

PWM Cuk AC-AC 컨버터의 특성해석

최남섭

여수대학교 전기및반도체공학전공

Characteristics Analysis of PWM Cuk AC-AC Converter

Choi Nam-Sup

Dept. of Electrical Engineering, Yosu National University

ABSTRACT

In this paper, a PWM Cuk AC-AC converter for VVCF applications such as AC line conditioner, phase shifter is presented. The PWM Cuk AC-AC converter is modelled by using complex circuit DQ transformation whereby the characteristics equations such as voltage gain and the interested voltage and current is analytically obtained. Finally, the PSIM simulation show the validity of the modelling and analysis.

1. 서 론

최근 고정주파수 가변전압(VVCF : Variable Voltage Constant Frequency) 전력변환 응용을 위한 PWM AC 초퍼의 응용범위가 단순한 수동가의 power dimming이나 전압제어를 넘어, AC line conditioner, phase shifter, impedance changer와 같이 전력품질 향상을 위한 Custom Power 기기로 응용분야가 다양화 되면서 관심과 개발의 중요성이 증대되고 있다^[1].

그동안 PWM AC 초퍼, 즉 PWM AC-AC 컨버터는 주로 Buck형, Boost형, Buck-Boost형을 중심으로 이루어져 왔다. 반면, PWM Cuk AC-AC 컨버터는 Buck-Boost 형과 비교하여 이론적으로 동일한 전압이득을 나타내지만 더 많은 수동소자를 필요로 함으로써 구성이 복잡하고 효율이 낮다는 단점 때문에 연구가 소외되어 왔으며, 최적의 회로 구성과 동작특성에 대한 엄밀한 해석적 모델링 등은 아직 문헌에서 찾아 볼 수 없다^[2].

그러나, PWM Cuk AC-AC 컨버터는 입출력 전류가 연속이므로 Buck-Boost 형에서 필요한 필터 없이도 전류의 리플을 일정 범위로 제한할 수 있으

므로, 필터까지 고려했을 때는 오히려 Buck-Boost 시스템보다 경제적인 컨버터 구성이 가능하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 복소 회로 DQ 변환 기법을 활용하여 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터에 대한 완전한 정보를 포함하는 등가모델을 제시하고, 이 모델로부터 전압이득과 같은 컨버터의 중요한 식들의 해석적인 표현을 유도할 수 있음을 보일 것이다. 더불어, 이러한 동작특성 해석에 대한 결과는 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증할 것이다.

2. 시스템 모델링

2.1 시스템 구성

그림 1은 본 논문에서 모델링 및 해석하려는 PWM Cuk AC-AC 컨버터의 회로를 나타낸다. 그림 1에서 보듯이 Q_1 과 Q_2 는 상용 IGBT 모듈로 대체되므로, 단지 3개의 IGBT 모듈을 사용하여 구성되며 기존의 AC 초퍼와 달리 별도의 양방향 스위치가 요구되지 않는 장점을 갖는다^[3].

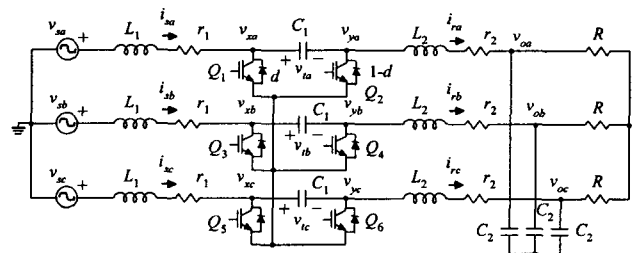


그림 1 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터

그림 1에서 저항 r_1, r_2 는 IGBT와 인덕터 L_1, L_2 의 손실을 각각 나타내고, 저항 R 은 부하저항이다. 부하저항 R 에는 커패시터 C_2 의 손실이 포함되어 있다고 가정한다. 또, d 는 스위치 Q_1, Q_3, Q_5 의

duty ratio이다. 즉 Q_1, Q_3, Q_5 는 동시에 온, 오프 스위칭하고, 동시에 온, 오프 스위칭하는 Q_2, Q_4, Q_6 과는 상보적인 스위칭 동작을 한다. 그러므로, d 는 그림 1의 컨버터의 유일한 제어변수이다.

2.2 시간영역에서의 회로방정식

그림 1의 PWM Cuk AC-AC 컨버터를 해석하기 위하여 그림 2와 같이 회로를 각 부분으로 나누어 고려한다.

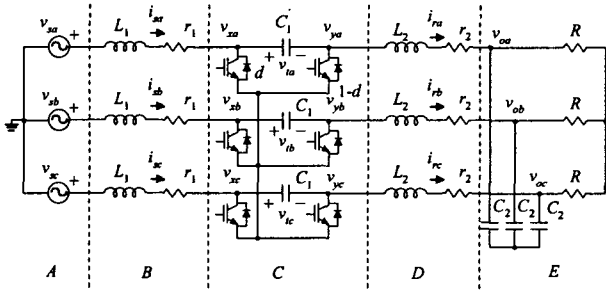


그림 2 회로의 분할

그림 2의 part A에서 3상 입력전원은,

$$\mathbf{v}_{s,abc} = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot v_s \mathbf{SIN}(\omega t) \quad (1)$$

이고, v_s 는 AC 전원측의 선간 실효전압을 나타내며,

$$\mathbf{SIN}(\omega t) = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

이다. 또한 분할된 영역을 각각 부분회로를 고려하여 다음과 같이 시간영역에서의 식들을 얻는다.

$$\mathbf{v}_{s,abc} - \mathbf{v}_{x,abc} = L_1 \frac{d}{dt} \mathbf{i}_{s,abc} + r_1 \mathbf{i}_{s,abc} \quad (\text{part B}) \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_{y,abc} - \mathbf{v}_{o,abc} = L_2 \frac{d}{dt} \mathbf{i}_{r,abc} + r_2 \mathbf{i}_{r,abc} \quad (\text{part D}) \quad (4)$$

$$\mathbf{i}_{r,abc} = C_2 \frac{d}{dt} \mathbf{v}_{o,abc} + \frac{1}{R} \mathbf{v}_{o,abc} \quad (\text{part E}) \quad (5)$$

한편, Part C에 대한 식을 세우기 위하여 그림 3의 (a)와 (b)의 경우와 같이 두 가지 스위칭 모드에 대한 회로의 상태를 고려한다. 스위칭 주기를 T_s 라 할 때, 그림 3(a)는 dT_s 동안 회로의 상태이며, (b)는 $(1-d)T_s$ 동안 회로의 상태이다. 그림 3으로부터 다음의 식을 얻는다.

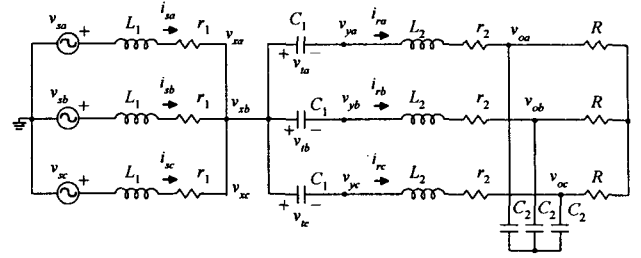
$$C_1 \frac{d}{dt} \mathbf{v}_{t,abc} = d \mathbf{i}_{r,abc} + (1-d) \mathbf{i}_{s,abc} \quad (6)$$

$$\mathbf{v}_{x,abc} = (1-d) \mathbf{v}_{t,abc} \quad (7)$$

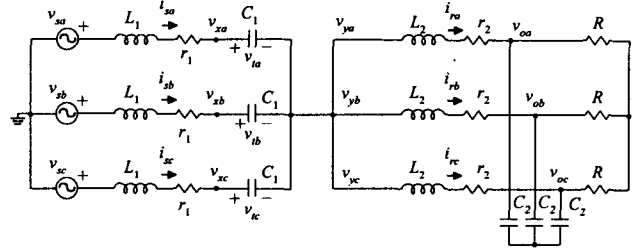
$$\mathbf{v}_{y,abc} = -d \mathbf{v}_{t,abc} \quad (8)$$

또한, 스위칭 주기가 매우 작은 경우 식 (6)~(8)은 순시적인 전압, 전류의 파형을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

2.3 복소 회로 DQ 변환



(a) Q_1, Q_3, Q_5 가 ON일 때 회로의 상태



(b) Q_2, Q_4, Q_6 가 ON일 때 회로의 상태

그림 3 스위칭에 따른 회로의 상태

대칭 3상인 전류 또는 전압은 영상성분이 0이므로, 적당한 DQ 변환에 의하여 d축의 양과 q축의 양만으로 표현할 수 있다.

본 논문에서는 다음과 같이 입력전원의 주파수와 위상에 동기되어 회전하는 DQ 변환을 정의한다. 즉,

$$\mathbf{x} = x_d + jx_q \quad (9)$$

여기서,

$$x_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mathbf{SIN}^T(\omega t) \cdot \mathbf{x}_{abc} \quad (10)$$

$$x_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mathbf{COS}^T(\omega t) \cdot \mathbf{x}_{abc} \quad (11)$$

이며, 윗첨자 T는 행렬의 transpose이다.

먼저, part A의 전원을 DQ 변환하면,

$$\mathbf{v}_s = v_{sd} + jv_{sq} = v_s \quad (12)$$

이다. 또, part B에 대하여,

$$\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_x = L_1 \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s + j\omega L_1 \mathbf{i}_s + r_1 \mathbf{i}_s \quad (13)$$

마찬가지로, part D에 대하여

$$\mathbf{v}_y - \mathbf{v}_o = L_2 \frac{d}{dt} \mathbf{i}_r + j\omega L_2 \mathbf{i}_r + r_2 \mathbf{i}_r \quad (14)$$

를 얻는다. 여기서, 식 (13)과 (14)의 $j\omega L_1$ ($j\omega L_2$)은 페이저를 나타내는 것이 아니라, 시변 복소 전류 \mathbf{i}_s 의 dq 성분과 시변 복소 전압의 dq 성분사이의 관계를 나타내는 요소임에 주의하여야 한다.

part E를 나타내는 식 (5)를 복소 DQ 변환하면,

$$\mathbf{i}_r = C_2 \frac{d}{dt} \mathbf{v}_o + j\omega C_2 \mathbf{v}_o + \frac{1}{R} \mathbf{v}_o \quad (15)$$

이 된다.

따라서, 식 (6)~(8)을 복소 DQ 변환하면,

$$C_1 \frac{d}{dt} v_t + j\omega C_2 v_t = d i_r + (1-d) i_s \quad (16)$$

$$v_x = (1-d) v_t \quad (17)$$

$$v_y = -d v_t \quad (18)$$

를 얻는다.

그림 4는 식 (12)~(18)을 사용하여 재구성한 등가회로이다.

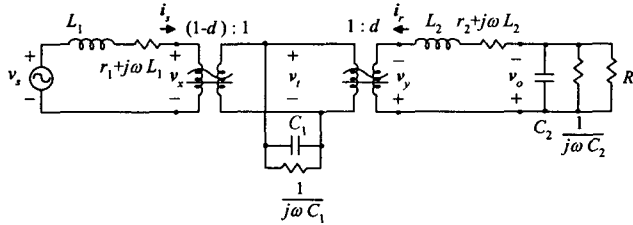


그림 4 PWM Cuk AC-AC 컨버터의 복소 DQ 등가회로

3. 시스템 해석

3.1 상태방정식

식 (12)~(18)로부터 다음과 같이 상태방정식을 정리할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} v_s \quad (19)$$

여기서,

$$\mathbf{x} = [i_s, v_t, i_r, v_o]^T \quad (20)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{r_1}{L_1} - j\omega & -\frac{1-d}{L_1} & 0 & 0 \\ \frac{1-d}{C_1} & -j\omega & \frac{d}{C_1} & 0 \\ 0 & -\frac{d}{L_2} & -\frac{r_2}{L_2} - j\omega & \frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{RC_2} - j\omega \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{B} = \left[\frac{1}{L_1} \ 0 \ 0 \ 0 \right]^T \quad (22)$$

이다.

그림 1의 Cuk 컨버터는 12개의 에너지 저장소자를 갖고 있으므로 시스템의 차수는 최대 12차가 나올 수 있다. 그러나, 평형 3상 대칭의 조건과 복소 DQ 상태 변수를 사용한 결과, 식 (19)에 나타난 바와 같이 4차의 시스템으로 모델링 할 수 있다.

식 (19)의 상태방정식은 스위칭 주파수가 매우 높다는 가정하에 나타난 시스템의 모든 정보를 완전히 포함하는 식이다.

3.2 전압 이득

시스템의 모든 정상상태 특성은 그림 4의 복소 DQ 등가회로에서, 인덕터는 단락하고 커패시터는 개방하여 얻는, 정상상태를 나타내는 그림 5와 같

은 DC 등가회로에서 구할 수 있다. 일반적으로, 저항 r_1, r_2 는 매우 작은 값이므로 그림 5에 생략되어 있다.

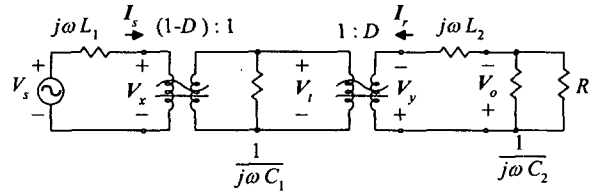


그림 5 DC 등가회로

그림 5에서 보듯이, 정상상태에서 모든 전압, 전류의 변수는 직류값을 가지므로 대문자를 사용하여 표기하였다. 또, 각 인덕터와 커패시터의 리액턴스를 다음과 같이 나타낸다.

$$X_{L1} = j\omega L_1 \quad (23)$$

$$X_{L2} = j\omega L_2 \quad (24)$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} \quad (25)$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} \quad (26)$$

일반적으로, 그림 1의 Cuk 컨버터에서 소자의 값에 대하여 다음의 관계식이 성립한다고 가정한다. 즉,

$$\{r_1, r_2\} \ll \{X_{L1}, X_{L2}\} \ll R \ll \{X_{C1}, X_{C2}\}. \quad (27)$$

그러므로 그림 5에 대하여 식 (27)의 관계를 고려하여 근사적으로 복소 출력전압 V_o 를 나타내면,

$$V_o = \frac{D(D-1)V_s}{(1-D)^2 + j \left[\frac{X_{L1}}{R} D^2 + \frac{X_{L2}}{R} (1-D)^2 \right]} \quad (28)$$

출력전압의 크기는

$$V_o = |V_o| \quad (29)$$

이므로, 전압이득은 다음과 같다.

$$G \equiv \frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1-D} \cdot \rho \quad (30)$$

여기서,

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{X_{L1}}{R} \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 + \frac{X_{L2}}{R} \right]}} \quad (31)$$

식 (30)과 (31)로부터 다음을 정리할 수 있다.

1) Cuk AC-AC 컨버터의 전압이득은 Buck-Boost AC-AC 컨버터의 것과 거의 유사하다.

2) 전압이득은 부하저항과 두 인덕터의 리액턴스에 따라 정해지며, 커패시터의 값에 따라 거의 영향을 받지 않는다.

3) ρ 는 이상적인 전압이득 특성으로부터 어느 만큼 벗어나 있는가를 나타내는 deviation factor로

볼 수 있다.

4) 전압이득을 결정할 때, D 가 작을 때는 X_{L2} 의 영향이 큰 반면, D 가 1에 가까이 갈수록, X_{L1} 의 영향이 크게 작용한다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터는 전원전압 $V_s = 220$ V, 전원주파수 $f = 60$ Hz, $L_1 = 1$ mH, $r_1 = 0.01$ Ω , $L_2 = 1$ mH, $r_2 = 0.01$ Ω , $C_1 = 10$ μ F, $C_2 = 45$ μ F, $R = 5$ Ω 이다. 또한 스위칭 주파수는 10 kHz이다.

그림 6은 듀티비 D 를 0.3부터 0.1씩 증가시켰을 때 출력전압의 변화를 나타내며, 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 $G(D)$ 는 식 (30)에 이론적으로 구한 전압이득을 나타내며 거의 일치함을 볼 수 있다. 그림 7에서 이론적인 전압이득보다 시뮬레이션 결과 얻어진 전압이득보다 약간 작은 이유는 이론적인 전압이득을 유도할 때 과감한 근사에 의해 커패시터에 의한 효과를 고려하지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 이러한 근사가 그림 7에서 보듯이 실용적으로 문제가 되지 않음을 아울러 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 복소 회로 DQ 변환 기법을 활용하여 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터에 대한 완전한 정보를 포함하는 등가모델을 제시하고, 이 모델로부터 전압이득과 같은 컨버터의 중요한 식들의 해석적인 표현을 유도할 수 있음을 보였다. 더불어, 이러한 동작특성 해석에 대한 결과는 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였으며, 본 논문에서 구한 등가모델이 매우 유용하게 사용될 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] N.G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities : Role of Power Electronics in Future Power System," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 76, No. 4, pp. 481-482, 1988, April.
- [2] H. Mehta, "Recent Development: EPRI's CUSTOM POWER Concept", *Proceedings of Power Quality '93 Conference*, Interec International Inc., Ventura, CA, pp 794-795, October 1993.
- [3] Vekataramanan, et al., "An AC-AC power converter for custom power applications", *IEEE*

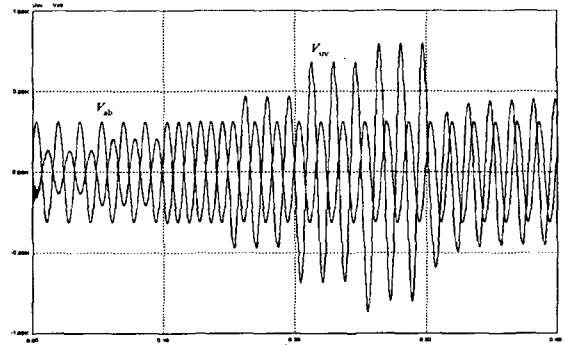


그림 6 d 의 변화에 따른 출력전압의 변화

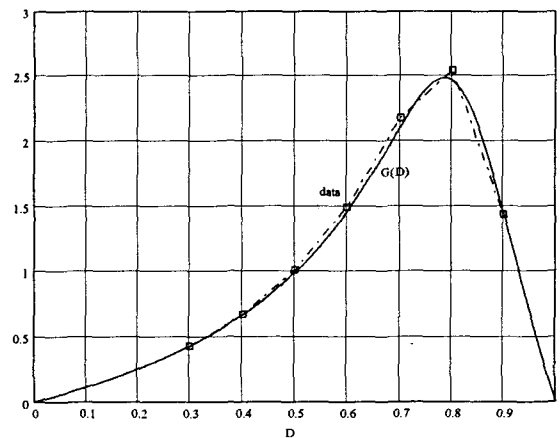


그림 7 이론적인 전압이득과 시뮬레이션 결과