

Starting Characteristic Analysis of Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor

姜圭洪* · 洪正杓**
(Gyu-Hong Kang · Jung-Pyo Hong)

Abstract - This Paper presents the transient analysis of the single-phase line-start permanent magnet synchronous motor. To analyze the starting characteristics, the dynamic equation which is combined electric dynamic equations with mechanical dynamic equation is used. The electric dynamics are derived from the d-q axis voltages of stator and rotor respectively. Especially, symmetrical components transformation is used to consider unbalanced magnetic field which is produced by single-phase input. Non-linear d-q axis inductances according to current amplitude and current phase angle are calculated by Finite Element Method and applied to lumped parameter circuit. The analysis methods are validated by comparing simulated and experimental results.

Key Words : single phase line-start permanent magnet motor, transient analysis, Finite Element Method

1. 서 론

단상 유도전동기는 고정자 및 회전자 구조가 간단하고 상용화된 가정용 전원으로 운전이 가능하여 가전(家電)에서의 동력원으로 널리 사용되고 있다. 그러나 주권선과 보조권선의 기자력차에 의해 평형 다상기와는 달리 불평형의 타원자계가 발생하고 기동 토크의 확보 및 기동 특성 향상을 위하여 보조권선에 저항 또는 기동형 콘덴서 등 별도의 부가장치를 구성해야 하는 문제점이 있다. 또한, 불평형 자계에 의한 성능 저하 및 2차측 손실에 의해 고 효율화가 매우 어렵다.[1] 이에 반해 영구자석 동기전동기는 유도 전동기에 비해 단위 체적 당 출력밀도가 높고 효율 및 역률이 우수하지만 기동 및 운전을 위하여 인버터와 같은 구동장치가 요구되므로 효율은 높은 반면 구동장치에 의한 전체 cost의 상승을 초래한다. 따라서 고 효율 및 저cost의 구현을 위하여 구동장치 없이 기동 및 고 효율 특성을 만족하는 직립 기동형 영구자석 동기전동기의 요구가 증가하고 있다.[2-4]

직립 기동형 영구자석 동기전동기는 회전자에 영구자석과 도체를 함께 구성하고 있어 전자(電磁)유도 현상에 의한 유도 전동기의 특성과 영구자석에 의한 동기전동기의 특성을 함께 가진다. 동기속도로 운전하는 정상상태에서는 동기전동기의 특성을 가지므로 유도 전동기에 비해 고 효율화가 가능한 반면 과도 상태에서는 영구자석에 의한 토크가 제동 토크(braking torque)로 작용하여 유도 기동토크에 중첩되므로 유

도전동기에 비해 기동특성이 저하하는 문제가 발생한다. 따라서 직립 기동형 동기전동기의 기동 및 운전특성 향상을 위하여 유도전동기의 특성과 동기전동기의 특성이 공존하는 과도상태에서의 정밀한 특성해석이 반드시 필요하다.[3][5-6]

본 논문에서는 주권선과 보조권선의 기자력 차를 가지는 고정자에 도체와 영구자석 매입 구조의 회전자를 채용한 단상 직립기동 동기전동기의 과도상태 해석을 수행하였다. 과도상태 해석을 위한 등가회로는 대칭좌표계법(symmetrical coordinate method)과 d-q축 이론으로부터 고정자 및 회전자의 전압방정식을 구성하였으며, 기계적 운동방정식과 결합한 동특성 방정식으로부터 과도상태 해석을 수행하였다. 매입형 영구자석 전동기는 회전자의 구조적인 특징으로부터 국부적인 포화가 극심하고 d-q축 인덕턴스가 전류의 크기 및 부하각에 따라 큰 변화가 발생한다.[7] 따라서, 본 논문에서는 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 전류 크기 및 부하각에 따른 d-q축 인덕턴스를 산정한 후 과도 상태에서의 전류 및 부하각 특성에 부합하도록 회로정수를 적용하여 과도상태 해석을 수행하였다. 본 논문에서 제시한 과도상태 해석의 결과를 실험치와 비교하여 과도상태 해석의 타당성을 입증하였다.

2. 과도상태 해석 이론

본 논문에서 해석대상으로 적용한 단상 직립기동 동기전동기는 가전(家電) 및 산업용 기기에 별도의 구동장치 없이 상용전원을 직접 인가하는 전동기로서 고정자는 기자력 차를 가지는 주권선과 보조권선으로 구성되어 115[V]/60[Hz]의 전원을 사용하며 회전자 형상은 그림 1과 같다. 그림 1에서와 같이 회전자는 매입 구조의 영구자석과 기동시에 기동토크를 얻기 위한 도체바로 구성되어있다.

* 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 BK教授 · 工博

** 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2001年 8月 29日

最終完了 : 2001年 11月 12日

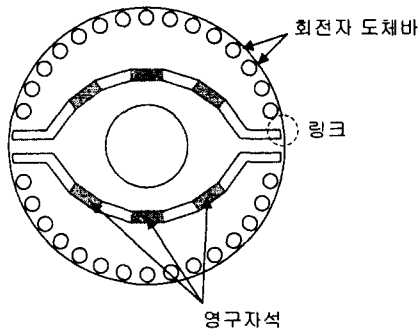


그림 1 단상 직립기동 동기전동기의 회전자 형상
Fig. 1 Rotor structure of single-phase line-start synchronous motor

2.1 동특성 방정식의 유도

회전자의 자속 축을 d-축으로 정의하면, 2상 전동기의 고정자 권선과 회전자의 d-q축과의 관계는 그림 2와 같다.[2][3]

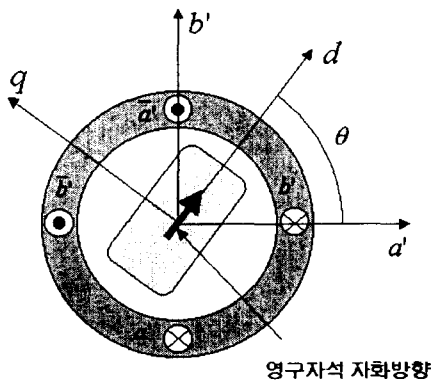


그림 2 고정자 상과 d-q축 성분과의 관계
Fig. 2 Relation between stator phase and d-q axis

그림 2의 벡터관계로부터 고정자 전압의 d-q 성분은 식 (1)과 같다. 식 (1)의 관계는 자속과 전류에 대해서도 만족한다.[2]

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

여기서 θ 는 2상으로 변환된 고정자 a' 상의 기자력과 회전자의 d-축이 전기적으로 이루는 각이다. 또한, 2상 전동기의 상 전압은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} v_{a'} &= R_{a'} i_{a'} + \frac{d\lambda_{a'}}{dt} \\ v_{b'} &= R_{b'} i_{b'} + \frac{d\lambda_{b'}}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

보조권선을 기준으로 한 상저항은 $R_{a'} = R_a, R_{b'} = R_m a^2$ 이고, a 는 보조권선과 주권선의 권선비이다.

전류에 대한 d-q축 성분과 상 전류의 관계는 식 (1)의 관계에 의해 상 전류는 d-q축의 전류로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} i_{a'} &= i_d \cos \theta - i_q \sin \theta \\ i_{b'} &= i_d \sin \theta + i_q \cos \theta \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)와 식 (1)에 의해 정리하면 고정자 전압방정식을 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_d &= (R_{a'} \cos^2 \theta + R_{b'} \sin^2 \theta) i_d \\ &\quad + (-R_{a'} + R_{b'}) \sin \theta \cos \theta i_q + p\lambda_d - \lambda_q \cdot p\theta \\ v_q &= (R_{a'} \sin^2 \theta + R_{b'} \cos^2 \theta) i_q \\ &\quad + (-R_{a'} + R_{b'}) \sin \theta \cos \theta i_d + p\lambda_q + \lambda_d \cdot p\theta \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $p = d/dt$ 이고, λ 는 쇄교자속이다. 또한, $p\theta = \omega_r$ 로써 회전자의 전기적인 회전 각속도를 나타낸다. 즉, $p\theta$ 는 속도 기전력 항이다.

계자자속은 영구자석에 의한 자속이므로 식 (4)의 d-축 쇄교자속에는 영구자석에 의한 직류 성분이 포함되어야 한다. d-축 쇄교자속에 각속도를 곱한 값이 영구자석의 자속에 의한 속도 기전력 성분이 된다. 따라서 d-q축 쇄교자속은 식 (5) 및 (6)과 같다. 또한, L_{md} 와 L_{mq} 는 각각 d-q축 자화인덕턴스, i_d 와 i_q 는 고정자 전류, i_{2d} 와 i_{2q} 는 회전자 도체바에 유기되는 전류이다.

$$\lambda_d = L_{a'} i_d + L_{md} i_{2d} + L_{md} I_{fm} \quad (5)$$

$$\lambda_q = L_{q'} i_q + L_{mq} i_{2q} \quad (6)$$

다음으로 회전자의 도체에 대한 전압방정식은 식 (7), (8)과 같다.[2-4] R_{2d} 와 R_{2q} 는 각각 회전자 도체바의 d-q 성분 저항이고, 여기서는 같은 값으로 처리하였다.

$$0 = p\lambda_{2d} + R_{2d} i_{2d} \quad (7)$$

$$0 = p\lambda_{2q} + R_{2q} i_{2q} \quad (8)$$

회전자 도체의 쇄교자속 λ_{2d} 와 λ_{2q} 는 각각 다음과 같다. I_{fm} 은 영구자석을 직류 권선형 계자로 고려한 경우의 등가 전류로 식 (11)과 같고, 무부하 역기전력과는 식 (12)와 같은 관계에 있다.

$$\lambda_{2d} = L_{2d} i_{2d} + L_{md} i_d + L_{md} I_{fm} \quad (9)$$

$$\lambda_{2q} = L_{2q} i_{2q} + L_{mq} i_q \quad (10)$$

$$I_{fm} = \frac{E_0}{X_{md}} \tag{11}$$

$$E_0 = \omega_s L_{md} I_{fm} \tag{12}$$

여기서, ω_s 는 동기속도에서의 전기적인 회전자 각속도이고 전기적인 입력 각속도와 같다. d-q축 인덕턴스는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_d &= L_{md} + L_1 \\ L_q &= L_{mq} + L_1 \\ L_{2d} &= L_{md} + L_{2d1} \\ L_{2q} &= L_{mq} + L_{2q1} \end{aligned} \tag{13}$$

여기서, L_1 은 고정자측 누설인덕턴스 성분이고, L_{2d1} 과 L_{2q1} 은 회전자측의 누설인덕턴스 성분이다.

이상과 같은 내용을 정리하면 고정자와 회전자의 전압방정식을 다식 (14)와 같이 구성하였다.[2-4]

$$\begin{aligned} v_d &= R_d + pL_{d'}i_d - \omega_r L_{q'}i_q + pL_{md'}i_{2d} - \omega_r L_{mq'}i_{2q} + pL_{md}I_{fm} \\ v_q &= \omega_r L_{d'}i_d + R_q + pL_{q'}i_q + \omega_r L_{md'}i_{2d} + pL_{mq'}i_{2q} + \omega_r L_{md}I_{fm} \\ 0 &= pL_{md'}i_d + (R_{2d} + pL_{2d})i_{2d} + pL_{md}I_{fm} \\ 0 &= pL_{mq'}i_q + (R_{2q} + pL_{2q})i_{2q} \end{aligned} \tag{14}$$

여기서 R_d 와 R_q 는 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} R_d &= (R_a' \cos^2 \theta + R_b' \sin^2 \theta)i_d + \\ &\quad (-R_a' + R_b') \sin \theta \cos \theta i_q \\ R_q &= (R_a' \sin^2 \theta + R_b' \cos^2 \theta)i_q + \\ &\quad (-R_a' + R_b') \sin \theta \cos \theta i_d \end{aligned} \tag{15}$$

권선비를 변환하여 2상 평형기가 되면 식 (15)의 저항 값은 같은 값이 되어 식이 간단해 진다. 그러나 본 해석 모델은 주권선과 보조권선의 도체 저항이 다르기 때문에 이를 고려하여 전압 방정식을 유도하면 식 (14)와 같이 된다. 또한 I_{fm} 은 직류성분이기 때문에 I_{fm} 에 대한 시간 미분은 0이므로 식 (14)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} v_d &= R_d + pL_{d'}i_d - \omega_r L_{q'}i_q + pL_{md'}i_{2d} - \omega_r L_{mq'}i_{2q} \\ v_q &= \omega_r L_{d'}i_d + R_q + pL_{q'}i_q + \omega_r L_{md'}i_{2d} + pL_{mq'}i_{2q} + \omega_r L_{md}I_{fm} \\ 0 &= pL_{md'}i_d + (R_{2d} + pL_{2d})i_{2d} \\ 0 &= pL_{mq'}i_q + (R_{2q} + pL_{2q})i_{2q} \end{aligned} \tag{16}$$

또한 전동기의 기계적인 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m \tag{17}$$

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

식 (16)과 식 (17)의 전압방정식과 기계적 운동방정식을 결합한 연립미분방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p i_d &= \frac{1}{\Delta d} (v_d L_{2d} - R_d L_{2d} + \omega_r L_q L_{2d} i_q + \\ &\quad \omega_r L_{mq} L_{2d} i_{2q} + R_{2d} L_{md} i_{2d}) \\ p i_q &= \frac{1}{\Delta q} (v_q L_{2q} - \omega_r L_d L_{2q} i_d - R_q L_{2q} - \\ &\quad \omega_r L_{md} L_{2q} i_{2d} - \omega_r L_{mq} L_{2q} I_{fm} + R_{2q} L_{mq} i_{2q}) \\ p i_{2d} &= \frac{1}{\Delta 2d} (v_d L_{md} - R_d L_{md} + \omega_r L_q L_{md} i_q + \\ &\quad \omega_r L_{mq} L_{md} i_{2q} + R_{2d} L_{d'} i_{2d}) \\ p i_{2q} &= \frac{1}{\Delta 2q} (v_q L_{mq} - \omega_r L_d L_{mq} i_d - R_q L_{mq} - \\ &\quad \omega_r L_{md} L_{mq} i_{2d} - \omega_r L_{mq} L_{mq} I_{fm} + R_{2q} L_{q'} i_{2q}) \\ p \omega_r &= \frac{P}{J} (T_e - T_L - \frac{B}{P} \omega_r) \\ p \delta &= \omega_s - \omega_r \\ p v_c &= \frac{1}{C} i_a \\ p \theta &= \omega_r \end{aligned} \tag{18}$$

여기서

$$\begin{aligned} \Delta d &= L_d L_{2d} - L_{md}^2, \quad \Delta q = L_q L_{2q} - L_{mq}^2 \\ \Delta 2d &= L_{md}^2 - L_d L_{2d}, \quad \Delta 2q = L_{mq}^2 - L_q L_{2q} \end{aligned}$$

이다. 또한 P 는 극쌍수이고, ω_s 는 동기속도로 회전하는 회전자계의 전기적 각속도, δ 는 부하각, v_c 는 커패시터 양단의 전압, C 는 커패시터의 정전용량을 나타낸다.

이와 같이, 식 (18)은 연립미분 방정식의 형태이고, 본 논문에서는 4계 Runge-Kutta 법을 이용하여 연립 미분방정식의 해를 구했다.

2.2 과도특성 해석

전압방정식으로부터 유도된 동특성 방정식의 d-q축 전압은 식 (18)의 연립 미분 방정식의 구동항이 된다. 권선 배치각과 권선비로부터 2상 전동기로 변환하여 d-q축 전압을 계산하였다. 이러한 과정은 그림 3과 같다. 그러나, 과도상태에서는 동기속도로 운전되지 않기 때문에, 시간에 대한 항을 고려하여 순시 값으로 계산해야 한다. 보조권선에는 커패시터가 부착되어 있기 때문에 단자전압의 관계는 다음과 같다.

$$v_m = v_s \tag{19}$$

$$v_a = v_s - v_c \tag{20}$$

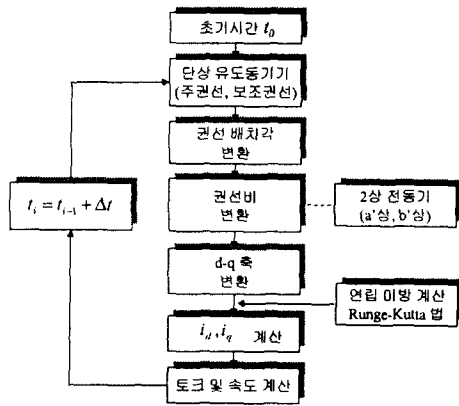


그림 3 과도특성 해석을 위한 2상 전동기 변환
 Fig. 3 2-Phase motor transformation for transient analysis

여기서 v_s 는 인가전압의 순시치, v_c 는 콘덴서 전압강하이 고, 다음과 같다.

$$pv_c = \frac{1}{C} i_a \quad (21)$$

따라서 식 (1)과 식 (19)~식 (21)을 연립하여 정리하면, d-q축 전압은 다음과 같다.

$$v_d = v_s \left[(1 + \cos \zeta) \cos \theta + \frac{\sin \zeta}{\beta} \sin \theta \right] - v_c \cos \theta \quad (22)$$

$$v_q = v_s \left[-(1 + \cos \zeta) \sin \theta + \frac{\sin \zeta}{\beta} \cos \theta \right] + v_c \sin \theta \quad (23)$$

식 (22)와 식 (23)은 식 (18)의 연립방정식의 구동항이 된다. 식 (18)의 해에 의해 계산된 d-q축 전류를 이용하여 그림 2의 과정을 역으로 수행하면 주권선과 보조권선 전류를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$i_{aux} = i_d \left[\cos \theta - \frac{\cot \zeta}{\beta} \sin \theta \right] - i_q \left[\sin \theta + \frac{\cot \zeta}{\beta} \cos \theta \right] \quad (24)$$

$$i_{main} = \frac{\text{cosec} \zeta}{\beta} [i_d \sin \theta + i_q \cos \theta] \quad (25)$$

$$i_s = i_{aux} + i_{main} \quad (26)$$

여기서, i_{aux} 는 보조권선 전류, i_{main} 은 주권선 전류, i_s 는 입력 전류이다. 단상 직립기동 영구자석 동기전동기의 출력 및 발생토크는 식 (27), (28)과 같다.

$$P_{out} = \omega_r (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (27)$$

$$T_e = P (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (28)$$

여기서 $\omega_r = P \omega_m$ 이다.

3. 유한요소법에 의한 회로정수의 산정

3.1 d-q축 인덕턴스의 산정

매입형 영구자석 전동기는 회전자의 구조적 특징으로부터 d-q축의 자기저항 차가 발생하고, 전류 크기 및 부하각에 따라 회전자의 포화 정도의 변화가 발생하므로 d-q축 인덕턴스는 전류 및 부하각에 따라 비선형적인 변화 특성을 가진다.[7-9] 이러한 비선형적 변화 특성을 집중정수로 고려하여 계산하면 오차가 발생하고, 링크부의 포화 등을 고려할 수 없어 정확한 인덕턴스 산정에 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 기하학적인 구조를 직접 모델링할 수 있고 기동 및 부하 조건에 따른 재질의 비선형 특성을 고려할 수 있는 유한요소법을 이용하여 단상 직립기동 영구자석 동기전동기의 d-q축 인덕턴스를 산정하였다.

단상 직립기동 영구자석 동기전동기는 기동시 급격한 전류 변동과 부하각의 변화로부터 인덕턴스의 변화가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 과도상태의 특성을 해석하기 위해서 유한요소 해석으로부터 전류의 크기에 따른 전류 위상각 변화에 따른 d-q축 인덕턴스를 산정하였다. d-q축 인덕턴스 산정 과정을 그림 4에 나타내었다.

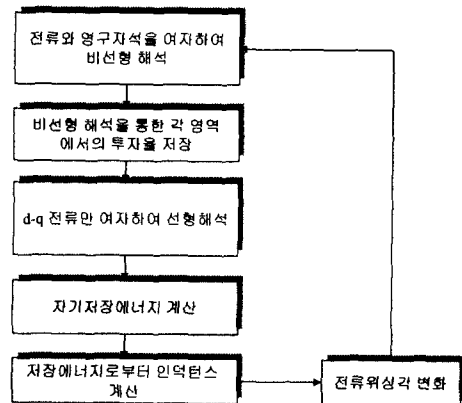


그림 4 인덕턴스 산정과정
 Fig.4 Inductance Calculation Process

3.2 무부하 역기전력의 산정

유한요소법으로 영구자석에 의한 무부하 역기전력 특성을 해석 영역에서 권선 쇄교자속의 시간 미분항으로부터 산정하였다. N 턴의 권선에 유기되는 역기전력은 슬롯 영역의 평균 자기벡터포텐셜로부터 구하였으며 자속은 자기벡터포텐셜로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi = l(A_1 - A_2) \quad (31)$$

여기서, A_1 과 A_2 는 슬롯 영역의 평균 자기벡터포텐셜이고, l 은 축방향 길이이다. N 턴 권선에 쇄교하는 평균 쇄교자속과, 역기전력은 다음과 같다.[7]

$$\lambda = N \left[\frac{\int \int_{S_1} A_1 ds}{S_1} - \frac{\int \int_{S_2} A_2 ds}{S_2} \right] \quad (32)$$

$$e_0 = \frac{d\lambda}{dt} \quad (33)$$

여기서 S_1 과 S_2 는 N 턴 권선이 시행되어 있는 슬롯 면적이다. 무부하 역기전력의 순시치가 구해지면, 다음과 같이 실효치를 계산하였다.

$$E_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e_0^2 dt} \quad (34)$$

여기서, T 는 주기, e_0 는 무부하 역기전력의 순시치이다.

4. 특성해석 결과

4.1 회로정수 산정결과

매입형 영구자석 전동기의 d-축 인덕턴스는 큰 변화가 없지만, q-축 인덕턴스는 고정자 전류의 크기 및 부하각에 따라 극심하게 변한다. 따라서 과도전류의 변화에 따라 비선형적인 인덕턴스가 고려되어야 한다.

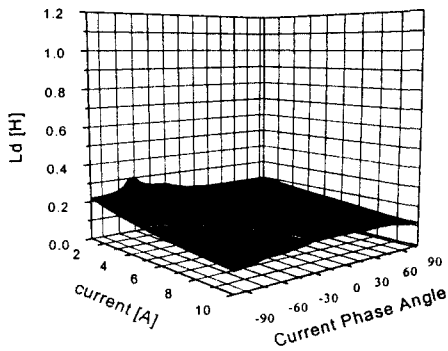


그림 5 d축 인덕턴스
Fig. 5 d-axis Inductance

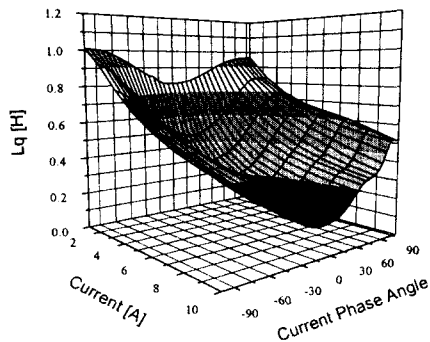


그림 6 q축 인덕턴스
Fig. 6 q-axis Inductance

그림 5와 그림 6은 각각 전류의 위상각과 크기에 따른 d 축, q축 인덕턴스 특성을 나타낸 그래프이다. 전류의 위상각과 크기에 따라 링크부의 포화정도가 달리 지기 때문에 q축 인덕턴스는 그림 6과 같이 같이 비선형적인 특성을 가진다는 것을 알 수 있다.

한편 무부하 역기전력은 유한요소법을 이용하여 회전자를 이동시키면서 각 권선에 쇄교하는 자속으로부터 계산하였다. 그림 7은 무부하 역기전력을 산정하기 위해 이동라인 기법 (moving line technique)을 적용하여 임의 회전자 위치에서 영구자석에 의한 등포텐셜 분포를 나타낸다. 그림 8은 유한요소법으로 산정한 무부하 역기전력이다. 여기서 무부하 역기전력의 실효치는 64[V]이다.

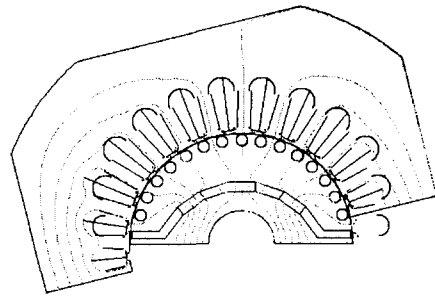


그림 7 회전자 이동시의 등포텐셜도
Fig. 7 Equi-potential distribution of moved rotor

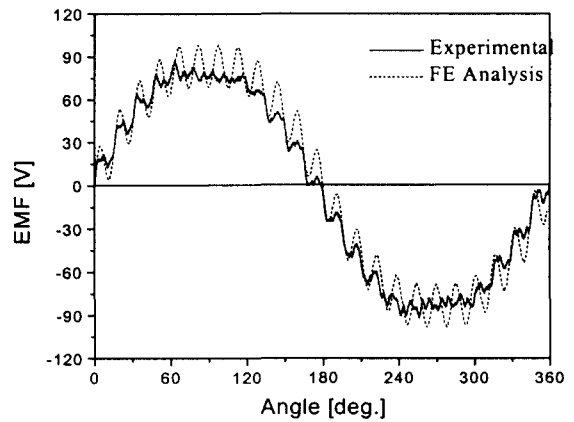


그림 8 무부하 역기전력(보조권선)
Fig. 8 No-load EMF (Auxiliary winding)

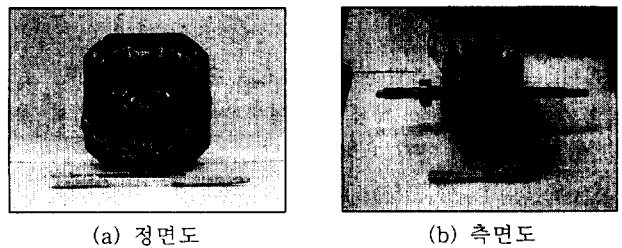


그림 9 단상 직립기동 동기전동기 시제품
Fig. 9 Prototype of Single-phase Line-start Synchronous Motor

4.2 특성해석 결과

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

단상 직립기동 동기전동기는 기동시 영구자석에 의한 braking 토크가 발생하기 때문에 큰 유도기동 토크의 확보가 필요하다. 이를 위해 보조권선에는 PTC(Positive Temperature Coefficient) 저항과 기동 캐패시터를 직렬로 연결되어 있다. 고정자 권선의 회로도도 그림 10과 같다. 여기서 PTC의 저항은 저온에서 $6.8[\Omega]$, 고온에서는 $10[k\Omega]$, 운전 캐패시터(C_r)의 용량은 $12[\mu F]$ 이다.

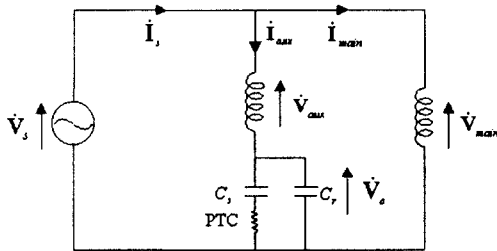


그림 10 기동시의 고정자 회로도
Fig. 10 Stator circuit diagram in starting

본 논문에서는 동특성 방정식으로부터 기동시의 속도 및 토크 특성과 주권선, 보조권선의 과도전류를 해석하였다. 기동 캐패시턴스(C_s)는 $100[\mu F]$ 을 적용하였다.

그림 11과 12는 과도상태에서 주권선의 순시치 전류 특성을 해석치와 실험치 각각 나타내었다. 해석결과 기동시 주권선 전류의 순시치가 실험치 보다 약간 크게 나타난다. 이는 실험에서 기동시의 회전자 초기 위치와 PTC 저항의 변화추이에 따라 다소 차이가 날 수 있으나 기동에서부터 정상상태 도달까지의 전류 추이는 해석치와 실험치가 잘 일치함을 알 수 있다. 본 논문에서 해석모델은 기동 후 $0.6[\text{sec}]$ 에서 PTC가 온도상승에 의해 저항이 급격히 증가하는 것으로 가정하였으며 이때 PTC 저항을 $10[k\Omega]$ 으로 변경하여 해석하였다. 그림 13, 14는 보조권선 전류 특성을 나타내었다. 보조권선 전류도 주권선 전류의 변화 추이와 유사함을 알 수 있다.

과도상태에서의 주권선 및 보조권선 전류의 변화 및 추이는 해석치와 실험치가 잘 일치하여 본 논문에서 제시한 해석방법의 타당성을 입증할 수 있다.

그림 15와 16은 과도상태에서 순시 토크와 속도 특성을 나타내었다. 해석결과 기동 후 $0.2[\text{sec}]$ 에서 동기속도에 도달함을 알 수 있다.

단상 직립기동 동기전동기는 보조권선의 캐패시턴스에 따라 기동특성이 달라진다. 따라서 기동특성 향상을 위해서 캐패시턴스에 따른 과도해석이 요구되어진다.

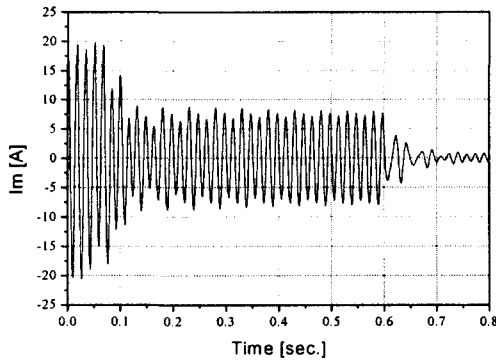


그림 11 주권선 전류(해석치)
Fig. 11 Main winding current (analysis result)

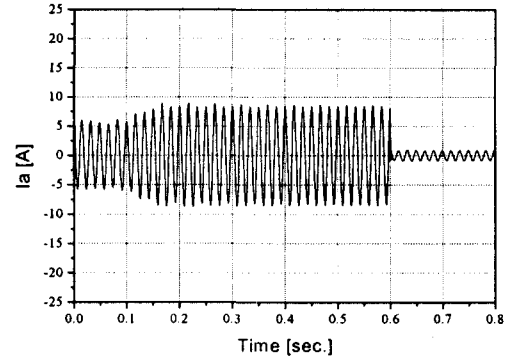


그림 13 보조권선 전류(해석치)
Fig. 13 Aux. winding current (analysis result)

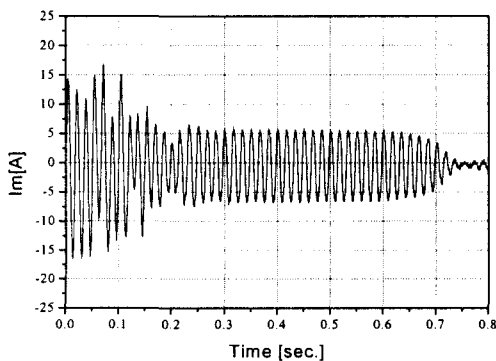


그림 12 주권선 전류(실험치)
Fig. 12 Main winding current (experiment result)

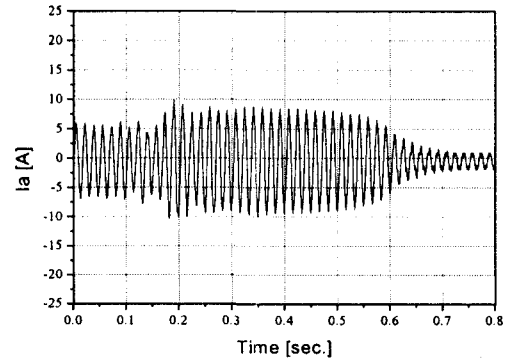


그림 14 보조권선 전류(실험치)
Fig. 14 Aux. winding current (experiment result)

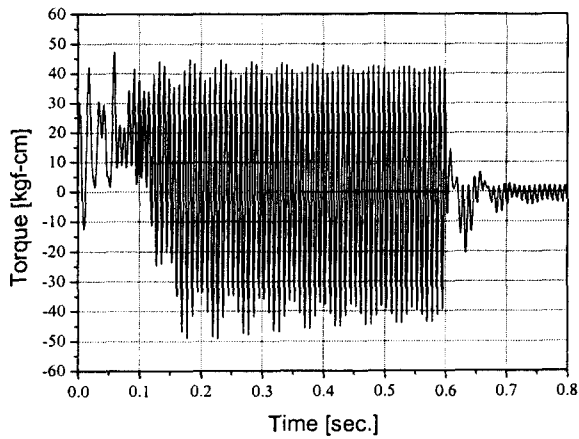


그림 15 토크특성 곡선

Fig. 15 Torque characteristic curve

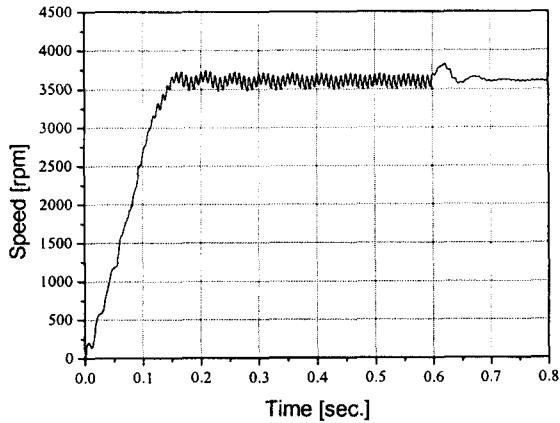
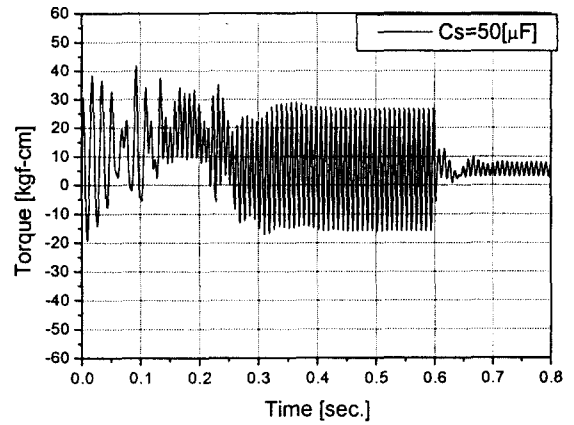


그림 16 속도 특성 곡선

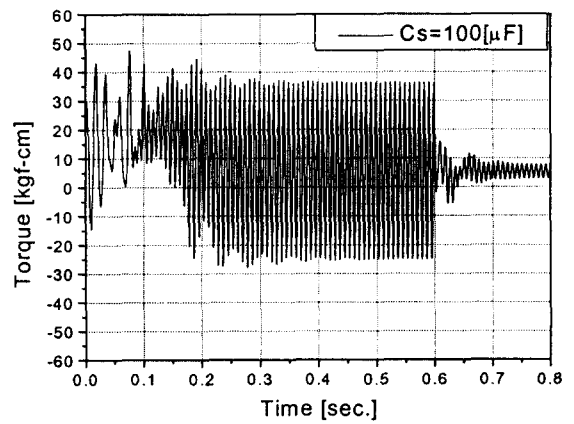
Fig. 16 Speed characteristic curve

그림 17은 기동부하가 정격부하(160[W])의 125[%]인 경우, 기동 캐패시턴스(C_s)의 변화에 따른 순시토크 특성을 나타내었다. 기동 캐패시턴스(C_s)가 증가하는 경우 순시 토크는 증가하지만 C_s 가 200 [μF]에서는 기동시 토크 맥동이 증가하여 동기속도 이후에서 속도 리플이 발생한다. 이는 기동토크 확보에 좋은 캐패시턴스 용량이 정상상태에서 심한 불평형을 야기함을 의미한다. 기동 캐패시턴스 변화에 따른 속도 특성을 그림 18에 나타내었다. C_s 의 변화에 따라 과도상태 속도 특성이 변화함을 알 수 있다.

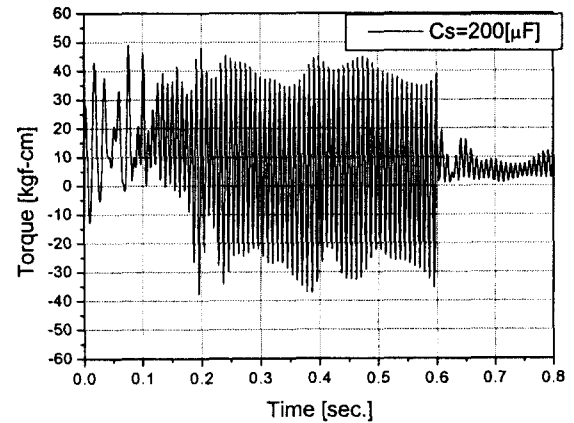
이러한 과정을 거쳐 전동기 설계시 최적의 캐패시터 용량을 산정할 수 있다. 기동 부하가 정격의 125[%]이고, 기동 캐패시턴스가 100[μF] 인 경우의 권선의 순시 전류를 각각 그림 19와 20에 나타내었다.



(a) $C_s = 50 [\mu F]$



(b) $C_s = 100 [\mu F]$



(c) $C_s = 200 [\mu F]$

그림 17 C_s 에 따른 순시토크 특성

Fig. 17 Instantaneous torque characteristics according to C_s

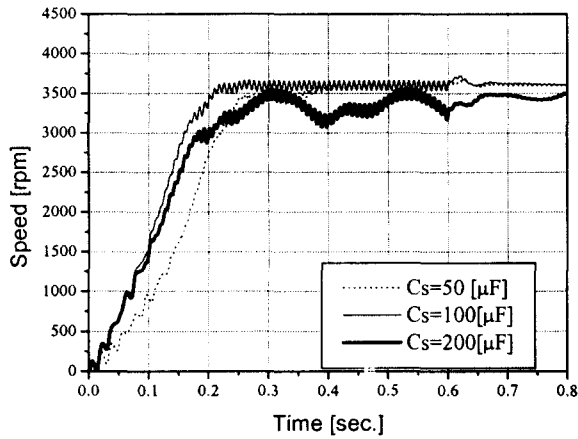


그림 18 기동 캐패시턴스에 따른 속도특성

Fig. 18 Speed characteristics according to starting capacitance

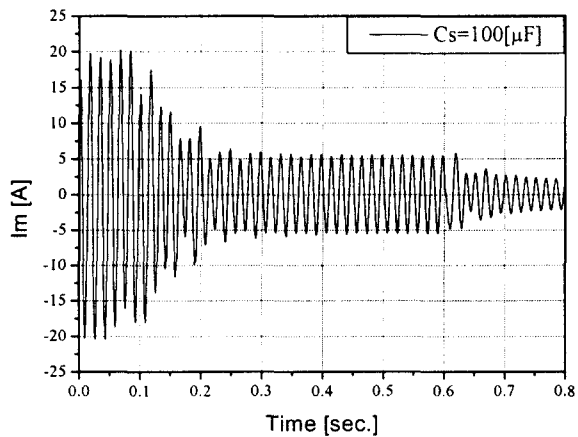


그림 19 주권선 전류특성

Fig. 19 Main winding current

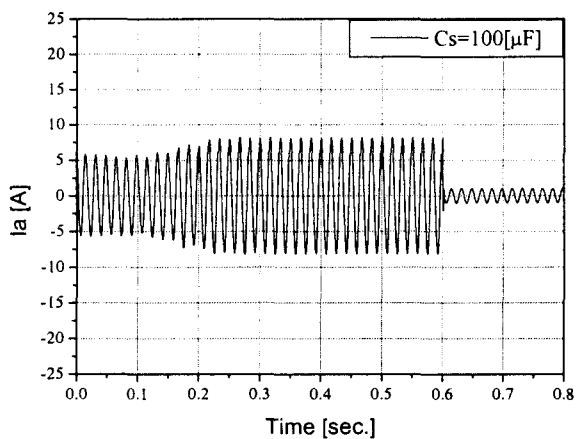


그림 20 보조권선 전류특성

Fig. 20 Aux. winding current

3. 결 론

본 논문에서는 단상 직립기동 영구자석 매입 동기전동기의 과도상태 해석을 수행하였다. 과도상태에서의 동특성 해석은 단상 유도전동기와 같은 불평형 자계를 해석하는 대칭좌표계 법과 고정자 및 회전자 전압에 대해 d-q축 이론으로부터 전압방정식을 유도하여 기계적 운동 방정식과의 결합으로 해석하였다.

매입형 영구자석 전동기의 전류 및 부하각에 따른 d-q축 인덕턴스 변화특성은 유한요소법을 이용하여 d-q축 인덕턴스를 산정하여 과도상태 해석에 적용하였다. 본 논문에서 제시한 과도상태 해석의 결과를 실험치와 비교한 결과 잘 일치하여 과도상태 해석의 타당성을 입증하였다. 또한 해석결과를 바탕으로 기동특성 향상을 위한 기동 캐패시턴스의 변화에 따른 토크 및 속도 추이를 검토하였다. 본 논문에서 제시한 해석방법을 토대로 하여 향후 직립기동 영구자석 동기전동기의 설계 및 최적화에 유용하게 적용되리라 사료되어진다.

참 고 문 헌

- [1] 강규홍, 하경호외 3인, “등가회로법과 수치해석의 결합에 의한 콘덴서 구동형 단상 유도 전동기의 회로정수 산정 및 특성해석”, 대한전기학회 논문지 vol. 49, no. 11, pp. 720-728, 2000. 11
- [2] Timothy J. E. Miller, “Single-Phase Permanent Magnet Motor Analysis”, IEEE Trans. on Industry Application, no. 4, pp. 651-658, 1985.
- [3] V. B. Honsinger, “Permanent Magnet Machines: Asynchronous Operation”, IEEE Trans. Power Apparatus, Syst., vol. 99, no. 4, pp. 1503-1509, 1980.
- [4] M. Azizur Rahman, Ping. Zhou, “Analysis of Brushless Permanent Magnet Synchronous Motors”, IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 43, no. 2, pp. 256-267, 1996.
- [5] M. Azizur Rahman, A. M. Osheiba, “Performance Analysis of Single-Phase Permanent Magnet Motors”, Electric Energy Conference, pp. 514-519, 1987
- [6] Chee-Mun Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink, Prentice Hall PTR, 1998.
- [7] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, J.W. Park “Improved parameters modeling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Finite Element Analysis”, IEEE Trans. on Magnetics, vol. 36, no. 4, pp. 1867-1870, July 2000.
- [8] T. A. Lipo, Introduction to AC Machine Design, Wisconsin Power Electronics Research Center, University of Wisconsin, 1966.
- [9] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINERY, IEEE Power Engineering Society, 1995.

저 자 소 개



강 규 홍 (姜圭洪)

1967년 11월 5일 생. 1992년 창원대 공대 전 기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1994년~1998년 LG전자(주) 주임연구원. 2001년 동 대학원 전기 공학과 졸업(공박). 현재 창원대 공대 BK

교수

Tel : 055-279-8044

E-mail : ipmsm@korea.com



홍 정 표 (洪正杓)

1959년 4월 17일 생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원.

1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수

Tel : 055-279-7517

E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr