

# PWM Converter의 새로운 전류제어기

이진우<sup>0</sup>, 민종진, 백상기, 강병희  
삼성종합기술원 기반기술연구소

## A New Current Controller for PWM Converters

J.W. Lee<sup>0</sup>, J.J. Min, S.K. Baek, B.H. Kang  
Core Technology Research Center  
Samsung Advanced Institute of Technology

### Abstract

From the cost-effective product point of view, it is very important to design a new current controller with the highest utilization factor of current capacity of power devices. This paper deals with a state-deadbeat current controller for PWM converters, which shows the fastest current control response without overshoot irrespective of the saturation of control voltage. No-overshoot control response means that the current capacity could be fully utilized in the control sense. Simulational results done by Matlab's Simulink show good current control characteristics.

### 1. 서론

PWM Converter-용 전력용 반도체소자의 전류 정격은 일반적으로 입력전압, 부하용량, Converter 효율 등을 고려하여 설계되고, 이에 따른 적절한 소자가 선정된다. 소자가 선정된 후에는 소자를 안전하고 효율적으로 어떻게 이용하는냐가 시스템설계 관점에서 중요하며, 특히 소자의 전류용량을 보다 효율적으로 이용하기 위한 측면에서 전류제어기의 응답특성이 매우 중요하다.

산업체에서 널리 사용되고 있는 기존의 PI 전류제어기는 제어입력의 포화가 발생하는 경우에 적분기의 동작특성에 따른 제어성능이 저하되며 특히 오버슈트가 발생하게 된다. 이를 개

선하기 위한 방법으로는 조건부 적분과 같이 적분동작을 시스템의 상태에 따라서 적절히 제어하는 여러가지 방법이 적용되고 있다. [1-2]

본 논문에서는 PWM Converter의 수학적 모델의 특성을 고려하여 가장 빠른 응답과 오버슈트가 없는 제어기로서 State-Deadbeat Controller를 설계하고, Matlab의 Simulink를 활용한 시뮬레이션을 통하여 제안된 전류제어기가 오버슈트없이 빠른 전류제어 응답특성을 갖고 있으며, 소자의 전류이용율을 극대화 할 수 있음을 보이고자 한다.

### 2. PWM Converter의 모델

전류제어기 설계를 위한 PWM Converter의 회로는 그림 1과 같으며, 리액터는 인덕터와 저항으로 구성되어 있으며 회로 방정식은 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

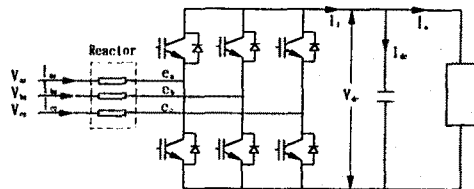


그림 1. PWM Converter의 회로

$$V_a = L \frac{di_a}{dt} + R \cdot i_a + e_a$$

$$V_b = L \frac{di_b}{dt} + R \cdot i_b + e_b \quad (1)$$

$$V_d = L \frac{di_d}{dt} + R \cdot i_d + e$$

$$V_d = \frac{1}{C} \int (i_i - i_o) dt + V_d(0) \quad (2)$$

전원전압을 기준으로 한 동기좌표계의 전원 축 방정식은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R}{L} \cdot i_d + \omega \cdot i_q + \frac{V_d}{L} - \frac{e_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R}{L} \cdot i_q - \omega \cdot i_d + \frac{V_q}{L} - \frac{e_q}{L} \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서 각전류의 제어입력은 콘버터의 출력 전압이고, 전원전압은 외란으로 모델링되며 3상전류간에 존재하는 종속관계는 DQ축 전류간의 간섭항으로 나타난다. 한편 역률 및 전류 제어를 위하여 전원전압 및 전류를 측정하므로 이 측정치를 이용하여 외란보상 및 전류간섭항을 제거하도록 콘버터의 출력전압을 2개의 보상전압항과 순수한 전류제어입력전압으로 구성한 후에 이를 식(3)에 적용하면 1차의 독립된 두개의 방정식으로 정리되며 식(4)와 같다. 즉 이와 같은 보상방법을 사용함으로써 PWM Converter는 보다 제어가 용이한 시스템으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R}{L} \cdot i_d + \frac{u_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R}{L} \cdot i_q + \frac{u_q}{L} \end{aligned} \quad (4)$$

### 3. 전류제어기 설계

먼저 산업체에서 널리 사용되고 있는 기존의 PI제어기를 식(4)에 적용하면 식(5)와 같은 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} L \cdot \frac{di_d}{dt} &= -R \cdot i_d + k_{pd} \cdot (i_d^* - i_d) + k_{id} \cdot \int (i_d^* - i_d) dt \\ L \cdot \frac{di_q}{dt} &= -R \cdot i_q + k_{pq} \cdot (i_q^* - i_q) + k_{iq} \cdot \int (i_q^* - i_q) dt \end{aligned} \quad (5)$$

그리고 식(5)의 특성방정식을 구하여 하나의 식으로 나타내면 식(6)과 같으며, 기존의 2차 시스템인 식(7)과 비교함으로써 쉽게 제어기 이득을 설정할 수 있다.

$$s^2 + \frac{(R+k_p)}{L} s + \frac{k_i}{L} = 0 \quad (6)$$

$$s^2 + 2\zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2 = 0 \quad (7)$$

한편 오버슈트가 없는 빠른 과도응답특성을 얻기 위하여 Digital State-Deadbeat Controller를 식(4)의 차분방정식을 이용하여

설계하면 식(8)과 같다.

$$G_R(z) = \frac{L}{T_s} - R \quad (8)$$

식(8)은 식(5)와 비교하면 비례제어기만 있는 경우와 유사하지만 시스템의 극점을 원점에 두도록 제어기의 이득을 설정하므로 가장 빠른 응답특성을 갖도록 하는 것이 특징이며, 적분항이 없기 때문에 제어입력의 포화에 따른 문제를 수반하지 않는 특징을 갖고 있다.

### 4. 시뮬레이션 및 결과검토

본 논문에서 사용한 시스템의 각 정수는 표 1과 같으며, 스위칭 주파수(3kHz)를 고려하여 제동정수 1, 주파수 150Hz가 되도록 PI제어기의 디지털이득을 식(6)과 식(7)을 이용하여 계산하였다. 그리고 시뮬레이션은 Matlab의 Simulink를 사용하여 행하였으며 전체적인 시스템 블럭도는 그림 2와 같으며, 공간벡터 PWM법을 사용하였다.

표 1. 시스템정수

L = 0.4mH	Vdc = 800V
R = 2mΩ	Vll = 440V
C = 27.2mF	P = 180kW

시스템블럭도는 상태방정식으로 표시한 PWM 콘버터부, 공간벡터 PWM신호를 발생하는 Block, 디지털전류제어를 수행하는 제어부로 구성되어 있으며, 각각이 블럭으로 처리되어 있기 때문에 Block의 수정 및 파라미터의 수정이 용이하다.

그림 3은 PI전류제어기를 사용한 전류제어응답특성으로 그림3(a)는 D축 기준전압 및 실제 콘버터의 D축 전압으로서 과도상태에서 제어전압이 포화되고 있음을 알 수 있다. 그림3(b)는 이 때의 전류 응답특성으로 큰 오버슈터가 발생함을 알 수 있다. 그림 4는 제안한 State-Deadbeat Controller에 의한 제어응답으로서 D축전압의 포화에도 불구하고 오버슈터없이 전류제어가 잘 되고 있음을 알 수 있다. 또한 전류제어특성을 기준치의 변화에 따라서 살펴보면 D축성분전류를 증가시키는 경우는 포화전압의 범위가 크기 때문에 전류가 잘 제어되지만,

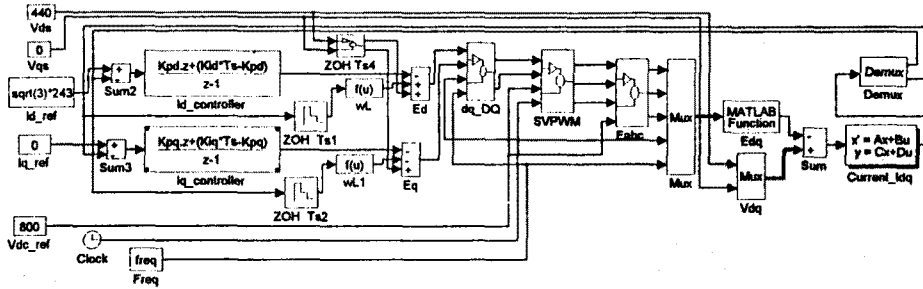


그림 2. Simulink를 이용한 PWM Converter의 시스템구성

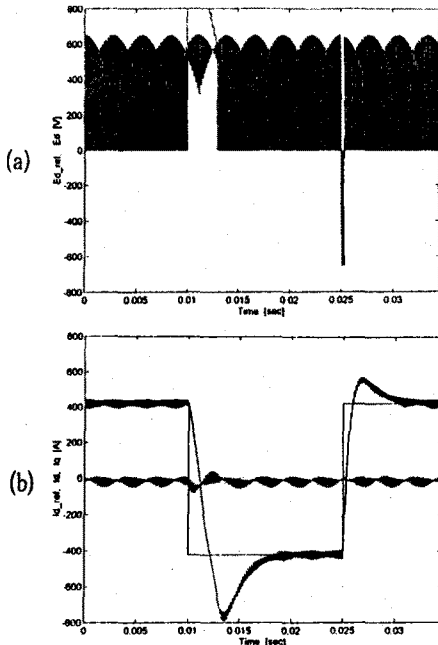


그림 3. PI제어기의 전류제어응답특성

D축 성분전류를 감소시키는 경우는 포화전압의 값이 작아서 전류제어 응답속도가 느리다. 그러나 PI제어 방법과 비교하면 같은 응답속도에서도 오버슈터가 없으며, 따라서 실제로 제어에 의한 전력용 반도체소자의 전류이용을 감소는 고려하지 않아도 된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 PWM Converter에 있어서 전력용 반도체소자의 정격전류에 대한 이용율을 높이기 위한 전류제어 방법으로서 State-Deadbeat Controller를 설계하고, Matlab의 Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통하여 오버슈트없는 전류제어 특성을 보이고 기존의 PI전

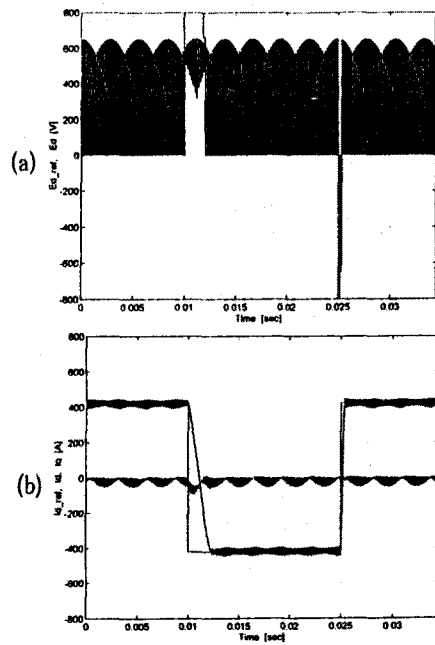


그림 4. State-deadbeat Controller의 전류제어응답특성

류제어기의 특성과 비교하였다. 앞으로 다른 시스템조건을 고려한 다양한 조건에서 우수한 제어특성과 소자의 전류이용율을 극대화 할 수 있는 연구가 필요하다.

### 6. 참고문헌

[1] Rolf Isermann, 'Digital Control System', Springer-Verlag Berlin, pp.74-116, pp.134-182, 1981.  
 [2] Karl J. Astrom and Bjorn Wittenmark, 'Computer-Controlled Systems:Theory and Design', Prentice-Hall Inc., pp.184-5, pp.369, pp.389, 1984.