

## 외부회로 방정식과 유한요소법을 이용한 AC 서보전동기의 과도자계 해석

\*연제욱<sup>1</sup>, 김영봉<sup>2</sup>, 황은식<sup>2</sup>, 신판석<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 홍익대학교 과학기술대학 전기공학과, 339-800 충남 연기군 조치원읍

<sup>2</sup> 제우컴퓨터(주), 135-100 서울 강남구 청담동 132, 중앙빌딩

### Transient Magnetic Analysis of AC Servo Motor Using FEM coupled with External Circuit Equation

\* Jae-Wook Yeon<sup>1</sup>, Young-Bong Kim<sup>2</sup>, Eun-Sik Hwang<sup>2</sup>, , Pan-Seok Shin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Eng. Hong-Ik University, Chochiwon Chung-nam 339-800

<sup>2</sup> Jaewoo Computer Ltd. , 132 Chungdamdong, Kangnamgu, Seoul 135-100

**Abstract**

AC servo motors are widely used for various mechatronic devices such as FA, OA and robot machines. To obtain more accurate simulation results, a method of analysis for AC servo motor is described using transient magnetic formulation coupled with external circuit equation of the motor.

The external circuit of the motor to be analyzed is described using FLUX2D program and linked to multiple finite element regions. The simulation results show that transient magnetic analysis coupled with external circuit has more accurate than those results from magnetostatic.

**1. 서론**

유한요소법은 비선형 재질을 포함하거나 복잡한 구조의 형상을 가진 전기기기 해석에 대하여 유용하게 사용되어 왔으며 AC 서보전동기 특성해석법으로서 유한요소법은 전동기 내부의 자장계산시에 영구자석에 의한 고조파 자속과 누설자속을 모두 고려하기 때문에 정확한 해석을 할 수 있다.

본 논문에서는 외부의 전기 회로도 및 유한요소법에 의한 해석영역을 연계하여 AC Servo Motor를 해석하는 방법을 소개하고자 한다. 최근 AC Servo Motor가 위상검파를 이용한 상전류제나 벡터제에 의해 우수한 제어성능을 낼 수 있음이 증명되고 나서 광범위하게 쓰이고 있다. 현재 30~800W 급이 가장 많이 사용되고 있으며 중소형 공작기계는 물론이고 소형 로봇이나 FA기기, 의료기기, 계측기기 등에 많이 활용되고 있다.

사용된 AC Servo Motor의 제어방식은 전동기에 들어오는 전류를 디지털로 제어하며 CPU에서 PWM 제어방식으로 구동하고 있다.

외부회로도의 Simulation은 스위치소자를 이용하여 제어 Sequence에 따라 on/off를 동작하여 coil을 여자함으로써 과도특성에 따라 해석하게 된다. [1~6]

정자계나 교류자계의 해석으로는 sequence에 따른 AC 전원 공급의 simulation이 불가능하므로 정확한 해석이 힘들고 외부회로도의 트랜지스터의 on/off의 동작 시간을 고려할 수 없는 문제가 있으나 과도 자계(Transient Magnetic)와 외부회로를 연계시켜 Servo Motor 전원공급을 실제와 똑같이 simulation하여 해석을 하면 정확한 AC Servo Motor의 특성 해석을 할 수 있을 것이다.

외부회로 simulation은 유한 요소 상용프로그램인 FLUX2D를 이용하였다. [7]

**2. 유한요소 정식화**

해석하려는 모델에 대해 해석모델이 z축 방향으로 충분히 길고, 전류는 z축 방향으로 흐른다고 가정하면 xy평면의 2차원 문제로 된다.

$$\vec{J} = \vec{J}(x, y) \tag{1}$$

$$\vec{A} = \vec{A}(x, y) \tag{2}$$

$$\nabla \phi = \frac{\partial \phi}{\partial z} \tag{3}$$

$$\vec{M}_r = M_x \hat{x} + M_y \hat{y} \tag{4}$$

여기서,  $A$  : 자기 벡터 포텐셜 [Wb/m]

$\phi$  : 자기 스칼라 포텐셜 [A]

$J$  : 전류밀도 [A/m<sup>2</sup>]

$M_x$  : 전류 자화량의 x축 성분 [A/m]

$M_y$  : 전류 자화량의 y축 성분 [A/m]

Galerkin Method을 이용하여 풀기위해 근사해  $A$ 와  $\frac{\partial \phi}{\partial z}$ 를 정의하여 방정식을 구할 수 있다. 방정식을 풀기위해 잔차( $R$ )를 구하면 다음과 같다.

$$R = \int_{\Omega} \left\{ \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) \right) - \frac{1}{\mu_r} \vec{M}_r \right\} + \sigma \nabla \phi - \vec{J}_V - \vec{J}_C \cdot N_i \hat{z} \tag{5}$$

여기서  $\vec{J}_V$  : 전압원에 의한 전류밀도 [A/m<sup>2</sup>]

$\vec{J}_C$  : 전류원에 의한 전류밀도 [A/m<sup>2</sup>]

(5)식을 정리하면 잔차( $R$ )는 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} \nu \left[ \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] dx dy A_j + \int_{\Omega} \sigma N_i dx dy \frac{\partial \phi}{\partial z} - \int_{\Omega} \pm \frac{N}{S_A} N_i dx dy I_{CD} = \int_{\Omega} N_i J_C dx dy + \int_{\Omega} \nu_r \left[ M_x \frac{\partial N_i}{\partial y} - M_y \frac{\partial N_i}{\partial x} \right] dx dy \tag{6}$$

여기서,  $S_A$  : 슬롯의 면적 [m<sup>2</sup>]

$N$ : 코일의 턴수

$I_{CD}$ : 전압원에 의해 흐르는 전류 [A]

식 (6)를 행렬식으로 표현하면

$$[S \ T \ K] \begin{pmatrix} A \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \\ I \end{pmatrix} = [F] \quad (7)$$

여기서,  $S_{ij} = \int_a \nu_i \left[ \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] dx dy$

$$T_i = \int_a a N_i dx dy$$

$$K_i = - \int_a \pm \frac{N}{S_A} N_i dx dy$$

$$F_i = \int_a N_i J_C dx dy + \int_a \nu_r \left[ M_{\pi} \frac{\partial N_i}{\partial y} - M_{\nu} \frac{\partial N_i}{\partial x} \right] dx dy$$

### 3. 전압원 문제 해석을 위한 외부회로방정식

외부전압원이 있는 회로방정식에서 외부 전압원을  $V$ , 회로의 저항을  $R$ , 권선의 누설 인덕턴스를  $L$ , 구성된 회로의 지나가는 자속을  $\phi$ 라 하면 회로방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V = RI + L \frac{dI}{dt} + \frac{d\phi}{dt} \quad (8)$$

식(8)을 정리하면 다음과 같다.

$$V = (R + j\omega L)I + j\omega \pm \frac{N}{S_A} \int_a N_i dx dy A_i \quad (9)$$

여기서  $l$ 은  $z$ 축 방향의 길이이다

식(9)를  $-j\omega l$ 로 나누고 정리하면 다음과 같다.

$$- \pm \frac{N}{S_A} \int_a N_i dx dy A_i - \frac{1}{j\omega l} (R + j\omega L)I = - \frac{1}{j\omega l} V \quad (10)$$

행렬식으로 표현하면

$$[K]^T [A] + [PH] [I] = [V] \quad (11)$$

(7)식과 (11)식을 합성하면 최종 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} S & T & K \\ K^T & 0 & P \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \\ I \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

### 4. 적용예

해석하고자 하는 모델은 3상 4극 220 V 400 W의 AC Servo Motor이며 표 1은 해석 모델의 사양이며 회전자는 Ferrite 영구자석을 사용했으며 표 2에 사용된 영구자석의 특성에 대한 설명을 하였다. 그림 1은 AC Servo Motor 구동을 위한 inverter 회로이며 그림 2는 FEM 해석영역과 외부 회로도를 link시키기 위한 회로도이며 구동 주파수는 2KHz로 작동되는 트랜지스터 대신에 스위치로 대체하여 모델링하였고 FLUX2D를 이용하여 해석하였다. 두개의 트랜지스터가 동시에 동작하며 Hall Sensor의 위치는 120°의 위상차를 두고 있으며, Hall Sensor에서 출력된 R, S, T상은 CPU를 거쳐 120° 차를 가지는 U, V, W, /U, /V, /W의 Gate신호를 Base Drive의 각 트랜지스터쪽으로 인가하게 된다. Simulation은 각 소자의 switching sequence에 따라 1주기를 과도자계로 해석하였고 그림 3은  $t=0.0002$ 에서의 시간에 따라 변화

는 자속선(fluxlines)을 보여줌에 극이 잘 형성되어 있고 영구자석의 누설도 보여주고 있다.

그림 4는 외부회로도로 사용된 FLUX2D의 CIRFLU에서의 전압원에서의 한주기(0.00005~0.0005 sec)에서의 전류의 파형이며 그림 5는 해석한 한주기의 토오크 특성을 나타내었으며 가상변위법을 이용하여 토오크를 구하였다. 이 계산된 결과는 실제의 측정치와 잘 일치하였다.

표1. 해석 모델의 사양

입력 전 원	220 V 60HZ
극 수	4 극
상 수	3 상
정 격 출 력	400 [W]
상 당 권 선 수	226 [turns]
전 기 자 길 이	70 [mm]
슬롯 수	24 [개]
정 격 회 전 수	1800 [rpm]

표2. 영구자석의 특성

Br (잔류 자속밀도)	4000 [G]
$\mu H_c$ (B=0 일때의 감자계)	3300 [Oe]
$J H_c$ (J=0 일때의 감자계)	3500 [Oe]
re (리코일 부자율)	1.05
최대 에너지적	3~4 [MGOe]

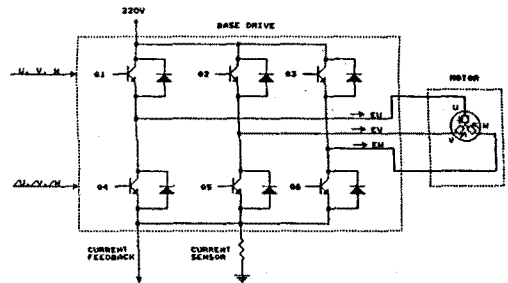


그림1. AC Servo Motor 구동을 위한 인버터 회로

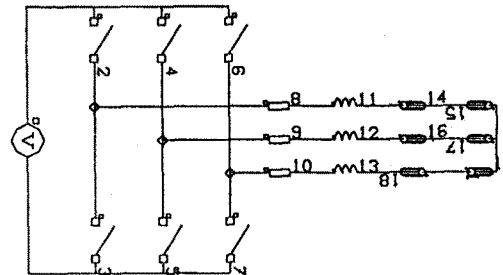


그림2. Flux2d를 이용한 FEM과 link시키기 위한 외부회로도

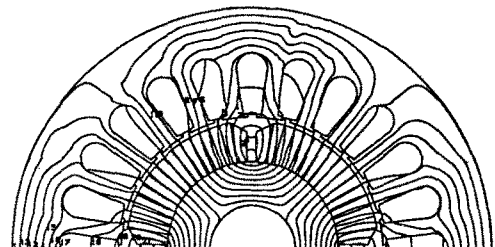


그림3. AC SERVO MOTOR의 Fluxlines ( $t=0.0002$  sec)

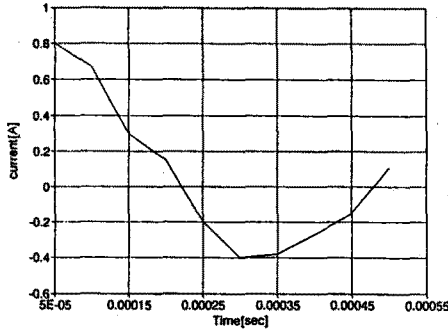


그림4. 전압원에서의 전류의 파형

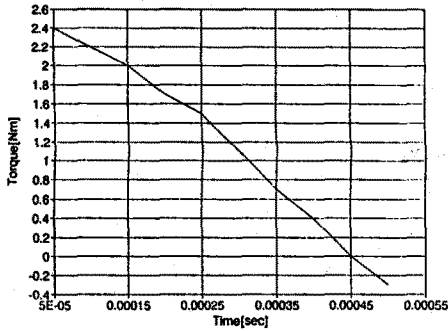


그림5. 시간에 따른 토크 특성

## 5 결론

AC Servo Motor의 정확한 특성 해석을 위하여 유한요소 해석 영역과 Motor의 전기적 외부회로와 연계하여 해석을 하였다. Servo Motor의 sequence에 따른 외부회로의 simulation은 상용 프로그램인 FLUX2D의 CIRFLU를 이용 하였고 유한요소 영역은 과도자계를 정식화하여 해석 하였으며 기동시의 torque, torque ripple 또는 cogging torque등의 motor 특성파악이 용이 하였다.

과도자계에서의 외부회로도 있는 경우의 유한요소 해석을 통해 실제의 제어조건을 모델링 할 수 있으며 계산결과도 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다. 앞으로의 과제는 소형모터에서 발생할 수 있는 end/edge effect를 고려한 3차원에서의 해석과 에너지저장이 높은 영구자석의 사용, 극이방성 영자석의 사용, 스테이터의 권선밀도를 높이는 것 등의 방법을 통한 서보 전동기의 소형화, 고효율화를 위하여 본 해석기법을 개선 보완하여 적용시키는 연구를 계속하는 것이다.

### \*참고문헌

- [1] P.Pillay, R.Krishnan, "Modelling of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. Mag. Vol. MAG-22, No.5., 1986
- [2] P.Pillay, R.Krishnan, "Control Characteristics and Speed Controller Design for a High Performance Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", IEEE PESC Record, 1987
- [3] T.M. Bowan, D. W. Novotny, "A New Synchronous Current-Regulated PWM Inverters", IEEE Trans on

- Industry Applications, Vol. IA-22, No. 4, May/June 1985
- [4] A. Domijan, Jr. and Y.Yin, "Single Phase Induction Machine Simulation Using the Electromagnetic Transients Program", IEEE Trans. Energy Conversion. Vol 9, 1994, 9
  - [5] Z.J.Liu, C. Bi, H.C Tan and T.S. Low "A Combined Numerical and Analytical Approach for Magnetic Field Analysis of Permanent Magnet Machines", IEEE Trans on Magnetics Vol 31, 1995, 5
  - [6] 전기자동차용 고효율 정량모터 설계기술개발에 대한 연구, 강원대학교 산업기술 연구소 1994, 9
  - [7] Flux2d users manual, 1995 Magsoft, USA