

Custom Power의 전력품질 향상을 위한 PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터에 대한 연구

최 남섭

여수대학교 전기및반도체공학과

A Study on PWM Buck-Boost AC-AC Converter for Improvement of Power Quality of Custom Power

Nam-Sup Choi

Dept. of Electrical Engineering, Yosu National University

ABSTRACT

In this paper, a PWM Buck-Boost AC-AC converter for improvement of power quality of custom power is presented. The PWM Buck-Boost AC-AC converter is modelled by using circuit DQ transformation whereby the both static and dynamic characteristics are analyzed completely. Finally, the converter system is implemented with the design criteria and the experimental results show the validity of modelling and analysis.

1. 서론

오늘날 고도의 기술성장을 이룩한 산업사회에서는 신뢰성을 갖춘 양질의 전력을 필요로 한다. 그렇지 못할 경우 생산되는 제품의 질 저하라든지 중요한 산업시설의 정지, 그리고 정보의 손실 등을 야기시킬 수 있으며 그에 따라 막대한 경제적인 손실도 초래하게 된다^{[1],[2]}.

Custom Power 기술은 수용가측이 전원의 불확실성에 대비하여 개별적으로 설치하여 운전하고 있는 UPS와 같은 기존의 전력 조정(Power Conditioning) 설비와 견주어 효율이나 비용측면에서 효과적인 대안으로 제시되어 세계적으로 현재 활발하게 연구가 진행중이다^[2].

특히 최근에 제시된 PWM AC-AC 컨버터에 기초한 전력품질 개선 방안은 배전계통이나 수용가측에 설치되었을 때 비교적 짧은 순간의 전원불안정에 대처하는데 매우 효과적이라고 알려져 있다.^[3] 지금까지 주로 연구되고 활용되어진 AC-AC 컨버터의 방식은 주로 Buck 컨버터인데, 본 연구과제에서는 PWM Buck-Boost 컨버터를 사용하여 일정범위의 전원 전압의 변동에 대하여 동시에 보상이 가능함을 보일 것이다.

2. 전체 시스템 개요

2.1 시스템구성

그림 2.1은 전체 시스템의 블록도를 보인다. 전체 블록은 크게 시스템의 하드웨어 부분인 전력부와 전력부를 제어하기 위한 제어부로 나눌 수 있다.

전력부는 PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터로 구성되며, PWM AC-AC 컨버터의 IGBT 전력반도체 스위치를 구동하기 위한 Gate Driver, 전압을 센싱하기 위한 센서부, 컨버터를 과전압으로부터 보호하기 위한 보호회로를 포함한다.

제어부는 20 MIPS의 TMS320F240 DSP(Digital Signal Processor)를 중심으로 구성된다. TMS320F240 제어보드는 Texas Instrument사의 TMS320F240 EVM 보드를 사용하였다. TMS320F240 제어보드는 센서부에서 센싱된 전압을 A/D 변환하여 읽어들이며, 제어 알고리즘에 따라 IGBT 스위치를 동작시키거나 혹은 과전압으로부터 컨버터를 보호하기 위한 6개의 gate driver 신호를 발생한다.

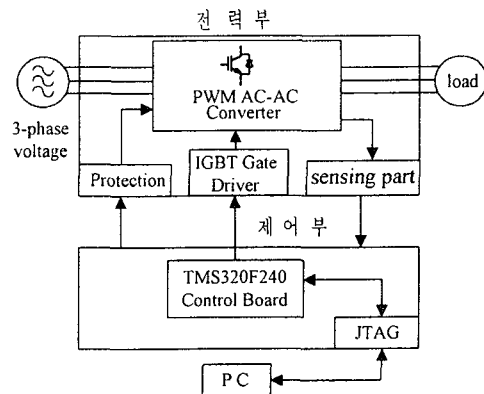


그림 1. 전체 시스템 블록도

2.2 동작원리 및 제어

그림 2는 본 연구과제의 전력부로 정한 PWM

Buck-Boost AC-AC 컨버터의 구성도이다. 그림 2에서 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 2의 컨버터의 유일한 제어변수이다.

주어진 PWM buck-boost AC-AC 컨버터의 기본적인 동작원리는, 먼저 일정한 시간동안 인덕터 L 에 build-up된 에너지를 스위칭 구간의 나머지 시간동안 커패시터에 dump하는 방식으로 에너지를 전달하는 방식이며 출력전압은 d 에 의하여 제어된다.

그림 3은 전체 시스템의 제어 블록도를 보인다. 3상 출력전압의 크기 V_o 를 센싱하여 원하는 기준 전압 V_o^* 와 비교한다. V_o 와 V_o^* 의 차, 즉 오차로 구동되는 제어기는 d 를 제어함으로써 V_o 가 V_o^* 를 추종하도록 동작한다. 여기서 입력전압 V_s 의 변동은 제어의 관점에서 외란(disturbance)에 해당되며, 본 연구과제의 제어목표는 외란에도 불구하고 V_o 를 일정한 값으로 regulation하는 것이다.

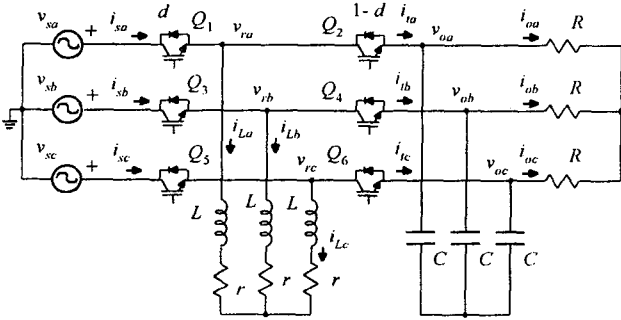


그림 2. PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터

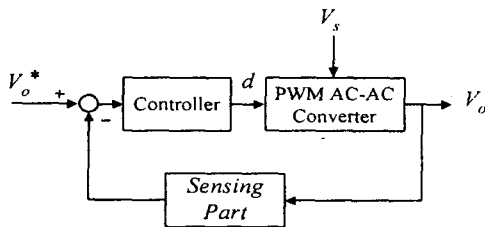


그림 3. 제어 블록도

3. 시스템 모델링 및 해석

3.1 DQ 변환

그림 2의 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, ω 는 전원의 각주파수를 나타낸다.

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

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

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

$$i_{ta} = C \frac{d}{dt} (v_{oa} - v_y) + \frac{1}{R} (v_{oa} - v_2) \quad (7)$$

$$i_{tb} = C \frac{d}{dt} (v_{ob} - v_y) + \frac{1}{R} (v_{ob} - v_2) \quad (8)$$

$$i_{tc} = C \frac{d}{dt} (v_{oc} - v_y) + \frac{1}{R} (v_{oc} - v_2) \quad (9)$$

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

a 상에 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,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

abc축상의 3상 변수 x_{abc} 를 qdo축상의 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 DQ 변환하면 다음의 식을 얻는다.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.2 정상상태 특성

해석과 설계의 편의를 위하여 무차원의 단위를 갖는 다음의 파라미터들을 정의한다.

$$\begin{aligned} Q_L &\equiv \omega L / r, & Q_C &\equiv \omega C R \\ \eta &\equiv r / R, & D_1 &= 1 - D \end{aligned}$$

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

$$I_{Lq} = -\eta [\eta Q_L (1 + Q_C^2) - Q_C D_1^2] \cdot \frac{D V_s}{r D_{ch}} \quad (30)$$

$$I_{Ld} = \eta [\eta (1 + Q_C^2) + D_1^2] \cdot \frac{D V_s}{r D_{ch}} \quad (31)$$

$$V_{oq} = \eta (Q_L + Q_C) D_1 (1 + Q_C^2) \cdot \frac{D V_s}{D_{ch}} \quad (32)$$

$$V_{od} = - [\eta (1 - Q_L Q_C) + D_1^2] D_1 \cdot \frac{D V_s}{D_{ch}} \quad (33)$$

여기서,

$$D_{ch} = D_1^4 + 2\eta(1 - Q_L Q_C) D_1^2 + \eta^2(1 + Q_L^2)(1 + Q_C^2) \quad (34)$$

또, 전압이득은 다음과 같이 정리된다.

$$G \equiv \frac{V_o}{V_s} = \frac{\sqrt{V_{oq}^2 + V_{od}^2}}{\sqrt{V_{sq}^2 + V_{sd}^2}} = \frac{D}{1-D} \cdot \rho \quad (35)$$

여기서,

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2\eta(1 - Q_L Q_C)}{(1-D)^2} + \frac{\eta^2(1 + Q_L^2)(1 + Q_C^2)}{(1-D)^4}}} \quad (36)$$

한편, 전원측 3상 전압원에서 PWM Buck-Boost 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 (22)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-Boost AC-AC 컨버터의 입력측의 역률 PF는

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

이고, 식 (38)과 (39)를 사용하여 정리하면,

$$PF = \left[\frac{\eta \sqrt{1 + Q_C^2}}{(1-D)^2} + \frac{1}{\sqrt{1 + Q_C^2}} \right] \cdot \rho \quad (42)$$

역률 곡선에서, duty ratio D가 0.5보다 작을 때는 역률이 거의 1에 가깝지만, 0.5보다 크게 되면 역률이 급격히 감소하여 역률이 악화됨을 확인할 수 있다.

3.3 과도상태 모델

PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터의 다른 동작점에서의 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 (21)~(29)에서 섭동을 가하여 얻어진 PWM Buck-Boost AC-AC 컨버터의 소신호 모델을 행렬식의 형태로 정리하면 다음과 같다.

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

여기서,

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

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

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

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{V_{oq}}{L} & 0 \\ \frac{V_s - V_{od}}{L} & \frac{D}{L} \\ \frac{I_{Lq}}{C} & 0 \\ \frac{I_{Ld}}{C} & 0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_{oq}}{\sqrt{V_{oq}^2 + V_{od}^2}} & \frac{V_{od}}{\sqrt{V_{oq}^2 + V_{od}^2}} \end{bmatrix} \quad (48)$$

4. 실험결과 및 검토

표 1은 본 연구과제의 실험에 사용된 시스템 파라미터이다. 또, TMS320F240 DSP 보드에서 발생시키는 PWM 신호는 스위칭 주파수 10 kHz로 동작하고, dead time은 3.2 usec를 주었다.

표 1 시스템 파라미터

시스템 파라미터	기호	값
전원주파수	f	60 Hz
전원 선간전압	V_s	220 V
연계 리액턴스	L	1 mH
필터 커패시턴스	C	75 μ F
리액터 손실저항	r	0.02 Ω
부하저항	R	5 Ω

그림 4는 정격전압일 때 출력 선간전압의 파형을 나타낸다. 그림 4에서 비교적 리플이 적은 파형이 입력전압 파형이다. 그림 4에서 보듯이 입력전압에 대하여 출력전압은 위상이 반전되고, duty ratio가 $D=0.5$ 임에도 약간 입력전압보다 작다. 이는 스위칭 손실이나 IGBT의 전도손실과 같이 고려하지 않은 손실에 의한 것이라 판단된다.

그림 5는 시스템의 입력전압을 220V에서 160V로 갑작스럽게 변화시켰을 때의 페루프 응답을 나타낸다. 시스템은 수 msec의 만족할 만한 응답특성을 보임으로써 전체 시스템의 모델링 및 제어기 설계가 옳았음을 확인시켜준다.

5. 결론

본 연구에서는 Custom Power의 전력품질의 향상을 위하여 PWM Buck-Boost AC-AC Converter를 사용, 항상 일정한 출력전압을 얻는 시스템을 구성을 제시하였다. 또, PWM Buck-Boost AC-AC Converter의 정적 특성은 물론 동적특성을 완전히 해석해 내었다. 끝으로, 10

kVA 시스템을 구성 제작하였고, open-loop 및 closed-loop 실험을 수행하였고, 이론적으로 밝힌 특성과 일치함을 확인하였다.

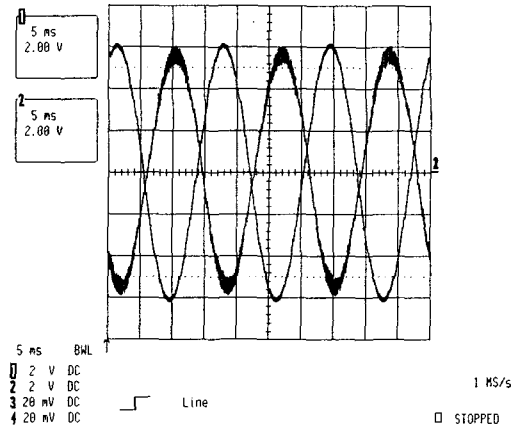


그림 4. 입력전압과 출력전압 (100V/div)

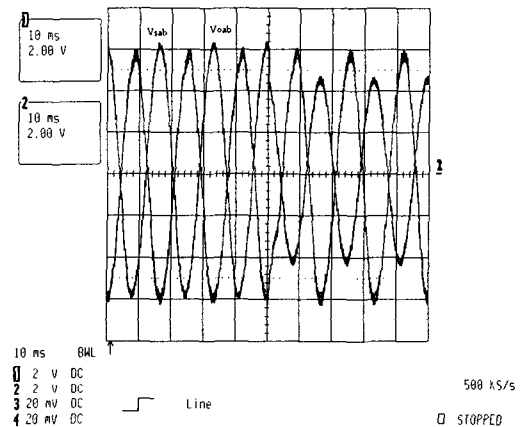


그림 5. 동적특성 (100V/div)

이 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음

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, April, 1988.
- [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.