

단상 전원의 고조파 제거용 500VA급 Hybrid 필터 개발

(500VA Hybrid filter development for harmonic elimination of a single phase power)

박종연 · 이 후 찬* 이 봉 진

(Jong-Yeon Park · Hu-Chan Lee · Bong-Jin Lee)

Abstract

Abstract - Because of the high cost for the active power filter, passive filters have been widely used to absorb harmonic currents of nonlinear loads and can also improve the power factor. They are not often optimal filters because the passive filters are designed with the fixed load conditions.

In this paper we proposed the method which only the necessary harmonic filters are operated by detecting the various harmonic current components. By the experimental results using the proposed system for the 500VA rectifier load, we concluded that the researched hybrid filter is cost effective and the performance is better than the passive filter.

1. 서 론

전력변환장치 사용의 급증으로 인해 고조파 발생 부하가 증가하고 있고 이에 의한 피해도 점차 늘어나고 있다[1]. 현대 사회는 과거와 달리 고도의 산업화와 반도체 소자를 이용한 응용 기기의 다변화로 전력 품질의 질적 향상이 더욱 요구되고 있다. 최근에는 반도체를 사용한 전기 기기의 대량 보급과 각종 설비의 자동화에 따라 전기 사용 기기에서의 고조파 발생이 점차 확대되고 있는 추세에 있으며, 고조파에 의한 장애는 전기의 질적 향상 측면에서의 문제점은 물론 전기 사용자 보호라는 면에서 매우 중요한 의미를 가진다.

이러한 고조파 발생을 억제하기 위한 대책으로 지금까지 가장 일반적으로 사용되어 왔던 방법으로 크게 수동필터(Passive filter)와 능동필터(Active filter)로 구분하고 있다[2][3]. 수동필터는 구조가 단순하고 설치 및 보수, 유지가 비교적 편리하다는 이점이 있으나 공진 발생 가능성, 부하 운전 조건 등에 따른 무효전력 과보상 등의 문제점이 있어 최근 수동필터를 대체하기 위해 고조파 전류를 전원에 주입하여 부하의 고조파 전류를 상쇄시키는 능동필터(Active Filter)에 대한 연구 개발이 이루어지고 있다. 그러나 능동필터는 가격이 매우 높으므로 자금 여력이 충분치 못한 대부분의 수용가에서는 고조파 억제대책으로 사용하기 매우 힘들다. [3][4] 따라서 고조파 억제대책이 필요한 수용가에 저렴하면서도 부하의 변동에도 적응이 가능한 필터가 필요하다.

본 논문에서는 정밀도를 요하는 반도체 기기, 의료 기기 등 단상의 소용량 특수기기에 사용되는 부하 적응

형 하이브리드 필터를 제안하였다. 제안된 고조파 제거 기법인 하이브리드 필터를 사용하여 수동필터의 문제점인 부하의 변동에 적응하지 못하는 단점을 보완 하였으며 실험으로 이를 확인하였다.

2. 본 론

2.1. 수동필터

수동필터는 수동소자를 조합하여 특정 주파수나 여러 주파수영역에서 저 임피던스가 되도록 구성하여 고조파 전류를 제거하는 것이고 기본파에 있어서는 진상설비와 같은 작용을 한다[6][7].

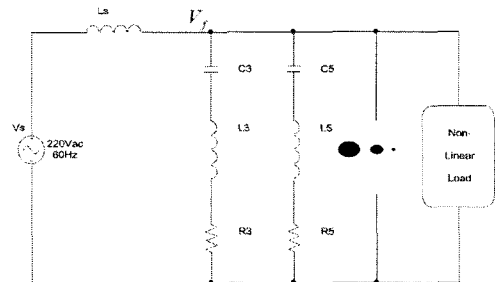


그림 1 수동필터의 구성
Fig 1 Composition of passive filter

수동필터는 저차 고조파(3~9차)를 제거하기 위한 동조필터의 조합으로 구성되어 있으며 이들 구성은 그림 1과 같다.

그림 1에서 각각의 동조필터는 R-L-C 직렬회로로 구성되어 있으며 임피던스(Z_f)는 식(1)과 같다. 공진주파수(ω_r)에서 임피던스는 R로 감소하며 이때의 선택도

(Q)는 식(2)와 같다.

$$Z=R+jX_{L_f}-jX_{C_f} \quad (1)$$

$$Q=\frac{X_0}{R}=\frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} \quad (2)$$

$$w_n=\frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (3)$$

또한 동조필터의 무효전력의 크기는 식(4)와 같다[2].

$$Q_f=\frac{|V_A|^2}{(X_{L_f}-X_{C_f})} \quad (4)$$

여기서 $|V_A|$ 는 기본파에 대한 전압으로 그림 1의 필터의 전압을 말한다. 수동필터가 공진일 때 리액턴스는 식(5)와 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{X_{C_f}}{n}=nX_{L_f} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면

$$Q_f=\frac{|V_A|^2}{\left(\frac{X_{C_f}}{n^2}-X_{C_f}\right)}=\frac{|V_A|^2}{X_{C_f}} \cdot \frac{n^2}{(1-n^2)} \quad (6)$$

식(6)과 같으며 이때 Q_f 는 필터의 무효전력량의 크기를 나타내며, 필터를 설치하지 않았을 때 부하의 필요 무효전력량의 크기와 같도록 설계되어야 한다.[2][6]

$$C_f=\frac{1}{2\pi 60\left(\frac{|V_A|^2}{Q_f} \cdot \frac{n^2}{1-n^2}\right)} \quad (7)$$

$$L_f=\frac{1}{w_n^2 C_f} \quad (8)$$

식(3)과 식(6)을 정리하여 콘덴서와 리액터를 구할 수 있으며 필터 설계 절차는 다음과 같다. 식(7)으로부터 필터의 콘덴서를 구하고 식(8)으로 리액터를 구한다.

본 연구에서는 500VA 부하를 사용하였으며 설계 예는 다음과 같다. 전력 분석기(Power Analyzer)로 측정된 필요 무효보상 용량은 약 72[VAR]로 수동필터의 무효전력 보상용량을 20% 큰 85[VAR]로 결정한다. 또한

부하에서 3고조파와 5고조파의 발생량이 가장 많으므로 무효전력의 80%를 3~5고조파 필터가 담당하고 나머지 20%를 7~9고조파 필터가 담당하도록 설계하였다. 3고조파 필터의 보상용량을 34[VAR, 40%]로 결정하여 식(7)에 조건을 대입하여 3고조파 필터의 콘덴서를 구한다.

$$C_3=\frac{1}{2\pi 60\left(\frac{|210|^2}{34} \cdot \frac{3^2}{1-3^2}\right)}=1.81\mu F$$

C_3 를 식(8)에 대입하고 공진주파수보다 7% 낮은 170Hz에 공진하는 L_3 를 구하면

$$L_3=\frac{1}{(2\pi 180)^2 C_3}=\frac{1}{(2\pi 170)^2 \times 1.82 \times 10^{-6}}=481mH$$

$C_3=1.82\mu F$, $L_3=481mH$ 로 결정되며 5~9차 수동필터의 값도 이와 같이 계산하여 구한다.

수동필터의 L, C값이 결정되면 직렬 L_s 값을 선정하여야 한다. L_s 는 33[%]리액터를 택하며 220[V] 전압, 60[Hz]의 주파수 2[A] 정격전류에서 구하면 된다.[8]

$$V_L=0.33 \times 220=74[V]$$

$$X_L=wL=\frac{74V}{2A}=37[\Omega]$$

$$L_s=\frac{X_L}{2\pi f}=\frac{37}{2\pi 60}=100mH$$

과 같이 구하며 이러한 수동필터의 설계 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1 500VA부하 수동필터 설계 사양

Table 1 Specifications of passive filter design for 500VA Load

구분	3차	5차	7차	9차	L_s
보상용량[VAR]	34	34	8.5	8.5	
리액터[mH]	481	159	32	197	100
콘덴서[uF]	1.82	1.82	0.46	0.46	

2.2. 제안된 고조파 제거 방법

제안한 고조파 제거 시스템의 수동필터는 표 1의 설계 사양으로 결정하였으며 검출부 및 구동부의 구성은 부하전류검출부, GIC(Generalized Impedance Converter)를 이용한 대역 통과 필터부, On/off 비을 결정부 및 릴

레이 구동부로 구성하였고, 제안한 하이브리드 필터 블록도는 그림 2와 그림 3과 같다[5].

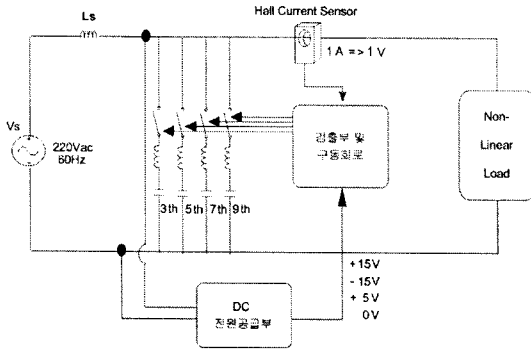


그림 2 제안한 하이브리드 필터 블록도
Fig 2 Block diagram of proposed Hybrid filter.

제안한 방법은 기존의 연구와는 다르게 부하 전류를 검출하고 각 고조파 필터 스위치를 개폐하는 구동부까지의 모든 회로가 아날로그 소자만으로 구성되어 있는 것이 특징이며, 저가로 회로를 구성할 수 있다는 장점이 있다[7].

검출부 및 구동회로는 비선형 부하의 전류로부터 기본파와 각 고조파를 검출하고 그 크기를 비교하여 정해진 비율에 따라 각 수동필터 스위치의 온/오프를 결정한다. 검출부 및 구동회로의 블록도와 회로도는 그림 3, 그림 4와 같다.

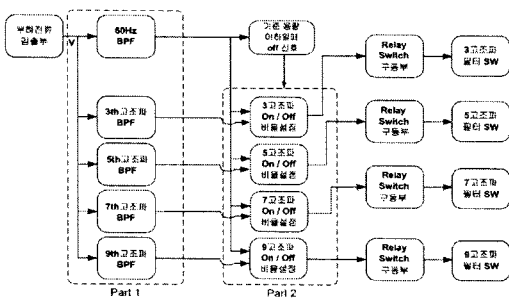


그림 3 검출 및 구동 회로의 블록도
Fig 3 Block diagram of sensing and driving circuit

부하 전류는 전류검출센서(Hall current sensor)에 의해 전압으로 검출하여 GIC(Generalized Impedance Converter)를 이용한 대역 통과 필터를 사용하여 기본파 및 각 고조파로 분류한다[5].

GIC는 연산 증폭기, 저항 커패시터의 수동 소자를 이용하여 L을 구현한 것으로 정확한 L값을 얻을 수 있으며 기생 성분에 의한 영향 또한 고려할 필요가 없는 장점이 있다[9].

대역 통과 필터에서 분류된 기본파는 반전 증폭기에 의한 증폭 후 버퍼를 통하여 두 개의 증폭된 신호로 나

닌다.

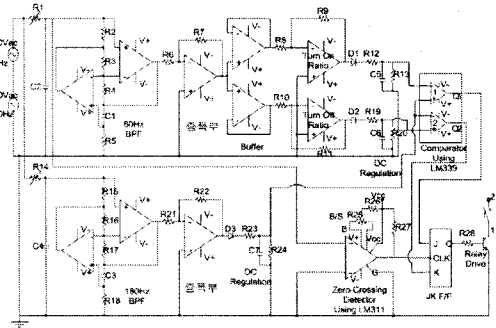


그림 4 검출 및 구동 회로의 회로도(3고조파 구동부)
Fig 4 Circuit of sensing and driving circuit(3th Harmonic Drive Part)

증폭된 두 신호는 On/Off 비율을 결정하는 회로의 입력으로 인가되며, On/Off 비율 결정부의 출력은 반파정류된 DC 신호를 비교기(LM339)로 입력하여 3고조파와 비교하게 된다. 비교기의 출력은 두 개로 나누어지며 이 출력은 JK 플립플롭의 J, K로 인가하여 최종 릴레이 구동회로의 출력 신호를 얻는다.

그림 5는 그림 4(part2)의 블록도이며 3고조파에 대한 경우를 예를 들어 설명하였다. 3고조파 필터의 경우 고조파 크기가 기본파의 15%이면 스위치가 On이 되며, 5%이면 스위치가 Off 된다.

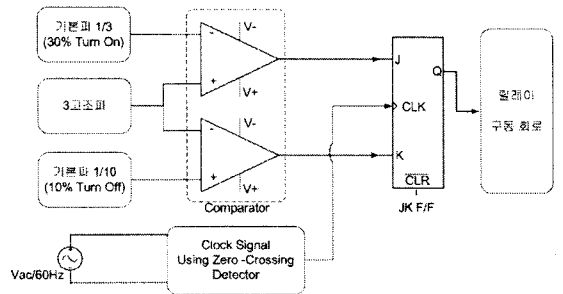


그림 5 3고조파 On/Off 비율 설정부 블록도
Fig 5 Block diagram of determine Switch on/off ratio for 3th passive filter

기본파와 3고조파 필터 On/Off 비율 설정은 기본파를 Op-amp를 사용하여 15/100(15%:On), 5/100(5%:Off)로 크기를 조정 후 3고조파의 크기와 비교하도록 하였다. 두 개의 Op-amp의 비교된 출력은 JK 플립플롭의 입력으로 사용하며 JK의 상태에 따라 On/Off 신호를 출력하게 된다. 이처럼 JK 플립플롭을 사용함으로써 히스테리시스 회로를 사용하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.

JK 플립플롭 IC는 클럭을 인가해 주어야 동작을 하며 클럭 하강 에지(edge)에 동기하여 J, K 입력에 의해

High 또는 Low 신호를 출력한다. 본 논문에서는 LM311을 이용하여 Zero-Crossing Detect 방법으로 JK 플립플롭의 클럭을 인가하였다. 60Hz 대역 통과 필터의 출력을 입력으로 하여 16.67ms마다 클럭이 발생하도록 하였다.

여기서 On/Off 비율을 각 고조파 필터마다 다르게 설정할 수 있는 것이 본 논문에서 제안한 고조파 제거 시스템의 특징이다. 제안된 고조파 제거 시스템은 설정된 비율에 따라 부하의 변동에 적응하여 3~9차 수동필터의 개폐를 결정한다. 낮은 용량의 부하에 대해 수동필터를 연결하는 것은 필요 이상의 무효 전력이 발생되므로 JK 플립플롭의 리셋 핀을 이용하여 적정 이하의 부하에 대해서 수동필터를 오프 하도록 설계 되어있으며 본 논문에서는 정격 용량의 10% 미만 용량이 되면 JK 플립플롭에 리셋 신호를 인가하도록 설계하였다.

2.3. 실험 결과

실험 대상은 단상 전원(220V/60Hz)으로 CFL Lamp (약 500 [VA]) 부하를 병렬로 연결하여 실험하였다.

그림 6은 500[VA] 비선형 부하의 입력 전압, 입력 전류 파형이다. 이 때 부하에 필요한 수동필터를 설치하면 그림 7과 같은 입력 전압과 입력 전류 파형을 얻게 된다.

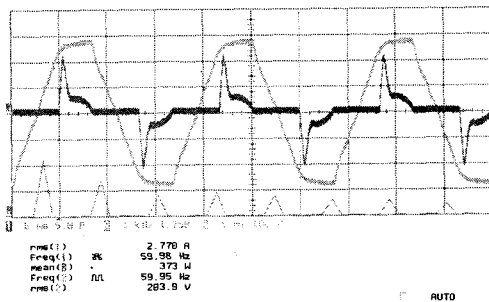


그림 6 500VA 부하의 입력 전압 입력 전류 파형
Fig 6 Input voltage and current waveform of 500VA load.

본 논문에서 제안한 고조파 제거 시스템의 성능을 검증하기 위해 필터 연결 전, 수동필터만 연결하였을 경우 [그림1], 수동 필터와 검출부 및 구동회로를 함께 연결하였을 경우[그림 2]로 나누어 전압, 전류 파형의 THD(Total Harmonic Distortion) 및 전원의 PF(Power Factor), 무효 전력량을 측정하여 데이터를 비교 분석하였다.

하이브리드 필터를 설치했을 경우에도 하이브리드 제어부에서 설정한 3~9 고조파 SW의 On 비율을 만족하기 때문에 그림 7의 수동필터만 연결했을 경우와 동일하게 나타난다. 즉 500VA 부하에서는 수동필터만 설치한 경우와 본 논문에서 제안한 제어기법을 사용한 하이

브리드 필터를 설치한 경우의 입력 전압, 전류 파형으로 THD, PF를 비교하면 비슷한 성능을 갖게 된다.

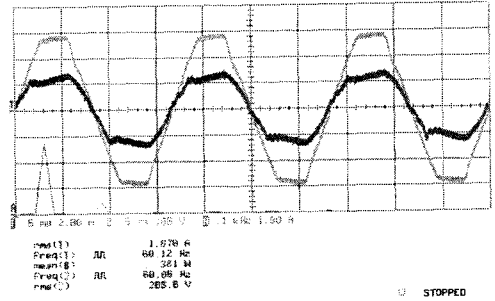


그림 7 수동필터만 연결시 입력 전압 전류 파형
Fig 7 Input voltage and current waveform (when passive filter connected)

다음으로 논문에서 확인하려고 하는 부하가 변동하였을 경우에 대해 수동필터와 하이브리드 필터의 성능을 비교하였다. 설정된 부하는 (CFL Lamp 100[VA]) + 저항부하 400[VA] 450[VA]급 용량으로 실험하였다.

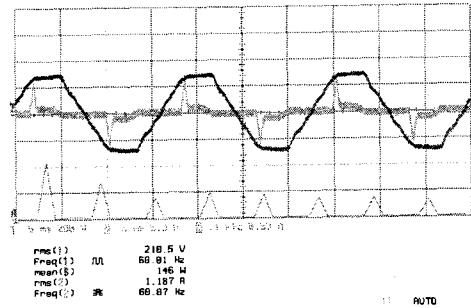


그림 8 부하 입력 전압 전류 파형
Fig 8 Input voltage and current waveform of load

그림 8은 필터를 연결하기 전의 입력 전압과 입력 전류의 파형을 나타낸 것이다. 그림 9는 수동필터를 연결한 경우의 입력 전압과 입력 전류 파형이며 그림 10은 하이브리드 필터를 설치했을 경우의 파형이다.

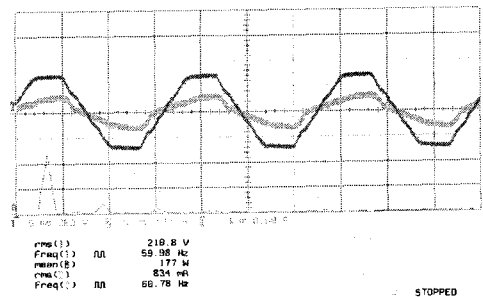


그림 9 수동필터만 연결시 입력 전압 입력 전류 파형
Fig 9 Input voltage and current waveform (passive filter connected)

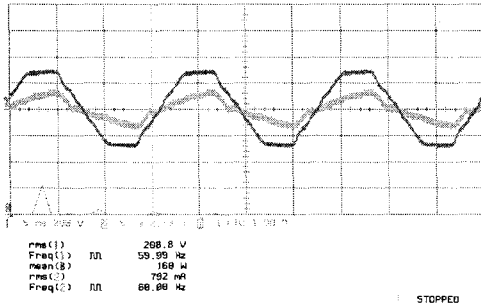


그림 10 하이브리드 필터 연결시 입력 전압 입력 전류 파형
Fig 10 Input voltage and current waveform (when hybrid filter connected)

실험을 통해 얻은 비교 데이터를 표 2에 나타내었다.

표 2 그림 8~10 데이터 비교

Table 2 Data comparison of fig 8~10.

구분	A THD[%]	PF	유효전력 [W]	필터
필터설치전	44.5	0.67	146	X
수동 필터	7.51	0.92	177	3,5,7,9th
Hybrid 필터	9.7	0.92	160	3th

설정된 부하에 대해 수동필터는 3~9고조파 필터가 연결되며 이때 3고조파 전류는 19.8%가 검출되며 5고조파 이상의 전류는 10%이하로 나타나게 되어 하이브리드 필터의 검출 및 구동회로에서는 조건을 만족하는 3고조파 필터만을 연결한다.

수동필터만을 연결했을 경우에는 필터 설치 전보다 약 31W의 유효전력이 필요이상으로 전력 낭비가 발생하게 되는 상태이며 이것은 수동필터만을 연결했을 때의 단점이다. 또한 입력 전압에 대해 입력 전류가 진상이므로 사고발생의 위험이 있다.

반면 하이브리드 필터를 연결한 경우에는 필터 설치 전에 비해 약 14W만의 유효전력이 소비되어 부하에 적용하여 알맞은 필터의 효과를 갖는 것을 확인 할 수 있었다.

3. 결론

본 논문은 부하의 변동에 적응이 가능한 고조파 제거 기법을 제안하였으며 부하가 변동하였을 경우에 대해 하이브리드 필터는 전력 손실측면에서 14W만을 소비하여 수동필터만을 연결하였을 때의 손실보다 적게 나타났으며 THD는 11%미만이고 PF는 0.92로 우수한 특성을 보였다.

본 시스템은 부하의 전류를 고조파 크기와 기본파 크기의 비율에 따라 필터를 연결 또는 차단하는 방법을

선택함으로써 부하의 성격에 따라 동작하도록 설계되었다. 또한 모든 회로를 아날로그 소자만을 이용함으로써 마이크로컨트롤러를 사용할 때 보다 오동작을 최소화 하였으며 저가로 구성할 수 있었다.

본 논문을 통하여 고조파 억제대책이 필요한 수용가에 저렴하면서도 부하의 변동에도 적응이 가능한 필터가 필요한 정밀도를 요하는 반도체 기기, 의료 기기 등 단상의 소용량 특수기에 하이브리드 필터가 적용 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 산학협동재단의 학술연구비 지원에 의하여 수행되었으며 산학협동재단에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] B.K. Bose, "Recent advances in power electronics", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 7, pp.2-16, Jan. 1992.
- [2] Yaow-Ming Chen, "Passive filter design using genetic algorithms", IEEE Trans Industrial Electronics Vol 50, pp. 2002-207, Feb. 2003
- [3] Z.Chen, F. Blaabjerg and J.K. Pedersen, "A Hybrid Compensation System with An Active Filter and Distributed Passive Filters in Power Systems with Dispersed Generation", Power Electronics Specialist Conference 2003. PESC 03.2003 IEEE 34th Annual Volume 2, 15-19 Page(s):767 - 772 vol.2 June 2003
- [4] J.C.Das, Senior Member, IEEE " Passive Filters - Potentialities and Limitations", IEEE Trans Industrial Applications, Vol.40, No.1, pp 232-241, Jan/Feb 2004
- [5] 124-130L.Goras, "Linear and nonlinear mulators derived form GIC-type configuration.", IEEE Trans, Circuit sys., vol CAS-28, pp. 165-168 Feb. 1981
- [6] Elham B.Makram, "Harmonic filter design using actual recorded data", Senior Member, IEEE, E,V IEEE Trans Industrial Applications, Vol. 29, No. 6, Nov/Dec 1993 pp.1176-1183
- [7] 전정채, 유재근, 이상의 "고조파 저감을 위한 수동 필터의 제어시스템에 관한 연구" 조명 전기 설비학회 논문지 제 18권 제 4호, 2004년 7월
- [8] 김경철, 강윤모, 백승현, 김종욱, "비선형부하의 고조파전류 저감을 위한 직렬 및 병렬 동조필터에 관한연구", 조명 전기 설비학회 논문지 Voll. 17. No.6 pp. 113-118 11. 2003
- [9] 정동열 "GIC를 이용한 전원 전류의 고조파 제거시스템 연구", 강원대학교 박사학위 논문 2004년. 8월