

# PWM Buck AC-AC 컨버터의 모델링 및 해석

최남섭

여수대학교 전기및반도체공학과

## Modeling and Analysis of PWM Buck AC-AC Converter

N.S. Choi

Dept. of Electrical Engineering, Yosu National University

### ABSTRACT

This paper presents modeling and analysis of a PWM buck AC-AC converter. The converter is modelled by using DQ transformation whereby both the static and dynamic characteristics are analyzed completely. The feedforward-feedback control technique is also proposed to obtain instantaneous duty level change whereby very fast dynamic response is achieved. The simulation results show the validity of the modeling and analysis.

### 1. 서론

최근 산업 현장에 양질의 전력을 공급하기 위한 전력품질 개선에 대한 논의가 활발해지면서, DVR (Dynamic Voltage Restorer), 위상천이기(Phase Shifter), 전자식 변압기(Electronic Transformer)와 같이 주파수가 고정된 계통이나 수용가측에 설치되어 동작하는 전력변환기기에 대한 관심이 증대되고 있다<sup>[1]</sup>. 이와 같이 주파수가 정해진 AC-AC 전력 변환 응용에, 기존의 SCR을 사용한 AC 초퍼보다 성능이 우수한 PWM AC-AC 컨버터에 대한 연구가 중요하며, EPRI에서 제안된 Custom Power의 개념을 구현하는데 훨씬 효과적임이 알려져 있다<sup>[2]</sup>.

특히, 최근 상용 IGBT 모듈이 활용가능한 PWM AC-AC 컨버터 회로구성이 제안되는 등, 실용적인 연구들이 뒤따르면서 기타 타 분야에 비하여 비교적 연구가 미진하였던 PWM AC-AC 컨버터에 대한 관심이 증대되고 있다.<sup>[3]</sup>

본 논문에서는 가장 활발히 응용이 되고 있는 PWM Buck AC-AC 컨버터에 대하여 다루며, 회로 구성과 정적 및 동적 동작 특성을 밝힌다. 즉, DQ 변환기법을 적용하여 전압이득, 입력측 역률과 같은 정상상태 특성을 해석하고, 제어의 목적을 위

한 상태방정식, 전달함수와 같은 동적 특성을 구한다. 또한, 이러한 정적 및 동적 모델링과 해석의 결과로부터 교류 입력전압의 변동에도 불구하고 안정되게 출력전압을 일정하게 유지하는 새로운 제어기법을 제안한다. 이러한 동작특성의 해석 및 제어기법은 PSIM을 통하여 시뮬레이션 함으로써 그 타당성을 보일 것이다.

### 2. 시스템 모델링 및 해석

#### 2.1 시스템 구성

그림 1은 본 논문에서 모델링 및 해석하려는 PWM Buck 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<sup>[3]</sup>.

그림 1에서 저항  $r$ 은 IGBT와 인덕터  $L$ 의 손실을 나타내고, 저항  $R$ 은 부하저항이다. 부하저항  $R$ 에는 커패시터  $C$ 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, 마찬가지로 동시에 온, 오프 스위칭하는  $Q_2, Q_4, Q_6$ 과는

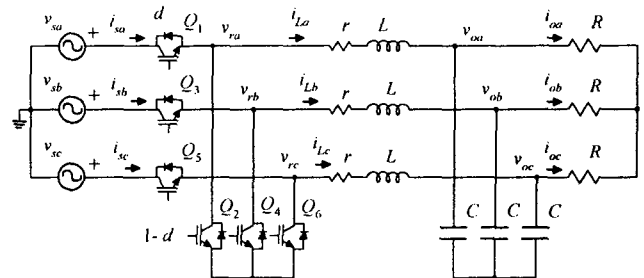


그림 1. 3상 PWM Buck AC-AC 컨버터.

상보적인 스위칭 동작을 한다. 그러므로,  $d$ 는 그림 1의 컨버터의 유일한 제어변수이다.

## 2.2 DQ 변환

그림 1의 3상 전원전압은 다음과 같다.

$$v_{sa} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot v_s \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$v_{sb} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot v_s \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \quad (2)$$

$$v_{sc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot v_s \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \quad (3)$$

여기서  $v_s$ 는 선간전압의 실효치를,  $\omega$ 는 전원의 각 주파수를 나타낸다. 또, 그림 1의 각 회로소자에 대하여 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

$$v_{ra} - v_{oa} = r i_{La} + L \frac{d}{dt} i_{La} \quad (4)$$

$$v_{rb} - v_{ob} = r i_{Lb} + L \frac{d}{dt} i_{Lb} \quad (5)$$

$$v_{rc} - v_{oc} = r i_{Lc} + L \frac{d}{dt} i_{Lc} \quad (6)$$

$$i_{La} = C \frac{d}{dt} v_{oa} + \frac{v_{oa}}{R} \quad (7)$$

$$i_{Lb} = C \frac{d}{dt} v_{ob} + \frac{v_{ob}}{R} \quad (8)$$

$$i_{Lc} = C \frac{d}{dt} v_{oc} + \frac{v_{oc}}{R} \quad (9)$$

또, 스위치의 동작에 의하여 다음의 전압-전류 관계식을 얻는다.

$$v_{ra} = d \cdot v_{sa} \quad (10)$$

$$v_{rb} = d \cdot v_{sb} \quad (11)$$

$$v_{rc} = d \cdot v_{sc} \quad (12)$$

$$i_{sa} = d \cdot i_{La} \quad (13)$$

$$i_{sb} = d \cdot i_{Lb} \quad (14)$$

$$i_{sc} = d \cdot i_{Lc} \quad (15)$$

한편,  $abc$ 축상의 3상 변수  $x_{abc}$ 를  $qdo$ 축상의 변수  $x_{qdo}$ 로 변환시키기 위해 전원의 위상에 동기되어 회전하는 다음과 같은 변환행렬  $K$ 를 정의한다. 즉,

$$x_{qdo} = K x_{abc}, \quad K^{-1} = K^T \quad (16)$$

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2}{3} \pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) & \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (1)~(15)에 식 (16)와 (17)을 적용하여 DQ 변환하면 다음의 식을 얻는다.

$$v_{sq} = 0 \quad (18)$$

$$v_{sd} = v_s \quad (19)$$

$$v_{rq} - v_{oq} = r i_{Lq} + L \frac{d}{dt} i_{Lq} + \omega L i_{Ld} \quad (20)$$

$$v_{rd} - v_{od} = r i_{Ld} + L \frac{d}{dt} i_{Ld} - \omega L i_{Lq} \quad (21)$$

$$i_{Lq} = C \frac{d}{dt} v_{oq} + \omega C v_{od} + \frac{v_{oq}}{R} \quad (22)$$

$$i_{Ld} = C \frac{d}{dt} v_{od} - \omega C v_{oq} + \frac{v_{od}}{R} \quad (23)$$

$$v_{rq} = d \cdot v_{sa} \quad (24)$$

$$v_{rd} = d \cdot v_{sd} \quad (25)$$

$$i_{sq} = d \cdot i_{La} \quad (26)$$

$$i_{sd} = d \cdot i_{Ld} \quad (27)$$

## 2.3 정상상태 특성

해석과 설계의 편의를 위하여 무차원의 단위를 갖는 다음의 파라미터들을 정의한다.

$$Q_L \equiv \omega L / r \quad (28)$$

$$Q_C \equiv \omega C R \quad (29)$$

$$\eta \equiv r / R \quad (30)$$

또, 정상상태에서 모든 전압, 전류의 변수는 직류값을 가지므로 대문자를 사용하여 표기하도록 한다. 식 (18)~(27)로부터,

$$I_{Lq} = -\eta [\eta Q_L (1 + Q_C^2) - Q_C] / \lambda \cdot D \cdot V_s / r \quad (31)$$

$$I_{Ld} = \eta [\eta (1 + Q_C^2) + 1] / \lambda \cdot D \cdot V_s / r \quad (32)$$

$$V_{oq} = -\eta (Q_L + Q_C) / \lambda \cdot D \cdot V_s \quad (33)$$

$$V_{od} = [\eta (1 - Q_L Q_C) + 1] / \lambda \cdot D \cdot V_s \quad (34)$$

여기서,

$$\lambda = 1 + 2\eta(1 - Q_L Q_C) + \eta^2(1 + Q_L^2)(1 + Q_C^2) \quad (35)$$

또, 전압이득은 다음과 같이 정리된다.

$$G \equiv \frac{V_o}{V_s} = \frac{\sqrt{V_{oq}^2 + V_{od}^2}}{\sqrt{V_{sq}^2 + V_{sd}^2}} = D \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (36)$$

한편, 전원측 3상 전압원에서 PWM Buck AC-AC 컨버터로 공급되는 유효전력  $P_s$ 와 무효전력  $Q_s$ 는 다음과 같다.

$$P_s = V_{sq} I_{sq} + V_{sd} I_{sd} \quad (37)$$

$$Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \quad (38)$$

또, 식 (18)에서 보듯이  $V_{sq} = 0$  이므로

$$P_s = V_{sd} I_{sd} \quad (39)$$

$$Q_s = -V_{sd} I_{sq} \quad (40)$$

따라서 PWM Buck AC-AC 컨버터의 입력측의 역률  $PF$ 는

$$PF = \frac{P_s^2}{\sqrt{P_s^2 + Q_s^2}} = \frac{I_{sd}^2}{\sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2}} \quad (41)$$

이고, 식 (31)과 (32)를 사용하여 정리하면,

$$PF = \frac{\eta(1 + Q_C^2) + 1}{\sqrt{(1 + Q_C^2)\lambda}} \quad (42)$$

식 (42)에서 컨버터 입력측의 역률은 제어변수인  $D$ 와 무관하며, 오직 회로상수에 의하여 정해짐을 알 수 있다.

## 2.4 동적 모델링

PWM Buck 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 외란에 해당하는 입력측 선간전압의 실효값  $v_s$ 를 동작점과 섭동(perturbation)의 양으로 나타내면 다음과 같다. 즉,

$$\begin{aligned} i_{Lq} &= I_{Lq} + \hat{i}_{Lq}, & i_{Ld} &= I_{Ld} + \hat{i}_{Ld} \\ v_{oq} &= V_{oq} + \hat{v}_{oq}, & v_{od} &= V_{od} + \hat{v}_{od} \\ d &= D + \hat{d}, & v_s &= V_s + \hat{v}_s \end{aligned}$$

여기서, 동작점에 인가되는 섭동은 ‘ $\hat{\quad}$ ’의 기호로 구분하였다

식 (18)~(27)에 섭동을 가하여 얻어진 PWM Buck AC-AC 컨버터의 소신호 모델을 행렬식의 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (43)$$

여기서,

$$\mathbf{x} = [\hat{i}_{Lq} \hat{i}_{Ld} \hat{v}_{oq} \hat{v}_{od}]^T \quad (44)$$

$$\mathbf{u} = [\hat{d} \hat{v}_s]^T, \quad \mathbf{y} = \hat{v}_o \quad (45)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -\omega & \frac{1}{L} & 0 \\ \omega & -\frac{r}{L} & 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{RC} & -\omega \\ 0 & \frac{1}{C} & \omega & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ V_s & D \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\mathbf{C} = \left[ 0 \ 0 \ \frac{V_{oq}}{\sqrt{V_{oq}^2 + V_{od}^2}} \ \frac{V_{od}}{\sqrt{V_{oq}^2 + V_{od}^2}} \right] \quad (48)$$

## 2.5 특성방정식과 전달함수

식 (46)으로부터 컨버터의 특성방정식을 구하면 다음과 같다.

$$C_h(s) = [(s + \alpha)^2 + \beta^2] \cdot [(s + \alpha)^2 + \gamma^2] \quad (49)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{\omega_R + \omega_r}{2}, \quad \beta = \frac{\omega_\delta}{2} - \omega, \quad \gamma = \frac{\omega_\delta}{2} + \omega \quad (50)$$

$$\omega_r = \frac{r}{L}, \quad \omega_R = \frac{1}{RC}, \quad \omega_o = \sqrt{LC} \quad (51)$$

$$\omega_\delta = \sqrt{4\omega_o^2 - (\omega_R - \omega_r)^2} \quad (52)$$

식 (49)의 특성방정식의 근은 항상 좌반면에 위치하므로 시스템의 open loop 특성이 항상 안정함을 알 수 있다. 또한, 식 (44)~(48)에 주어진 선형

상태방정식과 출력방정식으로부터 어렵지 않게 출력전압에 대한 전달함수를 구할 수 있다. 즉,

$$\hat{v}_o(s) = G_d(s) \hat{d}(s) + G_v(s) \hat{v}_s(s) \quad (53)$$

여기서,

$$G_d(s) = V_s \cdot \frac{\omega_o^2 N(s)}{V_o C_h(s)} \quad (54)$$

$$G_v(s) = D \cdot \frac{\omega_o^2 N(s)}{V_o C_h(s)} \quad (55)$$

$$N(s) = V_{od}(s + \alpha)^2 - 2\omega V_{oq}(s + \alpha) + \beta\gamma V_{od} \quad (56)$$

## 3. Feedforward-Feedback 제어

그림 1에 주어진 PWM Buck AC-AC 컨버터의 제어목적은 외란으로 인식되는 입력전압이나 부하의 변동에도 불구하고 출력전압이 출력전압 기준값을 추종하도록 하는 것이다.

그림 2는 이러한 제어 목적을 달성하기 위한 기존의 제어기의 구성을 나타낸다. 그림 2의 방법의 단점은 입력전압  $v_s$ 가 갑자기 변할 때, 출력전압을 feedback 받아  $d$ 를 제어하기 때문에, 일단 출력전압의 변동을 겪은 후에 제어 루프가 작동한다는 점이다. 그러므로 그림 2는 순간적인 입력전압 변동에 대하여 출력전압의 과도적 섭동이 동반된다.

본 논문에서는 그림 3과 같이 기존의 feedback 방식에 입력전압의 변동을 센싱하여 직접  $d$ 의 보정값을 계산하는 feedforward 루프를 삽입하여 동적 특성을 개선한 feedforward-feedback 제어방안을 제안한다.

즉, 식 (53)에 나타낸 출력전압에 대한 전달함수로부터 입력전압의 변동에 의한 출력전압의 변동을 상쇄하여  $\hat{v}_o = 0$ 가 되도록 하는 다음의 제어조건을 얻을 수 있다. 즉,

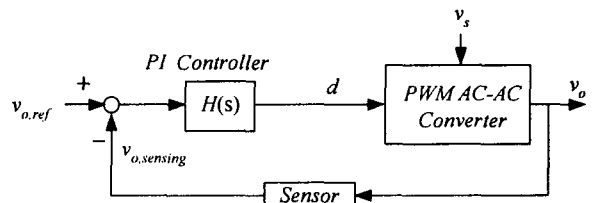


그림 2. 기존의 Feedback 제어방식.

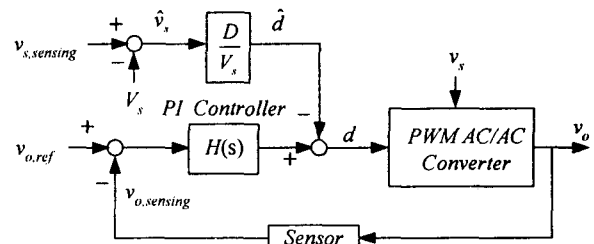


그림 3. 제안된 Feedforward-Feedback 제어방식.

$$\hat{d}(s) = -\frac{D}{V_s} \cdot \hat{v}_s(s) \quad (57)$$

그림 3에서 입력전압이 변하면 PI 제어기가 동작하기 전에 먼저 순시적으로  $d$ 가 변화되어 출력전압이 안정화된다.

#### 4. 시뮬레이션 및 검토

PWM Buck AC-AC 컨버터의 동작과 제어특성을 확인하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 시스템 파라미터는 전원전압  $V_s = 220$  V, 전원주파수  $f = 60$  Hz,  $L = 1$  mH,  $C = 45$  uF,  $r = 0.01$   $\Omega$ ,  $R = 5$   $\Omega$ 이다.

그림 4는 컨버터의 open-loop 특성을 나타낸다. 20 ms일 때,  $d$ 를 0.8에서 0.5로 감소시키면 출력전압도 176 V에서 110 V로 감소하고, 다시 70 ms일 때, 입력전압이 220 V에서 160 V로 변동되면 출력전압이 110 V에서 다시 80 V로 감소한다. 이러한 특성은 입력전압과 듀티의 변화에 대하여 출력전압이 선형적으로 변함을 보인다.

그림 5와 그림 6은 closed-loop 특성을 나타낸다. Feedback 방식에 의한 제어의 결과는 그림 5에서 보듯이 순간적인 overshoot를 나타내는 반면, 그림 6의 전압 파형에서는 이러한 출력전압의 overshoot가 억제되어 있다. 즉, feedforward-feedback 제어가 입력전압의 변동에도 불구하고 출력전압을 일정하게 유지하는데 매우 효과적임을 알 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 PWM Buck AC-AC 컨버터의 정적 특성은 물론 동적 특성을 완전히 해석해 내었다. 또한, 시스템 상태방정식으로부터 전달함수를 구하고 입력전압의 변동에도 불구하고 출력전압이 빠르게 안정화되는 feedforward-feedback 제어기를 제안하였다. 끝으로, PSIM 시뮬레이션을 통하여 동적 및 정적 모델링과 시스템 설계가 타당함을 확인하였다.

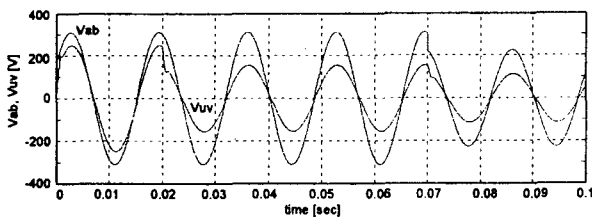


그림 4. Open-loop 특성.

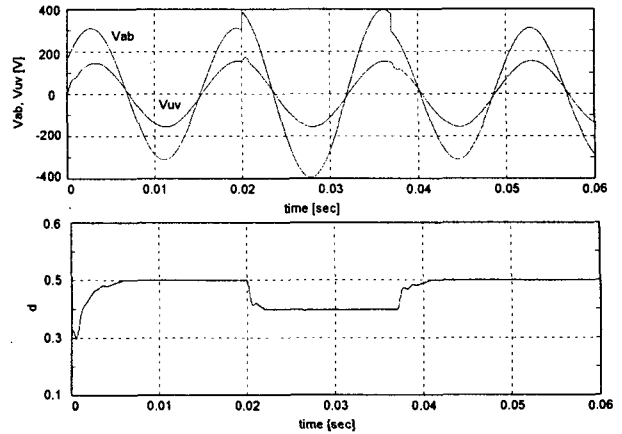


그림 5. Feedback 제어방식에 의한 출력전압의 제어.

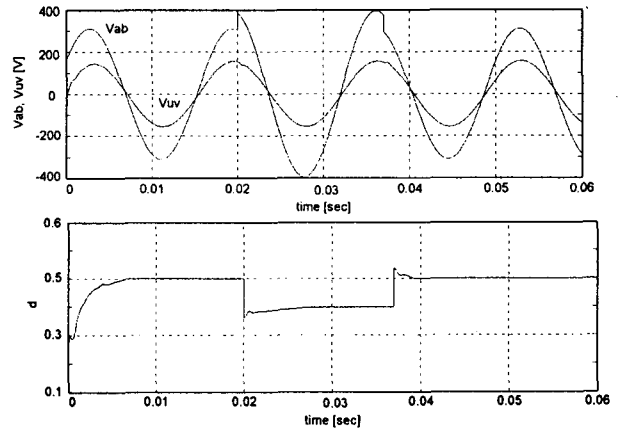


그림 6. Feedforward-Feedback 제어방식에 의한 출력전압의 제어.

#### 참고 문헌

- [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 Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, pp. 1666-1671, 1996.