

불평형 전원 전압을 갖는 PWM 컨버터의 입·출력 특성 분석

Analysis of Input·Output Characteristics in the PWM Converter with Unbalance Supply Voltage

구 자 경* 김 상 훈**
Khoo, Ja-Kyeong Kim, Sang-Hoon

Abstract

The PWM(Pulse Width Modulated) converter for the AC to DC rectification has become attractive in the industrial variable-speed drive application and the electric utilities due to the following benefits: Nearly the sinusoidal input current with unity power factor; Controllable DC link voltage; Bidirectional power flow.

This paper presents a quantitative analysis of single and three phase PWM converter's input and output characteristics as a function of the input filter inductance under balanced and unbalanced conditions. Also, its performance under the supply voltage including harmonics is investigated by simulation with Matlab Simulink and experiments. These results provide a reference for selecting the reasonable converter's input filter inductance for given harmonics or power factor criterion.

키워드 : PWM converter, 불평형 전원전압, 고조파, 역률

Keywords : PWM(Pulse Width Modulation), unbalance supply voltage, THD, Power factor

1. 서 론

기존의 부하들은 대부분 조명, 난방 등의 선형적인 부하들이었다. 이러한 부하들은 대개 공급 전압의 순간적인 변동에 민감하지 않다. 그러나 최근의 부하들은 마이크로 프로세서를 이용한 제어 장치나 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.[1,2] 최근 전원공급 시스템에서의 전압은 여

러 가지 원인으로 인하여 불평형이 되거나 고조파가 포함되는 등 전력 품질을 저하시키고 있다. 전력 품질에 영향을 끼치는 문제점들은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 전력의 공급신뢰성에 영향을 주는 요인으로서 전력 공급이 일시적으로 완전히 중단되거나 사고 등의 원인으로 인해 전압 공급이 순간적으로 중단되었다가 다시 공급되는 것과 같은 것들이 있다. 두 번째는 전압 품질을 저하시키는 요인으로 고조파(harmonics), 전압 불평형(unbalance), 순간 전압 상승(voltage swell), 전압 노치(voltage notch) 및 순간 전압 강하(voltage sag) 등이 있다.[3] 이러한 전압 불평형은 계통의 단상 혹은 불평형 부하가 존재하거나 단상 사고 등으로 인해 발생하며, 이러한 불평형은 불특정한 고조파를 발생시키고 계통의 제어 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 전압강하를 유발시킨다. 또한 연결된 전동기의 효

* 강원대학교 전기전자정보통신공학부 석사과정

** 강원대학교 전기전자정보통신공학부 부교수,
공학박사

율을 저하시키는 등의 악영향을 미친다.

직류 전력을 필요로 하는 부하들은 교류 전력으로부터 직류 전력을 얻기 위해 단상 또는 삼상 다이오드 정류기 또는 컨버터 시스템을 사용한다. 다이오드 정류기의 경우 비선형적인 특성을 갖고있기 때문에 입력전압이 순수한 정현파라 할지라도 입력전류의 왜곡과 입력 역률 저하 등의 전력품질 저하 현상을 피할 수 없다.

다이오드 정류기의 이와 같은 문제점 때문에 출력 직류 전압을 일정하게 제어하면서, 교류 입력 전류와 정현파로 제어하여 고조파를 감소시켜 교류 입력 전류의 역률을 1로 제어 가능한 PWM(Pulse Width Modulated) 컨버터의 사용이 증가되고 있다. PWM 컨버터에 공급되는 교류 전압의 품질은 교류 입력 역률, THD 및 직류 출력 전압의 품질에 큰 영향을 미친다.[4,5] 공급전압에 불평형 또는 고조파가 포함된 경우에는 평형 전압의 경우보다 입력 전류의 THD 및 역률 특성, 출력 직류 전압의 특성이 저하된다. 컨버터 입력측에 삽입되는 인덕턴스의 값에 따라 입력 전류의 THD 및 역률 특성, 출력 직류 전압의 특성이 달라질수 있다. 본 논문에서는 입력측 인덕턴스 값에 따른 단상 및 삼상 PWM 컨버터의 입력 전류 고조파와 역률 및 출력 전압의 관계를 해석하였는데, 특히 입력 전압에 고조파를 포함한 경우와 불평형인 상태까지 확장하여 성능을 평가하였다. 이를 통해 PWM 컨버터에서의 적절한 입력 인덕턴스값을 선정하는데 기준을 제시하였다.[9,10]

2. PWM 컨버터 시스템

교류 입력 전원으로 부터 직류출력 전압을 얻기 위한 삼상 PWM 컨버터 시스템은 그림 1과 같다.

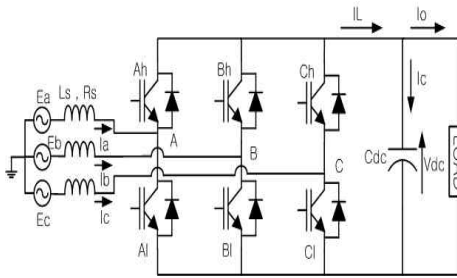


그림 1 삼상 전파 PWM 컨버터 시스템

공급전압 V_{an} , V_{bn} , V_{cn} 은 삼상 평형 전압으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{an} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t) \\ v_{bn} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{cn} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (1)$$

불평형 전압 전압에 대해 전압 불평형 조건을 계량화 하기 위해 불평형 지수(Unbalance Factor : UF)를 도입하였다.[5] 불평형 지수는 abc 상으로 표현되는 삼상 전압 전압 V_{an} , V_{bn} , V_{cn} 으로부터 식 (2)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 (3)과 같이 표현된다.

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

여기서, $a = \exp(j\frac{2\pi}{3})$ 이다.

$$|UF| \angle \Phi_{UF} \equiv \frac{V_n}{V_p} \quad (3)$$

PWM 컨버터에서 입력전류의 왜곡(distortion)의 정도는 기본파에 더해진 직류성분과 고조파성분의 양, 즉, 전고조파(total harmonics)에 따라 정해진다. 이를 평가하기 위한 지수로 전고조파 왜율(THD : Total Harmonic Distortion)이 사용된다. 비정현 파형의 전류에 대한 전고조파 왜율 THD_i 은 식 (4)과 같다.[6] 또한 PWM 컨버터 시스템의 역률(PF : Power Factor)을 평가하기 위해 식 (5)를 사용하였다.

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} I_n^2}}{I_1} \quad (4)$$

$$PF = \frac{V_1}{V} \frac{I_1}{I} \cos \phi_1 \quad (5)$$

여기서, $\cos \phi_1$ 는 기본파 전압(V_1)에 대한 기본파 전류(I_1)의 위상이다.

컨버터 시스템의 경우 boost 동작을 위해 필요로 하는 입력측 인덕턴스와 출력 직류 전압 및 입력 전류에 대해 안정 동작 영역이 있다. 단상 및 삼상 PWM 컨버터에서의 안정 동작 영역을 나타내는 관계식은 각각 식 (9)과 (10)로 나타낼 수 있다.

단상 PWM 컨버터 시스템의 경우 직류 전력(P_{dc}), 교류 전력(P_s), 전압 전압(V_s), 전압 전류(I_s)인 경우 입력 전류의 역률을 1로 제어 할수 있기 때문에 직류 전력과 교류 전력과 관계는 아래와 같다.

$$P_{dc} = P_s = V_s I_s \quad (6)$$

PWM 컨버터의 입력 전압(V_c)은 아래와 같이 표현할수 있다.

$$V_c^2 = V_s^2 + V_L^2 \quad (7)$$

여기서, $V_L = w_s L_s I_s = w_s L_s P_{dc} / V_s$ 로 표현할 수 있다. 따라서, 위 식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$V_c^2 = V_s^2 + (w_s L_s I_s)^2 \quad (8)$$

따라서 단상 PWM 컨버터의 입력 전류 값은 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$I^2 \leq \frac{(V_{dc}^2/2 - V_{an}^2)}{(wL)^2} \quad (9)$$

단상 PWM 컨버터와 같이 삼상 PWM 컨버터의 입력 전류 값 또한 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$I_a^2 \leq \frac{(V_{dc}^2/3 - V_{an}^2)}{(wL)^2} \quad (10)$$

식 (9)는 단상 PWM 컨버터 시스템에서의 안정 동작 영역에 관한 식이고, 식 (10)은 삼상 PWM 컨버터 시스템에서의 안정 동작 영역에 관한 식이다. 단상 PWM 컨버터 시스템에서의 입력 필터 인덕턴스 값은 출력 직류 전압을 400V로 제어할 경우 입력 전압(220V)과 입력 전류(80A)에 따른 입력 필터 인덕턴스 값은 식 (9)으로부터 5.89mH이상에서는 제어가 불가능하다. 삼상 PWM 컨버터 역시 출력 직류 전압을 400V로 제어할 경우 입력 상전압(127V)과 입력 전류(60A)에 따른 입력 필터 인덕턴스 값은 식 (10)으로부터 8.53mH이상에서는 제어가 불가능하다. 일정 출력 직류 전압에 대한 입력 인덕턴스 량에 따른 제어 가능한 입력 전류 값에 대한 식이다. 위의 두 식에 의해 PWM 컨버터 시스템에서의 입력 단 필터 인덕턴스 값이 제한된다.

그림 2는 단상 PWM 컨버터 시스템에서의 입력 전류 및 입력 인덕턴스 량에 따른 출력 직류 전압의 관계를 도표로 나타내었다.

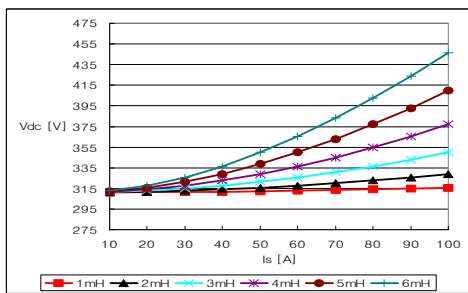


그림 2 입력 전류 및 입력 인덕턴스에 따른 출력 직류 전압

3. PWM 컨버터 시스템의 전력 품질 분석

단상 및 삼상 PWM 컨버터 시스템에서 입력 인덕턴스 값의 변화에 따른 입력 전류의 THD와 역률 및 출력 직류 전압의 특성을 분석하기 위하여 Mathwork사의 MATLAB Simulink 프로그램을 사용하여 시뮬레이션을 하였다. 단상 및 삼상 PWM 컨버터 시스템의 공급 전압은 상용 전원인 60Hz의 220V를 사용하였으며, $\cos \phi_1$ 를 1로 제어 하였으며, 출력 직류 전압은 400V로 제어 하였다. 또한 PWM 컨버터 시스템의 스위칭 주파수는 1kHz를 사용하였다.

3.1 단상 PWM 컨버터 시스템[7]

단상 PWM 컨버터 제어 방식으로는 SPWM(Sinusoidal PWM)방법을 사용하였다. 단상 PWM 컨버터 시스템의 경우 입력 전압에 고조파가 포함되어 있지 않은 순수한 정형파 입력 전압과 고조파가 포함되어 있는 입력 전원의 경우에 대해 분석하였다. 공급 전원에 고조파가 포함되어 있는 경우에는 5차 고조파 5%와 7%의 7차, 11차 고조파가 포함된 전원 전압을 사용하였다.

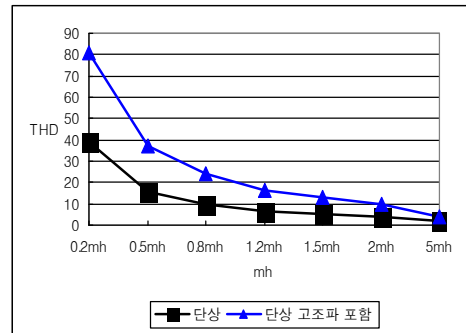


그림 3 고조파 포함된 경우의 입력 전류 THD

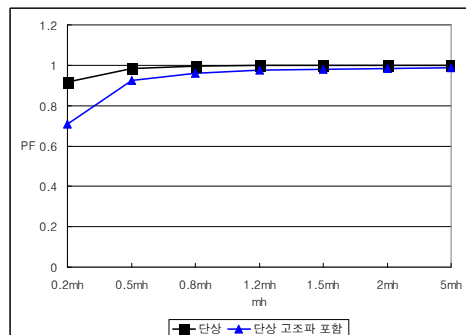


그림 4 고조파 포함된 경우의 입력 전류 PF

그림 3, 4는 전원 전압에 고조파가 포함된 경우와 고조파가 포함되어 있지 않은 순수한 정현파 입력 전원의 두가지 경우에 대한 입력 전류의 THD 및 PF를 나타낸 그림이다.

그림 3, 4의 시뮬레이션 결과의 경우 고조파가 포함되어 있지 않은 순수한 정현파의 전원 전압과 고조파가 포함되어있는 전원 전압에 대한 입력측 필터 인덕턴스 값에 따른 입력 전류의 THD 및 입력 전류의 역률을 보였다. 고조파가 포함되어있는 전원 전압의 경우 고조파가 포함되지 않은 순수한 정현파의 전원 전압에 비해 입력 전류의 THD 및 PF의 특성은 매우 저하됨을 알 수 있다.

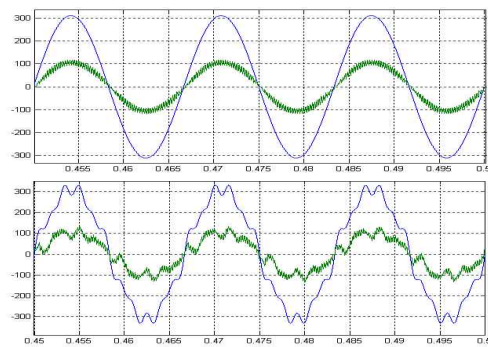


그림 5 전압 및 전류파형 (평형, 고조파, 입력 인덕턴스 0.8mH 경우)

고조파가 포함되어있는 전원 전압의 경우 고조파가 포함되지 않은 순수한 정현파의 전원 전압의 두 경우 모두 예상할 수 있듯이 입력측 필터 인덕턴스 용량이 커질수록 입력 전류의 THD 및 PF의 특성은 향상되지만, 특정 입력측 필터 인덕턴스 값(1.2mH) 이상에서는 입력 전류의 PF는 크게 향상되지 않는음을 알 수 있다.

또한 입력측 필터 인덕턴스를 크게 하더라도 전원 전압 및 전류에 포함된 고조파 성분으로 인하여 입력 전류의 역률은 고조파가 없는 경우의 값까지 이를 수는 없다.

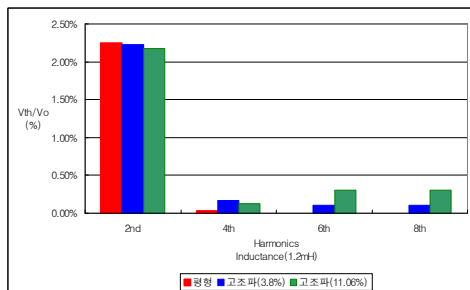


그림 6 고조파 포함된 경우의 출력 직류 전압의 고조파 특성

그림 5는 일례로 0.8mH의 입력측 필터 인덕턴스 값에서의 고조파가 포함되지 않은 순수한 정현파 전원 전압 및 전류 파형과 고조파가 포함된 전원 전압 및 전류 파형을 나타내었다.

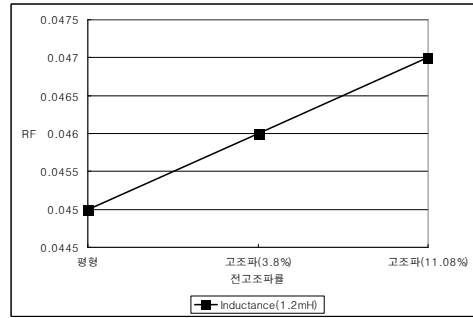


그림 7 고조파 포함된 경우의 출력 직류 전압의 리플률

그림 6은 단상 PWM 컨버터 시스템에서의 출력 직류 전압의 특성을 분석한 그림이다.

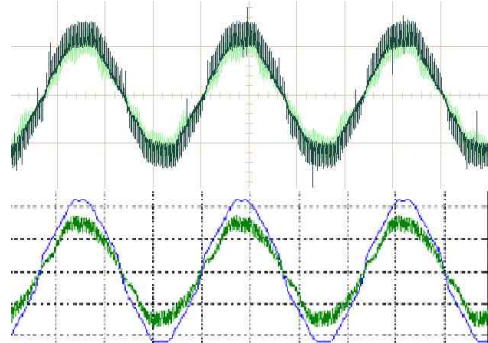


그림 8 입력 전압 및 전류파형(시뮬레이션 및 실험, 0.8mH 인 경우)

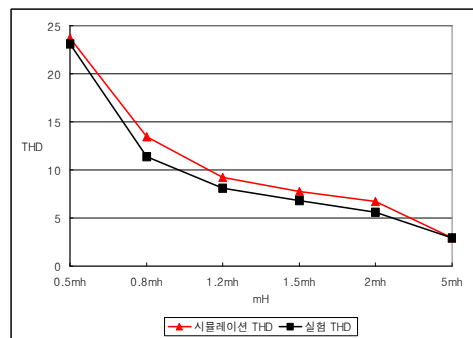


그림 9 입력 전류 THD의 실험 및 시뮬레이션 비교

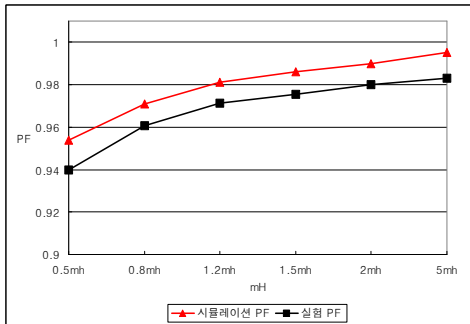


그림 10 입력 전류 PF의 실험 및 시뮬레이션 비교

고조파가 포함되어 있지 않은 순수한 정현파와 전원 전압의 경우 출력 직류 전압의 리플 성분에는 짝수 고조파중에서 2차 고조파 성분을 많이 포함하고 있으며 전원 전원에 포함된 고조파 량이 증가할수록 출력 직류 전압의 리플 성분중에서 짝수 고조파 성분이 증가하는 것을 알수 있다.

또한 그림 7에서 결과와 같이 입력 전원에 포함된 고조파 량이 증가할수록 출력 직류 전압의 리플률이 증가하는 것을 볼수 있다.

시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 단상 PWM 컨버터 시스템에 대한 실험을 실시하였다. 실험실의 단상 전원에는 그림 8에서와 같이 3.8%의 고조파가 포함되어 있다. 이 경우에 대한 실험을 실시하여 실험과 동일한 조건에서의 시뮬레이션과 비교하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 8 하단에 나타내었다. 실험에 사용된 입력측 필터 인덕턴스 값은 0.8mH이고 다른 실험조건은 시뮬레이션과 동일하다. 이 경우의 실험에서는 입력 전류의 THD는 13.83%, PF는 0.9608로 측정되었고, 시뮬레이션의 입력 전류의 THD는 11.38%, PF는 0.977로 측정되었다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 거의 비슷한 값을 얻을 수 있었다.

위 그림은 그림 8의 실험결과를 증명하기 위해서 위 실험 조건과 동일한 시뮬레이션을 통해 입력 전류의 THD 및 PF를 분석한 그림이다. 그림 9, 10에서 볼수 있듯이 실험과 시뮬레이션간의 비교에서 약간의 오차가 있는 것으로 나타났다. 그 이유는 실험 조건시 입력 전원을 변압기를 통하여 전원 레벨을 낮추어 실험한 결과 변압기의 누설 인덕턴스 량과 배선에서의 스트레이 인덕턴스(Stray Inductance)의 량에 따른 오차에 의해 시뮬레이션과 실험의 결과에 차이가 있는것도로 추정된다.

그림 11은 단상 PWM 컨버터 시스템 실험결과 입력측 필터 인덕턴스 값의 가변에 따른 입력 전류의 파형을 나타낸 그림이다. 입력측 필터 인덕턴스의 값이 증가할수록 정현파에 가까운 입력 전류 파형이 나타나는 것을 알수 있다.

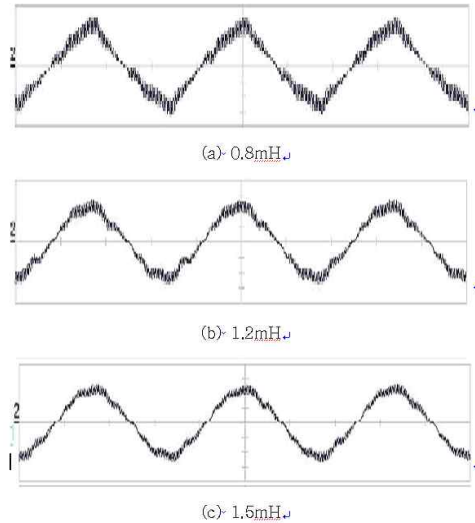


그림 11 입력측 필터 인덕턴스 량에 따른 입력 전류 파형

3.2 삼상 PWM 컨버터 시스템[8]

삼상 PWM 컨버터 시스템의 제어방식으로는 SVPWM(Space Vector PWM)방식을 사용하였다. 삼상 PWM 컨버터 시스템에 대해서는 입력 전압이 평형인 경우, 불평형인 경우와 고조파가 포함되어 있는 경우에 대해서 해석하였다. 고조파가 포함되어 있는 전원 전압의 경우 단상 PWM 컨버터 시스템에서와 동일하며, 불평형 입력 전압의 경우는 표1과 같이 세 개의 위상은 일정하게 유지시키고, 입력 전압의 상 전압의 크기를 가변시켜 3%, 5%, 10%의 불평형 전원 레벨을 생성하였다.

아래 그림은 0.8mH의 입력측 필터 인덕턴스의 경우에 대한 고조파 성분이 포함된 입력 전원에 대한 입력 전압 및 입력 전류파형을 도시하였다.

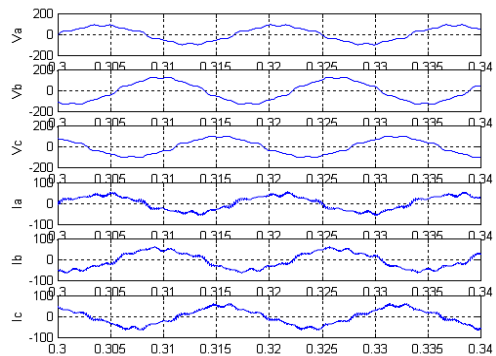


그림 12 고조파가 포함된 입력 전압 및 전류 파형(0.8mH인 경우)

표 1 불평형 전압[6]

UF	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
평형	$1 \angle 0^\circ$	$1 \angle 240^\circ$	$1 \angle 120^\circ$
3%	$1 \angle 0^\circ$	$.915 \angle 240^\circ$	$.929 \angle 120^\circ$
5%	$1 \angle 0^\circ$	$.861 \angle 240^\circ$	$.863 \angle 120^\circ$
10%	$1 \angle 0^\circ$	$1.4 \angle 240^\circ$	$1.1 \angle 120^\circ$

표 1은 식 (2)를 사용하여 불평형 전원 전압을 세 경우에 대해 나타내었다.

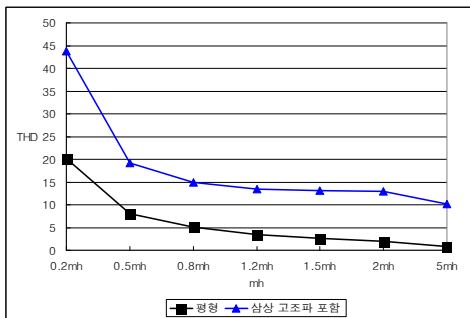


그림 13 고조파 포함된 경우의 입력 전류 THD

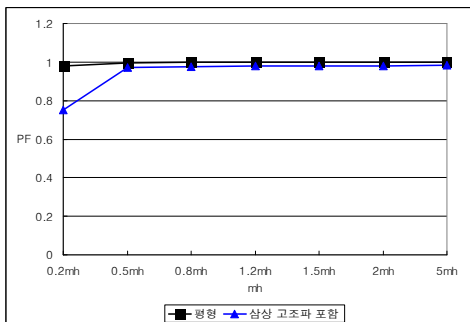


그림 14 고조파 포함된 경우의 입력 전류 PF

그림 13, 14의 시뮬레이션 결과로부터 단상 PWM 컨버터 시스템에서의 경우와 동일하게 모든 경우의 인덕턴스 용량이 커질수록 고조파가 포함된 전원 전압의 입력 전류의 THD 및 PF의 특성은 향상되지만, 입력 전류의 PF에 대해서는 특정 인덕턴스 값 이상에서는 크게 향상되지는 않음을 알 수 있다.

이 결과로부터 불평형 전원 전압일 경우의 입력 전류의 THD 및 PF의 설계기준에 맞는 입력측 필터 인덕턴스 용량을 결정할 수 있는데, 입력 전류의 PF 측면에서는 0.8mH이상의 입력측 필터 인덕턴스 용량을 선정하는 것이 PWM 컨버터 시스템의 성능과 경제적인 측면을 동시에 고려해 볼 때 바람직하지 않다는 것을 알 수 있다.

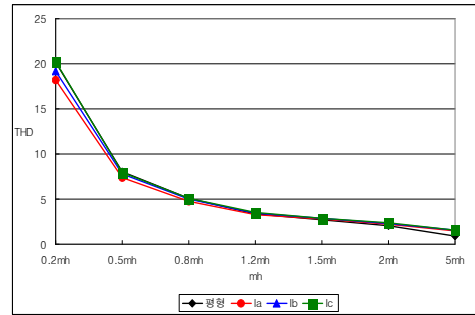


그림 15 불평형 3%의 경우의 입력 전류 THD

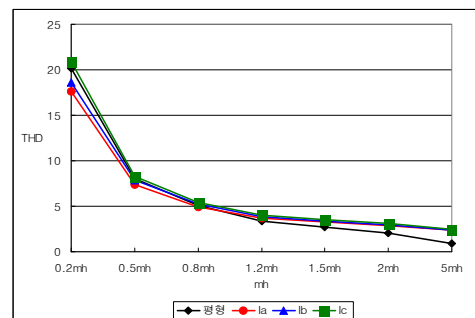


그림 16 불평형 5%의 경우의 입력 전류 THD

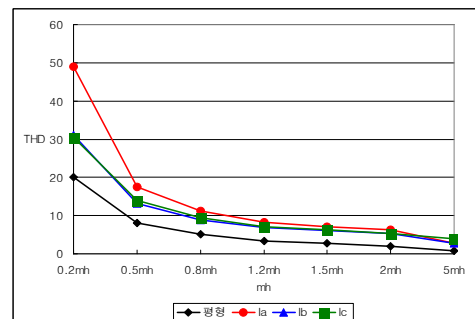


그림 17 불평형 10%의 경우의 입력 전류 THD

불평형 공급 전압의 경우에는 공급 전압의 불평형률에 따라 입력 전류의 THD 및 역률 특성의 저하가 심화되는 것을 알 수 있다.

그림 21은 공급 전압의 불평형률에 따른 출력 직류 전압의 특성을 분석한 그림이다. 그림에서도 알 수 있듯이 입력 전원의 불평형률이 증가할수록 출력 직류 전압의 리플성분에 대한 2차 고조파 성분이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 불평형률이 증가할수록 고차 짝수 고조파 성분이 나타나는 것을 알 수 있다.

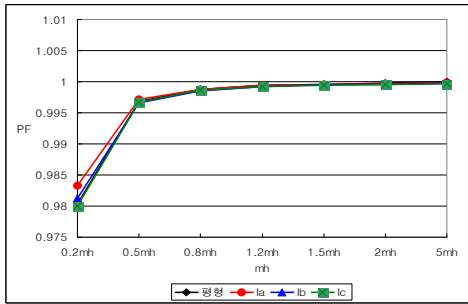


그림 18 불평형 3%의 경우의 입력 전류 PF

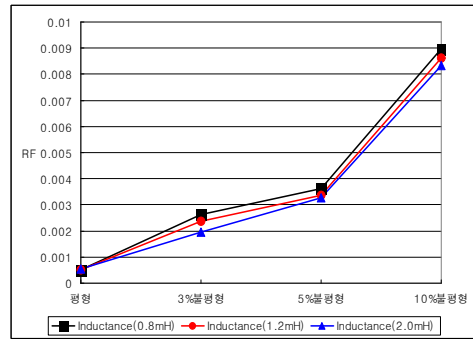


그림 22 전압 불평형률에 따른 출력 직류 전압의 리플률

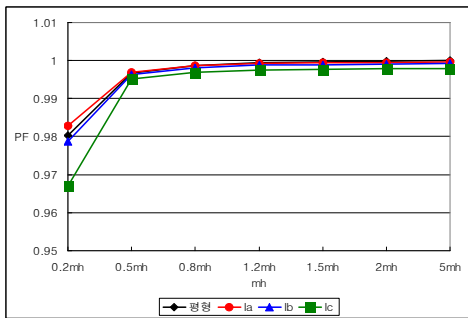


그림 19 불평형 5%의 경우의 입력 전류 PF

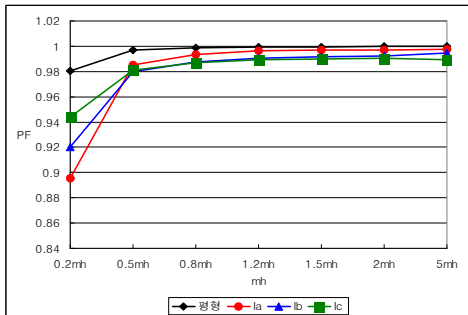


그림 20 불평형 10%의 경우의 입력 전류 PF

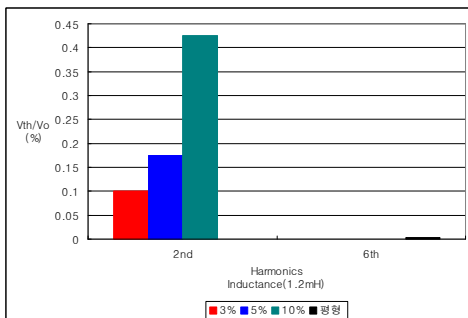


그림 21 전압 불평형률에 따른 출력 직류 전압의 고조파 특성

그림 22 입력 전원의 불평형률에 따른 출력 직류 전압의 리플률을 나타내었다. 입력 전원의 불평형률이 증가할수록 출력 직류 전압의 리플률 또한 증가하는 것을 알 수 있다.

삼상 PWM 컨버터 시스템의 경우 고조파가 포함된 경우의 입력 전원의 경우 불평형 전원 전압의 경우보다 입력 전류의 THD, PF 및 출력 직류 전압의 특성 저하에 더 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 단상 및 삼상 PWM 컨버터 시스템의 입력 전류의 THD 및 역률과 출력 직류 전압의 특성에 대해서 분석하였다. 평형인 경우의 공급 전압에 대한 입력측 필터 인덕턴스 값에 따른 입력 전류의 THD 및 PF를 분석하였고, 불평형 및 고조파가 포함되어 있는 공급 전압의 경우 입력측 필터 인덕턴스 값에 따른 입력 전류의 THD 및 PF를 확대 분석하여 평가하였다. 평형인 상태의 공급 전압에 비해 공급 전압의 불평형률 정도와 고조파의 포함량에 따라 입력 전류의 THD 및 역률 특성의 저하는 심화되는 것을 알 수 있다. 이러한 문제점은 불특정한 고조파를 발생시키거나, 계통의 제어 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 전압강하를 유발시킨다. 또한 연결된 전동기의 효율을 저하시키는 등의 악영향을 미친다. 고조파가 포함된 전원 전압의 경우 입력 전류의 THD 및 PF의 특성이 저하되는 것을 볼 수 있고, 출력 직류 전압의 특성 또한 저하되는 것을 볼 수 있다. 불평형률에 따른 출력 전압이 제한되는 것을 알 수 있었다. 위와 같은 특성은 PWM 컨버터의 입력 인덕턴스 값에 따라 개선될 수 있다.

따라서 본 논문에서 제시한 단상 및 삼상 PWM 컨버터 시스템에서의 입력측 필터 인덕턴스 값에 따른 입력 전류의 THD와 역률과 직류 출력 전압의 특성의 양적인 데이터를 이용하여 경제적, 실용적인 측면에서 원하는 성능을 낼 수 있는 입력 인덕턴스 값을 결정할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. McGranaghan, "Overview of Power Quality Standards," PQ Network Internet Site, <http://www.pqnet.electrotek.com/pqnet>.
- [2] Power Quality Tutorial, "PQ103 - Equipment Sensitivity Basics," Power Quality Assurance Internet Site, <http://www.powerquality.com/pqpark>
- [3] 이상준, "순간 전압 강하 보상용 직렬 보상기를 위한 새로운 PLL 및 전압 제어기에 관한 연구", 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부, 공학박사학위논문, August. 2003.
- [4] Math H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems : Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press, 2000.
- [5] Mohan and Underand and Robbins, "Power Electronics", John Wiley & Sons INC, 1995.
- [6] 김종겸, 박영진, "3상 4선식 저압 수용가의 전압 불평형률 측정 분석", 조명·전기설비학회 논문집, 제18권, 제5호, pp.91-99, 2004. 11.
- [7] 이오재, 단상 GTO PWM 컨버터의 직류링크 전압제어, 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부, 공학석사학위논문, August. 1994.
- [8] 위탁 기술 개발 보고서, 교류차량 시스템용 PWM 컨버터 개발, 서울대학교 공학 연구소, 1993. 12.
- [9] Prasad N. Enjeti, Phoivos D. Ziogas, Mehrdad Ehsani, "Unbalanced PWM Converter Analysis and Corrective Measures", Department of Electrical Engineering Texas A&M University, 1989.
- [10] Navid R. Zargari, Geza Joos, and Phoivos D. Ziogas, "A Performance Comparison of PWM Rectifiers and Synchronous Link Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 41, NO. 5, 1994.