

외부회로 방정식과 FEM을 이용한 Condenser Motor의 특성해석

박 건 우, 신 판 석

충남대학교 과학기술대학 전기공학과, 339-800 충남 연기군 조치원읍

Simulation of A Condenser Motor Using an External Circuit and FEM

Gun-Woo Park and Pan-Seok Shin

Depart. of Electrical Eng. Hong-Ik University, Chochiwon, Chung-nam 339-800

Abstract

A Single-phase condenser motor is analyzed by FEM coupled with external circuit. The finite element analysis is based on the solution of combined equation both the magnetic field equation from the Maxwell's and the circuit equations of the stator and rotor circuit. The external circuit of the single-phase condenser motor to be analyzed is described using FLUX2D and linked to multiple FEM regions. The simulated results show that the condenser motor analysis with external circuit has good agreement with those of test results.

1. 개요

유한 요소법은 복잡한 형상, 경계치 문제 및 재료의 비선형성 등이 매우 용이함으로 수치 해석법 중에서 가장 널리 사용되고 있다. 유한 요소법의 전자계 해석 프로그램이 발달하면서 전자계나 정전계에 대한 해석 뿐 만 아니라, 교류자계, 과도현상, 전자계에 의한 온도해석, 고주파 전자장 해석 등에 많이 이용되어 왔으며, 본 연구에서는 condenser 형 모터의 특성해석을 외부의 전기적인 회로와 유한요소법의 해석 영역을 coupling하여 simulation 하는 방법을 연구하여 상용화된 program 인 FLUX2D를 이용하여 분석하였다. 단상콘덴서형 유도전동기는 보조권선이 콘덴서와 직렬로 연결되어 있다. 콘덴서 전동기는 두가지 형이 있는데 하나의 콘덴서로 기동도하고 운전 중에도 이용하는 것과 기동용 콘덴서와 운전용 콘덴서가 별도로 있는 것이 있다. 후자의 경우 기동용 콘덴서와 운전용 콘덴서가 병렬로 접속되므로 큰 정전 용량으로 기동하고, 기동이 끝나면 원심 개폐기가 자동적으로 동작하여 기동용 콘덴서는 떨어지나 기동 권선과 운전용 콘덴서는 그대로 남아서 전동기의 역률을 개선한다. 콘덴서 전동기는 역률이 매우 좋을 뿐 만 아니라 효율도 다른 종류의 전동기보다 높다. 일반적으로 단상 유도 전동기에서는 토오크의 순시값이 맥동함으로 진동, 소음이 생기기 쉽지만, 콘덴서 전동기는 토오크의 진동을 감소시키기 때문에 높은 효율을 얻을 수 있다는 등의 장점으로 소용량 전자제품에 많이 응용되고 있다. 최적의 모터를 설계제작하기 위하여 core, coil, 콘덴서용량, 권선비 등이 부하조건과 일치되는 점에서 선정 되어야하며, 이를 위하여 기본설계 후에 제특성을 simulation 하여 평가하는

것은 필수적이며 선진국에서는 보편화되어 있는 과정이다. 본 연구에서는 FLUX2D를 이용하여 콘덴서 모터를 외부회로와 coupling 하는 방법으로 해석하였다.

2. 교류자장에 대한 유한요소 정식화

2.1 지배방정식의 정식화

전원전류가 시간에 대해 정현적인 변화를 하고 계의 모든 재질이 선형성을 갖는다고 가정하면 자기포화현상, 온도상승효과를 무시할 수 있다[1]. 또한, 2차원 문제에서는 고조파효과는 무시되어진다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \vec{J}_s \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (4)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (5)$$

여기서, \vec{H} 은 자기장의 세기, \vec{J}_c 은 와전류, \vec{J}_s 은 source에 의한 전류, \vec{E} 은 전기장의 세기, \vec{B} 은 자속밀도, ϕ 은 전기스칼라 포텐셜, \vec{A} 은 자기벡터 포텐셜 이다. 계산상 편의를 위해 유도기의 구조에 대해 다음과 같은 가정을 한다. 축방향의 길이가 반경에 비해 충분히 크므로 전류 및 자기벡터 포텐셜값은 축방향의 성분만 존재한다.

$$A = A(x, y, t)\hat{z}, \quad J = J(x, y, t)\hat{z} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (7)$$

식(1) - (5)을 정리하면

$$\frac{1}{\mu}(\nabla \times (\nabla \times \vec{A})) = \vec{J}_c - \sigma(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi) \quad (8)$$

벡터항등식 $\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$ 와, 식(8)을 이용하여 식(9)을 정리하면

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = j\omega \vec{A} - \sigma \nabla \phi - \vec{J}_c \quad (9)$$

이 된다.

가중잔차법중 Galerkin 법을 사용하여 식(10)을 정식화하고, 형상함수 N 을 이용하여 근사화하면 식(13)을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \int_a^b \left\{ \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) + j\omega\sigma N_i N_j \right\} dx dy A_i + \int_a^b a N_i \frac{\partial \phi}{\partial z} dx dy = \int_a^b J N_i dx dy \quad (10)$$

2.2 고정자 회로 방정식

고정자의 회로 방정식에 의하여 다음과 같은 회로 방정식을 얻을 수 있다.

주권선 회로 방정식

$$V(t) = I_m R + L \frac{dI_m(t)}{dt} + \frac{d\phi'}{dt} \quad (11)$$

보조권선 회로 방정식

$$V(t) = I_c(t) R + V_c(t) + L \frac{dI_c(t)}{dt} + \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (12)$$

$$I_c(t) = C \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (13)$$

여기서, $V(t)$ 는 외부전압, $I_m(t)$ 주 권선에 흐르는 전류, ϕ' 는 주권선에서 발생하는 자속, ϕ 는 보조권선에서 발생하는 자속, $I_c(t)$ 는 콘덴서에 흐르는 전류, $V_c(t)$ 콘덴서에 걸리는 전압을 나타낸다.

$$\frac{d\phi'(t)}{dt} = T \frac{d}{dt} \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{s} = T \frac{d}{dt} \oint_a \vec{A} dl \quad (14)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = T \frac{d}{dt} \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{s} = T \frac{d}{dt} \oint_a \vec{A} dl \quad (15)$$

여기서, T' 는 주권선수, T 는 보조권선수 이다.

2.3 회전자 회로 방정식

엔드링 저항을 고려한 회로 방정식[2]은 KCL에의하여

$$[I_b] = [R]^T [I_e] \quad (16)$$

여기서, I_b 는 도체비에 흐르는 와전류, I_e 는 엔드링에 흐르는 전류 $[R]$ 계수행렬이다. 또한 KVL를 적용하면

$$2r_e [I_e] = - [R]^T [R] [\Delta V] \quad (17)$$

$$I_b = \int_a^b I_e d\Omega = \int_a^b \sigma E d\Omega \quad (18)$$

이되고 위 식들을 정리하면

$$\frac{1}{2r_e} [R]^T [R] \left[\frac{\partial \phi}{\partial z} \right] + \sigma \left[\int_a^b \frac{dA}{dt} d\Omega + \int_a^b \frac{\partial \phi}{\partial z} d\Omega \right] = 0 \quad (19)$$

3. 외부회로회로 coupling을 이용한 콘덴서 모터 해석

3.1 해석 model

단상 2극 400W인 콘덴서형 능형유도전동기를 해석해 보았다. 해석을 간단하게 하기 위하여 반 평면을 Modeling 하였고, 그림 1은 해석 Model의 단면도로 주권선이 통과하는 슬롯 6개와 보조권선이 통과하는 슬롯 4개 주권선과 보조권선이 같이 있는 슬롯 2개로, Stator에 모두 12개의 슬롯이 있으며, Rotor에는 17개의 슬롯이 있음을 보여주고 있다. Stator의 외측과 Rotor의

내측은 고정 경계 조건으로 하고 나머지는 Neumann 경계조건으로 하였다. 그림2는 해석 Model의 외부회로 정수들은 계산하기 위하여 Flux2D의 Cirfluo로서 Simulation 한것을 보여주고 있으며, Stator의 코일은 전원전압에 연결되어 있고 Rotor의 bar도 함께 연결되어 있다.

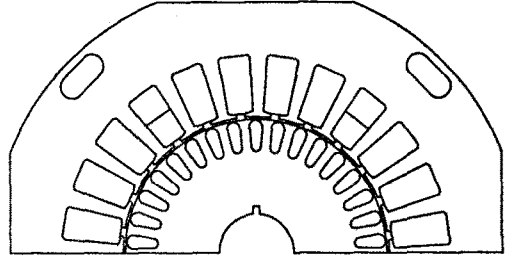


그림1. 단상 능형 유도전동기의 해석모델

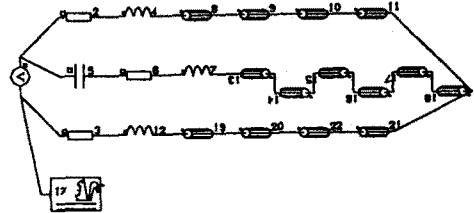


그림2. 해석 Model의 외부 회로도

3.2 해석결과

외부회로와 유한요소 해석영역을 coupling 하여 콘덴서 모터를 해석한결과 전류원 Source를 이용한 magnetostatic 이나 magnetodynamic 해석보다 더 실제상황에 가까운 결과를 얻을 수 있었다.

표1은 2극 400W 콘덴서형 단상 유도기의 사양을 나타내고 있고, 그림3은 Moving air gap을 이용하여 Rotor의 위치를 5.3° 시계방향으로 회전시켰을때의 동전위선을 본것이며, Moving air gap을 사용함으로 Rotor의 위치변화에 따른 여러가지 특성을 쉽게 구할 수 있었다. 그림4은 과도자계 해석으로써 60Hz의 주파수일 때 시간의 변화에 대한 Torque의 값의 변화를 계산한 것이

해석모델	단상 2극 400W
주 파 수	60 [Hz]
전 압	220 [V]
무부하 전류	1.05 [A]
정격 전류	2.85 [A]
정격 회전수	3467 [rpm]
입 력	620 [W]
기동 토크	11.6 [kg·cm]
콘덴서 용량	30 [μF]

표 1. 해석모델의 사양

다. 그림을 통하여서 전압이 증가하는 순간 Torque 역시 증가함을 알 수 있으며, 각 영역에서의 전압, 전류특성 역시 FLUX2D의 과도해석 Module을 이용하여 해석해본 결과 콘덴서형 단상전동기는 실험치와 거의 일치함을 확인 할 수 있었다.

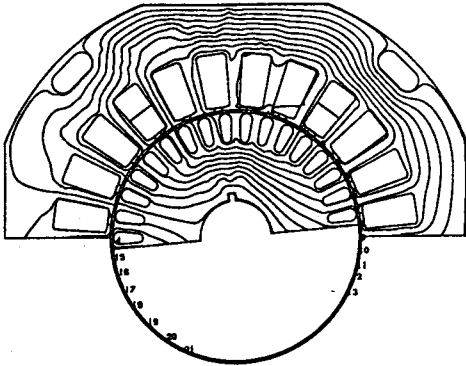


그림3. Moving air gap을 이용한 등전위선 분포도

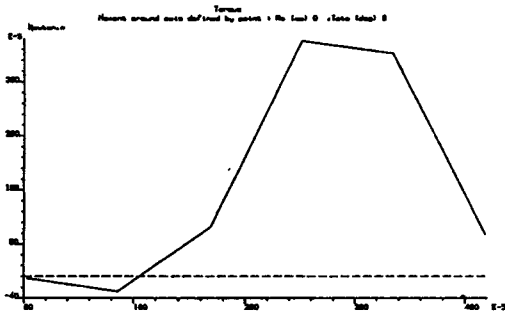


그림4. 기동시 토오크특성

4. 요약 및 연구방향

Single-phase Condenser Motor의 정확한 특성 해석을 위하여 유한요소의 해석 영역과 Motor의 전기적인 외부회로를 연계하여 해석을 하였고, Simulation은 FLUX2D의 CIRFLU을 이용하였다. 해석결과는 실험치와 거의 일치함을 확인하였으며, 앞으로의 과제는 Rotor의 회전수가 정상상태에 도달할때, 즉 보조권선에 직렬로 연결된 콘덴서가 분리된 상태에서의 slip에 대한 정격 토오크특성을 해석하는 것이며, 최적의 효율을 낼수 있는 권수비와 콘덴서의 용량을 결정하여 설계자에게 최적의 정보를 제공하는 것이다.

참고문헌

- [1] 전기자동차용 고효율 경량모터 설계 기술 개발에 대한 연구, 강원대학교 산업기술 연구소 1994.9
- [2] 이항범 스류효과를 고려한 유도전동기의 유한요소해석, 박사학위논문, 서울대학교, 전기공학 1995.