

전자장과 온도장을 혼합 적용한 유한요소법에 의한 선형유도전동기의 특성해석

°김 문경, 이 중호, 현 동석

漢陽大學校 電氣工學科

The Dynamic Characteristic Analysis Using
Coupled Magnetic & Thermal FEM in Linear Induction Motor

°Moon-Kyung Kim, Jung-Ho Lee, Dong-Seok Hyun

Dept. of Electrical Eng., Hanyang University

ABSTRACT

In an controlled electric machine, the variations of motor parameters such as stator and rotor time constant are caused by the temperature rise, thus it is needed to calculate the accurate parameter through the dynamic characteristic analysis considering the temperature variation. In this paper, the dynamic characteristic analysis method of vector controlled LIM is proposed using coupled magnetic & thermal 2D FEM taking into account the movement.

1 序論

線形誘導電動機는 (Linear Induction Motor : LIM) 構造가單純하고, 維持保守가 容易하며, 變換裝置 없이 直線 推進力を 얻을 수 있는 等의 長點을 가지고 있으므로 工場自動化, 事務自動化 등과 같이 直線運動이 必要한 시스템에 서보 電動機로서 그 用途가 漸次 增加되고 있다.

LIM을 高性能 動的特性이 要求되는 서보 시스템으로 實現하기 위해서는 瞬時推力制御가 可能한 벡터 制御가 必要하다.

그러나, 誘導機의 正格은 最大許容 上昇溫度에 의하여 決定되며, 이에따라 絶緣의 種類도 달라지게 된다. 溫度上昇은 抵抗損과 鐵損에 의하여 주로 發生되며, 인버터 驅動��에는 高調波電流에 의한 附加의 銅損과 鐵損에 의하여 正弦波 驅動時 보다一般的으로 20-30% 增加한다. 溫度上昇은 Motor 回路定數들을 變化시키고, 이로 인해 Torque 나 電流 등에 影響을 미치게 되고, 制御系에 構成된 1次, 2次 時定數의 變動이 생겨 制御에 어려움이 따르게 된다.

따라서, 誘導機의 特性解析時에 溫度解析은 우선되어야 하며, 이에따른 Motor의 回路定數 變化分析은 制御回路 構成에 필수적이라 할 수 있다.

實驗에 의한 溫度分析은 많은 어려움을 隨伴하므로, 數值解析적인 方法이 그重要性을 더해가고 있다.[1]

本論文에서는 電磁場과 溫度場을 混合適用한 2次元 有限要素法에 의한 벡터制御用 線形誘導電動機의 動特性解析模擬實驗技法을 提案하였다.

制御系의 構成은 一般的인 間接벡터制御 알고리즘으로 構成하였으며, 解析領域(FEM)에 移動을 考慮한 過度狀態 解析 技法을 適用하였다.[2] 이 技法을 통하여 溫度에 따른 Motor 回路定數 變化를 觀察하였다.

2 解析方法

2.1 解析 모델

LIM의 2-D 有限要素 解析모델을 그림1에 나타냈고, 仕様은 다음과 같다.

표1 實驗機의 仕様

相 數	3상	一次側 높이	49.0 mm
極 數	3극	Aluminium 두께	4.0 mm
一次側 길이	198.5 mm	Back iron 두께	6.0 mm
一次側 幅	80.0 mm	空隙	3.0 mm
슬롯 피치	8.5 mm	슬롯 깊이	34.8 mm
슬롯 幅	5.5 mm	極 間隔	51.0 mm
一次側 質量	7 Kg	每極 每相當 슬롯 數	2

Coupled Electromagnetic & Thermal field FE Region

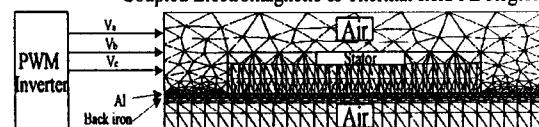


그림1 LIM의 電壓原 解析모델

2.2 電磁場에서의 移動을 考慮한 有限要素 解析

LIM의 磁氣ベ터 포텐셜에 관한 支配方程式은 다음과 같다.

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} = \vec{J}_o - \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v} \times \vec{B} \right) \quad (2.1)$$

여기서, σ 는 Russell and Norsworthy factor에 의한 橫方向端部效果를 考慮한 二次側 導體의 等價 導電率이다.[3] \vec{v} 는 移動部分의 速度이다. Moving coordinate system을 이용하여, 方程式(2.1)은 (2.2)로 變形할 수 있다.

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} = \vec{J}_o - \sigma \frac{d \vec{A}}{dt} \quad (2.2)$$

系方程式과 結合된 回路方程式은 다음과 같다.

$$[U] = [R] [I] + [L_o] \frac{d}{dt} [I] + [E] \quad (2.3)$$

여기서, $[E] =$ 捲線의 起電力

$[U] =$ 供給 電壓

(2.2)를 풀기 위해, Galerkin法을 사용하고, 解의 時間의 变化를 考慮하기 위해 時間に 대해 離散化한 후, 各 時刻에 대한 解를 구하는 時間差分法을 適用했다.

따라서 (2.2)와 (2.3)을 结合한 支配方程式은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left\{ \left(\begin{array}{cc} \frac{1}{\mu}S & -N \\ 0 & R \end{array} \right) + \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{cc} T & 0 \\ L_{eff}N^T & L \end{array} \right] \right\} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}, \\ & = \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{cc} T & 0 \\ L_{eff}N^T & L \end{array} \right] \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_{t-\Delta t} + \begin{bmatrix} 0 \\ U \end{bmatrix}_t, \quad (2.4) \end{aligned}$$

2.3 温度場에서의 有限要素 解析

溫度場에서, 각要素에 대한 热擴散 境界條件과 热原을 지닌 热傳導 問題의 時間微分 支配方程式은 다음과 같다.[1]

$$[M^e][T^e] + ([S^e] + [H^e] + [G^e])[T^e] = [F^e] + [P^e] \quad (25)$$

$[T^*]$	時間 微分 溫度 벡터	$[M^*]$	比熱 行列
$[S^*]$	熱傳導 行列	$[H^*]$	熱對流 行列
$[G^*]$	熱抵抗 行列	$[T^*]$	溫度 벡터
$[F^*]$	熱源 벡터	$[P^*]$	熱對流 벡터

$$[M^a] = \rho c \frac{A}{12} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{vmatrix}, \quad [G^a] = -\rho_0 a f^2 \frac{A}{12} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{vmatrix}$$

$$[S^e] = \frac{k}{4A} \begin{vmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1b_2 + c_1c_2 & b_1b_3 + c_1c_3 \\ b_1b_2 + c_1c_2 & b_2^2 + c_2^2 & b_2b_3 + c_2c_3 \\ b_1b_3 + c_1c_3 & b_2b_3 + c_2c_3 & b_3^2 + c_3^2 \end{vmatrix}$$

$$[H^s] = \frac{h_{ij}l_{ij}}{6} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} + \frac{h_{jk}l_{jk}}{6} \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} + \frac{h_{ki}l_{ki}}{6} \begin{vmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{vmatrix}$$

$$[P^e] = \frac{h_{ij}l_{ij}T_c}{2} \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} + \frac{h_{jk}l_{jk}T_c}{2} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix} + \frac{h_{ki}l_{ki}T_c}{2} \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

α : 비저항의 온도계수 [/ K]

c : 비열 [$J/(Kg \cdot K)$]

k : 열전도도 [$W(m \cdot K)$]

m : 밀도 [kg/m^3]

ρ_0 : 전기저항(at $T = T_0$) [$\Omega \cdot m$]

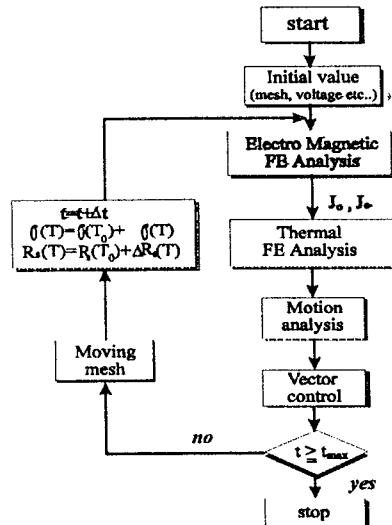


그림2 動特性 解析 順序圖

2.4 시뮬레이션 시스템 構成

FEM을 解析領域에 適用하여 시뮬레이션을 행함에 있어, 制御系를 構成하는 等價回路에 의한 回路定數와 FEM解析領域의 回路定數와의 等價性을 確認하기 위해 LIM의 定常狀態 推力值 等價回路法과 FEM으로 계산 比較하였고,[4] 制御알고리즘은一般的인間接ベタ制御方法을 使用하였다.

시뮬레이션은 電磁場만의 動特性解析과 電磁場과 溫度場을 混合適用한 動特性解析의 各各의 境遇에 대해서 隨行하였다.

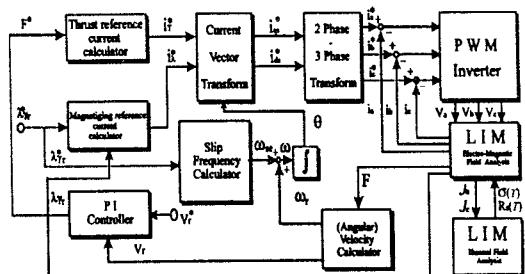


그림3 시뮬레이션 시스템 構成圖

3 시뮬레이션 結果

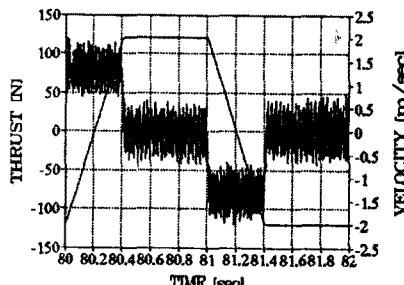
그림4(a) - 그림5(b)는 全體의 시뮬레이션 期間동안 特定 두 부분에서의 推力, 速度應答, 1次側 滾線抵抗과 2次側 平均 遊雷率의 變化를 보여준다.

그림4(b)과 그림5(b)의 시뮬레이션 결과, 1차側抵抗의變化特性이 거의線形의으로 변하였고, 2차側導電率은 各區間에서 거의 같은 樣相으로變化되는 것을 볼 수 있다.

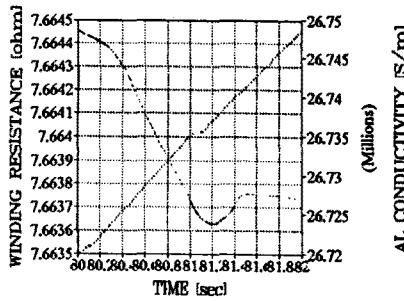
그림6에서 보이는 것처럼, 제어계系에構成된 슬립각速度, 励磁電流命令計算器에 具現한 2次 時定數는 2次側 平均導電率이 变함에 따라 實際의 時定數와 差異를 보였으며 따라서, 電磁場의 解析과 電磁場과 温度場의 混合適用된 解析에서의 變換角이 差異를 보인다.

그림7은 變換角의 差異로 인한 각 1次側 相電流에서의 差異를 나타내고 있다.

그림8은 解析 모델의 等溫度 分布를 보여준다.

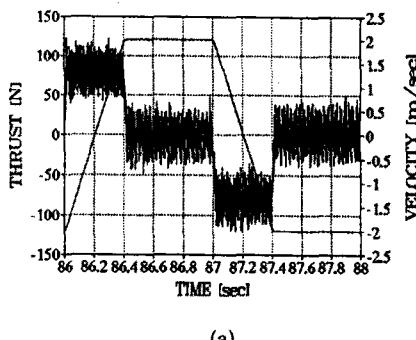


(a)

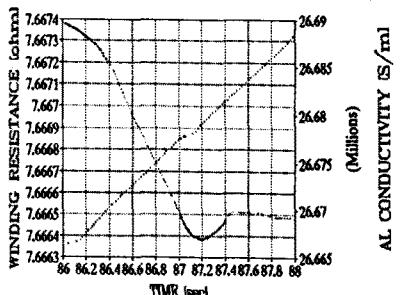


(b)

그림4 推力, 速度, 捲線抵抗, 2次 平均導電率 應答 特性



(a)



(b)

그림5 推力, 速度, 捲線抵抗, 2次 平均導電率 應答 特性

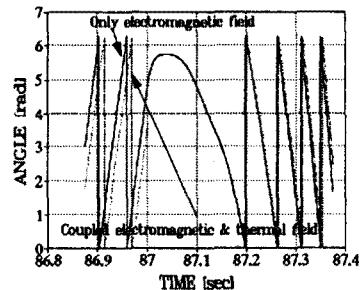


그림6 變換角 特性

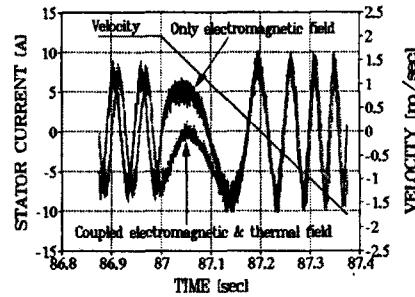


그림7 相電流 特性

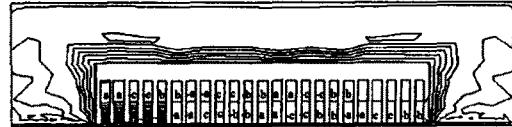


그림8 等溫 分布 曲線

4 結論

본 論文에서는 電磁場과 溫度場을 混合適用한 2次元 有限要素法에 의한 ベ터制御用 線形誘導電動機의 動特性解析模擬實驗技法을 提案하였다.

提案된 方法을 통하여 溫度上昇에 따른 1次側 電流와 2次側 導電率의 變化와 이들의 變化로 인한 變換角과 1次側 相電流의 應答 特性을 詳細히 觀察할 수 있었다.

따라서, 本 論文에서 提案된 技法은 Motor의 解析, 設計와 制御回路 構成 알고리즘 開發에 有用하게 쓰여질수 있다.

참고문헌

- [1] J. A. D. Pinto, A. P. B. Coimbra and C. F. R. L. Antunes, "Transient Heating and Cooling Analysis in an Electromagnetic Device", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 30, No. 5, pp 3339-3342, September, 1994.
- [2] Dal-Ho Im, Byung-il Kwon, Jung-Ho Lee, " Dynamic Characteristics Analysis of LIM's Vector Control Using FEM", LDIA'95, pp307-310, 31 May~2 June, 1995.
- [3] R. L. Russell and K. M. Norsworthy, "Eddy current and wall losses in screened rotor induction motors," Proc. IEE, Vol. 105A, pp.163-175, 1958.
- [4] S. Nonaka, T. Higuchi, "Approximate equations for calculation of characteristics of single-sided linear induction motors," Trans. IEE Japan, Vol. 102, No.1, pp.152-159 March 1987.