

파라미터 민감도를 이용한 유도전동기 자속 추정기 해석

남현택, 이경주, 김진규\*, 최영태\*\*, 최종우, 김홍근  
 경북대학교 전기공학과, \*대구공업대 전기과, \*\*영진전문대 전기과

Analysis of Induction Motor Flux Observer using Parameter Sensitivity

Hyun-Taek Nam, Kyung-Joo Lee, Jin-Kyu Kim\*, Young-Tae Choi\*\*,  
 Jong-Woo Choi and Heung-Geun Kim  
 Kyungpook Nat. Univ, \*Taegu Tech. College, \*\*Yeungjin Junior College

**Abstract** - To obtain a high performance in a direct vector controlled induction machine, it is essential to correct estimation of rotor flux. The accuracy of flux observers for induction machines inherently depends on parameter sensitivity. This paper presents an analysis method for conventional flux observers using Parameter Sensitivity. The Parameter sensitivity is defined as the ratio of the percentage change in the system transfer function to the percentage change of the parameter variation. We define the ratio between real flux and estimated flux as the transfer function, and analyzed a parameter sensitivity of this transfer function.

1. 서 론

유도전동기의 직접벡터제어에 있어서 회전자 자속의 정확한 동정이 필수적이다. 직접 벡터제어는 직접 측정 한 자속을 이용하거나 전압, 전류, 속도 등을 이용하여 간접적으로 추정 한 자속을 이용한다. 간접적으로 추정 한 회전자 자속은 제어 알고리즘에 따라 약간의 차이는 있지만 전동기 상수의 영향을 받는다[1~3].

시스템 민감도는 시스템 파라미터변동에 따른 시스템 전달함수의 변동을 비함수의 형태로 나타낸 것이다. 본 논문에서는 이 시스템 민감도를 이용하여 실제 회전자 자속과 추정된 회전자 자속사이의 비를 전달함수로 정하고 전동기 상수의 변동에 의한 이 전달함수의 변화를 해석하였다. 본 논문에서는 기존의 제안된 자속추정기들 중에서 전압모델, 전류모델, Improved Gopinath Model[1], Modified Improved Gopinath Model[3]을 대상으로하여 전동기 상수들의 변동에 의한 영향을 matlab를 이용하여 해석하였다.

2. 자속 추정기

2.1 전압모델 자속추정기(1)

고정자회로를 이용하여 직접 측정 한 고정자전압과 전류를 이용하여 다음식과 같이 계산한다.

$$\lambda_r^s = \int (v_s^s - R_s i_s^s) dt \quad (1)$$

$$\lambda_r^s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_s^s - \sigma L_s i_s^s) \quad (2)$$

2.2 전류모델 자속추정기(1)

회전자 전압방정식을 회전자 자속과 고정자 전류를 표현한 식(3)에서 측정된 고정자전류를 이용하여 회전자 자속을 추정한다.

$$p \lambda_r^s = -\left(\frac{R_r}{L_r} - j\omega_r\right) \lambda_r^s + R_r \frac{L_m}{L_r} i_s^s \quad (3)$$

2.3 Improved Gopinath Model Flux Observer(1)

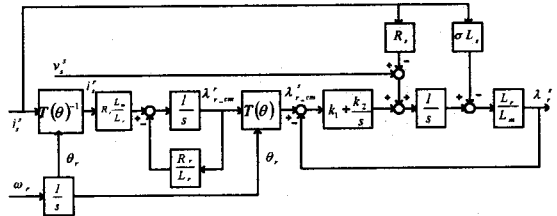


그림 1. Improved Gopinath Model 자속추정기의 블록도

그림 1은 Jansen과 Lorentz에 의해 제안된 Improved Gopinath Model 자속추정기의 블록도이다 [1]. 역기전력이 큰 고속영역에서는 전압모델을 사용하고 역기전력이 작은 저속영역에서는 전류모델을 사용한다. 추정된 자속을 추정기 특성방정식을 이용하여 전압 모델과 전류모델에서의 추정자속의 항으로 분리하여 식 (4)에 나타내었다[3].

$$\lambda_r^s = F(s) (\lambda_{r,cm}^s - \lambda_{r,cm}^s) + \lambda_{r,cm}^s = F(s) \lambda_{r,cm}^s + (1 - F(s)) \lambda_{r,cm}^s \quad (4)$$

$$F(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i}$$

여기서 F(s)는 자속추정기의 특성방정식이다[3]. 자속추정기 특성방정식을 주파수영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$F(j\omega_e) = \frac{\omega_e^2}{\sqrt{(K_i - \omega_e^2)^2 + (K_p \omega_e)^2}} e^{j\left(\pi - \tan^{-1}\left(\frac{K_p \omega_e}{K_i - \omega_e^2}\right)\right)} \quad (5)$$

전류모델에서 전압모델로 전이되는 주파수를 PI제어기의 이득으로 결정할 수 있는데, PI제어기의 이득을 2차 Butterworth필터의 개념에서 설계하면 다음과 같다.

$$K_p = K_1 \frac{L_r}{L_m}, \quad K_i = K_2 \frac{L_r}{L_m}$$

$$K_p = \sqrt{2} \omega_c, \quad K_i = \omega_c^2$$

2.4 Modified Improved Gopinath model Flux Observer(3)

그림 2는 Modified Improved Gopinath model 자속 추정기의 블록도를 나타내고 있다. 이 모델의 기본적인 설계방법은 Improved Gopinath Model의 경우와 같다[3].

$$\lambda_r^s = F(s) (\lambda_{r,cm}^s - \lambda_{r,cm}^s) + \lambda_{r,cm}^s = F(s) \lambda_{r,cm}^s + (1 - F(s)) \lambda_{r,cm}^s \quad (6)$$

$$F(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i} e^{-j\alpha}$$

여기서,  $\alpha = \pi - \tan^{-1} \left( \frac{K_p \omega_e}{K_i - \omega_e^2} \right)$  이다.

$$F(j\omega_e) = \frac{\omega_e^2}{\sqrt{(K_i - \omega_e^2)^2 + (K_p \omega_e)^2}} \quad (7)$$

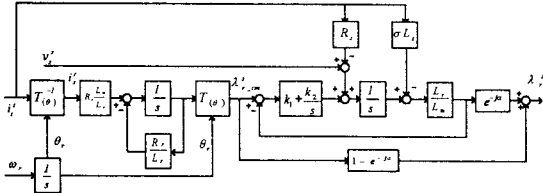


그림 2. Modified Improved Gopinath model 자속추정기의 블록도

### 3. 시스템 민감도

시스템 민감도는 시스템 파라미터 변동에 따른 시스템 전달함수의 변동을 비함수의 형태로 나타낸 것이다. System Sensitivity를 식(8)에 나타내었다.

$$S_a^T = \frac{\Delta T/T}{\Delta a/a} = \frac{a}{T} \frac{\Delta T}{\Delta a} \quad (8)$$

$S_a^T$  : System sensitivity,  $a$  : System parameter

$T$  : System Transfer Function

식(9)는 시스템 파라미터의 작은 변화에 대해서 고려해서 변화량의 비를 편미분으로 표시한 것이다.

$$S_a^T = \frac{\partial T/T}{\partial a/a} = \frac{\partial \ln T}{\partial \ln a} \quad (9)$$

여기서, 시스템 파라미터 변동에 따른 전달함수의 오차를 시스템 민감도로 표현하면 식(10)과 같다.

$$\Delta T = S_a^T T \frac{\Delta a}{a} \quad (10)$$

실제 회전자 자속과 추정된 회전자 자속의 비함수를 전달함수로 정의하고 이 전달함수의 전동기 상수들의 변화에 따른 자속변화의 비를 시스템 민감도를 이용해서 계산할 수 있다. 전압모델과 전류모델에서 전달함수를 정의하면 식(10), 식(11)과 같다[1].

$$T_{im} = \frac{\widehat{\lambda}_{r,m}^s}{\lambda_r^s} = \frac{L_m \widehat{L}_r}{L_m L_r} \left[ 1 + \frac{L_r^2}{R_r L_m^2} \left( \frac{R_r}{L_r} + j\omega_s \right) \times \left( (\sigma L_s - \widehat{\sigma} L_s) - j \frac{(R_s - \widehat{R}_s)}{(\omega_s + \omega_r)} \right) \right] \quad (10)$$

$$T_{cm} = \frac{\widehat{\lambda}_{r,cm}^s}{\lambda_r^s} = \frac{\left( \widehat{R}_r \frac{\widehat{L}_m}{L_r} \right) \left( \frac{R_r}{L_r} + j\omega_s \right)}{\left( R_r \frac{L_m}{L_r} \right) \left( \frac{\widehat{R}_r}{L_r} + j\omega_s \right)} \quad (11)$$

$\widehat{\lambda}_{r,m}^s$  : 전압모델 자속추정기의 추정자속

$\widehat{\lambda}_{r,cm}^s$  : 전류모델 자속추정기의 추정자속

식(12)는 추정된 회전자 자속을 실제 회전자 자속과 전동기 상수들의 변동에 의해 발생한 오차항의 합으로 표현한 것이다.

$$\widehat{\lambda}_{r,m}^s = \lambda_r^s + \Delta \lambda_{r,m}^s, \quad \widehat{\lambda}_{r,cm}^s = \lambda_r^s + \Delta \lambda_{r,cm}^s$$

$$\widehat{\lambda}_r^s = \lambda_r^s + \Delta \lambda_r^s \quad (12)$$

식(12)를 추정된 자속과 실제 자속의 전달함수에 대입하면 식(13)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\widehat{\lambda}_r^s}{\lambda_r^s} = 1 + \frac{\Delta \lambda_r^s}{\lambda_r^s} = T = 1 + \Delta T \quad (13)$$

여기서, 모든 상수들이 정확히 추정되면  $T = 1$

이 되고 그렇지 못할 경우에는  $T = 1 + \Delta T$ 가 되어 회전자 자속 오차의 실제 회전자 자속에 대한 비는 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta \lambda_r^s}{\lambda_r^s} = \Delta T = S_a^T T \frac{\Delta a}{a} = S_a^T \frac{\Delta a}{a} \quad (14)$$

오차를 고려할 경우 식(4)와 식(6)으로부터 식(15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_r^s + \Delta \lambda_r^s = F(s) \left[ (\lambda_{r,m}^s + \Delta \lambda_{r,m}^s) - (\lambda_r^s + \Delta \lambda_{r,m}^s) \right] + (\lambda_r^s + \Delta \lambda_{r,cm}^s) \quad (15)$$

여기서 오차에 관한 항만을 분리해내면 식(16)을 얻을 수 있다.

$$\Delta \lambda_r^s = F(s) \Delta \lambda_{r,m}^s + (1 - F(s)) \Delta \lambda_{r,cm}^s \quad (16)$$

전류모델과 전압모델의 경우에는 식(9)로 민감도를 직접 구하고, Improved Gopinath Model과 Modified Improved Gopinath Model모델의 경우에는 아래 식(17)을 이용하여 구하였다.

$$S_a = F(s) S_a^{T_{im}} + (1 - F(s)) S_a^{T_{cm}} \quad (17)$$

$S_a^{T_{im}}$  : 전압모델의 민감도

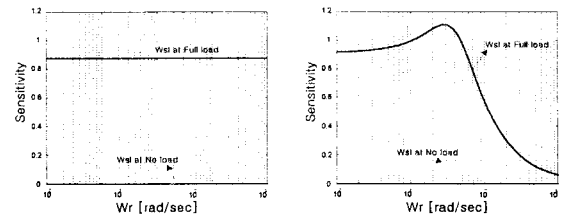
$S_a^{T_{cm}}$  : 전류모델의 민감도

### 4. 시뮬레이션 결과

제안된 방법으로 전동기 상수들의 변동에 대한 민감도를 Matlab을 이용하여 구하였다. 시뮬레이션에 사용된 전동기 상수 및 정격을 표1에 나타내었다.

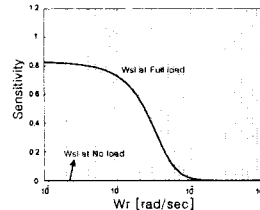
표 1. 유도전동기 정수 및 정격

정격출력	2.2 [kW]	$R_r$	0.20 [ $\Omega$ ]
정격전압	230 [V]	$L_b$	1.5 [mH]
정격전류	8.8 [A]	$L_{lr}$	1.5 [mH]
극 수	4	$L_m$	32.3 [mH]
$R_s$	0.20 [ $\Omega$ ]	$J$	0.045 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]
$\omega_c$	50 [rad/sec]		



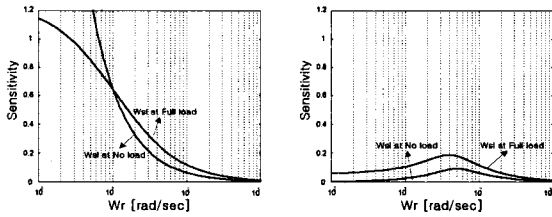
(a) Current Model

(b) Improved Gopinath Model

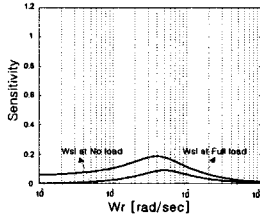


(c) Modified Improved Gopinath Model

그림 3  $R_r$ 에 대한 민감도

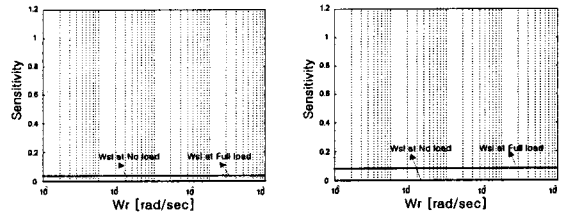


(a) Voltage Model (b) Improved Gopinath Model

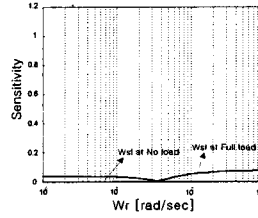


(c) Modified Improved Gopinath Model

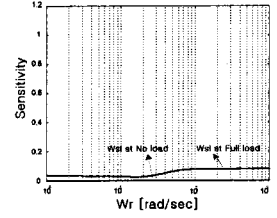
그림 4  $R_s$ 에 대한 민감도



(a) Current Model (b) Voltage Model

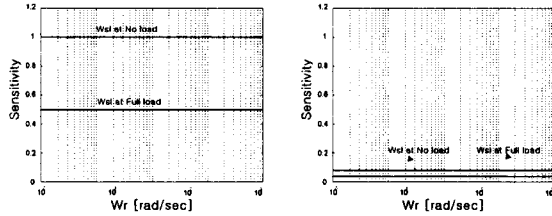


(c) Improved Gopinath Model

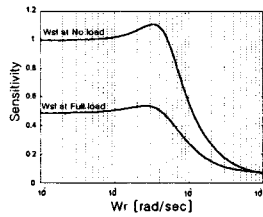


(d) Modified Improved Gopinath Model

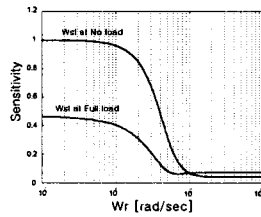
그림 6  $L_r$ 에 대한 민감도



(a) Current Model (b) Voltage Model

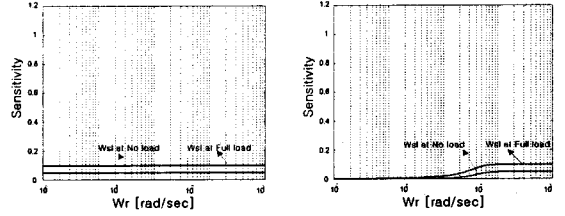


(c) Improved Gopinath Model

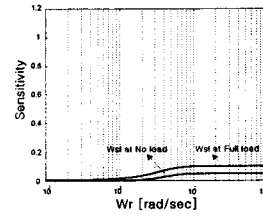


(d) Modified Improved Gopinath Model

그림 5  $L_m$ 에 대한 민감도



(a) Voltage Model (b) Improved Gopinath Model



(c) Modified Improved Gopinath Model

그림 7  $L_s$ 에 대한 민감도

## 5. 결론

본 논문에서는 전동기 상수들의 변화에 따른 자속추정기의 추정오차를 민감도를 이용해서 해석하는 방법을 제시하고 matlab을 통해 해석하였다. 전압모델의 경우 역기 전력이 작은 저속영역에서 고정자 저항의 변동에 의한 영향이 가장 크게 나타났고, 전류모델의 경우 전속도 영역에서 일정한 오차를 발생시킨다. Improved Gopinath Model의 경우 자화인덕턴스의 변동에 의해 교차각 주파수 부근에서 심한 오차를 발생하는 것을 볼 수 있다. 이에 비해서 Modified Improved Gopinath Model의 경우에는 교차각 주파수 부근에서 비교적 좋은 특성을 나타내었다.

제한한 해석방법은 다른 자속추정기에 적용가능하며 이 해석방법을 기초로 자속추정기 설계에 응용이 기대된다.

## [참고 문헌]

- [1] Patric L. Jansen and Robert D. Lorentz, "A Physically Insightful Approach to the Design and Accuracy Assessment of Flux Observers for field Oriented Induction Machine Drives", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 1, pp. 101~110, Jan./Feb., 1994
- [2] Hisao Kubota, Kouki Matsuse and Takayoshi Nakano, "New Adaptive Flux Observer of Induction Motor for Wide Speed Range Motor Drives", *IEEE, IECON90*, pp. 921~926
- [3] Jang-Hwan Kim, Jong-Woo Choi and Seung-Ki Sul, "Novel Rotor Flux Observer Characteristic Function in Complex Vector Space for Field Oriented Induction Motor Drives", 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE, Volume: 1, 2001 pp. 615 -621