

Laplace 변환을 이용한 단상 LSPM전동기의 정상상태 기동특성 해석

최명현*, 김병택*
국립 군산대학교*

Steady-State Analysis of Single Phase LSPM Motor using the Laplace's Transform

Myoung-Hyun Choi*, Byung-Taek Kim*
Kunsan National University*

Abstract - 본 논문은 단상 line-start permanent-magnet (LSPM) 전동기가 가지는 비동기 운전영역에서 나타나는 다양한 토크성분을 해석적 방법으로 분석한다. 비 동기속도에서의 정상상태 전류를 DQ 등가회로를 이용하여 유도하였으며, 이를 이용하여 유도전류와 제동전류의 주파수를 확인하였다. 마지막으로 시간차분 해석을 이용하여 비동기 운전영역의 특정 속도에 대한 토크와 전류를 분석하였으며, 주파수 변환을 이용하여 각 전류의 주파수 성분을 확인하였다.

1. 서 론

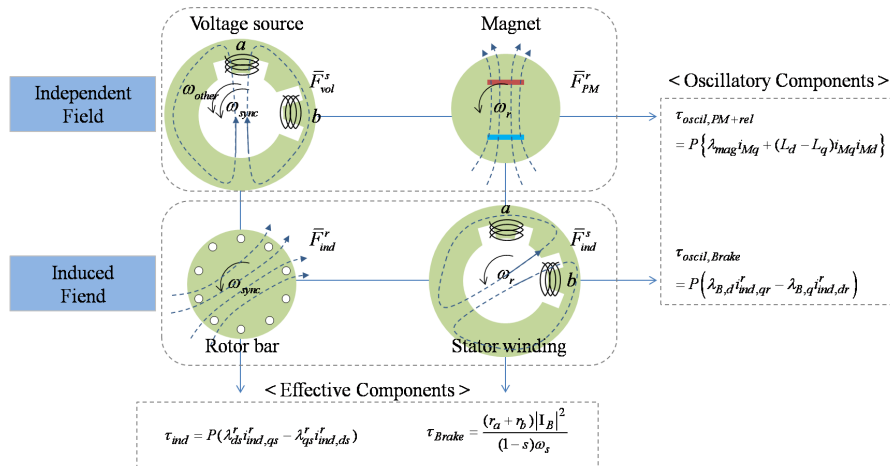
Line-start Permanent Magnet (LSPM) 전동기는 농형 도체로 인한 유도토크로부터 자기기동능력을 가지며 동기속도진입 후 자석을 이용하여 동기전동기로 운전되어 고효율, 고역률 특성을 가진다. 그러나 우수한 성능에 반해, 기동 시(즉 비동기속도에서) 다양한 유도토크와 진동토크가 발생한다. 특히 단상 LSPM의 경우 진동토크는 심한 이상 기동현상을 야기시킬 수 있으므로 정확한 해석이 필요하다. 이 같은 비 동기운전 시 토크특성은 Miller 등에 의해 연구된 바 있으나, 유도과정이 매우 복잡할 뿐 아니라 진동토크 계산에서 토크의 위상을 무시하고 크기만을 합하여 정확도를 보장하기 어렵다[1].

본 논문에서는 단상 LSPM전동기의 DQ 등가회로로부터 라플라스변환을 이용하여 비동기속도에서의 토크특성 및 비정현파 전류 성분의 주파수 성분을 분석하였다[2]. 시간차분 해석을 통하여 비동기 영역에서의 정상상태 특성을 확인하였으며, 주파수 분석을 통하여 진동성분을 예측하였다.

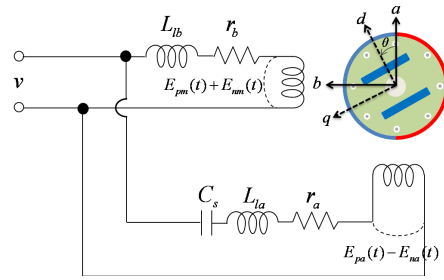
2. 토크 특성 분석

2.1 전체 토크 성분

유도기동형 동기전동기는 비동기속도에서 회전자도체와 영구자석에 의해 다양한 유도토크와 진동토크가 발생한다. 특히 진동토크는 이상 기동현상을 야기시킬 수 있으므로 정확한 해석이 필요하다. 비동기 운전영역에서 토크성분은 4가지 자속성분의 상호결합으로 그림 1과 같이 나타난다. 유도토크 성분은 동일한 속도로 회전하는 고정자와 회전자 자계의 상호결합으로 나타난다. 이때, 고정자 자속과 회전자 도체에 유도된 자속에 의해 유도토크 성분이 나타나며, 회전자 자석에서 생성되는 자속과 회전자 자속에 의해서 고정자 권선에 유도되는 자속의 상호작용으로 제동토크 성분이 나타난다. 진동토크 성분은 서로 다른 속도로 회전하는 고정자와 회전자 자계의 상호결합과 자기저항 차이에 의한 릴럭턴스 성분으로 나타나게 된다. 이때 ω_{other} 는 동기주파수를 제외한 나머지 주파수 성분을 의미한다.



2.2 유도 성분 분석



<그림 2> 단상 LSPM 기동시 등가회로

그림 2에 대칭자계법을 적용할 때 단상 LSPM의 전압방정식은 정상분 E_p 와 역상분 E_n 의 합으로 표현된다. 유도성분만을 고려하므로 자석에 의해 나타나는 항은 무시하였다. 여기서 보조권선 저항은 PTC 저항을 포함한 값이다. 이때 주권선과 보조권선 정상분 전압에 대하여 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{cases} E_{Pm}(t) = E_p \sin \omega t \\ E_{Pa}(t) = E_p \cos \omega t \end{cases} \quad (1)$$

정상분 전압에 대하여 유도전동기 DQ 전압방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{cases} E_{qs}^r = pL_q i_{qs}^r + (1-s_k) \omega_e L_d i_{ds}^r + pL_{mq} i_{qr}^r + (1-s_k) \omega_e L_{md} i_{dr}^r \\ E_{ds}^r = -(1-s_k) \omega_e L_q i_{qs}^r + pL_d i_{ds}^r - (1-s_k) \omega_e L_{mq} i_{qr}^r + pL_{md} i_{dr}^r \\ E_{qr}^r = pL_{mq} i_{qs}^r + (r_r i_{qr}^r + pL_q i_{qr}^r) \\ E_{dr}^r = pL_{md} i_{ds}^r + (r_r i_{dr}^r + pL_d i_{dr}^r) \end{cases} \quad (2)$$

여기서 s_k 는 슬립을 의미하며, Q축 전압과 D축 전압을 정상분 전압으로

로 나타내면 각각 $E_p \cos(s_k \omega t)$ 와 $-E_p \sin(s_k \omega t)$ 로 나타낸다. 식 (2)의 방정식을 각각의 전류성분에 대하여 라플라스 변환을 이용함으로써 정상상태 전류를 계산할 수 있다. 라플라스 변환을 통하여 얻어진 각 전류는 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} I'_{qs} \\ I'_{ds} \\ I'_{qr} \\ I'_{dr} \end{bmatrix} = \frac{E_p}{s^2 + (s_k \omega)^2} \begin{bmatrix} L_q s & (1-s_k)\omega_e L_d & L_m s & (1-s_k)\omega_e L_m d \\ -(1-s_k)\omega_e L_q & L_d s & -(1-s_k)\omega_e L_m q & L_m d s \\ L_m s & 0 & L_q s & 0 \\ 0 & L_m d s & 0 & L_d s \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} s \\ -s_k \omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이때 그림 2의 회로에서 누설인덕턴스는 외부에 있으므로 각축의 셀프 인덕턴스와 상호인덕턴스의 크기는 같게 된다. 라플라스 역변환을 이용하면 앞의 계수만 변하고 나머지는 같은 형태로 나타나므로, 정상분 전류에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{cases} i'_{ds} = E_p \left(k_1 \cos(k\omega t) + \frac{k_2}{k\omega} \sin(k\omega t) \right) \\ i'_{qs} = E_p \left(k_3 \cos(k\omega t) + \frac{k_4}{k\omega} \sin(k\omega t) \right) \end{cases} \quad (4)$$

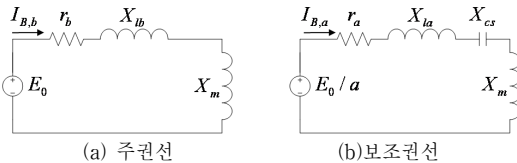
여기서 k_1 에서 k_4 는 인덕턴스와 슬립의 향으로 표현된 상수이다. DQ 변환 전류를 다시 정상분 성분으로 변환하면 (5)와 같다.

$$I_p = E_p \begin{bmatrix} (k_1 + k_4 / s\omega) \cos \omega t / 2 + (k_1 - k_4 / s\omega) \cos(s\omega t - \omega_r t) / 2 \\ + (k_2 / s\omega - k_3) \sin \omega t / 2 - (k_2 / s\omega + k_3) \sin(s\omega t - \omega_r t) / 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이때 주목 할 것은 두 가지 주파수로 유도전류가 표현된다는 점이다. 역상분성분 전류도 정상분과 같은 방법으로 같은 형태로 나타나게 되어, 유도전류는 총 3개의 주파수 성분을 갖게 된다.

2.3 제동성분 분석

비동기 영역에서 회전자 자석에 의해 발생하는 자속은 고정자 권선에 같은 주파수의 전압을 야기한다. 이때 자석에 의한 회전방향은 전동기의 회전방향을 방해하는 성분으로 나타나며, 주권선과 보조권선에 생성되는 제동 전류 성분들은 그림 3의 등가회로로 나타낼 수 있다. 여기서 첨자 B는 제동 성분을 의미한다.



〈그림 3〉 주권선과 보조권선 제동성분 등가회로

여기서 E_0 는 회전속도에 따른 역기전력을 의미한다. 주권선과 보조권선 전류는 (6)와 같이 DQ축 전류로 변환이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} I'_{B,d} \\ I'_{B,q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_r & \sin \omega_r \\ -\sin \omega_r & \cos \omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{B,a} \\ I_{B,b} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 주권선과 보조권선에 유도된 전류는 회전속도와 같은 주파수를 가지는 성분으로 나타난다.

3. 기동 특성 확인

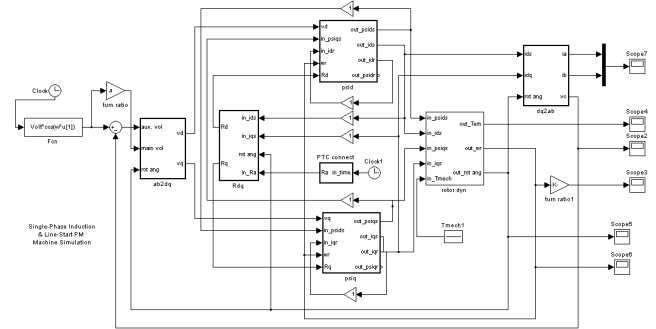
단상 LSPM 전동기 분석시 사용된 해석모델 회로정수는 다음과 같다.

〈표 1〉 단상 LSPM 전동기 사양

정격 전압	220 [V]	기동 콘덴서	40 [uF]
주파수	50 [Hz]	PTC 저항	15 [Ω]
주권선 저항	14.7 [Ω]	주권선 누설	0.0255 [H]
보조권선 저항	26.2 [Ω]	보조권선 누설	0.0255 [H]
회전자 저항	11.15 [Ω]	회전자 누설	0.0255 [H]
d축 인덕턴스	0.38 [H]	q축 인덕턴스	0.98 [H]

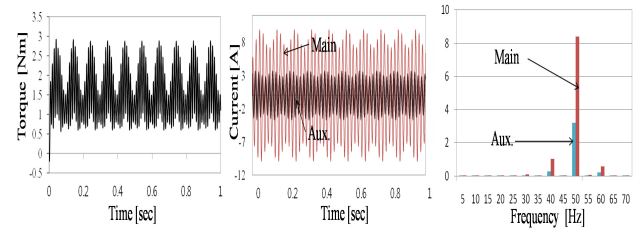
라플라스변환을 통한 결과가 매우 복잡하므로, 정상상태 특성을 쉽게

확인하기 위하여 특정 속도에 대하여 시간차분 해석을 진행하였다. 사용된 matlab siulink 회로도도 그림 4와 같다. 그림 4를 이용한 토크 및 전류 분석 결과를 그림 5에 도시하였다.

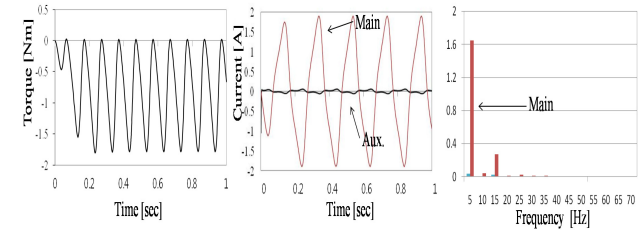


〈그림 4〉 단상 LSPM 전동기 개략도

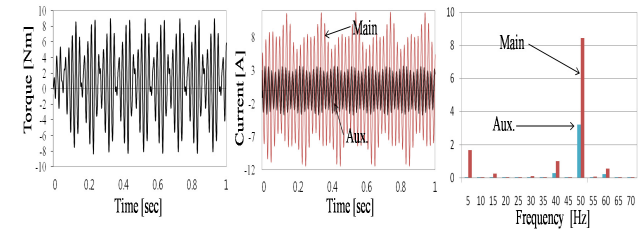
유도전류의 주파수 성분은 정상분과 역상분 주파수에 의해 3개의 주파수 성분으로 나타나는 것을 확인할 있었으며, 300rpm일 경우 (5)에 의해 정상분성분 경우 40Hz의 주파수가 나타나고, 역상분성분에 의해서는 60Hz의 주파수가 추가로 나타남을 확인할 수 있다. 제동성분 전류는 회전속도와 같은 주파수성분이 나타남을 확인할 수 있었다. 그러므로 속도에 따라서 진동토크 성분이 달라진다.



(a) 유도성분



(b) 제동성분



(c) 총 전류 및 토크 성분

〈그림 5〉 300rpm에서의 토크, 전류 분석

3. 결 론

유도성분과 제동성분 분석을 통하여 각성분의 주파수를 예측하였으며, 시간차분 해석을 이용하여 주파수성분을 확인할 수 있었다. 주파수 차이에 의하여 진동토크가 나타나므로, 추후 파라미터 변동에 대한 각성분 주파수 분석을 이용하여 단상 LSPM 전동기 기동성능 향상방안으로 적용할 예정이다.

[참고 문헌]

[1] Mircea Popescu and T.J.E. Miller, "Line-Start Permanent-Magnet Motor : Single-Phase Starting Performance Analysis", IEEETrans. Ind. Applicat., vol.39, no.4, pp.1021-1030, 2003
 [2] Chee-Mun Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery, Prentice Hall PTR, 1998