

# 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터를 이용한 정지형 무효전력보상기의 특성해석

최남섭

여수대학교 전자통신전기공학부

## Characteristic Analysis of Static Var Compensator Using Three Phase PWM Cuk AC-AC Converter

Nam-Sup Choi

Yosu National University

### ABSTRACT

In this paper, a static var compensator using PWM Cuk AC-AC converter is presented. The PWM Cuk AC-AC converter is modelled by using complex circuit DQ transformation whereby the basic condition to be used as a var compensator is derived and the static characteristic equations such as input current and reactive power is analytically obtained. Finally, the PSIM simulations show the validity of the modelling and analysis.

본 논문에서는 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터를 이용한 정지형 무효전력보상기의 회로를 제시하고, 특성을 해석할 것이다. 즉, 복소 회로 DQ 변환 기법을 활용하여 시스템에 대한 완전한 정보를 포함하는 등가모델을 구하며, 이 모델로부터 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터가 무효전력보상기로 동작하기 위한 파라미터 조건식을 구하며, 발생하는 무효전력과 같은 컨버터의 중요한 식들의 해석적인 표현을 유도한다. 더불어, 이러한 동작특성 해석에 대한 결과는 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증할 것이다.

### 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<sup>[1]</sup>.

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 왔다. 그러나, PWM Cuk 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<sup>[2-3]</sup>.

### 2. 시스템 구성

그림 1은 무효전력보상기로 사용되는 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터의 회로를 나타낸다. 그림 1은 PWM Cuk DC-DC 컨버터를 3상 PWM AC-AC 컨버터로 확장한 회로이다. 그림 1의 컨버터는 양방향 스위치를 사용하던 기존의 AC 초퍼와 달리 단방향 스위치만으로 구성되며, 더욱이 단지 3개의 IGBT 모듈만으로 구현이 가능하다는 장점을 갖는다. 즉, 그림 1의 회로에서, 즉  $Q_1, Q_3, Q_5$ 는 한꺼번에 온, 오프 스위칭하고, 마찬가지로 온, 오프 스위칭하는  $Q_2, Q_4, Q_6$ 과는 상보적인 스위칭 동작을 한다. 그러므로,  $d$ 가 스위치  $Q_1, Q_3, Q_5$ 의 duty ratio라면,  $d$ 는 회로의 유일한 제어변수가 된다<sup>[3]</sup>.

그림 2는 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터를 사용하는 무효전력보상기 회로의 다른 구성을 보인다. 그림 2의 회로는 그림 1의 회로에서 상보적 스위칭을 하는 두 스위치 그룹의 중성점 연결을 제거함으로써 얻어지는데, 주목할 점은, 그림 1의 회로는 DC 커패시터가 사용되는 반면, 그림 2에는 AC 커패시터가 요구되는 차이점이 있다는 것이다. 커패시터의 전압 스윙은 스위치의 전압 스트레스와 관련이 있는데, 그림 2의 회로에 사용된 IGBT는 그

림 1에 사용된 IGBT 보다 낮은 전압 스트레스를 갖는 장점이 있다.

한편, 그림 3은 그림 2의 3개의 단방향 스위치를 각각 3상 다이오드 브리지와 단일 스위치의 조합으로 구현이 가능함을 보인다. 그림 3은 단지 2개의 능동스위치만을 포함하므로 회로구성이 간단하며, 그림 1이나 그림 2의 회로구성에서 나타날 수 있는 동시에 턴 온 또는 턴 오프되는 스위치의 정확한 동기화에 대한 부담을 덜 수 있어 강인하며 쉽게 대용량화가 가능하다는 장점을 갖는다.

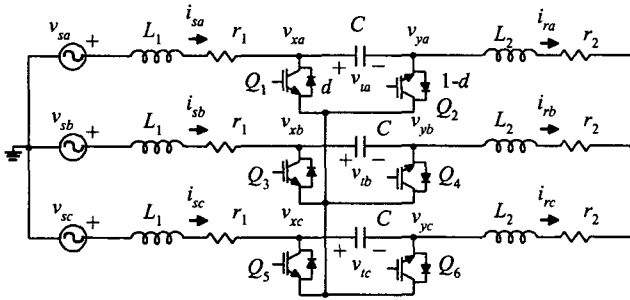


그림 1 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터에 기초한 무효전력보상기: 회로구성 1.

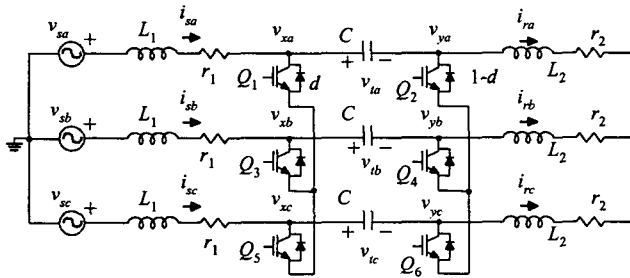


그림 2 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터에 기초한 무효전력보상기: 회로구성 2.

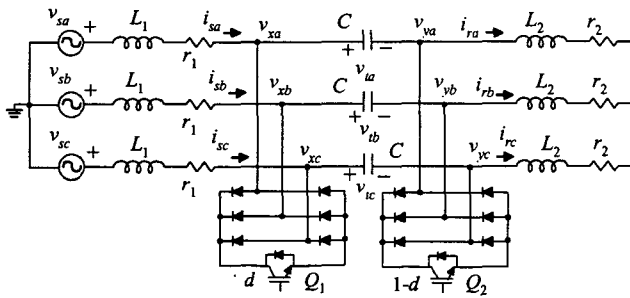


그림 3 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터에 기초한 무효전력보상기: 회로구성 3.

### 3. 시스템 모델링 및 해석

#### 3.1 시간영역에서의 회로방정식

그림 3에서 3상 입력전원은,

$$\mathbf{v}_{s,abc} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot v_s \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)

이고,  $v_s$ 는 AC 전원측의 선간 실효전압을 나타낸다.

또한 3상의  $L_1$ - $r_1$  세트에 대하여 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\mathbf{v}_{s,abc} - \mathbf{v}_{x,abc} = L_1 \frac{d}{dt} \mathbf{i}_{s,abc} + r_1 \mathbf{i}_{s,abc} \quad (2)$$

3상의  $L_2$ - $r_2$  세트에 대하여

$$\mathbf{v}_{y,abc} = L_2 \frac{d}{dt} \mathbf{i}_{r,abc} + r_2 \mathbf{i}_{r,abc} \quad (3)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

한편, 3상 C 세트의 전압에 대한 식을 세우기 위하여 두 가지 스위칭 모드에 대한 회로의 상태를 고려한다. 스위칭 주기를  $T_s$ 라 할 때, 커패시터 C 세트에 흐르는 전류는,  $dT_s$  동안은  $L_2$ - $r_2$  세트에 흐르는 전류  $\mathbf{i}_{r,abc}$ 와 같고,  $(1-d)T_s$  동안은 입력전원에 흐르는 전류  $\mathbf{i}_{s,abc}$ 와 같다. 그러므로,

$$C \frac{d}{dt} \mathbf{v}_{t,abc} = d \mathbf{i}_{r,abc} + (1-d) \mathbf{i}_{s,abc} \quad (4)$$

한편, 커패시터 양단의 전압은 스위칭의 상태를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{v}_{x,abc} = (1-d) \mathbf{v}_{t,abc} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_{y,abc} = -d \mathbf{v}_{t,abc} \quad (6)$$

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

#### 3.2 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<sup>[4]</sup>. 즉,

$$\mathbf{x} = x_d + jx_q \quad (7)$$

여기서,

$$x_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \mathbf{x}_{abc} \quad (8)$$

$$x_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \mathbf{x}_{abc} \quad (9)$$

먼저, 식 (1)의 3상 전원을 복소 DQ 변환하면,

$$\mathbf{v}_s = v_{sd} + jv_{sq} = v_s \quad (10)$$

이다. 식 (2)의 3상의  $L_1$ - $r_1$  세트에 대하여

$$\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_x = L_1 \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s + j\omega L_1 \mathbf{i}_s + r_1 \mathbf{i}_s \quad (11)$$

마찬가지로, 식 (3)의 3상의  $L_2$ - $r_2$  세트에 대하여

$$v_y = L_2 \frac{d}{dt} i_r + j\omega L_2 i_r + r_2 i_r \quad (12)$$

를 얻는다. 여기서, 식 (11)과 (12)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 요소이다.

끝으로, 식 (4)~(6)에 각각 복소 DQ 변환을 적용하면 다음과 같다.

$$C \frac{d}{dt} v_t + j\omega C v_t = d i_r + (1-d) i_s \quad (13)$$

$$v_x = (1-d) v_t \quad (14)$$

$$v_y = -d v_t \quad (15)$$

그림 3은 식 (10)~(15)을 사용하여 재구성한 등가회로이다.

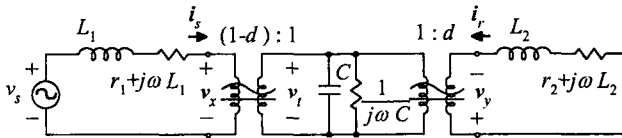


그림 4 복소 DQ 변환된 등가회로.

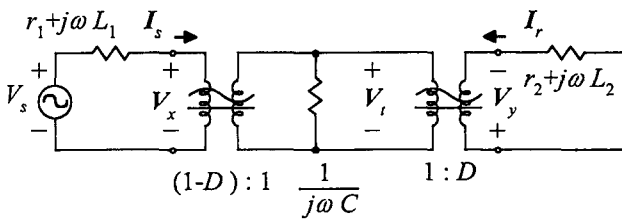


그림 5 DC 등가회로.

### 3.3 무효전력

시스템의 정상상태 특성은 그림 4의 복소 DQ 등가회로에서, 인덕터는 단락하고 커패시터는 개방하여 얻는, 그림 5와 같은 DC 등가회로에서 구할 수 있다. 또, 정상상태에서 모든 전압, 전류의 변수는 직류값을 가지므로 대문자를 사용하여 표기하며, 표기의 단순화를 위하여 다음과 같이 정의한다.

$$X_{L1} = \omega L_1; \quad X_{L2} = \omega L_2; \quad X_C = \frac{1}{\omega C}; \quad D' = 1 - D. \quad (16)$$

일반적으로, 그림 3의 Cuk 컨버터에서 소자의 값에 대하여 다음의 관계식이 성립한다고 가정한다. 즉,

$$\{r_1, r_2\} \ll \{X_{L1}, X_{L2}, X_C\}. \quad (17)$$

그러므로 DC 상태에 대하여 식 (17)의 관계를 고려하여 근사적으로 복소 입력전류  $I_s$ 를 나타내면,

$$I_s = I_{sd} + jI_{sq} = -jI_{sb} \cdot \frac{D^2 - k_2}{k_1 D^2 + k_2 D'^2 - k_1 k_2} \quad (18)$$

여기서,

$$I_{sb} = \frac{V_s}{X_C}; \quad k_1 = \frac{X_{L1}}{X_C}; \quad k_2 = \frac{X_{L2}}{X_C}. \quad (19)$$

식 (18)로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

1) 만일  $D^2 - k_2 > 0$  이면, 컨버터 입력전류의 위상은  $-90^\circ$ 가 되어 지상전류가 흐르고, PWM Cuk 컨버터는 등가적으로 인덕터로 볼 수 있다.

2) 만일  $D^2 - k_2 < 0$  이면, 컨버터 입력전류의 위상은  $90^\circ$ 가 되어 진상전류가 흐르고, PWM Cuk 컨버터는 등가적으로 커패시터로 볼 수 있다.

즉, 그림 3의 회로는 D를 제어함에 따라 리액턴스가 가변가능한 가변리액턴스로 볼 수 있으며, 유도성 또는 용량성의 무효전력보상기로 사용될 수 있음을 알 수 있다. 이때 컨버터의 무효전력 Q는 다음과 같다.

$$Q = -V_s I_{sq} = Q_{sb} \cdot \frac{D^2 - k_2}{k_1 D^2 + k_2 D'^2 - k_1 k_2} \quad (20)$$

여기서,

$$Q_{sb} = V_s I_{sb} = V_s^2 / X_C. \quad (21)$$

그림 6은  $k_1$ 이 일정할 때,  $k_2$ 의 변화에 대한 무효

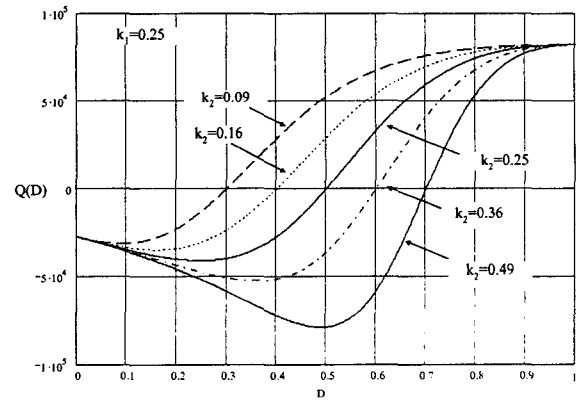


그림 6  $k_2$ 에 대한 무효전력의 변화( $k_1$ =일정).

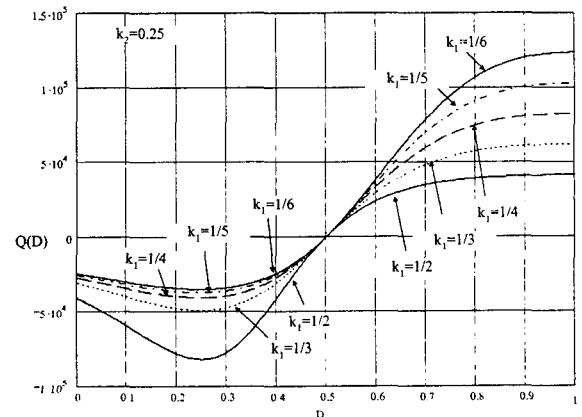


그림 7  $k_1$ 에 대한 무효전력의 변화( $k_2$ =일정).

전력  $Q$ 의 변화를 나타내는데 선형적 제어영역을 크게 하기 위하여  $k_2$ 의 값을 작게 선택해야 함을 보여준다. 그림 7은  $k_2$ 가 일정할 때,  $k_1$ 의 변화에 대한 무효전력  $Q$ 의 변화를 보이는데, 시스템이 발생하여야 하는 무효전력의 양에 따라  $k_1$ 의 값을 정해준다.

한편, 그림 5로부터 커패시터 양단의 전압  $V_t$ 를 구하면,

$$V_t = V_{td} + jV_{tq} = V_s \cdot \frac{k_2 D'}{k_1 D^2 + k_2 D'^2 - k_1 k_2} \quad (22)$$

가 되는데, 식 (22)에서 보듯이 커패시터 양단의 전압은 항상 전원전압과 위상이 일치한다.

#### 4. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터는 전원전압  $V_s = 220$  V, 전원주파수  $f = 60$  Hz,  $L_1 = L_2 = 0.9382$  mH,  $r_1 = r_2 = 0.04$   $\Omega$ ,  $C = 1200$   $\mu$ F 이다. 또한 스위칭 주파수는 5 kHz이다. 따라서,  $k_1 = k_2 = 0.16$  이고, duty ratio  $D = 0.4$ 를 중심으로 유도성 또는 용량성 전류가 발생한다.

그림 8는  $D = 0.35$  일 때, 그림 9는  $D = 0.45$  일 때 각 부의 파형을 각각 나타낸다. 그림 8에서 컨버터 입력전류는 입력전원에 대하여 위상이  $90^\circ$  앞선 진상전류가 흐르므로 컨버터는 커패시터처럼 동작함을 볼 수 있다. 그리고, 그림 9에서 컨버터의 입력전류는 유도성 전류가 되며, 따라서 그림 1~그림 3의 컨버터는 무효전력보상기로 동작할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 그림 8과 9에서 커패시터 양단의 전압은 항상 전원전압과 위상이 일치함을 볼 수 있다. 그러므로, 이러한 시뮬레이션에 의하여 복소 DQ 모델링에 의하여 얻은 결과가 타당함을 확인할하였다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 복소 회로 DQ 변환 기법을 활용하여 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터를 사용한 무효전력보상기에 대한 완전한 정보를 포함하는 등가 모델을 제시하고, 이 모델로부터 3상 PWM Cuk AC-AC 컨버터가 무효전력보상기로 동작하기 위한 파라미터 조건식을 구하였고, 무효전력과 같은 시스템의 중요한 식들의 해석적인 표현을 유도한다. 더불어, 이러한 동작특성 해석에 대한 결과는 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증할 검증하였다.

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

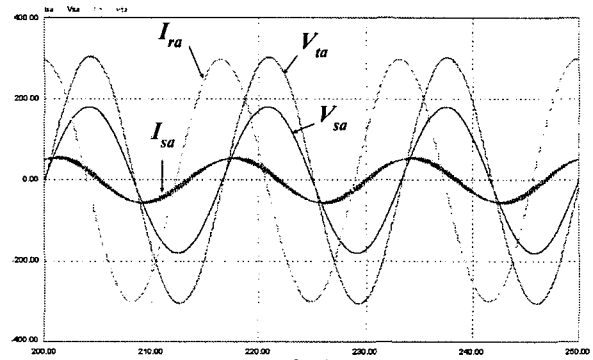


그림 8  $D=0.35$ 일 때 각 부의 파형.

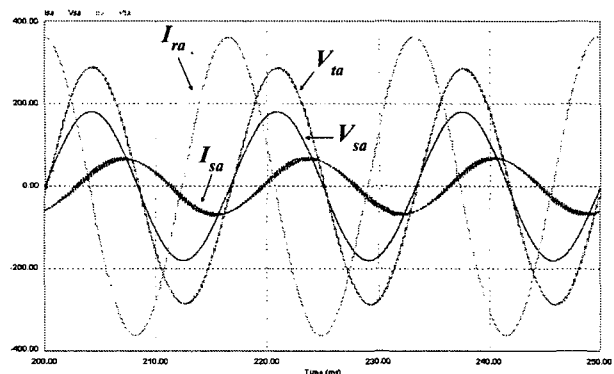


그림 9  $D=0.45$ 일 때 각 부의 파형.