

이중 푸리에 급수를 이용한 모터 구동용 3상 인버터의 배터리 전류 고조파 분석

배병주, 진태훈, 조영훈
건국대학교 전력전자연구실

Battery Current Harmonic Analysis of Three-Phase Inverter for Motor Drive Using Double Fourier Series

Byungju Bae, Taehoon Chin, Younghoon Cho
Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

3상 인버터를 이용한 모터 구동 시 상전류에는 기본파를 제외하고 기본파의 고조파 및 전력반도체의 스위칭 주파수 성분을 포함하고 있다. 이러한 상전류는 배터리 전류의 리플을 발생시키며, 이는 시스템의 안정도를 감소시키고 배터리의 소음 및 진동을 유발한다. 이를 방지하기 위해 인버터 입력단에 필터를 사용하며, 최적의 필터 설계를 위해 배터리 전류 고조파의 분석이 필수적이다. 본 논문에서는 이중 푸리에 급수를 이용하여 모터 구동용 3상 인버터의 배터리 전류 고조파를 분석한다. 스위칭 함수와 배터리 전압을 이용해 상전류를 구하고, 이를 이용해 배터리 전류를 분석한다. 모의 실험 결과와 비교를 통해 수식적으로 분석한 배터리 전류 고조파의 정합성을 검증한다.

1. 서 론

전기 자동차 모터 구동을 위해 주로 사용되는 3상 인버터는 펄스 폭 변조기법(PWM)을 이용하여 배터리의 직류 전원을 3상 교류 전원으로 변환한다. PWM을 사용할 시 각 상의 극전압은 구형파의 형태를 가지게 되고, 상전류에 스위칭 주파수를 포함한 고조파 성분이 발생한다.^{[1],[2]} 상전류의 고조파 성분은 배터리의 소음 및 진동을 발생시켜 자동차 탑승자의 불편함을 유발하며 배터리의 수명에도 악영향을 미친다. 배터리 전류의 고조파 성분을 줄이기 위해 커패시터를 이용한 필터를 주로 사용한다. 최적의 커패시터 용량 선정을 위해 배터리 전류의 고조파 성분 분석이 우선적으로 이루어져야 한다.

본 논문에서는 이중 푸리에 급수를 이용해 모터 구동용 3상 인버터의 배터리 전류 고조파를 분석한다. 스위칭 함수의 이중 푸리에 급수 전개를 통하여 극전압을 모델링하고, 이를 이용해 상전류의 모델링을 진행한다. 수식적으로 모델링한 상전류와 스위칭 함수를 이용해 배터리 전류의 고조파 성분의 크기를 분석하고, 모의 실험을 통해 분석의 정합성을 검증한다.

2. 배터리 전류의 고조파 크기 분석

2.1 스위칭 함수의 모델링

일반적으로 스위칭 함수는 캐리어와 전압지령의 비교를 통해

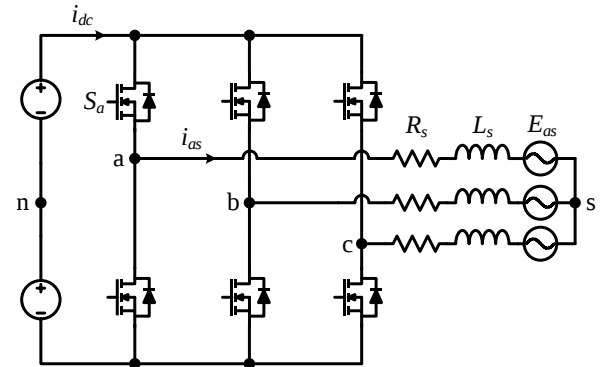


그림1 모터 구동용 3상 인버터 시스템

Fig.1 A three-phase inverter system for motor drive

발생한다. 샘플링으로 인한 시지연이 없다 가정하고 SPWM을 사용할 때, 이중 푸리에 급수를 이용하여 스위칭 함수를 식 (1)과 같이 모델링 할 수 있다.^[1]

$$S_j(t) = C_{s00} + C_{s01} \cos(\omega_0 t + \theta_j) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{smn} \cos[m\omega_c t + n(\omega_0 t + \theta_j)] \quad (1)$$

ω_c 는 캐리어의 각주파수, ω_0 는 기본파의 각주파수, $\theta_j(j=a, b, c)$ 는 각 상의 위상각을 나타낸다. 식 (1)의 첫 번째 항은 DC 성분, 두 번째 항은 기본파 성분, 마지막 항은 캐리어와 기본파의 고조파로 이루어진 성분을 나타낸다. 식 (1)의 계수는 식 (2)와 같으며, J_n 는 n 차 베셀 함수, MI 는 변조 지수를 각각 나타낸다.

$$\begin{cases} C_{s00} = \frac{1}{2}, C_{s01} = \frac{MI}{2}, \\ C_{smn} = \frac{2}{m\pi} J_n\left(\frac{m\pi}{2} MI\right) \sin\left(\frac{(m+n)}{2} \pi\right) \end{cases} \quad (2)$$

2.2 상전류의 모델링

극전압 V_{jn} 은 스위칭 함수 $S_j(t)$ 와 V_{dc} 의 곱으로 구해진다. 실제의 경우 극전압은 $-\frac{1}{2}V_{dc}$ 와 $\frac{1}{2}V_{dc}$ 로 변하기에 평균 값인 DC 성분은 0이 된다.

상전압 V_s 는 극전압 V_{jn} 에서 V_{sn} 을 뺀 값과 같다. V_{sn} 은 식 (3)과 같으며, 상전압은 식 (4)와 같다. 식 (4)의 계수는 식 (5)와 같다.

$$V_{sn} = \frac{1}{3}(V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) \quad (3)$$

$$V_{js} = C_{v01} \cos(\omega_0 t + \theta_j) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{vmn} \cos(m\omega_c t + n(\omega_0 t + \theta_j)) \quad (4)$$

$$\begin{cases} C_{v01} = \frac{MI}{2} V_{dc}, \\ C_{vmn} = \frac{2}{m\pi} V_{dc} J_n \left(\frac{m\pi}{2} MI \right) \sin \left(\frac{(m+n)\pi}{2} \right) \left(1 - \frac{1}{3} \left(1 + 2 \cos \frac{2}{3} n\pi \right) \right) \end{cases} \quad (5)$$

모터는 일반적으로 RL 부하와 역기전력 향으로 등가화 할 수 있다. 상전류는 상전압과 역기전력 E_{js} 의 차를 부하 임피던스로 나눈 값이다. 역기전력 E_{js} 는 식 (6)과 같으며, 상전류는 식 (7)과 같다.

$$E_{js} = \omega_r \lambda_f \cos(\omega_0 t + \theta_j) \quad (6)$$

$$i_{js} = \frac{1}{\sqrt{R_s^2 + ((m\omega_c + n\omega_0)L_s)^2}} (V_{js} - E_{js}) \quad (7)$$

2.3 배터리 전류의 모델링

배터리 전류는 각 상의 스위칭 함수와 상전류의 곱으로 표현된다. 스위칭 함수와 상전류를 이용한 배터리 전류는 식 (8)과 같다.

$$i_{dc} = S_a i_{as} + S_b i_{bs} + S_c i_{cs} \quad (8)$$

3. 모의 실험

3.1 모의 실험 결과

이론적 분석의 적합성을 검증하기 위해 모의 실험을 진행했다. 모의 실험의 구성도는 그림 1과 같고, 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 모의 실험 파라미터

Table 1 Simulation parameters

V_{dc}	20 V	MI	0.7
f_s	10 kHz	Pole	4
R_s	82.5 mΩ	L_s	250 μH
ω_{rpm}	1000 rpm	λ_f	0.0184 V·sec/rad

모의 실험 결과, i_{dc} 의 주파수 성분은 그림 2와 같다.

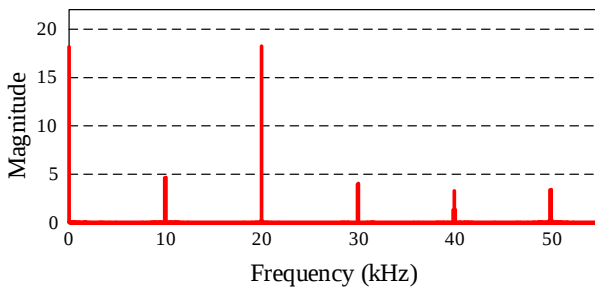


그림2 i_{dc} 의 주파수 성분

Fig.2 Frequency components of i_{dc}

표 2 i_{dc} 주요 고조파 성분의 크기

Table 2 Magnitude of major harmonic components of i_{dc}

주파수	크기		오차
	모의 실험	이론적 분석	
0	18.212	19.194	0.982
$\omega_c \pm 3\omega_0$	4.626	4.643	0.017
$2\omega_c$	18.249	19.426	1.177
$3\omega_c \pm 3\omega_0$	4.009	3.557	0.452
$4\omega_c$	3.301	3.523	0.222
$5\omega_c \pm 3\omega_0$	3.393	3.566	0.173

i_{dc} 의 주요 고조파 성분들의 크기는 표 2와 같다. 모의 실험을 통해 얻은 결과와 이론적 분석을 통해 얻은 결과의 오차가 1 내외인 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 이중 푸리에 급수를 이용한 모터 구동용 3상 인버터의 배터리 전류 고조파 분석에 대해 기술하였다. 스위칭 함수와 상전류의 모델링을 위해 이중 푸리에 급수를 사용했으며, 그 둘의 곱으로 배터리 전류를 모델링했다. 시뮬레이션과 비교를 통하여 이론적 분석의 적합성을 검증하였으며 이를 이용해 최적의 입력단 필터 설계가 가능하다.

이 논문은 2022년도 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구입니다. (No. 20010965)

참 고 문 헌

- [1] D. G. Holmes, "A general analytical method for determining the theoretical harmonic components of carrier based PWM strategies," Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242), St. Louis, MO, USA, 1998, pp. 1207-1214 vol.2, doi: 10.1109/IAS.1998.730300.
- [2] J. Sun and C. Lin, "Calculation and Spectral Analysis of DC-Link Current for three phase PWM inverter," 2021 21st International Symposium on Power Electronics (Ee), Novi Sad, Serbia, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/Ee53374.2021.9628308.