

속도 범위가 넓은 고속 PMSM의 정현파 구동을 위한 인버터 직류 링크전압 제어기법

박상욱, 박재성, 전금상, 안희욱
금오공과대학교

DC link voltage control method in sinusoidal current drive system for wide-speed range PMSM

Sang Uk Park, Jae Seung Park, Geum Sang Jeon, Hee Wook Ahn
Kumoh National Institute of Technology

ABSTRACT

속도 범위가 넓은 고속 PMSM의 정현파 구동용 인버터에서 전동기 전류 리플과 인버터 스위칭 손실을 저감시키는 방법으로, 중저속에서 직류 링크전압을 감소시키는 방법을 제안한다. 직류 링크전압 조절용 컨버터를 이용하며, 직류 링크 전압과 전동기 속도 사이의 관계를 설정하고 이를 제어 알고리즘에 반영한다. 제안된 기법에 의한 전류 리플 저감효과를 시뮬레이션으로 확인한다.

1. 서 론

고속 소형 절삭 공구에 사용되는 영구자석 동기 전동기(PMSM)는 저소음 및 정밀 작업을 위하여 토크 리플이 작도록 구동하는 것이 필요하므로 정현파 전류 구동방식이 적용된다. 정현파 구동용 인버터의 경우, 직류 링크 전압은 최고 속도에서의 전동기 역기전력을 기준으로 결정되고 속도와 관계없이 일정하게 유지하는 방법이 일반적으로 사용된다. 최고 속도가 50,000 rpm 정도인 PMSM의 경우에 속도 조절 범위가 넓고 중저속에서 구동되는 경우가 많은데 직류 링크 전압이 고정되어 있으면 중저속 구간에서 전동기의 전류 리플이 크게 나타나고, 이것은 전동기 코어의 히스테리시스 손실을 증가 시킬 뿐만 아니라 노이즈를 유발하여 제어 시스템을 불안정 하게 만들기 쉽다.^[1] 또한 인버터에서 발생하는 스위칭 손실은 직류 링크 전압에 비례하는 경향이 있다^[2]. 본 논문에서는 이러한 문제점을 완화시키기 위하여, 속도가 낮으면 직류 링크 전압을 감소시키는 방식을 제안한다. dc dc 컨버터를 사용하여 속도에 연동하여 직류 링크전압을 가변하는 방식을 제안한다. 속도에 따른 전압의 설정 방법을 설명하고, 제안된 기법에 의한 전류 리플 저감효과를 시뮬레이션으로 확인한다.

2. 직류 링크 전압 제어 기법

PMSM의 전류 리플은 인버터의 직류 링크 전압에 비례하므로^[3] 전류 리플을 감소시키기 위하여 속도에 따라서 직류 링크 전압을 최소화 시키는 방법을 적용한다. 제안하는 기법은 그림 1과 같이 DC DC 컨버터와 3상 인버터로 구현 가능하다. 인버터의 직류링크 전압을 일정하게 유지하기 위해 DC DC 컨버터가 사용되는 경우가 많은 상황에서는 컨버터 출력전압 제어를 위한 알고리즘만 추가하면 된다. 속도 제어는 일반적으로 마이

크로컨트롤러를 이용한 벡터제어 방식으로 구현되는데, 속도 제어 알고리즘에 있는 속도 기준치를 이용하여 컨버터 출력 전압, 즉 직류링크 전압의 기준치를 결정하도록 한다. 속도 기준치와 전압 기준치의 관계는 PMSM의 구동 특성을 반영하여 다양하게 설정될 수 있는데, 여기에서는 간단한 함수를 이용하는 방법을 적용한다.

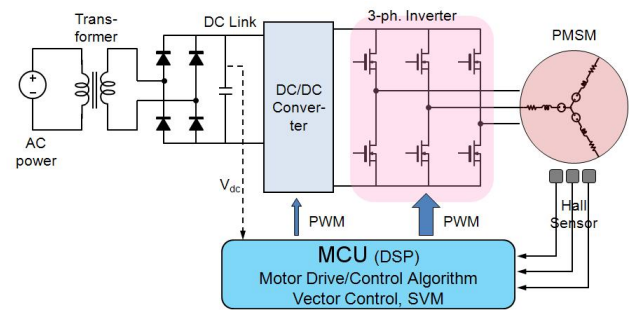


그림 1 영구자석 동기전동기의 구동 제어 시스템
Fig.1 PMSM Drive System

3. 속도에 따른 직류링크 전압의 결정 방법

PMSM을 벡터 제어하는 경우 토크 속도 특성은 직류 전동기의 특성과 유사하므로 식(1)과 그림 2 처럼 나타낼 수 있고 이를 이용하여 직류링크 전압을 설정한다.

$$T = (V - K_E \times \omega) \frac{K_T}{R} \quad (1)$$

여기서 T : 토크, V : 상전압, K_E : 역기전력 상수, K_T : 토크 상수 이다. 직류링크 전압의 최대값은 인버터 출력의 상전압 기

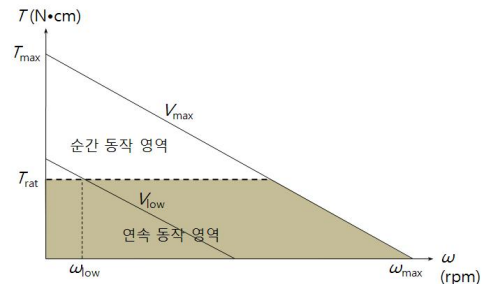


그림 2 벡터제어 PMSM의 토크-속도 특성
Fig. 2 Torque-speed curve of vector-controlled PMSM

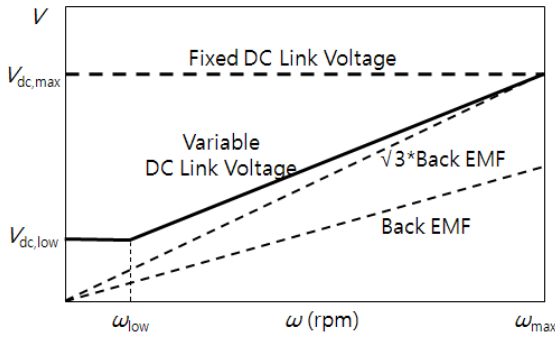


그림 3 속도에 따른 직류링크 전압 가변 방식의 개념도
Fig. 3 Concept of Variable DC-link voltage method

본과 성분이 무부하 최고속도에서의 역기전력과 동일하도록 결정한다. 공간벡터변조(SVM) 방식이 적용될 때 상전압의 최대 진폭은 직류링크 전압의 $1/\sqrt{3}$ 배^[4] 이므로 직류링크 전압의 최대값은 식(2)와 같다.

$$V_{dc,max} = \sqrt{3}(V_{ph,max}) = \sqrt{3}(K_E \times \omega_{max}) \quad (2)$$

속도가 낮을수록 직류링크 전압을 감소시키는데, 연속 동작이 허용되는 최저 속도 ω_{low} 에서 정격 토크를 발생시킬 수 있어야 한다는 점을 고려하여 식(1)을 이용하면 직류링크 전압의 최소값은 식(3)과 같이 계산된다.

$$V_{dc,low} = \sqrt{3} \left(R \frac{T_{rat}}{K_T} + K_E \times \omega_{low} \right) \quad (3)$$

이와 같이 계산된 직류링크 전압의 최대값과 최소값을 이용하여 속도에 따른 직류링크 전압의 설정 방법을 그림 3에 나타내었다. 최저 속도보다 낮은 구간에서는 기동 토크를 확보하기 위해 전압이 일정하게 유지되고 그 외의 구간에서는 직선적으로 변화되며 전압의 크기는 식(4)처럼 계산할 수 있다.

$$V_{dc} = \frac{V_{dc,max} - V_{dc,low}}{\omega_{max} - \omega_{low}} (\omega - \omega_{low}) + V_{dc,low} \quad (4)$$

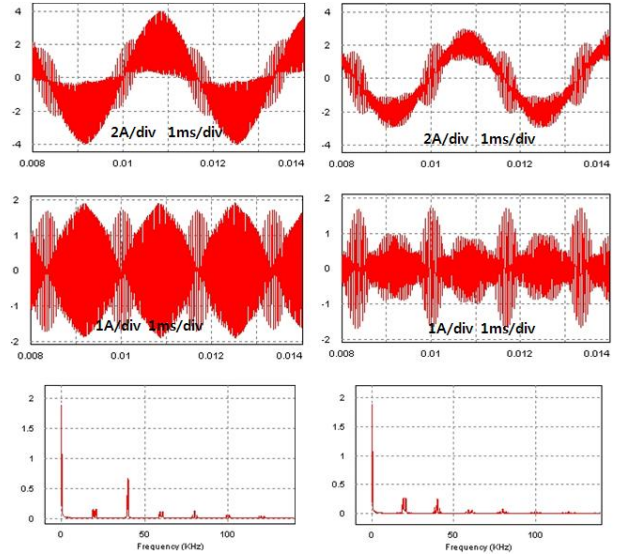
4. 시뮬레이션 결과

제안된 직류링크 전압 가변 방식은, 중저속 구간에서 직류링크 전압을 감소시킴으로써 인버터에서의 스위칭 손실 저감 효과를 얻을 수 있고 전동기 전류의 리플 저감에 따른 히스테리시스 손실 저감 및 저잡음화 효과를 얻을 수 있다. 전류리플 감소 효과를 확인하기 위하여 표 1에 제시된 전동기에 대하여 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. 직류링크 전압 가변 방식을 위한 계산 결과는 다음과 같다: $\omega_{max} = 50,000$ rpm, $\omega_{low} = 10,000$ rpm, $V_{dc,max} = 40.0$ V, $V_{dc,low} = 11.8$ V.

그림 4는 속도 18,000 rpm, 전류 2 A_{pk} 로 구동될 때, 직류링크 전압이 40 V로 고정된 경우(a)와 20 V로 조절된 경우(b)에 대하여 상전류를 시뮬레이션 결과이다. 리플 성분의

표 1 시뮬레이션용 PMSM의 주요 특성치
Table 1 Characteristics of PMSM used for simulation

정격출력	100 [W]	정격 전류	3 [A _{rms}]
최대속도	50,000 [rpm]	상 저항	0.5 [Ω]
정격속도	30,000 [rpm]	상 인덕턴스	40 [μH]
정격토크	3 [Ncm]	토크 상수	1.07 [Ncm/Arms]
역기전력 상수	0.36[V _{rms} /Krpm]	극수	2 pole



(a) 직류링크 전압 고정(40V) (b) 직류링크 전압 가변(20V)

그림 4 시뮬레이션 결과. (상:상전류, 중:상전류 리플 성분, 하:상전류의 FFT)

Fig. 4 Simulation results. (Up:phase current, Mid:Ripple, Bottom:FFT of phase current)

파형은 상전류 파형에서 기본과 성분을 제거하여 얻은 결과이며, 이것과 FFT 분석 결과를 종합하면 전압 감소에 의한 전류 리플 감소 효과를 확인할 수 있다.

5. 결 론

고속 PMSM의 정현과 구동장치에서 인버터의 직류링크 전압을 속도에 따라 변화시키는 방법을 제안하였다. 속도 기준치와 직류링크 전압의 상관관계를 결정하였고, 전류 리플 감소 효과를 시뮬레이션으로 확인하였다. 제안된 방법은 중저속 구간에서 인버터의 스위칭 손실과 전동기 전류 리플을 저감시킬 수 있으므로 구동 시스템의 효율 증가 및 제어 안정성 확보 등 고속 PMSM의 운전성능 개선에 효과적이라고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] C.C.Chan, K.T.Chau, "Novel Permanent Magnet Motor Drives for Electric Vehicles", IEEE Trans.on Industrial Electronics, Vol.43, No.2, 1996.
- [2] R. Erickson and D. Maksimovic. Fundamentals of Power Electronics. 1997. pp. 93~96, 1997
- [3] Dong Jiang, "Study of Analytical Current Ripple of Three Phase PWM converter", APEC, 2012 Twenty Seventh Annual IEEE
- [4] S. Ogasawara, H.Akagi And A.Nabae "A novel PWM scheme of voltage source inverters based on space vector theory", EPE Conf. Rec, 1989, pp. 1197~1292