

MATLAB을 활용한 3상 PFC 컨버터의 시뮬레이션

이헌홍*, 이호진, 이인환, 김영삼, 권영안
부산대학교

MATLAB Simulation of Three Phase PFC Converter

Heon-Hong Lee*, Hyo-Jin Lee, In-Hwan Lee, Young-Sam Kim, Young-Ahn Kwon
Pusan National University

Abstract - 최근, 전기품질에 관한 중요성과 EMI에 의한 규정이 강화되면서 PFC 컨버터에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 matlab을 활용하여 3상 PFC 컨버터를 효율적으로 시뮬레이션하는 연구를 수행한다. 단위역률을 위한 3상 컨버터 PFC 제어는 링 크전압제어부, 전류제어부, SVPWM 제어부로 구성된다. 3상 PFC 컨버터를 matlab/simulink로 구성하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 상전압과 상전류의 위상이 일치하여 단위역률이 잘 실현됨을 나타내고 있다. 본 연구는 PFC 컨버터의 설계 및 유사회로의 시뮬레이션에 유용하게 활용될 것이다.

측 상전류, v_a, v_b, v_c 는 컨버터 단자전압이다.

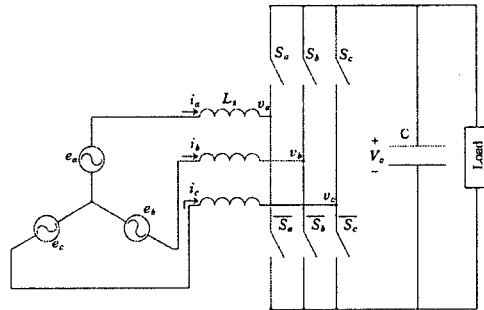


그림 1. 승압형 3상 컨버터

1. 서 론

컨버터는 계통선로와 직접 연계되어 고조파 및 역률 문제를 야기하므로 이에 대한 대책을 강구하여야 한다. 역률 문제는 오래 전부터 전력가격에 의하여 수용가에서 억제하도록 하고 있으며 고조파문제는 최근에 미국과 유럽에서는 IEEE-519 및 IEC-555와 같은 기준을 마련하여 이에 대한 억제를 강화하고 있다[1]. 회로가 간단한 다이오드 정류기는 입력측에 큰 고조파를 생성해서 입력측 역률을 저하시키고 전원전압에 왜곡을 일으킨다. 이러한 이유로 PWM 컨버터를 사용하게 된다. 본 논문에서는 PWM방식 중 최근 많이 활용되는 공간전압 PWM 방식 컨버터를 대상으로 하는데, 이 방식은 타방식의 PWM에 비해서 빠른 응답 특성을 보이고 선형적으로 제어가 가능한 제어영역이 넓은 특성을 가진다[2]. PWM 컨버터에서 입력파형을 개선하기 위한 여러 가지 방법들이 연구되고 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 PFC 3상 컨버터는 성능이 우수한, 유효전력분 전류와 무효전력분 전류를 제어하는 d-q 제어방식 컨버터이다[3]. 본 연구에서는 이러한 3상 PFC 컨버터를 대상으로 matlab/simulink를 활용하여 효율적으로 시뮬레이션하는 연구를 수행한다.

2.2 d-q 전압 방정식

3상의 변수를 임의의 좌표계로 변환하는 변환행렬은 다음과 같다.

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2}{3} \pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3} \pi) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3} \pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3} \pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0)$

3상 전원전압이 기본파만을 가진다면 d-q 전원전압은 다음과 같다.

$$e_d^e = 0 \quad (5)$$

$$e_q^e = E_m \quad (6)$$

여기서 E_m 은 상전압 최대값이다.

식(1)~(3)을 동기좌표계로 변환한 d-q전압방정식은 다음과 같다.

$$e_d^e = 0 = L_i \frac{di_d^e}{dt} - \omega L_i i_q^e + v_d^e \quad (7)$$

$$e_q^e = E_m = L_i \frac{di_q^e}{dt} + \omega L_i i_d^e + v_q^e \quad (8)$$

2. 3상 컨버터 전압방정식

2.1 3상 전압 방정식

그림 1과 같은 3상 AC/DC 승압형 컨버터에서 전압 방정식은 다음과 같다.

$$e_a = L_i \frac{di_a}{dt} + v_a \quad (1)$$

$$e_b = L_i \frac{di_b}{dt} + v_b \quad (2)$$

$$e_c = L_i \frac{di_c}{dt} + v_c \quad (3)$$

여기서 e_a, e_b, e_c 는 전원측 상전압, i_a, i_b, i_c 는 전원

3. 3상 컨버터 PFC 제어

단위역률을 위한 3상 컨버터 PFC 제어는 크게 링크 전압제어부, 전류제어부, SVPWM 제어부로 구성된다. 전류제어부는 안쪽 루프를 형성하며 전압제어부에 비해 대역폭을 크게 잡는데 이는 빠른 응답성을 위해서이다. 반면에 전압제어부는 바깥 루프를 형성하며, 이 제어부의 주 목표는 최적화된 정류작용과 안정성 부여에 있다. 따라서 전압제어부의 대역폭은 다소 작게 잡는다. SVPWM 제어부는 전류제어부에서 발생하는 d-q 축 지령전압을 받아서 스위칭 소자의 스위칭 패턴과 도통시간 등을 산출하게 된다.

3상 컨버터의 d-q 전류에 의한 역률관계는 식(9)와 같고 단위역률이 되기 위해서는 d축 전류가 영이 되어야 한다.

$$PF = \frac{i_q^e}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} \quad (9)$$

3.1 링크전압제어부

3상 AC/DC 컨버터의 출력 링크전압을 제어하기 위한 전압제어부는 그림 2와 같이 부하의 출력전력을 전향 보상해주는 항과 출력 전압의 오차를 보상해주는 부분으로 나뉜다. 전압제어기의 출력은 q축전류 지령치로서 이를 통하여 출력전력 및 출력 전압의 오차를 제어하게 된다. 출력 전력에 대한 정보는 LPF를 거쳐 출력의 리플성분, 즉 고조파 성분에 의해서 제어신호가 과도하게 흔들리는 것을 막아주게 된다

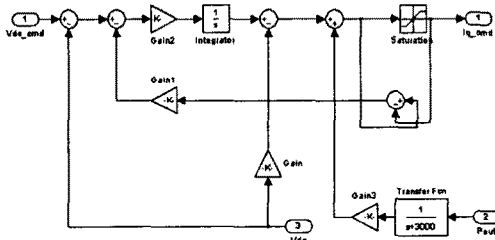


그림 2. 링크전압제어부

3.2 전류제어부

전류제어부는 그림 3과 같이 전압제어부에서 받은 지령전류와 실제 전류의 오차에 대한 보상항, 지령제어전압과 실제 제어전압의 차에 대한 보상항, 역기전력의 항으로 구성된다. 그림 3은 q축 전류제어부로서 d축 전류제어부와 유사하며 각각의 전류제어부의 출력은 d축 및 q축 지령전압이 된다.

3.3 SVPWM제어부

SVPWM제어부는 전류제어부에서 받은 지령전압을 실현하기 위하여 공간벡터전압 PWM을 위한 제어신호를 출력한다. 공간전압벡터 PWM에서 지령전압은 벡터 공간상의 위치로 표현되며 이 지령전압의 벡터 위치에 따라 인접한 유효벡터와 영전압 벡터의 합성으로 출력전압이 결정된다. 그림 4는 그림 1과 같은 3상 컨버터에서 스위칭 소자의 스위칭 상태에 따라 출력 가능한 6개의 유효벡터를 나타낸다. 각 유효벡터는 60°의 동일 간격을 가지는 6개의 벡터와 인버터의 상단 또는 하단의 스위치가 동시에 온 상태로 되는 영전압 벡터 2개를

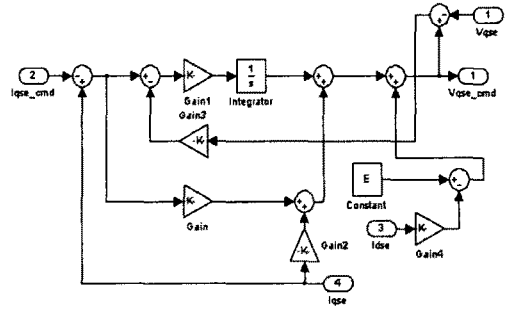


그림 3. 전류제어부

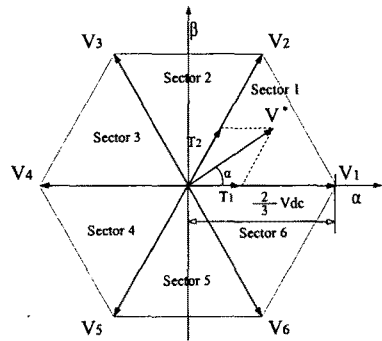


그림 4. 스위칭 상태에 따른 전압벡터

포함하여 구성된다. 그리고, 한 주기내의 지령전압의 기준벡터와 평균이 동일하도록 유효벡터들을 합성함으로써 인버터의 출력전압을 생성할 수 있다. 유효벡터의 인가 시간은 한 주기 내에서 적분으로부터 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\int_0^{T_s} V^* dt = \int_0^{T_1} V_n dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} V_{n+1} dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} V_0 dt \quad (10)$$

단, T_s : Sampling period

T_1, T_2 : 유효전압 벡터의 인가시간

V_n, V_{n+1}, V_0 : 유효전압벡터 및 영전압벡터

각 유효벡터가 인가되는 시간은 다음과 같다.

$$T_1 = T_s a \frac{\sin(60^\circ - \alpha)}{\sin 60^\circ} \quad (11)$$

$$T_2 = T_s a \frac{\sin \alpha}{\sin 60^\circ} \quad (12)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (13)$$

$$\text{단, } a = \frac{|V^*|}{2V_{dc}/\sqrt{3}}, \alpha = \theta - \frac{\pi}{3}(m-1)$$

m : 지령전압의 섹터 번호

T_0 : 영전압 벡터의 인가시간

이러한 방식으로 계산된 각 유효벡터의 인가시간은 실제 스위칭소자의 게이트 신호 인가시간을 의미하지는 않으며 각 상의 스위칭 소자를 온·오프 시키는 실제 시간은

각 유효전압벡터의 인가시간을 재구성하여 구하게된다. 이러한 스위칭 펄스의 인가시간에 대한 계산은 영전압벡터의 분할 방식에 따라 여러 구현이 가능하다. 그림 5는 지령전압이 sector 1에 있을 경우의 일반적인 SVPWM에 의한 실제 게이트 펄스의 배열을 나타낸다.

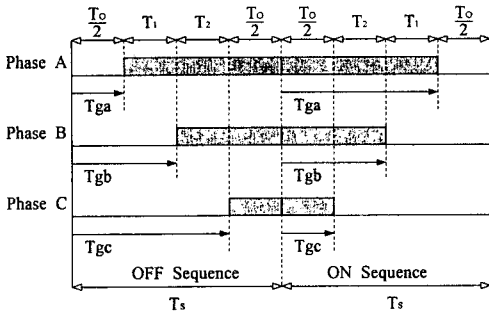


그림 5. SVPWM에서 스위칭소자의 게이트 신호

4. 시뮬레이션 및 검토

이상에서 기술한 3상 PFC 컨버터를 matlab/simulink 로 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 컨버터회로 및 저항부하의 각 파라미터 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega &= 120\pi \quad (f = 60\text{Hz}) \\ V_{dc_cmd} &= 400\text{V} \\ E_m &= \frac{220\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\text{V} \\ L_s &= 4.5\text{mH} \\ C &= 1200\mu\text{F} \\ R &= 30\Omega \end{aligned}$$

그림 6~9는 matlab에 의한 시뮬레이션 결과로서 상전압과 상전류의 위상이 일치하여 단위역률이 잘 실현됨을 나타내고 있다.

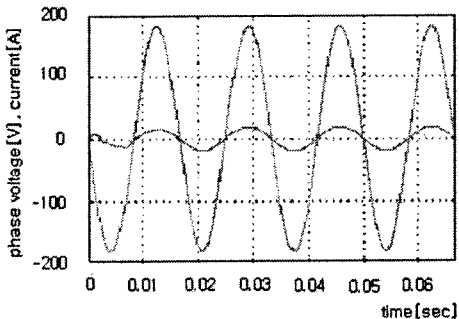


그림 6. 입력 상전압 및 상전류

5. 결 론

본 연구에서는 matlab/simulink을 활용하여 유효전력 분 전류와 무효전력분 전류를 제어하는 d-q 제어방식 3상 PFC 컨버터를 효율적으로 시뮬레이션하는 연구를 수행하였다. 단위역률을 위한 3상 컨버터 PFC 제어는 링

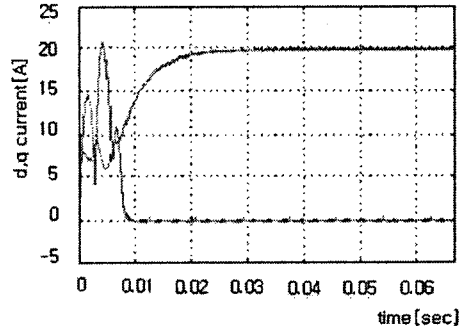


그림 7. 입력 d-q 전류

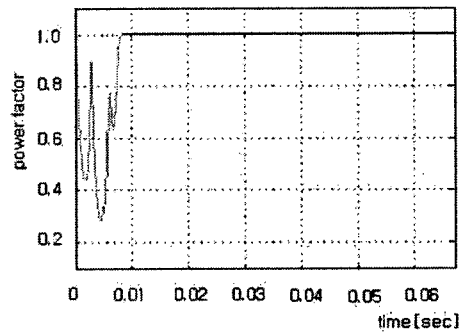


그림 8. 역률 순시치

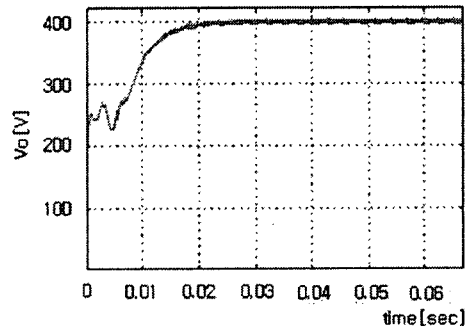


그림 9. 출력 직류전압

크전압제어부, 전류제어부, SVPWM 제어부로 구성된다. 시뮬레이션을 수행한 결과, 상전압과 상전류의 위상이 일치하여 단위역률이 잘 실현되었다.

(참 고 문 헌)

- [1] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, Project IEEE 519, 1992.
- [2] N.Mohan, T.M.Undeland and W.P.Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 2nd Ed.* John Wiley, 1995.
- [3] Thomas G. Habetler, "A Space Vector-Based Rectifier Regulator for AC/DC/AC Converters," IEEE, PE-8, No.1, pp.30-36, 1993.