

선형 영구자석 동기전동기 구동장치의 진동억제를 위한 노치필터 자동조정

이진우
두원공과대학

Automatic Tuning of Notch Filter to Suppress Oscillations in a PMLSM Drive

Jin-Woo Lee
Doowon Technical College

ABSTRACT

This paper deals with an automatic tuning method of the notch filter to suppress oscillations in a permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM) drive. First, it saves automatically the reference torque-component current when oscillations are detected. Then the oscillation frequency of the saved data is calculated by using the fast Fourier transform(FFT) algorithm. And also the Hanning function is used to reduce the leakage components due to the aperiodic measurement data. Finally, the proposed method tunes the notch filter to suppress oscillations. Experimental results on the test rig show the validity of the proposed method.

1. 서론

산업용 서보제어 시스템에서 전동기와 부하의 결합 특성에 따라서 기계적인 진동이 발생할 수 있으며, 압연기, 공작기계, 제지기계 등에서 발생하는 진동을 해결하기 위한 연구가 수행되었다^{[1],[2]}. 진동억제를 위한 방법 중에서 노치필터를 적용하는 방법은 구현이 간단하고 진동주파수가 높은 경우에도 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다^[2]. 따라서 본 논문에서는 선형 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM)의 서보제어에 있어서, 진동을 억제하기 위한 노치필터의 적용과 관련하여 진동발생을 설정한 기준에 의하여 자동적으로 검출하고, Hanning 함수를 적용한 데이터를 저장 완료한 후에 FFT를 수행하여 진동주파수를 구하며, 이 주파수로 노치필터의 공진주파수를 설정하는 방법을 제안하며, 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 보이고자 한다.

2. 진동억제를 위한 노치필터의 자동조정

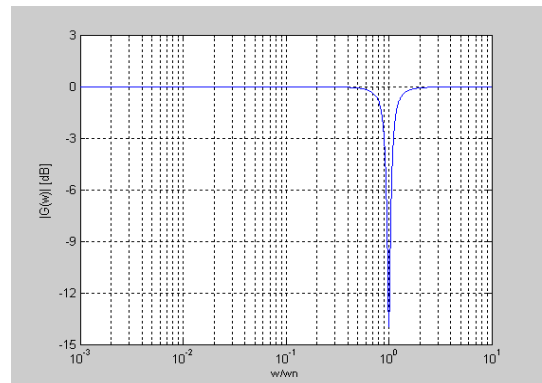
PMLSM 전동기 구동장치의 진동억제를 위하여 먼저 노치필터의 특성을 살펴보고, 노치필터에 의한 진동억제 제어 시스템을 살펴보기로 한다.

2.1 노치필터의 특성

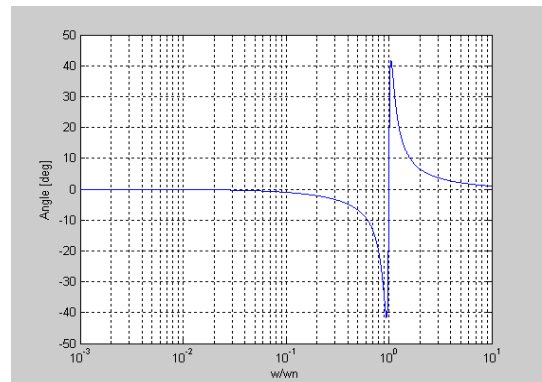
식 (1)은 노치필터에 대한 전달함수이며, 그림 1은 노치필터의 주파수특성을 나타낸 것으로 $\zeta_n = 0.2$, $Q = 4.74$

인 경우이다.

$$G(s) = \frac{s^2 + \zeta_n \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_d \omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$



(a) 크기



(b) 각도

그림 1 노치필터의 주파수 특성

식 (1)에서 공진주파수에서의 감쇠 정도는 $\zeta_n Q$ 에 비례하며, 대역폭은 선택도(Q)에 반비례한다. 따라서 본 논문에서는 감쇠 정도 및 선택도는 그림 1과 같이 선정하고, 공진주파수는 FFT를 통하여 계산한 값을 사용함으로써 노치필터의 전달함수를 정하도록 한다. 여기서 전달함수의 $\zeta_n Q$ 는 다음과 같이 정해진다.

$$\zeta_n Q = \frac{1}{2\zeta_d} \quad (2)$$

그림 1 (a)의 크기에 대한 주파수 특성으로부터 노치필터를 사용하면 특정한 주파수 성분을 감쇠시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 이를 통하여 서보 제어 시스템에서 발생하는 진동을 감쇠시키는 것이 가능하다.

2.2 노치필터에 의한 제어 시스템의 진동억제

선형 전동기인 PMLSM을 포함한 노치필터에 의한 진동억제 제어 시스템의 구성은 그림 2와 같다.

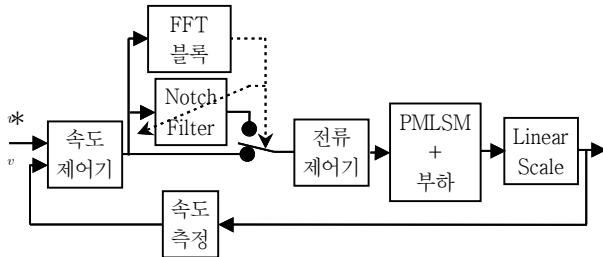


그림 2 노치필터에 의한 진동억제 제어 시스템

그림 2의 FFT 블록에서는 속도 제어기의 출력인 기준 토크 성분 전류를 입력하여 진동이 발생하는지를 검사하고, 진동이 발생하면 FFT에 필요한 데이터를 저장한 후 FFT를 수행하여 진동주파수를 구한다. 그리고 진동주파수를 이용하여 노치필터의 계수를 연산한 후에 스위치를 작동시켜 전류제어기의 입력을 노치필터의 출력으로 바꾼다.

그림 3은 진동이 발생할 때의 기준 토크성분 전류파형과 저주파 통과 필터 출력파형을 나타낸 것으로 진동여부는 A, B 구간에서 구한 I_{pkpk} 가 C 구간에서 설정치를 초과하면 진동이 발생한 것으로 판정하여 FFT에 필요한 수만개의 데이터를 저장한다. 그러나 이 저장과정 중에서 설정치보다 작아지면 다시 초기화를 시키고 진동발생을 기다리도록 한다. 진동이 지속되어 필요한 데이터를 얻은 경우에는 데이터 저장모드를 완료하고, 저장한 데이터에 대한 FFT를 수행하여 진동주파수를 구한다.

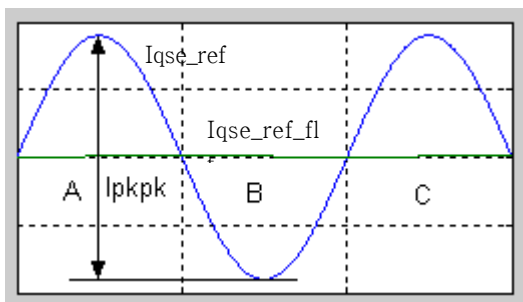


그림 3 기준 토크성분 전류파형(I_{qse_ref})과 저주파 통과 필터 출력파형($I_{qse_ref_flt}$)

한편 위와 같은 방법으로 데이터를 취득하면 저장 데이터가 비주기적인 신호가 되는 경우가 발생하며, 이러한 비주기적인 신호에 대한 FFT는 누설 주파수 성분을 발생시키는 문제점이 있다. 이러한 현상을 개선하기 위한 방법으로 식 (3)과 같은 Hanning 함수의 값을 기준 토크성분 전류에 곱한 값을 저장하여 FFT를 수행하도록 한다^[3].

$$h(t) = \frac{1}{2} \{1 - \cos(2\pi f_c t)\} \quad , \quad f_c = \frac{1}{N T_s} \quad (3)$$

한편 FFT는 DFT(Discrete Fourier Transform)를 고속으로 실행하는 알고리즘으로 연산량을 N 개의 데이터에 대한 DFT의 연산량과 비교하면 복소수 곱셈이 $\frac{N}{2}$ 에서 $(N \cdot \log_2 N)/2$ 로, 그리고 복소수 덧셈이 $N(N-1)$ 에서 $(N \cdot \log_2 N)$ 으로 현격하게 줄어든다^[3]. 따라서 DSP를 사용하여 FFT를 수행하는 것이 가능하다. 진동이 발생한 경우의 진동주파수는 저장한 데이터에 대한 FFT를 수행하여 진폭이 가장 큰 값에 대한 주파수로 구할 수 있으며, 이 주파수를 노치필터의 공진주파수로 설정하도록 한다.

3. 실험 결과 및 고찰

제안한 PMLSM 구동장치의 진동 저감을 위한 노치필터 자동조정 방법의 유용성을 검증하기 위하여 실험에 사용한 PMLSM 및 Linear Scale의 사양은 표 1과 같으며, TI사의 120[MHz] TMS320VC33 DSP를 사용한 제어장치의 전류제어 주기는 50[μs]이고, IGBT 인버터의 스위칭주기는 100[μs]이며, 전류제어기 대역폭은 13,000[rad/s]이다.

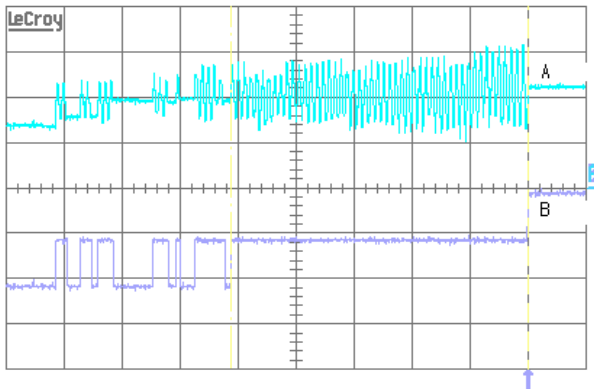
표 1 PMLSM 및 Linear Scale의 사양

정격주력	84.5[N]	Rs	3.79[Ω]
정격전류	2[Arms]	Ls	13.45[mH]
극수	8	가동자	2.66[kg]
추력상수	42.25[N/Arms]	극간격	12[mm]
Linear Scale : 1[μm/pulse]			

한편 FFT를 위한 데이터는 속도제어 주기 100[μs]로 샘플링하고, 전체 데이터의 수는 512개로 선정하였다. 따라서 주파수 분해능은 $1/(T_s \cdot N) \approx 19.5 [Hz]$ 이고, 전체 데이터 획득시간은 51.2[ms]이다. 진동 발생을 자동으로 검출하기 위한 기준전류 설정치는 정격전류의 7[%]로 선정하였으며, 저주파 통과 필터의 차단주파수는 70[Hz]로 하였다.

그림 4는 FFT를 위한 자동 데이터 검출 관련 파형으로 I_{pkpk} 가 설정치를 초과하면 기준 토크성분 전류 데이터를 획득하기 시작 (Save_Flag = 1)하고, 전체 데이터 획득시간이 경과하기 전에 다시 설정치내로 감소하면 데이터 획득을 중지 (Save_Flag = 0)하는 것을 보여주며, 최종적으로 512개의 데이터를 획득하면 데이터 저장 모드를 종료 (Save_Flag = 2)하는 것을 보여준다. 또한 비교를 위하여 마지막에 저장된 기준 토크성분 전류의 진동주파수를 디지털 오실로스코프의 기능을 이용하여 구한 값을 그림 4에 표시하였다. 그림 5는 Hanning 함수가 적용된 그림 4의 마지막에서 저장된 데이터 파형을 보여주며, 그림 6은 그림 5의 파형에 대한 FFT 결과 파형이다. 그림 6을 살펴보면 그림 4에 포함된 직류성분 때문에 직류 성분 및 낮은 주파수 성분이 존재하고, 진동 주파수에 해당하는 성분이 존재하는 것을 알 수 있다. FFT를 통하여 구한 진동주파수는 957[Hz]이며, 그림 4에 나타난 진동주파수(958.75[Hz])와 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 7은 계산한 진동주파수를 이용하여 자동 조정된 노치 필터 적용 전후의 실험파형으로서 부분 확대파형에 잘 나타난 바와 같이 기준 토크성분 전류 및 전동기의 속도가 진동하다가 노치필터를 적용하면 진동이 현저하

계 억제됨을 관찰할 수 있다. 그러므로 위의 실험결과로부터 제안한 방법에 의해 자동 조정되는 노치필터를 통하여 효과적인 진동억제가 가능함을 알 수 있다.



Freq(A) Ω 958.75 Hz

그림 4 FFT를 위한 기준 토크성분 전류의 자동 데이터 저장 (A: 저장되는 $I_{qse_ref}[0.25A/div]$, B: $Save_Flag$, 시간[10ms/div])

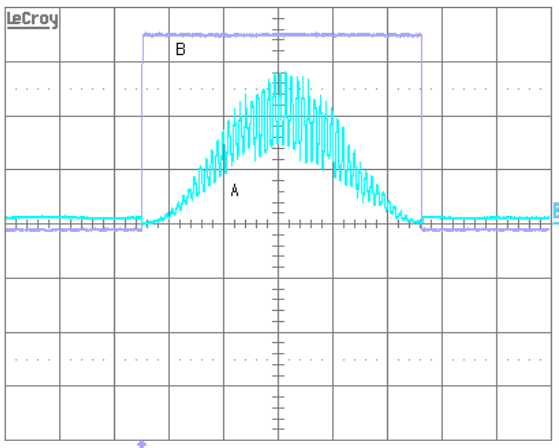


그림 5 Hanning 함수가 적용된 저장 전류 데이터 파형 (A: $I_{qse_ref} * Hanning함수[0.25A/div]$, B: $Data_Flag$, 시간[5ms/div])

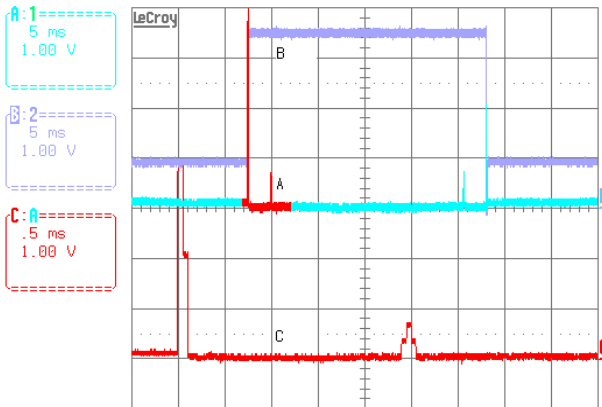


그림 6 저장된 전류에 대한 FFT 결과 파형 (A: 주파수 스펙트럼[0.125A/div], B: $Data_Flag$, C: A의 부분 확대 파형)

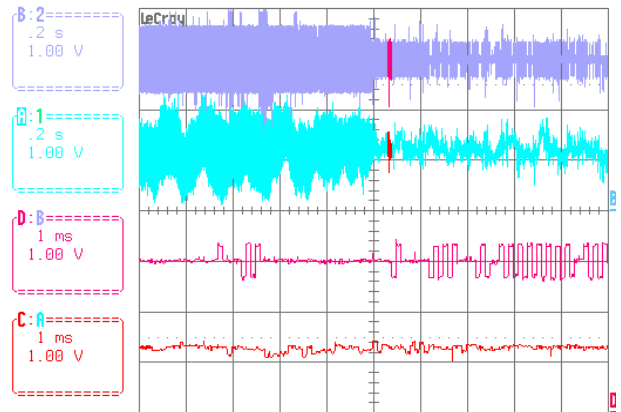
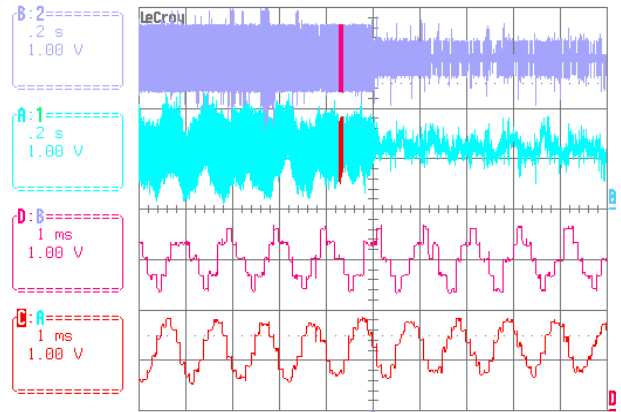


그림 7 노치 필터 적용 전후의 특성 비교 파형 (B: 속도 [33.33mm/s/div], A: $I_{qse_ref}[0.5A/div]$, D: B의 부분 확대파형, C: A의 부분 확대파형)

4. 결론

본 논문에서는 PMLSM 구동장치의 진동억제를 위한 노치 필터의 자동 조정 관련하여 자동으로 진동을 검출하여 데이터를 저장하고, 저장된 데이터에 대한 FFT를 통하여 진동주파수를 구하고 이를 노치 필터에 적용하였으며, 실험을 통하여 제안한 방법의 유용성과 자동 조정되는 노치필터에 의하여 진동을 효과적으로 억제할 수 있음을 보였다.

참고 문헌

- [1] S. N. Vukosavic and M. R. Stojic, "Suppression of Torsional Oscillations in a High-Performance Speed Servo Drive", IEEE Trans. on Industrial Elect., Vol. 45, No. 1, pp. 108-117, 1998, Feb.
- [2] P. Schmidt and T. Rehm, "Notch Filter Tuning for Resonant Frequency Reduction in Dual Inertia Systems", IEEE IAS Conference Proceedings, pp. 1730-1734, 1999.
- [3] E. Oran Brigham, The Fast Fourier Transform, Prentice-Hall, Inc. 1974.