신경회로망을 이용한 지상 1차 방식 선형유도전동기의 추력 추정

[a]임달호,박승찬,박두진,원성홍* [a]권병일 [b]장석명
[a]한양대학교 전기공학과 [b]충남대학교 전기공학과

Thrust Prediction of a Moving Secondary-SLIM Using the Neural Network

[a]D.H.Im, S.C.Park, D.J.Park, S.H.Won* [a]B.I.Kwon [b]S.M.Jang
[a]Dept. of Elec. Eng., Hanyang Univ., [b]Dept. of Elec. Eng., Chungnam Univ.

Abstract - In short primary, short secondary Single-sided Liner Induction Motor (SLIM), the thrust calculation is difficult when the overlapped area changes between the primary and the secondary. To solve this problem, we construct neural network that its inputs are the secondary displacement and the slip, and predict the thrust.

1. 서 론

선형유도전동기(SLIM)는 크게 가동부가 1차측인 지상 2차 방식과 가동부가 2차측인 지상 1차 방식으로 나누어진다. 전자는 현재 자기부상열차 및 경량 전철의 추진용으로 쓰이고 있으며, 후자는 반도체 제조 공장의 공정간 반송, 병원내 서류 및 의약품 반송등에 이용되고 있다.[1] 2차측이 이동하는 단1차 단2차 지상 1차 방식 선형유도전동기의 속도 시뮬레이션을 하기위해서는 2차측의 위치와 속도에 대한 추력을 구하여야 하는데, 2차측이 이동할때, 1차측과의 overlap 된 면적이 변화하므로 이를 계산하기는 힘들다.[2] 따라서, 본 연구에서는 최근, 비선형 문제를 학습에 의하여 빠른 속도로 해석할 수 있는 신경회로망을 이용하여, 단1차 단2차 지상 1차 방식 SLIM 의 추력을 추정하였다. 그림1에 본 연구에서 제시한 신경회로망에 의한 추력추정방법의 흐름도를 나타내었다.

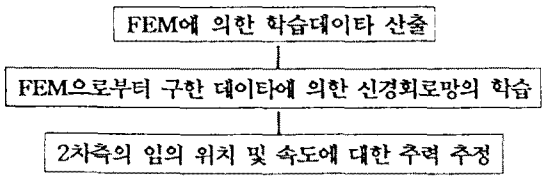


그림1. 신경회로망에 의한 추력추정

2. 신경회로망의 구성

2-1. 유한요소법에 의한 학습데이타 산출

인공 신경회로망을 구성하기 위해서는 학습데이타가 필요하며, 이것은 일반적으로 실험 또는 유한요소법과 같은 전자장 수치해석법으로부터 구해진다.[3] 본 연구에서는 유한요소법으로 2차측의 위치 및 속도에 따라서 학습데이타를 산출하였다.

그림 2는 단1차 단2차 지상1차방식 SLIM의 유한요소해석 모델을 나타내며, 이때의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

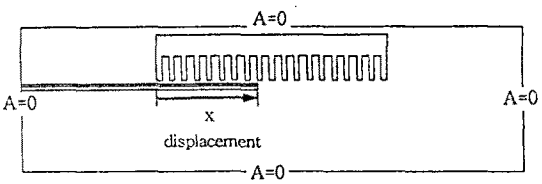


그림 2. 지상1차방식 SLIM의 해석 모델

$$\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2}\right)=-J_z+\sigma\left(j\omega A_z+v_x\frac{\partial A_z}{\partial x}\right) \quad (1)$$

여기서 σ 과 v_x 는 각각 2차 도체판의 도전율 및 이동속도이며, ω 는 전원주파수이다. 식 (1)의 해를 구하기 위하여 Galerkin 법으로 정식화하면 식 (2) 를 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{n}A_i\int_s\left\{\frac{1}{\mu}\frac{\partial N_i}{\partial x}\frac{\partial N_j}{\partial x}+\frac{1}{\mu}\frac{\partial N_i}{\partial y}\frac{\partial N_j}{\partial y}+j\omega\sigma N_iN_j+\sigma v_xN_i\frac{\partial N_j}{\partial x}\right\}dxdy=\int_s JN_jdxdy \quad (j=1,2,..,n) \quad (2)$$

여기서, n 은 절점수, N_j 는 보간함수이다. 또한, 식 (2)를 미지 절점의 자기벡터포텐셜과 각 상전류에 관하여 정리하면 식 (3) 과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} H_{1,1} & \cdots & H_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ H_{n,1} & \cdots & H_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{1,1} & \cdots & M_{1,3} \\ \vdots & & \vdots \\ M_{n,1} & \cdots & M_{n,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

또한 각 상에 관한 회로방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{d\phi_f}{dt} + R_f i_f + L_o \frac{di_f}{dt} = V_f \quad (4)$$

여기서, f는 각 상을 나타내며, R 과 L_o 는 각 상의 저항과 1차 권선의 코일 End 부분의 누설 인덕턴스이다. 식 (4)를 식 (3)과 같은 행렬 형태로 정리하면 식 (5)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} Q_{1,1} & \cdots & Q_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ Q_{n,1} & \cdots & Q_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a+j\omega L_o & 0 & 0 \\ 0 & R_b+j\omega L_o & 0 \\ 0 & 0 & R_c+j\omega L_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

선형유도전동기를 정전압으로 구동하는 것으로하여, 식 (3)의 자계방정식과 식 (5)의 전압방정식을 결합하면, 식 (6)와 같이 자기벡터포텐셜과 각 상의 전류를 미지수로 하는 계방정식을 구할 수가 있다.[4]

$$\begin{bmatrix} H & M \\ Q & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (A) \\ (I) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0) \\ (V) \end{bmatrix} \quad (6)$$

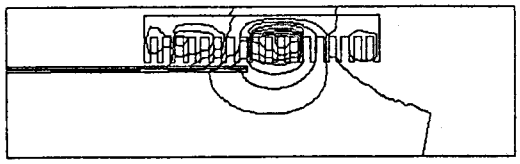
한편, 추력은 식 (7)로 주어지는 Maxwell 응력법을 이용하여 계산하였으며, 이때의 적분 경로는 2차측 표면만을 취하였다.

$$F(x,s) = \int_l \frac{h}{2\mu_0}\{(B_x^2 - B_y^2)n_x + 2n_y B_x B_y\}dl \quad (7)$$

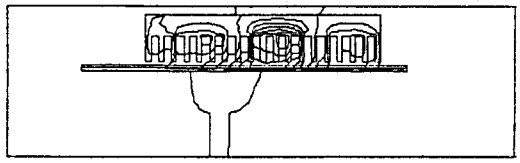
여기서, x 는 2차측의 위치, s 는 슬립, h 는 1차 철심의 적층폭을 나타낸다. 그림 3은 유한요소법에 의한 SLIM의 자계해석 결과를 몇개의 2차측 위치 및 속도에 대하여 나타낸것이다. 표 1은 유한요소법으로부터 구한 260개의 학습데이타 set 중의 일부이다.

표 1. 유한요소법에 의한 학습데이타 Set (260개)

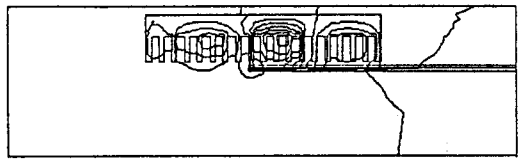
2차측의 위치 x (2.4 - 49.3 cm)	슬 립 s (0.4 - 1.6)	추력 F(x,s)[N]
2.4	0.4	0.3844
2.4	0.5	0.3374
.	.	.
24.6	0.8	32.6904
24.6	0.9	33.7989
.	.	.
49.3	1.5	0.3980
49.3	1.6	0.4206



(a) slip = 0.9, x = 9.6 [cm]



(b) slip = 0.7, x = 24.6 [cm]



(c) slip = 0.6, x = 39.7 [cm]

그림 3. 단1차 단2차 지상 1차 방식 SLIM의 자속분포

2-2. 신경회로망에 의한 추력 추정

본연구에서는 그림4에 나타낸바와 같이 은닉층을 3층, 각 은닉층의 뉴런수는 30개로 한 신경회로망을 구성하였으며, 여기서 입력은 2차측의 위치(x) 및 슬립(s) 이고 이때의 출력은 추력($F(x,s)$) 이다.

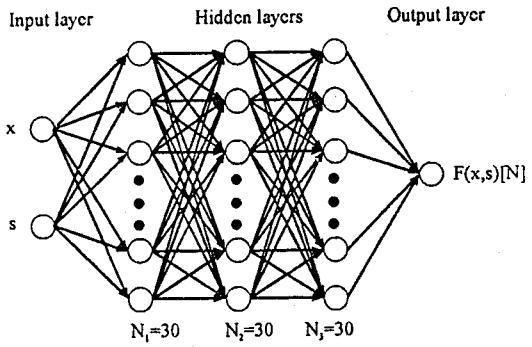


그림 4. 추력 추정을 위한 신경회로망

2-1절에서 구한 학습데이타에 의하여 신경회로망을 학습하기 위하여 Backpropagation 알고리즘을 사용하였다.[5] 이 알고리즘은 최소자승 알고리즘의 비선형적인 확장이며, 연결강도의 최적 근사치를 얻기위하여, 또한 주어진 입력에 대한 네트워크의 출력값을 기대값과 가능한한 가깝게 하기위하여 연결강도를 조정해나가는 최급강하법을 사용한다. 이 알고리즘에 의한 연결강도의 변화 Δw_{ij}^{s} 에 대한 수식은 다음과 같다.

$$w^{k}_{i}{}^{(k-1)}_{j}(n+1) = w^{k}_{i}{}^{(k-1)}_{j}(n) + \Delta w^{*k}_{i}{}^{(k-1)}_{j}(n+1)$$

$$\Delta w^{*k}_{i}{}^{(k-1)}_{j}(n+1) = \eta \ [\ \Delta w^{k}_{i}{}^{(k-1)}_{j}(n+1)] - \alpha \ [\ \Delta w^{*k}_{i}{}^{(k-1)}_{j}(n)]$$

여기서,

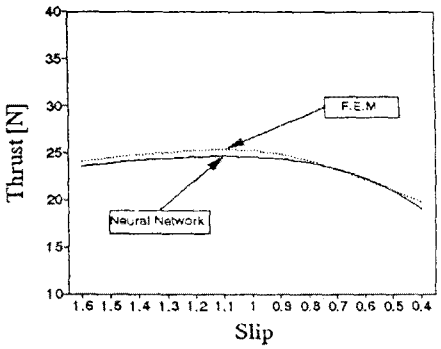
$$\Delta w^{k}_{i}{}^{(k-1)}_{j} = \Delta v^{k}_{i} f_s'(u^{k}_{i}) v^{(k-1)}_{j}$$

$$\Delta v^{k}_{i} = \varepsilon (v^{k}_{i} - \hat{y}_i) \qquad (k = N)$$

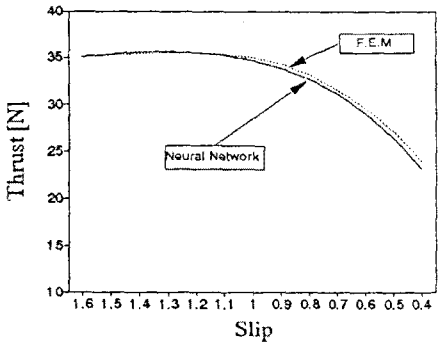
$$\Delta v^{k}_{i} = \sum_{j} \Delta v^{(k+1)}_{j} f_s'(u^{(k+1)}_{j}) \ w^{(k+1)}_{j}{}^{k}_{i} \qquad (k = N-1,..,1)$$

그리고 n은 학습횟수, α는 상수, $\hat{y}$ 는 기대값, ε 는 작은값의 정수이며 $\Delta w^{k}_{i}{}^{(k-1)}_{j}(n)$ 는 연결강도의 변화량으로 오차진동을 적게하여 수렴속도를 빨리하기 위하여 첨가한 모멘텀항이다.

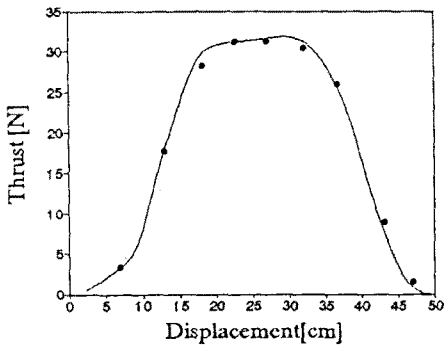
그림 4는 신경회로망을 이용하여 추정한 추력값을 유한요소법으로 계산한 결과와 비교한 예를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 4로 부터, 본 연구에서 제안한 신경회로망에 의한 지상 1차 방식 선형유도전동기의 추력 추정이 정확하게 이루어졌음을 알 수 있다.



(a) x= 16 [cm]



(b) x= 31.3 [cm]



— 신경회로망 • F.E.M

(c) slip=0.8

그림 4. 추력추정의 예

3. 결 론

본 연구에서는 단1차 단2차 지상 1차방식 선형유도전동기의 2차측 위치와 속도에 따른 추력을 추정하는 데에 있어서의 난점을 해결하기위해 신경회로망을 이용한 방법을 제시하였다. 본 논문에서와 같이 구성된 신경회로망을 이용하면 보다 정확한 분산배치형 지상 1차 방식 선형유도전동기의 속도 시뮬레이션이 가능할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] 正田英介, "リニアドライブ技術とその應用", オーム 社, 1991.

[2] 小豆澤, "搬送システム用モータの勵磁特性の檢討", 昭和62年電氣學會全國大會 841, pp.1041 - 1042

[3] 矢川元基, "ニューラルネットワーク", 培風館, 1992

[4] 임달호, 박승찬, 박두진, "신경회로망과 유한요소법을 이용한 편측식 선형유도전동기의 최적설계에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회논문집 (1993) pp.1004 - 1006

[5] Paul J. Werbos, Backpropagation through time : What it does and how to do it, *Proc of IEEE: Special Issue on Neural Network*, vol. 78, no. 10, Oct. 1990

* 이 연구는 한국과학재단 연구비 지원에 의한 일부 결과임. (과제번호 92-47-00-02)