2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

단상 유도형 동기전동기의 동특성 해석

김 솔*, 장기봉*, 김병복*, 이 주*, 고권민**, 김태덕**, 오상경**
* 한양대 전기공학과, ** 삼성전자

Characteristic Analysis of Single Phase Line Start Synchrous Motor

Sol Kim*, Ki-Bong Jang*, Byung-Bok Kim*, Ju Lee*, Kwon-Min Ko*, Tea-Duk Kim*, Sang-Kyeong Oh*
* Hanyang Univ. ** Samsung Electric Ltd.

Abstract - SPLSSM may operate with very high efficiencies and near unity power factor. SPLSSM has been shown to be capable of desirable steady state performance, but is known to have undesirable staring performance because starting asynchronously by means of an induction cage, it operates in steady state performance of a PM motor. This combination provides the steady state performance of a permanent magnet motor without the need for an expensive drive system. However, that combination makes it difficult to analyze the transient behaviors. This paper investigates the behaviors of Single-Phase Line-Start Synchronous Motor using finite element method combined analytic method. It is shown that finite element modeling is capable of giving accurate prediction of performances. Varying the value of capacitance and material of permanent magnet shows the effect on the dynamic characteristics in this paper.

1. 서 론

가전분야에서는 전동기의 효율이 제품의 선택에 중요한 요소로 작용한다. 따라서 제품을 생산하는 업체에서는 전동기의 효율을 높이기 위해 코어의 적층두께를 줄이거나 철손이 적은 재질을 사용하는 등 많은 노력을 기울이고 있다. 단상 유도형 동기기는 가전제품에서 요구되는 고효율 운전이 가능하고, 값비싼 구동회로를 필요로 하지 않는 점에서 가전제품에 적용하기에 적합한 전동기이다. 그러나 기동시에는 농형전동기의 특성을 가지고 정상상태에서는 동기기의 특성을 가지며, 과도상태에서는 유도기의 특성과 동기기의 특성이 뒤섞여 나타나게 되어 동특성의 해석에 어려움이 있다. 1980년대 중반이후, Miller를 비롯한 여러학자들에 의해 등가회로법에 의한 동특성해석이 진행되어 왔다. 본 논문에서는 단상 유도형 동기기의 동특성을 유한요소법과 등가회로법을 이용하여 해석하였다. 즉, d-q축 인덕턴스, 누설인덕턴스, 저항등의 회로정수를 유한요소법을 이용하여 계산한후 이를 이용하여 전압방정식을 구성하고 이를 운동방정식과 결합하여 동특성을 해석하였다. 동특성 해석을 통해 단상 유도형 동기기의 설계시 중요한 요소인 영구자석의 크기가 효율에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, 동기기의 기동에 필수적인 콘덴서의 영향을 함께 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델.

그림1은 2극 구조의 단상 유도형 동기기의 해석모델을 표시한 것이다. 영구자석은 Radial 방향으로 착자되었으며, 회전자 내부에 매립되어있다. 특성해석에 이용된 모델의 사양은 표1에 나타나있다.

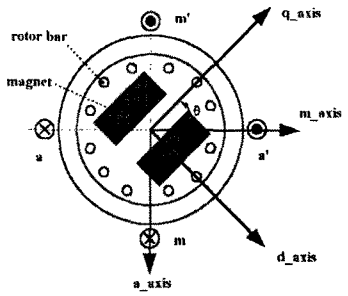

그림1. 단상 유도형 동기기의 모델

표1. SPLSSM의 기본사양

	Ferrite	NdFeB
Outer diameter of Stator [mm]	106.0	106.0
Outer diameter of Rotor [mm]	60.4	60.4
Stack height [mm]	50.0	50.0
Turns of Main Winding	297	297
Turns of Sub Winding	191	191
Residual Induction of PM [T]	0.4	1.2
Size of PM [mm2]	289.5	52.2

2.2 특성해석에 사용된 전압방정식

영구자석을 포함한 단상 유도형 전동기의 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}^s \\ -- \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{R}^s + p\mathbf{L}^{ss} & p\mathbf{L}^{sr} \\ \hline p\mathbf{L}^{rs} & \mathbf{R}^r + p\mathbf{L}^{rr} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \mathbf{i}^s_{sm} \\ -- \\ \mathbf{i}^r_{dq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p\boldsymbol{\Phi}^r \\ -- \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

여기서, $p = \frac{d}{dt}$, $\mathbf{v}^s = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{ms} \end{bmatrix}$, $\mathbf{i}^s_{sm} = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{ms} \end{bmatrix}$, $\mathbf{i}^r_{dq} = \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$,

$\boldsymbol{\Phi}^r = \begin{bmatrix} \Phi^r_a \cos\theta \\ \Phi^r_m \sin\theta \end{bmatrix}$, $\mathbf{R}^s = \begin{bmatrix} R_{as} & 0 \\ 0 & R_{ms} \end{bmatrix}$, $\mathbf{R}^r = \begin{bmatrix} R_{dr} & 0 \\ 0 & R_{qr} \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{L}^{ss} = \begin{bmatrix} L^{ss}_{las} + L^{ss}_{aao} - L^{ss}_{am}\cos 2\theta & -L^{ss}_{am}\sin 2\theta \\ -L^{ss}_{am}\sin 2\theta & L^{ss}_{lms} + L^{ss}_{mmo} - L^{ss}_{am}\cos 2\theta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L}^{sr} = \begin{bmatrix} L^{sr}_{ad}\cos\theta & -L^{sr}_{aq}\sin\theta \\ L^{sr}_{md}\sin\theta & L^{sr}_{mq}\cos\theta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}^{rs} = \begin{bmatrix} L^{sr}_{ad}\cos\theta & L^{sr}_{md}\sin\theta \\ -L^{sr}_{aq}\sin\theta & L^{sr}_{mq}\cos\theta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L}^{rr} = \begin{bmatrix} L^{rr}_{ldr} + L^{rr}_{dor} - L^{rr}_{dp} & 0 \\ 0 & L^{rr}_{lqr} + L^{rr}_{qor} + L^{rr}_{qp} \end{bmatrix}.$$

식(1)의 회전자 전압방정식을 a-m축으로 변환하면,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}^s \\ -- \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^s + p\mathbf{L}^{ss} & | & p\mathbf{L}^{sr}\mathbf{S}_{dq} \\ ------- & | & ---------- \\ \mathbf{S}_{dq}^{-1}p\mathbf{L}^{rs} & | & \mathbf{R}^r + \mathbf{S}_{dq}^{-1}p\mathbf{L}^{rr}\mathbf{S}_{dq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{sm}^s \\ -- \\ \mathbf{i}_{sm}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p\Phi^s \\ -- \\ p\Phi^r \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$p\mathbf{L}^{sr}\mathbf{S}_{dq} = p\begin{bmatrix} L_{aao}^{sr} - L_{aa}^{sr}\cos 2\theta & -L_{am}^{sr}\sin 2\theta \\ -L_{ma}^{sr}\sin 2\theta & L_{mmo}^{sr} + L_{mm}^{sr}\cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{S}_{dq}^{-1}p\mathbf{L}^{rs} = \begin{bmatrix} pL_{aa}^{rs} & pL_{am}^{rs} \\ pL_{ma}^{rs} & pL_{mm}^{rs} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$pL_{aa}^{rs} = p(L_{aao}^{sr} - L_{aa}^{sr}\cos 2\theta) + \omega_m L_{am}^{sr}\sin 2\theta,$$

$$pL_{am}^{rs} = \omega_m(L_{amo}^{sr} + L_{am}^{sr}\cos 2\theta) - p(L_{am}^{sr}\sin 2\theta),$$

$$pL_{ma}^{rs} = -\omega_m(L_{amo}^{sr} - L_{am}^{sr}\cos 2\theta) - p(L_{am}^{sr}\sin 2\theta) \quad \text{and}$$

$$pL_{mm}^{rs} = p(L_{mmo}^{sr} - L_{mm}^{sr}\cos 2\theta) - \omega_m L_{am}^{sr}\sin 2\theta$$

$$\mathbf{S}_{dq}^{-1}p\mathbf{L}^{rr}\mathbf{S}_{dq} = \begin{bmatrix} pL_{aa}^{rr} & pL_{am}^{rr} \\ pL_{ma}^{rr} & pL_{mm}^{rr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,

$$pL_{aa}^{rr} = p(L_{lar}^{rr} + L_{aao}^{rr} - L_{aa}^{rr}\cos 2\theta) + \omega_m L_{am}^{rr}\sin 2\theta,$$

$$pL_{am}^{rr} = \omega_m(L_{amo}^{rr} - L_{am}^{rr}\cos 2\theta) - p(L_{am}^{rr}\sin 2\theta),$$

$$pL_{ma}^{rr} = -\omega_m(L_{amo}^{rr} + L_{am}^{rr}\cos 2\theta) - p(L_{am}^{rr}\sin 2\theta) \quad \text{and}$$

$$pL_{mm}^{rr} = p(L_{mmo}^{rr} + L_{mm}^{rr}\cos 2\theta) - \omega_m L_{am}^{rr}\sin 2\theta$$

Sdq는 회전자축 프레임을 고정자축 프레임이로 변환하는 변환 matrix이며 다음과 같이 나타난다.

$$\mathbf{S}_{dq} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서, 전압방정식(2)는 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$V_{as} = R_{as}\cdot i_{as} + p\lambda_{as} + p\Phi_a^s\cos\theta + \frac{1}{C}\int i_{as}dt \quad (7)$$

$$V_{ms} = R_{ms}\cdot i_{ms} + p\lambda_{ms} + p\Phi_m^s\sin\theta \quad (8)$$

$$0 = R_{ar}\cdot i_{ar} + p\lambda_{ar} + \omega_m\lambda_{mr} + p\Phi_a^r\cos\theta \quad (9)$$

$$0 = R_{mr}\cdot i_{mr} + p\lambda_{mr} - \omega_m\lambda_{ar} + p\Phi_m^r\sin\theta \quad (10)$$

$$\lambda_{as} = L_{las}\cdot i_{as} + (L_{aao} - L_{am}^a\cos 2\theta)\cdot(i_{as} + i_{ar}) - L_{am}^{am}\sin 2\theta\cdot(i_{ms} + i_{mr}) + \Phi_a^s\cos\theta \quad (11)$$

$$\lambda_{ms} = L_{lms}\cdot i_{ms} + (L_{mmo} + L_{am}^m\cos 2\theta)\cdot(i_{ms} + i_{mr}) - L_{am}^{ma}\sin 2\theta\cdot(i_{as} + i_{ar}) + \Phi_a^s\sin\theta \quad (12)$$

$$\lambda_{ar} = L_{lar}\cdot i_{ar} + (L_{aao} - L_{am}^a\cos 2\theta)\cdot(i_{as} + i_{ar}) - L_{am}^{am}\sin 2\theta\cdot(i_{ms} + i_{mr}) + \Phi_a^r\cos\theta \quad (13)$$

$$\lambda_{mr} = L_{lmr}\cdot i_{mr} + (L_{mmo} - L_{am}^m\cos 2\theta)\cdot(i_{ms} + i_{mr}) - L_{am}^{ma}\sin 2\theta\cdot(i_{as} + i_{ar}) + \Phi_a^r\sin\theta \quad (14)$$

2.3 회로정수 산정

등가회로법에 의한 특성해석에는 회로정수의 정확성이 특성해석 결과에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 회로정수를 산정하였다.

표2. 유한요소법으로 계산한 회로정수

	Ferrite	NdFeB		Ferrite	NdFeB
L_{las} [mH]	3.31	3.31	L_{lar} [mH]	3.1	4.1
L_{aao} [mH]	378.5	363.3	L_{lmr} [mH]	7.5	10
L_{am}^{a} [mH]	51.8	62.1	R_{ms} [Ω]	18	18
L_{lms} [mH]	9.6	9.6	R_{as} [Ω]	8	8
L_{mmo} [mH]	764.2	731.2	R_{mr} [Ω]	8	8
L_{am}^{m} [mH]	113.2	136.2	R_{ar} [Ω]	8	8
L_{am}^{ma} [mH]	75.2	90.1	EMF [V]	43.4	109.34

그림2는 1차측이 여자되지 않은 상태에서 Ferrite 영구자석에 의한 Flux의 분포를 보여준다. Ferrite의 잔류자밀도는 0.4T이나, 공극자속밀도는 Rib부분을 통해 흐르는 자속이 발생하여 실제로는 0.2T로 떨어짐을 알수 있다. 해석에 이용된 전동기의 Rib크기는 1.0mm로 제조되었으며, Air block는 자속의 Barrier로 작용되고 있다 Ferrite에 의한 역기전력은 3600rpm에서 43.4V로 계산었다.

그림3은 회토류계 영구자석형 동기기의 자속분포도이다. 잔류자속밀도는 1.2T이며, 공극자속밀도는 0.8T이다.

표3은 유한요소법으로 계산된 회로정수를 나타내었다.

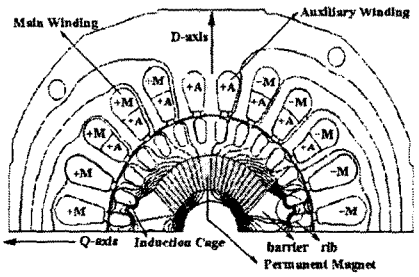

그림2. Ferrite 동기기 자속분포도

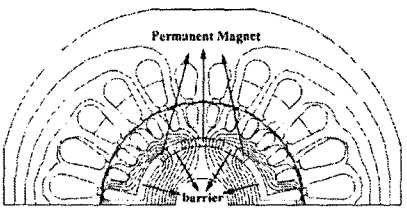

그림3. NdFeB 동기기 자속분포도

2.4 해석결과

그림4와 그림5는 구동콘덴서 용량에 따른 효율, 역률 토크 리플비를 보여준다.

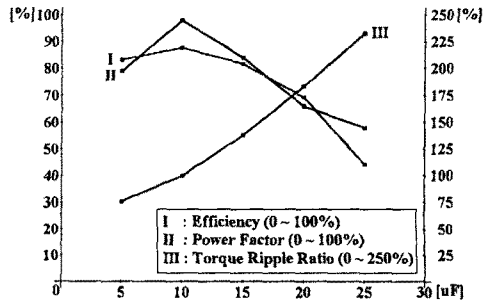

그림4. Ferrite를 사용한 동기전동기

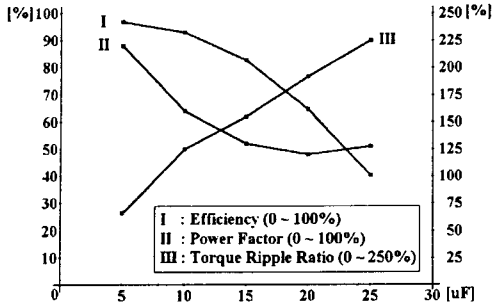

그림5. NdFeB를 사용한 동기전동기

그림4에서와 같이 10uF의 구동콘덴서에서 효율과 역율이 최대이며, 반면, 그림5에서 회토류계 영구자석형의 경우 5uF에서 최대효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림7, 그림8, 그림9는 NdFeB 영구자석형 단상 유도형 동기기의 해석 결과로 기동시에는 125uF, 정상상태에서는 5uF 콘덴서를 사용하였다. 정격토크는 0.45[Nm]이며, 정격속도는 3600rpm이다. 그림7에서와 같이 정상상태에서 속도가 정격속도를 기준으로 변동하나 평균속도는 정격속도와 같다. 그림7과 그림8은 토크와 전류의 특성을 보여준다. 정상상태시 평균토크는 정격 토크와 같으며, 그림8과 같이 정상상태에서 주권선에 흐르는 전류는 0.4A, 보조권선에 흐르는 전류는 0.6A로 불평형을 이루어 토크리플을 발생시키는 원인이 된다.

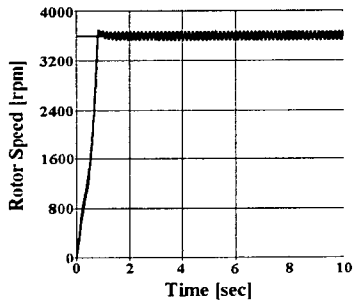

그림6. NdFeB 동기기의 속도특성

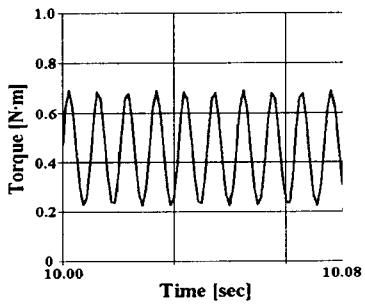

그림7. NdFeB 동기기의 토크특성

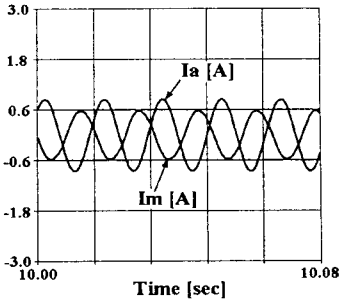

그림8. NdFeB 동기기의 전류파형

3. 결 론

본 논문에서는 단상 유도형 동기기를 전압방정식과 운동방정식을 결합하여 특성을 해석하였으며, 등가회로법에 의한 특성해석시 중요한 요소인 회로정수를 유한요소법에 의해 계산하여 누설리액턴스등을 고려할수 있어 보다 정확한 특성해석이 가능하였다.

[참 고 문 헌]

[1] A.N.Knight and J.C.Salmon, "Modeling the dynamic behaviour of single-phase line-start permanent magnet motors.", IEEE Conference Record vol. 4, pp.2582-588, 1999.

[2] T.J.E Miller, "Single-phase pernanent-magnet motor analysis.", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-21, no.4, pp.651-658, May 1985.

[3] M.A.Rahman and A.M.Osheiba, "Performance analysis of single-phase permanent magnet motors", Electric Energy Conference 1987. Adelaide., October 1987.

[4] S. A. Nasar, Electromagnetic Energy Conversion Devices and Systems, Prentice-Hall, 1970