

콘덴서 구동형 단상 유도형 동기전동기의 과도특성

강규홍 · 이선권 · 홍정표 · 김규탁
 창원대학교 전기공학과

Transient Characteristics of Capacitor Run Single-Phase Line-Start Synchronous Motors

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

Abstract - Line-start motor has ability to start itself without using other methods, so, it is important to predict starting performance accurately. In this paper, the starting characteristics of single-phase capacitor-start, capacitor-run line-start motor was calculated by combination of d-q axis voltage equations and mechanical dynamic equations. D-q axis inductances of this machine varied with current phase angle and amplitude are considered. The validity of analysis method verified by comparing to test results.

1. 서 론

유도 기동형 동기전동기는 회전자에 영구자석과 도체를 함께 구성하고 있어 slip이 발생하는 과도 상태에서는 전자유도 현상에 의한 유도전동기의 특성과 영구자석에 의한 토크 특성이 중첩되어 나타난다. 동기속도로 운전하는 정상상태에서는 유도전동기에 비해 고 효율화가 가능한 반면 과도상태에서는 영구자석에 의한 토크가 계동 토크(breaking torque)로 작용하여 기동특성이 저하하는 문제가 발생한다. 따라서, 유도 기동형 동기전동기의 기동 및 운전특성 향상을 위해서 과도상태에서의 정밀한 특성해석이 요구된다. [1,2]

본 논문에서는 단상 유도형 영구자석 매입 동기전동기의 과도 상태 해석을 유한요소법과 등가회로법을 결합하여 해석하였다. 단상 유도전동기는 3상 평형기와는 달리 주권선과 보조권선의 기차력 차에 의한 불평형 자계가 발생하므로 다상 평형기의 해석방법을 적용하기 곤란하다. 또한, 영구자석이 회전자 내부에 매입되어있는 매입형 구조로 d축과 q축의 자기저항 차에 의한 인덕턴스 차가 발생한다. 이러한 d-q축 인덕턴스는 전류의 크기 및 부하 각에 따라 급격한 변화가 발생하므로 과도상태에서의 특성해석 시 전류 변화에 따른 특성해석이 고려되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 영구자석 매입 구조의 단상 유도 동기기 과도특성 해석을 위해 불평형 회로 해석에 적용되고 있는 대칭좌표계법(symmetrical coordinate method)과 d-q축 이론으로부터 고정자와 회전자의 전압방정식을 유도하고, 이를 기계적인 운동방정식과 결합한 동특성 방정식으로부터 과도상태 해석을 하였다. 과도 상태에서의 전류 및 부하각의 변화에 따른 d-q축 인덕턴스의 변화는 유한요소 해석의 결과를 3차원 보간하여 과도 특성 해석에 적용하였으며 해석 결과를 실험치와 비교, 분석하여 해석의 타당성을 입증하였다.

2. 과도상태 해석 이론

해석대상의 단상 유도동기기의 회전자 구조와 고정자의 회로를 그림 1에 나타내었다. 회전자는 영구자석이 매입되어 있고, 유도기동 토크를 확보하기 위한 도체가 구성되어 있다. 고정자 권선은 주권선과 보조권선으로 분상되어 있고, 보조권선에는 기동토크 증대와 정상상태에서의 역률 향상을 위해 캐패시터가 삽입되어 있다.

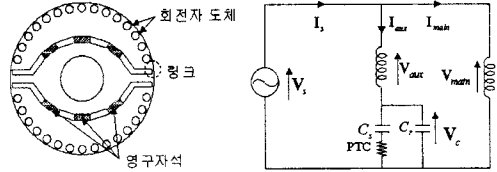


그림 1. 회전자 구조 및 고정자 회로도

단상 유도 동기기는 주권선과 보조권선이 공간적으로 90°의 위상차를 가지고, 보조권선의 캐패시터에 의해 시간적인 위상차가 발생하므로 2상 전동기로 생각할 수 있다. 즉 2상 전동기의 전압방정식을 d-q성분으로 분리할 수 있다. 2상 전동기의 상 성분과 d-q성분과의 관계는 그림 2와 같다. [1]

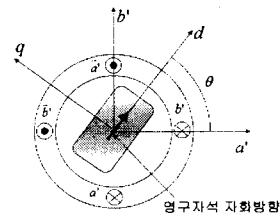


그림 2. 고정자 상과 d-q축과의 관계

이러한 벡터 관계로부터 고정자 상의 d-q 성분은 식 (1)과 같고 여기서 θ 는 2상으로 변환된 고정자 a'상의 기차력과 회전자의 d-축이 전기적으로 이루는 각이다.

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

식 (1)의 행렬로부터 2상 전동기 전압방정식을 다음과 같은 d-q 전압방정식의 형태로 변환하여 운동방정식과 결합하여 동특성 방정식을 구성하였다. [1,2]

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

$$0 = pL_{md}i_d + (R_2 + pL_{2d})i_{2d} \quad (3)$$

$$0 = pL_{mq}i_q + (R_2 + pL_{2q})i_{2q} \quad (4)$$

$$E_0 = \omega_r L_{md}i_{fm} \quad (4)$$

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 도체에 유도되는 d-q성분 전류이다. E_0 는 동기속도 운전시의 무부하 역기전력이고, i_{fm} 은 영구자석을 등가전류로 치환한 값으로 직류성분이다.

또한 전동기의 기계적인 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (5)$$

여기서, T_e 는 전자기적 발생토크, ω_m 은 회전자 기계적 회전 각속도, T_L 은 부하토크, J 는 회전자 관성모멘트, B 는 점성마찰계수이다.

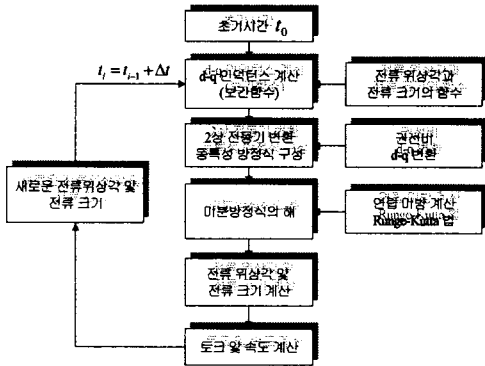


그림 3. 과도특성 해석을 위한 2상 전동기 변환

그림 3은 단상 유도동기기의 과도상태 해석과정을 나타낸다. 단상 유도동기기는 주권선과 보조권선의 권선수가 상이하므로 권선 배치각과 권선비가 고려된 2상 전동기로 변환하여 d-q축 전압을 계산하였다. 권선 배치각과 권선비에 대한 변환은 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \zeta \\ 0 & \sin \zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{aux} \\ v_{main} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} v_a' \\ v_b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

또한, 식 (1)의 d-q축 전압을 권선비와 권선 배치각을 고려하여 변환하면 각각 식 (7), 식 (8)과 같다.

$$v_d = v_s \left[(1 + \cos \zeta) \cos \theta + \frac{\sin \zeta}{\beta} \sin \theta \right] - v_c \cos \theta \quad (7)$$

$$v_q = v_s \left[-(1 + \cos \zeta) \sin \theta + \frac{\sin \zeta}{\beta} \cos \theta \right] + v_c \sin \theta \quad (8)$$

여기서, ζ 는 권선 배치각, β 는 권선비의 역수이다. 식 (7)과 식 (8)은 동특성 방정식인 미분방정식의 구동항이 된다. 동특성 방정식의 해에 의해 계산된 d-q축 전류를 권선비와 권선 배치각에 대하여 변환하면 주권선과 보조권선의 전류를 식 (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{aux} &= i_d \left[\cos \theta - \frac{\cot \zeta}{\beta} \sin \theta \right] - i_q \left[\sin \theta + \frac{\cot \zeta}{\beta} \cos \theta \right] \\ i_{main} &= \frac{\csc \zeta}{\beta} [i_d \sin \theta + i_q \cos \theta] \\ i_s &= i_{main} + i_{aux} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, i_{aux} 는 보조권선 전류, i_{main} 은 주권선 전류, i_s 는 선 전류로 주권선과 보조권선 전류의 순시 합이다.

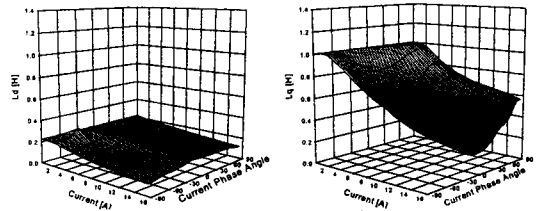
3. d-q축 인덕턴스 및 과도특성 해석

과도상태 해석을 위한 해석조건은 표 1과 같다.

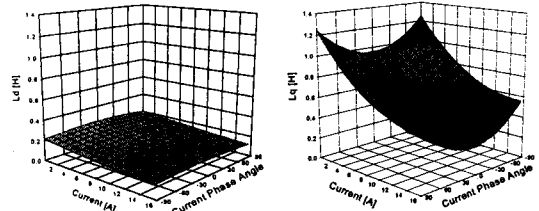
표 1. 해석조건 및 사양

항 목	수 치	항 목	수 치
인가전압 [V]	115	주파수 [Hz]	60
T_L [kg·cm]	3.37	J [kg·m ²]	0.001075
C_s [μ F]	100	C_r [μ F]	12

매입형 영구자석 전동기의 경우 회전자의 구조적으로 전류의 크기 및 전류 위상각에 따라 포화 정도가 급격히 변화한다. 단상 유도동기기는 기동시 전류의 크기 및 부하각이 급격히 변화하므로 등가회로에 의한 과도상태 해석시 운전 상태를 고려한 d-q축 인덕턴스가 적용되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 2차원 유한요소 해석으로부터 전류 크기 및 전류 위상각에 따른 d-q축 인덕턴스를 산정하고 이를 3차원 보간하여 과도상태 해석에 적용하였다. 3차원 보간에서는 상용 프로그램(Sigma Plot)을 이용하였으며 유한요소법에 의한 d-q축 인덕턴스 산정 결과와 보간함수에 의한 결과는 각각 그림 4 및 5와 같다.



(a) d축 인덕턴스 (b) q축 인덕턴스
그림 4. d-q축 인덕턴스 산정결과(FEM)



(a) d축 인덕턴스 (b) q축 인덕턴스
그림 5. d-q축 인덕턴스 보간 결과

부하토크가 3.37[kg·cm]인 경우 과도상태에서의 주권선 및 보조권선 전류 특성을 실험의 결과와 비교하여 그림 6에서 그림 9에 나타내었다. 기동 후 0.5[sec]까지 전류의 급격한 변화가 발생하고 0.5[sec] 이후 동기속도에 도달하여 전류의 급격한 변화 없이 안정된 값을 가진다. 기동 후 1.2[sec]에서 보조권선에 직렬로 연결된 PTC가 off되어 정상상태로 운전되며 해석 구간에서의 순시전류 특성이 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다. 단상 유도형 동기전동기의 순시 토크 특성은 그림 10, 속도특성은 그림 11에 나타내었다.

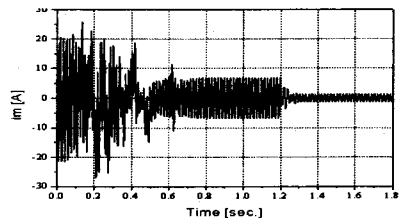


그림 6. 주권선 전류(해석치)

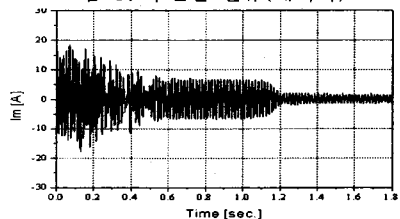


그림 7. 주권선 전류(실험치)

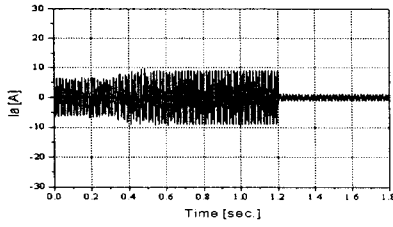


그림 8. 보조권선 전류(해석치)

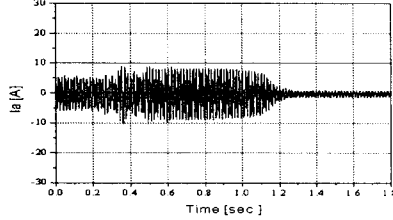


그림 9. 보조권선 전류(실험치)

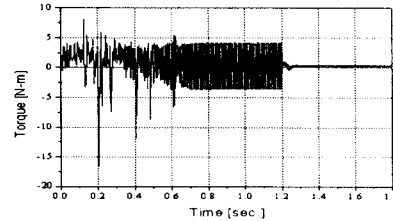


그림 10. 토크특성(해석치)

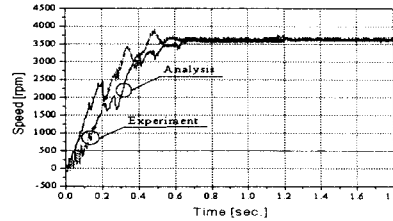


그림 11. 속도특성

위의 결과에서와 같이 기동시 전류의 형태가 가속구간, 동기화 이후 PTC 개방 이전과 이후의 세 구간으로 나누어진다. PTC 개방 이후 정상상태에서의 주권선 및 보조권선 전류 특성을 그림 12와 13에, 전압 및 선 전류 특성을 그림 14, 15에 해석 및 실험의 결과를 비교하여 나타내었다. 전류의 크기는 잘 일치하나 주권선 및 보조권선의 위상차가 실험치와 다소 차가 발생하였다. 즉, 주권선과 보조권선 전류 위상차의 차이로 인해 역률이 다소 차이가 발생하였으나 단상 유도형 동기전동기의 신뢰할 수 있는 해석 결과를 얻었다. 특성해석을 위한 입력 및 출력은 식 (10), (11)과 같고 160[W] 출력에서의 해석치와 실험치 특성비교를 표 2에, 부하 출력에 따른 효율 및 역률 특성은 그림 16에 나타내었다.

$$P_{in} = V_s I_s \cos \theta \quad (10)$$

$$P_o = \omega T \quad (11)$$

표 2. 정상상태 해석결과

	해석치	실험치
주권선 전류 [A]	1.37	1.29
보조권선 전류 [A]	0.76	0.76
선 전류 [A]	1.6	1.63
역률 [%]	95.4	98.4
효율 [%]	91.2	89.45
기계손 [w]	-	5

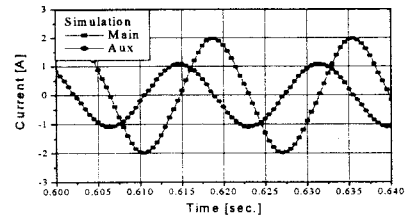


그림 12. 주권선 및 보조권선 전류-해석치

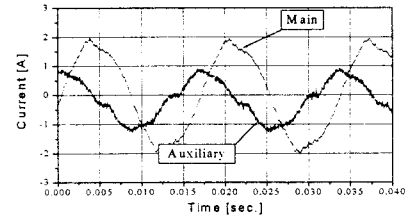


그림 13. 주권선 및 보조권선 전류-실험치

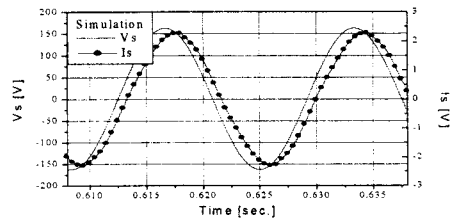


그림 14. 전압 및 선 전류-해석치

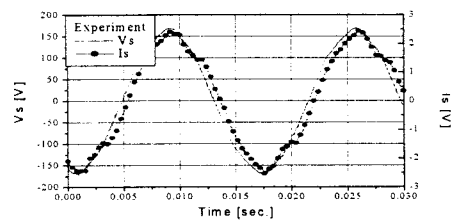


그림 15. 전압 및 전류-실험치

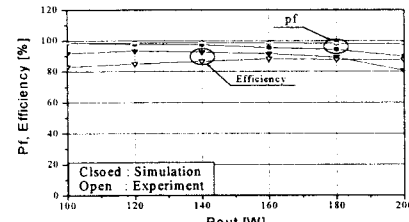


그림 16. 부하 출력에 따른 효율 및 역률 특성

4. 결 론

본 논문에서는 단상 유도형 동기기의 고정자와 회전자의 d-q축 전압방정식과 기계적 운동방정식을 결합하여 과도상태 해석을 수행하였다. 과도상태 해석 시 d-q축 인덕턴스의 변화를 전류 크기 및 위상각에 따라 산정한 후 이를 3차원 보간하여 해석에 적용하였다. 해석 결과를 실험 결과와 비교함으로써 해석 방법의 타당성을 검증하였다.

(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] 이선권, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "단상 영구자석형 유도동기기의 과도상태해석", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집, pp. 147-149, 2001