

폐루프 자속추정기를 이용한 유도전동기의 센서리스 벡터제어

서영수*, 임영배**, 음두성*, 이상훈*°

*명지대학교, **충남전문대

Sensorless Vector Control of Induction Motor Using Closed loop Flux Estimator

Young-Soo Seo* Young-Bae Lim** Doo-Seong Eum* Sang-Hun Lee*°

*Myong-Ji Univ, **Chung-Nam Junior College

Abstract

In this paper, for high performance as drive, in the speed sensorless vector control of induction motor, introduced flux estimator of voltage model and error compensation algorithm using closed loop integration method, and then we proposed a improved flux estimation method of high accuracy.

And the rotor speed is estimating using the stator current and the estimated flux, it is used speed information.

The proposed scheme is verified through digital simulations and experiments for 3.7[kw] induction motor and shows good dynamic performance.

1. 서론

유도전동기의 센서리스 벡터제어를 실현하기 위해서는 전압, 전류값 뿐만 아니라 자속이나 속도정보가 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 개선된 자속추정기를 적용하여 회전자 자속을 정확하게 추정하여 구동시스템의 동작특성을 향상시키고자 한다. 구체적으로 살펴보면, 고정자 전압의 적분항을 순수 적분기 대신 저역통과 필터로 구성된 전압모델 자속추정기를 구현하여 자속을 추정하고, 전동기 운전속도가 낮은 영역에서 전압모델 자속추정기의 여러 가지 문제점을 해결하기 위하여 폐루프 자속추정기를 적용하여 자속 추정의 정확도를 높였다. 또한 추정된 자속값을 이용한 회전자 속도추정기를 구성하여 속도를 추정하고 이를 속도정보로 사용하였으며, 정지축에서 회전축으로의 변환각에 대한 정보는 간접벡터제어 방식을 사

용하여 자속의 회전각 위치를 알아내었다.

제안된 시스템을 3.7[KW]용량의 농형 유도전동기에 적용하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 타당성과 성능을 파악하고 유용성을 비교 검토하였다.

2. 회전자 자속추정 방식

2-1. 전압모델 자속추정기

유도전동기의 모델링으로부터 전압방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
v_{ds}^s &= R_s i_{ds}^s + p \lambda_{ds}^s \\
v_{qs}^s &= R_s i_{qs}^s + p \lambda_{qs}^s \\
0 &= R_r i_{dr}^s + p \lambda_{dr}^s + \omega_r \lambda_{qr}^s \\
0 &= R_r i_{qr}^s + p \lambda_{qr}^s - \omega_r \lambda_{dr}^s
\end{aligned} \tag{1}$$

고정자 자속정보는 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
\lambda_{ds}^s &= \int (v_{ds}^s - R_s i_{ds}^s) dt \\
\lambda_{qs}^s &= \int (v_{qs}^s - R_s i_{qs}^s) dt
\end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)는 고정자 전압과 전류값을 이용하여 고정자 자속값을 추정하는 방식이다.^[1] 이 방식은 순수 적분기로 인해 인가전압 및 상저항 오차의 영향을 크게

받고 또한 적분기 포화의 영향으로 정확한 자속정보를 기대하기 어렵다. 따라서 본 논문에서 제시한 전압모델 자속추정 방식은 자속과 역기전력의 직교성을 기초로 순수 적분기 대신 저역통과 필터를 적용하여 비교적 정확하게 고정자 자속값을 구하는 방식이다.

고정자 누설자속에 대한 성분을 고려하여 전압모델 자속추정기로 회전자 자속을 구하면 다음과 같다.^[2]

$$\lambda_{dr-v}^s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{ds-F}^s - \sigma i_{ds}^s) \quad (3)$$

$$\lambda_{qr-v}^s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{qs-F}^s - \sigma i_{qs}^s)$$

식 (3)을 이용하여 전압모델 자속추정기 블록도를 그림 2-1과 같이 나타내었다.

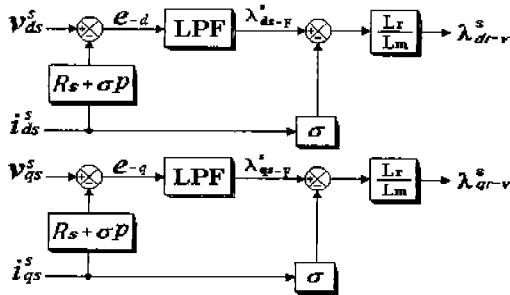


그림 2-1 전압모델 자속추정기

2-2 페루프 자속추정기

전압모델 자속추정 방식은 전동기 상수의 영향을 거의 받지 않아 고속에서는 비교적 정확한 자속정보를 제공한다. 그러나 이 방법은 전 속도영역에서 동작하기 위해 필터의 차단 주파수가 낮아야 한다는 제한 조건이 있고, 또한 전동기의 주파수가 필터의 차단 주파수보다 낮은 속도영역에서는 자속추정의 오차가 발생하여 결과적으로 구동 시스템의 동작속도 영역을 제한하게 된다.

본 논문에서는 보다 넓은 속도범위에서 구동시스템의 동작특성을 향상 시키기 위해 페루프 적분방식의 추정자속 Y 를 보상하는 알고리즘을 적용하였다.^[3]

페루프 적분방식의 자속 추정기 알고리즘은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$Y = \frac{L_r}{L_m} \left(\frac{1}{s + \omega_c} X - \sigma i_{ds}^s \right) + \frac{\omega_c}{s + \omega_c} Y \quad (4)$$

그림 2-2는 식 (4)를 사용하여 페루프 자속 추정기 알고리즘의 구성도를 나타내었다.

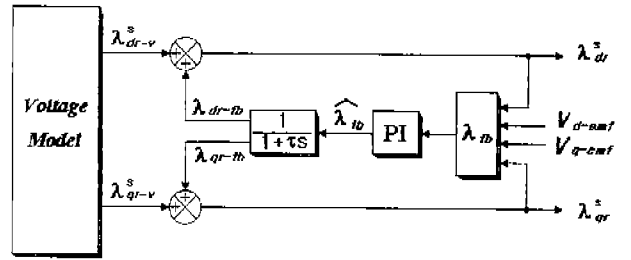


그림 2-2 페루프 자속추정기

그림 2-3의 벡터도는 페루프 자속 보상기의 동작원리를 나타낸다.

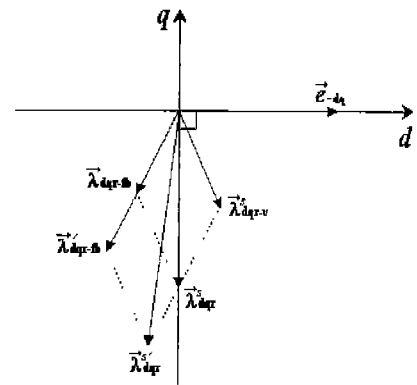


그림 2-3 추정자속과 역기전력의 벡터도

3. 회전자 속도추정기

유도전동기 속도 센서리스 벡터제어 시스템을 구동을 위해 고정자 전류와 페루프 자속추정기로 추정된 자속값을 이용하여 회전자 속도 정보는 다음과 같이 얻을 수 있다.^[3]

$$\hat{\omega}_r = \frac{(\lambda_{ds-F}^s - L_s i_{ds}^s) \frac{d}{dt} \lambda_{qr}^s - (\lambda_{qs-F}^s - L_s i_{qs}^s) \frac{d}{dt} \lambda_{dr}^s}{(\lambda_{ds-F}^s - L_s i_{ds}^s) \lambda_{qr}^s + (\lambda_{qs-F}^s - L_s i_{qs}^s) \lambda_{dr}^s} \quad (5)$$

그림 3-1은 식 (5)를 사용하여 회전자 속도추정기의 구성도를 나타내었다.

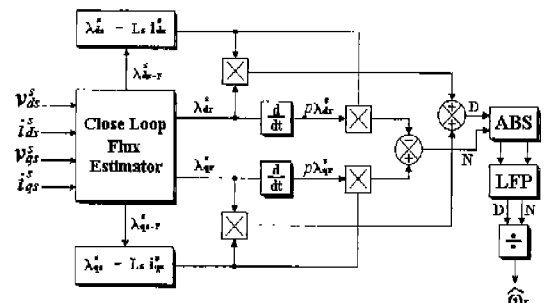


그림 3-1 회전자 속도추정기

4. 회전자 속도 제어 알고리즘

본 논문에서 제안된 회전자 속도 추정 알고리즘은 그림 4-1과 같이 나타낼수 있다. 이 시스템은 속도제어기, 자속제어기, 전류제어기, 전압모델 자속추정기, 페루프 자속추정기, 회전자 속도 추정기, PWM 발생기, 좌표변환기등으로 구성되어 있다.

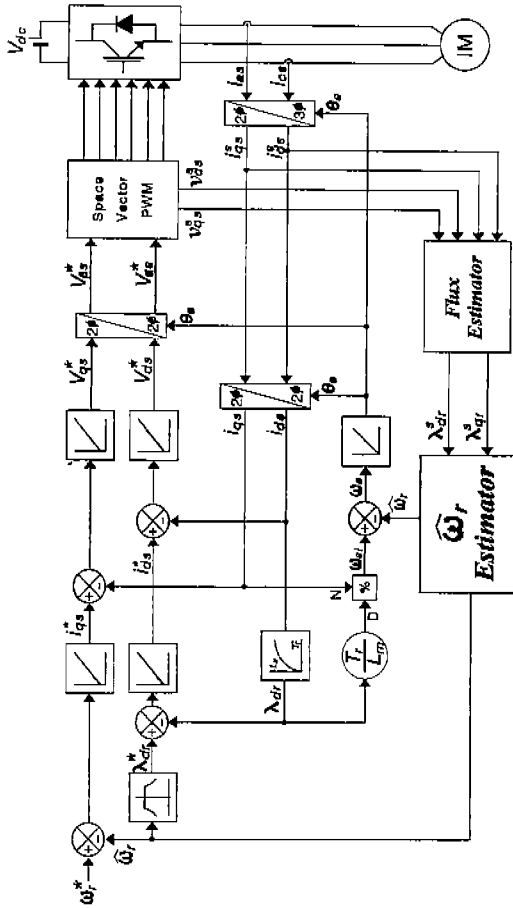


그림 4-1 시스템 제어 블록도

5. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 제어 시스템의 유용성을 알아보고 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 이용된 유도전동기는 5[HP], 220[V], 60[Hz], 4극이며, 정격속도는 1730[rpm]이다.

그림 5-1은 기준속도 변화에 대한 시스템의 속도와 자속추정 특성을 살펴보기 위한 시뮬레이션 파형이다. 디지털 필터를 인가하여 추정된 회전자 속도 파형 $\hat{\omega}_r$ 과 페루프 자속 추정기에 의해 추정된 d축 및 q축 자속 파형을 나타낸다.

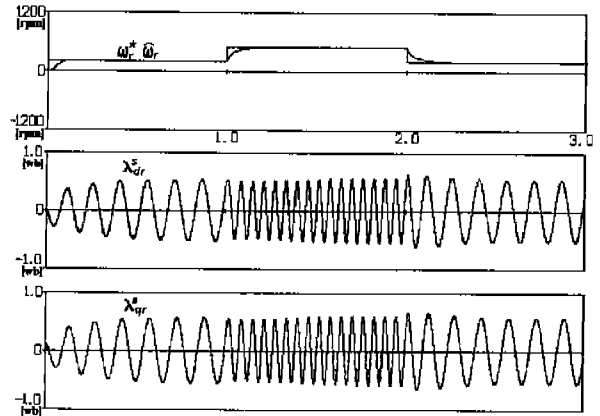


그림 5-1 기준속도 변화시 추정속도와 자속 파형 (200 → 500 → 200 [rpm], 무부하시)

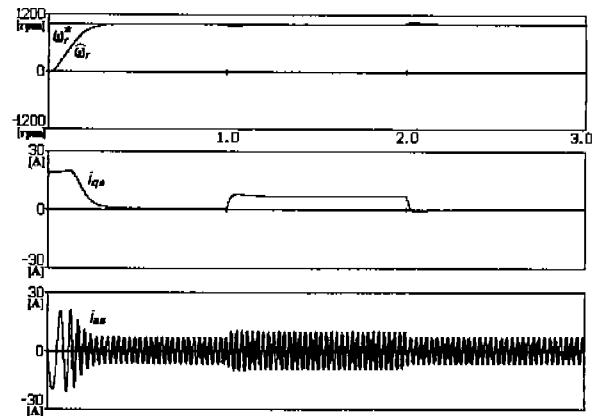
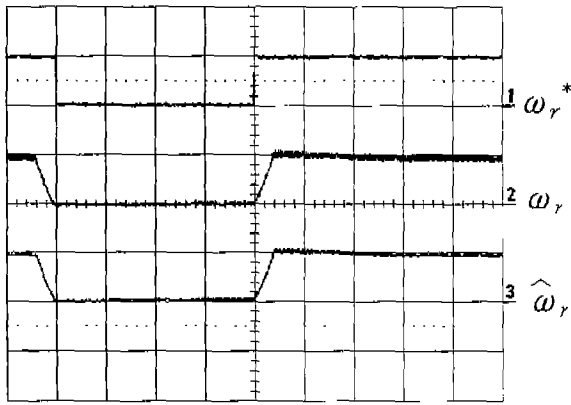


그림 5-2 구동 시스템의 부하응답 특성 (1000[rpm], 정격의 0 → 1/2 → 0 부하)

그림 5-2는 부하 변동에 대한 과도응답 특성을 살펴보기 위한 시뮬레이션으로써, 무부하 상태에서 기준속도 1000[rpm]으로 기동하고 나서, $t = 1.0[\text{sec}]$ 에서 1/2부하를 스텝 인가하며, 다시 $t = 2.0[\text{sec}]$ 에서 부하를 스텝 제거하였을 경우 추정된 회전자 속도 $\hat{\omega}_r$, 토크분 전류 i_{qs} , 고정자 전류 i_{as} 의 응답특성을 시뮬레이션한 결과 파형을 나타낸다.

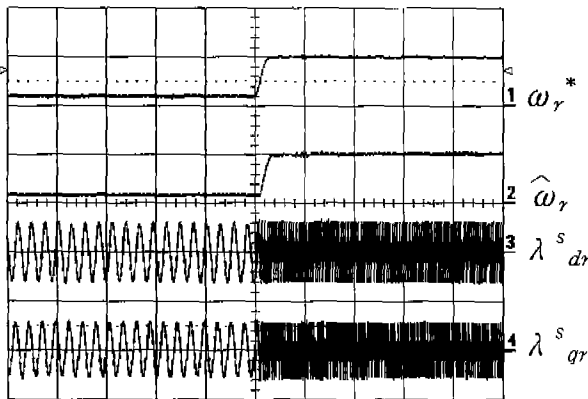
제 6 장 실험결과 및 고찰

본 논문에서 실험에 사용된 전체 시스템의 구성은 전력변환부와 센서리스 벡터제어 알고리즘의 고속 연산처리를 위해 TMS320C31 DSP를 CPU로 사용한 마이크로 프로세서부, 또한 공간전압벡터 PWM관련 회로나 CPU 주변의 기본회로들을 EPLD로 처리하는 인터페이스부 그리고 D/A컨버터로 시스템을 구성하였다.



Speed:100[rpm]/div, Time:1[sec]/div
 그림 6-1 스텝기동시 속도응답 특성
 (0→500[rpm], 무부하시)

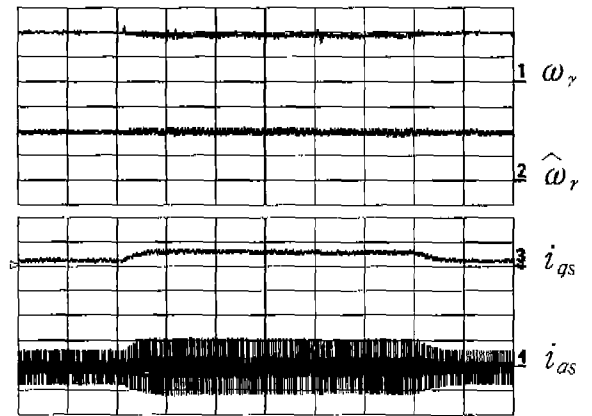
그림 6-1은 무부하 상태에서 기준속도를 0[rpm]에서 500[rpm]으로 스텝기동하는 경우의 기동특성을 나타내는 실험 파형이다. 기준속도 ω_r^* , 엔코더에서 측정한 회전자 속도 ω_r , 추정된 회전자 속도는 $\hat{\omega}_r$ 이다.



Speed:200[rpm]/div, Flux:0.2[wb]/div, Time:1[sec]/div
 그림 6-2 기준속도 변화시 추정속도와 자속 파형
 (200 → 1000 [rpm], 무부하시)

그림 6-2는 무부하 상태에서 기준속도 ω_r^* 을 200[rpm]에서 1000[rpm]으로 가변하였을 때 폐루프 자속 추정기에 의해 추정된 자속 λ^s_{dr} , λ^s_{gr} 와 회전자 속도추정기에서 추정된 회전자 속도 $\hat{\omega}_r$ 이다.

그림 6-3은 부하토크를 스텝으로 변동시켰을 때의 과도응답 특성을 나타내는 실험 파형이다. 기준속도는 1000[rpm]으로 일정하게 유지하면서, 1/6부하에서 정격부하의 1/2부하로 스텝 증가시키고, 다시 1/6부하로 스텝 감소시킨 경우 회전자 속도추정기에 의한 구동 시스템의 부하특성을 보여주고 있다.



Speed:500[rpm]/div, i_{qs}, i_{ds} :10[A]/div, Time:1[sec]/div
 그림 6-3 구동 시스템의 부하응답 특성
 (1000[rpm], 정격의 1/6 → 1/2 → 1/6 부하)

제 7 장 결 론

본 연구에서 제안된 시스템을 5[HP]의 3상 유도전동기에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 회전자 자속추정시 폐루프 자속추정기를 적용하여 자속의 크기가 변화하는 상태에서도 왜곡을 최소화 시켜 정밀도 높은 자속을 추정하였다.
- [2] 고정자 전류와 추정된 자속을 이용한 회전자 속도 추정기를 구성하여 속도추정이 원활하게 수행되는것을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였다.
- [3] 전류제어부에는 공간전압벡터 PWM 방식을 사용하였고, 시스템은 고속연산 및 인버터 스위칭을 위하여 DSP와 EPLD등 디지털 방식으로 단순화하여 신뢰성을 높였다.

참 고 문 헌

- [1] X. Xu and D. W. Novotny, "Implementation of Direct Stator Flux Orientation Control on a Versatile DSP Based System", IEEE Trans Indus Appli., vol 27, no. 4, pp. 694~700, 1991.
- [2] T. Kanmachi and I. Takahashi, "Sensor-less Speed Control of An Induction Motor with No Influence of Secondary Resistance Variation", IEEE IAS Ann. Mtg., pp.408~413, 1993.
- [3] J. HU and B. WU, "New Integration Algorithms for Estimating Motor Flux Over a Wide Speed Range", IEEE PESC'97, pp.1075~1081, 1997.