

박민호 김기택 서광덕^o
서울대학교 전기공학과

A Study on the Step-Up Operation of Forced Commutated PWM Cycloconverter

Min Ho Park, Gi Taek Kim, Kwang Duk Seo
Dept. of Electrical Eng. Seoul National Univ.

Abstract

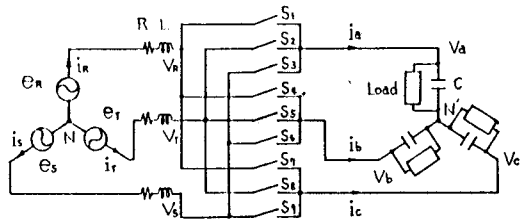
This paper describes the PWM cycloconverter which can provide step-up ac-ac direct conversion in a wide output frequency range. With input reactor and output capacitor, the input and output ports are exchanged. And sine PWM scheme is applied to the converter. To analyze the converter operation the state equations are derived using dq transformation. Simulated results show that both the output voltage and frequency can be controlled by adjusting the modulating functions.

ralized Step-down Transformer 이라고 불리어지고 있다. 전류원을 입력측으로 하면 승압작용(Step-up)도 가능하며 이 경우 출력측은 전압원이 되어야 하기 때문에 콘덴서를 이용하여 전압원을 구성한다. 입력측이 전류원이 되기 위해서는 3상 전압원에 리액터를 추가하게된다. 본 논문에서는 승압형 PWM 사이크로콘버터의 구성과 이에 대한 상태방정식을 dq 좌표계를 이용하여 구하고 출력측이 저항부하일 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 변조함수의 각 요소에 대한 출력의 변화를 고찰하였다.

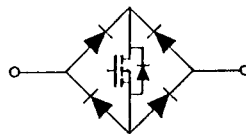
1. 서론

PWM 사이크로콘버터는 중간단계(dc link)를 거치지 않고 다상교류를 가변전압, 가변주파수의 다상교류로 직접 변환하는 장치이다. 전력용 반도체 소자의 발달에 따라 사이크로콘버터는 기존의 정류기-인버터 구조를 대체할 수 있을 것으로 예상된다. 정현파 PWM에 의한 스위칭 방식이 제시된 이후 그간의 연구 동향은 입력전압에 대한 출력 전압의 크기의 비를 개선시키는 것과 출력전압과 입력 전류의 고조파를 억제시키는 것에 집중되어 왔다. PWM 사이크로콘버터는 3상-3상 변환의 경우 9개의 양방향 스위칭 소자를 사용하며 입력과 출력을 구분할 필요가 없다. 통상적으로 전압원을 입력, 전류원을 출력이라고 하고 있다. 현재까지 연구된 바에 의하면 출력전압은 입력 전압의 3/2을 넘지 못하는 것으로 알려져 있으며 Gene-

2. 시스템 구성 및 상태방정식



(a) 주 회로



(b) 양 방향성 스위칭소자

그림 1. 승압형 PWM 사이크로콘버터

강제 전류형 PWM 사이크로컨버터에서의 출력 승압에 관한 연구

승압형 PWM 사이크로컨버터의 구성은 그림 1 (a)과 같다. 주 회로는 9개의 양 방향성 스위칭소자로 구성되어 있으며 각 스위칭소자는 그림 1 (b)와 같이 4개의 다이오드와 자기 소호능력이 있는 소자, 즉 GTO, Power TR, MOSFET 등으로 구성된다. 입력측은 3상 전압원에 리액터가 직렬로 연결되어 있고 출력측에는 커패시터와 부하로서 저항이 연결되어 있다. 입력측은 abc로 표시한다.

그림 1의 입력과 출력측에서 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} e_{rst} &= (Lp + R) \underline{i}_{rst} + \underline{v}_{rst} \\ \underline{i}_{abc} &= (Cp + 1 / \text{Load}) \underline{v}_{abc} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 p는 미분 연산자이며 입력 상전압 벡터는 다음과 같다.

$$\underline{e}_{rst} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} V \cos(\omega t) \\ \sqrt{2} V \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \sqrt{2} V \cos(\omega t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

사이크로컨버터 양측의 전압, 전류에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \underline{v}_{rst} &= M \underline{v}_{abc} \\ \underline{i}_{abc} &= M^T \underline{i}_{rst} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 M(·)는 저주파변조함수로서 Venturini가 제안한 것을 사용하였으며 다음과 같다.

$$M(t) = \frac{\alpha_0}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1+2qCS(0) & 1+2qCS(-2\pi/3) & 1+2qCS(-4\pi/3) \\ 1+2qCS(-4\pi/3) & 1+2qCS(0) & 1+2qCS(-2\pi/3) \\ 1+2qCS(-2\pi/3) & 1+2qCS(-4\pi/3) & 1+2qCS(0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$+ \frac{\alpha_1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1+2qCA(0) & 1+2qCA(-2\pi/3) & 1+2qCA(-4\pi/3) \\ 1+2qCA(-2\pi/3) & 1+2qCA(-4\pi/3) & 1+2qCA(0) \\ 1+2qCA(-4\pi/3) & 1+2qCA(0) & 1+2qCA(-2\pi/3) \end{bmatrix}$$

$$CS(x) = \cos[\omega_m t + x]$$

$$CA(x) = \cos[-(\omega_m + 2\omega) t + x]$$

$$\omega_m = \omega_0 - \omega, \quad q = V_o / V_x \quad (0 \leq q \leq 1/2)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \alpha_1, \alpha_2 \geq 0$$

ω 는 입력 각주파수, ω_0 는 출력 각주파수 이고 q는 입력력 전압 크기의 비이다. ω_0 , q를 변화시켜 전압, 주파수를 조정할 수 있다. M의 앞의 항은 대칭 변조이며 뒤의 항은 반대칭 변조의 경우이며 대칭 변조일 경우 출력측 역률이 입력측에 그대로 반영되며 반대칭일 경우 역전된다. 이 두 가지 변조 방식을 결합하여 입력 역률을 제어할 수 있으며 α_1, α_2 는 결합의 가중치를 나타낸다. 위의 관계식을 입력주파수의 각속도로 회전하는 dq좌표계로 변환시키면 다음과 같다.

입력측 변수를 dq, 출력측을 DQ로 표시한다.

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3} V \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lp + R & \omega L \\ -\omega L & Lp + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_q \\ v_d \end{bmatrix} \quad (1)'$$

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cp + 1 / \text{Load} & \omega C \\ -\omega C & Cp + 1 / \text{Load} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_D \end{bmatrix}$$

여기서 변환행렬은 다음과 같다.

$$C = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\omega t + 4\pi/3) & \sin(\omega t + 4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C^T C = I, \quad \underline{v}_{dq} = C^T \underline{v}_{rst}, \quad \underline{v}_{DQ} = C^T \underline{v}_{abc} \text{ 이므로}$$

$$\begin{aligned} \underline{v}_{dq} &= C^T M \underline{v}_{abc} = C^T M C \underline{v}_{DQ} = M_c \underline{v}_{DQ} \\ \underline{i}_{DQ} &= C^T M \underline{i}_{rst} = C M C^T \underline{i}_{dq} = M_c^T \underline{i}_{dq} \end{aligned} \quad (6)$$

의 관계가 성립한다.

(1)', (6) 식에서 다음의 비선형 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{i}_d \\ \dot{v}_a \\ \dot{v}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -\omega & & \\ \omega & -R/L & & \\ & & -M_c/L & \\ & M_c^T/C & -1/\text{Load} & -\omega \\ & & \omega & -1/\text{Load} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ v_a \\ v_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{3}V \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서

$$M_c = q \begin{bmatrix} \cos(\omega_c t) & \sin(\omega_c t) \\ (-\alpha_1 + \alpha_2) \sin(\omega_c t) & (\alpha_1 - \alpha_2) \cos(\omega_c t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$(\omega_c = \omega - \omega_0)$$

3. 시뮬레이션 결과

(7) 식에서 조정할 수 있는 요소는 M_c 의 q, ω_0, α_1 과 α_2 이다. q 는 출력 전압의 크기에, ω_0 는 출력 주파수, α 는 입력 역률에 관계된다. 기존의 PWM 사이크로콘버터에서 q 는 출력 전압이 입력 전압에 비해 강압(Step-down) 하는 정도를 의미하게 되며 승압형 사이크로콘버터에서는 입력과 출력속이 바뀌었기 때문에 승압하는 정도를 나타내게 된다. 본 논문의 스위칭 방식에서는 $0 \leq q \leq 1/2$ 이기 때문에 입력전압의 2배 이상의 출력전압을 발생할 수 있다.

그림 2는 입력 상전압의 최대치가 $\sqrt{2} \times 100$ 일때 출력 상전압, 입력 전류, 입력전류의 d속, q속 성분을 나타내고있다. 본면서의 초기전압이 없는 상태에서 3상 전압이 확립(build-up) 되는 과정을 보여주고있다. 150 msec 에서 $q=0.4$ 에서 $q=0.2$ 로 변화시킬 경우 출력 전압이 상승하게 되며 일정 부하이기 때문에 q속전류(실효분 전류)가 증가되며 따라서 입력전류가 증가하게 된다. 이때 d속전류(무효분 전류)도 q속 전류와 거의 변화하고 있다. 출력이 정확히 2배가 안되는 것은 내부 임피던스 강하에 의한 것으로 생각된다. 출력 주파수는 30Hz이며 반대칭의 변조함수($\alpha_1=0, \alpha_2=1$)를 사용하고 있다. 출력속이 진상이기때문에 입력속이 지상($i_d > 0$) 이된다.

그림 3은 ω_0 가 100 msec일 때 30Hz에서 90Hz로 변환한 경우이다. 출력이 매우 빠르게 응답하는 것을 볼 수 있다. 또한 200 msec일때 부하를 2배로 증가시켰으며 이때 q속 전류가 증가하며 d속 전류는 거의 일정함을 알 수 있다.

그림 4는 α 를 일정한 비율로 변화시킬 때의 특성을 보여주고 있다. 이 경우 출력 전압의 위상은 반전되고 d속 전류가 매우 심하게 변화하며 대칭과 비대칭이 거의 균형을 유지할 경우 매우 큰 지상전류를 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 α 를 조정함으로써 역률 1이 가능하다.

시뮬레이션 결과에서 변조함수의 각 요소 즉 ω_0, q, α 를 변화시켜 출력전압, 주파수 및 입력역률 제어가 가능함을 알 수 있으며 또한 제어요소와 출력간의 간섭작용이 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

예를 들어 ω_0 를 조정하면 출력주파수 뿐만 아니라 입력역률도 변화하게 된다. 또한 시뮬레이션 과정에서 출력전압, 주파수변화가 매우 안정하며 우수한 속응성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

시스템 상수

리액터	5 mH, 0.1 Ohm
커패시터	20 uF
부 하	100 Ohm

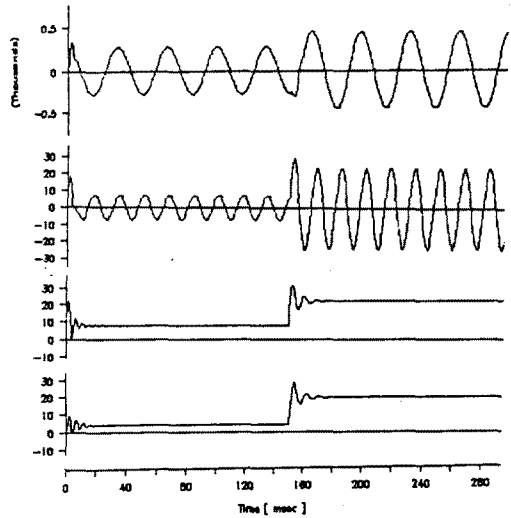


그림 2. q 가 변시 V_a, I_r, I_q, I_d 파형

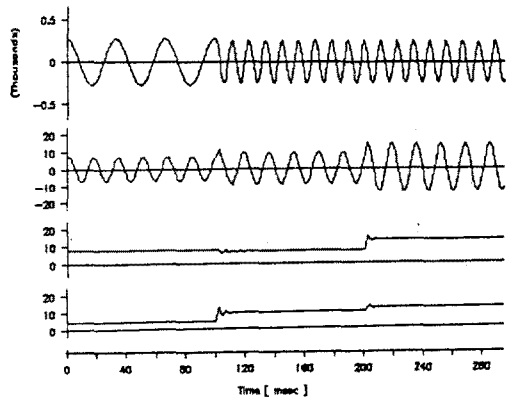


그림 3. ω_0 및 부하변화에 따른 V_a, I_r, I_q, I_d 파형

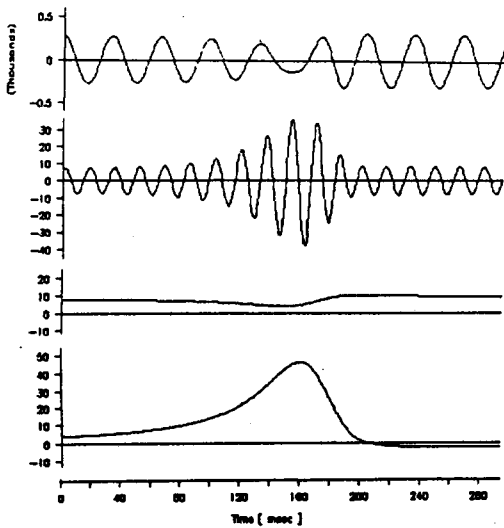


그림 4. V_a , I_r , I_q , I_d 파형

3. Phoivos D. Ziogas et al., "Analysis and Design of Forced Commutated Cycloconverter Structures with Improved Transfer Characteristics", IEEE Trans. on IE, Vol. IE-33, No. 3, 1986
4. Akio Ishiguro et al., "A New Method of PWM Control for Forced Commutated Cycloconverters using Microprocessors", IEEE IAS Annual Meeting, 1988
5. Hidehiko Sugimoto et al., "A High Performance Control Method of A Voltage-Type PWM Converter", PESC '88 RECORD

4. 결론

본 연구에서는 입력전압보다 큰 출력전압을 발생하는 승압형 PWM 사이클로컨버터를 구성하였으며 전체시스템을 dq 좌표계를 사용하여 상태방정식을 유도하였다. 스위칭 방식으로는 기존의 정현파 변조방식을 사용하였다. 상태방정식을 사용하여 저항부하에 대해 시뮬레이션을 통하여 제어특성 및 각 제어요소의 상관 관계를 고찰하였다. 제안된 사이클로컨버터는 출력전압 자기복합의 기능이 있으며 매우 안정하고 속응성이 우수한 것을 알수있다. 또한 각 제어 요소가 출력변수에 미치는 효과가 매우 복합적으로 나타나기 때문에 이에 대한 정확한 해석 및 제어 부우프구조성이 필요하다고 생각된다.

5. 참고 문헌

1. Marco Venturini, "A New Sine Wave In, Sine Wave Out Conversion Technique Eliminates Reactive Elements", Proceedings of Powercon7, 1980
2. Alberto Alesina and Marco Venturini, "Intrinsic Amplitude Limits and Optimum Design of 9 switches Direct PWM AC-AC Converters", PESC '88 RECORD