

자화 인덕턴스 보상구조를 가지는 속도센서없는 벡터 제어시스템

권영길, 최정수, 김삼욱\*, 김영석  
 인하대 전기공학과, \*인하공전 전기과

Speed Sensorless Vector Control System with the Magnetizing Inductance Compensation Structure

Young-Gil Kwon, Jung-Soo Choi, Sang-Uk Kim\*, Young-Seok Kim  
 Inha University, \*Inha Technical Junior college

**Abstract** - In this study, the speed sensorless vector control system with the magnetizing inductance compensation structure is presented. The estimations of the rotor speed and the magnetizing inductance using the terminal voltages and currents are performed with the reduced order Gopinath flux observer. The rotor speed is estimated by the torque producing current which is derived from the estimated value of the rotor flux and the measured stator currents. In order to compensate the variation of the magnetizing inductance under the saturated conditions, we also established the compensation scheme which is made with the instantaneous reactive power. The validity of the proposed method is verified by simulation results.

1. 서 론

유도전동기의 속도제어 분야에 있어서 벡터제어의 실현은 마이크로프로세서와 전력소자의 급속한 발달로 인하여 가능하게 되었다. 유도전동기의 벡터제어는 타여자 직류전동기와 같이 계자전류와 전기자전류를 독립적으로 제어하기 위해 순시적인 자속의 위치를 파악할 수 있어야 제어가 가능하다. 자속의 위치정보를 알기 위해서 주로 속도센서가 사용되어왔다. 그러나, 속도센서의 사용은 시스템의 견실성, 보수성 또는 사용환경에 따라 바람직하지 못한 경우가 있어 속도센서없는 벡터제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-2].

유도전동기 벡터제어에서 전동기 정수는 하나의 제어 이득으로 토오크와 속도제어에 사용되고, 속도센서없는 벡터제어의 경우는 자속의 위치 정보가 전동기 정수들과 상태량으로부터 추정되므로 전동기 정수들에 대한 정보의 정확성에 따라 추정성능 및 제어성능이 영향을 받게 된다. 이러한 전동기 정수들은 기존의 전동기 정수 측정법 또는 제조사에서 제공하는 정수값으로 정격점에서 구한 값이거나 정상상태에서 얻어진 것이다. 그러나 전동기 정수는 온도상승, 자속포화, 전동기 운전주파수 및 변환기의 캐리어 주파수(Carrier Frequency) 등에 따라 순시적으로 변동하게 된다. 전동기 정수 변동에 대한 고려로써 첫째, 전동기 정수변동에 강인한 제어기 설계에 대한 연구 둘째, 정수의 변화를 온라인으로 파악하는 연구인 정수동정(Parameter Tuning)으로 나뉘어 진행되고 있으나 고성능 벡터제어를 위해서는 정수변동에 강인한 제어기 분야보다는 정확하게 정수변동을 파악하는 연구가 더 효과적이라 여겨지고 있다.

특히, 순시적인 과부하나 급가·급속 운전에 의해서

유도전동기의 주자속에 포화가 발생하고 비선형적 자속의 포화는 전동기 인덕턴스를 변화하게 한다. 유도전동기 포화시 벡터제어와 인덕턴스변동에 대한 선행연구로, R.J.Kerkman은 포화를 고려한 일반화된 모델을 제안하였으며[3], E.Levi는 자속포화시 비선형적인 인덕턴스변동에 대한 보상제어기를 가지는 벡터제어시스템을 제안하였다[4]. 또한 I.Takahashi등은 무효전력모델로써 인덕턴스를 보상하는 방법을 제안한 바 있다[5]. 이러한 방법들은 속도센서를 이용하여 인덕턴스 변동을 보상하는 구조를 갖고 있으나 속도센서없는 연구로까지 확장되어 적용되고 있지는 않다.

본 논문에서는 축소차원 Gopinath 관측기를 구성하고 이로부터 회전자자속을 추정하였다. 추정된 회전자자속과 측정된 고정자전류로부터 토크분전류를 구하고, 토오크분 지령치전류와의 오차로부터 회전자 속도를 추정하였다. 또한 측정된 실제 무효전력량과 인덕턴스의 함을 포함하는 추정된 무효전력량과의 오차를 구하였다. 무효전력량 오차에 의해 인덕턴스변동을 순시적으로 보상법을 통해 속도제어시의 유도전동기의 동적특성을 개선하였다. 제안된 방법의 타당성을 모의 실험을 통해 확인하였다.

2. 본 론

2.1 유도전동기의 모델링

고정자 정지좌표계에서 고정자전류와 회전자자속을 상태변수로 하는 유도전동기의 상태방정식을 다음과 같이 구성할 수가 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{\lambda}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{\lambda}_r \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \bar{v}_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_s & \bar{\lambda}_s \end{bmatrix}^T = [ i_{ds} \ i_{qs} \ \lambda_{dr} \ \lambda_{qr} ]^T$$

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_s & 0 \end{bmatrix}^T = [ v_{ds} \ v_{qs} \ 0 \ 0 ]^T$$

$$A_{11} = \left\{ -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r} \right\} I$$

$$A_{12} = \frac{M}{\sigma L_s L_r} \left\{ -\frac{1}{\tau_r} I - \omega_r J \right\}$$

$$A_{21} = \frac{M}{\tau_r} I$$

$$A_{22} = -\frac{1}{\tau_r} I + \omega_r J$$

$$B = \frac{1}{\sigma L_s} I$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r}, \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

## 2.2 축소차원 Gopinath 회전자자속 관측기

회전자자속을 추정하기 위해 축소차원 Gopinath 자속 관측기를 설계하였다. 축소차원 Gopinath 자속 관측기는 고정자전류의 미분치를 오차수정항으로 피드백하며 다음 (2)식과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_r &= A_{21} \bar{i}_s + A_{22} \hat{\lambda}_r \\ &+ G [\bar{i}_s - (A_{11} \bar{i}_s + A_{12} \hat{\lambda}_r + B_1 \bar{v}_s)] \end{aligned} \quad (2)$$

G는 게인행렬로써 다음과 같이 정의된다.

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & -g_2 \\ g_2 & g_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

자속관측기의 극배치는 게인행렬 G의 계수를 통해서 이루어진다. 극배치는 순시적인 회전자속도와 보상된 인덕턴스에 따라 실시간으로 정해진다.

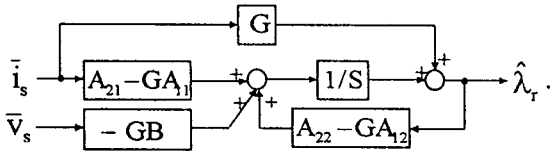


그림1. Gopinath형 자속관측기의 구성도.

## 2.3 회전자속도 추정원리

유도전동기의 벡터제어에서 토크는 기준좌표계에 상관없이 자속과 전류가 이루는 각이 일정하기 때문에 그 크기가 동일하다. 고정자 정지좌표계와 회전자자속좌표계의 토크를 구하여 그 크기가 동일하다고 하면, 식 (6)과 같이 토크분 전류를 구할 수 있다. 토크분 지령치전류와 식(6)에서 구한 토크분 전류와의 오차에 의해 회전자속도를 추정한다. [7]

$$T = \lambda_{dr}^r i_{qr}^r = -\frac{M}{L_r} \lambda_{qr}^s i_{qs}^r \quad (4)$$

$$T = -\frac{M}{L_r} (\lambda_{dr}^s i_{qs}^s - \lambda_{qr}^s i_{ds}^s) \quad (5)$$

위의 두 식으로부터 다음(6)식을 유도할 수 있다.

$$i_{qs}^r = -\frac{(\lambda_{dr}^s i_{qs}^s - \lambda_{qr}^s i_{ds}^s)}{\lambda_{qr}^s} = -\frac{(\lambda_{dr}^s i_{qs}^s - \lambda_{qr}^s i_{ds}^s)}{\sqrt{(\lambda_{dr}^s)^2 + (\lambda_{qr}^s)^2}} \quad (6)$$

$$\Delta i_{qs}^r = i_{qs}^{r*} - i_{qs}^r \quad (7)$$

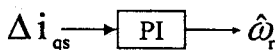


그림2. 토크분전류를 이용한 속도추정 구조

첨자 s,r은 고정자정지, 회전자자속좌표계를 나타낸다.

## 2.4 자화인덕턴스의 보상구조

자화인덕턴스의 변동분의 보상구조에 대한 추정식은 고정자 정지좌표계에서의 측정된 실제 무효전력량과 인덕턴스항을 포함하는 추정된 무효전력량으로부터 유도된다.

$$Q^* = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (6)$$

$$Q = L_\sigma (i_{ds}^s \dot{p}i_{qs}^s - i_{ds}^s \dot{p}i_{qs}^s) + i_{ds}^s \dot{p}\hat{\lambda}_{qr}^s - i_{qs}^s \dot{p}\hat{\lambda}_{dr}^s \quad (7)$$

$$\Delta Q = Q^* - Q \quad (8)$$

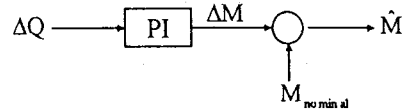


그림3. 무효전력을 이용한 자화인덕턴스 추정

식(6)은 전동기의 측정값인 전압, 전류만으로 구성되어 실제 무효전력량으로 볼 수 있다. 또한, 식(7)은 추정된 회전자 자속을 포함하는데, 회전자자속의 추정에 이용하는 자속관측기는 인덕턴스의 변동항을 포함하므로, MRAC(Model Reference Adaptive Control)의 형태에서 보면, 식(6)은 자화인덕턴스의 값을 포함하지 않으므로 기준모델로 볼 수 있으며, 식(7)은 자화인덕턴스항을 포함하므로 가조절모델로 볼 수 있다.

## 2.5 동시추정 문제에 대한 고찰

회전속도와 자화인덕턴스의 동시 추정을 위해 다음의 가정을 한다.

- 자속포화시 고정자와 회전자의 권선저항은 일정하다.
- 누설인덕턴스는 변화량은 미소하므로 변하지 않는다
- 인버터의 지령전류와 실제전류는 동일하다고한다.

자속포화시 속도와 자화인덕턴스의 동시추정문제는 실질적으로 속도와 회전자저항의 동시추정 문제에 대한 관점으로 접근하는 것이 유리하다. 기존의 속도와 회전자저항의 동시 추정문제에서 회전자자속이 일정하면 속도와 회전자저항의 동시추정이 불가능하다고 알려져 왔는데 이것은 정상상태에서 유도기 상태변수로부터 회전자속도 정보와 회전자저항 정보를 동시에 분리(decoupling)시킬 수 없기 때문이다[7]. 그러나, 실제 속도제어에서 가감속에 따른 자속포화는 과도상태에서의 현상이므로 위의 문제와는 달리 생각할 수 있다. 또한, 추정된 회전자자속의 추정오차는 인버터의 지령치와 실제치가 동일하다는 가정으로부터 속도오차와 전동기 정수오차로 구성된다고 가정할 수 있다. 위의 새로운 가정으로부터 전압,전류 샘플링 구간에서 한 구간은 속도를 추정하고, 다른 구간에서는 속도가 일정하다고 가정한다면 속도 일정구간에서 자화인덕턴스를 추정하여 동시추정문제를 해결할 수 있다. 이것은 실제 마이크로프로세서의 샘플링시간이 약 100μsec의 짧은시간이기 때문에 가능하다.

## 2.6 동시 추정구조

그림4.에서는 유도 전동기의 전압, 전류만이 피드백량

으로 나타나는 동시 추정구조를 나타내었다. 추정된 회전자 자속은 속도와 인덕턴스 추정기의 입력된다. 역으로 추정된 속도와 인덕턴스는 회전자 자속관측기의 입력이 되는 구조를 볼 수 있다.

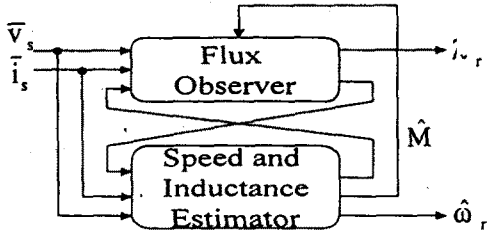


그림4. 동시추정 구조

### 2.7 모의실험 및 고찰

그림 5는 제안하는 방법을 이용한 속도센서없는 벡터 제어계의 전체 블록도이다. 그림 6은 속도 지령치에 대해 가속시 인덕턴스 변동을 보상한 후의 속도응답 파형이다. 그림 7.8은 각각 인덕턴스 변동 보상이 없는 경우와 보상을 행한 경우의 회전자자속의 실제치와 추정치를 나타낸다. 인덕턴스 변동으로 인해 회전자자속의 위치와 크기를 정확히 추정하지 못하며, 인덕턴스의 변동을 보상한 후 자속의 추정성능이 개선됨을 알 수 있다.

과도상태에서 토오크분전류의 지령치에 대한 실제 토오크분전류의 오차로 인한 자화분전류가 부정확한 크기와 위치를 가지게 된다. 이로부터 발생한 공극자속포화에 의한 자화인덕턴스 변동을 보상하여 회전자자속관측기의 자속추정성능을 향상시킴으로써 실제속도를 정확히 추정함을 알 수 있다.

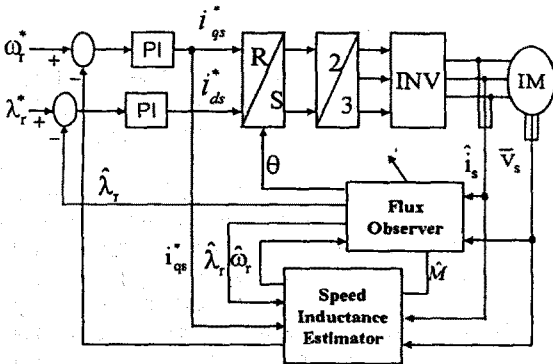


그림5. 전체 시스템의 구성도

### 3. 결 론

본 연구에서는 회전자 자속관측기의 출력값을 이용하여 토오크분전류를 구하여 그 지령치와의 오차로부터 속도센서없는 벡터제어를 행하고, 자속포화시 추정성능의 개선을 위해 무효전력량의 변동을 관측하여 변동분만큼 자화인덕턴스를 보상해주는 방법을 제안하였으며, 모의 실험을 통해 제안한 방법의 타당성을 확인하였다.

추후의 과제로는 실험을 행하여 제안한 방법의 타당성을 확인하는 것이다.

본 연구는 한국학술진흥재단이 지원하는 자유공모 과제 (1997-001-E00206)에 의해 수행되었음을 알립니다.

### (참 고 문 헌)

- [1] C.Scauder, "Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers", IEEE. Trans. Indus. Appli. Vol 28, No5, pp. 1054-1061, 1992
- [2] H.Tajima, "Speed Sensorless Field-Orientation Control of the induction Machine", IEEE. Trans. Indus. Appli. Vol.29.No1, pp.175-180, 1993.
- [3] R.J.kerkman, "Steady-State and Transient Analyses of an Induction Machine with Saturation of the Magnetizing Branch", IEEE Trans. I.A. Vol. IA-21.No.1 pp.226-234, 1985.
- [4] E.Levi, M.Sokola, "A Novel Saturation Adaptive Rotor Flux Estimator For Rotor Flux Oriented Induction Machines", EPE Conference, Vol. 1, pp.518-523, 1998.
- [5] I. Takahashi, "Field-Oriented Control of an Induction Motor with Robust On-Line Tuning of Its Parameters", IEEE Trans. I.A., Vol.33, No.1, pp.35-42, 1997
- [6] T.Ohtani, "Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder", IEEE.Trans. Indus.Appli., Vol28, No1, pp157-164, 1992
- [7] S.Shinnaka, "A unified analysis an simultaneous identification of velocity and rotor resistance of induction motor", JIEE,113-D No12, pp.1483-1484, 1993.

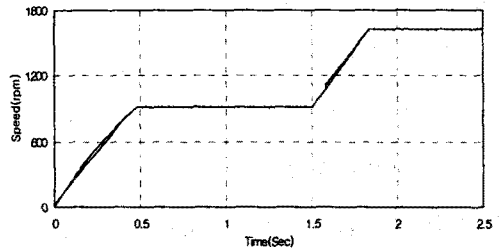


그림6. 속도 응답 파형

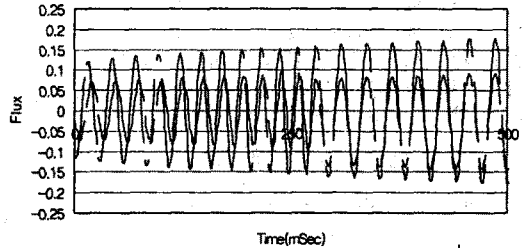


그림7. 보상전 회전자자속의 실제치와 추정치

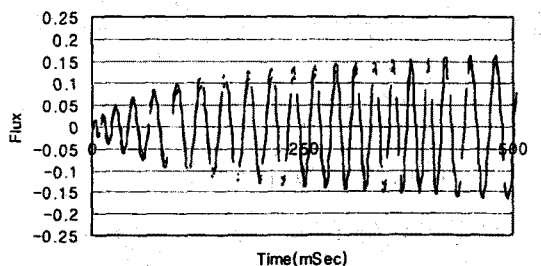


그림8. 보상후 회전자 자속의 실제치와 추정치