단상유도전동기의 FEM시뮬레이션과 실험에 의한 자기적 진동원 분석

*김철진, **최철용※, **김현일, **최근수, **백수현
*한라대학교, **동국대학교

Magnetic vibration analysis for FEM simulation and experiment of single phase induction motor

Cherl-Jin Kim, Chul-Yong Choi, Hyun-Il Kim, Geun-Soo Choi, Soo-Hyun Baek
Halla University, Dongguk University

Abstract - Various kinds of practical machines using single phase induction motor(SPIM) are necessary to control speed and torque. In particular, capacitor-run type SPIM has constitutional characteristics, the motor torque is changed by auxiliary capacitance variation. In this study, we manifest equivalent model having more simplicity, and study the relation between torque and capacitance value of SPIM. And analyze Magnetic vibration for FEM(Finite Element Method) simulation. Also, We design the experimental controller which is able to speed control accurately by phase angle control of AC input voltage. Through the simulation and experimental results, we confirmed validity of this study.

1. 서 론

단상유도전동기는 가전기기에 널리 사용되는 대표적인 전동기이나, 3상 유도기와는 달리 전동기 자체만으로는 회전자계를 얻지 못하는 단점이 존재한다.

그러나 커패시터구동형 단상유도전동기(SPIM)의 주권선과 병렬연결된 보조권선에 직렬로 커패시터를 연결함으로써 보조권선 전류의 위상이 진상으로 앞서게되어 전동기의 기동이 가능하며, 기동 후 시간의 경과에 따라 맥동하는 자계를 발생하고 이 자계에 의해 지속적인 토크를 발생하게 된다.

커패시터구동형 단상유도전동기의 커패시터용량을 선정할 때, 운전중의 출력특성을 주목적으로 하는 경우 기동시 커패시터용량이 적기 때문에 기동토크가 적고, 기동시에 적용한 비교적 대용량의 커패시터를 구동 중에도 계속 사용하게 되면 무부하 및 경부하시 효율이 저하하고, 보조권선의 포화, 불평형운전에 의한 심한 자기진동의 발생 우려가 있다. 따라서 커패시터용량의 선정에 주의하여야 한다.

본 연구에서는 2차원 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 통하여 커패시터의 용량에 따른 단상유도전동기의 토크특성을 분석하고, Triac 소자를 적용한 실험용 위상제어기의 실험결과로부터 이론해석과의 비교검토를 실시하였다. 또한, 단상유도전동기의 전압과 전류를 정상 및 역상성분으로 변환한 모델을 기초로 한 등가회로로부터 백터해석을 통해 토크를 산출하고 MATLAB 시뮬레이션을 통해 커패시터용량에 따른 토크의 변화를 예측하였으며 실험결과로부터 해석의 타당성을 확인하였다.

2. 커패시터 구동형 단상유도전동기

2.1 FEM해석

본 연구에서는 커패시터구동형 단상유도전동기의 특성을 분석하기 위하여 2D 모델의 유한요소법을 적용하여 수치 해석을 수행하였다. 실험에 적용한 전동기는 40[W], 4극 커패시터 구동형 단상유도전동기로서 Ansoft사의 RM-Xprt 및 Em-2D를 이용한 유한요소법을 적용하여 수치해석을 수행하였으며, 해석모델의 기본사양 및 구조는 표 1 및 그림 1과 같다..

표 1 커패시터 구동형 단상유도전동기의 사양

정격 출력[kW]	0.04
정격 전압[V]	220
극수	4
주파수[Hz]	60
정격 속도[rpm]	1550

그림 1은 단상유도전동기의 구조도와 슬롯형상을 나타낸 것으로 고정자는 steel, 회전자 도체는 알루미늄이며, 축은 stainless steel로 구성되어 있으며, 그림 2에 권선의 분포를 제시하고 있다.

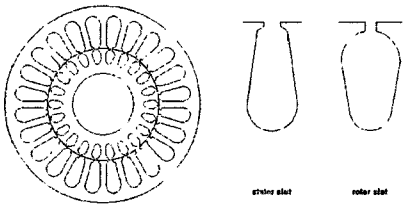

그림 1 단상유도전동기의 구조

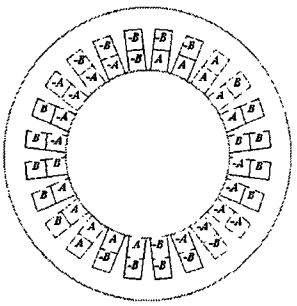

그림 2 단상유도전동기의 권선분포

2.2 전동기특성

커패시터구동형 단상유도전동기는 보조권선에 직렬로 삽입된 커패시터에 의해 주권선과 보조권선에는 90°정도의 위상차가 생겨 지속적인 토크를 발생하고 회전하게 된다.

그림 3의 등가회로는 커패시터구동형 단상유도전동기의 등가회로를 나타내고, 등가회로로부터 주권선에서 발생된 자계에 의해 유기되는 전압과 보조권선에서 발생된 자계에 의해 유기되는 전압은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

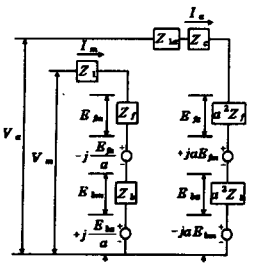

그림 3 SPIM의 등가회로

$$\begin{aligned} E_{fm} &= I_m Z_f \\ E_{bm} &= I_m Z_b \\ E_{fa} &= I_a a^2 Z_f \\ E_{ba} &= I_a a^2 Z_b \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 a는 권선비이며 보조권선에 의한 자계는 주권선에 전압을 유기하고 보조권선에 생긴 전압의 $1/a$배의 크기를 갖는다. 그러나 두 권선의 공간적인 상대위치 때문에 보조권선의 정방향 회전자계에 의하여 주권선에 유기된 전압은 90° 지연되어 보조권선의 정방향 전압에 비해 위상이 지연된다. 또한 보조권선의 역방향 회전자계에 의하여 주권선에 유기된 전압은 같은 자계에 의하여 보조권선에 유기된 전압에 비해 90° 앞선다.

위의 등가회로의 전압은 다음 식 (2)와 같이 나타내며 이 식을 주권선 전류와 보조권선 전류로 나타내면 식 (3)과 같이 간소화 된다.

$$\begin{aligned} V_m &= I_m Z_1 + I_m Z_f - jaI_a Z_f + I_m Z_b + jaI_a Z_b \\ V_a &= I_a Z_{1a} + I_a Z_c + a^2 I_a Z_f + jaI_m Z_f + a^2 I_a Z_b - jaI_m Z_b \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{V_m Z_{Ta} + jV_a a(Z_f - Z_b)}{Z_T Z_{Ta} - a^2(Z_f - Z_b)^2} \\ I_a &= \frac{V_a Z_T - jV_m a(Z_f - Z_b)}{Z_T Z_{Ta} - a^2(Z_f - Z_b)^2} \end{aligned} \tag{3}$$

2.3 토크(Torque)

정,역방향 자계에 의해 주권선에 유기된 전압은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} E_f &= (I_m - jaI_a)Z_f \\ E_b &= (I_m + jaI_a)Z_b \end{aligned} \tag{4}$$

다음의 그림 4는 커패시터 구동형 단상유도전동기의 전류의 위상관계를 나타낸 그림이다.

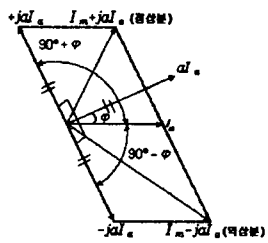

그림 4 단상유도전동기의 전류 페이저도

양 자계에 기인한 토크는 각각의 자계에 관계하는 저항에 전류를 제곱함으로서 구한다. 정방향 자계에 의한 전류와 역방향 자계에 의한 전류는 그림 4와 같고, 보조권선의 전류와 주권선 전류는 ϕ의 위상차를 갖는다.

커패시터구동형 단상유도전동기의 구동토크는 정방향 토크에서 역방향 토크의 차에 의해 나타나므로 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} T_f &= [\ I_m^2 + (aI_a)^2 + 2aI_m I_a \sin\phi\ ]R_f \\ T_b &= [\ I_m^2 + (aI_a)^2 - 2aI_m I_a \sin\phi\ ]R_b \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} T &= T_f - T_b \\ &= \frac{\{\ I_m^2 + (aI_a)^2\ \}(R_f - R_b) + (2aI_m I_a \sin\phi)(R_f + R_b)}{\omega_{syn}} \end{aligned} \tag{6}$$

3. 특성해석

3.1 FEM해석

본 연구에서는 커패시터구동형 단상유도전동기의 기본사양을 적용하여 2D 모델을 구성하였고 일정 커패시터 용량에서의 Em-2D를 이용한 유한요소해석결과 그림 5와 같이 회전자의 자속분포를 분석할 수 있다.

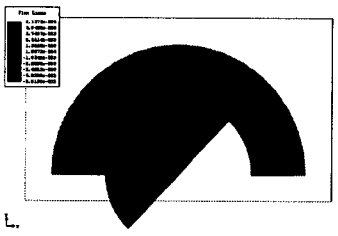

그림 5 전동기의 자속밀도(2.5[μF])

다음의 그림 6은 커패시터의 용량을 2.5[μF], 12.5[μF]으로 선택한 경우의 쇄교자속, 손실, 토크 및 권선전류의 해석 결과를 제시한 것으로, 좌측에 제시한 결과는 2.5[μF]의 경우이며, 우측에 제시한 결과는 12.5[μF]의 용량을 적용한 결과를 각각 나타낸 것이다.

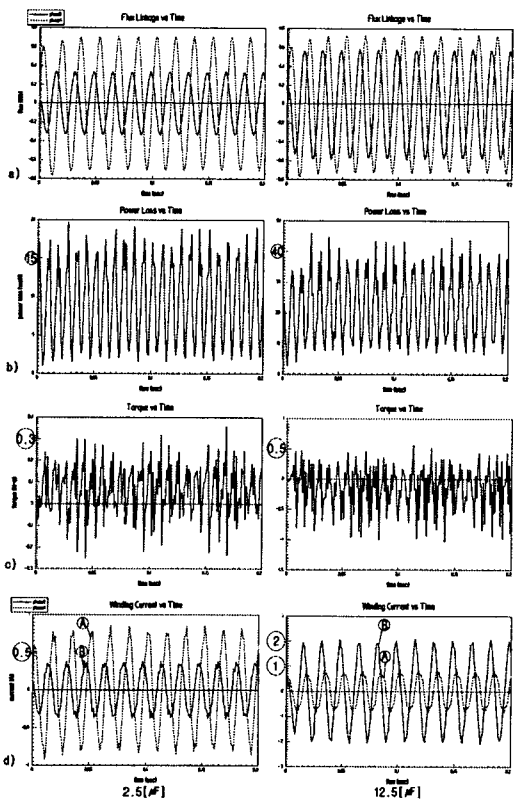

그림 6 시뮬레이션 결과 파형

그림 6(a)로부터, 12.5[㎌] 구동시 보조권선과 쇄교되는 자속이 현저히 증가하여 결국 그림(b)에서와 같이 손실이 40[W]정도로 증가하고 구동이 불안정하게 되는 것을 알 수 있다. 또한, 그림(c)에서와 같이 2.5[㎌]에 비해 12.5[㎌]으로 구동시 역방향 토크가 과도하게 증가하여 발생토크가 저감되는 현상은 그림(d)에 제시한 바와 같이 약 4배 이상 증가된 보조권선 전류에 기인 한 것으로 판단할 수 있다.

3.2 수식적 해석

FEM해석 결과와 비교하기 위해 식 (6)에 제시한 토크 관계식을 이용하여, 커패시터의 용량변화에 따른 토크특성을 시뮬레이션한다.

특성해석을 위해 적용한 모터의 출력은 4극 40[W]이며, 시뮬레이션에 적용한 단상유도전동기의 파라미터는 표2와 같고, 커패시터 용량별 토크특성의 시뮬레이션 결과는 그림7과 같이 나타내었다.

표 2 단상유도전동기의 파라미터

주권선 저항[Ω]	63.5729
주권선 리액턴스[Ω]	49.8734
보조권선 저항[Ω]	76.202
보조권선 리액턴스[Ω]	71.0875
회전자 저항[Ω]	199.895
회전자 리액턴스[Ω]	82.2302
자화 리액턴스[Ω]	849.645
슬립	0.2775
권수비	1.09155

여기서, 커패시터 용량이 증가함에 따라 구동토크가 일정한 용량(약6[㎌])에서 최대토크가 발생하며, 보다 용량이 증가하는 경우에는 구동토크가 저감하는 특성을 나타냄을 알 수 있다.

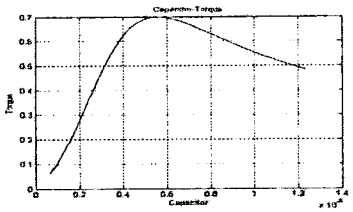

그림 7 기동시 커패시턴스에 따른 토크변화

4. 실험결과 및 고찰

다음의 그림 8에 제시한 회로도는 실험에 적용한 제어기의 회로구성을 나타낸 것으로, 속도제어를 위하여 Triac을 사용하였으며, 주권선에서 영전압을 검출하고 위상각을 연산하여 전압의 실효치를 제어하도록 회로를 구성하였다.

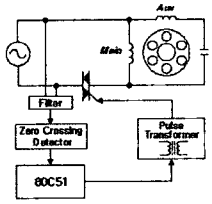

그림 8 위상제어방식 제어기

제작한 제어기를 이용하여 모터의 커패시턴스를 0.65[㎌]-12.5[㎌]로 각각 변화하여 커패시턴스에 따른 토크를 시뮬레이션과 실험을 통하여 비교하였다.

그림9는 실험한 데이터를 그래프로 나타낸 것이다.

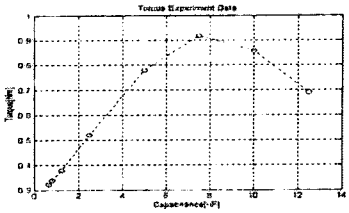

그림 9 커패시터의 용량별 토크 실험

커패시터의 용량에 따른 토크의 시뮬레이션 결과로부터, 그림 7의 경우는 기동시(s=1)의 경우를 시뮬레이션하였고, 그림9의 경우는 구동상태에서의 토크를 측정한 것이기 때문에 약간 차이가 있으나 커패시터의 변화에 따른 토크의 결과는 유사한 현상을 나타내며 실제 토크 측정 실험시 커패시터용량이 6[㎌]보다 커지면 전동기에서 소음과 진동이 발생되는 실험결과로부터, 제안된 수식은 최대의 토크를 발생시킬 수 있는 커패시터를 선정하기에 적절함을 알 수 있다.

본 연구에서 적용한 전동기의 경우, 실험 및 시뮬레이션 결과로부터 전동기의 위상이 약 90° 가 유지되는 7.5[㎌]에서 최대 토크를 발생하는 것을 알 수 있으나 다소의 소음, 진동현상의 발생으로 효율이 저하되었으며, 효율의 측면에서는 보다 낮은 용량인 2.5[㎌]에서 양호한 효율 특성을 나타내고 있다.

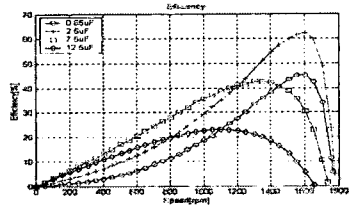

그림 10 커패시턴스별 효율

5. 결 론

커패시터 구동형 단상유도전동기를 최적의 상태에서 구동하기 위해서는 전동기의 파라미터를 고려한 최적의 커패시터용량을 적용해야 한다.

본 논문에서는 모터의 파라미터를 적용하고 2D 유한요소법을 사용하여 커패시턴스에 따른 자속분포를 시뮬레이션을 통하여 검토하였고, 제안한 수식을 시뮬레이션하여 적절한 커패시턴스를 예측하였다. 위상제어기를 제작하고 실험을 통해서 커패시턴스에 따른 토크 및 효율을 고려하여 전동기에 최적의 용량을 예측하고 커패시턴스에 따른 토크특성을 비교분석 하였다. 실험 및 시뮬레이션 결과로부터 전동기의 위상이 약 90° 가 유지되는 7.5[㎌]에서 최대 토크를 발생하였으며, 2.5[㎌]에서 가장 양호한 효율 특성을 나타내었다.

[참 고 문 헌]

[1] 박민호, 유도기기, 동명사, pp.286-562, 1969.

[2] 류준형 이광원, "보조권선 전압제어에 의한 커패시터 런 유도전동기의 속도제어", KIEE, Vol.48B, NO.7, pp.357-362, July. 1999.

[3] Ph.RABIER, "TRIAC CONTROL BY BULSE TRANSFORMER", SGS-THOMSON, 1995.

[4] X.DURBECQ, " CONTROL BY A TRIAC FOR AN INDUCTIV E LOAD HOW TO SELECT A SUITABLE CIRCUIT", SGS-THO MSON, 1995.

[5] E. R. Collins, Jr., "Operating Characteristics of Single- Phase Capacitor Motors Driven from Variable Frequency Supplies", IEEE IAS'91, pp.52-57, 1991.

[6] Eduard Muljadi, "Adjustable ac Capacitor for a Single-Phase Induction Motor", IEEE, Vol.29, NO.3, pp.479-485, 1993.