

# PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터의 동적 모델링 및 제어기 설계

최남섭, 배영철  
여수대학교

## Dynamic Modeling and Controller Design of PWM Buck-Boost AC-AC Converter

Nam-sup Choi, Yong-Chul Bae  
Yosu National University  
E-mail : nschoi@yosu.ac.kr

### 요 약

본 논문에서는 Custom Power의 전력품질의 향상을 위하여 PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터를 사용, 항상 일정한 출력전압을 얻는 시스템을 보이고 제어를 위한 동적 모델링 및 제어기 설계의 일례를 보였다. 그 결과, 시스템 상태방정식을 유도하였고 전달함수를 구였으며 일정한 동작점 하에서 출력전압을 기준전압으로 regulation 제어하기 위한 제어기에 대하여 다루었다. 끝으로, 실험을 통하여 제안된 모델링과 시스템 설계가 타당함을 확인하였다.

### ABSTRACT

This paper presents an output voltage regulation system using PWM Buck-Boost AC-AC converter for power quality improvement of custom power. This paper proposes dynamic modeling of the system for control object and in addition, a controller design example. Therefore, system state equation is derived whereby the transfer function could be obtained. The paper shows a regulation controller for tracking the output voltage to the reference under specific operating point. Finally, this paper shows validity and practical applicability of the proposed modelling and system design by experimental results.

### 키워드

AC-AC Buck-Boost 컨버터, 전압안정화, Custom Power, 전력품질 개선, DQ 변환

### 1. 서 론

Custom Power 기술은 수용가측이 전원의 전압의 sag나 surge와 같은 불확실성에 대비하여 개별적으로 설치하여 운전하고 있는 무정전전원장치(UPS)와 같은 기존의 전력 조정(Power Conditioning) 설비와 견주어 효율이나 비용측면에서 효과적인 대안으로 제시되어 세계적으로 현재 활발하게 연구가 진행중이다<sup>[1-4]</sup>.

특히 최근에 제시된 PWM AC-AC 컨버터에 기초한 전력품질 개선 방안은 배전계통이나 수용가측에 설치되었을 때 비교적 짧은 순간의 전원불안정에 대처하는데 매우 효과적이라고 알려져 있다. 지금까지 주로 연구되고 활용되어진 AC-AC 컨버

터의 방식은 주로 Buck 컨버터이다. 그러나, 전압의 sag나 surge에 동시에 대처하기 위하여는 강압만 가능한 Buck형보다 승압이나 강압이 가능한 Buck-Boost형이 더 유용하다[1].

본 논문에서는 이러한 PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터의 동적 모델링 및 제어기 설계 기법을 제시하며 일정범위의 전원 전압의 변동에 대하여 전압 보상이 가능함을 보일 것이다. 특히, 컨버터를 모델링함에 있어서 회로 DQ 변환 기법을 도입하여 회로의 특성을 완전히 해석하고 제어대상인 Buck-Boost 컨버터에 대하여 전달함수나 특성방정식과 같은 특성식을 유도해 낸다. 끝으로 실험을 통하여, 제안된 동적 모델링과 제어기 설계의 타당성과 유용성을 확인한다.

## II. 회로 DQ 변환 및 상태방정식

### 2-1. 회로 DQ 변환

그림 1은 본 논문에서 모델링 및 해석하려는 PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터의 회로를 나타낸다. 그림 1에서 저항  $r$ 은 인덕터  $L$ 의 손실을 나타내고, 저항  $R$ 은 부하저항이다. 부하저항  $R$ 에는 커패시터  $C$ 의 손실이 포함되었다고 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 상보적인 스위칭 동작을 한다. 그러므로,  $d$ 는 그림 1의 컨버터의 유일한 제어변수이다.

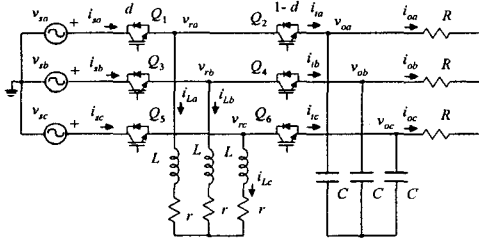


그림 1. PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터  
Fig. 1 PWM Buck-Boost AC-AC converter.

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 각주파수를 나타낸다.

또, 그림 1의 각 회로소자에 대하여 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

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

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

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

$$i_{oa} = C \frac{d}{dt} (v_{oa} - v_y) + \frac{1}{R} (v_{oa} - v_z) \quad (7)$$

$$i_{ob} = C \frac{d}{dt} (v_{ob} - v_y) + \frac{1}{R} (v_{ob} - v_z) \quad (8)$$

$$i_{oc} = C \frac{d}{dt} (v_{oc} - v_y) + \frac{1}{R} (v_{oc} - v_z) \quad (9)$$

여기서  $v_x, v_y$ 는 3상 Y-결선된 인덕터와 커패시터 중성점의 노드전압을 각각 나타낸다.

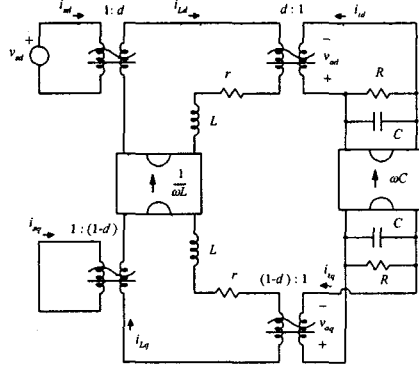


그림 2. 회로 DQ 변환된 등가회로  
Fig. 2 Circuit DQ transformed equivalent circuit.

a상에 대하여 스위치  $Q_1$ 과  $Q_2$ 는 서로 상보적으로 스위칭 하므로 single-pole-double throw 스위치로 볼 수 있다. 즉, 인덕터에 인가되는 전압  $v_{ra}$ 는 스위치의 상태에 따라,  $v_{sa}$  또는  $v_{oa}$ 가 된다. 그러므로,

$$v_{ra} = v_{sa}d + v_{oa}(1-d) \quad (10)$$

$$v_{rb} = v_{sb}d + v_{ob}(1-d) \quad (11)$$

$$v_{rc} = v_{sc}d + v_{oc}(1-d) \quad (12)$$

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

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

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

$$i_{ra} = (1-d) \cdot (-i_{La}) \quad (16)$$

$$i_{rb} = (1-d) \cdot (-i_{Lb}) \quad (17)$$

$$i_{rc} = (1-d) \cdot (-i_{Lc}) \quad (18)$$

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,

$$x_{qdo} = K x_{abc}, \quad K^{-1} = K^T \quad (19)$$

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2}{3} \pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) & \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

식 (1)~(18)을 식 (19)와 (20)을 적용하여 DQ 변환하면 다음의 식을 얻는다.

$$v_{sq}=0, \quad v_{sd}=v_s \quad (21)$$

$$\omega L i_{Ld} + L \frac{d}{dt} i_{Ld} = v_{rq} - r i_{Ld} \quad (22)$$

$$-\omega L i_{Lq} + L \frac{d}{dt} i_{Ld} = v_{rd} - r i_{Ld} \quad (23)$$

$$i_{Lq} = \omega C v_{od} + C \frac{d}{dt} v_{oq} + \frac{1}{R} v_{oq} \quad (24)$$

$$i_{Ld} = -\omega C v_{oq} + C \frac{d}{dt} v_{od} + \frac{1}{R} v_{od} \quad (25)$$

$$v_{rq} = d v_{sq} + (1-d) v_{oq} \quad (26)$$

$$v_{rd} = d v_{sd} + (1-d) v_{od} \quad (27)$$

$$i_{sq} = d i_{Lq}, \quad i_{sd} = d i_{Ld} \quad (28)$$

$$i_{Lq} = -(1-d) i_{Lq}, \quad i_{Ld} = -(1-d) i_{Ld} \quad (29)$$

그림 2는 식 (21)~(29)로부터 얻어진 회로 DQ 변환된 등가회로를 나타낸다.

### 2-2. 상태방정식

해석과 설계의 편의를 위하여 무차원의 단위를 갖는 다음의 파라미터들을 정의한다.

$$Q_L \equiv \omega L / r, \quad Q_C \equiv \omega C R$$

$$\eta \equiv r/R, \quad D_1 = 1 - D$$

또, 정상상태에서 모든 전압, 전류의 변수는 직류값을 가지므로 대문자를 사용하여 표기하도록 한다. 식 (21)~(29)로부터,

$$I_{Lq} = -\eta [ \eta Q_L (1 + Q_C^2) - Q_C D_1^2 ] \cdot V_D / r \quad (30)$$

$$I_{Ld} = \eta [ \eta (1 + Q_C^2) + D_1^2 ] \cdot V_D / r \quad (31)$$

$$V_{oq} = \eta (Q_L + Q_C) D_1 \cdot V_D \quad (32)$$

$$V_{od} = -[ \eta (1 - Q_L Q_C) + D_1^2 ] D_1 \cdot V_D \quad (33)$$

여기서,

$$V_D = (D/D_{ch}) V_s \quad (34)$$

$$D_{ch} = D_1^2 + 2\eta (1 - Q_L Q_C) D_1^2 + \eta^2 (1 + Q_L^2) (1 + Q_C^2) \quad (35)$$

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

$$i_{Lq} = I_{Lq} + \hat{i}_{Lq}, \quad i_{Ld} = I_{Ld} + \hat{i}_{Ld}$$

$$v_{oq} = V_{oq} + \hat{v}_{oq}, \quad v_{od} = V_{od} + \hat{v}_{od}$$

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

여기서, 동작점에 인가되는 섭동은 ‘^’의 기호로 구분하였다 식 (21)~(29)에 섭동을 가하여 얻어진 PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터의 소신호 모델을 행렬식의 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (36)$$

여기서,

$$\mathbf{x} = [ \hat{i}_{Lq} \hat{i}_{Ld} \hat{v}_{oq} \hat{v}_{od} ]^T \quad (37)$$

$$\mathbf{u} = [ \hat{d} \hat{v}_s ]^T, \quad \mathbf{y} = \hat{v}_o \quad (38)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -\omega & \frac{1-D}{L} & 0 \\ \omega & -\frac{r}{L} & 0 & \frac{1-D}{L} \\ -\frac{1-D}{C} & 0 & -\frac{1}{RC} & -\omega \\ 0 & -\frac{1-D}{C} & \omega & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{V_{oq}}{L} & 0 \\ \frac{V_s - V_{od}}{L} & \frac{D}{L} \\ \frac{I_{Lq}}{C} & 0 \\ \frac{I_{Ld}}{C} & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\mathbf{C} = \left[ 0 \ 0 \ \frac{V_{oq}}{\sqrt{V_{oq}^2 + V_{od}^2}} \ \frac{V_{od}}{\sqrt{V_{oq}^2 + V_{od}^2}} \right] \quad (41)$$

### III. 제어기 설계 및 실험

제어기는 동작점으로부터 식 (36)~(41)에 주어진 소신호 모델을 구하고 일반 선형제어론을 적용하여 설계한다. 여기서 시스템 파라미터는 전원전압  $V_s = 220$  V, 전원주파수  $f = 60$  Hz,  $L = 5$  mH,  $C = 75$  uF,  $r = 0.02$  Ω,  $R = 5$  Ω이다.

동작점이  $D=0.5052$ 인 경우, 동작점의 전류 전압은 정상상태에 관한 식 (30)~(33)으로부터,  $I_{Lq}=-14.0709$  A,  $I_{Ld}=88.3176$  A,  $V_{oq}=66.6283$  V,  $V_{od}=-209.6870$  V 이다.

동작점이 결정되면, 식 (36)~(41)로부터 시스템의 선형화 모델에 대한 상태방정식과 출력방정식을 구할 수 있다. 즉,

$$\mathbf{A} = 10^3 \begin{bmatrix} -0.0100 & -0.3770 & 0.4976 & 0 \\ 0.3770 & -0.0100 & 0 & 0.4976 \\ -6.2200 & 0 & -2.5000 & -0.3770 \\ 0 & -6.2200 & 0.3770 & -2.5000 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$B = 10^6 \begin{bmatrix} -0.0666 & 0 \\ 0.4297 & 0.0005 \\ 0.1759 & 0 \\ 1.1040 & 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$C = [ 0 \quad 0 \quad 0.3028 \quad -0.9530 ] \quad (44)$$

또, 식 MATLAB을 사용하여, 어렵지 않게 상태 방정식으로부터 전달함수를 계산할 수 있다. 즉,

$$\hat{v}_o(s) = G_d(s) \hat{d}(s) + G_v(s) \hat{v}_s(s) \quad (45)$$

이고,

$$G_d(s) = N_d(s) / D_c(s) \quad (46)$$

$$G_v(s) = N_v(s) / D_c(s) \quad (47)$$

여기서,

$$N_d(s) = -(1.105 \times 10^6)s^3 - (1.758 \times 10^8)s^2 + (3.386 \times 10^{12})s + 8.109 \times 10^{15} \quad (48)$$

$$D_c(s) = s^4 + 5020s^3 + (1.282 \times 10^7)s^2 + (1.638 \times 10^{10})s + 9.764 \times 10^{12} \quad (49)$$

$$N_v(s) = (2.978 \times 10^6)s^2 + (8.189 \times 10^9)s + 9.764 \times 10^{12} \quad (50)$$

그림 3은 PI 제 $\times$ 어기를 포함하는 전체 제어 블록도이다. 즉,  $\le$  외란인 입력전압의 변동에도 불구하고 출력전압이  $V_{o,ref}(=220V)$ 가 유지되도록  $d$ 를 제어한다. 근계적으로부터  $K_p=2.2 \times 10^{-4}$ ,  $\Rightarrow \uparrow K_i=0.33$ 로 정하였다.  $\times \le \le \%$

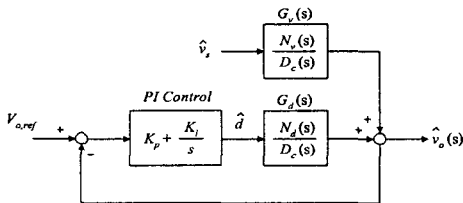


그림 3. 제어 블록도  
Fig. 3 Control block diagram.

그림 4는 시스템의 순간 입력 실효전압을 그림 4의 아래 화살표의 시간에서 220V에서 380V로 갑작스럽게 변화시켰을 때의 페루프 응답을 나타낸다. 이 경우 순간 출력전압은 일정하게 220V를 계속 유지함을 볼 수 있다. 또, 그림 5는 컨버터의 순간 입력 실효전압을 220V에서 160V로 갑작스럽게 감소시켰을 때 입력전압의 순간 전압을 나타낸다. 그림 5에서 출력전압은 마찬가지로 일정하게 유지됨으로써 제어 루프가 제대로 동작하고 있음을 알 수 있다.

그림 4와 5에서 출력전압의 위상은 입력전압에 비하여 반전된 파형이며 필터의 효과 때문에 완전히 180° 반전된 것은 아님을 볼 수 있다.

실험 결과, 제안된 컨버터 시스템은 수 msec 이내의 만족할 만한 동적 페루프 응답특성을 보임으로써 전체 시스템의 모델링 및 제어기 설계가 유효함을 확인할 수 있다.

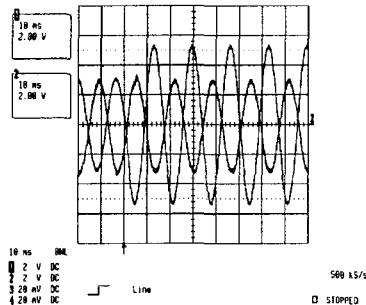


그림 4. Surge 입력전압이 인가되었을 때 출력전압의 파형(200V/div, 10msec/div)  
Fig. 4 Output voltage in the case of surge input voltage (200V/div, 10msec/div).

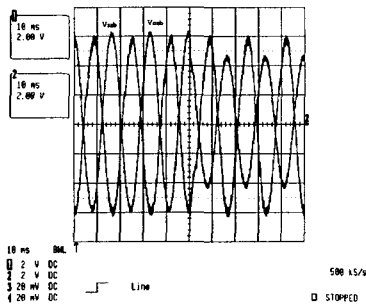


그림 5. Sag 입력전압이 인가되었을 때 출력전압의 파형(100V/div, 10msec/div)  
Fig. 5 Output voltage in the case of sag input voltage (100V/div, 10msec/div).

#### IV. 결론

본 논문에서는 Custom Power의 전력품질의 향상을 위하여 PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터를 사용, 항상 일정한 출력전압을 얻는 시스템을 보이고 제어를 위한 동적 모델링 및 제어기 설계의 일례를 보였다. 그 결과, 시스템 상태방정식을 유도하였고 전달함수를 구했으며 일정한 동작점에서 출력전압을 기준전압으로 regulation 제어하기 위한 제어기에 대하여 다루었다. 끝으로, 실험을 통하여 제안된 모델링과 시스템 설계가 타당함을 확인하였다.

### 참고 문헌

- [1] 최남섭, "PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터의 정상상태 동작특성", 한국해양정보통신학회 2002년 추계종합학술대회 논문집, Vol. 6, No. 2, pp. 430-434, 2002. 11.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.