

가변 전류형 능동전력필터

김호진 조한덕 김홍성* 최규하 김한성
 건국대학교 전기공학과

The Controllable Current-Source Active Power Filter

Ho-Jin Kim Han-Duk Cho Hong-Seong Kim* Gyu-Ha Choe Han-Sung Kim
 Dept. of Electrical Eng., Kon-Kuk University

Abstract In this paper suggested methods for current control in active filter are using the triangular carriers which were composed of independently generated threefold carriers and controllable current source which compensates the harmonics generated independently from the types of the load with instantaneous amplitude adjusting from the maximum magnitude of the compensating currents. And the 2-nd order high pass passive filter connected to the source finally supplies pure sinusoidal waves by suppressing the residual harmonics which cannot removed by the active filter. As the typical load which generates the harmonics, a rectifier was set and the system was also designed by simulations and implementations.

1. 서론

다이오드나 사이리스터 컨버터 혹은 사이크로 컨버터등을 사용하는 각종 전력전자 장치의 비선형성으로 인해 발생하는 고조파를 저감하기 위한 대책으로 능동필터를 들 수 있다. 능동필터는 컨버터를 사용하여 고조파 보상전류를 부하에 포함된 고조파전류와 크기는 같고 위상은 반대로 되게 하여 계통에 주입함으로써 고조파전류를 제거하며, 교류전력계통의 임피던스 변경과 고조파전류의 주파수 변동에 대하여 우수한 보상특성을 갖고 있다. 그러나 보상 전류는 PWM펄스 패턴으로 주입되므로 고조파를 완전히 제거하는 것은 불가능하고, 스위칭 주파수에 따라 제거가능한 고조파의 차수가 제한된다. 이런 주입전류와 고조파전류 사이의 차로 인해 보상후에도 존재하는 잔류 고조파성분 때문에, 능동필터의 스위칭주파수를 고려하여 적절한 공진주파수를 선택한 수동필터의 채택은, 전 주파수범위에 걸쳐 고조파 저감이 가능하게 된다는 점에서 필수적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 능동필터를 운전하는 방법들 가운데 하나인 삼각파 방식중 비교적 우수한 고조파 보상특성을 갖는 3개의 변조신호를 갖는 새로운 삼각파 변조방법과 보상전류의 최대 크기에 순시적으로 전류원에 흐르는 전류의 크기를 가변하는 가변전류원을 갖는 능동필터를 구현하였다. 이러한 능동필터의 제어기법은 보상전류가 동시에 두상으로 주입되는 멀티크로스현상을 제거할 수 있다는 장점을 가진다. 그리고, 2차 고역통과필터로 구성된 수동필터를 전원에 병렬로 연결하여, 잔류고조파가 전원으로 유입되는 것을 억제하여 전원에는 정현파가 흐르도록 하였다. 고조파 발생원으로 정류기 부하를 대상으로 하여 시뮬레이션과 실험으로 이론적 타당성을 입증하였다.

2. 필터에 의한 고조파 저감원리

능동필터는 기본파성분을 제외한 고조파신호를 주입 기준신호로 하여 전류형 컨버터를 통해 전원에 주입함으로써, 전원전류를 기본파로 보상하고자 하는 것이다. 그러나 능동필터로 제거할 수 있는 고조파의 차수는 스위칭 주파수에 따라 제한되므로 나머지 고차 고조파성분은 고역 통과필터를 통해 제거함으로써, 전원에는 기본파전류만 흐르도록 한다. 능동필터는 그림 1.에서처럼 고조파 발생원의 입력단에 연결되는데, 비선형부하에 의한 고조파와 동일한 보상전류를 주입해야 완전한 고조파 저감특성을 갖는다. 능동필터가 이상적이라고 가정하면, 고조파 보상전류 i_c 에 의하여 고조파전류는 상쇄되어, 교류전원측은 순수한 정현파전류 i_{sr} 로 될 것이다.

$$i_{sr}(t) = i_s(t) - i_c(t)$$

$$= \sqrt{2} I_{s1} \sin(\theta) \quad (1)$$

그러나, 실제로 능동필터에 사용되는 컨버터는 전력용 반도체소자로 구성되어 스위칭동작을 하므로, 고조파 신호와 같은 전류를 주입하는 것은 불가능하고, PWM펄스 형태로 주입된다. 이와같이 능동필터가 이상적이지 못하므로 인해 야기되는 잔류고조파 성분을 수동필터의 설계로 제거하고자 한다. 수동필터는 R, L, C로 구성되어 전원측에 병렬로 연결되며, 제거하고자 하는 고조파 주파수 부근에서 공진되도록 L, C값을 설정한다. Z_s 를 전원측 내부등가 임피던스라 하고, Z_f 를 필터의 임피던스라 하면, 공진시에는 $|Z_s| \gg |Z_f|$ 로 되어 고조파 전류의 대부분은 수동필터로 흡수된다. 그리고 필터의 성능을 나타내는 Q(Quality factor)는 R값에 좌우되므로, 이를 조정하여 전 주파수 범위에 걸쳐 원하는 만큼의 고조파를 제거할 수 있도록 설계한다.

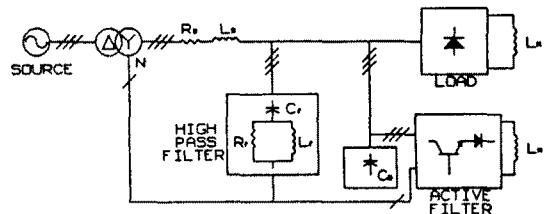


그림1. 전체 회로도

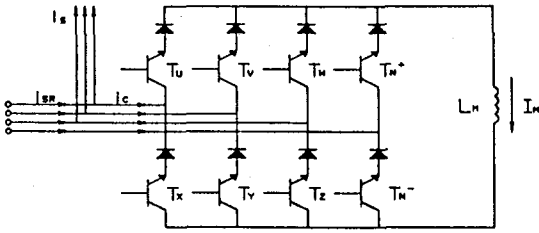


그림 2. 4각 전류형 능동필터

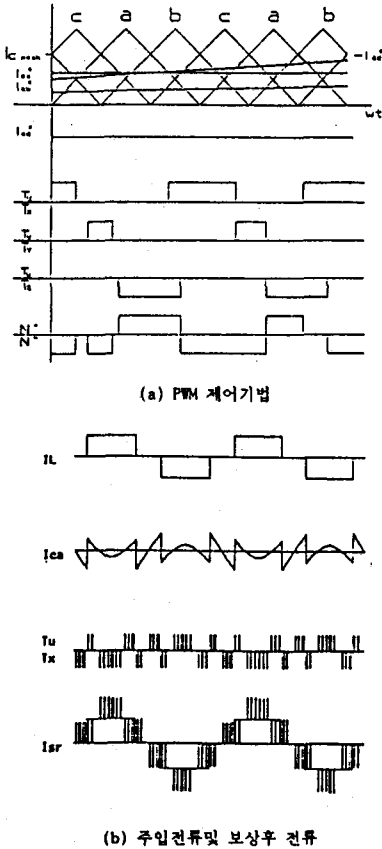


그림 3. PWM 제어 기법 및 보상후 전류

3. 전류형 능동필터

3.1. PWM 제어 기법

그림 2.는 전류형 능동필터의 개략도이고, 일반적으로 전류형 능동필터는 다음의 조건을 만족하여야 한다.

- 1) 전류형 능동필터는 최소의 시간지연을 가진 보상기준신호와 똑같은 임의의 전류파형을 발생하여야 한다.
- 2) 반드시 전류경로가 형성되어야 한다.

그림 3.은 서로 1/3주기씩 이동되어져 있는 3개의 삼각파 변조 신호를 사용한 PWM 제어 기법과 주입전류 및 보상후 전류를 나타낸다. 이 삼각파 변조신호는 전류형 능동필터의 단점인 멀티크로싱을 해결하기 위한 것으로, 각각 1/3주기씩 이동되어진 3개의 변조신호를 A, B, C 각 상에 할당하여, 이들 변조신호를 각 상의 PWM 펄스의 중심이 겹쳐지지 않도록 한다.

한다. 그림 3. (a)의 PWM 펄스는 임의의 고조파 신호에 대한 예로서, 고조파 전류가 $i_{ca}^* > i_{cb}^* > 0 > i_{cc}^*$, $|i_{ca}^*| > |i_{cb}^*| > 0 > |i_{cc}^*|$ 로 흐르는 경우에 대해 나타낸 것이다. 여기서, N*, N'는 중성선의 트랜지스터를 켜주는 PWM 신호이다.

3.2. 보상 기준신호의 검출

보상전류를 검출하기 위해서는 순시 무효전력 이론에 따라 상전압 e_a, e_b, e_c 와 부하전류 i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 를 직교하는 p축과 q축의 2상으로 변환한다. 3상을 2상으로 변환하는 이유는 제어의 간단하고, 고조파와 무효전력으로 제어대상을 나눌 수 있기 때문이다.

본 연구에서 구성한 보상기준신호 검출을 위한 블록 다이어그램을 나타내면 그림 4.와 같다.

3.3. 시스템의 구성

능동필터 시스템은 크게 전력회로, 영교차 검출회로, 소프트웨어로 분류된다. 전력회로는 중성선을 갖는 4각 컨버터로 구성되었기 때문에, 각 상은 독립적으로 되고, 단상 3대로 운전할 때 보다 회로의 구성과 제어 측면에서 유리하게 된다. 소프트웨어는 외부신호의 검출, 보상 전류계산, 연산된 보상전류 기준신호를 전원과 동기시켜 출력을 내기 위한 인터럽터 루틴, 인덕터 전류제어, PWM 펄스 발생등의 기능을 갖는다. 보상 기준신호는 3개의 삼각파 변조신호와 비교되어져서 PWM 패턴으로 변환되고, D/A 변환기를 거쳐 전력회로의 전력용 트랜지스터의 구동신호로 전달된다. 인덕터의 전류제어는 시정수가 커서 사실상 실시간제어가 불가능하므로 한 주기 마다 계산하고, 기준전류 신호와 입력 전류신호를 비례적분기를 통해 새로운 i 를 계산한다. 또한, 전류원 크기의 가변은 한 주기의 보상전류가 구해진 뒤에 보상전류의 절대치의 최대치를 구하고, 이 수치보다 1.5배 크게하여 인덕터 전류의 크기 및 그에 따른 변조신호의 최대치를 설정한다. 영교차 검출회로는 컴퓨터에서 출력되는 트랜지스터 구동용 PWM 신호를 전원 전압의 위상에 동기시키는 역할을 한다.

4. 수동필터

그림 5.는 2차 고역통과 필터의 동가회로이다. 수동필터는 각 상이 Y결선을 통해 전원의 중성선으로 연결되므로 단상동작을 하게 되는데, 이는 4각 능동 필터를 사용하기 때문에 가능하다. 수동필터는 하나씩의 캐패시터, 인덕터, 저항으로 구성되고, 여기서 L_0 와 R_0 는 전원의 내부등가 인덕턴스와 저항이다.

4.1. 공진 주파수 f_r

그림 6.은 고역통과 필터의 주파수와 임피던스의 관계를 보여준다. 여기서 Z_0 와 Z_r 는 필터 임피던스와 특성 임피던스이며 다음과 같이 표현된다.

$$Z_0 = 2\pi f_r L_r$$

$$Z_r = 1/j\omega C_r + (1/R_r + 1/j\omega L_r)^{-1} \quad (2)$$

공진 주파수 이상의 주파수범위에 대해 Z_r 는 전원 임피던스보다 작아야 한다. 만약 Q값이 2보다 작게 선택되면, Z_r 는 주파수의 증가에 따라 감소하고, 공진주파수 f_r 에서 최소로 되며 그 이후로는 일정한 값을 가지게 된다.

$$f_r = 1/(2\pi L_r C_r) \quad (3)$$

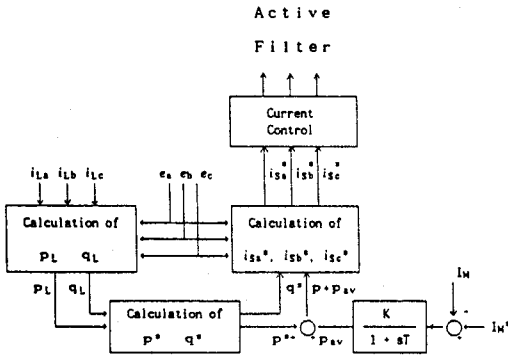


그림 4. 보상 기준신호의 검출

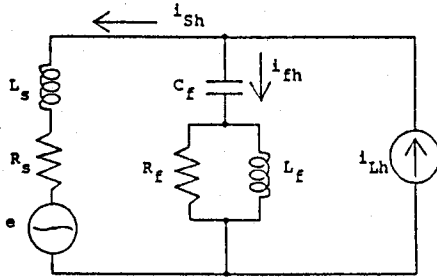


그림 5. 수동필터의 단상 동가회로

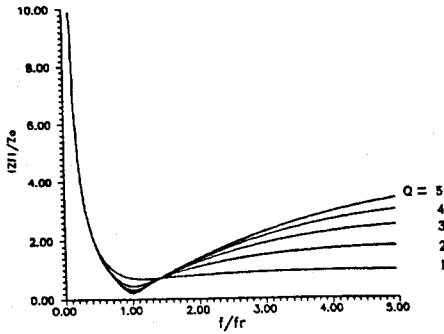


그림 6. 주파수에 따른 필터 임피던스의 변화

4.2. 커패시턴스 Cr와 인덕턴스 Lr

G_t 는 전원과 필터의 임피던스로 표현되는 전류 전달이득이다.

$$G_t = \left| \frac{i_{sh}}{i_{Lh}} \right| = \left| \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} \right| \quad (4)$$

대개 f_r 이 일정할때, C_r 가 증가한다면 진상 무효전력은 C_r 에 비례하여 증가될 것이고, 반대로 감소하게 되면 높은 주파수 범위에서 필터특성은 나빠지고, 캐리어 주파수 성분이 전원 전류에 나타나게 된다. 그리고 $L_s + L_r$ 와 C_r 사이의 병렬공진 때문에 병렬공진 주파수에 가까운 고조파는 증폭되고, 전원측과의 병렬공진주파수 f_p 는 f_r 에 가깝게 된다. 여기서 f_p 는 다음과 같이 표시된다.

$$f_p = 1 / 2\pi \sqrt{(L_r + L_s)C_r} \quad (5)$$

만약 C_r 가 감소하면 f_r 은 f_p 에 가까워진다. 능동필터는 스위칭주파수에 따라 제거 가능한 고조파의 최고차수가 제한

되므로 주파수가 f_r 을 초과하게 되면 필터링 능력이 감소하고, 고역통과 필터의 입력 전류 i_{Lh} 는 f_r 부근의 고조파를 포함하게 된다. 이런 고조파 성분은 고역통과 필터에 의해 감소되지 않고 반대로 증폭된다. 그러므로 C_r 값은 부하특성을 고려하여 신중하게 결정하여야 한다.

4.3. 저항 Rf

고역통과 필터에서 Q값의 선정 또한 중요하다. Q값은 공진주파수 f_r 이상에서 제거하고자 하는 고조파의 제거 가능한 양을 나타내기 때문에, 전 주파수범위에서의 필터의 성능을 좌우한다고 할 수 있다. 만약 Q값이 매우 크면 고역통과 필터는 L-C 동조필터와 비슷해지고, 반대로 Q값이 작으면 1차 고역통과 필터와 비슷해지기 때문이다.

$$Q = \frac{R_f}{2\pi f_r L_f} \quad (6)$$

5. 시뮬레이션 및 실험

5.1. 시뮬레이션을 통한 특성분석

그림 7.은 시뮬레이션을 통해 구한 능동필터의 각 부 파형인데 보상후 전류가 보상전보다 많이 개선되었음을 알 수 있다. 보상후 전류 i_{sh} 을 보면 주입전류의 크기가 부하전류의 크기에 비해 약 10%정도로 작게 나타나는데, 이는 전류원이 부하의 특성에 따라 인덕터 전류의 크기가 가변되어 정상상태에 도달했을 때 감소되었음을 나타낸다. 전류원으로 인한 손실면에서 보면, 손실은 회로 및 인덕터의 내부저항에 의하여 생기는 것으로, 전류원의 크기에 비례해서 나타난다. 그래서 전류원의 크기를 줄일수록 유리하고, 시뮬레이션을 통해 가변전류원의 장점을 확인하였다. 그림 7.에서 error는 컨버터에서 전진속으로 주입되어야 할 전류가 주입되지 못하고 남은 전류의 파형으로, 제어기법과 컨버터의 스위칭주파수에 따라 달라지고 이에 따라 컨버터의 특성이 좌우된다. 수동필터의 입력단에 유입되는 전류는 능동필터에 의해 보상되고 남은 잔류고조파 성분과 기본파 성분이므로, 능동필터의 성능 또한 전체 시스템의 성능을 크게 좌우한다.

5.2. 결과

실험에서 능동필터의 인덕터는 340[mH]를 사용하였으며 저항은 3[Ω]으로 측정되었다. 그림 8. (a)에는 전원전류와 부하전류의 파형과 보였고, (b)에는 보상후 전류를 나타내었다. 그림 9.는 부하 전류의 스펙트럼과 보상후 스펙트럼을 보였다. 수동필터는 원하는 공진주파수에서 공진이 일어나도록 다양한 실험을 통해 R_f, L_r, C_r 의 적절한 값을 선정하였다. 실험에서 수동필터의 특성에 가장 크게 영향을 미친것은 C_r 값으로, C_r 가 너무 작으면 필터 특성이 나빠지고, C_r 가 너무 커지면 고조파 보상역할은 수행할 수 있으나, 진상 전류가 흘러 역율이 저하됨을 알 수 있었다. 그리고 공진시 주파수 범위에서의 필터 특성을 좌우하는 Q값은 R_f 에 비례하므로 R_f 의 작은 변화에도 파형은 큰 변화를 보였다. 그림 8. (b)하단의 파형은 능동필터만 운전하였을 때의 전류파형으로 시뮬레이션의 결과와 동일하게 나타났고, 상단의 파형은 수동필터와 능동필터를 병렬운전하였을 때의 전류파형으로, 능동필터만 운전했을때 보다 정현파에 가까운 파형을 얻을 수 있었다. 여기서 수동필터는 17차 고조파 주파수에서 공진이 일어나도록 설계되었다. 그림 9. (a)의 스펙트럼은 부하전류의 스펙트럼이고, (b)는 능동필터만으로 보상한 경우의 것으로, 저차 고조파성분이 많이 감소되었음을 볼 수 있다. 그리고 (c)는 능동필터와 수동필터를 병렬운전한 경우의 스펙트럼으로, 능동필터만 운전시보다 고조파 성분이 상당히 제거되었음을 알 수 있었다.

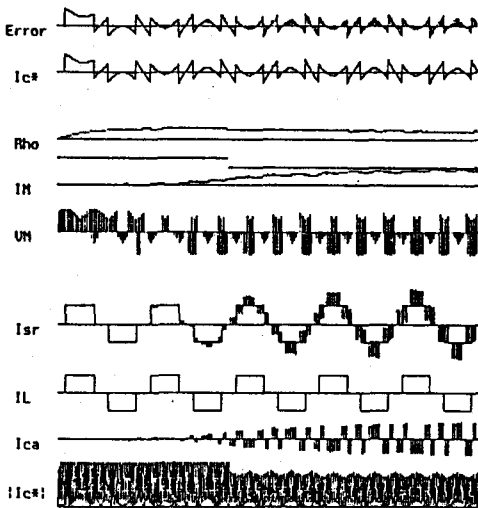
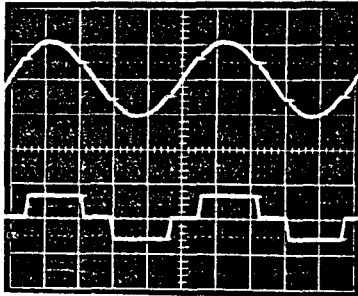
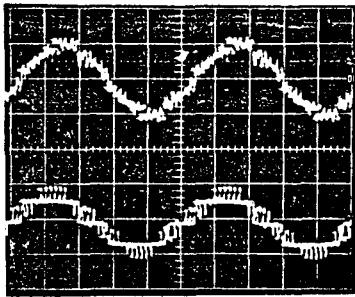


그림 7. 시뮬레이션을 통한 각 부 파형

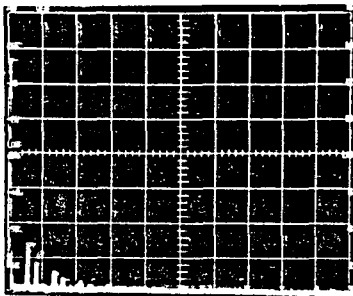


(a) 전원전류와 부하전류파형



(b) 보상후파형

그림 8. 시스템의 각 부 파형



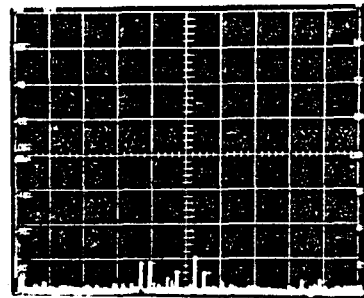
(a) 부하전류의 스펙트럼

6. 결론

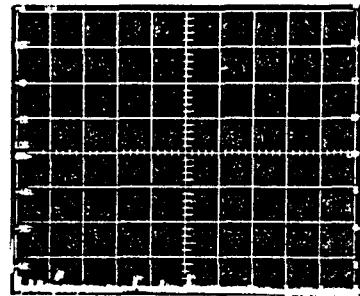
본 논문에서는 3상 능동필터 시스템을 위한 가변전류원을 갖는 3개의 변조신호를 사용한 삼각파 변조방법과 고차고조파 저감을 위한 수동필터와의 병렬운전에 대하여 고찰하였다. 이를 통해 우리는 전 주파수 범위에 걸친 우수한 고조파 저감특성을 얻을수 있었고, 능동필터의 스위칭주파수와 수동필터의 공진주파수 및 Q값의 적절한 선정이 전류필터 특성의 열쇠임을 알 수 있었다. 그러나 실험결과에서와 같이 콘덴서의 영향에 따른 위상의 문제를 해결하지 못했다. 따라서 공진주파수 선정에 따른 수동필터의 최적설계에 대한 문제가 요구된다.

7. 참고문헌

- [1] Y. Hayashi and N. Sato, "A Novel Control of a Current-Source Active Filter for ac Power System Harmonics Compensation", IEEE Trans. on Industrial Applications, Vol.27, No.2, Mar./Apr.1991
- [2] H. Fujita and H. Akagi, "Design Strategy for the Combined System of Shunt Passive and Active Filter", IAS, Annual Meeting IEEE 1991
- [3] T. Ise, Z. Wang and Y. Murakami, "Compensation Characteristic of the Active Filter Using a Current Source PWM Converter", IPEC 1990
- [4] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", IEEE Trans. on Industrial Applications, Vol.1A-20, No.3, May/June 1984
- [5] Gyu-Ha Choe, Min-Ho Park, "A New Injection Method for AC Harmonic Elimination by Active Power Filter", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.35(1), Feb. 1988
- [6] 박수영, "가변전류원을 사용한 전류형 능동필터에 관한 연구", 건국대학교 석사학위 청구논문, 1992.



(b) 능동필터 보상후 스펙트럼



(c) 병렬운전후 스펙트럼

그림 9. 시스템의 각 부 스펙트럼