

전력 능동 필터의 설계 및 시뮬레이션

정 동 열, 박 중 연, 방 선 배
 강원대학교 전기전자정보통신공학부
 전화 : 033-250-6292 / 핸드폰 : 019-386-1129

Design and Simulation of Active Power Filter

Dong-Youl Jung, Chong-Yeun Park, Sun Bae Pang
 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Kangwon University
 E-mail : superman@kwnu.kangwon.ac.kr

Abstract

This paper presents the harmonics rejection technique and the simulation of a active power filter using power operational amplifier. The proposed active power filter consists of CT(current transformer), harmonics detector and harmonics amplifier. The harmonics detector is a high pass filter using a GIC(Generalized Impedance Converter). The harmonics amplifier consists of a power operational amplifier and passive filters. The simulation has been implemented by OR-CAD program. It is examined whether the proposed active power filter can be realized or not through simple experiments

I. 서론

전력 반도체 소자의 스위칭에 의해 전력을 변환하는 전력 전자기기가 상용전원에 미치는 영향으로 고조파에 의한 파형의 왜곡현상을 들 수 있으며 이것은 최근 전력전자 기기의 사용이 급속히 증가함에 따라 심각한 문제가 되고있다.

현재 고조파 저감대책으로는 Active Filter, Passive Filter, 위상 변위 장치, 중성선 고조파 저감 장치등이 있고 근간 L, C로 구성된 수동 필터가 구조의 간결함과 저가의 이유로 전력계통의 고조파 전류 저감 및 역률 개선을 위해 사용되어 왔으나 수동 필터의 특성상 부하의 용량과 전원의 임피던스에 매우 민감하게 영향을 받으며 부피가 크고 주파수가 고정되어 있는 공진형 필터 특성이라는 결점을 가지고 있다. 또한 수동 필터는 Active filter 보다 고조파의 제거율이 낮다. 따라서, Active filter가 가장 유용한 고조파 저감대책으로 볼 수 있다. 근래 많이 연구되어 오고 있는 Active Filter의 구조는 전력 반도체 소자로 구성된 PWM 인버터 형태이다.[1]-[4]

본 논문에서는 인버터 및 DSP를 사용하지 않고 고조파를 신속히 제거할 수 있는 다른 형태의 Active Filter를 제안하였으며 그 설계에 앞서 시뮬레이션을 통해 제안된 Active Filter의 성능을 검토하였다.

제안된 Active Filter는 특히 부하에 의해 발생된 고조파 전류만을 검출하여 제거하는 기능을 갖도록 하였으며 크게 고조파 검출부와 고조파 증폭부로 구성되어 있다. 고조

파 검출부에서 고조파 전류를 검출한 후 고조파 증폭부에서는 검출된 전류와 180°의 위상차이를 갖는 전류를 Power line에 실어 이 두 전류가 서로 상쇄되도록 하였다. 이는 결국 발생된 고조파를 제거한 것이 된다.

II. The proposed Active Power Filter

2.1 제안된 active power filter의 구조

제안된 active power filter의 구조는 그림 1과 같이 CT, 고조파 검출부 그리고 고조파 증폭부로 되어 있다.

CT(Current Transformer)는 전류의 고조파성분을 전압의 형태로 검출하는 것으로 CT의 1차측에 흐르는 전류를 CT의 2차측에서 전압으로 얻는다. 이때 CT는 고조파 성분뿐만 아니라 기본파성분도 함께 검출하기 때문에 고조파 성분만을 얻기 위해서는 필터가 반드시 필요하며 고조파 검출부에서 이 기능을 하고 있다.

고조파 검출부는 GIC (Generalized Impedance Converter) 필터와 감산회로로 구성된다.

고조파 증폭부는 power operational amplifier와 transformer로 구성된다. power operational amplifier는 고조파 검출부의 출력을 입력으로 받아 발생된 고조파 전류와 같은 크기의 전류를 증폭시킨다. transformer는 이 전류를 발생된 고조파 전류와 180°의 위상차이를 갖도록 power line에 유입시킨다.

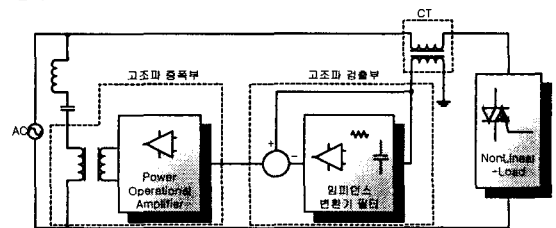


그림 1 제안된 active power filter의 구조

이러한 구조의 Active power filter로 고조파 전류를 제거할

수 있으며 PWM 인버터를 사용하는 경우 발생하는 스위칭 소자의 스위칭 손실 및 또 다른 고조파의 유입을 없앨 수 있다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 Active power filter의 성능이 검증되면 차후 실제 시스템을 설계 및 제작하여 현장에 적용시킬 수 있다.

2.2 CT(Current Transformer)부

CT는 Power line에 흐르는 전류를 검출하기 위해 사용한다. CT의 1차측에 흐르는 전류에 의해 CT 1차측 양단에 전압이 발생하고 CT 2차측에는 이 전압에 CT의 turn 수비 만큼 비례한 값의 전압이 나타난다. 따라서 Power line에 흐르는 전류를 CT를 통하여 전압으로 검출할 수 있다.

본 연구에서 제안한 시스템의 경우는 전류의 크기 뿐 아니라 전류의 위상도 매우 중요하게 다루어져야 한다. 이는 CT의 1차측에 흐르는 전류와 CT 2차측 양단 전압의 위상차가 0 이어야한다는 것을 의미한다. 그러나 CT의 특성상 CT 1차측에 흐르는 전류와 CT 2차측 양단 전압은 90도 위상차가 발생한다. 그림 2는 CT의 특성을 파악하기 위한 회로이다.

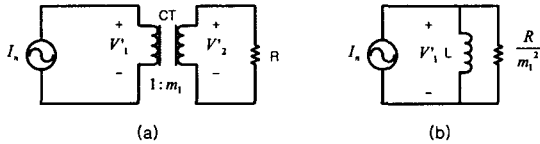


그림 2 CT의 특성을 파악하기 위한 회로(a)와 그 등가회로(b)

그림 2 (b)는 CT의 1차측만을 등가화한 것으로 R/m_1^2 에 해당하는 저항이 병렬로 연결되어 있다. 여기서 m_1 은 turn 수비이다. 이 때 CT 1차측 전압 V_1 을 구하면 수식 (1)과 같다.

$$V_1 = \frac{\frac{R}{m_1^2} X_n'}{\sqrt{\left(\frac{R}{m_1^2}\right)^2 + (X_n')^2}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \angle \tan^{-1}\left(\frac{R/m_1^2}{X_n'}\right) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 $X_n' = \sum_{n=1}^{\infty} 2\pi f_n L$ 이다. 그리고 CT의 2차측 전압 V_2 는 식 (2)와 같다.

$$V_2 = m_1 V_1 = \frac{\frac{R}{m_1} X_n'}{\sqrt{\left(\frac{R}{m_1^2}\right)^2 + (X_n')^2}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \angle \tan^{-1}\left(\frac{R/m_1^2}{X_n'}\right) \dots \dots \dots (2)$$

V_2 와 I_n 의 위상차이는 $\tan^{-1}\left(\frac{R/m_1^2}{X_n'}\right)$ 으로써 R 값이 작고 k의 값이 크면 클수록 위상차는 줄어들게 된다. 따라서 CT의 2차측에는 작은 값의 저항을 연결하고 CT의 turn수 비를 크게하여 CT의 1차측 전류와 CT 2차측 전압의 위상차를 최소화하여야 한다.

2.3 고조파 검출부

CT를 통하여 얻은 전압은 기본파 성분과 고조파 성분의 합이다. 제안된 시스템은 오직 고조파만을 필요로 하므로 CT의 2차측 전압에서 기본파 성분을 제거하여야만 한다. 고조파 검출회로는 GIC 필터와 감산회로로 구성되어 있으며 그 구조는 그림 1에 나타나 있는 것과 같다.

CT의 2차측 전압은 GIC 필터의 입력이 되고 감산회로는

CT의 2차측 전압 성분 중 60Hz 성분을 뺀 나머지 성분을 출력하며 이는 곧 고조파 성분만의 전압이 출력됨을 의미한다.

2.3.1 GIC(Generalized Impedance Converter)를 이용한 필터

그림 3 (a)는 LC 공진형 bandpass 필터이다. 이 필터의 첨예도 $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 이며 L과 C가 고정되어 있을 경우 R값이 클수록 매우 높은 첨예도를 보인다.

본 연구에서 제안한 시스템에서는 LC 공진형 bandpass 필터의 L 대신 OP-amp를 이용한 GIC를 사용하였으며 그 이유는 L을 제작하는데 드는 시간과 비용을 줄일 수 있는 점과 좀 더 정밀한 L값을 얻을 수 있다는 큰 장점때문이다.

그림 3 (b)는 GIC 회로로써 이 회로의 입력 임피던스 Z_m 은 식 (3)과 같다.

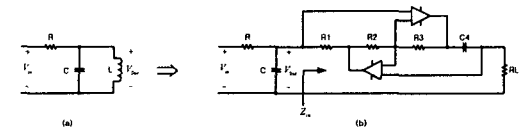


그림 3 GIC를 이용한 필터

$$Z_m = \frac{R_1 R_3 R_L C_4}{R_2} s = Ls \dots \dots \dots (3)$$

2.3.2 감산회로

그림 4는 GIC 필터에 감산회로를 연결한 고조파 검출부 전체의 회로도이다. V_m 은 CT의 2차측 전압이며 감산회로는 op-amp를 이용하여 실현하였다. $R_4 = R_5$, $R_6 = R_7$ 일 때 감산회로의 일출력관계는 수식 (4)와 같다.

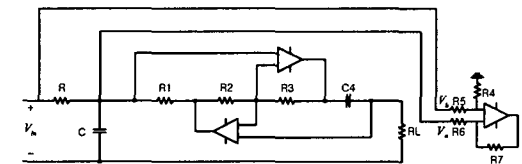


그림 4 고조파 검출부 전체 회로

$$V_{out} = V_b - V_a \dots \dots \dots (4)$$

그림 5는 고조파 검출부의 출력 특성을 본 것으로 60Hz의 주파수만을 제거하는 band rejection 필터의 특성을 확인할 수 있다.

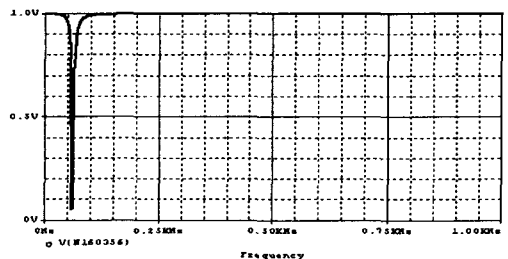


그림 5 고조파 검출부의 특성 시뮬레이션 결과

2.4 고조파 증폭부

고조파 증폭부는 power operational amplifier를 사용하여 전류를 증폭시킬 수 있도록 설계하였다. 고조파 검출부의 출력은 기본파 성분을 제외한 나머지 고조파 성분이며 이 출력을 고조파 증폭기로 증폭시킨 후 transformer를 통해 전력선에 실는다. 여기서 사용한 transformer는 고조파 증폭기와 전력선 간의 절연을 목적으로 하고 있다. CT와 고조파 검출부를 거친 출력 전압은 전력선에 직접 실기에는 크기가 너무 작기 때문에 고조파 증폭기를 통해 증폭시켜서 전력선에 실어야 한다. 그림 6은 고조파 증폭부의 증폭을 계산을 설명하기 위한 등가회로도이다.

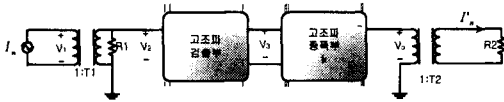


그림 6 고조파 증폭물의 계산을 위한 등가회로

전력선 자체의 저항성분과 전원 내부 저항의 합을 R_2 로 등가화 하였다. V_2 는 수식 (2)로 2.2절에서 이미 설명했다. 여기서 R_1 값이 고조파 전류와 V_2 사이의 위상차이가 없을 정도로 작다고 가정하고 증폭률 k 를 구하면 식(5)와 같다.

$$k = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{m_1}{m_2} \dots \dots \dots (5)$$

따라서 증폭률 k 는 CT의 turn 수와 비례하고 transformer의 turn 수와는 반비례하며 CT 2차측의 병렬저항 R 과는 반비례하고 전력선과 전원의 저항 R_2 와는 반비례한다. 고조파 증폭기의 증폭률을 수식(5)에 의거하여 계산하면 원하는 고조파 전류를 얻을 수 있다.

III. 결과

3-1 시뮬레이션 결과

그림 7은 시뮬레이션을 위한 회로도이다.

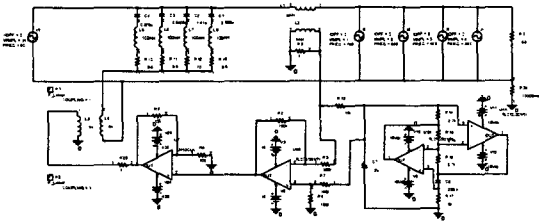


그림 7 시뮬레이션을 위한 회로도

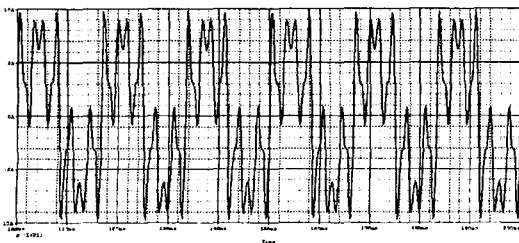


그림 8 기본파 전류와 고조파 전류 합

고조파는 5, 7, 11, 13 고조파 전류원을 이용하여 비선형 부하를 대신하였으며 이 고조파가 전력선상에서 가장 큰값으로 많이 나타나는 고조파이다.

그림 8은 고조파 전류와 기본파 전류의 합의 파형이며 그림 9는 주파수 분석결과이다.

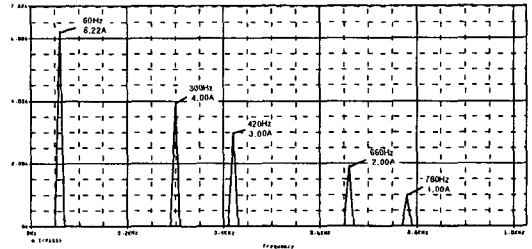


그림 9 기본파 전류와 고조파 전류 합의 주파수 특성

그림 10은 CT 2차측의 전압 파형으로 CT 1차측에 흐르는 전류파형과 같은 형태이며 주파수 분석결과가 그림 11에 나타나있다. 그림 9와 그림 11을 비교해 보면 기본파를 기준으로 한 각 고조파 성분의 비들이 서로 같은 것을 알 수 있다.

그림 12는 고조파 검출부를 거친 고조파 증폭기의 출력파형으로 주파수 분석결과가 그림 13과 같다. 기본파를 제외한 고조파 성분이 출력되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 기본파 성분이 완전히 제거되지는 않았는데 이것은 CT의 2차측 전압의 기본파 성분과 GIC 필터를 통과한 전압의 크기가 차이가 나서 나타나는 현상이다.

그림 14는 전원측에 흐르는 전류파형으로 부하에 의해 발생된 고조파 성분이 제거되고 기본파 성분만이 존재하는 것을 볼 수 있다. 그림 15는 전원측 전류파형의 주파수 분석결과 아직 잔여 고조파가 존재하는 것을 볼 수 있다. active power filter 출력이 고조파 성분과 완전하게 180°의 위상차이가 아니기 때문에 발생하는 것이다. 이는 simulator 자체가 복잡한 회로에서는 계산상의 오류를 발생하는 것이기 때문에 나타나는 현상이다. 따라서 간단한 모의 실험을 통해 제안된 시스템의 타당성을 입증할 필요가 있다.

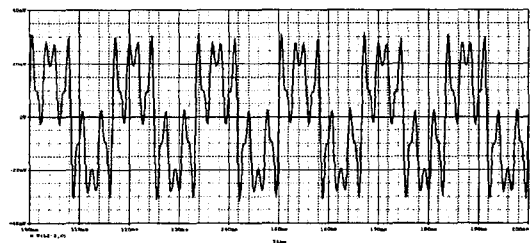


그림 10 CT의 2차측 전압 파형

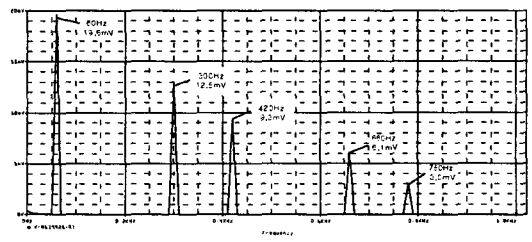


그림 11 CT 2차측 전압파형의 주파수 특성

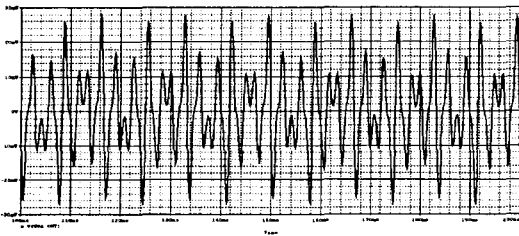


그림 12 고조파 검출부 출력파형

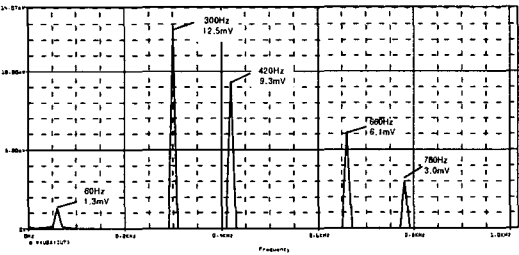


그림 13 고조파 검출부 출력 파형의 주파수 특성

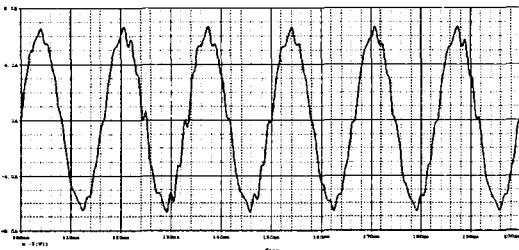


그림 14 전원측 전류 파형

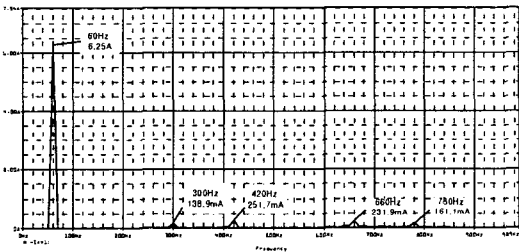


그림 15 전원측 전류파형의 주파수 특성

3.2 모의 실험

시뮬레이션 결과를 실험적으로 간단히 입증하기 위해 그림 16과 같이 회로를 구성한 뒤 실험을 하였다.

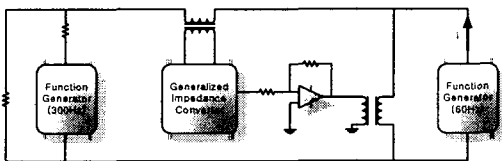


그림 16 모의 실험 회로 구조

전원과 고조파 발생원은 모두 함수발생기를 이용하였고 전원은 60Hz, 고조파 발생원은 300Hz로 정하였다. 그림 17은 active power filter가 없을 때 전류파형으로 60Hz와 300Hz 전류 파형의 합이 나타나있다. 60Hz 전류는 peak 240mA이고 300Hz 전류는 peak 50mA이다. 그림 21은 active power filter를 적용시킨후의 전류파형으로 60Hz 성분의 전류파형만 나타나서 active power filter가 제대로 동작하는 것을 알 수 있다.

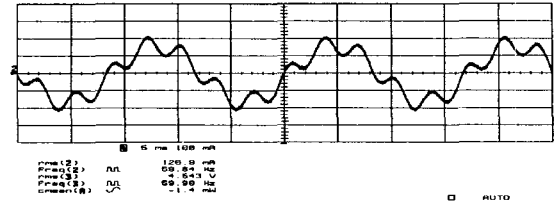


그림 17 active power filter를 적용하지 않았을 때의 전류 파형

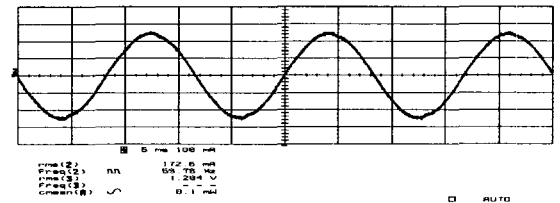


그림 18 active power filter를 적용하였을 때의 전류파형

IV. 결론

본 논문에서는 전력전자기에 의해 발생하는 고조파 전류의 제거를 위해 사용되는 active power filter에 관해 논의 하였다. 기존의 active power filter의 경우 고주파수로 인버터블 구동시키는 방식을 사용하였으며 고조파 분석을 위해 고속의 신호처리용 IC를 사용하였다. 본 논문에서는 이 방식과는 달리 아날로그 소자를 이용하여 고조파를 검출하고 고조파 증폭을 통해 전력선에 있는 전류를 제거하는 시스템을 제안하고 시뮬레이션을 통한 검증을 시도하였다. 시뮬레이션 결과, 고조파 성분을 CT와 고조파 검출부를 통해 얻어낼 수 있었으며 이 고조파 성분은 power operational amplifier를 통해 증폭을 시켜 부하에 의해 발생한 고조파 전류를 제거할 수 있었다. 또한 모의 실험을 통하여 간단히 실험적으로도 제안된 active power filter의 성능을 확인할 수 있었다.

감사의 글
본 연구는 강원대학교 BK21사업단의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] H. Kawahira, Nahamura, and S. Nakazawa, "Active power filters," in proc. JIEE IPEC, Tokyo, Japan, 1983, pp. 981-992
- [2] J. Uceda F.Aldana, and P. Martinez, "Active filters for static power converters," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 130, no. 5, pp. 347-354, 1983
- [3] Zhaoan Wang, Qun Wang, Weizheng Yao, and Jinjun Liu, "A series activepower filter adopting hybrid control approach," IEEE. Transaction on power electronics, vol. 16, no. 3, pp. 301-309, May 2001