

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

姜圭洪* · 南 赫** · 洪正杓***
(Gyu-Hong Kang · Hyuk Nam · Jung-Pyo Hong)

Abstract - This paper deals with steady-state analysis of a single-phase line-start permanent magnet synchronous motor. In order to analyze the steady-state characteristics, the asymmetric single-phase line-start synchronous motor is converted to the symmetric two-phase synchronous motor, that is, the asymmetric magnetic field is separated from the positive and the negative symmetric components using symmetrical-component theory. The analysis method of the synchronous motor on the d-q axis coordinates is used for the positive component and the equivalent circuit of the induction motor is applied for the negative component analysis. Moreover, d-q axis inductance considering current phase angle is applied to positive component analysis for precise characteristic analysis. In order to validate the proposed analysis method, the analysis results are compared with the experimental results.

Key Words : steady-state analysis, line-start permanent magnet synchronous motor, symmetrical-component theory, d-q axis inductance, current phase angle

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 영구자석형 유도동기기(Line-start Permanent Magnet Synchronous Motor, LSPM)는 영구자석을 사용하므로 출력 에너지 밀도가 높고, 정상상태에서 동기속도로 운전하므로 정상분의 2차측 동손을 완전히 제거할 수 있고 불평형 자계로 인하여 역상분에 의한 2차측 동손은 완전히 제거할 수 없지만 저감시킬 수는 있기 때문에 단상 유도기에 비해 효율이 높다.

또한, 구동회로 없이 기동 및 운전이 가능하여 비용 면에서도 우수한 경쟁력을 가진다. 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[1],[2].

단상 유도동기기는 단상 유도기와 같이 주권선과 보조권선의 기자력 차에 의한 불평형 자계가 발생하기 때문에 동기속도로 운전하는 정상상태에서도 정상분뿐만 아니라 슬립 2의 역상분이 존재하기 때문에 단상 유도기와 마찬가지로

불평형 자계를 대칭좌표를 이용하여 2개의 독립적인 평형전동기로 분리하여 특성해석을 수행하고 있다. 즉 불평형 자계가 발생하는 단상 유도동기기의 고효율 및 정밀설계를 수행하기 위해서는 불평형 자계의 정확한 해석을 통해 주권선과 보조권선의 기자력차와 위상을 콘텐서를 이용하여 평형운전이 가능하도록 하는 설계가 주를 이루고 있다[3]-[5].

해석방법에 있어 주권선과 보조권선의 회로정수들은 집중정수로 고려하거나 유한요소 해석으로부터 산정하여 등가회로 해석을 하고 있다 그러나, 영구자석이 회전자 내부에 매입된 매입형 영구자석 단상 유도동기전동기의 d축과 q축의 인덕턴스 차가 발생하고 이로 인해 릴럭턴스 토크가 발생하여 전자기적 토크에 중첩되므로 d-q축 회로정수의 정밀한 산정이 요구되어진다[6],[7].

따라서, 본 논문에서는 d-q축 변환이론과 대칭좌표 변환을 결합하여 매입형 영구자석 단상 유도동기기의 특성해석을 수행하였다. 대칭좌표 변환에 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. 매입형 영구자석 전동기의 경우 영구자석이 회전자 내부에 매입된 구조로 부하전류의 크기와 전류 위상각에 따라 철심 각 영역의 포화상태가 급격한 변화가 발생한다. 즉 부하 및 부하각 변화에 따라 d-q축 인덕턴스의 변화가 급격하게 발생한다. 따라서 유한요소법으로부터 부하전류의 크기 및 전류 위상각에 따른 인덕턴스를 산정한 후 특성해석에서 d-q축 전류에 따른 인덕턴스특성을 고려하여 적용하였으며 해석 결과를 실험치와 비교하여 해석의 타당성을 입증하였다.

* 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 BK 教授 · 工博
 ** 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 博士課程
 *** 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
 接受日字 : 2002年 7月 26日
 最終完了 : 2002年 12月 30日

2. 단상 영구자석형 유도동기기의 특성해석

단상 영구자석형 유도동기전동기의 구조를 그림 1에 나타내었다. 고정자는 주권선과 보조권선으로, 회전자는 기동토크 확보를 위한 도체바와 동기속도 운전시의 출력 토크를 발생하는 영구자석으로 구성되어 있다.

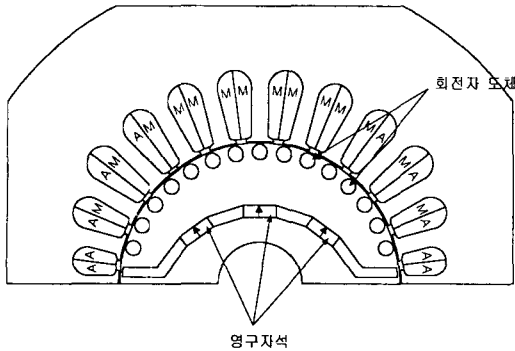
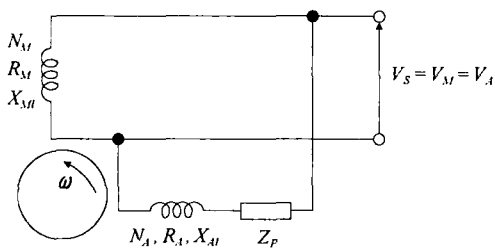


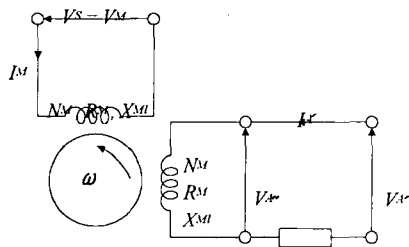
그림 1 단상 영구자석 유도동기기의 구조
Fig. 1 The structure of a single-phase LSPM

2.1 대칭좌표변환

그림 2는 그림 1의 해석 대상 전동기에 대한 고정자 권선의 회로도를 나타낸 것이다.



(a) 실제 전동기의 고정자 회로도



(b) 2상 전동기로 변환된 경우의 고정자

그림 2 2상 해석모델의 고정자 결선도
Fig. 2 Connections of the stator in the 2-phase analysis model

그림 2(a)와 같이 전동기의 주권선과 보조권선의 권선수가 각각 N_M, N_A 인 서로 다른 비대칭 2상 전동기이며, 이

것을 동일한 권선수와 임피던스를 가진 평형 2상 전동기로 변환하여 해석할 수 있다. 먼저, 그림 2(a)의 실제 전동기의 회로도를 그림 2(b)와 같이 주권선과 보조권선의 권선비로부터 보조권선을 주권선으로 치환하여 평형 2상 전동기로 변환하였다. 식 (1)~식 (3)은 실제 전동기를 독립전원의 평형 2상 전동기로 변환 시 인가전압, 전류 및 회로정수를 나타낸 것이며, k_{wM} 와 k_{wA} 는 주권선과 보조권선의 권선계수이다.

$$a = \frac{k_{wA}N_A}{k_{wM}N_M} \tag{1}$$

$$R_A' = \frac{R_A}{a^2}, \quad X_{A1}' = \frac{X_{A1}}{a^2}, \quad Z_p'' = \frac{Z_p}{a^2} \tag{2}$$

$$V_A' = \frac{V_A}{a}, \quad I_A' = aI_A \tag{3}$$

여기서, R_A, X_{A1} 은 보조권선의 권선 저항 및 누설리액턴스를 나타내며 Z_p 는 캐패시터의 임피던스 $1/j\omega C_r$ 을 나타낸다. 이때, ω 는 각속도, C_r 은 구동 캐패시터이다.

권선비를 이용하여 치환하여도 주권선과 보조권선의 권선 방식에 따른 엔드코일의 길이와 도체직경이 다를 경우 임피던스 불평형이 발생한다. 이를 보정하기 위해 외부 임피던스를 식 (4)와 같이 보상하였다.

$$Z_p' = \frac{Z_p}{a^2} + (R_A' - R_M) + j(X_{A1}' - X_{M1}) \tag{4}$$

여기서, $V_A = V_M = V_s$ 이고, V_s 는 인가전압이다.

그림 2. (b)의 보조권선을 변환한 부분의 회로방정식은 식 (5)와 같다.

$$V_A' = V_A'' + Z_p' I_A' \tag{5}$$

대칭좌표 변환은 단일한 불평형 시스템을 2개 이상의 독립적인 평형시스템으로 나누어 해석하는 방법으로서, 2상 불평형에서는 정상분과 역상분이 두 개의 평형 성분으로 나뉘어진다. 본 논문에서는 공통 인가 전원 V_s 를 두 개의 독립된 전원 V_A', V_M 으로 분리한다. 이때, 임피던스 평형을 위하여 V_A'' 과 V_M 의 불평형 2상 전압을 정상분과 역상분으로 대칭좌표 변환하여 나타낸다. 불평형 자계해석을 위한 2상 전동기의 대칭좌표변환은 식 (6), (7)과 같다 [4],[8].

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A'' \\ V_M \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} V_A'' \\ V_M \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

이를 벡터관계로 표현하면 그림 3과 같다. 식 (5)와 대칭좌표 변환을 연립하여 정리하면 대칭성분전압을 상전압으로 표현할 수 있다.

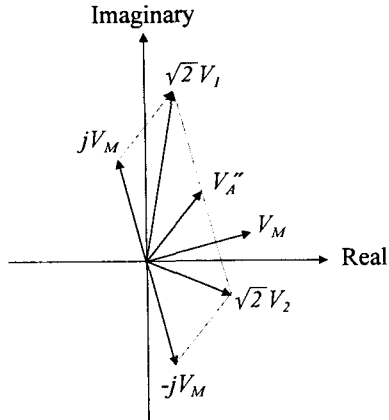


그림 3 대칭좌표이론의 벡터도
Fig. 3 Phasor diagram of symmetrical component theory

$$\begin{aligned} \frac{V_A}{a} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(V_1 + V_2) + Z_b' \frac{1}{\sqrt{2}}(I_1 + I_2) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(V_1 + V_2) + Z_b' \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{V_1}{Z_1} + \frac{V_2}{Z_2}\right) = \frac{V_M}{a} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)을 정리하면 다음과 같다.

$$\sqrt{2} \frac{V_A}{a} = a_1 V_1 + a_2 V_2 \quad (9)$$

여기서 $a_1 = 1 + Z_b' / Z_1$, $a_2 = 1 + Z_b' / Z_2$ 이며 Z_1, Z_2 는 각각 정상분과 역상분의 임피던스이다.

식 (9)를 대칭좌표변환행렬과 연립하여 정상분과 역상분에 대하여 정리하면 식(10), (11)과 같다.

$$V_1 = Z_1 I_1 = \frac{\sqrt{2} V_A}{a_1 + a_2} \left(\frac{1}{a} + j a_2 \right) \quad (10)$$

$$V_2 = Z_2 I_2 = \frac{\sqrt{2} V_A}{a_1 + a_2} \left(\frac{1}{a} - j a_1 \right) \quad (11)$$

정상분과 역상분의 전류로부터 주권선과 보조권선 전류에 대해 정리하면 식(12), (13)과 같고 선전류는 식(14)에 나타내었다.

$$I_M = \frac{1}{\sqrt{2}} j (-I_1 + I_2) \quad (12)$$

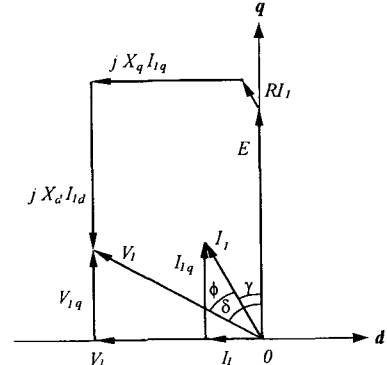
$$I_A = \frac{1}{\sqrt{2} a} (I_1 + I_2) \quad (13)$$

$$I_S = I_M + I_A \quad (14)$$

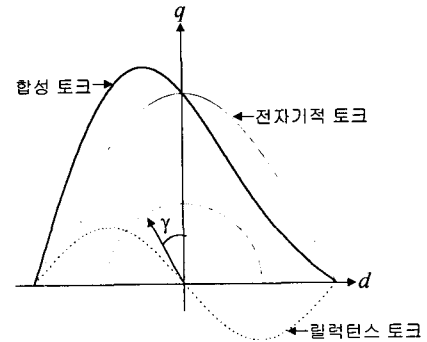
2.2 정상상태 특성해석

단상 유도형 동기전동기의 정상상태 특성해석은 대칭좌표 변환으로부터 정상분과 역상분으로 분리하여 해석하였다. 정상분 전압이 계산되면, 전류의 계산이 가능하고 전동기 특성해석을 할 수 있다. 이 때, 정상분 전압과 정상분의 임피

던스는 미지수가 되므로 반복계산이 요구된다. 따라서 이를 계산하기 위해 초기의 정상분 전압을 가정하고 2상 전동기를 d-q 분해하여 특성을 나타내는 관계식으로부터 전류를 계산하여 정상분 전압을 수렴할 때까지 반복계산 하였다. 동기좌표계로 표현한 매입형 영구자석 동기전동기의 d-q축 벡터도와 전류위상각에 따른 토크특성은 그림 4에 나타내었고, 특성을 나타내는 관계식은 다음과 같다 [7],[9].



(a) 동기전동기 벡터도



(b) 토크 특성

그림 4 매입형 영구자석 동기전동기의 벡터도 및 토크 특성
Fig. 4 Phasor diagram and torque characteristics of the interior-type PM synchronous motor

여기서, 전압과 q축이 이루는 각도 δ 은 부하각이며 전류와 q축이 이루는 각도 γ 는 전류위상각, ϕ 는 역률각이다.

벡터도로부터 정상분 전압의 d-q축 성분은 식 (15), (16)과 같다.

$$V_{1d} = -V_1 \sin \delta = -X_q I_{1q} + R I_{1d} \quad (15)$$

$$V_{1q} = V_1 \cos \delta = E + R I_{1q} + X_d I_{1d} \quad (16)$$

식 (15), (16)을 전류에 대해 정리하면 식 (17), (18)과 같다.

$$I_{1d} = \frac{X_q V_{1q} + R V_{1d} - X_q E}{R^2 + X_d X_q} \quad (17)$$

$$I_{1q} = \frac{R V_{1q} - X_d V_{1d} - R E}{R^2 + X_d X_q} \quad (18)$$

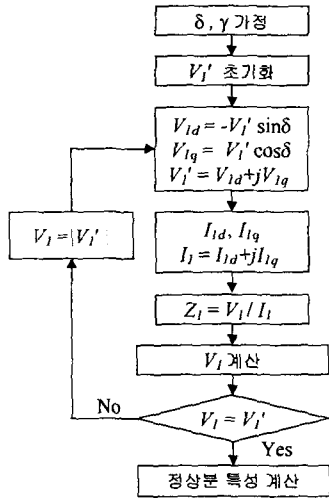


그림 5 정상상태 특성 해석 과정

Fig. 5 Analysis process on steady-state performance

대칭좌표 변환으로 정상분과 역상분의 전압을 분리하려면, 정상분과 역상분의 임피던스를 산정해야한다. 그러나, 정상분 임피던스는 정상상태 해석을 위한 d-q축과는 다른 기준축이므로 d-q축 임피던스를 직접 정상분 임피던스로 사용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 특정 부하각에서 정상분 전압을 동기좌표계상의 전압으로 가정한 후 동기전동기의 전압방정식으로부터 d-q축 전류와 정상분 임피던스를 산정하고 초기전압과 비교한 후 정상분 전압이 수렴할 때까지 반복 수행하였다. 이때 동기좌표계상의 d-q축 인덕턴스는 유한요소해석으로 산정하였고 부하각에 따른 정상상태 해석 과정을 그림 5에 나타내었다. 반면에 역상분의 자계는 회전자의 회전방향과 반대 방향으로 전동기의 자기적 상태가 순시적으로 달라지기 때문에 정밀한 벡터해석이 곤란하다

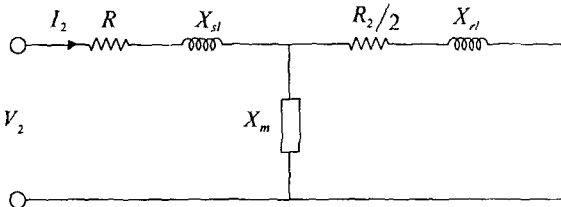


그림 6 역상분의 등가회로

Fig. 6: Equivalent circuit of negative-sequence

따라서 본 논문에서는 역상분의 임피던스는 d-q축 임피던스의 평균값으로 고려했다. 역상분의 자계가 발생하면 회전자의 도체에 기전력이 유기되고, 정상상태에서 슬립은 2가 된다. 이를 등가회로로 나타내면 그림 6과 같다[3],[6]. 그림 6의 등가회로 파라미터를 d-q 성분으로 분해하여 정리하면 식 (19), (20)과 같다.

$$Z_d = \frac{(R_d/2 + jX_{rd})jX_{md}}{R_d/2 + j(X_{md} + X_{rd})} + (R + jX_{sl}) \quad (19)$$

$$Z_q = \frac{(R_q/2 + jX_{rq})jX_{mq}}{R_q/2 + j(X_{mq} + X_{rq})} + (R + jX_{sl}) \quad (20)$$

여기서, 첨자 *r* 은 회전자측을, *s* 는 고정자측을, *l* 은 누설을 의미한다. 그리고, X_{md} 와 X_{mq} 는 d-q축 자화 리액턴스이다. 또한, R_d 와 R_q 는 보조권선에 환산한 2차측 저항값을 이용하였고, R 은 R_a' 와 R_b' 의 평균값을 이용하였다.

역상분 d-q 성분 임피던스의 평균값인 역상분 임피던스와 역상분 전류를 식 (20)과 (21)에 나타내었다.

$$Z_2 = \frac{1}{2} (Z_d + Z_q) \quad (20)$$

$$I_2 = V_2 / Z_2 \quad (21)$$

또한, 정·역상분 전류가 구해지면 주권선과 보조권선 전류는 식 (22)~(24)와 같이 대칭좌표변환의 역변환을 통해 구할 수 있다.

$$I_{aux} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[I_1 \left(1 + j \frac{\cot \zeta}{\beta} \right) + I_2 \left(1 - j \frac{\cot \zeta}{\beta} \right) \right] \quad (22)$$

$$I_{main} = -\frac{j}{\sqrt{2}\beta} \csc \zeta (I_1 - I_2) \quad (23)$$

$$I_s = I_{main} + I_{aux} \quad (24)$$

여기서 I_1 과 I_2 는 각각 정상분과 역상분의 대칭성분 전류이다. 즉, 정상분의 d-q 성분에 의해 계산된 임피던스를 이용하여 대칭성분 전압을 구하고, 이 대칭성분 전압과 임피던스에 의해 구해진 대칭성분의 전류 값을 대입하여 역변환에 의해 권선의 전류를 계산하였다.

단상 유도형 동기전동기의 정상분 및 역상분 출력과 이를 합성한 전기적 출력은 식(25)~(27)에 나타내었다.

$$P_1 = (\text{Re}(V_1 I_1^*) - RI_1^2) \quad (25)$$

$$P_2 = (\text{Re}(V_2 I_2^*) - RI_2^2) \quad (26)$$

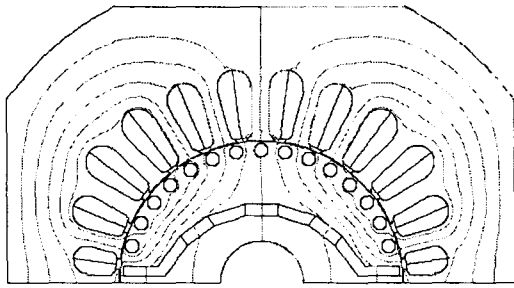
$$P_{out} = P_1 - P_2 \quad (27)$$

3. 유한요소법에 의한 회로정수 산정

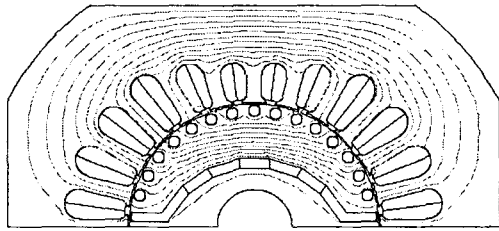
매입형 영구자석 전동기는 무부하 상태에서도 d-q축의 자기저항 차에 의해 회전자 위치에 따른 인덕턴스 차가 발생하며 부하전류가 인가되는 경우 철심 각 영역의 자기포화 상태가 달라져 인덕턴스의 변화가 발생한다. 이러한 특성은 동기전동기의 부하각이 변하는 경우에도 철심 비투자율의 변화와 인덕턴스의 변화를 유발하므로 본 논문에서는 부하각 변화에 따른 d-q축 인덕턴스 특성을 부하전류의 크기와 전류위상각의 변화로 고려하여 산정하였다.

영구자석 전동기의 경우 영구자석은 항상 여자되어 있는 상태이므로 d-q축 인덕턴스 산정시 영구자석에 의한 철심 포화현상을 고려하기 위해 특정 전류위상각에서 부하전류와 영구자석을 동시에 여자하여 철심 각 영역의 비투자율을 저장한 후 저장된 비투자율을 이용하여 d-q축 전류로부터 인덕턴스를 산정하는 에너지 중첩법을 적용하였다[7].

인덕턴스 산정을 위한 d축 및 q축 전류에 의한 등포텐셜 분포도를 그림 7에 나타내었다.



(a) d-축 전류에 의한 등 포텐셜 분포



(b) q-축 전류에 의한 등 포텐셜 분포

그림 7 d-q축 전류에 등 포텐셜 분포

Fig. 7 Equi-potential distributions by the d- and q-axis currents

전류위상각이 0° 인 경우는 고정자 권선에 의한 기자력이 q축과 동일하게 인가되고 있음을 나타내며 전류위상각이 90° 인 경우는 고정자 권선에 의한 기자력이 d축과 일치할 때를, 또한, 90(deg.)인 경우는 -d축과 고정자 권선에 의한 기자력이 일치할 때를 나타낸다. 따라서, 무부하 상태에서는 권선의 전류가 작으므로 q축의 포화는 거의 발생하지 않으므로 어떤 전류위상각에서도 q축 인덕턴스는 거의 변함없었다. 그런데, 부하의 증가와 함께 주권선의 전류가 증가하면 q축의 자기회로가 전류위상각이 ±90° 부근에서는 이미 영구자석에 의한 포화로 거의 변화가 없지만 전류위상각이 0° 인 경우에는 전류의 증가에 직접적인 영향을 받으므로 다른 전류위상각에 비해 특히 심한 포화 현상이 일어나게 되어 q축 인덕턴스는 급격한 변화를 발생하게 된다. 반면, d축 인덕턴스는 d축의 자기회로가 매입된 영구자석 영역으로 인하여 자기저항이 매우 크므로 전류의 크기에 거의 영향을 받지 않으므로 거의 일정한 양상을 나타내게 된다. 주권선 전류가 4(A) 이상이 되는 경우 q축 자속 경로의 포화에 의해 q축 인덕턴스는 급격히 감소하여 d축과 q축의 인덕턴스 차이가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 즉 부하전류가 1(A) 이상에서는 토크턴스 토크에 의한 출력은 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서 부하전류 및 전류위상각에 따른 비선형적 d-q축 인덕턴스를 고려한 특성해석이 반드시 필요함을 알 수 있다.

그림 9는 보조권선의 무부하 역기전력 특성을 유한요소 해석의 결과와 실험치를 비교하여 나타내었다. 보조권선의 무부하 역기전력은 58[V]로 특성해석시 유한요소 해석의 결과를 도입하여 해석하였다.

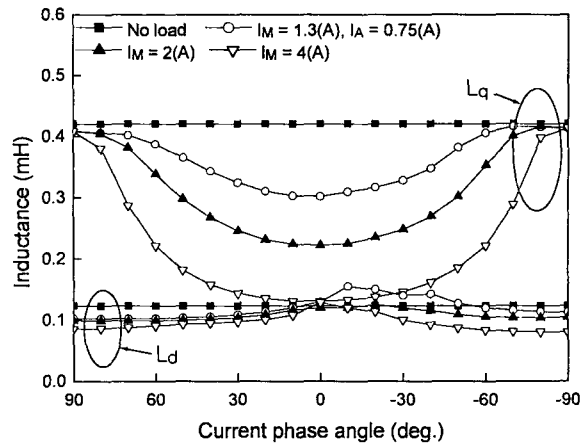


그림 8 전류위상각에 따른 인덕턴스 프로파일

Fig. 8 Inductance profiles according to current phase angle

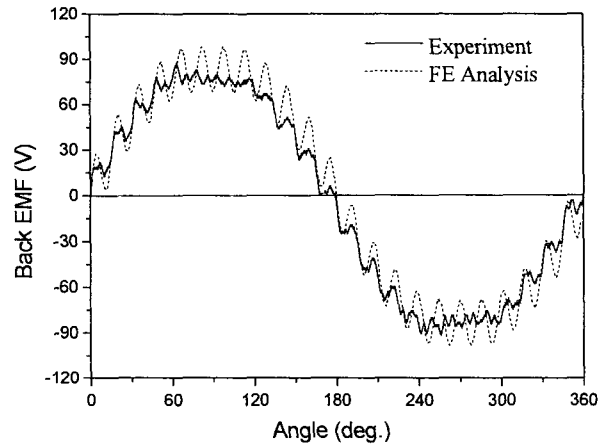


그림 9 무부하 시 보조권선에서의 역기전력

Fig. 9 Back EMF of the auxiliary winding at no load

4. 정상상태 특성해석 결과

해석대상인 단상 유도형 동기전동기의 정상상태 특성해석을 위한 입력 조건은 표 1과 같다. 무부하 역기전력의 실험치는 2차원 유한요소법의 결과를 적용하였고, 입력 전압 및 전류, 역기전력은 모두 정현파라고 가정하였다. d-q축 인덕턴스는 주권선 전류가 1.3(A), 보조권선 전류가 0.75(A) 인 가된 상태에서 전류 위상각 0°의 값을 초기값으로 적용하여 해석을 반복 수행하였다.

동기회로의 회로정수인 d-q축 인덕턴스는 전류 위상각과 부하전류의 크기에 따라 철심 각 영역의 포화정도가 달라져 회전자와 고정자 극의 상대위치와 고정자 전류의 크기에 따른 비선형 인덕턴스 특성을 가진다. 이러한 전류 위상각과 크기에 따른 비선형 인덕턴스 특성을 그림 8에 나타내었다. 따라서 정상상태 특성해석 시 전류 위상각과 전류 크기에 따른 d-q축 인덕턴스의 변화를 고려해서 특성해석을 해야 한다.

표 1 해석모델에 대한 제원

Table 1 Specifications of the analysis model

항목	단위	수치
전압	(V)	115
d축 인덕턴스의 초기값	(mH)	107
q축 인덕턴스의 초기값	(mH)	370
역기전력	(Vrms)	58
극수		2
주파수	(Hz)	60
운전 캐패시턴스 Cr	(μ F)	12
동기속도	(rpm)	3600

본 논문에서는 정상상태 해석시 전류크기의 변화는 없다고 가정하고 전류 위상각에 따른 비선형 인덕턴스 특성을 그림 10과 같이 반복법으로 고려하였다

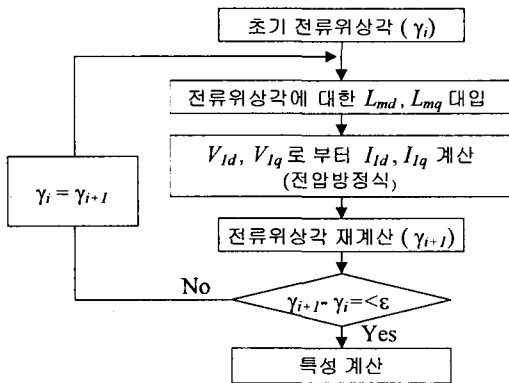


그림 10 전류위상각에 따른 비선형 인덕턴스 특성을 고려한 해석 방법

Fig. 10 Analysis method considering non-linear inductance characteristic with current phase angle

본 논문에서 제시한 해석 방법을 이용하여 정상상태 해석 결과를 부하각에 따른 전류특성을 그림 11에 나타내었다. 보조권선의 전류는 큰 변화가 없는 반면 주권선 전류는 부하각에 따라 큰 변화를 발생한다. 따라서 단상 유도형 동기전동기의 토크특성은 주권선 전류에 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

부하각에 따른 토크 및 전류위상각 특성을 그림 12에 나타내었다. 부하각 82° 에서 발생 토크는 4.35(kgfc)로 본 논문에서 적용한 해석 모델의 정격 부하토크가 발생한다.

매입형 영구자석 전동기의 경우 전자기적 토크 T_{mag} 는 역기전력 E 와 q축 전류 I_q 의 곱으로, 릴럭턴스 토크 T_{rel} 는 d-q축 인덕턴스차와 d축 및 q축 전류 I_d, I_q 와의 곱으로 표현되며 식 (28), (29)와 같다.

$$T_{mag} = E I_q \cos \gamma \quad (28)$$

$$T_{rel} = \omega(L_d - L_q) I_d I_q \quad (29)$$

$$= I_1^2 \frac{\omega}{2} (L_q - L_d) \sin 2\gamma$$

따라서, 그림 4(b)에서와 같이 릴럭턴스 토크는 전자기적 토크의 2배의 주기를 가지게 되고, 전자기적 토크의 경우 전

류위상각 0° 에서 단위 전류당 최대토크가 발생하며 릴럭턴스 토크는 전류 위상각 45° 에서 최대토크를 발생한다. 그리고, 전자기적 토크와 릴럭턴스 토크가 중첩된 발생토크는 전류 위상각이 0° 에서 45° 사이에서 최대토크가 발생한다. 따라서 본 논문에서의 해석모델은 정격부하에서 부하각은 82°, 전류 위상각은 38° 로 단위 전류당 최대토크가 발생하고 효율은 93.6(%)로 최대가 됨을 알 수 있다.

부하각에 따른 효율 및 역률 특성을 그림 13에 나타내었다. 정격부하에서 효율 및 역률이 최대가 되고 정격부하에서 운전 캐패시턴스에 의해 역률이 매우 높으며 d-q축 인덕턴스와의 조합으로 정격부하에서 단위 전류당 최대토크를 확보함을 알 수 있다.

본 논문에서 제시한 해석방법의 결과를 실험치와 비교하여 해석의 타당성을 입증하였다. 실험을 위한 단상 유도형 영구자석 동기전동기의 시작기를 그림 14에, 정격부하에서의 실험결과를 해석결과와 비교하여 표 2에 나타내었다. 보조 권선 전류와 역률 특성은 해석치와 실험치가 잘 일치하는 반면 주권선 전류와 입력은 약간의 오차가 발생하였다.

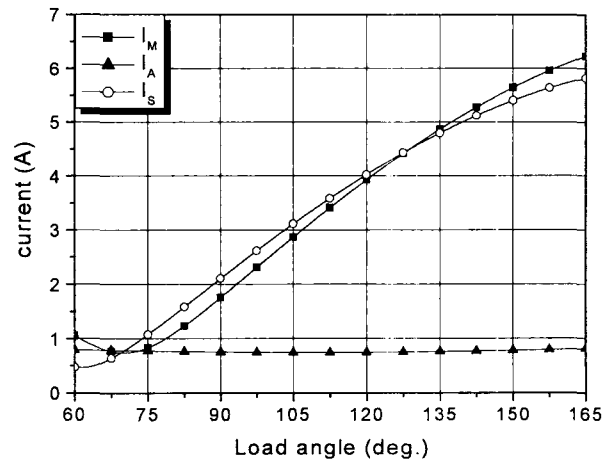


그림 11 부하각에 따른 전류 특성

Fig. 11 Current characteristic according to the load angle

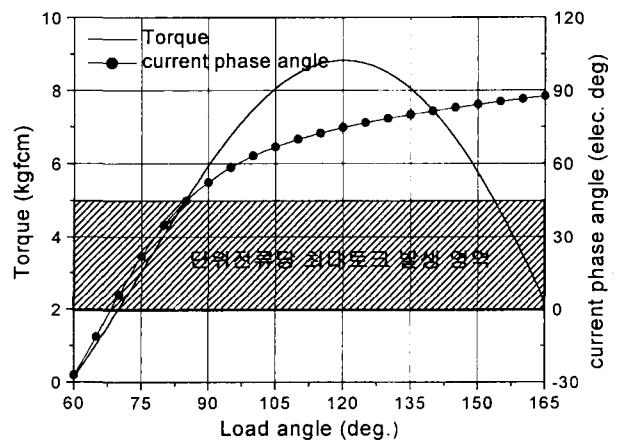


그림 12 부하각에 따른 전류위상각 및 토크 특성

Fig. 12 Current phase angle and torque characteristics according to the load angle

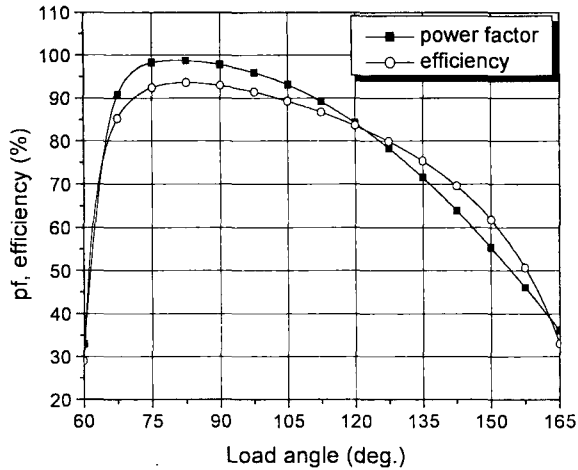


그림 13 부하각에 따른 효율 및 역률 특성
 Fig. 13 Efficiency and power factor characteristics according to the load angle

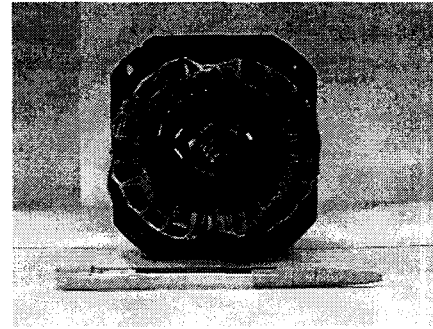
부하토크의 증가에 따른 전류 특성의 실험 결과는 그림 15에, 효율 및 역률 특성은 그림 16에 해석치와 비교하여 나타나 있다. 부하토크의 증가에 따른 실험 및 해석의 결과에서도 정격부하의 결과와 유사하게 주권선 전류 및 효율의 결과는 약간의 오차를 가지지만 전류의 증가 추이나 최대 효율이 발생하는 부하토크 영역이 실험의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 d-q축 회로정수 산정과 특성 해석방법은 실험의 결과로부터 타당성을 입증하였다.

여기서, 실험치는 고정자 및 회전자 동손 뿐만 아니라, 철손, 표류부하손이 포함되어 있으나 해석치에서는 고정자 및 회전자측의 동손만을 고려하였으므로, 실험치와 해석치의 효율 및 전류의 오차가 발생한 것으로 분석된다. 따라서, 입력 및 효율의 정밀한 특성해석을 위해서는 고정자 및 회전자 철심에서의 철손을 등가회로를 이용한 전동기 특성해석에 반영해야 하며 이는 다음과제로 삼는다.

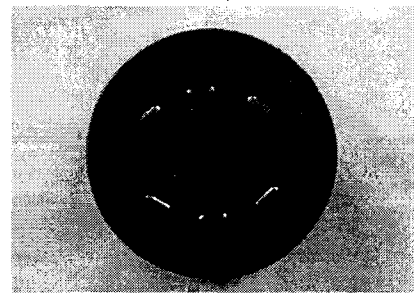
5. 결론

본 논문에서는 대칭좌표 변환과 d-q 전압방정식을 결합하여 단상 유도형 동기전동기의 특성 해석을 수행하였다. 비대칭 단상 유도형 동기전동기를 2상 평형 전동기로 구성하여 대칭성분을 분리하고 정상분은 d-q축상에서의 동기전동기로 해석하였으며 역상분은 슬립 2의 유도전동기 등가회로를 이용하여 특성해석을 수행하였다.

· 매입형 영구자석의 전동기의 회전자 특성으로부터 발생하는 d-q축 인덕턴스의 변화는 유한요소법을 이용하여 전류 위상각에 따른 인덕턴스를 산정하여 정상분 특성해석에 적용하였으며 해석의 결과를 실험치와 비교하였다. 해석 결과는 실험치와 부하에 따른 특성 추이가 잘 일치하며 해석 대상의 전동기가 정격부하에서 최대 효율을 발생함을 알 수 있다. 향후 철손을 고려한 특성해석으로부터 해석 정도를 향상시키며 효율 증가를 위한 구조 설계 시 단위 전류당 최대토크가 발생하는 전류위상각에서 운전되도록 파라미터간의 상호관계를 검토할 것이다.



(a) 고정자



(b) 회전자

그림 14 해석모델의 시작기

Fig. 14 Prototype of analysis model

표 2 정격상태에서의 특성해석결과

Table 2 Analysis results at the steady-state

항 목	해석치	실험치
부하출력 [W]	160	160
주권선 전류 [A]	1.17	1.29
보조권선 전류 [A]	0.76	0.76
선 전류 [A]	1.52	1.66
입력 [W]	172	182.58
역률 [%]	98.72	98.65
효율 [%]	93.58	87.6

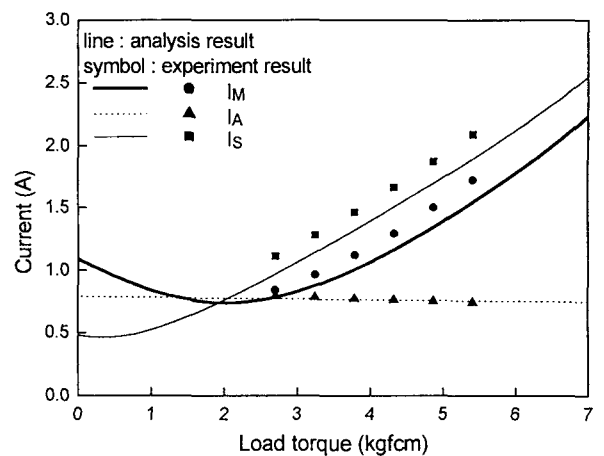


그림 15 부하에 따른 전류 특성 비교

Fig. 15 Comparison of the currents according to the load

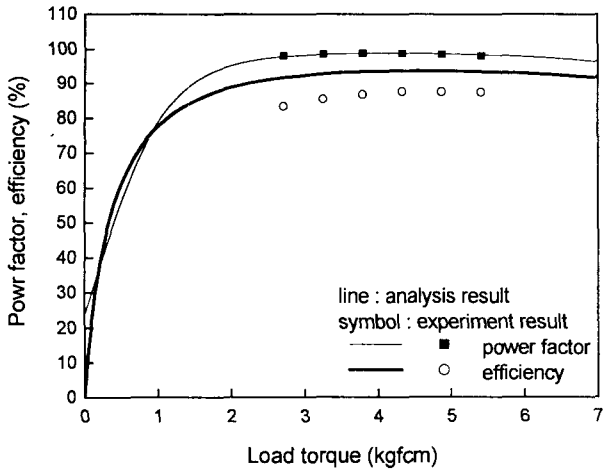


그림 15 부하에 따른 효율 및 역률 특성 비교

Fig. 15 Comparison of efficiency and power factor according to the load

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 강규홍, 홍정표, "단상 직립기동 영구자석 동기전동기의 기동특성 해석", 대한전기학회 논문지 vol. 50, no. 12, pp. 592-600, 2001. 12
- [3] Timothy J. E. Miller, "Single-Phase Permanent Magnet Motor Analysis", IEEE Trans. Industry Application, no. 4, pp. 651-658, 1985.
- [4] T. A. Lipo, Introduction to AC Machine Design, Wisconsin Power Electronics Research Center, University of Wisconsin, 1966.
- [5] 강규홍, 홍정표의 3인, "등가회로법과 수치해석의 결합에 의한 콘덴서 구동형 단상 유도전동기의 회로정수 산정 및 특성해석", 대한전기학회 논문지 vol. 49, no. 11, pp. 720-728, 2000. 11
- [6] M. Azizur Rahman, A. M. Osheiba, "Performance Analysis of Single-Phase Permanent Magnet Motors", Electric Energy Conference, pp. 514-519, 1987
- [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] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINERY, IEEE Power Engineering Society, 1995.
- [9] M. Azizur Rahman, Ping. Zhou, "Analysis of brushless Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 43, no. 2, pp. 256-267, 1996.

저자 소개



강규홍 (姜圭洪)

1967년 11월 5일생. 1992년 창원대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~1998년 LG전자(주) 주임연구원. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 창원대 전기공학과 BK 교수

Tel : 055-279-8044, Fax : 055-263-9956
E-mail : ipmsm@korea.com



남혁 (南赫)

1972년 5월 24일생. 1999년 창원대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(석사). 2001년~현재 동 대학원 박사과정

Tel : 055-262-5966, Fax : 055-263-9956
E-mail : haeggee@bcline.com



홍정표 (洪正杓)

1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원. 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 부교수

Tel : 055-279-7517, Fax : 055-263-9956
E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr