

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

최남섭*

*여수대학교

Dynamic 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 복소 회로 DQ 변환 기법을 활용하여 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터에 대한 완전한 정보를 포함하는 등가모델을 제시하고, 이 모델로부터 상태방정식과 같은 컨버터의 동적 특성의 해석적인 표현을 유도하였다. 또, 이러한 동적 동작특성 해석에 대한 결과는 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, a PWM Cuk AC-AC converter is modelled by using complex circuit DQ transformation whereby the equivalent model is obtained which has the complete information of the Cuk converter. Using the model, the dynamic characteristics equations such as state equations 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 전력 품질 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 대하

여 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 상태방정식과 같은 동적 특성을 나타내는 식들의 해석적인 표현을 유도할 수 있음을 보일 것이다. 더불어, 동적 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 대치되므로, 단지 3개의 IGBT 모듈을 사용하여 구성되며 기존의 AC 초퍼와 달리 별도의 양방향 스위치가 요구되지 않는 장점을 갖는다^[3].

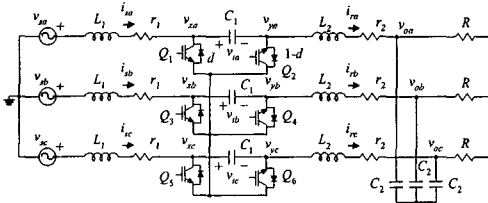


그림 1. PWM Cuk AC-AC 컨버터
Fig. 1 PWM Cuk AC-AC converter.

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,

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

이고, v_s 는 AC 전원축의 선간 실효전압을 나타내며,

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

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

$$v_{s,abc} - v_{x,abc} = L_1 \frac{d}{dt} i_{s,abc} + r_1 i_{s,abc} \quad (3)$$

$$v_{y,abc} - v_{o,abc} = L_2 \frac{d}{dt} i_{r,abc} + r_2 i_{r,abc} \quad (4)$$

이고, 3상 C_2 - R 세트에 대하여 다음과 같다.

$$i_{r,abc} = C_2 \frac{d}{dt} v_{o,abc} + \frac{1}{R} v_{o,abc} \quad (5)$$

한편, C_1 에 대한 식을 세우기 위하여 두 가지

스위칭 모드에 대한 회로의 상태를 고려하여 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$C_1 \frac{d}{dt} v_{t,abc} = d i_{r,abc} + (1-d) i_{s,abc} \quad (6)$$

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

$$v_{y,abc} = -d v_{t,abc} \quad (8)$$

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 d축의 양과 q축의 양만으로 표현할 수 있다^[4]. 즉,

$$x = x_d + jx_q \quad (9)$$

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, 윗첨자 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 페이저를 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,

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

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

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

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

그림 2는 식 (12)~(18)을 사용하여 재구성한 등가 회로이다.

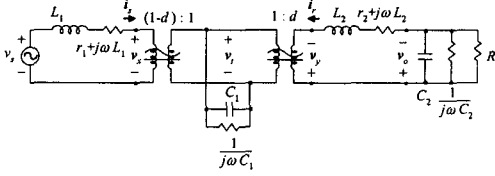


그림 2. 복소 DQ 변환된 등가 회로
Fig. 2 Complex DQ transformed equivalent circuit.

IV. 동적 특성

그림 1의 Cuk 컨버터는 평형 3상 대칭의 조건과 복소 DQ 상태 변수를 사용한 결과, 시스템의 모든 정보를 완전히 포함하는 그림 2에 나타난 바와 같이 4차의 시스템으로 모델링 할 수 있다.

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,

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

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

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

식 (20)의 상태방정식에서 행렬 \mathbf{A} 가 시간에 따라 변하는 제어변수 d 를 포함하므로 시변비선형 방정식이 된다.

4.1 선형화된 소신호 모델

PWM Cuk AC-AC 컨버터의 다른 동작점으로의 상태 천이 특성은 AC 해석, 즉 주어진 동작점에 대한 소신호 해석으로 살펴 볼 수 있다.

먼저, 상태변수 전압, 전류와 제어변수 d 및 의 란에 해당하는 입력측 선간전압의 실효값 v_s 를 동작점과 섭동(perturbation)의 양으로 나타내면 다음과 같다. 즉,

$$i_s = I_s + \hat{i}_s ; \quad i_r = I_r + \hat{i}_r ;$$

$$v_t = V_t + \hat{v}_t ; \quad v_o = V_o + \hat{v}_o ;$$

$$d = D + \hat{d} ; \quad v_s = V_s + \hat{v}_s .$$

여기서, 동작점에 인가되는 섭동은 ' ^ ' 의 기호로 구분하였다

식 (19)에서 섭동을 가하여 얻어진 PWM Cuk AC-AC 컨버터의 소신호 모델을 행렬식의 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B} \hat{\mathbf{u}} \quad (23)$$

여기서,

$$\hat{\mathbf{x}} = [\hat{i}_s \quad \hat{v}_t \quad \hat{i}_r \quad \hat{v}_o]^T \quad (24)$$

$$\hat{\mathbf{u}} = [\hat{v}_s \quad \hat{d}]^T \quad (25)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{r_1}{L_1} - j\omega & -\frac{1-D}{L_1} & 0 & 0 \\ \frac{1-D}{C_1} & -j\omega & \frac{D}{C_1} & 0 \\ 0 & -\frac{D}{L_2} & -\frac{r_2}{L_2} - j\omega & \frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{RC_2} - j\omega \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & \frac{V_t}{L_1} \\ 0 & \frac{I_r - I_s}{C_1} \\ 0 & -\frac{V_t}{L_2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

해석의 편의를 위하여, 각 인덕터와 커패시터의 리액턴스를 다음과 같이 나타낸다.

$$X_{L1} = j\omega L_1 ; \quad X_{L2} = j\omega L_2 ; \\ X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} ; \quad X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} . \quad (28)$$

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

$$\{r_1, r_2\} \ll \{X_{L1}, X_{L2}\} \ll R \ll \{X_{C1}, X_{C2}\}. \quad (29)$$

4.2 특성방정식

식 (23)의 선형화된 소신호 상태방정식으로부터 제어대상인 PWM Cuk AC-AC 컨버터의 특성방

정식 $C_h(s) = |sJ - \bar{A}| = 0$ 을 구할 수 있다. 여기서, J 는 4×4 단위 행렬이다. 즉,

$$C_h(s) \approx a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \quad (30)$$

여기서,

$$s_1 = (s + ja) / \omega \quad (31)$$

$$a_4 = (X_{L1} X_{L2}) / (X_{C1} X_{C2}) \quad (32)$$

$$a_3 = (X_{L1} X_{L2}) / (R X_{C1}) \quad (33)$$

$$a_2 = \frac{X_{L2}}{X_{C2}} (1-D)^2 + \frac{X_{L1}}{X_{C2}} D^2 + \frac{X_{L1}}{X_{C1}} \quad (34)$$

$$a_1 = \frac{X_{L2}}{R} (1-D)^2 + \frac{X_{L1}}{R} D^2 \quad (35)$$

$$a_0 = (1-D)^2 \quad (36)$$

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 3은 입력전압을, 그림 4는 d 를 변화시킬 때, 시뮬레이션 결과 얻은 출력전압 파형과 모델링으로 구한 출력전압 파형을 나타내는데, 거의 일치함을 볼 수 있다. 그림 4에서 불일치는 이론적인 출력전압을 유도할 때 과감한 근사에 의해 커패시터에 의한 효과를 고려하지 않았기 때문인 것으로 추정된다.

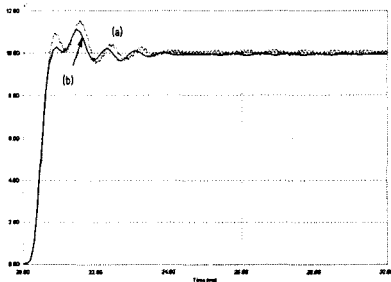


그림 3. 입력전압의 변화에 대한 출력전압의 변화; (a) PSIM 시뮬레이션, (b) 모델링

Fig. 3 Output voltage variation with respect to input voltage variation; (a) PSIM simulation, (b) modeling.

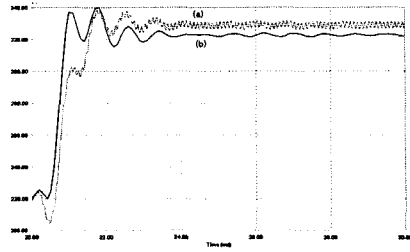


그림 4. d 의 변화에 대한 출력전압의 변화; (a) PSIM 시뮬레이션, (b) 모델링

Fig. 4 Output voltage variation with respect to d variation; (a) PSIM simulation, (b) modeling.

VI. 결론

본 논문에서는 복소 회로 DQ 변환 기법을 활용하여 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터에 대한 완전한 정보를 포함하는 등가모델을 제시하고, 이 모델로부터 컨버터의 상태방정식과 같은 동적 특성의 해석적인 표현을 유도하였다. 또, 이러한 동작특성 해석에 대한 결과는 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

감사의 글

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

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