

전력용 능동필터용 Notch Filter 설계기법

민준기, 김형철, 최재호
충북대학교 전기전자 컴퓨터 공학부

Notch Filter Design Method for the active power filter

Joonki Min, Hyungchul Kim, Jaeho Choi
School of Electrical and Computer Engineering Chungbuk Univ.

Abstract - 전력용 능동 필터를 제어하기 위해서는 보상 고조파 전류에 대한 지령치가 필요하다. 3상 전력용 능동 필터의 경우 순시전력이론을 이용하여 보상 전류 지령치를 계산할 수 있다. 하지만 단상 전력용 능동 필터의 경우에는 디지털 필터를 사용하는 것이 일반적이다. 디지털 필터의 차수가 높은 경우에는 필터의 성능이 향상되지만 높은 차수에 따르는 연산시간의 증가와 민감도 증가로 인하여 설계 조건에 부합하는 저차 디지털 필터의 설계가 필요하다. 본 논문은 제안된 notch filter 설계 기법으로 디지털 필터를 설계하고 제어루프에 필터 사용시 발생 할 수 있는 안정도 저하를 평가하고, 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 검증하였다.

1. 서 론

전력전자 기술이 발달함에 따라 비선형 부하의 사용이 증가하여 배전망의 전력품질에 많은 영향을 받고 있다. 가변속 모터 구동, 사이리스터 정류장치, 대용량 무정전 전원장치 등과 같은 3상 비선형 부하들과 SMPS, 형광등의 전자식 안정기, 다이오드 정류기와 같은 단상 비선형 부하들에 의해 전류고조파가 발생하고 전류고조파로 인하여 정밀 기기의 오동작, 전력 전송선의 손실 증가, 과도학 증성선 전류 발생, 적산 전력계의 부정확한 동작 유발, 변압기의 정격 감소, 다른 전력회로와의 공진 등과 같은 문제가 발생하게 된다.

이러한 전류 고조파에 의해서 발생하는 문제에 대한 가장 좋은 대책은 전력용 능동필터를 설치하는 것으로 알려져 있다. 3상 전력용 능동필터의 제어 지령치는 순시전력이론을 이용하여 연산할 수 있지만, 단상 전력용 능동필터의 경우에는 디지털 필터를 사용하는 것이 일반적이다.

단상 전력용 능동필터의 디지털 필터 설계에 있어서 필터의 차수가 높을수록 위상과 크기 오차가 줄어드는 장점이 존재하지만, 차수가 높을수록 연산량이 증가되는 문제점을 안고 있다. 그리고 필터의 구조와 위치에 따라 제어 안정도에 영향을 미치게 된다.

본 논문은 제안한 설계기법으로 notch filter를 설계하고, 필터를 포함한 전달함수의 상대안정도를 보데선도로 해석하였다.

2. 디지털 필터

2.1 Notch Filter 전달 함수



<Fig 1> Notch filter block diagram

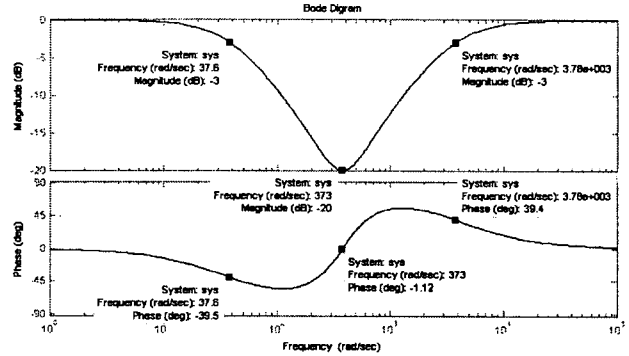
s도메인에서 설계된 notch filter의 블록은 그림 1과 같고 그 전달함수는 식(1)과 같다.

$$F(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_1\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

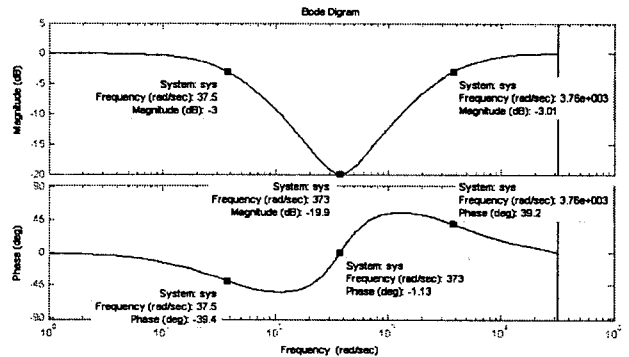
단, $\omega_n=376.99[\text{rad/sec}]$, $\zeta_1=1$, $\zeta_2=10$ 일때 보데선도를 그리면 그림 1과 같다. 샘플링 주파수가 10[kHz] 일때 디스크리트 보데선도를 그리면 그림2와 같다. 그리고 bilinear 변환을 이용 Z변환하여 이산방정식으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$y(n) = 44.05943y(n-1) - 13.73741y(n-2) + 22.87617x(n) - 44.05943x(n-1) + 21.21458x(n-2) \quad (2)$$

그림 1은 notch filter의 차단 주파수가 373[rad/sec] 즉, 약 60[Hz]가 됨을 보여주고 있다. -3[dB]의 주파수는 37.6과 3780[rad/sec]이다. 즉, 6과 601[Hz]이다. 이것은 notch filter의 주파수 차단 영역이 6에서 601[Hz]까지이고 60[Hz]에서 -20[dB]의 감쇄율을 가지는 것을 보여주고 있다. 하지만 감쇄율이 양의 값을 가지는 영역은 존재하지 않는다.



<Fig 2> Bode diagram of notch filter



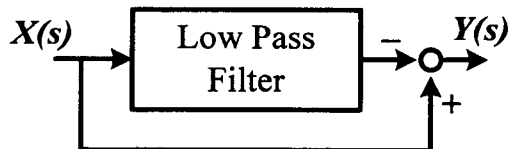
<Fig 3> Bode diagram of digital notch filter

s도메인에서 z도메인으로 매핑될때 압축 특성에 의하여 주파수의 찌그러짐 현상이 발생하게 된다. 그리고 이것은 샘플링 주파수에 의해 가장 큰 영향을 받게 된다. 이것은 ω_n 이 376.99[rad/sec]로 선택되어 필터가 설계되었지만 그림 2에서 가장 큰 감쇄율을 가지는 차단 주파수가 373[rad/sec]이 됨으로 확인 할 수 있다. 이러한 특성 때문에 디지털 필터를 설계할 때는 이를 보정해 주어야 한다. 이러한 특성은 그림 3에서도 동일하게 나타나고 있다. 이러한 주파수 변동은 미리 보정해 주어야 하는데 이것을 주파수축 보상(frequency prewarping)이라고 하고 식으로 나타내면 식(3)과 같다.

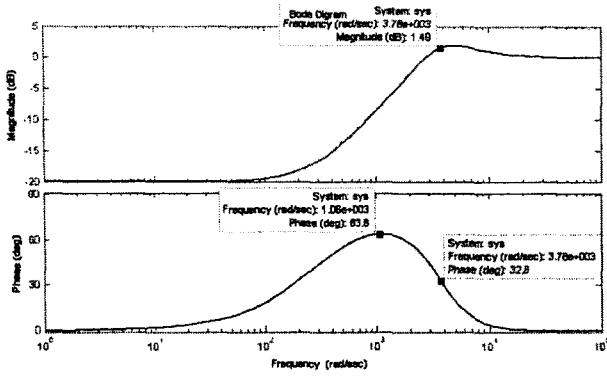
$$\omega_n' = \frac{2}{T_{\text{samp}}} \tan \frac{\omega_n}{2} \quad (3)$$

여기에서 ω_n' 는 보상된 주파수 이고, T_{samp} 는 샘플링 주기, ω_n 은 필터 설계를 위한 주파수이다. 즉, ω_n 으로 필터를 설계하려고 한다면, 주파수축 보상을 거친 ω_n' 값으로 필터를 설계해야 실제 필터는 ω_n 에 해당하는 필터 성능을 지니게 된다.

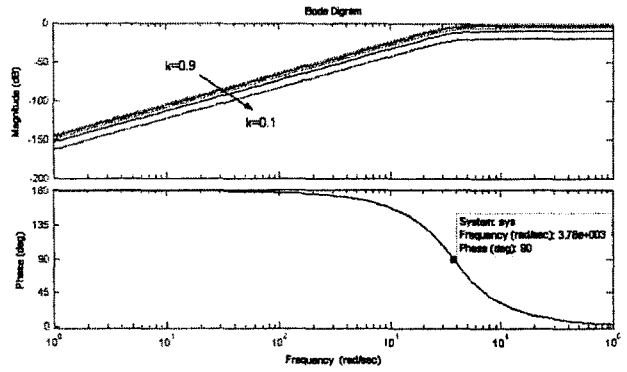
2.2 Low Pass Filter 전달 함수



<Fig 4> Low pass filter block diagram



<Fig 5> Bode diagram of LPF block(k=0.9)



<Fig 9> Bode diagram of HPF gain k from 0.1 to 0.9

$$F(s) = \frac{ks^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

단, $\omega_n=376.99$ [rad/sec], $\zeta=0.7$, k는 HPF 이득이다. 그림 8은 k=0.9일때의 보데선도를 보여주고 있다. 차단영역인 377[rad/sec]에서 -40[dB]의 감쇄율을 보여주고 있다. 그리고 주파수가 낮아질수록 감쇄율이 증가하는 특성을 보인다. 그림 9는 HPF의 이득이 0.9에서 0.1까지 감소할 때의 보데 선도를 나타내고 있다. HPF의 이득 k가 감소함에 따라 낮은 주파수영역에서의 감쇄율은 더욱 증가하지만, 통과 주파수 영역에서의 감쇄율이 0보다 더 작은 값을 가지게 된다.

3. 결 론

본문에서 notch filter, LPF 페루프, HPF를 각각 60[Hz]이하의 주파수가 차단되도록 설정하여 전달함수를 유도하고, 각각의 보데 선도를 그렸다.

LPF의 경우 이득 k가 0.9일 때 감쇄율이 양의 값이 되는 영역이 존재하게 된다. 이 경우 필터링된 신호의 왜곡이 일어 날수 있기 때문에 필터를 설계할 때 이러한 점을 고려하여 감쇄율이 항상 일정한 기울기를 가지도록 설계해야 한다.

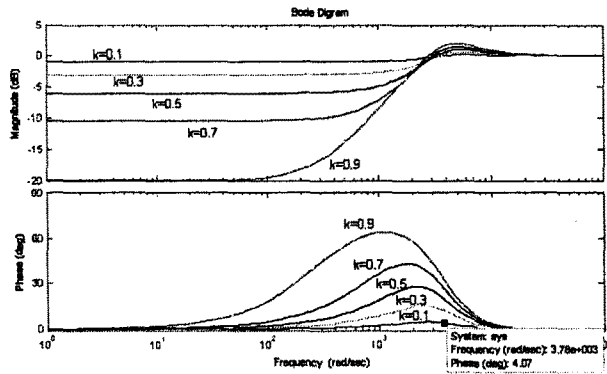
HPF의 경우 이득 k가 0.9일 때 낮은 주파수 영역에서 감쇄율이 굉장히 증가하는 특성을 보이고 있다. 이것은 아날로그 시스템에서는 좋은 성능이 될 수 있겠지만, 디지털 시스템에서는 발산 할 수 있는 여지를 남겨둔다. 그러므로 감쇄율은 일정한 범위내에서 설계되는 것이 효과적이라 할 수 있다. 그리고 이득 k가 0.9보다 감소할수록 통과 영역의 감쇄율이 0이 아닌 더 작은 값을 가지게 되는 문제가 발생한다.

notch filter의 경우 일정한 감쇄율을 가지는 특성을 나타내고, 그리고 통과영역에서 감쇄율이 0이 되는 좋은 성능을 가지고 있다. 그리고 Z변환을 통하여 이산방정식에서의 보데 선로도 좋은 특성을 나타내고 있다.

전력용 능동필터에서 고조파 주파수 항을 끌어 내기위해 필터를 사용하는 경우 notch filter의 감쇄특성이 가장 우수한 것을 보였다. 그리고 notch filter, LPF, HPF 모두 안정이지만 상대적으로 notch filter의 상대안정도가 가장 크다.

[참 고 문 헌]

- [1] 임재탁, 이두수, *디지털 신호처리*, 회중당, 260-278, 1995
- [2] K. Hirano, S. Nishimura, S. Mitra, "Design of Digital Notch Filters," *IEEE trans. Communications*, vol.22, Issue 7, pp.964-970, jul, 1974



<Fig 6> Bode diagram of LPF gain k from 0.1 to 0.9

전력용 능동 필터에서 고조파 전류를 만들어 내기 위한 사용하는 LPF의 블록은 그림 4와 같다. 그리고 이때의 페루프 전달함수는 식(4)과 같다.

$$F(s) = \frac{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2(1-k)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

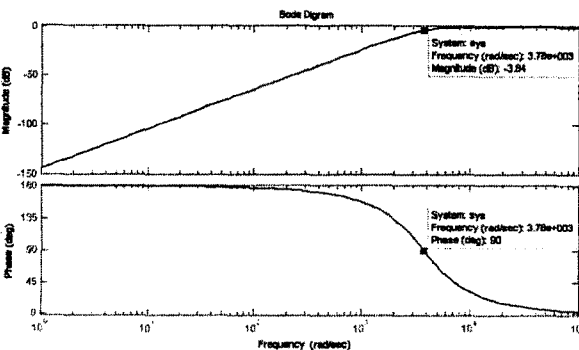
단, $\omega_n=376.99$ [rad/sec], $\zeta=0.7$, k는 LPF 이득이다. k=0.9일때 식(3)에 대한 보데선도는 그림 5와 같다. 그림 5에서 신호의 피드포워드에 의해 HPF의 특성을 가진다. 3780[rad/sec]에서 notch filter일때 -3[dB]였지만 1.49[dB]를 가지므로 신호가 차단 정도가 떨어진다고 할 수 있다. 377[rad/sec]에서 -15[dB] 정도의 감쇄율을 가진다. 그림 6은 LPF 이득 k값을 0.1에서부터 0.9까지 변화가 보데선도에 어떤 영향으로 나타나는지를 보였다. LPF 이득 k값이 커질수록 주파수 감쇄율이 증가한다는 것을 알 수 있다.

2.3 High Pass Filter 전달 함수



<Fig 7> High pass filter block diagram

전력용 능동 필터에서 고조파 전류를 만들어 내기 위한 사용하는 HPF의 블록은 그림 7과 같다. HPF의 전달함수는 식(5)과 같다.



<Fig 8> Bode diagram of HPF(k=0.9)