

# 회전자 속도 오차가 고포나스 자속 추정기에 미치는 영향 분석 및 오차 보상 알고리즘

김윤재, 남광희  
포항공과대학교

## Analysis of effects of rotor speed error on Gopinath flux observer and error compensation algorithm

Yoon-Jae Kim, Kwanghee Nam  
POSTECH

### ABSTRACT

본 논문은 전류모델과 전압모델의 장점을 취해 자속을 추정하는 고포나스(Gopinath) 모델 자속 추정기에 속도 피드백 오차가 미치는 영향에 대해 분석하였다. 속도 오차는 전류모델의 위상 지연 및 크기 오차를 발생시키고, 이로 인해 고포나스 모델에 의해 추정된 회전자 자속의 위상 및 크기 오차가 발생하였다. 따라서 전류모델에 발생한 위상 지연을 통해 속도 오차를 보상하여 자속 추정 오차를 감소시키는 새로운 알고리즘을 제시하였고, 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다.

### 1. 서론

유도모터 자속 벡터 기준 제어를 위해서는 정확한 자속의 추정을 필요로 한다. 일반적으로 유도모터 자속 추정에는 전류모델과 전압모델이 이용된다.<sup>[1]</sup> 전류모델은 고정자 전류와 유기되는 자속 간의 관계를 이용한다. 따라서 자화 인덕턴스 및 회전자 시정수에 영향을 받으며 코어의 포화 정도에 따라 변화하는 인덕턴스의 값에 의해 자속 추정이 영향을 받게 된다. 전압 모델은 자속으로부터 발생하는 역기전력을 통해 자속을 추정한다. 따라서 역기전력이 크게 발생하는 고속 영역에서 상당히 정확하며, 상대적으로 저속에서 부정확하다는 단점이 있다. 따라서 전 속도 구간에서 정확한 자속을 추정하기 위해 다양한 자속 추정 방식이 시도되었다.<sup>[2]</sup>

고포나스 자속 추정기는 저속 구간에서 전류모델의 장점과 고속 구간에서 전압모델의 장점을 모두 얻기 위해 두 모델을 비례-적분 제어를 이용하여 결합한 것이다. 제어기의 이득을 조절함으로써 넓은 속도 범위에서 원하는 모델의 특성을 얻을 수 있다. 그러나 두 모델의 자속이 교차되는 중간 주파수 범위에서 고포나스 자속 추정기의 출력에 큰 오차가 발생할 수 있음이 확인되었고, 이를 감소시키기 위한 방법이 제시되었다.<sup>[3]</sup> 이러한 추정 오차는 전류모델과 전압모델로부터 측정된 자속 사이의 오차가 커질수록 더 심각해진다.

본 논문에서는 속도 측정 에러가 고포나스 모델 자속 추정기에 미치는 영향에 집중하여 작성되었다. 2.1절에서 속도 에러가 전류모델의 자속 추정에 미치는 영향을 해석한다. 2.2절에서는 전류모델에서 발생한 오차가 고포나스 출력에 미치는 영향을 주파수 영역에서 복소 평면을 통해 해석한다. 그리고 수식적으로 계산하여 구한 자속 벡터와 Matlab 유도모터 모델에서 출력된 자속 벡터를 비교한다. 2.3 절에서는

속도 오차와 발생한 자속 위상 오차의 관계식을 이용하여 속도 에러를 보상하는 알고리즘을 제안하고, 2.4절에서 시뮬레이션을 통해 알고리즘을 검증한다.

### 2. 회전자 자속 추정

#### 2.1 전류 모델

회전자 자속 전류모델은 회전자 동기 축에서 회전자의 전압 방정식과 고정자 전류 및 회전자 전류의 관계식에 의해 구해진다.

$$0 = R_r i_r^r + \frac{d\lambda_r^r}{dt} \quad (1)$$

$$\lambda_r^r = L_r i_r^r + L_m i_s^r \quad (2)$$

식 (1), (2)를 연립하여 회전자 전류를 소거함으로써 (3)의 회전자 자속에 대한 상태방정식을 구한다.  $\tau_r$  은 회전자 시정수  $L_r/R_r$  이다.

$$\tau_r \frac{d\lambda_r^r}{dt} + \lambda_r^r = L_m i_s^r \quad (3)$$

식 (3)의 상태 방정식을 통해 전류모델 회전자 자속과 정지좌표계 고정자 전류에 대한 전달함수를 구할 수 있다 (그림 1). 전달함수  $G(s)$ 를 식 (4), (5)로 정리하였다.

$$\hat{\lambda}_{r,cm}^s = G(s) i_s^s \quad (4)$$

$$G(s) = \frac{L_m}{1 + \tau_r(s - j\omega_r)} \quad (5)$$

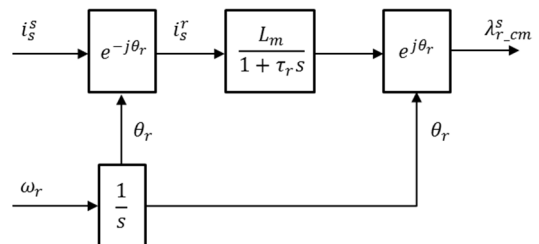


Fig. 1 Current Model Rotor Flux Observer

피드백 되는 회전자 속도 오차에 의한 전류모델의

영향을 보기 위해 속도 오차를 식 (6)으로 정의하였다.  $G(j\omega_e)$ 를 통해 복소 평면에서 속도 오차에 의한 영향을 해석하였다.

$$\omega_{err} = \omega_r - \hat{\omega}_r = k_{err} * \omega_r \quad (6)$$

$$\text{gain: } L_m \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\{\tau_r(\omega_e - \hat{\omega}_r)\}^2}} = L_m \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\{\tau_r(\omega_e - \omega_r + \omega_{err})\}^2}} \quad (7)$$

$$\text{phase delay: } \tan^{-1}(-\tau_r(\omega_e - \hat{\omega}_r)) = \tan^{-1}(-\tau_r(\omega_e - \omega_r + \omega_{err})) \quad (8)$$

식 (7), (8)을 통해 회전자 속도의 오차가 발생할 경우 전류모델을 이용한 회전자 자속 추정에서 크기 및 위상에 대한 오차가 발생함을 알 수 있다. 속도 오차가 양의 값을 가질 경우  $-\tau_r\omega_{err}$ 가 음의 값을 지상 오차가 속도 오차가 음의 값을 가질 경우 반대로 진상 오차가 발생한다.

## 2.2 고피나스 모델

고피나스 모델 자속 추정기는 전류모델의 저속에서의 안정성과 전압모델의 고속에서의 정확성을 동시에 얻기 위해 두 모델을 비례-적분 제어기를 통해 결합한 모델이다. 고피나스 모델의 페루프 전달함수는 식 (9), (10)과 같다.

$$\lambda_s^r = T(s)\lambda_{svm}^r + (1 - T(s))\lambda_{s\_cm}^r \quad (9)$$

$$T(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i} \quad (10)$$

$$T(j\omega) = \frac{\omega^2}{(-\omega^2 + K_i)^2 + (K_p \omega)^2} \cdot (\omega^2 - K_i + jK_p \omega) \quad (11)$$

동기 제어 주파수에 대한 고피나스 모델의 정상상태 해석을 위해 식 (4), (9)와 식 (10)을 복소평면에서 해석하였다 (그림 2). 이때 회전자 속도 오차는 전 주파수 영역에서 3%로 ( $k_{err} = 0.03$ ) 일정하게 발생한다고 가정하였다. 속도 오차에 대한 영향만을 정확하게 확인하기 위해 전압모델과 전류모델의 자속 추정에 영향을 주는 모터 파라미터  $R_s, R_r, L_m, \sigma L_s$ 는 정확히 측정되었다고 가정하였다.

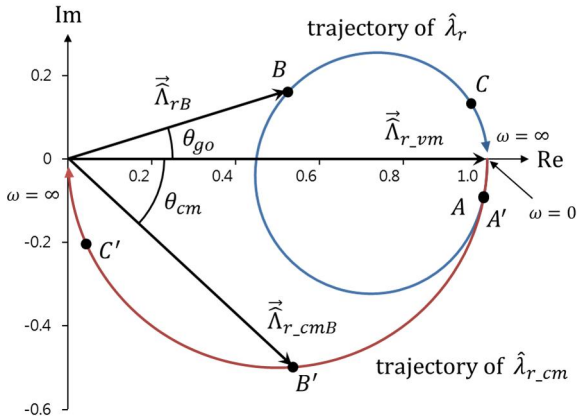


Fig. 2 Trajectory of estimated rotor flux in case of rotor speed estimation error exist ( $k_{err} = 0.03$ )

전압모델은 회전자 속도의 오차에 대해 독립적이므로 정확한 자속 추정이 가능하다. 그림 2의 실수 축에 1의 크기로 전압모델에서 측정된 정확한 회전자 자속 벡터를 나타냈다. 전류모델에 의한 자속 추정 값 ( $\hat{\lambda}_{r\_cm}$ )의 궤적을 적색 선으로 표시하였다. 식 (7)과 (8)에서 알 수 있듯이 동기 주파수가 증가하여 속도 오차의 크기가 증가함에 따라 위상 오차가 증가하여  $-90^\circ$ 에 수렴하고, 크기는 점점 감소하여 0에 수렴한다. 전류모델 오차에 대한 고피나스 회전자 자속 추정값 ( $\hat{\lambda}_r$ )의 궤적을 청색 선으로 표시 하였다. 그림 2의 A, A', B, B', C, C'는 각각 회전자 속도 50, 300, 1500RPM 에서의 고피나스 추정 자속과, 전류모델 추정 자속 값 이다.  $\hat{\lambda}_r$ 은 저 주파수 대역에서 거의  $\hat{\lambda}_{r\_cm}$ 과 거의 일치한다. 저 주파수 대역에서는 회전자 자속이 작기 때문에  $k_{err}$ 에 의한 속도 오차가 비교적 작기 때문에 전류모델의 오차 역시 작다(그림 2의 A, A').  $\hat{\lambda}_r$ 은 정격 모터 주파수 이하 중간 주파수 대역에서 직접적으로 속도 오차에 의해 발생한  $\hat{\lambda}_{r\_cm}$ 의 오차 보다 더 큰 오차가 추정 오차가 발생한다 (그림 2의 B, B'). [2] 식 (9)와 (11) 전달함수의 위상특성으로 인해 중간 주파수 대역에서 전류모델 자속 추정에 오차가 발생할 경우 고피나스 모델은 자속 오차를 증폭 시키는 역할을 한다. 따라서 피드백 되는 자속은 고피나스 모델을 사용 하지 않는 것 보다 더 부정확해 저 자속 제어가 불안정해 진다. 고속 주파수로 갈수록 식 (10)의 주파수 특성으로 인해 전압모델의 자속이 우세하므로 오차가 감소한다 (그림 2의 C, C')

그림 3은 Matlab 시뮬레이션을 통해  $k_{err} = 0.03$ 이고 회전자 속도가 300RPM인 조건에서 각 모델에 의한 정상상태 d상 추정 자속을 구한 것이다. 주파수 해석을 통해서 계산한 그림 2의 B, B' 점에서 추정된 자속 벡터와 위상 차이 및 크기 비가 정확히 일치하는 것을 확인하였다.

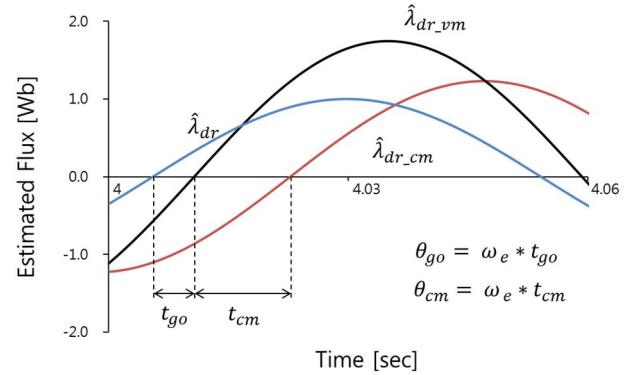


Fig. 3 Simulation results of rotor flux estimation using Gopinath flux observer in case of rotor speed estimation error exist ( $k_{err} = 0.03, 300RPM$ )

## 2.3 제안된 자속 추정 알고리즘

회전자 속도 오차에 의해 전류모델 추정 자속에 위상 지연 및 크기 오차가 발생하기 때문에, 위상 지연 검출을 통해 속도 오차를 보상하는 알고리즘을 제안하였다 (그림 4). 식 (8)을 통해  $\omega_{err}$ 를 추정하여 비례-적분 제어기를 이용하여 회전자 속도를 직접

보상하여 주는 방식으로 설계하였다.

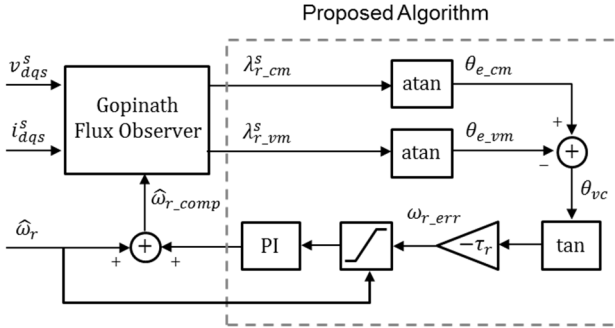


Fig. 4 Proposed rotor speed error reduction algorithm

## 2.4 시뮬레이션 결과

일반적인 고프나스 자속 추정기를 사용하여 회전자 자속을 제어하였을 경우와 제안된 알고리즘을 사용하였을 때 중간 주파수 대역에서 자속 전류 제어를 비교하였다 (그림 5). 그림 2와, 3에서 알 수 있듯이 일반적인 고프나스 추정 값은 오차가 크기 때문에 정상상태에서 자속 전류 오차가 크게 발생하는 것을 확인하였다. 실제 모터에서 인덕턴스의 포화를 고려하면 자속 추정 오차에 의한 자속 전류 제어 문제점은 더욱 크게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

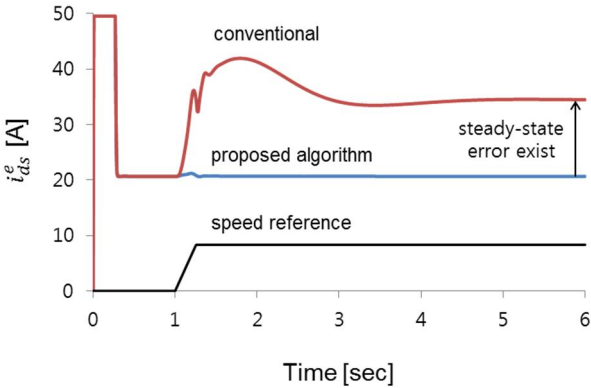


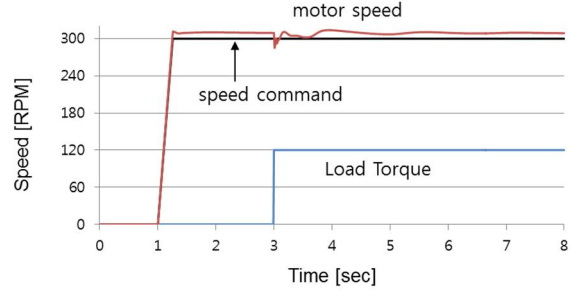
Fig. 5 Comparison of simulation results of flux current control ( $k_{err} = 0.03$ )

제안된 알고리즘을 적용하여 중간 주파수 대역에서 스텝 부하 토크에 대한 속도 제어 능력을 기존 고프나스 모델과 비교하였다 (그림 6). 속도제어기의 피드백 입력으로 그림 4에서 구해진  $\hat{\omega}_{r\_comp}$  를 사용하였다. 시뮬레이션 결과 정격 토크에 대해 안정적인 속도 제어 특성을 확인하였다. 또한 속도 센싱에 일정한 오차 ( $k_{err} = 0.03$ ) 가 존재함에도 불구하고 정상상태 오차가 없이 속도 지령에 대해 정확히 속도가 제어되는 것을 확인하였다.

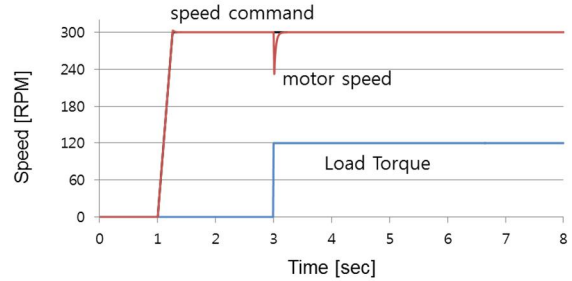
## 3. 결론

본 논문에서는 유도모터의 회전자 자속 기준 제어를 위한 자속 추정기에서 회전자 모터의 속도가 잘못 측정되었을 때 발생하는 자속 추정 및 제어의 문제점을 분석하고 이를 해결 할 수 있는 보상 알고리즘을

제안하였다.



(a) Conventional Gopinath flux observer



(b) Proposed algorithm

Fig. 6 Simulation results of speed control ( $k_{err} = 0.03$ , step rated load torque imposed at time 3.0sec)

회전자 속도가 잘못되어 실제 값보다 작게 측정되었을 때 전류모델에서 발생하는 위상 및 크기 오차로 인해 고프나스 자속 추정기에 위상 및 크기 오차가 발생한다. 이러한 영향은 특히 정격 모터 주파수 이하의 중간 주파수 영역에서 더욱 크게 나타난다. 따라서 정확한 회전자 자속 벡터 기준 제어가 불가능하고, 자속 전류 및 속도 제어에 정상상태 오차가 발생한다. 본 논문에서 제안된 알고리즘을 통해 속도 에러를 보상해 줌으로써 속도 측정 에러가 존재함에도 불구하고 자속 전류 제어가 안정적으로 되고, 부하 토크에 대해 정확한 속도가 제어됨을 확인하였다.

이 논문은 포항공과대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

## 참고 문헌

- [1] J. Holtz, "Sensorless Control of Induction Motor Drives", Proceedings of the IEEE, Vol. 90, No. 8, pp. 1359-1394, 2002, August.
- [2] P. L. Jansen and R. D. Lorenz, "A Physically Insightful Approach to the Design and Accuracy Assessment of Flux Observers for Field Oriented Induction Machine Drives," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, pp. 101-110, 1994, Jan./Feb.
- [3] Jang-Hwan Kim, Jong-Woo Choi, Seung-Ki Sul, "Novel Rotor Flux Observer Using Observer Characteristic Function in Complex Vector Space for Field Oriented Induction Motor Drives." IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 5, pp. 1334-1343, 2002

Sep./Oct.