

가변형 수동 고조파 필터에 의한 단상 무정전전원장치의 고조파 저감에 관한 연구

A Study on Harmonic Reduction of Single-phase UPS with Variable Passive Harmonic Filters

김 성 삼*, 황 선 환**★

Sung-Sam Kim*, Seon-Hwan Hwang**★

Abstract

This paper proposes a variable passive harmonic filter for reduction and improvement of harmonics and power factor of single-phase uninterruptible power supply(UPS) with full bridge rectifier. Recently, UPSs have excellent harmonic and power factor operation characteristics by applying 2-level or more levels of power conversion methods. On the other hand, the single-phase UPS of the full bridge rectifier seriously causes the third, fifth, and seventh harmonics, and the power factor reduction on the grid side. Therefore, we present a variable passive harmonic filter for eliminating $(2n+1)$ order harmonics and improving the power factor generated by the full bridge rectifier operation. In order to evaluate the performance of the proposed variable harmonic filter, the its validity is verified by various simulations and experiments.

요 약

본 논문에서는 정류 브리지 다이오드를 갖는 단상 무정전전원장치의 전원측 고조파 및 역률 개선을 위한 가변형 고조파 필터를 제안한다. 2레벨 이상의 전력변환방식을 적용한 무정전전원장치는 전원측 고조파 및 역률 특성이 우수한 반면, 전 브리지 방식의 무정전전원장치는 전원측에 제 3고조파, 제 5고조파, 제 7고조파 및 역률 저하를 심각하게 야기한다. 이에 따라 단상 전 브리지 동작에 의해 야기된 $(2n+1)$ 차 고조파 제거 및 역률 개선을 위한 가변형 고조파 필터를 제안하고자 한다. 제안한 가변형 고조파 필터의 성능을 평가하기 위해 다양한 시뮬레이션과 실험을 진행하여 타당성을 검증하였다.

Key words : Uninterruptible power supply, Total harmonic distortion, Variable passive harmonic filters, Power factor improvement, Harmonic reduction

* Dept. of Smart Electricity, Korea Polytechnic Colleges

** Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University

★ Corresponding author

E-mail : seonhwan@kyungnam.ac.kr, Tel : +82-55-249-2744

※ Acknowledgment

This research was supported by National Research Foundation of Korea(NRF-2017R1D1A1B03031807).

Manuscript received Jun. 7, 2019; revised Jun. 17, 2019; accepted Jun. 25, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

무정전전원장치(Uninterruptible Power Supply, UPS)는 상용전원 또는 예비전원에 전압변동, 순간 정전 및 주파수 변동 등이 발생하더라도 부하측에 정전압 및 정주파수의 안정적인 교류전원을 공급하는 장치이다[1-2]. 최근에는 무정전전원장치가 분산전원 및 에너지저장시스템과 연계되어 효과적인 전력공급에 기여를 하고 있다[3-5].

하지만, 전원측 전력변환방식으로 다이오드 정류 회로를 갖는 UPS 또는 전력변환장치는 입력전류에 많은 저차 고조파를 포함하고 있고 그 결과 역

률에도 악영향을 미친다[6-8]. 이를 위해 일반적으로 진상용 콘덴서를 삽입하여 역률 개선을 시도하고 이로 인해 회로에는 일반 유도회로와 달리 감쇠진동의 과도현상이 발생하고 전력공급 시 돌입전류가 발생할 수 있다. 이로 인한 고조파를 억제하기 위해 콘덴서 회로에 직렬로 그림 1과 같이 리액터를 삽입하여야 한다. 추가적으로 기기 및 장치들로부터 발생된 고조파는 발생설비에만 머무르지 않고 전력계통 전체로 유입되어 다른 전력설비에도 악영향을 발생시킨다. 일반적인 고조파의 영향은 콘덴서 과열, 변압기 과열, 케이블 과열, 역률저하, 전력 손실 등을 야기하고 역률저하와 전력손실 측면만 보더라도 고조파 발생은 에너지 손실이라고 볼 수 있다.

단상 전원을 사용하는 현장에서 발생하는 고조파의 유형은 크게 제 3고조파, 제 5고조파 및 제 7고조파 유형이 함께 발생하며 주로 발생하는 유형은 그림 2와 그림 3과 같이 부하의 종류 또는 변압기 형식에 따라 각각 다르다. 실제 산업현장에서는 3고조파 또는 5고조파용 리액터를 설치하지만 현장에서 발생하는 고조파에 적절하게 대처하지 못하고 있다. 이때 리액터 적용의 불합리함을 해결해 주고 부하에서 발생하는 고조파의 종류에 따른 가변형 리액터 및 고조파 제거용 필터를 적용하게 되면 고조파 제거 및 역률 개선 효과를 얻을 수 있다.

따라서 본 논문에서는 전 브리지 다이오드를 갖는 단상 UPS의 저차 고조파 및 역률 개선을 위한 가변형 고조파 필터를 제안하였다. 이를 위해서 전 브리지 정류회로의 전원측 고조파 분석과 역률 개선용 리액터 및 저차 고조파 제거용 수동필터를 설계하고 제안한 리액터 및 고조파 필터의 성능을 비

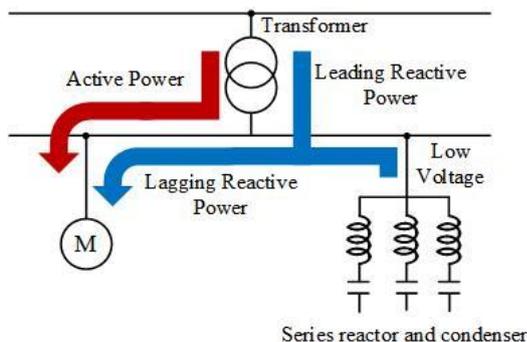


Fig. 1. Power factor Improvement of the series reactor and the condenser.

그림 1. 직렬리액터와 콘덴서군의 역률 개선

교 검토하기 위해 다수의 시뮬레이션과 실험을 진행하여 역률 개선 및 고조파 저감에 효과적임을 검증하고자 한다.

II. 본론

2.1 가변형 고조파 LLC필터 설계

전 브리지 정류회로를 갖는 단상 UPS의 구성은 그림 4와 같이 단상 전원, 전파 정류다이오드, 직류단, 풀 브리지 인버터, 필터 및 부하 등으로 이루어져 있다. 이 경우, 부하측에 전력을 공급하는 과정에서 직류단 전압의 충/방전 동작이 수행된다. 그 결과 전원측 전류에 3상 전파 정류회로에서는 거의 발생되지 않는 3고조파 성분이 존재하게 되며, 특히 3고조파 성분이 5차 및 7차 고조파 성분에 비해 많은 성분을 차지하게 된다.

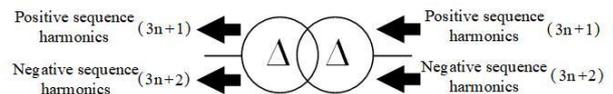


Fig. 2. Harmonics occurrence and shift in a three-phase three-wire transformer.

그림 2. 3상 3선식 변압기에서의 고조파 발생 및 이동

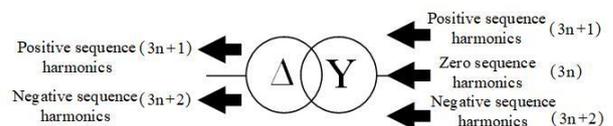


Fig. 3. Harmonics occurrence and shift in a three-phase four-wire transformer.

그림 3. 3상 4선식 변압기에서의 고조파 발생 및 이동

교조파 제거용 수동필터를 설계함에 있어 5차 및 7차 고조파 제거를 중점으로 한 기존의 3상 전파정류회로용 필터 설계를 단상 전파정류회로에서는 3차 고조파 성분을 저감시키는데 주안점을 두어야 한다. 이를 통해 저차 고조파에 의한 역률 저하 특성을 개선할 수 있다.

먼저 전원측 회로의 필터를 설계함에 있어 All IGBT 방식의 UPS가 아니고 단순 전파정류 동작을 하기 때문에 60[Hz] 기준으로 역률 개선 및 고조파 성분을 저감할 수 있는 수동 동조필터를 그림 5와 같이 적용하고자 한다.

그림 5의 간략화된 등가회로를 좀 더 구체적으로

표현하면 그림 6과 같이 전원측 임피던스 Z_s 와 수동필터의 임피던스 Z_f 로 나타낼 수 있다. 전파 정류회로에서 발생한 고조파 전류 i_h 를 직렬공진회로 즉, 고조파용 저임피던스 회로를 통해서 식 (1)과 같이 고조파 전류를 흡수할 수 있다.

$$i_{hf} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_f} i_h \tag{1}$$

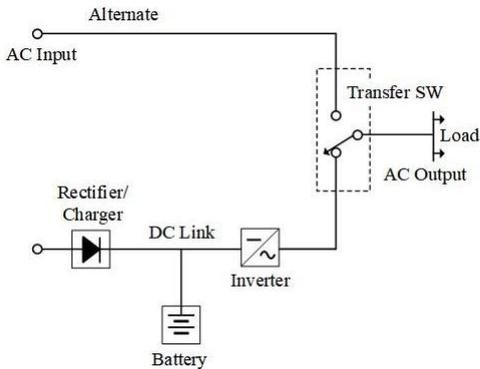


Fig. 4. Single-phase UPS system configuration with full bridge rectifier.

그림 4. 전파 정류회로를 갖는 단상 UPS 시스템 구성도

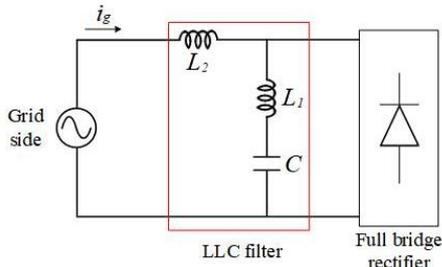


Fig. 5. Simplified equivalent circuit of grid side with LLC filter.

그림 5. LLC 필터를 갖는 간략화된 전원측 등가회로

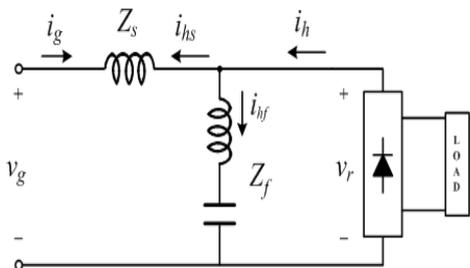


Fig. 6. Equivalent circuit for single-phase full bridge rectifier circuit.

그림 6. 단상 전파 정류회로의 등가회로

그림 6에서 부하측에서 전원측으로 흐르는 전류 i_h 를 저감하기 위해서는 식 (2)에서 알 수 있듯이

Z_f 가 '0'이 되어야 한다. 그러나 이는 현실적으로 매우 힘들 뿐만 아니라 전원측 임피던스 Z_s 는 매우 작은 임피던스를 가지기 때문에 수동필터만으로 고조파 전류를 완전히 제거하기가 어렵다.

$$i_{hs} = \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} i_h \tag{2}$$

따라서, 본 논문에서는 식 (2)의 전원측 임피던스 영향을 고려하여 전원과 동조필터 사이에 별도의 교류 리액터(ACL)를 추가하여 직렬공진 동조필터에 의해 제거되지 않은 높은 차수의 고조파 성분을 추가적으로 흡수하는 역할을 수행함과 동시에 전원측 용량 변동 및 UPS의 정전, 정전복귀 및 과부하 등의 동작 상태에 따른 입력측 역할을 개선하고자 한다.

단상 UPS 입력전류와 전압은 정현파가 아니고 변형되어 있기 때문에 입력 역률이 저하되고 입력의 변형률은 전원용량이 커질수록 높아진다.

이러한 원인으로 전원측 교류 리액터의 선정은 전원용량에 따라 다르나, 일반적으로 선간 전압강하가 3~5%의 값으로 되는 것을 선정한다.

2.1.1 전원측 교류 리액터 설계

전원측과 동조필터 간의 고조파 대책 및 역할 개선을 위한 3상 전파정류회로 적용시의 교류 리액터에 의한 전압강하 V_{drop} 은 아래와 같다.

$$V_{drop} = V_{LL} \times V_{rate} (3 \sim 5\%) \tag{3}$$

3상 전파정류회로의 선간 전압강하율 V_{rate} 는 3~5% 범위 내에서 선택하며, 일반적으로 3%를 적용하나, 직류단에 추가 직류 리액터가 없고 고조파 성분을 좀 더 효과적으로 억제해야하는 필요성이 있는 시스템에서는 5%를 사용하기도 한다. 이에 의한 계산한 결과는 다음과 같다.

$$V_{drop_3phase} = 220 \times 0.05 = 11[V] \tag{4}$$

식 (4)의 3상 전파 정류회로상의 교류 리액터 전압강하 분은 11[V]이며, 이를 단상 전파정류회로에 적용할 경우, 단상 UPS용량인 10 [kVA]를 고려하여 정격전류를 반영하여 계산하면 최종 인덕턴스 L_s 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_s = V_{drop} / (2\pi f I_{rated})$$

$$= 11 / (2\pi \times 60 \times 15.1) \approx 1.93 [mH] \quad (5)$$

2.1.2 역률개선용 커패시터의 용량 계산

그림 6의 등가회로를 통해 계통의 역률을 일정치 이상으로 유지하기 위한 수동 LC 동조필터 내의 역률용 커패시터 용량은 식 (6)과 같이 정리할 수 있다.

$$Q_c = P_L \times \left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_1}}{\cos \theta_1} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_2}}{\cos \theta_2} \right) \quad (6)$$

여기서, $Q_c [kvar]$ 는 커패시터 용량, $P_L [kW]$ 는 전부하 용량, $\cos \theta_1$ 는 현재 역률, $\cos \theta_2$ 는 목표 역률이다.

개선 전 역률은 0.66이었고, 이의 역률을 0.81 이상으로 하기 위하여 필요한 커패시터 용량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_c = 9 \times (1.138 - 0.724) \approx 3.726 [kvar] \quad (7)$$

이를 통해 역률 개선용 커패시터의 리액턴스 X_c 를 도출하면 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$X_c = \frac{V_{LL}^2}{Q_c} = \frac{V_{LL}^2}{var} = \frac{220^2}{3726} \approx 12.99 [\Omega] \quad (8)$$

식 (8)을 통해서 그림 6의 LC동조필터의 커패시턴스를 계산하면 아래와 같다.

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi(60)(12.99)} \approx 204.3 [\mu F] \quad (9)$$

2.1.3 n차 고조파 제거용 리액터 설계

n차 고조파에서 공진 현상을 이용하여 리액터 값을 계산할 경우, 커패시터가 식 (9)와 같이 선정이 되면 인덕턴스는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \frac{1}{C \times (2\pi f_n)^2}$$

$$= \frac{1}{204.3 \times 10^{-6} \times (2\pi \times 60 \times n)^2} \quad (10)$$

3차 고조파 제거용 리액터의 경우, 커패시터의 열화 등을 고려하여 2.7차에 공진하도록 하여 나타내면 식 (11)과 같다.

$$L = \frac{1}{204.3 \times 10^{-6} \times (2\pi \times 60 \times 2.7)^2} \approx 4.72 [mH] \quad (11)$$

5차와 7차 고조파 제거용 리액터의 경우, 4.7차와 6.7차에 공진하도록 하여 나타내면 식 (12)와 식 (13)로 나타낼 수 있다.

$$L_{5th} = \frac{1}{204.3 \times 10^{-6} \times (2\pi \times 60 \times 4.7)^2} \approx 1.56 [mH] \quad (12)$$

$$L_{7th} = \frac{1}{204.3 \times 10^{-6} \times (2\pi \times 60 \times 6.7)^2} \approx 0.768 [mH] \quad (13)$$

2.2 시뮬레이션 결과

그림 7은 교류 리액터와 LC 수동필터의 동작특성을 위한 시뮬레이션 블록도를 보여주고 있다.

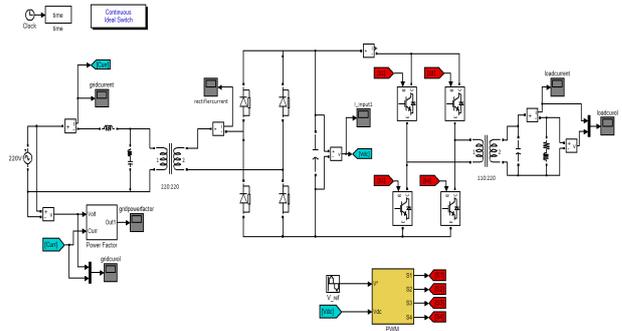


Fig. 7. Simulation block diagram with a LLC filter.
그림 7. LLC 필터를 갖는 시뮬레이션 블록도

시뮬레이션은 교류 리액터와 필터를 추가하지 않은 상태에서 발생하는 고조파 성분에 대한 분석과 3차, 5차 고조파용 필터 적용 후로 진행을 하였다. 그림 8과 그림 9는 각각 3차 및 5차 고조파 제거용 필터 사용에 따른 FFT 결과 및 파형을 나타낸다. 시뮬레이션 결과 제거하고자 하는 고조파 성분이 설계된 파라미터에 맞게 억제됨을 확인 할 수 있었다. 표 1에서는 3차 및 5차 고조파용 필터 적용 시 3차, 5차 및 7차 고조파 성분의 THD 결과값을 보인다. 표 1에서 THD 저감을 위해서는 5차 이상의 고조파 성분을 억제하는 것보다는 3차 고조파 성분을 억제하는 방향으로 필터를 설계하는 것이 필요하다. 설계된 필터에 의해 3차와 5차 고조파 성분은 필터 전 대비 크게 개선됨을 확인 할 수 있었으며 3차 고조파 성분은 4.4 [%]가 향상됨을 보이고 있다.

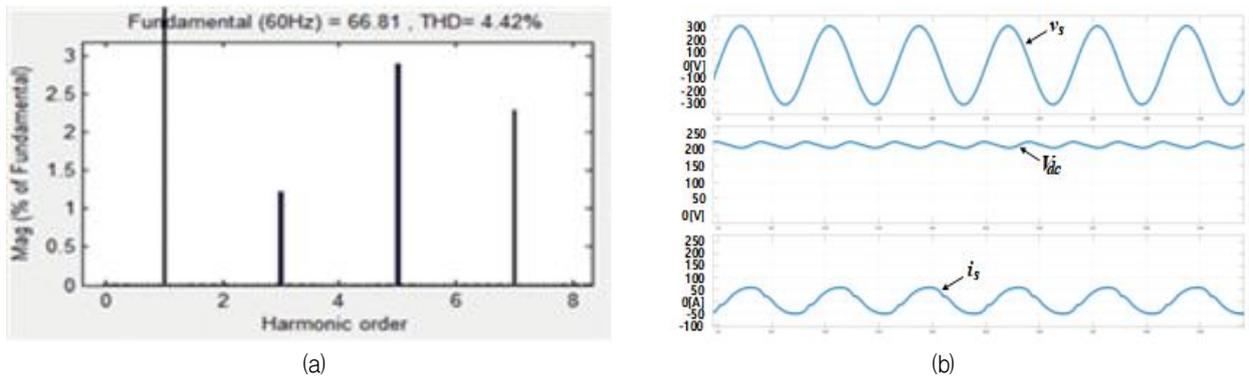


Fig. 8. Waveforms of LLC filter for reducing 3rd harmonic component, (a) FFT result of phase current, (b) waveforms of phase current, grid voltage and DC link voltage.

그림 8. 3차 고조파 제거를 위한 LLC필터의 시뮬레이션 결과, (a) 상전류의 FFT 결과, (b) 상전류, 계통전압 및 직류단 전압의 파형

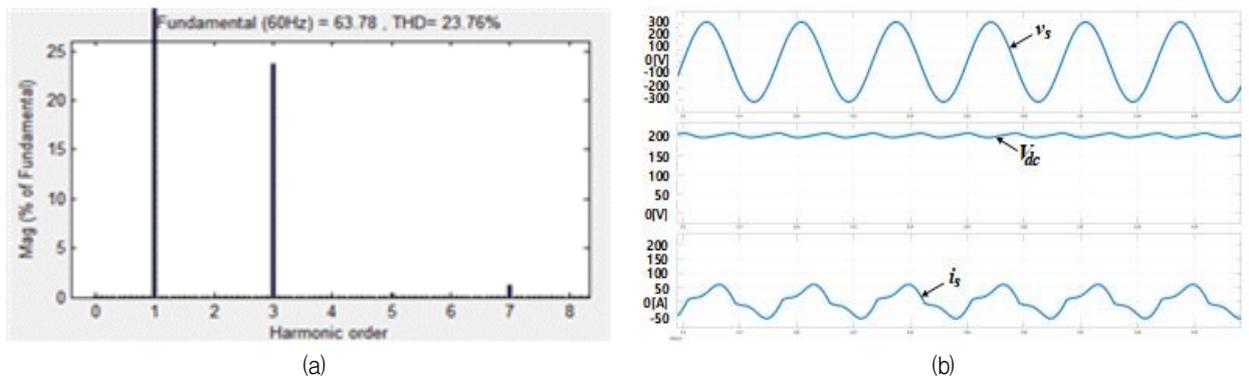


Fig. 9. Waveforms of LLC filter for reducing 5th harmonic component, (a) FFT result of phase current, (b) waveforms of phase current, grid voltage and DC link voltage.

그림 9. 5차 고조파 제거를 위한 LLC필터의 시뮬레이션 결과, (a) 상전류의 FFT 결과, (b) 상전류, 계통전압 및 직류단 전압의 파형

Table 1. Simulation results before and after the filter.

표 1. 필터 전/후의 시뮬레이션 결과

	Before filter	ACL+3rd	ACL+5th
3rd	70.82%	1.21%	23.69%
5th	32.34%	2.88%	0.3%
7th	9.26%	2.27%	1.26%
THD	79.10%	4.4%	23.76%

2.3 실험결과

그림 10은 단상 UPS 동작 및 부하 특성에 의해 야기된 전원측 고조파 성분을 제거하기 위해 제안된 가변형 고조파 필터 및 역률 개선용 리액터의 성능을 시험하기 위한 실험 장치를 보여주고 있다.

실험 장치는 10 [kVA]용 UPS, 고조파 제거용 가변형 필터인 리액터와 커패시터 및 배터리로 구성되어 있다. 또한, 저항성 부하, 유도성 부하 및 비선형 부하들을 조합하여 서로 다른 유형의 부하 사용

조건에서 가변형 고조파 제거용 필터의 동작 성능을 확인하였다.

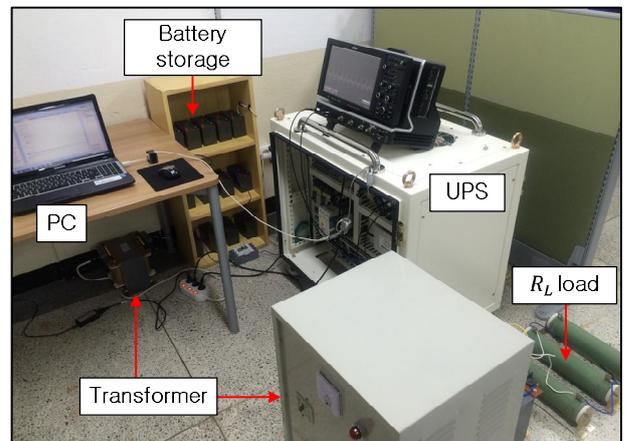


Fig. 10. Experimental setup.

그림 10. 실험 장치

표 2는 3차, 5차 및 7차 고조파 제거용 필터를 각각 적용하기 전/후의 결과를 나타내고 있다. 무부하 조건에서 필터 사용 전 전원측 입력전류의 고조파 함유율이 상당히 높고, 역률이 약 0.66인 것을 확인할 수 있다. 반면, 3차, 5차 및 7차 고조파 제거용 가변형 필터를 적용한 경우 각 차수에 해당하는 고조파가 크게 저감됨을 확인할 수 있으며 역률 개선용 커패시터 사용으로 인해 역률 또한 0.9 이상으로 향상됨을 알 수 있다. 표 2의 실험 조건하에서 3회 시험에 대한 평균값을 비교 분석할 경우 필터 사용 전에 비해 3차, 5차 7차 고조파 성분이 크게 감소되었음을 알 수 있으며, 특히 3차 고조파의 평균 THD가 5% 이내인 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 실험결과를 통해 전파 브리지 다이오드 방식의 UPS에 제안된 가변형 고조파 제거 필터를 적용할 경우, 저차 고조파 저감 및 역률 개선에 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

운전 특성을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전파 브리지 다이오드를 갖는 단상 무정전전원장치의 저차 고조파 및 역률 개선을 위한 가변형 고조파 필터를 제안하였다. 이를 위해서 전파 브리지 정류회로의 전원측 고조파 분석과 역률 개선용 리액터 및 저차 고조파 제거용 수동필터를 설계하였다. 제안한 리액터 및 고조파 필터의 성능을 비교 검토하기 위해 시뮬레이션을 수행하였고, 무부하, 선형 및 비선형 부하 조건에서 다수의 실험을 진행하여 역률 개선 및 고조파 저감에 효과적임을 검증하였다. 이를 통해서 전파 정류회로를 갖는 무정전전원장치에서 발생하는 다양한 저차 고조파와 역률 저하 문제를 역률 개선용 리액터 및 고조파 제거용 필터를 운전 상황에 따라 선택할 수 있고, 기존 무정전전원장치를 대체하지 않고도 손쉽게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

Table 2. Test results according to load conditions.

표 2 부하조건에 따른 실험 결과

Filter types	Items	Load	Unit	Test result		
				1	2	3
-	Output voltage	No load	V	220.5	219.8	220.7
	Output frequency		Hz	60.00	59.96	59.97
	Input 3rd THD		%	37.0	36.4	36.4
	Input 5th THD		%	42.2	41.8	42.4
	Input 7th THD		%	17.2	16.9	17.8
	Input PF		-	0.67	0.66	0.66
3rd harmonic reduction filter	Output voltage	Load	V	219.2	220.1	220.3
	Output frequency		Hz	59.97	60.00	60.01
	Input 3rd THD		%	2.9	3.1	3.0
	Input PF		-	0.95	0.95	0.95
5th harmonic reduction filter	Output voltage	Load	V	220.1	220.2	220.1
	Output frequency		Hz	60.02	60.02	60.00
	Input 5th THD		%	5.7	5.8	5.6
	Input PF		-	0.95	0.95	0.95
7th harmonic reduction filter	Output voltage	Load	V	220.1	218.7	220.3
	Output frequency		Hz	60.01	60.01	60.02
	Input 7th THD		%	2.7	2.8	2.9
	Input PF		-	0.93	0.93	0.93

III. 결론

2레벨 및 3레벨 전력변환방식의 단상 무정전전원장치와 달리 전파 브리지 정류회로를 갖는 무정전전원장치는 기본적으로 높은 THD 및 낮은 역률

- [1] A. C. King "Uninterruptible Power Supplies and Standby Power Systems," *McGraw-Hill*, 2003.
- [2] M. S. Racine, J. D. Parham and M. H. Rashid, "An overview of uninterruptible power supplies," *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium*, pp.159-164, 2005.
DOI: 10.1109/NAPS.2005.1560518
- [3] A. Lahyani, P. Venet, A. Guermazi and A. Troudi, "Battery/Supercapacitors Combination in Uninterruptible Power Supply(UPS)," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.28, no.4, pp.1509-1522, 2013.
DOI: 10.1109/TPEL.2012.2210736
- [4] A. Fernandez, J. Sebastian, M. M. Hernando, J. A. Martin-Ramos and J. Corral, "Multiple output AC/DC converter with an internal DC UPS," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.53, no.1, pp.296-304, 2006.
DOI: 10.1109/TIE.2005.862220
- [5] M. C. Chandorkar, D. M. Divan, Y. Hu, and B. Banerjee, "Novel architecture and control for distributed UPS systems," in *Proc. 9th IEEE Applied Power Electronics Conference*, pp.683-

689, 1994. DOI: 10.1109/APEC.1994.316332

[6] U. C. Noh, "LCL Filter Design for Grid-connected PCS Using Total Harmonic Distortion and Ripple Attenuation Factor," *Power Electronics Institute*, Vol.3, No.15, pp.235-243, 2010.

DOI: 10.1109/IPEC.2010.5542131

[7] B. W. An, C. P. Hong, H. W. Kim, K. Y. Cho, and B. K. Lim, "A Study on LLCL Filter to Reduce Harmonic Current of Grid Connected Power Inverter," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, vol.19, No.1, pp.64-70, 2014. DOI: 10.6113/TKPE.2014.19.1.64

[8] E. W. Lee, "Characteristics Analysis of Capacitor and Reactor for Harmonic Filter," *Electrical Engineers*, Vol.1, No.58P, pp.1-8, 2009. DOI: 10.5370/JEET.2011.6.2.239

BIOGRAPHY

Sung-Sam Kim (Member)



2001 : B.S. degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.
2003 : M.S. degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.
2007 : Ph.D. degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.

2017~Present : Professor in Department of Smart Electricity, Korea Polytechnic Colleges.

Seon-Hwan Hwang (Member)



2004 : B.S. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
2006 : M.S. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
2011 : Ph.D. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

2011~2012 : Postdoctoral Researcher, Center for Advanced Power Systems(CAPS), Florida State University, Tallahassee, FL, USA.

2012~Present : Professor in Department of Electrical Engineering, Kyungnam University.