

3상 PWM SEPIC AC-AC 컨버터의 특성해석

최 남 섭

여수대학교 전자통신전기공학부

Characteristics Analysis of PWM SEPIC AC-AC Converter

Nam-Sup Choi

Yosu National University

Abstract - In this paper, a PWM SEPIC AC-AC converter for VVCF applications such as AC line conditioner, phase shifter is presented. The PWM SEPIC AC-AC converter is modelled by using complex circuit DQ transformation whereby the characteristics equations such as voltage gain and input power factor is analytically obtained. Finally, the PSIM simulation shows 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 수용가의 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 SEPIC 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^[2].

그러나, PWM SEPIC AC-AC 컨버터는 입력 전류가 연속이므로 Buck-Boost 형에서 필요한 필터 없이도 전류의 리플을 일정 범위로 제한할 수 있으므로, 필터까지 고려했을 때는 오히려 Buck-Boost 시스템보다 경제적인 컨버터 구성이 가능하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 복소 회로 DQ 변환 기법을 활용하여 3상 PWM SEPIC 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 결과를 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증할 것이다.

2. 시스템 모델링

2.1 시스템 구성

그림 1은 본 논문에서 모델링 및 해석하려는 PWM SEPIC AC-AC 컨버터의 회로를 나타낸다. 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 스위칭

하는 Q_2, Q_4, Q_6 과는 상보적인 스위칭 동작을 한다. 그러므로, d 는 그림 1의 컨버터의 유일한 제어변수이다.

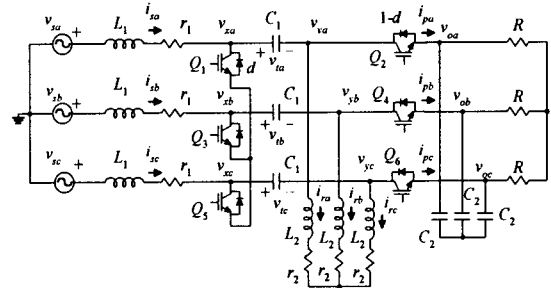


그림 1. 3상 PWM SEPIC AC-AC 컨버터

2.2 시간영역에서의 회로방정식

그림 1에서 3상 입력전원은,

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

(1)

이고, v_s 는 AC 전원측의 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 3상의 L_1 - r_1 세트에 대하여 다음과 같은 관계식을 얻는다.

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

3상의 L_2 - r_2 세트에 대하여

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

이고, 3상의 C_2 - R 세트에 대하여

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

와 같이 나타낼 수 있다.

한편, 3상 C_1 세트의 전압에 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 3(a)는 dT_s 동안 회로의 상태이며, (b)는 $(1-d)T_s$ 동안 회로의 상태이다. 그림 2로부터 다음의 식을 얻는다.

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

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

$$v_{y, abc} = -d v_{1, abc} + (1-d) v_{o, abc} \quad (8)$$

$$i_{p, abc} = (1-d)(i_{s, abc} + i_{r, abc}) \quad (9)$$

또한, 스위칭 주기가 매우 작은 경우 식 (6)-(9)는 순시적인 전압, 전류의 파형을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

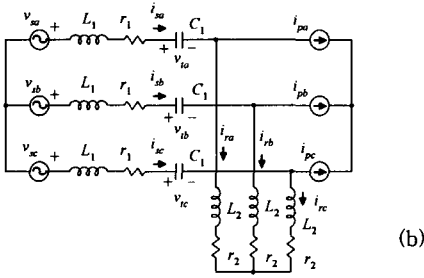
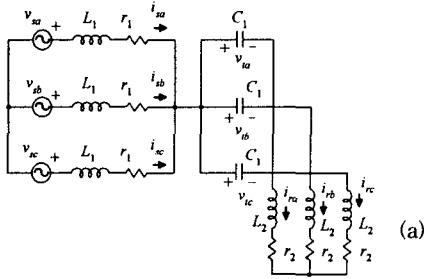


그림 2. 스위칭에 따른 회로의 상태

2.3 복소 회로 DQ 변환

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,

$$\mathbf{x} = x_d + jx_q \quad (10)$$

여기서,

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

$$x_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \text{COS}^T(\omega t) \cdot \mathbf{x}_{abc} \quad (12)$$

이며, 뒀첨자 T는 행렬의 transpose이다.

먼저, 식 (1)의 3상 전원을 복소 DQ 변환하면,

$$\mathbf{v}_s = v_{sd} + jv_{sq} = \mathbf{v}_s \quad (13)$$

이다. 식 (3)의 3상의 L_1 - r_1 세트에 대하여

$$\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_x = L_1 \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s + j\omega L_1 \mathbf{i}_s + \mathbf{r}_1 \mathbf{i}_s \quad (14)$$

마찬가지로, 식 (4)의 3상의 L_2 - r_2 세트에 대하여

$$\mathbf{v}_y = L_2 \frac{d}{dt} \mathbf{i}_r + j\omega L_2 \mathbf{i}_r + \mathbf{r}_2 \mathbf{i}_r \quad (15)$$

를 얻는다. 여기서, 식 (14)와 (15)의 $j\omega L_1$ ($j\omega L_2$)은 페이지를 나타내는 것이 아니라, 시변 복소 전류 \mathbf{i}_s 의 dq 성분과 시변 복소 전압의 dq 성분사이의 관계를 나타내는 요소이다.

식 (5)의 3상의 C_2 - R 세트에 대하여

$$\mathbf{i}_p = C_2 \frac{d}{dt} \mathbf{v}_o + j\omega C_2 \mathbf{v}_o + \frac{1}{R} \mathbf{v}_o \quad (16)$$

이 되고, 끝으로, 식 (6)~(9)를 복소 DQ 변환하면,

$$C_1 \frac{d}{dt} \mathbf{v}_t + j\omega C_1 \mathbf{v}_t = d \mathbf{i}_r + (1-d) \mathbf{i}_s \quad (17)$$

$$\mathbf{v}_x = (1-d) \mathbf{v}_t + (1-d) \mathbf{v}_o \quad (18)$$

$$\mathbf{v}_y = -d \mathbf{v}_t + (1-d) \mathbf{v}_o \quad (19)$$

$$\mathbf{i}_p = (1-d)(\mathbf{i}_s + \mathbf{i}_r) \quad (20)$$

를 얻는다.

그림 3은 식 (13)~(20)을 사용하여 재구성한 등가회로이다.

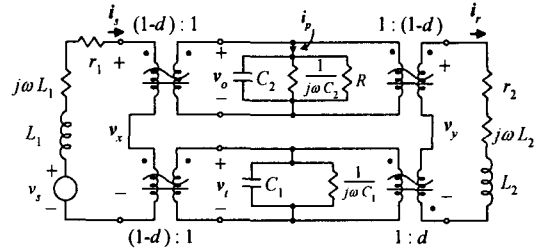


그림 3. PWM SEPIC AC-AC 컨버터의 복소 DQ 등가회로

그림 3의 등가회로는 시스템의 모든 특성 및 제어정보를 포함하는 완전한 등가회로이다.

3. 시스템 해석

3.1 상태방정식

그림 1은 본 논식 (13)~(20)으로부터 다음과 같이 상태방정식을 정리할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{v}_s \quad (21)$$

여기서,

$$\mathbf{x} = [i_s \ v_t \ i_r \ v_o]^T \quad (22)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{r_1}{L_1} - j\omega & -\frac{1-d}{L_1} & 0 & -\frac{1-d}{L_1} \\ \frac{1-d}{C_1} & -j\omega & \frac{d}{C_1} & 0 \\ 0 & -\frac{d}{L_2} & -\frac{r_2}{L_2} - j\omega & \frac{1-d}{L_2} \\ \frac{1-d}{C_2} & 0 & -\frac{1-d}{C_2} & -\frac{1}{RC_2} - j\omega \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{B} = \left[\frac{1}{L_1} \ 0 \ 0 \ 0 \right]^T \quad (24)$$

이다.

그림 1의 Cuk 컨버터는 12개의 에너지 저장소자를 갖고 있으므로 시스템의 차수는 최대 12차가 나올 수 있다. 그러나, 평형 3상 대칭의 조건과 복소 DQ 상태변수를 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 전압이득

시스템의 모든 정상상태 특성은 그림 3의 복소 DQ 등가회로에서, 인덕터는 단락하고 커패시터는 개방하여 얻는, DC 등가회로에서 구할 수 있다. 정상상태에서 모든 전압, 전류의 변수는 직류값을 가지므로 대문자를 사용하여 표기하며, 현의 단순화를 위하여 다음과 같이 정의한다.

$$X_{L1} = \omega L_1; \quad X_{L2} = \omega L_2; \quad D = 1 - D$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1}; \quad X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} \quad (25)$$

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

$$\{r_1, r_2\} \ll \{X_{L1}, X_{L2}\} \ll R \ll \{X_{C1}, X_{C2}\} \quad (26)$$

그러므로 DC 상태에 대하여 식 (26)의 관계를 고려하여 근사적으로 복소 출력전압 \mathbf{V}_o 를 나타내면,

$$\mathbf{V}_o = \frac{DD' \mathbf{V}_s}{D^2 + j \frac{X_L}{R}} \quad (27)$$

여기서,

$$X_L = X_{L1}D^2 + X_{L2}D^2 \quad (28)$$

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

$$G = \frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{D} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{X_{L1}}{R} \left(\frac{D}{D} \right)^2 + \frac{X_{L2}}{R} \right]^2}} \quad (29)$$

식 (29)로부터 다음을 정리할 수 있다.

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

3.3 전력과 역률

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

$$S = V_s I_s^* = P + jQ \quad (30)$$

이고, 그림 3에서 I_s 를 구하여 대입하면,

$$P = \frac{V_s^2}{R} \cdot \frac{D^2(D^2 - X_{L2}/X_C) + X_{L1}/X_C}{D^4 + (X_{L1}/R)^2} \quad (31)$$

$$Q = -\frac{V_s^2}{R} \cdot \frac{D^2R/X_C - (D^2 - X_{L2}/X_C)X_{L1}/R}{D^4 + (X_{L1}/R)^2} \quad (32)$$

여기서,

$$\frac{1}{X_C} = \frac{D^2}{X_{C2}} + \frac{D^2}{X_{C1}} \quad (33)$$

그러므로, 역률 $PF = P/\sqrt{P^2 + Q^2}$ 이므로,

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{D^2R/X_C - (D^2 - X_{L2}/X_C)X_{L1}/R}{D^2(D^2 - X_{L2}/X_C) + X_{L1}/X_C} \right]^2}} \quad (34)$$

와 같다.

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 4는 시뮬레이션 결과 얻은 전압이득과 식 (29)에 이론적으로 구한 전압이득을, 그림 5는 시뮬레이션으로 얻은 역률과 식 (30)으로 구한 역률을 나타내는데, 거의 일치함을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 복소 회로 DQ 변환 기법을 활용하여 3상 PWM SEPIC AC-AC 컨버터에 대한 완전한 정보를 포함하는 등가모델을 제시하고, 이 모델로부터 전압이득과 같은 컨버터의 정적 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 과제 의 일부임.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Mehta, "Recent Development: EPRI's custom power concept", *Proceedings of Power Quality '93 Conference*, pp 794-795, October 1993.
- [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*, pp.538-544, 1998.

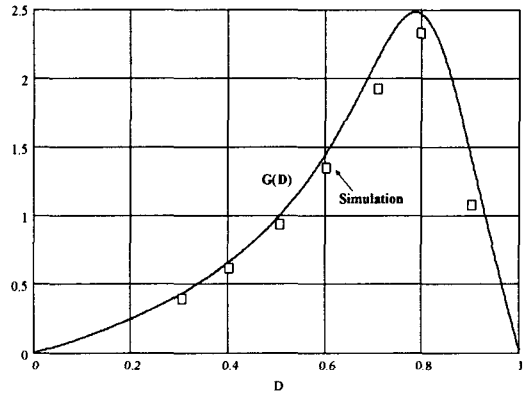


그림 4. 전압이득

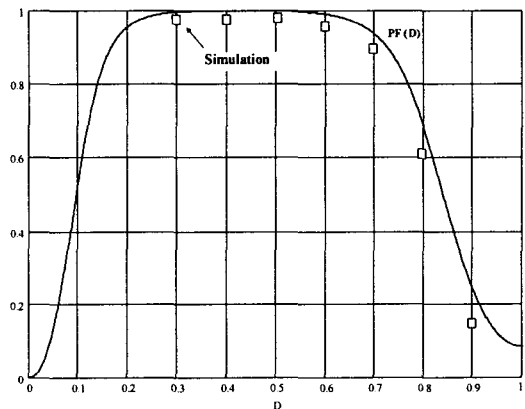


그림 5. 입력 역률