다.

제안된 방법은 캐리어를 이용하여 각 상의 스위칭 상태(switching state)를 바로 구할 수 있고, 스위칭 상태에서 직접 게이팅 신호를 얻을 수 있으므로 그 구현이 간단하다. 또한, 캐리어를 이용하므로, 매트릭스 컨버터의 변조 방법을 직관적으로 이해하기 쉬우며, VSI에서 잘 확립된 여러 변조 기법들, 예를 들면 스위칭 손실을 줄이기 위한 2상/3상 변조 기법, 출력 전압을 최대화하기 위한 과변조 기법 등을 손쉽게 적용할 수 있다.

2. 매트릭스 컨버터의 제한 조건 및 변조 목적

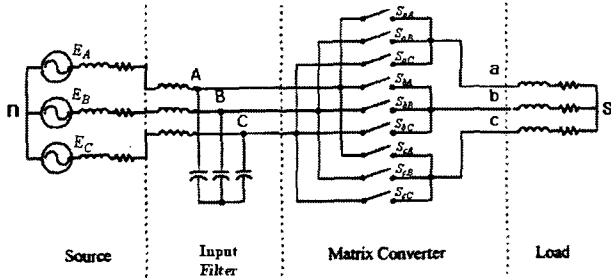


그림 1. 매트릭스 컨버터의 시스템 구성

Fig. 1. The system configuration of matrix converter

2.1 제한 조건

매트릭스 컨버터에서 입력(A상, B상, C상)은 전압원으로 볼 수 있고, 부하(a상, b상, c상)는 전류원으로 볼 수 있다. 부하의 한 상(a 상)을 생각할 때, 세 개의 스위치 S_{aA}, S_{aB}, S_{aC} 중 2개가 동시에 도통(Turn On) 되면, 이것은 전압원 2개가 단락(Short)된 것으로 볼 수 있고 이로 인한 과전류로 매트릭스 컨버터의 소자가 파괴된다. 또한, 세 개의 스위치 S_{aA}, S_{aB}, S_{aC} 가 모두 꺼지게 (Turn Off) 되면, 이것은 전류원이 개방된 것으로 볼 수 있고, 이 경우에 매트릭스 컨버터의 소자에 과전압이 인가되어 소자가 파괴된다.

따라서, 세 개의 스위치 S_{aA}, S_{aB}, S_{aC} 는 항상 하나만 켜져야 하며, 모든 스위치가 다 꺼져도 안 된다. 즉, 하나의 부하단은 항상 하나의 전원단에 연결되어야 한다. 이러한 제한 조건은 다음과 같이 표현될 수 있다. 여기서 S_{aA}, S_{aB}, S_{aC} 는 스위칭 상태를 나타내는 함수이며 해당 스위치가 켜져 있을 때는 '1', 꺼져 있을 때는 '0'의 값을 가진다.

$$\begin{aligned} S_{aA} + S_{aB} + S_{aC} &= 1 \\ S_{bA} + S_{bB} + S_{bC} &= 1 \\ S_{cA} + S_{cB} + S_{cC} &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 변조 목적

매트릭스 컨버터의 변조 목적을 다음과 같이 간단히 서술할 수 있다.

- 출력 전압 V_{as}, V_{bs}, V_{cs} 를 출력 전압 지령에 따라 잘 합성해야 한다.
- 입력 전류는 정현적이어야하고 역율이 조절 가능하여야 한다. 통상 전원단 역율은 1로 제어 된다.

3. 제안된 방법 part. 1

3.1 출력 전압 합성 방법

입력 전원은 3개의 선간 전압으로 구성되어 있다. 이 세 개의 전압 중 가장 큰 하나를 이용하여, 매트릭스 컨버터의 입력으로 사용할 경우, 스위칭 주기 안에서 3상 중 2개의 상만이 이용된다. 이렇게 되면, 스위칭 주기 안에서 하나의 상은 전류가 흐르지 않게 되어 입력 전류에 왜곡이 생기게 된다.

따라서, 제안된 방법에서는 3개의 선간 전압 중 크기가 큰 2개의 선간 전압을 스위칭 주기 안에서 사용한다. 이렇게 하면, 스위칭 주기 안에서 3개의 상을 다 이용하게 되고, 3개의 상에 모두 전류가 흐르게 된다.

이 때 사용하는 2개의 선간 전압을 VSI의 DC link 전압으로 생각하고, 매트릭스 컨버터의 출력 전압 합성을 수행한다. 이 때, “오펙트 전압을 이용한 전압 변조 방법 [7]”을 적용한다.

VSI에서 “오펙트 전압을 이용한 전압 변조 방법”은 자유도인 오펙트 전압(V_{sn})을 이용하여, 상 전압 지령(V_{as}, V_{bs}, V_{cs})에 오펙트 전압을 더하여, 폴(Pole) 전압 지령(V_{an}, V_{bn}, V_{cn})을 만든다. 이 과정을 매트릭스 컨버터에 적용하여 출력 전압을 합성한다.

표기

- E_A, E_B, E_C : 입력 상 전압
 $MAX = \max(E_A, E_B, E_C)$
 $MID = \text{mid}(E_A, E_B, E_C)$
 $MIN = \min(E_A, E_B, E_C)$
- V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : 출력 상전압 지령
 $\max = \max(V_{as}, V_{bs}, V_{cs})$
 $\min = \min(V_{as}, V_{bs}, V_{cs})$
- V_{sn1} : T1 기간의 오펙트 전압
 V_{sn2} : T2 기간의 오펙트 전압
- $V_{an1} = V_{as} + V_{sn1}$: T1 기간의 a 상 폴전압 지령
 $V_{an2} = V_{as} + V_{sn2}$: T2 기간의 a 상 폴전압 지령

스위칭 주기(T_s)를 2개로 나눠서 T1, T2라고 한다. T1 동안에는 DC link 전압으로 입력 선간 전압이 가장 큰 MAX와 MIN사이의 전압을 사용한다. T2 기간에는 전압 이용율을 높이기 위해서 그 다음으로 입력 선간 전압이 큰 것을 이용한다. 경우에 따라서, MAX와 MID사이의 전압, 또는 MID와 MIN사이의 전압 중 그 크기가 큰 전압을 이용한다.

이렇게 사용할 경우, 캐리어는 다음과 같이 표시 될 수 있다.

그림 2는 입력 선간 전압 중에서, MAX와 MID사이의 전압이 MID와 MIN사이의 전압보다 큰 경우를 나타내

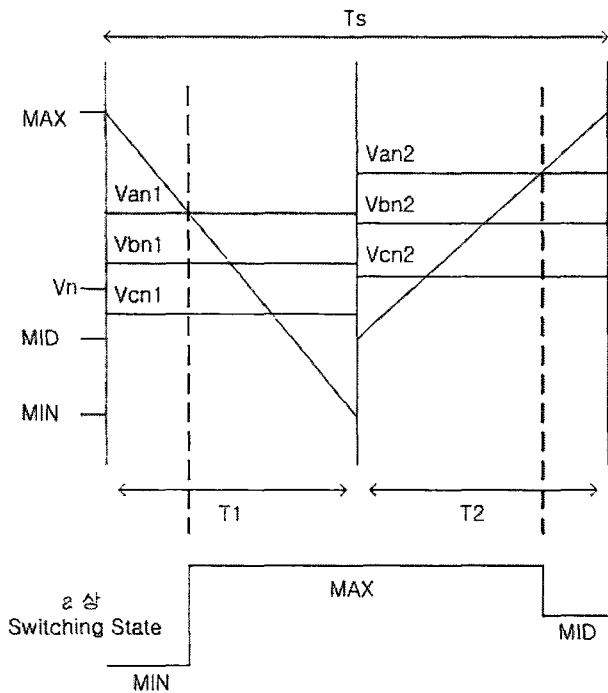


그림 2. 캐리어와 폴 전압 지령에 따른 스위칭 상태
 Fig. 2. The switching state according to the carrier and pole voltage reference

고 있다. 따라서, T2 기간에는 DC link 전압으로 MAX와 MID사이의 전압을 이용한다. T1 기간에는 DC link 전압으로 MAX와 MIN사이의 전압을 이용하므로, 캐리어를 MAX에서 MIN까지 그릴 수 있고, T2 기간에는 DC link 전압으로 MAX와 MID사이의 전압을 이용하므로, 캐리어를 MAX에서 MID까지 그릴 수 있다. 따라서, 캐리어는 불연속적으로 나타난다.

폴 전압 지령을 만들기 위한 육섯 전압(V_{sn})은 “육섯 전압을 이용한 전압 변조 방법”에서 만든 것과 동일한 방식으로 만들 수 있다.

육섯 전압(V_{sn1} , V_{sn2})을 이용하여 연산한 폴 전압 지령(V_{an1} , V_{an2})을 캐리어와 비교하여, a 상의 스위칭 상태를 표현하면, 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. b상, c상에 대해서도 같은 방식으로 스위칭 상태를 나타낼 수 있다.

3.2 시뮬레이션

3.2.1 시뮬레이션 조건

R-L 부하에 대해 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표1과 같다. 스위칭 주기(T_s)는 100[usec]이고, $T_1 = T_2 = 50$ [usec]이다. 입력 전류 및 출력 전압 파형은 스위칭 전압, 전류의 영향을 배제하기 위하여, 입력 전류와 출력 전압에 10[krad/s]의 차단 주파수를 갖는 저역통과 2차 필터를 적용한 결과이다.

3.2.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과 그림 3과 같이 출력 전압은 잘 합성하였으나, 입력 전류는 크게 왜곡되어 있다.^[4]

4. 제안된 방법 part. 2

4.1 입력 전류의 합성 방법

제안된 방법의 결과, 출력 전압은 잘 합성되었으나, 입력 전류는 왜곡이 심하게 나타나고 있다. 이러한 입력 전류의 왜곡을 개선하기 위해, 출력 전압 합성 과정에 전혀 영향을 미치지 않으면서, 입력 전류를 정현적으로 제어할 수 있도록, T1과 T2의 비율을 조정할 수 있다.

T1 기간과 T2 기간은 입력 전압의 각(β_i)에 따라서

표 1 시뮬레이션 파라미터
 Table 1 Simulation Parameters

R-L 부하	R=10[Ω], L=20[mH]
q(전압 전달율)	0.5
입력 전압(상 rms) : E	220[V]
출력 전압(상 rms) : V_s	110[V]
입력 주파수 : f_s	50[Hz]
출력 주파수 : f_l	25[Hz]

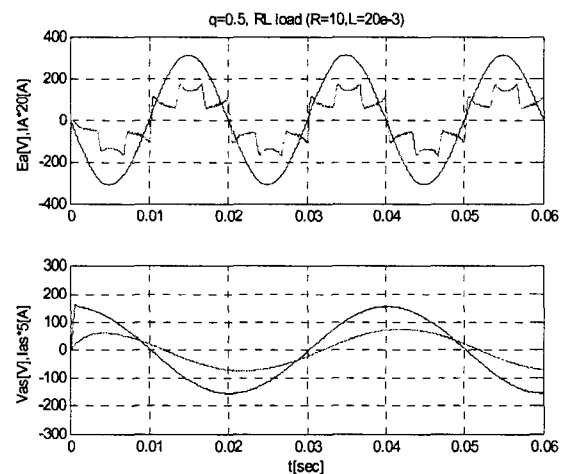


그림 3. 입력 전압 전류와 출력 전압 전류 파형
 (파란색 : 전압, 녹색 : 전류)

Fig. 3. The waveforms of input-output current and voltage
 (Blue : Voltage, Green : Current)

결정된다. 이 경우, 그림 2에서 가운데 수직선의 위치가 좌우로 움직이게 된다.

단, T1 기간과 T2 기간의 합은 항상 스위칭 주기(T_s)가 된다.

4.2 시뮬레이션

4.2.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션 조건은 3.2.1과 동일하다.

4.2.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과 그림 5와 같이 출력 전압 및 입력 전류가 잘 합성된 것을 확인할 수 있다.

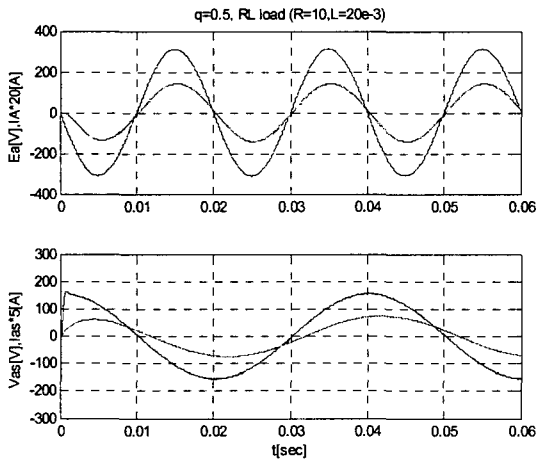


그림 4. 입력 전압 전류와 출력 전압 전류 파형
(파란색 : 전압, 녹색 : 전류)

Fig. 4. The waveform of input-output current and voltage
(Blue : Voltage, Green : Current)

5. 결 론

제안된 방법은 출력 상전압에 적절한 윗전압을 더하고, 캐리어 파형의 기울기를 적절히 제어함으로써, 입력 전류를 역율 1의 정현파로 제어하면서, 동시에 출력 전압의 합성을 가능하게 하는 방법이다.

이 방법은 기존의 매트릭스 컨버터 전압 변조 방법인 SVPWM과 동일한 스위칭 패턴을 나타내지만, 그 구현은 훨씬 간단하다. 또한, 기존의 전압형 인버터(VSI)에서 발전된 2상/3상 변조, 과변조 등의 개념을 유사하게 적용할 수 있어 그 활용도가 매우 높다. Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] A. Alesina, M. Venturini, "Solid-State Power Conversion: a Fourier Analysis Approach to Generalized Transformer Synthesis", IEEE Trans. Circuits and Systems, vol. 28, No. 4, pp. 319-330, April 1981.
- [2] A. Alesina, M.G.B. Venturini, "Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 4, pp. 101-112, January 1989.
- [3] G. Roy, G.E. April, "Cycloconverter Operation Under a New Scalar Control Algorithm", in Proc. IEEE PESC Conf., Milwaukee (WI), pp. 368-375, 1989.
- [4] P.D. Ziogas, S.I. Khan, M.H. Rashid, "Analysis and Design of Forced Commutated Cycloconverter Structures with Improved Transfer Characteristics", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 1E-33, No. 3, pp. 271-280, August 1986.
- [5] L. Huber, D. Borojevic, "Space Vector Modulator for Forced Commutated Cycloconverters", in Proc. IEEE PESC Conf., San Diego, (USA), pp. 871-876, 1989.
- [6] L. Huber, D. Borojevic, "Space Vector Modulated Three-Phase to Three-Phase Matrix Converter with Input Power Factor Correction", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 31, No. 6, pp. 1234-1246, November/December 1995.
- [7] Dae-Woong Chung, Joohn-Sheok Kim, Seung-Ki Sul, "Unified voltage modulation technique for real-time three-phase power conversion", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 34, pp. 374 - 380, March-April 1998.