

단상 영구자석형 유도동기기의 특성해석

강규홍 · 이신권 · 홍정표 · 김규택
 창원대학교 전기공학과

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

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

Abstract - This paper deals with analysis method of single-phase line-start permanent magnet motors. Unbalanced magnetic fields produced by single-phase input make analysis difficult. To solve this unbalanced magnetic fields, this paper proposed symmetrical components transformations as well as d-q axis ones. Parameters in d-q voltage equations were calculated by Finite Element Analysis.

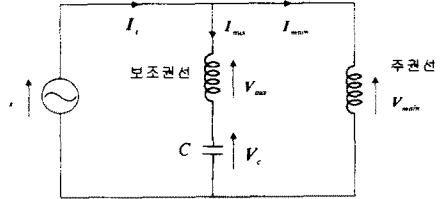


그림 1. 고정자 회로도

그림 1의 회로를 전압방정식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$V_s = V_{main} = V_{aux} + V_c = V_{aux} - jX_c I_{aux} \quad (1)$$

단상 불평형 자계해석을 위해 주권선과 보조권선을 권선수가 같은 2상 전동기로 변환하고, 이 2상 전동기의 파라미터로부터 대칭좌표성분을 분리하였다. 이러한 과정은 그림 2와 같다.

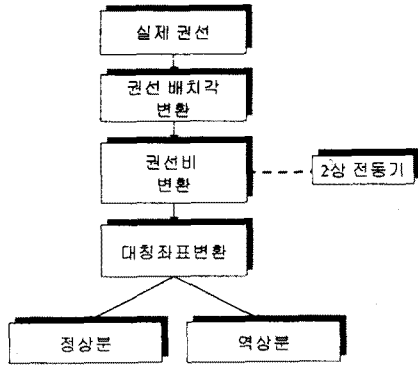


그림 2. 대칭좌표변환 과정

먼저 실제의 권선 배치각을 전기적으로 90° 위상차가 되도록 하고, 같은 권선수를 가지도록 변환하기 위한 행렬은 각각 식 (2), 식 (3)과 같다[1].

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \zeta \\ 0 & \sin \zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{aux} \\ v_{main} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v'_a \\ v'_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{a}$$

여기서 ζ 는 주권선과 보조권선간의 실제 권선 배치각이고, a 는 주권선과 보조권선 간의 권선비이다.

1. 서 론

단상 유도전동기는 구조가 간단하고 제작이 용이하며, 별도의 전력변환장치 없이 기동이 가능하므로 가전분야에서 널리 이용되고 있다. 그러나, 단상 불평형 자계에 의한 성능의 저하 및 2차 동손의 발생으로 효율이 떨어지는 단점이 있다. 이에 비해 단상 유도동기기는 영구자석을 사용하므로 출력 에너지 밀도가 높고, 정상상태에서 동기속도로 운전하여 2차측 동손이 발생하지 않기 때문에 단상 유도기에 비해 효율이 높다[1,2]. 또한, 구동회로 없이 기동 및 운전이 가능하여 비용 면에서도 경쟁력이 있다. 따라서, 현재 에너지 절약 및 saving 차원에서 전동기의 고효율화가 요구되고 있기 때문에, 이를 만족할 수 있는 단상 유도동기기의 설계 및 해석 기술의 확보가 요구되어지고 있다.

그러나, 단상 유도동기기는 단상 유도기와 같이 주권선과 보조권선의 기차력 차에 의한 불평형 자계가 발생하기 때문에 전동기의 성능이 저하되고, 역상분에 의한 슬립이 발생하여 2차측 도체에 전류가 유도되어 2차 동손이 발생할 수 있다. 이러한 불평형 자계 때문에 특성 해석 또한 평형기에 비해 매우 어렵다[1]. 따라서 고효율 및 고성능의 전동기를 설계하기 위해서는 이러한 불평형 자계의 정확한 해석을 통한 평형운전이 가능하도록 하는 설계가 필요하다.

본 논문에서는 d-q축 변환이론과 대칭좌표법을 결합하여 단상 유도동기기의 정상상태 특성을 해석하였다. 이때, 회로정수는 유한요소법을 이용하여 산정하였다. 단상 불평형 자계를 발생하는 전동기를 대칭좌표법을 이용하여 2개의 독립적인 평형전동기로 고려하여 특성을 해석하였다. 대칭좌표법에 의해 분리된 정상분은 동기속도로 회전하고, 역상분은 슬립 2로 역회전하는 성분이다. 정상분의 임피던스는 d-q축 전압방정식을 이용하여 반복법에 의해 계산하였고, 역상분은 d-q축 임피던스의 평균치로 고려하였다[1].

2. 정상상태 특성해석

2.1 대칭좌표법

단상 유도동기기의 고정자는 주권선과 보조권선으로 구성되어 있고, 보조권선에는 기동토크의 확보와 역률의 개선을 목적으로 캐패시터가 부착되어 있다. 이러한 고정자 결선을 회로도도 나타내면 그림 1과 같다.

식 (2), 식 (3)으로부터 변환된 전압 v_a' 와 v_b' 는 동일한 권선수를 가지고 공간적인 위상차가 90° 인 2상 전동기의 상 전압이 된다. 변환된 2상 전동기의 불평형 성분은 식 (4)의 대칭좌표변환으로부터 분리하여 단상 유도동기기의 정상상태 특성을 해석할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(V_a' + jV_b') \\ V_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(V_a' - jV_b') \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, V_b' 는 V_s 와 위상이 같기 때문에 입력 전압의 위상을 $V_s \angle 0^\circ$ 라 하면, 식 (4)의 대칭성분과 상 성분의 관계는 주권선 전압이 치환된 V_b' 를 실수 축으로 둔 그림 3과 같은 벡터도로 표현할 수 있다.

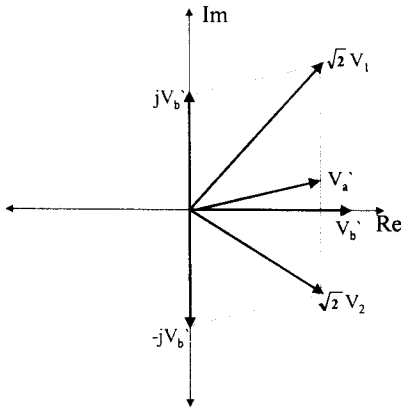


그림 3. 상 성분과 대칭성분의 관계

2.2 d-q축 전압방정식을 이용한 특성해석

2상 전동기 고정자 전압의 d-q 성분은 식 (5)과 같이 상 전압으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a' \\ v_b' \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 θ 는 2상으로 변환된 고정자 a' 상의 기자력과 회전자의 d-축이 전기적으로 이루는 각이다. 또한, 식 (5)는 자속 및 전류에 대해서도 성립한다. 다음으로, 2상 전동기의 상 전압은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} v_a' &= R_a' i_a' + \frac{d\lambda_a'}{dt} \\ v_b' &= R_b' i_b' + \frac{d\lambda_b'}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $R_a' = R_a$, $R_b' = R_m a^2$ 이고, λ_a' 와 λ_b' 는 각각 a' 상과 b' 상의 쇄교자속수이다.

본 논문의 해석 대상은 권선비를 이용하여 치환해도 주권선과 보조권선의 임피던스는 달라진다. 그러므로 일반적인 d-q축 변환이론을 적용하면, 이를 고려할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 이를 고려하기 위해, 식 (5)와 식 (6)을 연립하여 전압방정식을 유도하였다.

대칭좌표법을 이용하여 정상분 전압과 역상분 전압을 계산하기 위해서는 정상분과 역상분의 임피던스를 알아야 한다. 그러나 임피던스는 전압과 전류의 비이기 때문

에 대칭성분의 전압 값을 알아야 계산이 가능하다. 그러므로 미지수 2개(대칭성분 전압과 대칭성분 임피던스)가 발생하여 직접적인 계산이 불가능하다.

본 논문에서는 정상분의 전압을 계산하기 위해 정상분 전압의 초기치를 가정하여 d-q축 변환을 이용하여 정상분 임피던스를 계산하고, 이 임피던스를 이용하여 산정된 정상분 전압과 초기에 가정한 전압이 수렴할 때까지 계산하는 반복법을 이용하였다. 이러한 과정을 그림 4의 순서도에 나타내었다. 이 때, 정상분 전압, 전류 및 임피던스의 관계는 식 (7), 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} V_1 &= V_d + jV_q, & I_1 &= I_d + jI_q \\ Z_1 &= \frac{V_1}{I_1} \end{aligned} \quad (7) \quad (8)$$

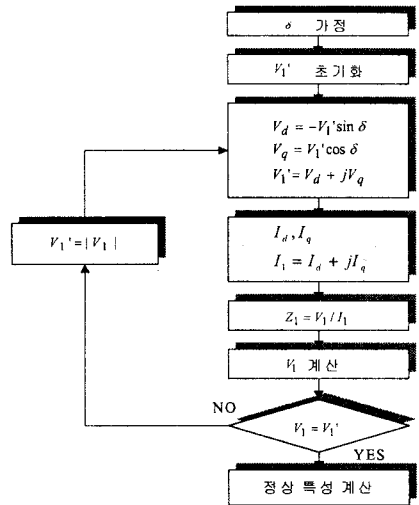


그림 4. 반복법에 의한 정상상태 해석의 순서도

반면에 역상분의 임피던스는 해석적으로 구하기 어렵기 때문에 d-q 성분 임피던스의 평균값으로 고려했다. 역상분의 자계가 발생하면 회전자에 도체에 기전력이 유도되고, 정상상태에서 슬립은 2가 된다. 이러한 슬립 2인 경우의 역상분의 임피던스의 d-q축 성분은 식 (9)로부터 계산할 수 있다. 또한, 역상분 임피던스의 평균치는 식 (10)과 같고, 역상분 임피던스가 구해지면 식 (11)과 같이 역상분 전류를 계산할 수 있다.

$$Z_d = \frac{(R_d/2 + jX_{rd})jX_{md}}{R_d/2 + j(X_{md} + X_{rd})} + (R + jX_s) \quad (9)$$

$$Z_q = \frac{(R_q/2 + jX_{rq})jX_{mq}}{R_q/2 + j(X_{mq} + X_{rd})} + (R + jX_s) \quad (10)$$

$$Z_2 = \frac{1}{2}(Z_d + Z_q) \quad (10)$$

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \quad (11)$$

여기서, 첨자 r 은 회전자측을, s 는 고정자측을, l 은 누설을 의미한다. 그리고, X_{md} 와 X_{mq} 는 각각 d-q축 자화 리액턴스이다.

이상과 같이 정상분과 역상분 전류가 구해지면 주권선과 보조권선의 전류는 식 (12), 식 (13)과 같이 대칭좌표변환의 역변환을 통해 구할 수 있다.

$$I_{aux} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[I_1 \left(1 + j \frac{\cot \zeta}{\beta} \right) + I_2 \left(1 - j \frac{\cot \zeta}{\beta} \right) \right] \quad (12)$$

$$I_{main} = -\frac{j}{\sqrt{2}\beta} \csc \zeta (I_1 - I_2) \quad (13)$$

$$I_s = I_{main} + I_{aux} \quad (14)$$

3. 해석결과

유한요소법을 이용하여 인덕턴스를 산정한 결과는 각 그림 5와 같다. 매입형 영구자석 기기의 경우, d-q 축의 인덕턴스의 차이가 발생하고, 전류의 크기와 위상에 따라 비선형 특성을 나타낸다. 따라서, 본 논문에서는 에너지 중첩법을 이용하여 정상상태 동작상태를 고려한 보조권선의 d-q축 인덕턴스를 전류 위상각 별로 산정하였다. 또한, 무부하 역기전력 해석 결과는 그림 6, 그림 7과 같다.

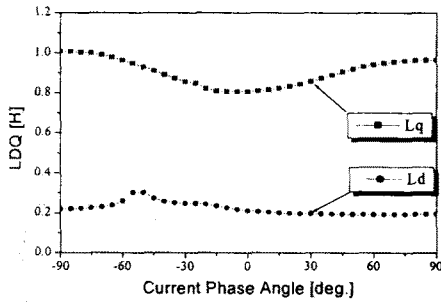


그림 5. 전류 위상각에 따른 인덕턴스 산정결과

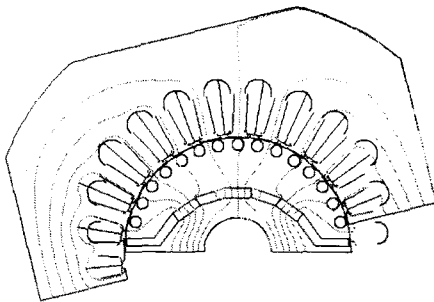


그림 6. 해석 모델의 등 포텐셜 분포

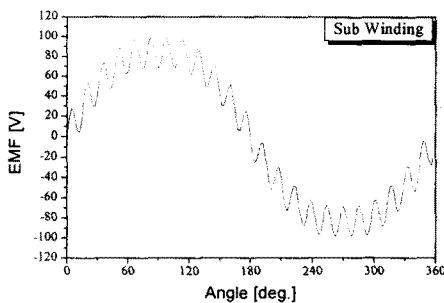


그림 7. 무부하 역기전력 산정결과(보조권선)

유한요소법에 의해 계산된 회로정수를 이용하여 단상 유도동기기의 정상특성을 해석하였다. 해석에 사용된 운전 전 캐패시턴스는 $12[\mu F]$ 이다. 전 부하에 대한 특성들 그림 8, 그림 9, 그림 10에 각각 나타내었다.

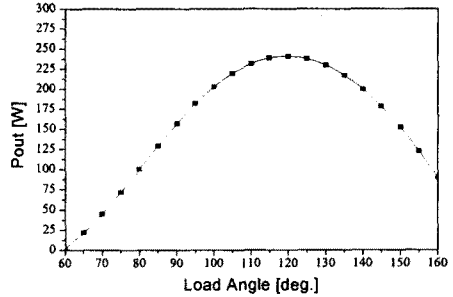


그림 8. 출력 특성

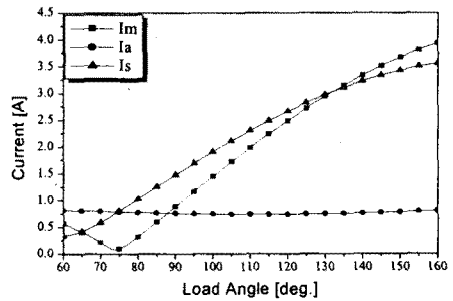


그림 9. 주권선 보조권 및 선 전류

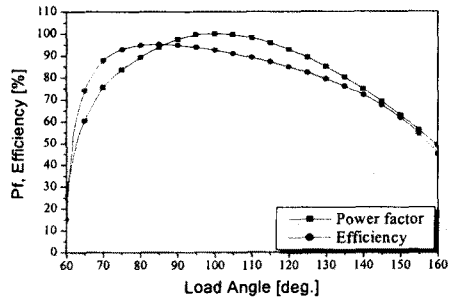


그림 10. 역률 및 효율 특성

4. 결 론

본 논문에서는 대칭좌표법과 d-q 전압방정식을 결합하여 단상 유도동기기의 특성 해석을 수행하였다. 주권선과 보조권선간의 권선 배치각과 권선비를 변환하여, 권선 배치각이 90° 이고, 동일한 권선수의 2상 전동기를 구성하여 대칭성분을 분리하여 해석하였다.

전압방정식에 의한 등가회로 해석은 파라미터 변화에 따른 전동기 특성 추이를 신속히 분석할 수 있기 때문에 설계 단계에서 유용하게 사용할 수 있고, 유한 요소법과 결합하여 정밀한 해석도 가능할 것으로 사료된다.

[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] I. Boldea, S. A. Nasar, "Unified Analysis of 1-Phase AC Motors Having Capacitors in Auxiliary Windings", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 14, no. 3, pp. 577-582, 1999.