



이용하여 전압모델과 전류모델에서의 추정자속의 향으로 분리하여 식 (4)에 나타내었다<sup>[3]</sup>.

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

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

여기서  $F(s)$ 는 자속추정기의 특성방정식이다<sup>[3]</sup>.

$$\lambda_r^s = [HPF] \lambda_{r,m}^s + [LPF] \lambda_{r,cm}^s \quad (5)$$

여기서  $[HPF]$ 는 고주파 통과 필터를  $[LPF]$ 는 저주파 통과 필터를 의미한다.

전류모델에서 전압모델로 전이되는 주파수를 PI 제어기의 이득으로 결정할 수 있는데, PI 제어기의 이득을 2차 Butterworth 필터의 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<sup>[3]</sup>

그림 2는 Modified Improved Gopinath model 자속추정기의 블록도를 나타내고 있다. 이 모델의 기본적인 설계방법은 Improved Gopinath Model의 경우와 같다<sup>[3]</sup>.

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

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

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

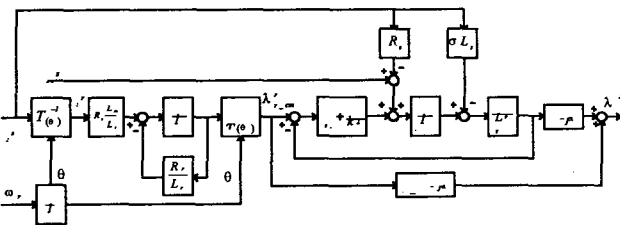


그림 2 Modified Improved Gopinath model 자속추정기의 블록도

## 3. 파라미터 민감도

시스템 민감도는 시스템 파라미터 변동에 따른 시스템 전달함수의 변동을 비함수의 형태로 나타낸

것이다. System Sensitivity를 식(7)에 나타내었다.

$$S_a^T = \frac{\Delta T/T}{\Delta a/a} = \frac{a}{T} \frac{\Delta T}{\Delta a} \quad (7)$$

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

$T$ : System Transfer Function

식 (8)는 시스템 파라미터의 작은 변화에 대해서 고려해서 변화량의 비를 편미분으로 표시한 것이다.

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

여기서, 시스템 파라미터 변동에 따른 전달함수의 오차항을 시스템 민감도로 표현하면 식 (9)과 같다.

$$\Delta T = S_a^T T \frac{\Delta a}{a} \quad (9)$$

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

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

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

$\widehat{\lambda}_{r,cm}^s$ : 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.

$$\begin{aligned}\widehat{\lambda}_{r,cm}^s &= \lambda_r^s + \Delta \lambda_{r,cm}^s \\ \widehat{\lambda}_{r,cm}^s &= \lambda_r^s + \Delta \lambda_r^s \\ \widehat{\lambda}_r^s &= \lambda_r^s + \Delta \lambda_r^s\end{aligned}\quad (12)$$

오차를 고려할 경우 식 (4)와 식 (6)으로부터 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\lambda_r^s + \Delta \lambda_r^s &= F(s) \left[ (\lambda_r^s + \Delta \lambda_{r,cm}^s) - (\lambda_r^s + \Delta \lambda_{r,cm}^s) \right] \\ &\quad + (\lambda_r^s + \Delta \lambda_{r,cm}^s)\end{aligned}\quad (13)$$

여기서 오차에 관한 항만을 분리해내면 식 (14)을 얻을 수 있다.

$$\Delta \lambda_r^s = F(s) \Delta \lambda_{r,cm}^s + (1-F(s)) \Delta \lambda_{r,cm}^s \quad (14)$$

그러므로, Improved Gopinath model과 Modified Improved Gopinath model의 파라미터 민감도는 아래 식 (15)과 같다.

$$S_a = F(s)S_a^{T_m} + (1 - F(s))S_a^{T_{cm}} \quad (15)$$

$S_a^{T_m}$  : 전압모델의 민감도

$S_a^{T_{cm}}$  : 전류모델의 민감도

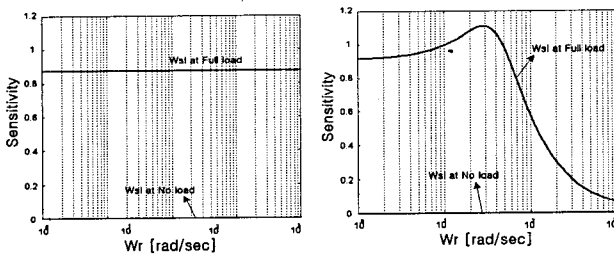
전류모델과 전압모델의 경우에는 식 (9)로 민감도를 직접 구하고, Improved Gopinath Model과 Modified Improved Gopinath Model 모델의 경우에는 아래 식 (15)을 이용하여 구하였다.

#### 4. 시뮬레이션 및 실험결과

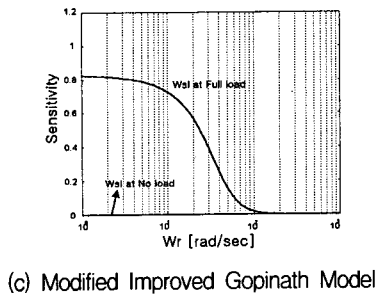
전동기 상수들의 변동에 대한 민감도를 Matlab을 이용하여 구하고 실험을 통하여 민감도의 타당성을 확인하였다. 시뮬레이션과 실험에 사용된 전동기 상수 및 정격을 표1에 나타내었다.

표 1 유도전동기 정수 및 정격

정격출력	2.2 [kW]	$R_r$	1.66 [ $\Omega$ ]
정격전압	380 [V]	$L_s$	75 [mH]
정격전류	5.1 [A]	$L_{lr}$	75 [mH]
극 수	4	$L_m$	225 [mH]
$R_s$	2.75 [ $\Omega$ ]	$J$	0.02 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]
$\omega_c$	50 [rad/sec]		

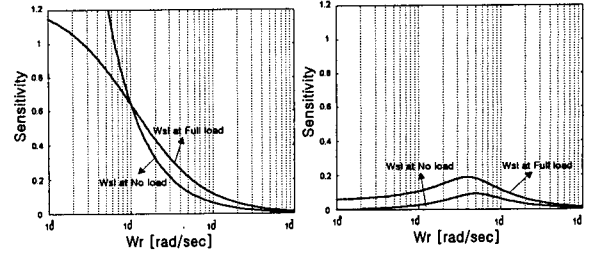


(a) Current Model (b) Improved Gopinath Model

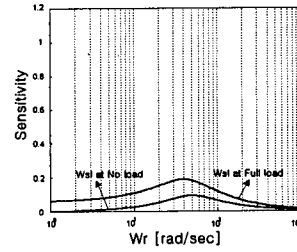


(c) Modified Improved Gopinath Model

그림 3  $R_r$ 에 대한 민감도

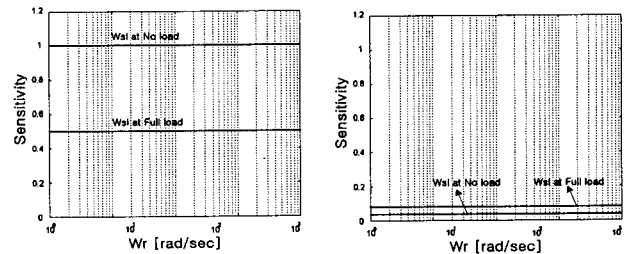


(a) Voltage Model (b) Improved Gopinath Model

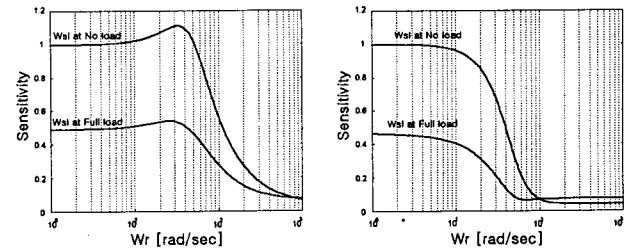


(c) Modified Improved Gopinath Model

그림 4  $R_s$ 에 대한 민감도

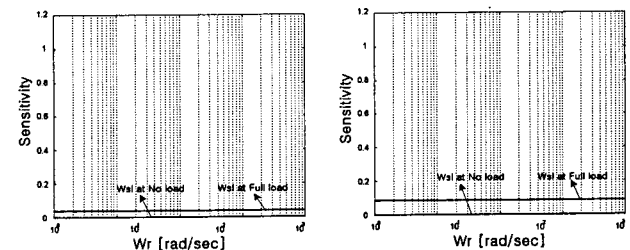


(a) Current Model (b) Voltage Model

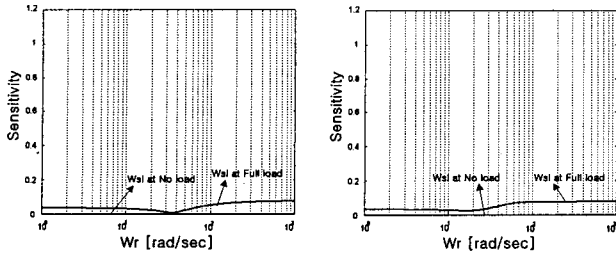


(c) Improved Gopinath Model (d) Modified Improved Gopinath Model

그림 5  $L_m$ 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

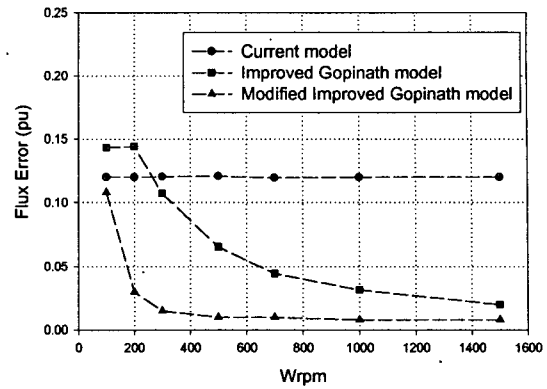
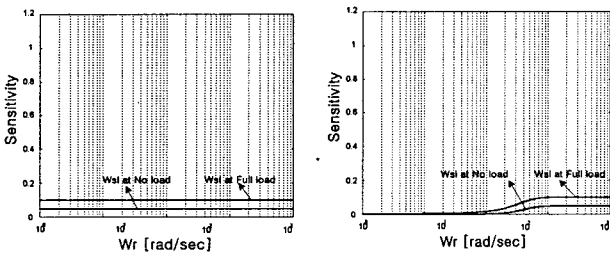
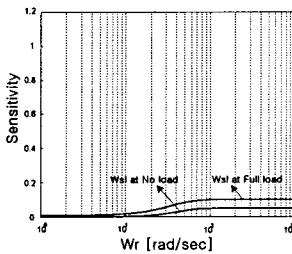


그림 9  $R_r$ 이 20%변동했을 경우(50%부하시)



(a) Voltage Model

(b) Improved Gopinath Model



(c) Modified Improved Gopinath Model

그림 7  $L_s$ 에 대한 민감도

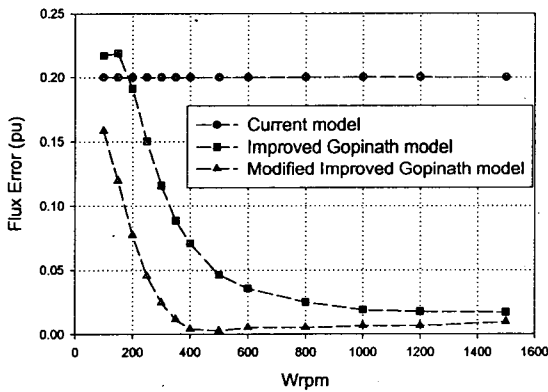


그림 8  $L_m$ 이 20% 변동되었을 경우

## 5. 결 론

본 논문에서는 전동기 상수들의 변화에 따른 자속추정기의 추정오차를 민감도를 이용해서 해석하는 방법을 제시하고 matlab을 통해 자속추정기들의 파라미터 민감도를 구하였고, 실험을 통해서 파라미터 민감도의 타당성을 확인하였다. 전압모델의 경우 역기전력이 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. 제안한 해석방법은 다른 자속추정기에 적용가능하며 이 해석방법을 기초로 자속추정기 설계에 응용이 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [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.