

왜곡된 전원 전압과 주파수하에서 단상 PWM 컨버터의 전류 제어

안창현, 김상훈
강원대학교

Current control of a single-phase PWM converter under distorted source voltage and frequency condition

Chang Heon Ahn, Sang Hoon Kim
Kangwon National University

ABSTRACT

본 논문에서는 왜곡된 전원 전압과 주파수 변동 하에서도 입력 전류를 정현적으로 제어하도록 하는 단상 PWM 컨버터의 동기좌표계 전류 제어 기법을 제안한다. 왜곡된 전원 전압은 PWM 컨버터 제어를 위한 제어 위상각을 왜곡시켜 입력 전류에 고조파를 발생시키며, 전원 주파수의 변동 역시 입력 전류의 제어 성능을 저하시킨다. 본 논문에서는 위상각의 왜곡 성분을 이용하여 지령 전류를 보상하고 동기좌표계 PLL (Phase Lock Loop) 제어기의 출력으로부터 주파수 변동분을 검출하여 왜곡된 전원 전압과 주파수하에서도 정현적인 전류 제어가 가능하도록 하였다. 제안된 기법의 유용성은 실험을 통해 확인하였다.

1. 서 론

AC/DC 전력변환장치로서 입력 전류를 정현적으로 제어할 수 있을 뿐만 아니라 입력 역률과 출력 직류전압의 제어가 가능하며 양방향으로 전력을 전달할 수 있는 PWM(Pulse Width Modulation) 컨버터의 사용이 증가하고 있다[1]. PWM 컨버터의 입력인 계통 전압의 공통접속점에는 근래 들어 고조파를 발생시키는 비선형 부하의 사용이 증가하고 있어 이로 인해 계통 전압이 왜곡되고 있다. 전원 전압의 왜곡 현상 이외에 전원의 주파수도 계통의 사고나 부하의 증가로 인해 변동될 수 있다. 왜곡된 전원 전압은 PWM 컨버터 제어에 필요한 전원 위상각을 왜곡시켜 입력 전류에 왜곡성분과 같은 고조파를 함유시킨다. 전원 주파수의 변동 역시 컨버터 제어 시 입력 전류의 정현파 제어 성능을 저하시킨다.

본 논문에서는 전원 전압과 주파수의 왜곡 시에 단상 PWM 컨버터의 동기좌표계 전류 제어 성능을 향상시키기 위한 기법을 제안한다. 제안된 기법에서는 전원 전압의 위상각에서 왜곡 성분을 검출하고 이를 이용하여 지령 전류를 보상하여 입력 전류의 정현적인 제어를 가능하게 하였고, PLL 제어기의 출력으로부터 전원 주파수의 변동분을 검출하여 제어 시스템의 기준 주파수를 조정함으로써 전류 제어 성능 저하를 방지하도록 하였다.

2. 전원 전압과 주파수 왜곡 시에 단상 PWM 컨버터 제어

2.1 전원 전압 왜곡

왜곡된 전원 전압은 동기좌표계 d축 전압을 0으로 제어하는 SRFPLL(Synchronous Reference Frame PLL) 기법으로 검출된 전원 위상각을 왜곡시킨다. 왜곡된 위상각은 식(1)에 보이듯이 정지좌표계 지령 전류를 왜곡시켜 실제 입력 전류의 왜곡의 원인이 된다[1].

$$\begin{bmatrix} i_d^{**} \\ i_q^{**} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \Delta\theta) & -\sin(\theta + \Delta\theta) \\ \sin(\theta + \Delta\theta) & \cos(\theta + \Delta\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^{e*} \\ i_q^{e*} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} i_d^{e*} \cos(\theta + \Delta\theta) - i_q^{e*} \sin(\theta + \Delta\theta) \\ i_d^{e*} \sin(\theta + \Delta\theta) + i_q^{e*} \cos(\theta + \Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $\Delta\theta$ 는 위상각의 왜곡 성분, i_d^{**}, i_q^{**} 와 i_d^{e*}, i_q^{e*} 는 각각 정지좌표계와 동기좌표계 d와 q축 지령전류이다.

2.2 전원 전압 왜곡 보상 기법

왜곡된 전원 위상각으로 인한 입력 지령 전류의 왜곡 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 위상각의 왜곡 성분을 추출하여 이를 동기좌표계 지령전류에 보상함으로써 정지좌표계 지령 전류의 왜곡을 제거하도록 하였다[1]. 그림 1에 지령전류 보상 과정이 보인다. 지령전류 보상에 필요한 위상각의 왜곡 성분 $\Delta\theta$ 는 왜곡 전압의 위상각과 왜곡 전압에 포함된 기본파 성분의 위상각의 차로 얻는다. 기본파 성분의 위상각은 차단주파수가 10Hz인 저역통과필터(Low Pass Filter: LPF)를 사용하여 얻는다. LPF를 이용하여 얻은 기본파 성분의 위상각은 LPF의 위상 지연으로 인한 제어 성능 저하로 왜곡성분 추출용으로만 사용한다.

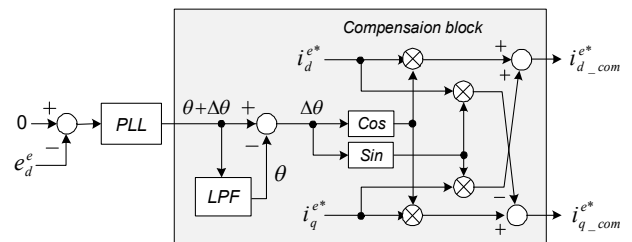


그림 1 왜곡 전압 시 보상 기법
Fig. 1 Compensation method for distortion voltage

2.3 전원 주파수 변동 시 PLL 특성

단상 PWM 컨버터의 동기좌표계 제어를 하는 경우 단상 전원 전압 $e_q^s (= e_{in})$ 으로부터 APF(All Pass Filter)를 이용하여 90°의 위상차를 갖는 전압 e_d^s 을 얻어 사용한다. 이때 APF의 차단주파수가 전원 주파수와 같다면 정확히 90°의 위상차를 갖는 전압을 얻을 수 있다. 그러나 두 주파수가 다르다면 두 전압의 위상각은 90°와는 다르게 오차 θ_{err} 가 발생하여 식(2)와 같이 동기좌표계 d축 전압은 0이 아니라 전원 주파수의 2배로 변동하는 직류 값이 된다.

$$\begin{aligned} e_d^s &= -E\sin(\theta + \theta_{err})\cos\theta + E\cos\theta\sin\theta \\ &= -E\cos(2\theta + \frac{\theta_{err}}{2})\sin\frac{\theta_{err}}{2} - \frac{E}{2}\sin\theta_{err} \end{aligned} \quad (2)$$

d축 전압을 0으로 제어하는 SRFPLL 기법에서 이렇게 왜곡된 전압을 사용하는 경우 전원 위상각의 오차를 발생하게 된다. 이러한 위상각 오차는 전류 제어 시에 영향을 주어 전류 왜곡을 일으킨다. 또한 왜곡된 전원 전압 하에서 보상 기법으로 전류제어를 수행할 경우에도 주파수 변동은 입력 역률을 저하시킨다.

2.4 전원 주파수 변동 추정 기법[2]

앞에서 설명한 주파수 변동에 의한 문제를 해결하기 위해서는 계통 전원의 주파수 변동을 실시간으로 추정하여 APF의 차단주파수와 동기좌표계 PLL의 기준 주파수 설정을 바꾸어 주어야 한다. 그림 2는 제안된 주파수 변동 검출 시스템의 블록도이다. SRFPLL 제어가 출력 값이 주파수 변동 값을 반영하기 때문에 제안한 주파수 검출 방법은 SRFPLL 제어가 출력의 평균을 구하여 주파수 변동 $\Delta\omega$ 를 구하게 된다.

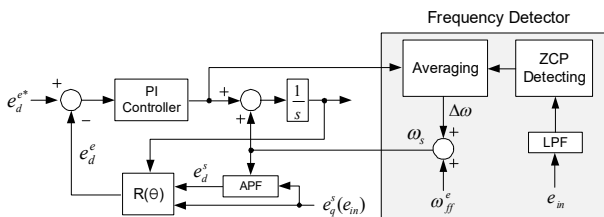


그림 2 제안된 전원 주파수의 검출 방법
Fig. 2 Proposed source frequency variation detection method

이를 위해 전원 전압의 ZCP(Zero crossing point)로부터 전원 전압의 반주기에 대한 SRFPLL 제어가 출력의 평균값을 계산한다. 이렇게 얻어진 주파수 오차를 APF의 차단주파수와 SRFPLL의 기준 주파수에 보상한다. 전원 전압의 ZCP로부터 전원 전압의 주기를 계산하여 직접 주파수 변동분을 알아낼 수도 있지만 유한한 샘플링 개수에 따른 ZCP 검출의 부정확성에 의해 주파수 검출에 리플이 발생하는 문제가 발생한다.

4. 실험

본 논문에서 제안된 기법의 타당성을 검증하기 위해 사용된 단상 PWM 컨버터 시스템에서는 정격 전류와 전압이 각각 50A, 600V인 IGBT 모듈을 사용하였고, 스위칭 주파수는

10kHz, 입력단 인덕턴스는 2.4mH, 출력단 평활 커패시터는 2200uF이다. 제안한 기법은 TMS320F28335 DSC를 사용한 디지털 제어보드에서 구현되었다.

그림 3은 전원 전압 e_{in} 의 왜곡을 위해 3차, 5차, 7차 고조파를 각각 10%, 10%, 5%로 하여 전고조파왜율(Total Harmonic Distortion, THD)을 15%로 설정하고, 전원 주파수의 변동을 3Hz로 하였을 때 제안된 기법을 이용한 경우에 입력 전류 제어 성능이다. 이때 전류의 THD는 3.4%으로 정현적으로 제어됨을 확인하였다.

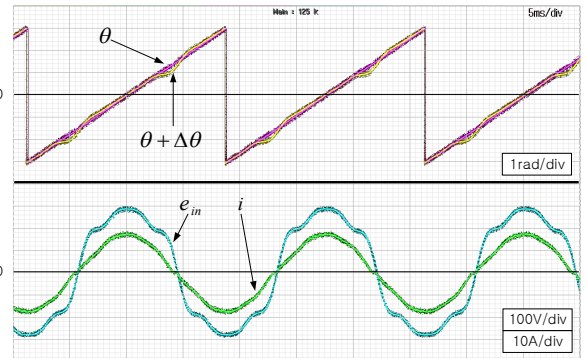


그림 3 전원 전압과 주파수 왜곡시 제안된 기법의 전류 제어
Fig. 3 Proposed current control method under source voltage distortion and frequency variation

5. 결론

본 논문에서는 왜곡된 전원 전압과 주파수 변동을 고려한 단상 PWM 컨버터의 동기좌표계 전류 제어 기법을 제안하였다. 위상각의 왜곡성분을 추출하여 동기좌표계 지령전류를 보상하는 기법과 SRFPLL의 출력으로부터 전원 주파수의 변동을 검출하여 APF의 차단주파수와 SRFPLL의 기준주파수에 반영하는 기법을 제안하여 왜곡된 전원 전압뿐만 아니라 전원 주파수 변동에 대해서도 우수한 전류제어 성능을 유지할 수 있도록 하였다. 제안한 기법을 적용한 경우 15%의 THD를 가진 전원 전압과 3Hz의 주파수 변동 하에서 입력 전류의 THD는 IEEE std. 519에서 규제하는 5% 이내로 제어됨을 실험을 통해 확인하였다.

참고 문헌

- [1] N. C. Park, H. S. Mok, J. K. Ji and S. H. Kim, "Current compensation method of a three phase PWM converter under distorted source voltages", Transactions of Korean Institute of Power Electronics, Vol, 13, No. 5, pp. 352-359, Aug, 2008.
- [2] 안창현, 김상훈, "왜곡된 전원 전압 하에서 단상 PWM 컨버터의 제어기법", 전력전자학회논문집, pp. 19-20, 2014.
- [3] C. H. Ann and S. H. Kim, "The control of a single phase PWM converter under a frequency variation in a power grid", Journal of Telecommunications and Information, Vol. 19, pp.11-14, 2015.