

Custom Power의 전력품질 향상을 위한 PWM Cuk AC-AC 컨버터의 정적 특성 해석

최남섭*

*여수대학교

Static Characteristics Analysis of PWM Cuk AC-AC Converter for Power Quality Improvement of Custom Power

Nam-Sup Choi

*Yosu National University

E-mail : nschoi@eyosu.ac.kr

요 약

본 논문에서는 Custom Power의 전력품질 향상을 위한 PWM Cuk AC-AC 컨버터를 제안한다. AC line Conditioner, 위상천이기와 같은 고정주파수 가변전압(VVCF:Variable Voltage Constant Frequency)응용에 사용되는 PWM Cuk AC-AC 컨버터를 모델링함에 있어서 복소 회로 DQ 변환을 사용하여 전압이득, 역률과 같은 정적인 특성에 대한 해석적인 식을 구한다. 끝으로, PSIM 시뮬레이션을 통하여 해석과 모델링의 타당성을 보일 것이다.

ABSTRACT

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

키워드

PWM Cuk AC-AC converter, Custom power, AC chopper, VVCF, complex DQ transform

1. 서 론

오늘날 산업 현장에서 많이 사용되고 있는 디지털 컴퓨터나 자동화 설비 제조공정 등은 순간적인 전압강하나 수 사이클 동안의 짧은 정전에도 매우 예민하게 동작한다. 그러므로 정밀한 장치들을 안전하게 운전하기 위해서 무정전 전원장치나 기타 다른 전력 조절장치가 사용되어 전력품질 모니터링을 위한 IEEE 1159 규정 등을 만족하도록 하고 있다[1].

본 논문에서는 수용가에 공급되는 전력의 품질을 높일 수 있는 수용가 전원 응용을 위한 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터를 다룬다. 최근 EPRI에서 제안된 Custom Power의 개념을 구현하는데 PWM AC-AC 컨버터가 매우 유용함이 밝혀지고,

실용적인 연구들이 뒤따르면서 기타 타 분야에 비하여 비교적 연구가 미진하였던 AC 초퍼에 대하여 관심이 증대되고 있다[2].

특히, 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 회로구성과 동작특성에 대한 엄밀한 해석적 모델링 등은 아직 문헌에서 찾아 볼 수 없다[3].

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 정적 동작특성 해석에 대한 결과는 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증할 것이다.

II. 시간영역에서 회로방정식

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 초파와 달리 별도의 양방향 스위치가 요구되지 않는 장점을 갖는다[3].

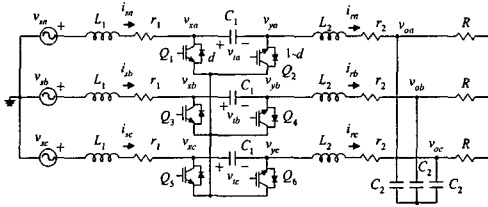


그림 1. PWM Cuk AC-AC 컨버터
Fig. 1 PWM Cuk AC-AC converter.

그림 1에서 저항 r_1, r_2 는 IGBT와 인덕터 L_1, L_2 의 손실을 각각 나타내고, 저항 R 은 부하저항이다. 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. 그림 1에서 3상 입력전원은,

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

이고, v_s 는 AC 전원측의 선간 실효전압을 나타내며,

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

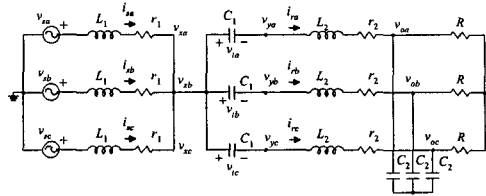
이다. 또한 각각 부분회로를 고려하여 다음과 같이 시간영역에서의 식들을 얻는다. 먼저 3상 L_1 - r_1 세트와 L_2 - r_2 세트에 대하여 각각,

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

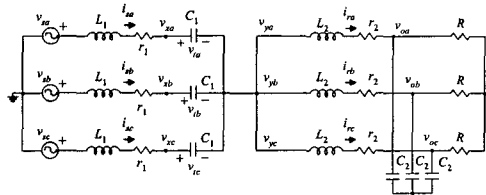
$$\mathbf{v}_{y, abc} - \mathbf{v}_{o, abc} = L_2 \frac{d}{dt} \mathbf{i}_{r, abc} + r_2 \mathbf{i}_{r, abc} \quad (4)$$

이고, 3상 C_2 - R 세트에 대하여 다음과 같다.

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



(a) Q_1, Q_3, Q_5 : ON, Q_2, Q_4, Q_6 : OFF



(b) Q_1, Q_3, Q_5 : OFF, Q_2, Q_4, Q_6 : ON

그림 2. 회로의 두 가지 스위칭 상태
Fig. 2 Two switching circuit states.

한편, C_1 에 대한 식을 세우기 위하여 그림 2의 (a)와 (b)의 경우와 같이 두 가지 스위칭 모드에 대한 회로의 상태를 고려한다. 스위칭 주기를 T_s 라 할 때, 그림 2(a)는 dT_s 동안 회로의 상태이며, (b)는 $(1-d)T_s$ 동안 회로의 상태이다. 그림 2로부터 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.

III. 복소 DQ 변환

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

본 논문에서는 다음과 같이 입력전원의 주파수와 위상에 동기되어 회전하는 DQ 변환을 정의한다[4]. 즉,

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

여기서,

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

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

이며, 뒀침자 T는 행렬의 transpose이다.
먼저, 전원을 DQ 변환하면,

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

이고, 3상 L_1 - r_1 세트와 L_2 - r_2 세트에 대하여 각각,

$$v_s - v_x = L_1 \frac{d}{dt} i_s + j\omega L_1 i_s + r_1 i_s \quad (13)$$

$$v_y - v_o = L_2 \frac{d}{dt} i_r + j\omega L_2 i_r + r_2 i_r \quad (14)$$

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

식 (5)~(8)을 복소 DQ 변환하면,

$$i_r = C_2 \frac{d}{dt} v_o + j\omega C_2 v_o + \frac{1}{R} v_o \quad (15)$$

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

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

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

그림 3은 식 (12)~(18)을 사용하여 재구성한 등가 회로이다.

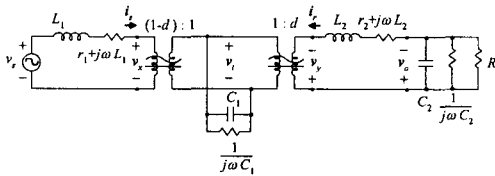


그림 3. 복소 DQ 변환된 등가 회로
Fig. 3 Complex DQ transformed equivalent circuit.

IV. 정적 특성

그림 1의 Cuk 컨버터는 평형 3상 대칭의 조건과 복소 DQ 상태 변수를 사용한 결과, 시스템의 모든 정보를 완전히 포함하는 그림 3에 나타난 바와 같이 4차의 시스템으로 모델링 할 수 있다.

시스템의 모든 정상상태 특성은 그림 3의 복소

DQ 등가회로에서, 인덕터는 단락하고 커패시터는 개방하여 얻는, 정상상태를 나타내는 그림 4와 같은 DC 등가회로에서 구할 수 있다. 일반적으로, 저항 r_1 , r_2 는 매우 작은 값이므로 그림 4에 생략되어 있다.

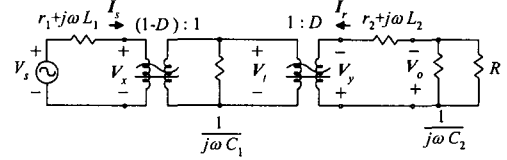


그림 4. DC 등가 회로
Fig. 4 DC equivalent circuit.

그림 4에서 보듯이, 정상상태에서 모든 전압, 전류의 변수는 직류값을 가지므로 대문자를 사용하여 표기하였다. 또, 각 인덕터와 커패시터의 리액턴스를 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} X_{L1} &= j\omega L_1 ; & X_{L2} &= j\omega L_2 ; \\ X_{C1} &= \frac{1}{\omega C_1} ; & X_{C2} &= \frac{1}{\omega C_2} . \end{aligned} \quad (19)$$

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

$$\{r_1, r_2\} \ll \{X_{L1}, X_{L2}\} \ll R \ll \{X_{C1}, X_{C2}\}. \quad (20)$$

4.1 전압이득

그림 4에 대하여 식 (20)의 관계를 고려하여 근사적으로 복소 출력전압 V_o 를 나타내면,

$$V_o = \frac{D(D-1)V_s}{(1-D)^2 + j\left[\frac{X_{L1}}{R}D^2 + \frac{X_{L2}}{R}(1-D)^2\right]} \quad (21)$$

출력전압의 크기는 $V_o = |V_o|$ 이므로, 전압이득은 다음과 같다.

$$G \equiv \frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1-D} \cdot \rho \quad (22)$$

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{X_{L1}}{R} \left(\frac{D}{1-D}\right)^2 + \frac{X_{L2}}{R}\right]}} \quad (23)$$

식 (22)와 (23)으로부터 전압이득은 부하저항과 두 인덕터의 리액턴스에 따라 정해지며, 커패시터의 값에 따라 거의 영향을 받지 않으며, 전압이득을 결정할 때, D 가 작을 때는 X_{L2} 의 영향이 큰

반면, D 가 1에 가까이 갈수록, X_{L1} 의 영향이 크게 작용한다는 사실을 알 수 있다.

4.2 역률

그림 4의 전원측 3상 전압원에서 PWM Cuk AC-AC 컨버터로 공급되는 유효전력 P 와 무효전력 Q 는 다음과 같다. 즉, 복소전력 S 라 할 때,

$$S = V_s I_s^* = P + jQ \quad (25)$$

이고, 그림 4에서 I_s 를 구하여 대입하면,

$$P = \frac{V_s^2}{R} \cdot \left(\frac{D}{1-D}\right)^2 \cdot \frac{1}{k} \quad (26)$$

$$Q = \frac{V_s^2}{R} \cdot \left(\frac{D}{1-D}\right)^2 \cdot \frac{h}{k} \quad (27)$$

여기서,

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

$$h = \frac{X_{L1}}{R} \left(\frac{D}{1-D}\right)^2 + \frac{X_{L2}}{R} - \left(\frac{R}{X_{C2}} + \frac{R}{D^2 X_{C1}} \right) \quad (29)$$

그러므로, 역률 PF 는 다음과 같다.

$$PF = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + h^2}} \quad (30)$$

V. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터는 전원 전압 $V_s = 220$ 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 5는 시뮬레이션 결과 얻은 전압이득과 식 (22)에 이론적으로 구한 전압이득을, 그림 6은 시뮬레이션으로 얻은 역률과 식 (30)으로 구한 역률을 나타내는데, 거의 일치함을 볼 수 있다.

VI. 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 정적 특성의 해석적인 표현을 유도하였다. 또, 이러한 동작 특성 해석에 대한 결과는 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

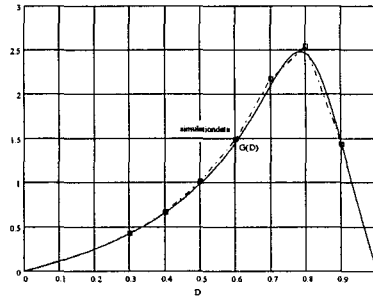


그림 5. 전압이득
Fig. 5 Voltage gain.

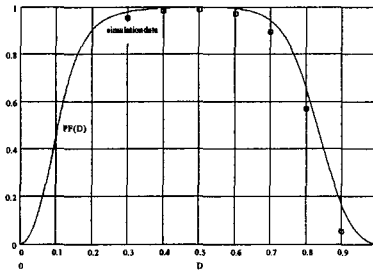


그림 6. 입력 역률
Fig. 6 Input power factor.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2003-B-469)주관으로 수행된 과제의 일부임.

참고문헌

- [1] H. Mehta, "Recent Development: EPRI's custom power concept", *Proceedings of Power Quality '93 Conference*, October 1993, pp 794-795.
- [2] Shank Srinivasan and Giri Venkataramanan, "Versatile PWM converters for three phase AC power conditioning", *PCIM Conference Record*, 1994.
- [3] Zbigniew Fedyczak, Ryszard Strzelecki and Krzysztof Skorski, "Three-phase PWM AC line conditioner based on the Cuk converter topology: study of the basic energetic properties", CD on *EPE Conf. Record*, 1999.
- [4] Soo-Bin Han, G. H. Cho, B. M. Jung and S. H. Choi, "Vector-transformed circuit theory and application to converter modeling/analysis", *Power Electronics Specialist Conference Record*, 1998, pp.538-544