

단상 영구자석형 유도동기기의 과도상태해석

이 선 권 · 강 규 홍 · 홍 정 표 · 김 규 탁
 창원대학교 전기공학과

Transient Analysis of Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors

Sun-Kwon Lee · Gyu-Hong Kang · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - The single-phase line-start permanent magnet motor has been shown to be capable of very desirable steady state performance, but known to have undesirable starting performance. This is because magnetic braking torque. So, it is very important to predict starting performance accurately when designing the line-start motors. In this paper, starting performance was calculated by combination of d-q axis voltage equations and mechanical dynamic equations. D-q axis voltage components were derived by winding angle and turns ratio transformations.

1. 서 론

유도전동기는 별도의 구동 장치 없이 기동이 가능한 반면 공극자속 밀도가 낮고 slip이 존재하며 2차측 손실에 의한 고 효율이 어렵다. 이에 반해 영구자석 동기전동기는 유도 전동기에 비해 단위 체적 당 출력밀도가 높고 효율 및 역률이 우수하다. 그러나 영구자석 동기전동기는 기동 및 운전을 위하여 별도의 구동장치가 요구되므로 효율은 높은 반면 구동장치에 의한 전체 cost의 상승을 초래한다. 따라서, 유도기동 특성을 가지면서 정상 상태에서 고효율 운전이 가능한 유도형 동기전동기는 산업용 기기뿐만 아니라 특히 고효율, 저 cost를 요구하는 가전(家電)에서의 요구가 증가하고 있지만 전동기 설계 및 과도상태에서의 특성해석에 대한 연구는 극히 미미한 상태이다.

유도형 동기전동기는 회전자에 영구자석과 도체를 함께 구성하고 있어 과도 상태에서는 전자(電磁)유도 현상에 의한 유도전동기의 특성에 영구자석에 의한 토크 특성이 중첩되어 나타나므로 과도상태에서의 기동특성이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 단상 유도형 영구자석 매입 동기전동기의 과도 상태 해석을 유한요소법과 등가회로법의 결합으로부터 해석하였다. 단상 유도전동기는 3상 평형기와는 달리 주권선과 보조권선의 기차력차에 의한 불평형 자계가 발생하므로 설계 및 특성해석이 평형기에 비해 다소 복잡하다. 또한, 유도형 동기기는 기동시 영구자석에 의한 제동 토크(braking torque)가 발생하므로 단상 유도기에 비해 기동특성이 나쁘다. 따라서 기동 특성의 개선을 위해서 정밀한 과도상태 특성해석이 필요하다.

본 논문에서는 단상 유도동기기의 과도특성 해석을 위해 d-q축 이론에 의한 고정자와 회전자의 전압방정식을 유도하고, 이를 기계적인 운동방정식과 결합한 동특성 방정식으로부터 과도상태 해석을 하였다.

2. 동특성 방정식 유도

해석에 사용된 단상 유도동기기의 회전자 구조는 그림 1과 같다.

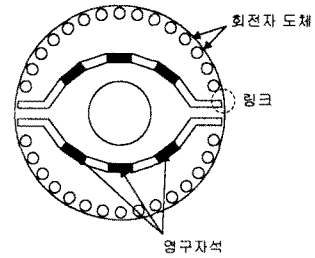


그림 1. 해석대상 전동기의 회전자 구조

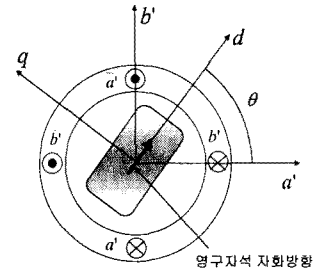


그림 2. 고정자 상과 d-q축과의 관계

그림 1에서 보는 바와 같이 회전자에는 영구자석이 매입되어 있고, 유도기동 토크 확보를 위한 도체가 삽여져 있다.

2상 전동기의 고정자 상과 회전자의 d-q축과는 그림 2와 같은 벡터의 관계가 있다. 그림 2의 벡터관계로부터 고정자 전압의 d-q 성분은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a'} \\ v_{b'} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 θ 는 2상으로 변환된 고정자 a' 상의 기차력과 회전자의 d-축이 전기적으로 이루는 각이다. 또한, 2상 전동기의 상 전압은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{a'} &= R_a i_{a'} + p \lambda_{a'} \\ v_{b'} &= R_b i_{b'} + p \lambda_{b'} \end{aligned} \quad (2)$$

보조권선을 기준으로 한 상 저항은 $R_a' = R_a$, $R_b' = R_m a^2$ 이고, a 는 보조권선과 주권선의 권선비이다. 또한, $p = d/dt$ 이고, λ 는 쇠교자속이다.

식 (1)과 식 (2)를 연립하여 정리하면 고정자 및 회전자의 전압방정식은 식 (3)과 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_d = (R_a' \cos^2 \theta + R_b' \sin^2 \theta) i_d + (-R_a' + R_b') \sin \theta \cos \theta i_q + p \lambda_d - \lambda_q \cdot p \theta \quad (3)$$

$$v_q = (R_a' \sin^2 \theta + R_b' \cos^2 \theta) i_q + (-R_a' + R_b') \sin \theta \cos \theta i_d + p \lambda_q + \lambda_d \cdot p \theta$$

$$0 = p \lambda_{2d} + R_{2d} i_{2d} \quad (4)$$

$$0 = p \lambda_{2q} + R_{2q} i_{2q}$$

여기서 $p\theta = \omega_r$ 이므로, $p\theta \cdot \lambda_d$ 는 속도 기전력 항이고, 계자자속은 영구자석에 의한 자속이므로 식 (3)의 d-축 쇄교자속에는 영구자석에 의한 직류 성분이 포함되어야 한다. 따라서 고정자와 회전자의 d-q축 쇄교자속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_d &= L_{di} i_d + L_{md} i_{2d} + L_{md} I_{fm} \\ \lambda_q &= L_{qi} i_q + L_{mq} i_{2q} \\ \lambda_{2d} &= L_{2di} i_d + L_{md} i_d + L_{md} I_{fm} \\ \lambda_{2q} &= L_{2qi} i_q + L_{mq} i_q \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 L_{md} 와 L_{mq} 는 각각 d-q축 자화 인덕턴스, i_d 와 i_q 는 고정자 d-q 성분 전류, i_{2d} 와 i_{2q} 는 회전자 도체바에 유기되는 d-q 성분 전류이다. 영구자석은 등가 전류 I_{fm} 으로 표현하여 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_0 = \omega_s L_{md} I_{fm} \quad (6)$$

여기서, E_0 는 동기속도 운전시의 무부하 역기전력이고, ω_s 는 회전자의 전기적 각속도이다.

이상과 같은 내용을 정리하면 고정자와 회전자의 전압 방정식을 식 (7)과 같이 얻을 수 있다. 또한 I_{fm} 은 직류성분으로 시간에 대한 변화율은 0이 된다.

$$\begin{aligned} v_d &= R_d + p L_{di} i_d - \omega_r L_{qi} i_q + p L_{md} i_{2d} - \omega_r L_{mq} i_{2q} \\ v_q &= \omega_r L_{di} i_d + R_q + p L_{qi} i_q + \omega_r L_{md} i_{2d} \\ &\quad + p L_{mq} i_{2q} + \omega_r L_{md} I_{fm} \\ 0 &= p L_{md} i_d + (R_{2d} + p L_{2d}) i_{2d} \\ 0 &= p L_{mq} i_q + (R_{2q} + p L_{2q}) i_{2q} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} R_d &= (R_a' \cos^2 \theta + R_b' \sin^2 \theta) i_d + (-R_a' + R_b') \sin \theta \cos \theta i_q \\ R_q &= (R_a' \sin^2 \theta + R_b' \cos^2 \theta) i_q + (-R_a' + R_b') \sin \theta \cos \theta i_d \end{aligned} \quad (8)$$

또한 전동기의 기계적인 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m \quad (9)$$

여기서, T_e 는 전자기적 발생토크, ω_m 은 회전자의 기계적 회전 각속도, T_L 은 부하토크, J 는 관성모멘트, B 는 마찰 계수이다.

본 논문에서는 연립 미분방정식의 형태로 표현되는 식 (7)~식 (9)를 4계 Runge-Kutta법을 적용하여 과도 상태 해석을 하였다.

3 과도상태 특성해석

전압방정식으로부터 유도된 동특성 방정식의 d-q축 전압은 식 (7)의 연립 미분 방정식의 구동항이 된다. 권

선 배치각과 권선비로부터 2상 전동기로 변환하여 d-q축 전압을 계산하였다. 이러한 과정은 그림 3과 같다.

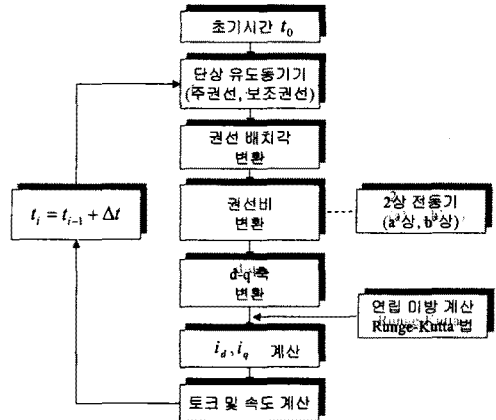


그림 3. 과도특성 해석을 위한 2상 전동기 변환

그림 3에서 권선 배치각과 권선비를 변환하는 행렬은 각각 식 (10), 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \zeta \\ 0 & \sin \zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{aux} \\ v_{main} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} v_a' \\ v_b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{1}{a}, \quad a: \text{권선비}$$

또한, 보조권선에는 캐패시터가 부착되어 있고, 각 권선의 전압 관계는 다음과 같다.

$$v_m = v_s \quad (12)$$

$$v_a = v_s - v_c = v_m - v_c \quad (13)$$

$$p v_c = \frac{1}{C} i_a \quad (14)$$

여기서 v_s 는 인가전압의 순시치, v_c 는 콘덴서 전압강하이다. 또한, 식 (1)과 식(12)~식 (14)를 연립하여 정리하면, 고정자 d-q 전압은 다음과 같다.

$$v_d = v_s \left[(1 + \cos \zeta) \cos \theta + \frac{\sin \zeta}{\beta} \sin \theta \right] - v_c \cos \theta \quad (15)$$

$$v_q = v_s \left[-(1 + \cos \zeta) \sin \theta + \frac{\sin \zeta}{\beta} \cos \theta \right] + v_c \sin \theta \quad (16)$$

식 (15)와 식 (16)은 식 (7)의 미분방정식의 구동항이 된다. 동특성 방정식의 해에 의해 계산된 d-q축 전류를 이용하여 그림 3의 과정을 역으로 수행하면 주권선과 보조권선 전류를 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{aux} &= i_d \left[\cos \theta - \frac{\cot \zeta}{\beta} \sin \theta \right] - i_q \left[\sin \theta + \frac{\cot \zeta}{\beta} \cos \theta \right] \\ i_{main} &= \frac{\csc \zeta}{\beta} [i_d \sin \theta + i_q \cos \theta] \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, i_{aux} 는 보조권선 전류, i_{main} 은 주권선 전류, 입력 전류는 이 두 권선 전류의 순시 합이다.

또한 동특성 방정식의 해로부터 단상 유도동기기의 토크는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_e = P_p(\lambda_{qi}^* - \lambda_{qi}) \quad (18)$$

여기서, P_p 는 극쌍수이다.

4. 해석결과

본 논문에서는 기동시의 전기-기계적 특성의 순시 변화를 해석하기 위해 전압방정식과 운동방정식을 결합한 동특성 방정식을 구성하여 해를 구하였다.

단상 유도동기기는 기동토크를 증대시키기 위해 보조 권선에 PTC와 기동 캐패시터가 직렬로 연결되어 있다. 이러한 고정자 권선의 회로도도 그림 4와 같다. 해석시 운전 캐패시턴스는 $12[\mu F]$, 기동 부하는 정격부하 ($160[W]$)의 $125[\%]$ 로 가정하여 해석하였다.

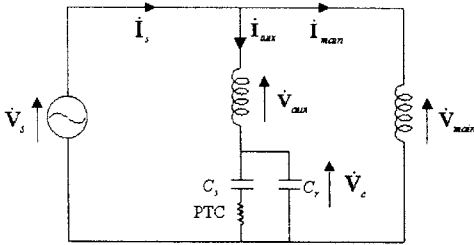


그림 4. 기동시의 고정자 회로도

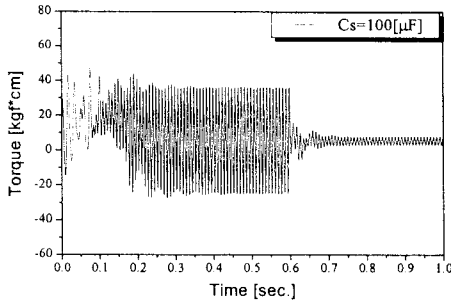


그림 5. 순시 토크 특성

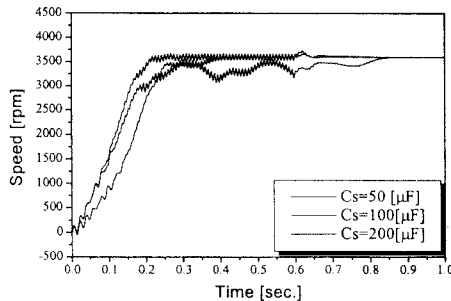


그림 6. 기동 캐패시턴스에 따른 속도 특성

그림 5는 기동 캐패시턴스가 $100[\mu F]$ 인 경우의 기동시 순시토크 특성을 나타낸다. 그림 5에서 시간이 0.6초 이하인 경우는 PTC 저항이 $6.8[\Omega]$, 0.6초 이상인 경우 PTC는 큐리온도를 넘어 저항 값이 $10[k\Omega]$ 가 되었다고 가정하였다. 따라서 0.6초를 기준으로 서로 다른 토크 특성을 나타낸다. 이는 속도와 전류특성에서도 마찬가지이다. 이는 기동토크 확보에 좋은 캐패시턴

스 용량이 정상상태에서 심한 불평형을 야기함을 의미한다. 따라서 그림 5, 그림 6의 결과에서 보는 바와 같이 PTC 회로가 개방되어 운전 캐패시터만으로 동작하는 경우 정상상태에서 불평형 성분을 줄일 수 있다. 그림 6은 기동 캐패시턴스의 변화에 따른 속도 특성을 나타내었다. 이러한 과정을 거쳐 설계시 최적의 캐패시터 용량을 선정할 수 있다. 기동 캐패시턴스가 $100[\mu F]$ 인 경우의 권선의 순시 전류를 각각 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

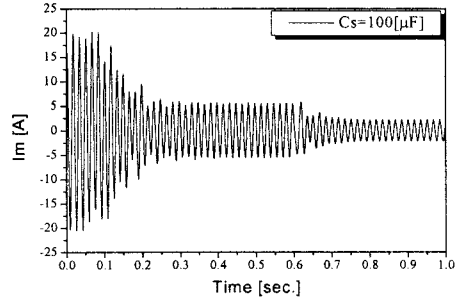


그림 7. 주권선 전류

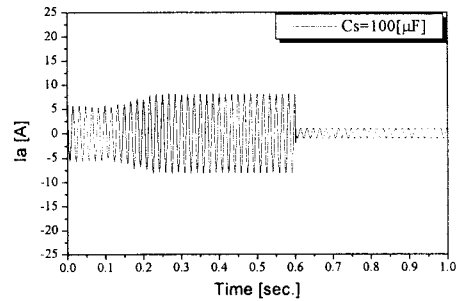


그림 8. 보조권선 전류

5. 결 론

본 논문에서는 단상 유도동기기의 고정자와 회전자 전압에 대해 d-q축 전압방정식을 유도하고, 이를 기계적 운동 방정식과 결합하여 동특성 방정식을 구성하였다. 또한, 단상 유도동기기의 기동 보조장치인 캐패시터와 PTC 저항을 고려한 과도상태 해석을 수행하였다.

본 논문에서 제시한 등가회로에 의한 과도상태 해석 방법은 파라미터나 캐패시터 값에 따른 신속한 기동특성 분석에 용이하므로 설계단계에서 유리하게 사용할 수 있고, 유한요소법을 이용하여 정밀한 회로정수를 선정하여 비선형 특성을 고려하면 보다 정확한 기동특성 계산이 가능할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Timothy J. E. Miller, "Single-Phase Permanent Magnet Motor Analysis", IEEE Trans. Industry Application, no. 4, pp. 651-658, 1985.
- [2] V. B. Honsinger, "Permanent Magnet Machines: Asynchronous Operation", IEEE Trans. Power Apparatus, Syst., vol. 99, no. 4, pp. 1503-1509, 1980.
- [3] M. Azizur Rahman, Ping. Zhou, "Analysis of Brushless Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 43, no. 2, pp. 256-267, 1996.