

## IM의 궤환 선형화에 대한 연구

임재훈,장기열,박승규,안호균,곽군평  
창원대학교

### A study on the feedback linearization for Induction Motor

Jae-hun Lim, Ki-yeol Jang, Seung-kyu Park, Ho-goon Ahn, Gun-pyung Kwak  
Changwon National University

**Abstract** - This paper presents a novel nonlinear speed control strategy for induction motor utilizing exact feedback linearization with states feedback. The speed and flux control loops utilize nonlinear feedback which eliminates the need for tuning, while ordinary proportional-integral controllers are used to control the stator current of d-axis the speed. The control scheme is derived in rotor field coordinates and employs an appropriate estimator for estimation of the rotor flux angle, flux magnitude.

#### 1. 서 론

유도전동기는 구조가 간단하고 견고하여 고장이 적고 가격이 저렴하여 유지보수가 좋은 특징을 가지지만 전기량인 전압과 전류, 기계량인 토크와 속도가 결합된 비선형 시스템이다. 이와 같이 비선형 특징을 가지는 유도전동기의 제어시 순시적인 토크의 발생으로 인해 제어가 어려웠으나 벡터제어에 의해 이러한 문제에 대해 해결을 하게 됨에 따라 최근의 산업현장에서는 AC 전동기의 사용이 급증하고 있으며 그에 따른 제어의 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 일반적인 유도전동기의 제어방법은 PI제어기를 사용하는 것이다. 즉 전류제어루프, 자속제어루프, 속도제어루프 등에 각각 PI제어기를 사용하는 것이 일반적이거나 유도전동기의 비선형성 때문에 제어기 이득의 튜닝이 쉽지않다.[1] 일반 선형제어이론을 적용시킬 수 있는 방법으로 궤환선형화방법이 있으나 수학적으로 어렵고 유도전동기의 파라미터를 정확히 알아야만 적용할 수 있다는 단점 때문에 널리 사용되지는 못하고 있는 실정이다.[2]-[10] 이에 PI제어기와 궤환선형화를 적절히 사용하여 실용적인 제어를 제안한 연구가 발표되었다.[11] 그러나 이 논문은 전류제어에 있어서 PI제어기를 사용하기 때문에 비선형성에 대한 PI제어기의 한계를 극복하지는 못하고 있다. 본 연구에서는 비선형성을 많이 포함하고 있는 d축의 전류제어에 있어 궤환선형화를 이용하여 선형화시킴으로써 궤환선형화의 장점을 극대화시킨 후 PI제어기와 병행하여 사용함으로써 실용적이고 고성능을 갖는 유도전동기의 제어방법을 제안한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 유도전동기의 동특성

5차 계통의 비선형 유도전동기의 상태 방정식 모델은 다음과 같이 나타내어진다.

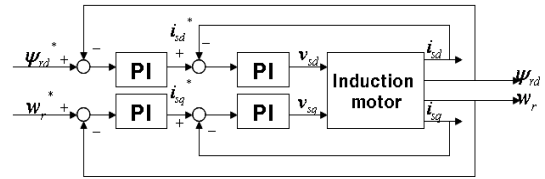
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} w_r \\ \psi_{rd} \\ \theta_{rf} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu\psi_{rd}i_{sq} - (\frac{D}{J})w_r - (\frac{1}{J})T_L \\ -\alpha\psi_{rd} + \alpha M_{sd} \\ n_p w_r + \frac{\alpha M_{sq}}{\psi_{rd}} \\ -\gamma i_{sd} + \alpha\beta\psi_{rd} + n_p w_r i_{sq} + \frac{\alpha M_{sq}^2}{\psi_{rd}} \\ -\gamma i_{sq} + \beta n_p w_r \psi_{rd} - n_p w_r i_{sd} - \frac{\alpha M_{sq} i_{sd}}{\psi_{rd}} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

d 축의 회전자속은  $\psi_{rd}$ 이며 q 축의 회전자속은 정의에 의해  $\psi_{rd} = 0$ 이다. 회전자속의 기계적 속도는  $w_r$ , 회전자속위치는  $\theta_{rf}$ . D는 마찰계수,

J는 관성모멘트,  $T_L$ 은 부하토크이다.  $v_{sd}$ 와  $v_{sq}$ 는 고정자 d,q축의 전압이며  $i_{sd}$ 와  $i_{sq}$ 는 그에 상응하는 전류이다.  $R_s$ 와  $R_r$ 은 고정자와 회전자속의 저항,  $L_s, L_r$ 은 고정자와 회전자의 자가 인덕턴스, M은 고정자와 회전자의 상호 인덕턴스이다. 회전자속은 다음과 같이 정의한다.  $\alpha \cong R_r/L_r$ ,  $\sigma \cong 1 - M^2/(L_s L_r)$ ,  $\beta \cong M/(\sigma L_s L_r)$ 는 누설계수이며,  $\gamma \cong M^2 R_r/(\sigma L_s L_r^2) + (R_s/(\sigma L_s))$ ,  $n_p$ 는 극의 수  $\mu \cong n_p M/(J L_r)$ 이다.

##### 2.2 Field-Oriented 속도제어

다음은 유도전동기의 벡터제어에 대한 간략한 블록으로 나타낸 것이다.



<그림 1> Field Oriented Control

기존의 벡터제어는 전압과 전류의 PI제어를 통해 사용자가 원하는 유도전동기에 인가되는  $v_{sd}$ 와  $v_{sq}$ 는 다음식에 의해 결정되어지고,

$$v_{sd} = K_{dP}(i_{sd}^* - i_{sd}) + K_{dI} \int (i_{sd}^* - i_{sd}) dt \quad (2)$$

$$v_{sq} = K_{qP}(i_{sq}^* - i_{sq}) + K_{qI} \int (i_{sq}^* - i_{sq}) dt \quad (3)$$

위 전류 루프의 경우 실제 회전자속 전류와 그에 상응하는 기준입력이 충분한 빠른 응답으로 같아진다는 가정하에서 전류 PI 제어부의 출력  $i_{sd}^*$ 와  $i_{sq}^*$ 는 다음과 같은 식에서 결정되어진다.

$$i_{sd}^* = K_{p1}(\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) + K_{p1} \int (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) dt \quad (4)$$

$$i_{sq}^* = K_{p2}(w_r^* - w_r) + K_{p2} \int (w_r^* - w_r) dt \quad (5)$$

위와 같은 기존의 전류 PI 제어기에서는 IM의 비선형 특성으로 인해 고성능 특성을 얻기 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 비선형 궤환선형화 제어기법을 사용하는 사례가 있다. 하지만 이러한 비선형궤환선형화 제어기법은 수학적으로 복잡하며 모델의 동특성을 정확하게 파악하고 있어야 한다는 단점이 있다. 전류제어는 PI제어기를 사용하고 나머지는 궤환선형화를 이용하는 제어방법이 제안되었다.[11]

##### 2.3 제안된 궤환 선형화 제어 기법

본 연구에서는  $i_{sq}$  전류의 전류 제어 부분만 궤환 선형화기법을 적용하고 나머지 부분에 대해서는 기존의 PI 제어기법을 사용하는 방법을 제안한다. 궤환 선형화하고자 하는  $i_{sq}$ 의 동특성은 식(1)에서 다음과 같다.

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\gamma i_{sq} + \beta n_p w_r \psi_{rd} - n_p w_r i_{sd} - \frac{\alpha M_{sd} i_{sq}}{\psi_{rd}} \quad (7)$$

$i_{sq}$ 의 비선형 부분에 대한 궤환선형화를 위한 입력을 다음과 같이 결정한다.

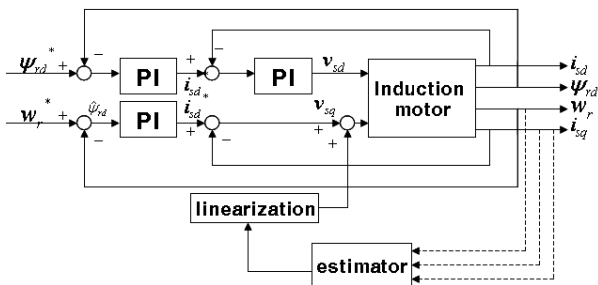
$$v = \alpha \gamma i_{sq} - \beta n_p w_r \widehat{\psi}_{rd} + n_p w_r i_{sd} + \frac{\alpha M_{sd} i_{sq}}{\widehat{\psi}_{rd}} \quad (8)$$

이때 a는 응답특성을 빠르게 하기 위한 상태 피드백 이득이다.

궤환 선형화에 사용하는 추정 자속  $\widehat{\psi}_{rd}$ 는 상태추정기에 의한 추정값이며, 상태추정기는 다음과 같은 형태를 사용한다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \widehat{\psi}_{rd} \\ \widehat{\theta}_{rf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha \widehat{\psi}_{rd} + \alpha M_{sd} \\ n_p w_r + \frac{\alpha M_{sd}}{\widehat{\psi}_{rd}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

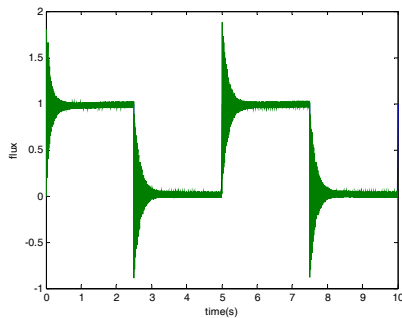
본 연구에서 제안된 방법을 도식화로 나타내보면 다음과 같다.



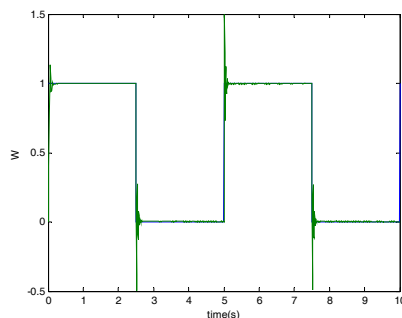
<그림 2> 제안된 궤환 선형화 기법

위와 같이 제안된  $i_{sq}$  궤환 선형화기법을 통해 기존의 PI벡터제어보다 우수한 성능의 제어 특성을 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있다.

## 2.4 컴퓨터 시뮬레이션



<그림 3> 기존의 PI 벡터제어에 의한 속도응답 특성



<그림 4> 제안된 궤환 선형화 기법과 PI를 이용한 속도응답 특성

시뮬레이션에 사용되어진 파라미터의 값은 다음과 같다.

$n_p = 1$ ,  $R_s = 3.05 \Omega$ ,  $R_r = 2.21 \Omega$ ,  $L_s = 0.234 H$ ,  $L_r = 0.306 H$ 이며, 상호 인덕턴스 값  $M = 0.025 H$ 이다. 또한 모터의 부하 관성 및 마찰 계수는 각각  $J = 0.0002 Nmsec^2$ ,  $D = 0.0001 Nmsec$ 로 정의하였다. 속도의 기준 입력력은 크기 1에 듀티비 50%의 펄스를 사용하였고, 자속의 기준 입력과 부하 토크의 값은 각각 0.8 Wb, 0.8Nm의 스텝 파형을 선택하였다.

## 3. 결 론

기존의 전압과 전류를 PI 제어하는 기존의 벡터 제어에 궤환 선형화 기법을 접목하여 새로운 형태의 제어 기법에 대한 시뮬레이션을 해보았다. 속도를 결정짓는 q-축의 전류  $i_{sq}$ 에서만의 궤환 선형화를 통해 유도 전동기의 비선형성에 대한 부분을 상쇄시키고 시스템이 선형성을 가지도록 하였다. 또한 빠른 응답 특성을 얻기 위해  $i_{sq}$ 의 궤환 신호에 대한 상태 피드백 이득을 곱해주는 상태 피드백의 개념을 이용하였다. 제안된 방법에 대한 시뮬레이션을 통해 기존의 PI 기반의 벡터 제어에서 보다 빠른 응답 특성과 보다 적은 오차를 가짐을 확인할 수 있었다. 참고 문헌 [1]에서 제안된 궤환 선형화 방법보다 간단하면서도 벡터드라이버 내에서 궤환선형화를 구현함으로써 속도제어나 위치제어시 PI제어의 이득결정을 보다 용이하고 나은 제어 성능을 가질 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

## [참고 문헌]

- [1] F.N.Koumboulis, T.K.Boukas, and B.G.Merzios, "PID control for induction motors in field coordinates," in Proc. 8th IEEE Mediterranean Conf. Control Automation, Rio, Greece, July 2000.
- [2] D.W.Novotny and T.A.Lipo, vector control and Dynamics of AC Drives. London, U.K :Oxford University Press, 1998
- [3] W.Leonhard, control of Electrical Drives. New York : Springer-Velag, 1996
- [4] A. Insidori, Nonlinear Control Systems New York, 1995
- [5] D.G.Taylor, "Nonlinear Control of electric machines : An overview," IEEE Control Syst. Mag., vol.14, pp.41-51, Dec.1994.
- [6] A. De Luca and G. Ulivi, "Design of an exact nonlinear controller for induction motor," IEEE Trans. Automat. Contr., vol AC-34, pp.1304-1307, Dec. 1989.
- [7] J. Chiasson, "Dynamic feedback linearization of the induction motor," IEEE Trans. Automat. Contr., vol.38, pp.1588-1594, Oct 1993.
- [8] M.bodson, J.Chiasson, and R.Novotnak, "High performance induction motor control via input-output linearization," IEEE Contr.Syst.Mag., vol 14, pp 25-33, Aug.1994
- [9] R.Marino, S. Peresada, and P. valigi, "Adaptive partial feedback linearization of induction motors," in Proc.29th IEEE conf. Decision and Control, Dec. 1990, pp.313-3318
- [10] R. Ortega, C.Canudas, and S.I.Seleme, "Nonlinear Control of induction motors: Torque tracking with unknown load disturbance," IEEE Trans. Automat. Contr., vol 38, pp.1675-1680, Nov.1993.
- [11] High performance induction motor speed control using exact feedback linearization with state and state derivative feedback. boukas, T.K., Habeler, T.G., IEEE transaction on power electronics, vol. 19, no.14, 2004