

불평형 전원 전압을 갖는 PWM 컨버터의 입력 전류 고조파 분석

구자경, 김상훈
강원대학교

Analysis of Input Characteristic in the PWM Converter with Unbalance Supply

Khoo Ja Kyeung, Kim Sang Hoon
Kangwon National University

ABSTRACT

PWM(Pulse Width Modulation) 컨버터에서 공급 전압의 품질은 교류 입력전류 및 직류 출력전압의 품질에 큰 영향을 미친다. 공급전압이 불평형 또는 고조파가 포함된 경우에는 평형 전원전압의 경우보다 입력 전류의 고조파 및 역률 특성이 저하된다. 또한 컨버터 입력 측의 사용된 인덕턴스의 용량에 따라 입력전류의 고조파 및 역률 특성이 달라진다. 본 논문에서는 입력측 인덕턴스 값의 변화에 따른 단상 및 삼상 PWM 컨버터의 입력전류 고조파와 역률 관계를 해석하였는데, 특히 입력 전압에 고조파를 포함한 경우와 불평형인 상태까지 확장하여 성능을 평가하였다. 이러한 결과를 통해 입력 인덕턴스 설계 값을 선정하는데 기준을 제시하였다.

1. 서론

기준에 부하들은 대부분 조명, 난방 등의 선형적인 부하들이었다. 이러한 부하들은 공급 전압의 품질에 민감한 편이 아니었다. 하지만 최근 부하들은 전력 전자 기술을 응용한 기기들을 내장하여 그 자체가 공급되는 전력의 품질에 매우 민감해지는 경향을 가지게 되어 부하 시스템 전체가 전력 품질(Power Quality)에 매우 민감하게 되었다. 또한, 최근 전원공급 시스템에서의 전압은 이러한 기기들로 인하여 불평형이 되거나 고조파가 포함되는 등 전력 품질이 저하되고 있다.^{[1],[2]}

직류 전력을 필요로 하는 부하들은 교류 전력으로부터 직류 전력을 얻기 위해 단상 또는 삼상 다이오드 정류기 또는 PWM 컨버터를 사용한다. 다이오드 정류기의 경우 비선형적인 특성을 갖고 있기 때문에 전압이 순수한 정현파라 할지라도 입력 전류의 왜곡과 역률 저하 등의 전력품질 저하 현상을 피할 수 없다. 다이오드 정류기를 사용할 경우 이와 같은 문제점이 발생하기 때문에 출력 직류 전

압을 일정하게 제어하면서, 교류입력 전류파형을 정현파로 제어하여 고조파를 감소시킬 수 있으며 교류입력의 역률을 1로 제어 가능한 PWM 컨버터의 사용이 증가되고 있다.^{[5],[6]} 이러한 PWM 컨버터에 공급되는 교류 전압의 품질은 교류 입력 역률, 교류 입력전류의 파형 및 THD와 직류 출력전압의 품질에 큰 영향을 미친다. 공급전압이 불평형 또는 고조파가 포함된 경우에는 평형 전원전압의 경우보다 입력 전류의 고조파 및 역률 특성이 저하된다. 컨버터 입력 측의 사용 되는 인덕턴스의 용량에 따라 이러한 입력 전류의 고조파 및 역률 특성은 달라질 수 있다. 본 논문에서는 입력 단상 인덕턴스 값에 따른 단상 및 삼상 PWM 컨버터의 입력전류 고조파와 역률 관계를 해석하였는데, 특히 입력 전압에 고조파를 포함한 경우와 불평형인 상태까지 확장하여 성능을 평가하였다. 이를 통해 PWM 컨버터에서 사용되는 적절한 입력 인덕턴스 용량을 선정하는 기준을 제시하였다.

2. PWM 컨버터 시스템

교류 입력 전원으로부터 직류출력 전압을 얻기 위한 3상 PWM 컨버터 시스템은 그림 1과 같다.

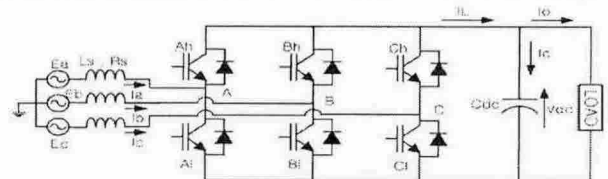


그림 1 3상 전파 PWM 컨버터 시스템
Fig. 1 Three Phase, Full Bridge PWM Converter System

불평형 전원 전압에 대해 전압 불평형 조건을 계량화하기 위해 불평형 지수(Unbalance Factor : UF)를 도입하였다.^[5] 불평형 지수는 abc 상으로 표현되는 3상 전원 전압 v_{an} , v_{bn} , v_{cn} 으로부터 식(1)과 같이 정상분 전압

v_p , 역상분 전압 v_n , 영상분 전압 v_0 를 구한 후, 정상분 크기에 대한 역상분 전압의 크기의 비로 식(2)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $a = \exp(j\frac{2\pi}{3})$ 이다.

$$|UF| \angle \phi_{UF} \equiv \frac{V_n}{V_p} \quad (2)$$

PWM 컨버터에서 입력전류의 왜곡(distortion)의 정도는 기본파에 더해진 직류성분과 고조파성분의 양, 즉, 전 고조파(total harmonics)에 따라 정해진다. 이를 평가하기 위한 지수로 전고조파 왜율(THD : Total Harmonic Distortion)이 사용된다. 비정현 파형의 전류에 대한 전 고조파 왜율 THD_i 은 식(3)과 같다. 또한 PWM 컨버터 시스템의 역률(PF : Power Factor)을 평가하기 위해 식(4)을 사용하였다.

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} I_n^2}}{I_1} \quad (3)$$

$$PF = \frac{V_1}{V} \frac{I_1}{I} \cos \phi_1 \quad (4)$$

여기서, $\cos \phi_1$ 는 기본파 전압에 대한 기본파 전류의 위상이다.

3. PWM 컨버터 시스템의 전력품질 분석

단상 및 3상 PWM 컨버터 시스템에서 입력 인덕턴스 값의 변화에 따른 입력 전류의 THD와 역률을 분석하기 위해 MATLAB Simulink를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 단상과 삼상 PWM 컨버터 시스템의 공급 전압은 60Hz의 220V이며, $\cos \phi_1$ 을 1로, 출력 직류 전압은 400V로 제어하였다. 스위칭 주파수는 1kHz이다.

3.1 단상 PWM 컨버터 시스템^[3]

PWM 방식으로는 SPWM(Sinusoidal PWM)을 사용하였다. 단상 PWM 컨버터 시스템의 경우 입력 전압에 고조파가 함유되어있지 않은 순수한 정형파와 고조파가 함유되어 있는 경우에 대해 해석하였다. 고조파가 함유되어 있는 경우에는 5차 고조파 5%와 7%의 7차, 11차 고조파가 포함된 전원 전압을 사용하였다. 그림 2의 시뮬레이션 결과는 고조파가 포함되지 않은 전원전압과 고조파가 포함되어있는 전원전압에 대한 입력 인덕턴스 값에 따른 입력 전류의 THD 및 입력역률을 보인다. 고조파가 포함되어있는 전원전압의 경우 고조파가 포함되지 않은 전원전압에 비해 THD 및 PF 특성은 매우 저하됨을 알 수 있다. 두 경우의 모두 예상할 수 있듯이 인덕턴스 용량이 커질수록 THD 및 PF

특성은 향상되지만, 특정 인덕턴스 값(1.2mH) 이상에서 PF는 크게 향상되지는 않음을 알 수 있다. 또한 인덕턴스를 크게 하더라도 전원전압 및 전류에 포함된 고조파로 인하여 역률은 고조파가 없는 경우의 값까지 이를 수는 없다. 그림 3은 일례로 0.8mH의 인덕턴스 값에서의 전원전압 및 전류파형이다.

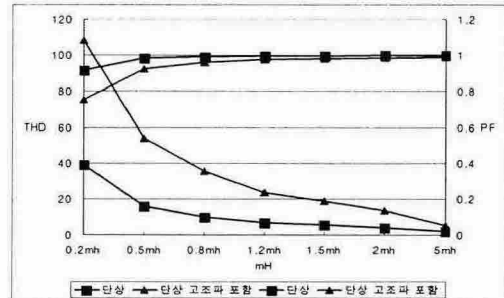


그림 2 입력 인덕턴스 값에 따른 전고조파 왜율 및 역률
Fig. 2 THD and PF as a function of input inductance

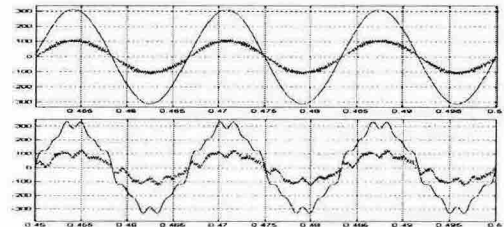


그림 3 전압 및 전류파형(평형, 고조파, 0.8mH 인 경우)
Fig. 3 Voltage and Current Wave(Balance, Harmonics)

시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 단상 PWM 컨버터 시스템에 대한 실험을 실시하였다. 실험실의 단상 전원에는 그림 4에서와 같이 3.8%의 고조파가 포함되어 있다. 이 경우에 대한 실험을 실시하여 아래 시뮬레이션과 비교하였다. 실험에 사용된 입력 인덕턴스 값은 0.8mH이고 다른 실험조건은 시뮬레이션과 동일하다. 이 경우의 실험에서는 입력 전류의 THD는 11.83%, PF는 0.9608로 측정되었고, 시뮬레이션의 입력 전류 THD는 11.38%, PF는 0.977로 거의 비슷한 값을 얻을 수 있었다.

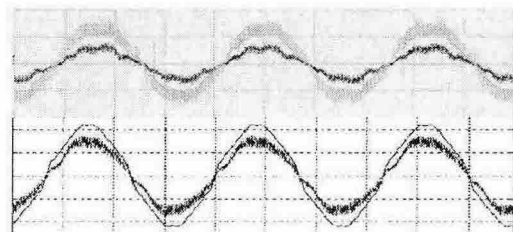


그림 4 전압 및 전류파형(시뮬레이션 및 실험, 0.8mH 인 경우)
Fig. 4 Voltage and Current Wave(Simulation and Test)

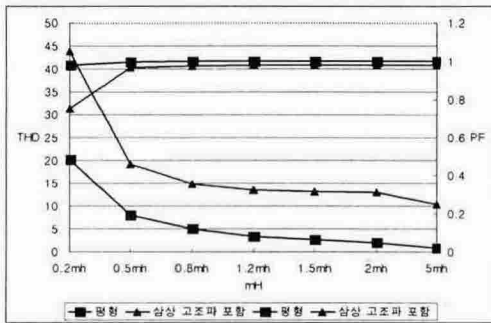
3.2 삼상 PWM 컨버터 시스템^[4]

삼상 PWM 컨버터 시스템은 SVPWM(Space Vector PWM)방식을 사용하였다. 삼상 PWM에 대해

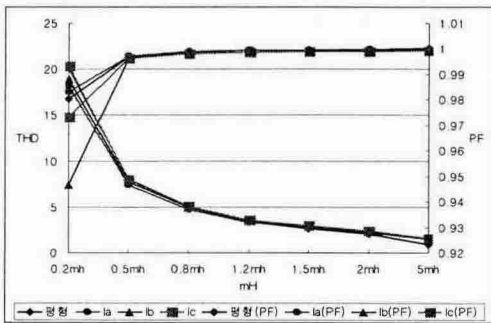
서는 입력 전압이 평형인 경우, 불평형인 경우와 고조파가 포함되어있는 경우에 대해 해석하였다. 고조파가 함유되어 있는 전원은 단상 에서와 동일하며, 불평형 입력 전압은 표1과 같이 위상의 변화는 없고, 상 전압의 크기를 변화시켜 3%, 5%의 불평형 전원을 생성하였다.

표 1 불평형 전압^[6]
Table 1 Unbalance Voltage

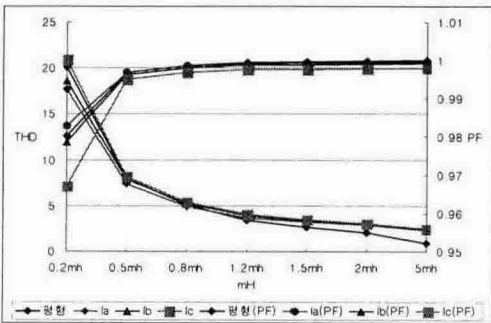
UF	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
평형	$1 \angle 0^\circ$	$1 \angle 240^\circ$	$1 \angle 120^\circ$
3%	$1 \angle 0^\circ$	$.915 \angle 240^\circ$	$.915 \angle 120^\circ$
5%	$1 \angle 0^\circ$	$.861 \angle 240^\circ$	$.863 \angle 120^\circ$
10%	$1 \angle 0^\circ$	$1.4 \angle 240^\circ$	$1.1 \angle 120^\circ$



(a) 고조파가 포함된 전원 전압의 경우



(b) 불평형 지수 3%의 전원 전압의 경우



(c) 불평형 지수 5%의 전원 전압의 경우

그림 5 입력 인덕턴스 값에 따른 입력전류의 THD 및 PF
Fig. 5 THD, PF of current as a function input inductance

그림 5의 시뮬레이션 결과로부터 단상에서의 경우와 동일하게 모든 경우 인덕턴스 용량이 커질수록 THD 및 PF 특성은 향상되지만, PF에 대해서는 특

정 인덕턴스 값 이상에서 크게 향상되지는 않음을 알 수 있다. 이 결과부터 THD나 PF 설계기준에 맞는 입력 인덕턴스 용량을 결정할 수 있는데, PF 측면에서는 0.8mH이상의 인덕턴스 용량을 선정하는 것은 성능과 경제적인 측면을 동시에 고려해 볼 때 바람직하지 않다는 것을 알 수 있다. 불평형 공급 전압의 경우에는 불평률에 따라 THD 및 역률 특성의 저하가 심화되는 것을 알 수 있다. 또한 고조파가 포함된 공급전압의 경우가 불평형 전원전압의 경우보다 THD 및 역률 특성 저하에 더 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 단상 및 삼상 PWM 컨버터에서 공급전압이 평형, 불평형, 고조파가 포함되어있는 경우 입력 인덕턴스 값에 대한 입력 역률 및 입력전류의 THD를 평가하였다. 공급 전압의 불평률과 포함된 고조파양에 따라 THD 및 역률 특성의 저하가 심화되는 것을 알 수 있으며, 이러한 특성은 컨버터에서 사용된 입력 인덕턴스 값에 따라 개선될 수 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 단상 및 삼상 컨버터 시스템에서의 입력 인덕턴스 값에 따른 입력전류의 THD와 역률의 양적인 데이터를 이용하여 경제적, 실용적인 측면에서 원하는 성능을 낼 수 있는 입력 인덕턴스 값을 결정할 수 있다.

“본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(R-2003-0-291)주관으로 수행된 과제임.”

참고 문헌

- [1] 이상준, "순간 전압 강하 보상용 직렬 보상기를 위한 새로운 PLL 및 전압 제어기에 관한 연구", 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 공학박사학위논문, 2장, 2003.
- [2] 김중경, 박영진, "3상 4선식 저압 수용가의 전압 불평형률 측정 분석," 조명·전기설비학회 논문지 제18권 제5호, pp.91-99, 2004. 11.
- [3] 이오재, "단상 GTO PWM 컨버터의 직류링크 전압제어", 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부, 공학석사학위논문, August. 1994.
- [4] 위탁 기술 개발 보고서, "교류차량 시스템용 PWM 컨버터 개발", 서울대학교 공학연구소, 1993. 12.
- [5] Prasad N. Enjeti, Phoivos D. Zogas, Mehrdad Ehsani, "Unbalanced PWM Converter Analysis and Corrective Measures", Department of Electrical Engineering Texas A&M University, 1989.
- [6] Math H. J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems : Voltage Sags and Interruptions", IEEE Press, Ch.1, 2000.