

전동기 구동 인버터에서 Aliasing 현상을 이용한 LC필터 공진 현상 억제

신동호, 김재석, 설승기
서울대학교

Damping of Output LC filter Resonance Based on Aliasing Phenomenon for Motor Drive Inverter

Dongho Shin, Jaesuk Kim, Seung-Ki Sul
Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 전동기를 구동하는 인버터 출력단에 있는 LC 필터의 공진현상을 피하기 위한 능동감쇠 방법을 제안하였다. 기존의 방법들은 추가적인 센서 혹은 복잡한 신호처리를 필요로 한다. 이에 비해 제안된 방법은 기존의 방법과 달리 샘플링 주파수를 변경하여 추가적인 제어 없이 공진 문제를 해결한다. 제어 시스템이 특정한 조건을 만족하는 경우, 샘플링 주파수를 공진 주파수와 일치시켜 공진 전류를 Aliasing된 형태의 저주파수 성분으로 계속한 후, 이를 통해 시스템의 안정성을 확보하여 공진현상을 억제한다. 이산 시간(discrete-time)에서의 모델링을 통해 제안된 방법의 안정성 여부를 확인하였고, 최종적으로 실험을 통해 제안된 능동감쇠 방법의 유효성을 검증하였다.

1. 서론

최근 SiC(silicon carbide) 전력 반도체 소자의 발전으로 높은 스위칭 주파수를 적용한 3상 전동기 구동 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다. SiC 소자는 높은 dv/dt 특성을 갖기 때문에 과전압에 의한 모터의 권선절연 파괴의 위험이 증가한다. 이를 방지하기 위해 인버터 출력단에 LC 필터 구조를 가지는 dv/dt 필터 또는 sine wave 필터를 적용한다.

LC 필터는 임피던스가 최소가 되는 공진주파수(f_{res})가 존재하며, 이 공진 주파수는 전체 제어 시스템을 불안정 하게 만든다. 시스템 공진 문제를 해결하기 위해서는 저항을 회로에 추가하는 수동감쇠 방법을 사용할 수 있다. 하지만 수동감쇠 방법은 시스템의 손실을 증가시키기 때문에 제어를 이용한 공진 억제 방법인 능동감쇠를 이용하기도 한다. 능동감쇠를 이용한 방법으로는 캐패시터에 흐르는 전류를 궤환 하는 방법^[1]과 측정 전류를 노치(notch) 필터를 통과시켜 궤환 하는 방법이 있다.

본 논문에서는 샘플링 주파수(f_{sample}) 설계를 통한 능동감쇠 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존의 능동감쇠 방법과 달리 추가적인 센서 혹은 복잡한 제어가 필요하지 않으며, 특정한 조건을 만족하는 경우, 적절한 샘플링 주파수의 설정만으로 능동감쇠가 가능하다. 이산 시간(discrete-time)에서의 모델링을 통해 제안된 방법의 안정성 여부를 확인하였고, 최종적으로 실험을 통해 제안된 능동감쇠 방법의 유효성을 검증하였다.

2. Aliasing 현상을 이용한 능동감쇠

일반적으로 디지털 영역에서 시스템을 제어하기 위해서는 제어하고자 하는 주파수가 나이퀴스트(Nyquist) 주파수보다 작아야 한다. 이러한 이유로 LC filter가 적용된 시스템에서

공진 주파수대역의 전류를 제어하기 위한 조건으로 $f_{res} < f_{sample} / 2$ 을 고려하여 설계한다. 또한 스위칭 주파수(f_{sw}) 성분이 공진 주파수 대역 근처로 설계가 되면 시스템이 불안정해질 수 있기 때문에 보통 스위칭 주파수의 1/3 ~ 1/2정도의 주파수를 공진 주파수로 설계한다. 하지만 이러한 조건들 하에서 시스템을 설계하여도 디지털 제어의 시지연을 고려하면 공진 문제가 해결되지 못한다.^[2]

궤환 전류를 노치 필터에 통과시켜 능동감쇠를 하는 방법은 이미 많이 사용되고 있다.^[3] 궤환 과정에서 공진 주파수 대역의 성분을 감쇠시켜 공진 문제를 해결하여 시스템을 안정하게 만든다. 또한 Aliasing 현상을 이용하여 공진 주파수 대역의 성분을 디지털 영역에서 다른 주파수로 계속하여 능동감쇠를 구현할 수도 있다.^[4] [4]에서는 LCL필터를 적용한 단상 컨버터에서 공진 현상으로부터 안정할 수 있는 조건으로 $f_{sample} / 2 < f_{res} < 5f_{sample} / 6$ 을 제시하였다.

본 논문에서는 이를 3상 시스템으로 확장하여 안정화가 가능한 새로운 샘플링 주파수를 제시한다. 높은 스위칭 주파수를 사용하는 시스템에서는 샘플링 주파수를 공진 주파수 대역으로 낮추어도 디지털 제어의 충분한 동적 성능 확보가 가능하다. 샘플링 주파수를 공진 주파수와 같게 설정 하게 되면 전류를 계속하는 과정에서 Aliasing 현상이 일어나게 되고, 궤환되는 공진 주파수 대역의 전류는 디지털 영역에서 직류에 가까운 저주파수 성분으로 보이게 된다. 이렇게 샘플링 주파수를 공진 주파수와 같게 설정을 함으로써 능동감쇠의 효과를 얻을 수 있고, 시스템을 안정하게 만들 수 있다. 하지만 디지털 상에서의 지연 시간, 제어기의 이득 값, 필터 설계 값 등 안정도를 결정하는 중요한 다른 변수들이 있기 때문에 Aliasing 현상 이외에도 다른 요소들을 고려해야 한다. 그러므로 이 모든 요소들을 고려하여 실제로 제안된 방법이 능동감쇠의 효과를 가질 수 있음을 확인하기 위해서는 시스템의 모델링을 통한 안정도 분석이 필요하다.

2.1 안정도 분석

LC 필터가 사용된 3상 전동기 구동 회로는 그림 1과 같다.

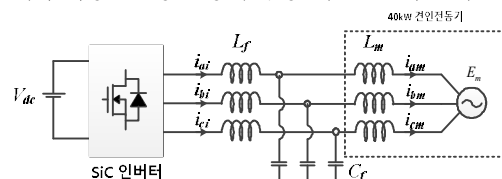


그림1. 3상 LC 필터가 사용된 모터 구동 회로도

인버터 전류 제어기 블록도는 그림 2와 같이 표현할 수 있다.

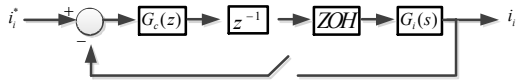


그림2. 전류 제어 블록도

입력 전압을 v_i , 인버터 출력 전류를 i_i 로 나타내면 전달함수는 식 (1)과 같다.

$$G_i(s) = \frac{i_i(s)}{v_i(s)} = \frac{s^2 + \omega_r^2}{sL_f(s^2 + \omega_{res}^2)} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } \omega_r = \sqrt{1/L_m C_f}, \quad \omega_{res} = \sqrt{(L_f + L_m)/L_f L_m C_f}.$$

전류제어기로는 동기좌표계 PI 제어를 사용하였지만 정지좌표계에서 분석을 하기 위해 PR제어기로 분석을 하였다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2)$$

식 (1)은 Zero-order hold를 이용하여, 식 (2)는 Tustin with prewarping 방식을 이용하여 z 도메인으로 변환하면 결과는 아래의 식들과 같다.

$$G_i(z) = \frac{i_i(z)}{v_i(z)} = (1-z^{-1})Z\left\{L^{-1}\left[\frac{G_i(s)}{s}\right]\right\}$$

$$= \frac{T_{sample}}{(L_f + L_m)(z-1)} + \frac{L_m \sin(\omega_{res} T_{sample})(z-1)}{L_f(L_f + L_m)\omega_{res}(z^2 - 2z\cos(\omega_{res} T_{sample}) + 1)} \quad (3)$$

$$G_c(z) = K_p + \frac{K_i \frac{\sin(\omega_0 T_{sample})}{\omega_0} (z^2 - 1)}{z^2 - 2\cos(\omega_0 T_{sample})z + 1} \quad (4)$$

실제로 시스템의 안정도는 폐루프 전달함수의 극점(pole)을 통해 확인할 수 있다. 디지털 시지연을 샘플링 시간으로 고려하면 전류 지령과 전류 사이의 폐루프 전달함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T(z) = \frac{i(z)}{i^*(z)} = \frac{z^{-1}G_i(z)G_c(z)}{1 + z^{-1}G_i(z)G_c(z)} \quad (5)$$

위의 전달함수를 이용하여 극점과 영점(zero)을 표시하면 그림 3과 같고, 분석에 사용된 제정수는 표1과 같다.

변수	값
L_m	1.55mH
L_f	50μH
C_f	5μF
ω_0	120 × 2π (rad / s)
f_{sw}	30kHz
f_{res}	10.2kHz
f_{cutoff} (전류대역폭)	200Hz

표1. 전동기 및 시스템 제어 정수

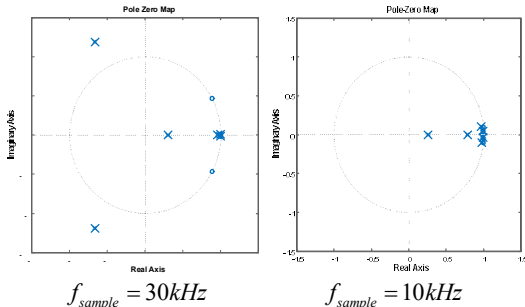


그림3. 전달함수 $T(z)$ 의 극점과 영점

샘플링 주파수가 30kHz일 때는 2개의 극점이 단위 원(unit circle) 바깥에 위치하여 불안정 영역에 있지만 샘플링 주파수가 10kHz 일 때는 극점들이 전부 단위원 안으로 들어오게 되어 안정 영역에 있음을 확인할 수 있었다.

3. 실험 결과

표1의 조건 하에서 실제로 40kW 견인 전동기에 Sinewave 필터(LC 필터)를 적용하여 전류 제어를 하였다. 샘플링 주파수가 30kHz인 경우에는 0A 전류 제어 조작 실패하여 그림 4와 같이 전류가 발산하였다.

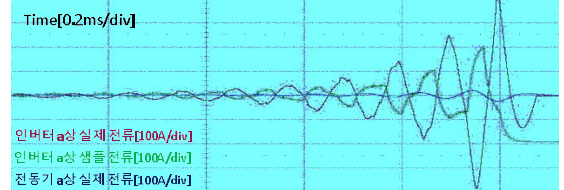


그림4. 영 전류 제어 파형 ($f_{sample} = 30kHz$)

샘플링 주파수를 10kHz로 낮췄을 경우에는 정격 조건에서 공진에 의한 발산 없이 전류 및 속도제어가 정상적으로 수행되었다. 정격에서의 실험 파형은 그림 5와 같다.

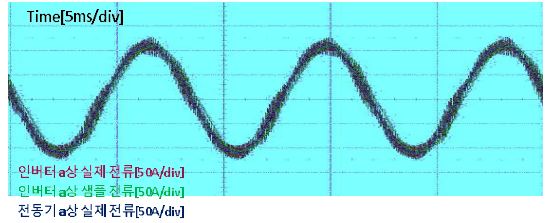


그림5. 정격 전류 제어 파형 ($f_{sample} = 10kHz$)

4. 결론

본 논문에서는 LC필터를 사용한 전동기 구동 시스템에서 샘플링 주파수를 특정 주파수로 변화시켜 공진 문제를 해결하는 능동감쇠 방법을 제안하였다. 안정도 분석과 실험을 통해 제안된 방법이 실제로 공진 문제를 해결할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

[1] Xiaoqiang Li, Xiaojie Wu, Yiwen Geng, Xibo Yuan, Chenyang Xia and Xue Zhang, "Wide Damping Region for LCL-Type Grid-Connected Inverter With an Improved Capacitor-Current-Feedback Method," IEEE Trans, Power Electronics, vol.30, no.9, Sep. 2015.

[2] Jianguo Wang, Jiu Dun Yan, Lin Jiang and Jiyan Zou, "Delay-Dependent Stability of Single-Loop Controlled Grid-Connected Inverters with LCL Filters," IEEE Trans, Power Electronics, vol.31, no.1, Jan. 2016.

[3] Wenli Yao, Yongheng Yang, Xiaobin Zhang, and Poh Chiang Loh, "Design and Analysis of Robust Active Damping for LCL Filters Using Digital Notch Filters," IEEE Trans, Power Electronics, vol.32, no.3, Mar.2017.

[4] Yi Tang, Wenli Yao, Poh Chiang Loh and Frede Blaabjerg, "Design of LCL Filters With LCL Resonance Frequencies Beyond the Nyquist Frequency for Grid-Connected Converters," IEEE Journal, Power Electronics, vol.4, no.1, Mar. 2016