

전원의 고조파 제거를 위한 Hybrid Filter의 실현

방선배, 정동열, 황환영, 박종연

강원대학교 전기전자공학부

Realization of Hybrid Filter for Harmonics Elimination on the Power line

Sun-Bae Bang, Dong-Youl Jung, Hwan-Young Hwang, Chong-Yeun Park
Department of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon Univ.

ABSTRACT

This paper proposed Hybrid Filter for harmonics elimination on the power line. It's control method is very simple, but its permannce is better than the results by passive filter. For the harmonics elimination, we improved the performance of the BPF(Band-pass Filter) with the GIC(Generalize Impedance Converter), and the new hysteresis controller.

1. 서론

수동전력필터(Passive power filter)는 전원의 고조파를 저감시키는 방법으로 사용되고 있으며, 이는 능동전력필터(Active power filter)보다 간단하고 구현하기가 쉽다는 장점이 있다. 그러나 부하변동에 따른 고조파 차수의 변화에 적응하기가 어렵고, 고조파가 없는 상태에서도 전원에 연결된 상태에서 전력손실과 병렬공진을 야기한다는 단점이 있다.^{[1][2][3]}

본 연구에서는 수동전력필터의 단점을 보완하기 위하여 전원의 고조파 함유량에 따라 수동전력필터를 능동적으로 전원에 연결함으로써 기존의 수동전력필터에서 발생할 수 있는 전력손실과 병렬공진을 감소시키고, 부하변동에 따른 고조파 함유량에 적용할 수 있는 Hybrid-Filter를 제안하였다.^{[1][2]}

제안된 Hybrid-Filter는 전원에 포함된 고조파 중에서 많은 비중을 차지하고 있는 제3차, 5차, 7차, 9차 고조파에 해당하는 수동전력필터를 제작하였고, 해당 고조파 함유량이 임의의 설정치를 초과할 경우 수동전력필터를 전원에 연결시키는 방법을 실현하였다.

또한, 수동전력필터의 on/off 제어를 위하여 GIC(Generalize Impedance Converter)를 이용한 BPF

(Band-pass Filter)와 Hysteresis 제어기를 사용하여 간단한 구조로 정확한 제어가 가능함을 확인하였고 우수한 성능을 확인하였다.^[4] 제안된 구조는 simulation을 통하여 타당성을 검증하였고 구현 및 실험을 통하여 적용 가능성을 확인하였다.

2. 제안한 필터의 구조 및 특성

본 연구에서 제안한 Hybrid Filter의 구조는 그림 1과 같으며 Hall CT, 전류 고조파 검출부, Hysteresis 제어부, 수동전력필터 on/off switch, 수동전력필터(Passive power filter)로 구성된다.

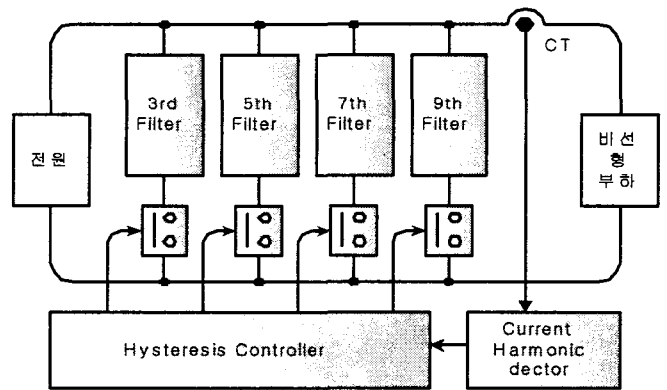


그림 1 제안한 Hybrid filter의 구조
Fig. 1 Structure of proposed Hybrid Filter

Hall CT는 전원에 포함된 기본파 및 고조파 성분을 BPF로 전달하는 역할을 한다. 부하전류를 검출하는 방법에는 분로저항, CT, Hall CT를 이용하는 등 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 Hall CT를 사용하였다.

CT에 의하여 검출된 전류는 GIC를 이용한 BPF에 의해 3고조파(180Hz), 5고조파(300Hz), 7고조파(420Hz), 9고조파(540Hz)로 분리된다. BPF는 LC 필

터로 구성이 가능하지만, L의 기생 커패시터 성분을 감소시키기 어렵고 정확한 L값을 얻기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 L을 GIC (Generalized Impedance Converter)로 대체하여 L이 갖는 단점을 극복하였다.

GIC는 연산 증폭기와 R, C를 이용하여 L을 구현하는 것으로 정확한 L값을 얻을 수 있으며, L에서 나타나는 기생성분을 고려할 필요가 없는 장점이 있다. GIC의 기본회로는 그림 2와 같다.

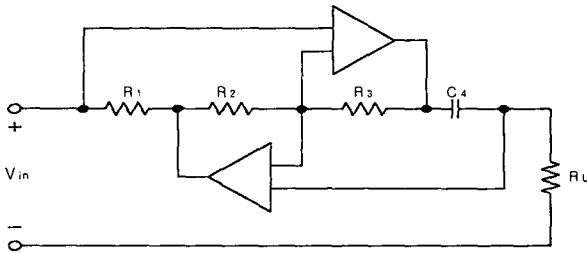


그림 2 GIC의 기본회로
Fig. 2 GIC circuit

그림 2에서 GIC의 입력임피던스(Z_{in})을 구하기 위해 밀만의 정리를 사용하여 정리하면

$$Z_{in} = \frac{R_1 R_3 R_L C_4}{R_2} s = L_{eq} s$$

가 된다. 따라서 GIC 임피던스 전달함수는 L의 전달함수와 같은 형태로 나타나므로 GIC는 L로 대체될 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

Hysteresis 제어부는 그림 3과 같이 구성하였으며 증폭기부, DC Regulation부, 감산부, Hysteresis 제어부로 구성된다.

Band-pass filter에 의하여 검출된 전압은 매우 낮기 때문에 증폭기를 통하여 임의의 설정치까지 증폭할 수 있으며, 증폭된 전압은 DC Regulation를 통하여 DC로 변환한다.

Hysteresis 회로는 Op-amp 1개와 2개의 저항으로 구성하였으며, Op-amp는 비교기로 동작하기 때문에 V_i 가 출력전압의 $-R_i/R_0$ 배가 되면 출력전압을 트리거링한다. 예를들어 출력전압(V_0)이 10V라고 가정하면 $\pm 5V$ 일 때 트리거링된다. 그러나 Hysteresis 제어부의 실제 입력은 0V 이상이며 트리거링 최소전압이 1~2V 이상이 되어야 하기 때문에 본 연구에서는 Hysteresis 회로의 입력에 감산기를 첨부하여 이를 해결하였다. 본 연구에서는 트리거링 전압을 최소 1V, 최대 4V로 설정하였으므로 DC Regulation 전압에 2.5V를 감산하여 트리거링 전압을 $\pm 1.5V$ 로 하였다.

Hysteresis 제어기에서 발생된 on/off 신호는 수동전력필터를 전원선에 on/off 시키는 동작을 수행하며, 본 연구에서는 일반적인 relay를 사용하였다.

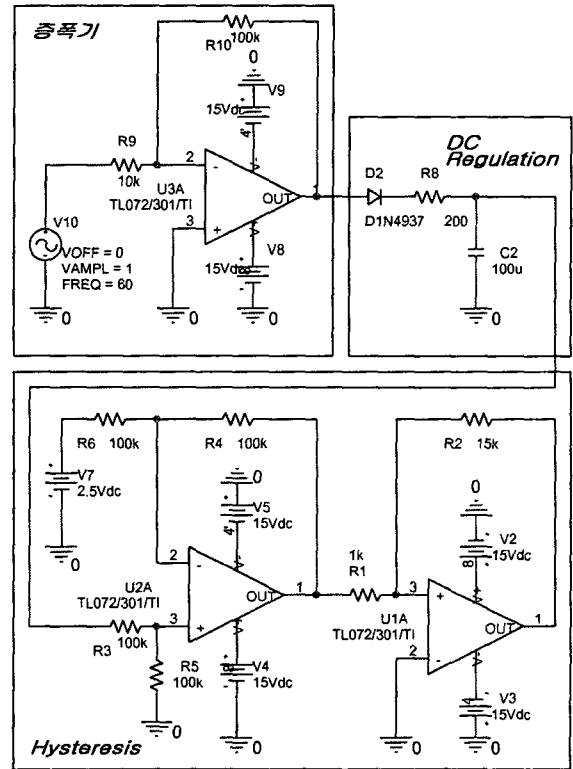
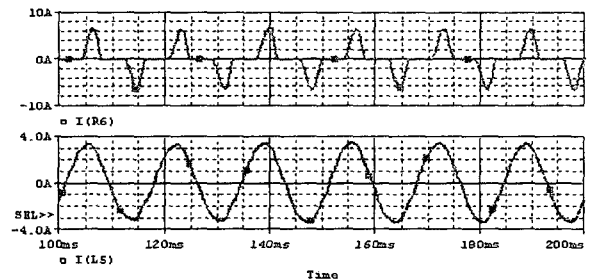


그림 3 Hysteresis 제어부의 구조
Fig. 3 Structure of Hysteresis controller

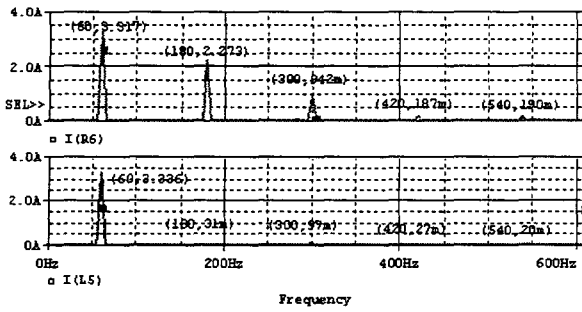
3. Simulation 결과

제안한 Hybrid Filter의 동작특성을 simulation하기 위하여 비선형부하 및 제3, 5, 7, 9차 수동전력필터의 소자값은 구현한 Hybrid Filter의 소자값과 동일하게 구성하였다.

Simulation를 실시한 결과, 비선형 부하에서 발생하는 부하전류(고조파전류 제거 전의 전류)와 전원측으로 유출되는 전류(고조파전류 제거 후의 전류)는 그림 4(a)와 같다.



(a) 고조파 제거 전·후의 전류 파형



(b) 고조파 제거 전·후의 주파수 스펙트럼

그림 4 Hybrid Filter의 고조파 제거 전·후 전류 파형과 주파수 스펙트럼

Fig. 4 Current waveform and frequency spectrum of Hybrid Filter when Harmonics exclusion before and after

그림 4(b)는 그림 4(a)를 주파수 분석한 결과이며, 비선형 부하에서 발생하는 제3차, 5차, 7차, 9차 고조파가 수동전력필터에 의해 제거되어 전원측으로 유출되는 고조파 전류가 나타나지 않고 있을 것을 알 수 있다.

비선형 부하에서 발생하는 고조파전류와 수동전력필터가 동작한 후의 전원전류를 비교하면 표 1과 같다.

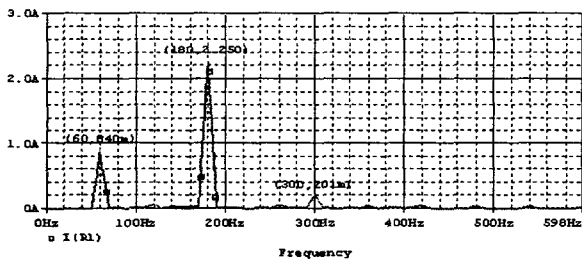
표 1 고조파 제거 전·후의 고조파 전류량

Table 1 Current of Harmonics exclusion before and after

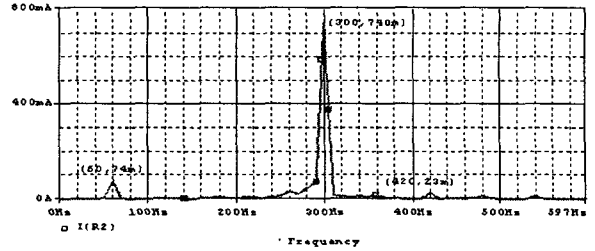
고조파 차수	고조파 전류량 [mA]			
	3rd	5th	7th	9th
필터 동작 전	2,273	942	187	190
필터 동작 후	31	97	27	20

표 1에서 제3고조파 전류는 2,273[mA]에서 31[mA]로 제거되었으며 5차, 7차, 9차 고조파 전류도 많은 양이 제거되었음을 알 수 있다.

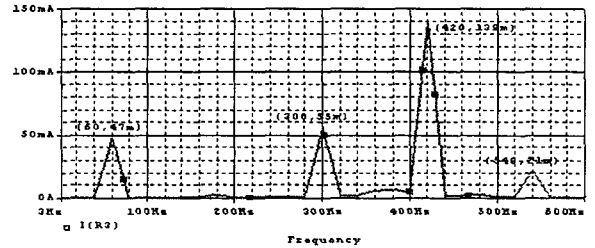
그림 5는 Hybrid Filter가 동작하여 수동전력필터로 유입되는 제3차, 5차, 7차, 9차 고조파 전류를 주파수 분석한 결과이다.



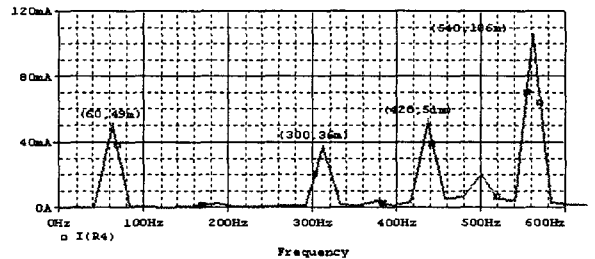
(a) 제3고조파 수동전력필터 전류



(b) 제5고조파 수동전력필터 전류



(c) 제7고조파 수동전력필터 전류



(d) 제9고조파 수동전력필터 전류

그림 5 제3차, 5차, 7차, 9차 수동전력필터 전류
Fig. 5 Current of 3rd, 5th, 7th, 9th passive power filter

그림 5를 살펴보면, 제3고조파는 2.25[A]가 제거되고 제5고조파는 740[mA]가 제거되며, 제7고조파는 139[mA]가 제거되고 제9고조파는 106[mA]가 제거됨을 알 수 있다. 그러므로 그림 4(b)와 비교하여 부하에서 발생하는 고조파 전류는 수동전력필터를 통하여 많은 부분이 제거되고 있음을 알 수 있다.

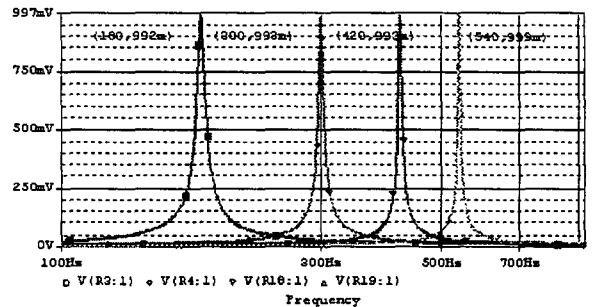


그림 6 GIC를 이용한 BPF의 주파수 특성
Fig. 6 Frequency characteristic of BPF using GIC

그림 6은 Hall CT를 통하여 입력된 전류를 제3

차, 5차, 7차, 9차 고조파 전류로 분리하기 위하여 설치된 BPF(Band-pass Filter)의 주파수 특성을 나타낸다.

그림 6에서 알 수 있듯이 GIC를 이용하면 BPF의 우수한 주파수 특성을 얻을 수 있으며, 첨예도 조정이 간편하고 사용이 편리하다.

그림 7은 BPF를 통과한 제3고조파 전류가 Hysteresis 제어기에 의하여 95[ms]에서 turn-on 되는 것을 나타내고 있다. 또한, BPF를 통과한 전류가 증폭기, DC Regulation, 감산기를 통과할 때 나타나는 전압파형을 보여주고 있으며 Hysteresis 제어기 입력 전압이 1[V]일 때 Hysteresis 제어기가 turn-on 되는 것을 알 수 있다.

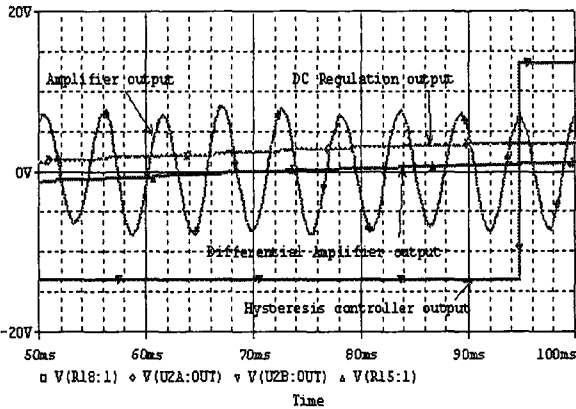
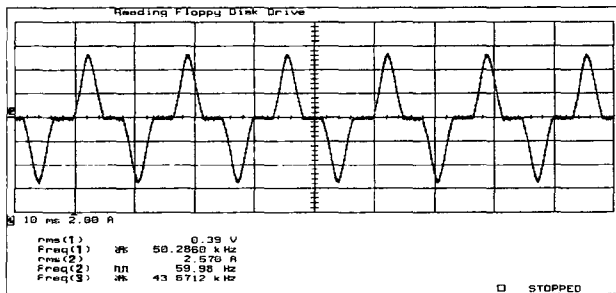


그림 7 Hysteresis 제어기의 Turn-on 특성
Fig. 7 Turn-on characteristic of Hysteresis controller

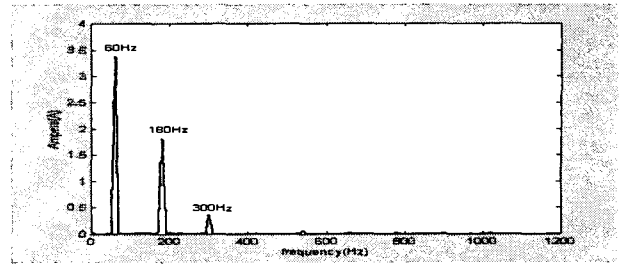
Hysteresis 제어기가 turn-on 상태가 되면 수동 전력필터에 설치된 Relay를 동작하여 수동 전력필터가 전원선에 연결된다.

4. 실험 결과

그림 8은 구현한 비선형 부하에서 발생하는 전류 파형과 주파수를 분석한 그림이다.



(a) 부하전류 파형

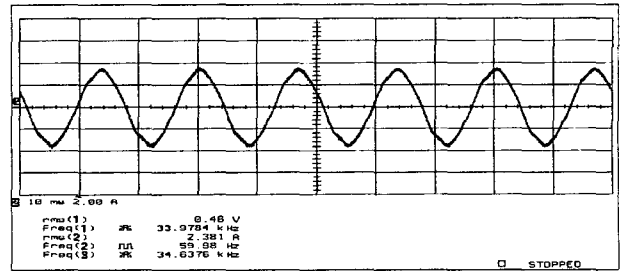


(b) 부하전류의 주파수 스펙트럼

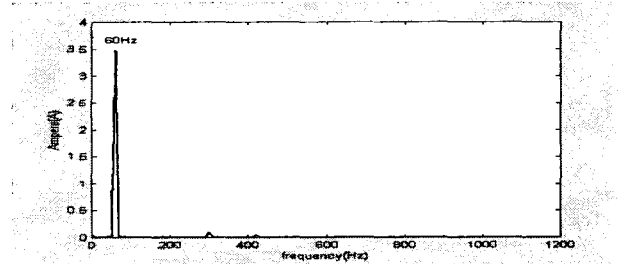
그림 8 부하전류 파형과 주파수 스펙트럼
Fig. 8 Load current waveform and frequency spectrum

그림 8(b)에서 제3고조파는 1.8[A]이며 제5고조파는 0.35[A]이다. 이러한 고조파는 Hysteresis 제어기가 turn-on 할 수 있는 전류로서 수동 전력필터를 전원선에 연결하게 한다.

그림 9는 제3차, 5차 수동 전력필터가 전원선에 연결되어 3고조파와 5고조파를 제거한 후 전원측으로 유출되는 전류 파형과 주파수를 분석한 그림이다.



(a) 전원전류 파형

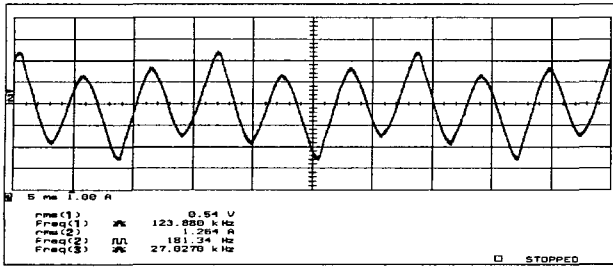


(b) 전원전류의 주파수 스펙트럼

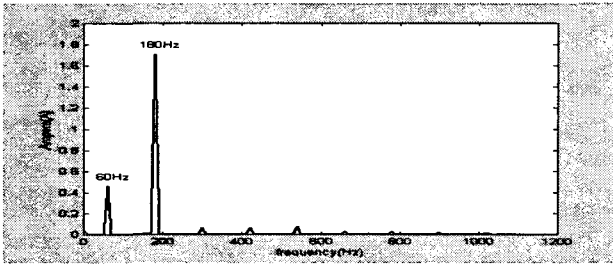
그림 9 전원전류 파형과 주파수 스펙트럼
Fig. 9 Source current waveform and frequency spectrum

그림 9(b)를 살펴보면, 부하전류에서 나타나는 3차, 5차 고조파가 수동 전력필터에 의하여 제거되어 거의 나타나지 않고 있으며, 기본파 전류(60Hz)는 감소되지 않고 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 제3고조파 수동 전력필터에 흐르는 전류 파형과 주파수를 분석한 그림이다.



(a) 제3고조파 수동전력필터 전류 파형



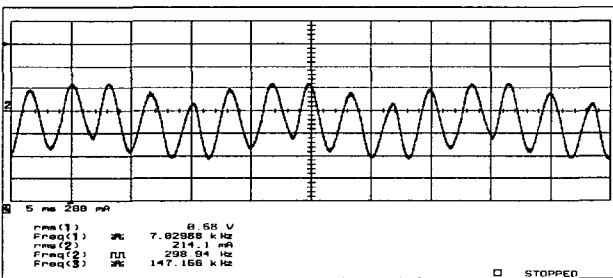
(b) 제3고조파 수동전력필터 전류의 주파수 스펙트럼

그림 10 제3차고조파 수동전력필터 전류 파형과 주파수 스펙트럼

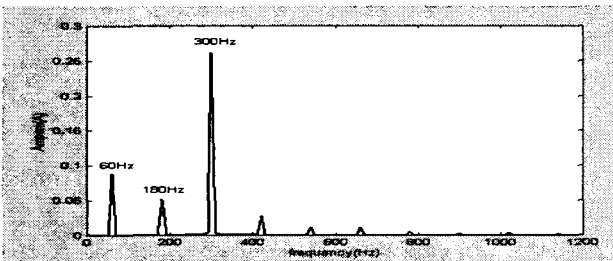
Fig. 10 Waveform and Frequency spectrum of 3rd harmonic current passive power filter

그림 10의 (b)를 살펴보면, 그림 8의 고조파 부하에서 발생되는 1.8[A]의 제3고조파 전류가 모두 제거되고 있음을 알 수 있다.

그림 11는 제5고조파 수동전력필터에 흐르는 전류파형과 주파수를 분석한 그림이다.



(a) 제5고조파 수동전력필터 전류 파형



(b) 제5고조파 수동전력필터 전류의 주파수 스펙트럼

그림 11 제5차고조파 수동전력필터 전류 파형과 주파수 스펙트럼

Fig. 11 Waveform and Frequency spectrum of 5th harmonic current passive power filter

그림 11의 (b)를 살펴보면, 그림 8의 고조파 부하에서 발생되는 0.35[A]의 제3고조파 전류 중 0.26[A]가 제거되고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 수동전력필터의 단점을 보완한 Hybrid Filter를 제안하였으며 simulation을 통하여 타당성을 검증하였고, 구현 및 실험을 통하여 적용 가능성을 확인하였다.

또한, GIC를 이용하여 BPF의 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하였으며, 간단한 Hysteresis 제어기로 수동전력필터를 on/off 할 수 있는 방법을 제시하였다.

실험 결과 구현한 수동전력필터는 simulation 결과와 유사한 특성으로 동작함을 알 수 있었으며, 전원에 포함된 고조파 함유량에 따라 수동전력필터가 on/off 됨을 증명하였다.

본 연구는 전력용량이 작은 장소에서 수동전력필터의 실용화 가능성을 확인하였으며, 추후에는 수동전력필터의 주파수 특성을 향상시키고 제어기법을 정립하여 실부하에 적용하고자 한다.

이 논문은 산업자원부 전력기술기초연구사업(기초 전력연구소 주관)지역거점 핵심과제의 연구비 지원에 의하여 연구되었습.

참고 문헌

- [1] Darwin Rivas, Luis Moran, Juan Dixon, Jose Espinoza, "Improving Passive Filter Compensation Performance with Active Techniques", Proceedings of the IEEE, pp.232-238, 2000.
- [2] Julio del-Valle-Jeldres, Guillermo Perez-Vasquez, "Control of Harmonics and Power Factor Improvement", Proceedings of the IEEE, pp.1227-1229, 1996.
- [3] 김주찬, 신수한, 이충식, 고희석, "고압수전설비의 고조파에 관한 대책", 한국조명·전기설비학회 2004 춘계학술대회 논문집, pp.353-357, 2004. 5.
- [4] A. Antoniou, "Realization of gyrators using operational amplifiers, and their use in RC-active network synthesis", Proceedings of the IEEE, Vol. 116, No. 11, pp.1838-1850, 1969. Nov.