

전원전압 왜곡시 3상 AC/DC PWM 컨버터의 전류제어

장정익*, 김동억*, 이동춘*, 김흥근**
 영남대학교 전기공학과*, 경북대학교**

Current Control of Three-Phase AC/DC PWM Converters in Distorted Source Voltage

Jeong-Ik Jang*, Dong-Eok Kim*, Dong-Choon Lee*, and Heung-Geun Kim**

*Dept. of Electrical Eng. Yeungnam Univ.

**School of Electrical Eng. and Computer Science, Kyungpook Nat. Univ.

ABSTRACT

본 논문에서는 전원전압 왜곡시 3상 PWM 컨버터의 새로운 전류제어 기법을 제시한다. 전원전압의 5, 7차 고조파성분에 의한 고조파 전류가 0이 되도록 각 성분에 대한 전류 제어루프를 구성한다. 그리고 전원전압이 불평형일 경우 직류링크에 나타나는 전압리플을 제거한다. 실험을 통해 제안한 전류제어기법의 타당성을 검증한다.

1. 서론

교류-직류 변환용 PWM 컨버터는 직류단 전압의 크기를 일정하게 제어하고, 전원측 전류를 정현적으로 제어하며 단위역률을 얻을 수 있고, 양방향 전력 흐름이 가능한 장점이 있다. 그리고 컨버터 출력측인 직류링크 후단에 인버터를 연결하여 back-to-back 형식으로 산업체에서 널리 사용되고 있다. 전원전압이 정현파이면 컨버터는 원활히 동작하지만 전원전압이 고조파전류의 영향으로 왜곡되거나 불평형을 포함한다면 입력전류 제어 및 출력전압 제어 특성이 나빠지게 된다. 전원전압의 왜곡 효과를 감소시키기 위해 수동필터를 사용할 수도 있으나 이는 가격과 부피 면에서 부담이 된다.^{[1]-[3]}

전원전압에 불평형이 발생하면 PWM 컨버터의 직류단 전압은 전원주파수의 2배의 전압리플이 나타난다. 이는 부하에 나쁜 영향을 미치게 되므로 이를 제거할 필요가 있다. 이를 위해 [4]에서는 불평형 전원전압을 정상분과 역상분으로 나누어 이중전류제어 루프를 구성하여 해결한 바 있다.

본 논문에서는 전원전압이 불평형 및 저차 고조파를 포함한 경우 PWM 컨버터의 전류제어 알고리즘을 제안하고 프로토타입의 실험장치에 수행한 실험을 통해 제안한 제어기법의 타당성을 검증한다.

2. PWM 컨버터의 전류제어

2.1 전원전압의 불평형

그림 1과 같은 PWM 컨버터에서 d-q 동기좌표계로 나타낸 전압 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$E_{dq} = V_{dq} + L \frac{dI_{dq}}{dt} + RI_{dq} \quad (1)$$

여기서 E_{dq} 는 전원전압, V_{dq} 는 컨버터의 입력전압, I_{dq} 는 전

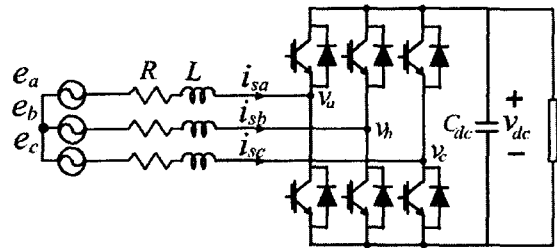


그림 1 3상 PWM 컨버터
 Fig. 1 Three-phase PWM converter

원전류를 나타낸다. 그리고 전원전압이 불평형일 때 피상 전력은 아래와 같다.

$$S = (e^{j\omega t} E_{dq}^p + e^{-j\omega t} E_{dq}^n) (e^{j\omega t} I_{dq}^p + e^{-j\omega t} I_{dq}^n)^* \quad (2)$$

여기서 위 첨자 p와 n은 각각 정상분과 역상분을 의미한다. 식 (2)를 전개하여 유효전력과 무효전력으로 분리하여 표현하면 평균치 (P_0, Q_0)와 크기가 $P_{\omega}, P_{2\omega}, Q_{\omega}, Q_{2\omega}$ 이며 전압전압의 2배 주파수로 맥동하는 성분으로 나타낼 수 있다.

$$P(t) = P_0 + P_{\omega} \cos(2\omega t) + P_{2\omega} \sin(2\omega t) \quad (3)$$

$$Q(t) = Q_0 + Q_{\omega} \cos(2\omega t) + Q_{2\omega} \sin(2\omega t) \quad (4)$$

여기서

$$P_0 = 1.5(E_d^p I_d^p + E_q^p I_q^p + E_d^n I_d^n + E_q^n I_q^n)$$

$$P_{\omega} = 1.5(E_d^p I_d^n + E_q^p I_q^n + E_d^n I_d^p + E_q^n I_q^p)$$

$$P_{2\omega} = 1.5(E_q^p I_d^p - E_d^n I_q^p - E_q^n I_d^n + E_d^p I_q^n)$$

$$Q_0 = 1.5(E_q^p I_d^p - E_d^n I_q^p + E_q^n I_d^n - E_d^p I_q^n)$$

$$Q_{\omega} = 1.5(E_q^p I_d^n - E_d^n I_q^n + E_q^n I_d^p - E_d^p I_q^p)$$

$$Q_{2\omega} = 1.5(E_d^p I_d^n + E_q^p I_q^n - E_d^n I_d^p - E_q^n I_q^p)$$

이다. 직류단 전압은 유효전력에 의해 결정된다. 전원전압이 불평형일 경우 직류단 전압의 맥동은 식(3)에서 유효전력의 맥동에 의한 것임을 알 수 있다. 그러므로 P_{ω} 와 $P_{2\omega}$ 가 0이 되면 직류단 전압의 맥동은 제거될 수 있다. 무효전력의 평균값 Q_0 는 단위역률을 제어하기 위해 0으로 제어되어야 한다. 그리고 무효전력의 맥동인 Q_{ω} 와 $Q_{2\omega}$ 는 평균값이 0이므로 단위 역률제어에 있어서 고려되지 않는다. 직류단 전압의 평균값은 P_0 에 의해서 결정한다. 따라서 불평형 전원전압에서 PWM 컨버터의

전류 지령은 아래와 같다.^[4]

$$\begin{bmatrix} I_d^{p*} \\ I_q^{p*} \\ I_d^{n*} \\ I_q^{n*} \end{bmatrix} = \frac{2}{3D} V_{dc}^* I_{dc}^* \begin{bmatrix} E_d^p \\ E_q^p \\ -E_d^n \\ -E_q^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서

$$D = [(E_d^p)^2 + (E_q^p)^2] - [(E_d^n)^2 + (E_q^n)^2] (\neq 0).$$

그리고 I_{dc}^* 는 전압 제어기의 출력이고, V_{dc}^* 는 직류단 전압지령이다.

2.2 전원측 고조파 전압

배전시스템의 전원전압은 고조파 전류의 영향으로 일반적으로 저차고조파 성분을 포함한다. 이때 전원전압과 컨버터 입력 전압을 단상 등가회로로 표현하면 그림 2(a)와 같다. 그림에서 전원과 컨버터 입력전압 사이에 고조파 전원이 추가된 것으로 나타낼 수 있다. 이 고조파 전압은 고조파 전류를 야기하므로 이 효과를 제거할 필요가 있다. 이를 위해 그림 2(b)에 보인

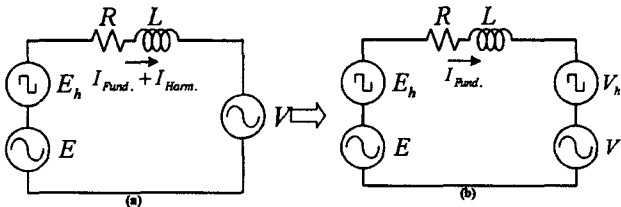


그림 2 전원전압에 고조파가 포함된 경우의 단상 등가회로 (a) 기존의 제어 (b) 제안된 제어

Fig. 2 Per-phase equivalent circuit of three-phase PWM converter with harmonic source (a) conventional control (b) proposed control

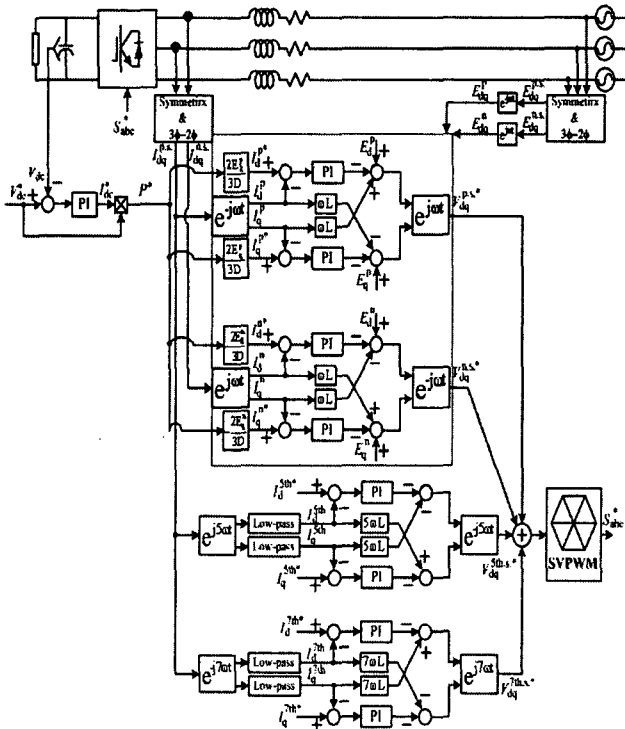


그림 3 PWM 컨버터의 전체 제어블럭도
Fig. 3 Control block diagram of PWM converter

바와 같이 컨버터 입력전압에 전원측 고조파 전압과 같은 전압을 주입하면 이 고조파 전압이 전류에 미치는 영향을 배제시킬 수 있다. 전원 고조파 전압은 주로 5, 7차 성분이므로 5차, 7차 전류제어기를 추가하면 이를 해결할 수 있다. 그리고 3상 3선식에서 3배수 고조파 전류는 서로 상쇄되므로 고려하지 않는다.

그림 3은 PWM 컨버터의 전체 제어도이다. 전원전압에 불평형이 발생하면 식(5)로 주어지는 전류지령에 의해 직류링크 전압이 제어된다.

3. 실험 결과

제안한 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해서 실험을 수행하였다. 직류단 전압은 150[V]로 제어하고 IGBT를 사용하는 PWM 컨버터의 스위칭 주파수는 5[kHz]이다. 부하는 40Ω의 저항을 사용한다. 그림 4와 같은 불평형을 14.66[%]인 전원 전압을 사용하였고 각 상전압에 포함된 5차, 7차 고조파 성분은 표 1에 나타나 있다.

그림 5는 불평형 및 고조파가 포함된 전원을 고려하지 않고 PWM 컨버터를 제어한 결과의 3상 전류와 직류단 전압파형이다. 앞서 예측했듯이 전원 전류는 고조파를 포함하고 있고 직류단 전압은 전원주파수 2배의 맥동성분을 갖는다. 그리고 그림 6은 고조파 전압만을 보상할 때의 파형이다. 저차고조파는 감소되었지만 불평형에 의한 직류링크 전압의 맥동성분은 그대로 존재함을 보인다. 그림 7은 전압 불평형만을 보상한 경우의 파

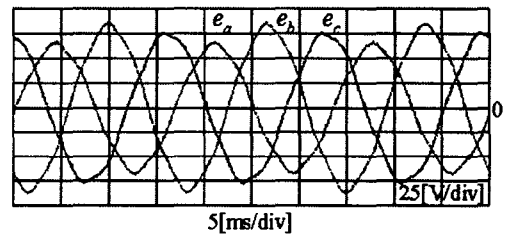


그림 4 전원 전압
Fig. 4 Source voltage

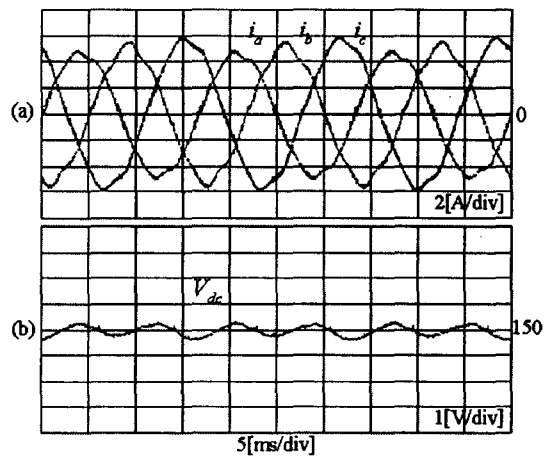


그림 5 보상제어를 하지 않은 경우
(a) 3상 전원전류 (b) 직류링크 전압
Fig. 5 Control performance without any compensation (a) three-phase source currents (b) dc-link voltage

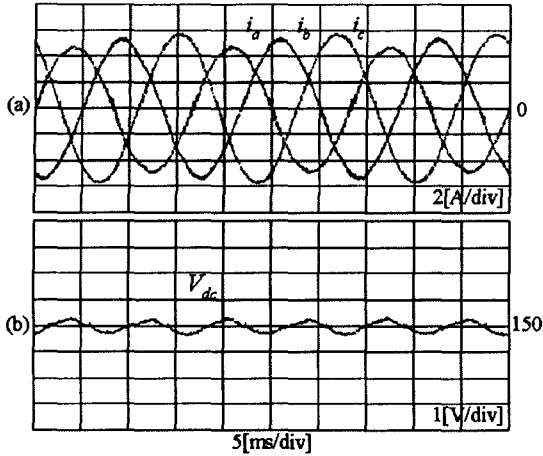


그림 6 고조파 보상제어
(a) 3상 전원전류 (b) 직류단 전압
Fig. 6 Control performance with compensation for harmonic voltage (a) three-phase source currents (b) dc-link voltage

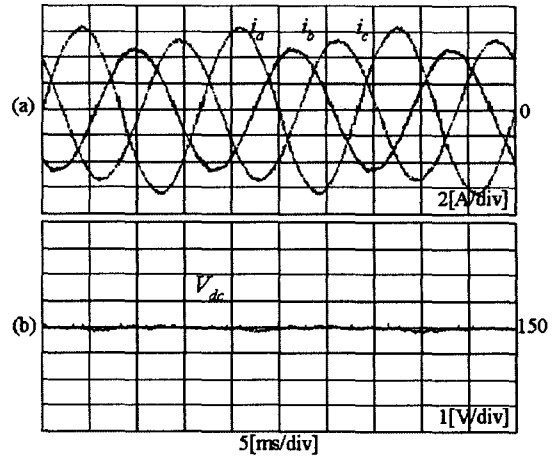


그림 8 고조파 및 불평형 전압 보상제어
(a) 3상 전원전류 (b) 직류단 전압
Fig. 8 Control performance with compensation for harmonics and unbalance of source voltage (a) three-phase currents (b) dc-link voltage

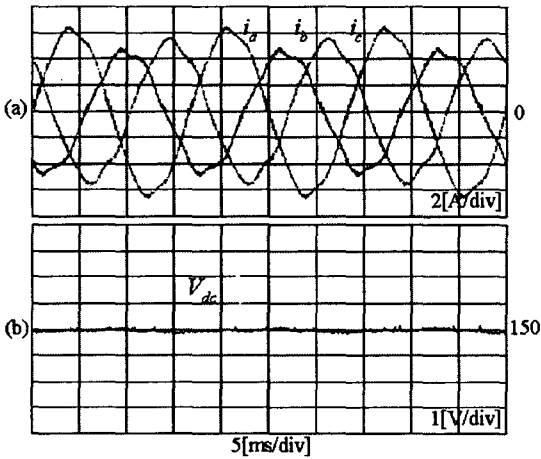


그림 7 불평형 전압 보상제어
(a) 3상 전원전류 (b) 직류단 전압
Fig. 7 Control performance with compensation for source voltage unbalance (a) three-phase currents (b) dc-link voltage

표 1 5, 7차 고조파 비율과 전고조파 왜율(THD)
Table 1 Ratio of 5, 7-th harmonics and THD

	5차 고조파(%)			7차 고조파(%)			THD(%)		
	a상	b상	c상	a상	b상	c상	a상	b상	c상
전원전압	2.88	2.82	3.18	0.41	0.42	0.48	2.94	2.89	3.23
그림 5 전류	2.60	3.90	3.46	1.77	2.27	1.70	3.66	4.77	4.04
그림 6 전류	1.31	1.12	0.99	0.27	0.38	0.25	2.28	1.94	1.57
그림 7 전류	2.79	4.83	3.99	1.27	1.35	1.51	3.14	5.19	4.37
그림 8 전류	0.72	0.94	0.86	0.29	0.49	0.44	1.05	1.66	1.37

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-067) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] B. K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, Inc. pp. 210-240, 2001.
- [2] F. Z. Peng, "Harmonic source and filtering approaches", IEEE Ind. Appl., Magazine, vol. 7, no. 41, pp. 18-25, 2001.
- [3] Y. S. Kim, J. S. Kim, and S. H. Ko, "Three-phase three-wire series active power filter, which compensates for harmonics and reactive power", IEE Proc. on Electric Power Appl., vol. 151, no. 3, pp. 276-282, 8 May 2004
- [4] H. S. Song and K. Nam, "Dual current controller PWM converter under unbalanced input voltage conditions", IEEE Trans. on Ind. Electron., Vol. 46, No. 5, pp. 953-959, 1999.

4. 결론

본 논문에서는 전원전압이 불평형과 저차 고조파를 포함한 경우 PWM 컨버터의 새로운 전류제어기법을 제안하고 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 제안한 알고리즘으로 불평형 전원 전압에 의한 직류링크전압의 맥동성분을 제거하였을 뿐만 아니라 고조파 전압에 의한 전원전류의 고조파를 감소시켰다.