

전동기 제정수와 전압 및 전류 제한에 따른 단상 영구자석 동기전동기의 능력곡선 분석

최승보, 이욱진
충남대학교

Analysis of single-phase PMSM capability curve using motor parameter, voltage limit and current limit

Seungbo Choi, Wook-Jin Lee
Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문에서는 전동기 제정수와 전압 및 전류제한 값에 따른 단상 영구자석 동기전동기의 능력곡선을 분석하였다. 역기전력 상수와 고정자 인덕턴스 및 전압·전류 제한값에 따라 영구자석 동기전동기의 능력곡선이 변하게 되며, 최대토크를 얻을 수 있는 인가전압의 크기 및 위상이 결정된다. 제안한 능력곡선의 분석방법을 통하여 얻은 최대토크에서의 인가전압을 컴퓨터 모의실험으로 검증하였다.

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 유도전동기 대비 높은 효율과 전력 밀도, 빠른 제어 응답성 등의 장점을 가지고 있어 산업용 자동화기기 뿐만 아니라 가정용 기기에서도 널리 사용되고 있다. 단상 영구자석 동기전동기는 3상에 비해 구조가 간단하기 때문에 소형화 측면과, 전동기 구동을 위해 사용되는 스위치 소자가 적기 때문에 재료비 측면에서도 장점을 가지고 있다.^{[1]-[2]}

한편, 인버터를 이용하여 영구자석 동기전동기를 운전할 경우 인버터의 스위칭 방법 및 직류단 전압의 크기에 따라 이용할 수 있는 전압의 크기가 달라지며, 인버터와 전동기가 각각 허용할 수 있는 최대 전류를 따라 전동기의 능력을 제한하는 요소가 된다. 따라서 제한된 전압 및 전류조건 내에서 전동기가 낼 수 있는 토크 능력을 아는 것이 중요하지만, 단상의 경우 3상 동기전동기에 비해 많은 연구가 진행되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 단상 영구자석 동기전동기의 전압 및 전류제한 조건 내에서의 속도에 따른 능력곡선을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 full-bridge 인버터를 사용한 단상 영구자석 동기전동기의 해석 모델을 설명하고 이를 분석하는 방법을 제시하며, 3장에서 컴퓨터 모의실험을 통해 제안한 모델에 대하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 단상 영구자석 동기전동기 모델

단상 영구자석 동기전동기의 고정자 전압방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_e \omega_m \sin(\omega_m t) \quad (1)$$

v_a 는 고정자 전압이며 R_a 는 고정자 저항, i_a 는 고정자 전류, L_a 는 고정자 인덕턴스, k_e 는 역기전력 상수, ω_m 은 동기전동기의 속도이다. 위 전압방정식에서 평균전력을 간단하게 해석하기 위해 고정자 저항을 무시하고, 고정자 전류를 곱하여 한 주기동안 적분을 하면 아래의 식 (2)와 같이 고정자 저항성분을 무시한 영구자석 동기전동기의 평균전력이 된다.

$$P_e = \frac{1}{T} \int i_a v_a dt = \frac{1}{T} \int i_a k_e \omega_m \sin(\omega_m t) dt \quad (2)$$

인버터에서 나온 출력전압의 고조파 성분들은 위의 전력식에서 적분하면 모두 0이 되어 기본파 성분만 출력파위에 영향을 미치게 된다. 따라서 토크는 위의 전력식에서 영구자석 동기전동기의 회전속도에 대하여 나누게 되면 알 수 있다.

한편, full-bridge 인버터는 직류단 전원(v_{dc})과 인버터 출력전압(v_{inv})으로 나뉘며 독립적으로 동작할 수 있는 2개의 레그로 구성되어있다. 본 논문에서는 정현파 PWM방식을 사용하였으며, 이 때 사용할 수 있는 최대 전압에서 기본파는 스위칭 각주파수(ω)에서 식 (3)과 같다.

$$v_{\in v_f}(t) = v_{dc} \sin(\omega t) \quad (3)$$

따라서 식 (3)을 복소평면에서 해석을 하면 인버터 출력전압은 전압제한 원을 만들게 된다. 또한 식 (1)의 단상 영구자석 동기전동기의 전압방정식에서 고정자 저항성분을 무시하면 역기전력성분이 전류제한 원의 중심이며, 전류제한 값(I_{limit})에서의 인덕턴스에 의한 전압성분이 전류제한 원의 반지름인 전류제한 원을 만들 수 있게 된다. 또한 전류제한 원의 중심의 위치와 반지름의 크기에 따라 그림 1과 같이 3개의 조건으로 나뉜다. 따라서 각각의 조건에서 두 개의 원을 통해 최대 토크를 낼 수 있는 인버터 출력전압의 크기와 위상이 바뀌는 것을 알 수 있다.

2.2 단상 영구자석 동기전동기 능력 분석

영구자석 동기전동기가 역률 1을 유지할 수 있을 때까지의 속도를 ω_{base1} 로 정의하고, 더 이상 운전할 수 없거나, 특정 지점에서 인버터 출력전압이 고정될 때의 속도를 ω_{base2} 로 정의한다.

역률 1을 유지하는 경우, 인버터의 가용전압을 넘어서지 않기 때문에 전압제한 원의 내부에서 인버터의 출력전압이 결정되며, 역기전력이 속도에 비례하여 증가하기 때문에 출력파위는 증가하지만 최대 토크는 일정하게 유지된다. ω_{base1} 이후 고정자 전류의 위상이 틀어지면서 역률 1을 유지할 수 없게 되면서 최대 토크가 점차 감소하게 되며, 영구자석 동기전동기가 더 이상 운전할 수 없을 때에는 토크가 0이 되고, 인버터 출력전압이 고정될 때에는 최대 토크가 0에 가까워지게 된다.

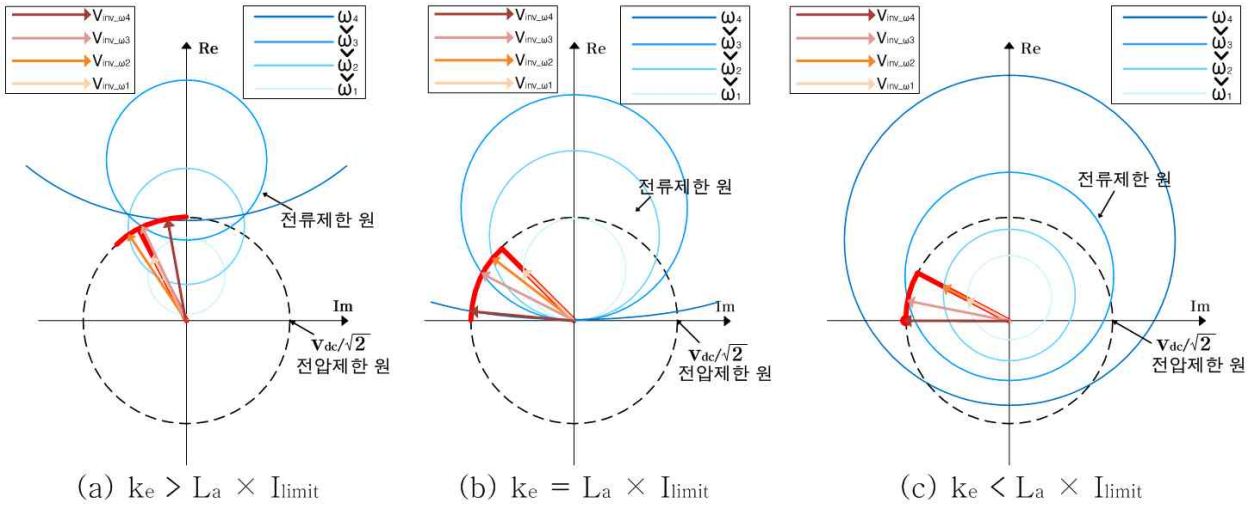


그림 1. (a),(b),(c)의 조건에 따른 인버터 출력전압이 결정되는 지점

따라서 영구자석 동기전동기의 속도가 ω_1 부터 ω_4 로 변화할 때 만들어지는 전류제한 원과 전압제한 원에 의해 최대 토크를 얻을 수 있는 인버터 출력전압($v_{inv,\omega_1} \sim v_{inv,\omega_4}$)이 그림 1과 같이 나타나며, 빨간색 실선은 인버터 출력전압의 경로를 나타낸다.

3. 시뮬레이션 결과

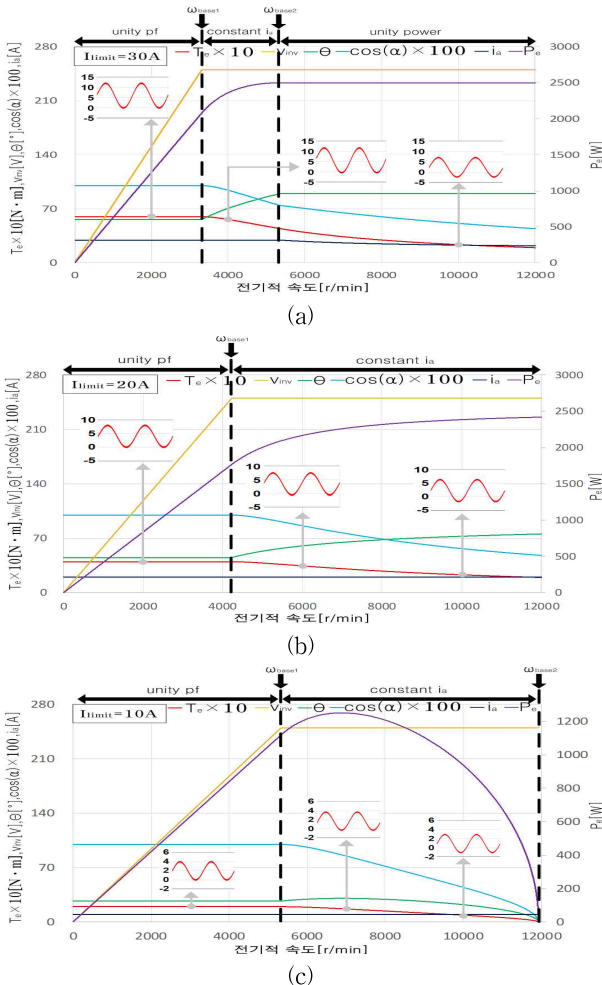


그림 2. 단상 영구자석 동기전동기 능력 곡선.(a) $k_e > L_a \times I_{limit}$, (b) $k_e = L_a \times I_{limit}$, (c) $k_e < L_a \times I_{limit}$

본 논문에서는 제안한 능력곡선의 검증을 위하여 8극의 단상 영구자석 동기전동기를 가정하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 모의실험을 위해 표 1과 같이 전동기의 제정수를 고정시키고 전류제한 값(I_{limit})만 바뀌가며 그림 2와 같은 능력곡선을 각각 보여주며, 특정 속도에서의 평균토크의 파형도 나타내었다. T_e 는 토크이며 v_{inv} 는 인버터 출력전압, i_a 는 고정자전류, P_e 는 출력파워, θ 는 인버터 출력전압과 역기전력 사이의 위상이며, α 는 역기전력과 고정자 전류 사이의 위상 차이이다.

표 1 단상 영구자석 동기전동기 모의실험 제정수

$v_{dc}[V]$	$k_e[V/rad/s]$	$L_a[H]$
300	0.3	10m

4. 결론

본 논문에서는 전압제한과 전류제한, 전동기의 제정수에 따른 단상 영구자석 동기전동기의 능력곡선을 분석하였다. 전류제한 값에 따라 출력파워의 곡선이 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 전동기를 설계하기 전에, 전동기 제정수와 인버터 및 모터의 물리적 한계에 의한 전류제한을 적절히 선정하면 부하에 맞는 능력을 갖는 전동기를 설계할 수 있음을 확인하였다. 또한 속도에 따른 최대 토크를 얻을 수 있는 인버터 출력전압의 크기 및 위상을 제안한 방법으로부터 도출하여, 이를 컴퓨터 모의실험을 통하여 검증하였다.

참고 문헌

[1] H. B. Ertan, B. Dag, and G. Capolino, "Calculation of parameters of single-phase PM motor for design optimization," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 3, pp. 538-548, Sep. 2005.
 [2] 이육진, 정부분, "초고속 단상 BLDC 전동기의 고역률 제어 방법," 전력전자학회 논문지, Vol. 21, No. 2, pp.144-149, Apr. 2016.