

역률 개선 컨버터용 고차 능동 필터의 설계 및 분석

이 동영*, 조 보형
서울 대학교 공과대학 전기 공학부

Design and Analysis of High-order Active Input Filter for Power Factor Correction (PFC) Converter

Dong-Young Lee*, Bo-Hyung Cho
School of Electrical Engineering, Seoul National University

ABSTRACT - In this paper, active input filter for power factor correction (PFC) circuit employing ripple current and voltage cancellation is proposed to reduce filter's size and cost, and to make filter design easy. Switching ripple current and voltage can be sensed through the secondary windings of filter inductor. Single stage passive filter can achieve high order filter characteristics by using active ripple current and voltage cancellation technique.

Conventional high order passive filter and its problems are suggested. Analysis of active filter and design procedure are detailed. Simulation result is presented to verify high order filter characteristics of proposed scheme.

1. 개론

최근 고역률과 입력 전류의 낮은 고조파 왜곡에 대한 요구가 점점 증가하고 있다. 이러한 역률 조건을 만족시키고 높은 효율을 얻기 위해 스위칭 방식의 역률 보상 회로가 널리 쓰이고 있다. 그러나, 스위칭 방식의 역률 보상 컨버터는 고주파수 스위칭 맥동 전류를 발생시킨다. 그래서, FCC, VDE 0871 등과 같은 전자파 장해(EMI) 기준을 만족시키기 위해서는 입력 필터가 이 맥동 전류를 감쇄시켜야 한다.

특히 역률 보상 컨버터의 입력 필터는 다음과 같은 요구 조건을 가진다. 첫째, 전원 주파수에서 역률이 1에 가깝기 위해서 전체 필터 캐페시턴스가 제한된다. 동시에 역률을 낮추기 위한 상 지연(phase delay)을 막기 위해서 입력 필터의 차단 주파수는 전원 주파수보다 훨씬 높아야 한다. 둘째, 전자파 장해 규격을 만족시키기 위해서 입력 필터는 충분한 맥동 감쇠(ripple attenuation)가 있어야 한다. 위의 요구 조건을 만족시키기 위해서 Cauer-Chebychev 필터 같은 고차 수동 필터가 소개되었다. 그러나, L C 소자의 숫자가 매우 많고 구조가 복잡하여 설계하기가 어렵다. 본 논문에서는 능동 보상 방법을 이용한 1 단 LC 필터가 제안되었다.

제안된 입력 필터는 세 단으로 구분된다. 첫 단은 맥동 전류와 전압을 측정하는 단이다. 맥동 전류와 전압은 필터 인덕터의 전압 강하를 이용해 저항을 통해 측정할 수 있다. 둘째 단은 보상 회로 단이고, 마지막 단은 보상 전류를 주입하는 단과 보상 전압을 인가하는 단이다. 보상 회로 단에서는 스위칭 주파수의 맥동 성분만이 능동 회로를 통해 필터링이 된다. 마지막으로 전압 신호가 주입 전류로 변환되어 주입되고 보상된 전압 신호는 변압기를 통해 필터 캐페시터에 직렬로 인가된다.

본 논문에서는 필터 설계 과정을 보여주기 위해 능동 필터의 보상 회로의 설계와 1 단 수동 필터의 인덕터, 캐페시터의 설계를 제시한다.

2. 고차 수동 필터 (Cauer-Chebychev 필터)

역률 보상 컨버터용 입력 필터의 요구 조건을 만족시키기 위해서는 고차 수동 필터가 필요하다. 고차 Cauer-Chebychev 필터의 구조는 너무 복잡하고 각 소자의 계산이 너무 어렵다. 게다가 소자 값의 변화에 따라 필터의 특성이 매우 민감하게 변한다.

본 논문에서는 수동 필터의 문제를 해결하고 필터의 크기를 줄이기 위해 능동 입력 필터를 제안한다.

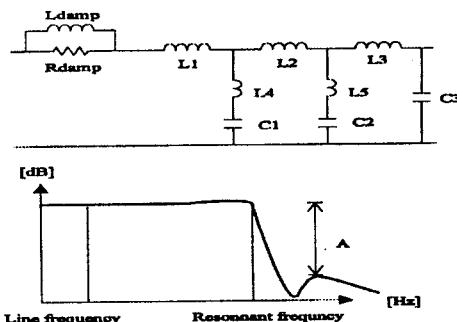


그림 1.6 차 Cauer-Chebychev 필터

3. 제안된 방법과 설계 과정

그림 2는 능동 맥동 상쇄를 간략히 보여 준다. 필터 인덕터의 맥동 전류를 측정하여 180도 위상이 바뀌어 보상한다. 보상된 전류를 다시 주입함으로써 맥동 전류를 상쇄시킨다. 이 맥동 전류를 측정하기 위해서 인덕터 양 단에 유기된 전압을 이차 저항을 통해 측정한다. 이 측정된 전압을 적분하여 인덕터의 맥동 전류와 비례하는 전압 신호를 얻는다. 이 전압을 보상한 후 보상된 전압 신호를 전류로 바꾸어 주입시킨다. 그리고 필터 인덕터 양단의 전압을 측정하여 보상한 후 캐페시터에 직렬로 인가하여 맥동 전류를 상쇄시킴으로써 인덕터의 맥동 전류를 감쇄시킨다.

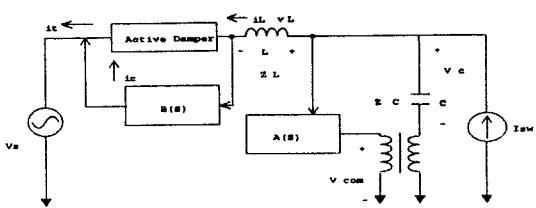


그림 2. 능동 필터의 구조

고차 필터 특성을 얻기 위해 보상 회로가 필요하다. 그림 3은 시스템의 간략화된 블록 다이어그램을 보여준다.

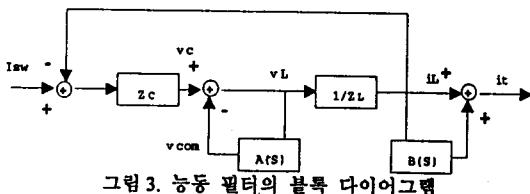


그림 3. 능동 필터의 블록 다이어그램

전체 필터의 전달 함수는 아래와 같다.

$$\frac{I_L}{I_{sw}} = H^*(s) = (1 + B(s)) \cdot \frac{\frac{Z_c(s)}{1 + A(s)}}{\frac{Z_c(s)}{1 + A(s)} + Z_L(s)} = (1 + B(s)) \cdot H(s) \quad (1)$$

그리고, 필터의 출력 임피던스는 아래와 같다.

$$Z = \frac{V_c + V_{com}}{I_{sw}} = \frac{\frac{Z_c(s)}{1 + A(s)} \cdot Z_L(s)}{\frac{Z_c(s)}{1 + A(s)} + Z_L(s)} = \frac{Z_c(s)}{1 + A(s)} // Z_L(s) \quad (2)$$

위 식에서 보듯이 맥동 전압 보상 회로에 의해 캐페시턴스가 $(1+A(s))^2 C$ 로 보상된다. 하지만 전원 주파수에서 필터 캐페시턴스의 최고치가 제한되고 고주파수 맥동 전압만을 보상하기 위해서 $A(s)$ 는 전원 주파수에서는 이득이 1보다 작아야 하고 고주파수에서는 큰 이득을 가져야 한다. 그림 4는 $A(s)$, $L(s)$, $C(s)$, $L'(s)$, $C_{eff}(s)$, $H(s)$ 의 점근선을 보여준다.

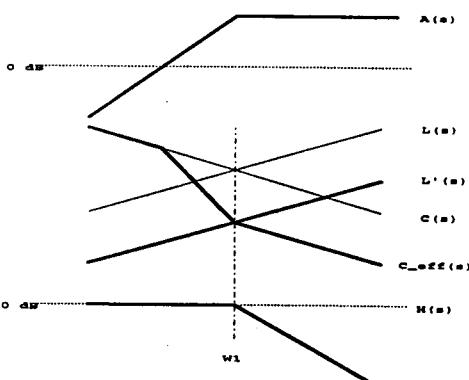


그림 4. $A(s)$, $L(s)$, $C(s)$, $L'(s)$, $C_{eff}(s)$, $H(s)$ 의 점근선

필터 인덕터 전류의 전원 주파수 성분을 제거시키기 위해서 보상 회로 $B(s)$ 는 고주파 통과 필터(high pass filter) 특성을 가져야 한다. 동시에 스위칭 주파수에서 충분한 맥동 감쇠를 얻기 위해서 $1+B(s)$ 는 고차의 감쇠 기울기를 갖는 저주파 통과 필터(low pass filter) 특성을 가져야 한다. $B(s)$ 의 최적 선택은 아래와 같다.

$$B(s) = \frac{-s^2 \left(s + \left(1 + \frac{1}{Q} \right) \omega_0 \right)}{(s + \omega_0) \left(s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2 \right)} \quad (3)$$

$$1 + B(s) = \frac{\left(1 + \frac{1}{Q} \right) \omega_0^2 \left(s + \frac{\omega_0}{1 + \frac{1}{Q}} \right)}{(s + \omega_0) \left(s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2 \right)} \quad (4)$$

그림 5는 $B(s)$, $1+B(s)$, $H(s)$, $H^*(s)$ 의 점근선을 보여준다.

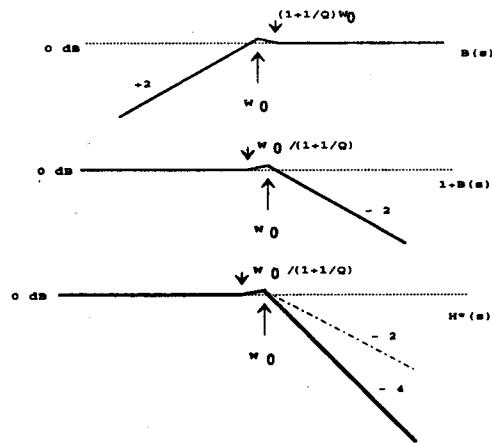


그림 5. $B(s)$, $1+B(s)$, $H(s)$, $H^*(s)$ 의 점근선

능동 필터를 설계하기 위해서는 $B(s)$ 와 LC 필터의 공진 주파수 그리고 $A(s)$, 필터 인덕턴스와 캐페시턴스의 값을 정해야 한다.

역률 보상 컨버터의 입력 필터에서 전체 캐페시턴스가 아래 식에 의해서 제한된다. [2]

$$C_{max} = \frac{I_m}{\omega \cdot V_m} \tan(\cos^{-1}(IDF)) \quad (6)$$

where, IDF = cosine : displacement power factor

$\omega = 2\pi \times 60$ [rad/sec]

V_m : rms. value of the input voltage,

I_m : rms. value of the line frequency current

$A(s)$ 의 고주파수 이득이 크면 클수록 실제 필터 인덕턴스는 $1/(1+A(s))$ 만큼 작아질 수 있다. 하지만 전원 주파수에서 이득이 1보다 작아야 하므로 $A(s)$ 는 큰 기울기를 가져야 한다. 그리고 $A(s)$ 를 잘 설계하면 별도의 템퍼가 없어도 필터의 공진을 막을 수가 있다. $A(s)$ 는 이론적으로 고주파수에서 무한 이득을 가질 수 있으나 실제 설계를 고려하여 고주파수에서의 이득을 10으로 잡으면 필터 인덕턴스는 $1/11$ 만큼 작아진다.

$B(s)$ 의 차단 주파수가 낮을수록 많은 맥동 감쇄가 되므로 수동 필터의 인덕턴스가 작아진다. 그러나, 이것 때문에 보상 회로에서 전원 주파수 성분의 전류가 멀 제거된다. 전원 주파수 전류를 특정 값까지 제한하기 위해서 $B(s)$ 의 차단 주파수는 아래의 식보다 높아야 한다.

$$\omega_0 \geq 2\pi \cdot 60 \left(\frac{I_m}{I_x} \right)^{0.5} \quad (7)$$

Where, I_m : rms. value of the line current

I_x : specified limit

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot C (1 + A(s))} \quad (8)$$

where, ω_0 is the resonant frequency of filter.

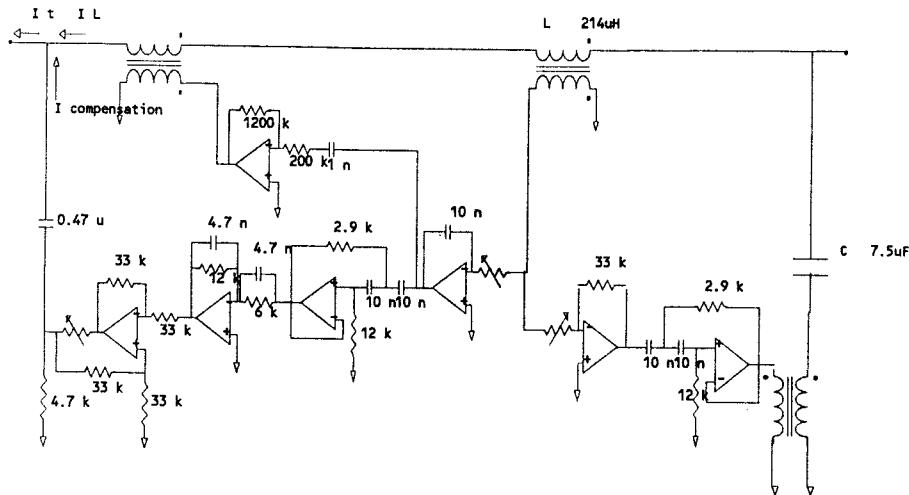


그림 7. 능동 필터 회로도

우선 필터의 전체 캐페시턴스가 정해지고 둘째로 $B(s)$ 의 차단 주파수가 선택된다. 스위칭 주파수에서 $1+B(s)$ 의 맥동 감쇠가 계산된다. 세째로 전체 맥동 감쇠 규격을 만족하기 위해서 수동 필터의 공진 주파수가 정해진다. 마지막으로 $A(s)$ 가 정해지면 보상된 캐페시턴스와 필터의 공진 주파수로부터 필터 인덕턴스를 정한다(식 (8)). 필터의 공진을 막기 위해 능동 램프를 사용한다. 병렬 RL 램프 대신에 능동 램프를 사용함으로써 필터의 크기를 줄이고 효율을 향상시킨다.[2]

4. 설계 예와 시뮬레이션 및 실험 결과

3700W buck+boost 역률 보상 컨버터의 입력 필터를 설계하였다.

3700W buck+boost 역률 보상 컨버터는 50kHz의 스위칭 주파수와 4.2A의 맥동 전류를 가진다. 전자파 규격 (VDE 0871)을 만족하기 위해서 스위칭 주파수에서 88 dB의 맥동 감쇠가 필요하다. 식(6)에서 전체 필터 캐페시턴스 C_{max} 는 7.5 μ F가 된다. 필터의 공진 주파수와 보상된 캐페시턴스로부터 인덕턴스는 21.4 μ H가 된다. 위의 설명으로부터 설계된 값은 아래와 같다.

Filter capacitance	$C = 7.5 \text{ } \mu\text{F}$,
filter inductance	$L = 21.4 \text{ } \mu\text{H}$,
passive filter cut-off frequency	$\omega_1 = 2.5 \times 10^4 \text{ [rad/sec]}$,
passive filter Q factor	$Q_1 = 1$,
active filter cut-off frequency	$\omega_0 = 1.7 \times 10^4 \text{ [rad/sec]}$,
active filter Q factor	$Q = 1$,

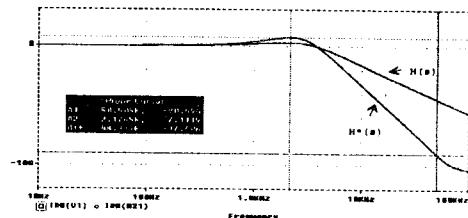
표 1. 능동 필터의 설계 값

그림 6은 주파수 영역과 시간 영역에서의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션 결과에서 맥동 감쇠는 90 dB이다.

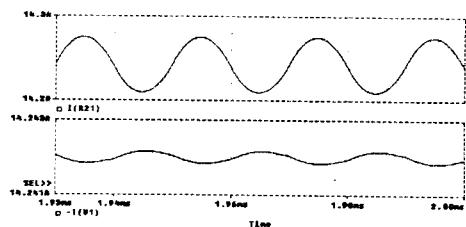
고차 수동 필터(6차 Cauer-Chebyshev 필터)의 인덕터 개수가 6개이고 전체 인덕턴스 494 μ H인 것에 비해 능동 필터는 21.4 μ H의 인덕터 하나만 사용한다.

	Passive filter	Active filter
Total capacitance	7.5 μ F	7.5 μ F
number of capacitor	3	1
Total inductance	494 μ H	21.4 μ H
number of inductor	6	1

표 2. 능동 필터와 수동 필터의 비교



(a) 능동 필터의 주파수 응답 시뮬레이션



(b) 능동 필터의 시간 응답 시뮬레이션

그림 6. 시뮬레이션 결과

능동 필터의 구현은 세 단계로 나뉘어진다. 첫째는 전류 생성하는 단이고 둘째는 보상 회로 그리고 마지막은 전류 주입하는 단과 보상된 전압을 인가하는 단이다.

그림 7은 능동 필터의 구체적인 회로도이다.

5. 결론

대용량 역률 보상 컨버터에서, 제안된 능동 필터 방식은 전체 효율을 향상시키면서 필터의 크기와 비용을 줄일 수가 있다. 본 논문에서는 고차 수동 필터와 비교하여 능동 필터 방식이 수동 LC 소자의 숫자와 크기를 줄일 뿐만 아니라 설계 또한 간단함을 보였다.

REFERENCES

- [1] A. I. Zverev, *Handbook of Filter Synthesis*, New York : John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- [2] V. Vlatkovic, D. Borovjevic, and F. C. Lee, "Input Filter Design for Power Factor Correction Circuits," *Proceedings of the IECON'93*, pp. 954-958, 1993.
- [3] B. H. Cho and D. H. Lee, "A Single PWM Section Solar Array Shunt Switching Unit with an Active Ripple Filter," *IECEC*, August 1995.