

유도 전동기 센서리스 제어를 위한 Programmable Low-Pass Filter 기반의 향상된 고정자 자속 추정기

이상수¹, 박병건², 김래영¹, 현동석¹

한양대¹, 한국전기연구원²

Abstract

본 논문은 유도 전동기 센서리스 제어를 위해 자속 추정기로 사용되는 Programmable low-pass filter (PLPF)의 문제점 분석과 그 해결방안에 관한 연구이다. 기존의 PLPF는 추정된 동기 각속도를 극점으로 사용하고 실제 동기 각속도가 추정 값과 동일하다는 가정하에 순수 적분기와의 위상과 크기 오차를 보상한다. 하지만 추정 동기 각속도가 실제 값과 같지 않다면 이때 얻어진 크기와 위상 보상은 적절하지 않게 되고, 결과적으로 PLPF는 순수적분 기능을 제대로 수행할 수 없게 된다. 본 논문은 PLPF의 문제점을 극복하고자 동기 각속도 오차가 고정자 자속의 위상 지연 오차와 비례함을 분석하고, 이를 통하여 동기 각속도 오차를 보상하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 타당성은 실험을 통하여 증명되었다.

1. 서론

유도 전동기는 벡터 제어의 발달과 함께 다양한 산업 분야에서 널리 적용 되어 왔으며, 최근에는 속도 센서가 없는 벡터제어에 관한 연구가 활발히 진행 되고 있다. 고성능 벡터 제어를 위해서는 정확한 자속 추정이 필요한데, 자속 추정 방법으로는 전류 모델과 전압 모델이 널리 사용되어 왔다. 전류 모델은 전동기 파라미터 변동에 민감하며, 특히 회전자 속도 정보를 필요로 하기 때문에 센서리스 제어 방법으로는 적합하지 않다. 이와 반대로 고정자 자속 기준제어 (SFOC)에서의 전압 모델은 전동기 파라미터로서 고정자 저항만을 요구하며, 역기전력의 적분을 통해 간단히 고정자 자속을 추정할 수 있다. 전압 모델의 단점은 적분기의 dc drift와 saturation 문제가 있다. 이를 해결하고자 1차 low-pass filter (LPF)를 사용한 방법이 제안되었다. LPF는 기본적으로 크기와 위상 오차를 갖게 되며, 넓은 속도 영역에서 오차를 최소화 하기 위해서는 매우 낮은 극점을 요구한다. 이것은 dc drift 문제를 더욱 심각하게 만든다. 고정된 극점을 갖는 LPF의 문제점을 해결하고자, 속도에 비례하는 극점을 갖고 위상과 크기 보상을 갖는 programmable LPF (PLPF)가 제안되었다. PLPF에서의 크기와 위상 보상은 추정된 동기 각속도가 실제 값과 동일하다는 가정하에 결정된다. 따라서, 정확한 동기 각속도 추정의 여부가 PLPF의 적분기로서의 성능을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 순수 적분 동작의 판단은 역기전력에 대한 고정자 자속의 위상 지연이 90°가 되는지 여부이다. 이를 이용하여 본 논문에서는 동기 각속도 오차가 고정자 자속의 위상 지연 오차와 비례하는 관계를 분석하고 이에 대한 보상 방법을 제안한다. 제안한 방법을 실험을 통하여 그 타당성과 성능을 검증하였다.

2. 본론

2.1 기존의 PLPF를 이용한 전압 모델

유도 전동기에서 고정자 자속 추정을 위한 전압 모델은 정지 좌표 계의 고정자 전압 방정식 (1)을 이용한다.

$$v_s = R_s i_s + d\lambda_s / dt \quad (1)$$

(1)에서 역기전력 $E_s = v_s - R_s i_s$ 을 적분함으로써 고정자 자속 λ_s 을 간단히 구할 수 있다. 순수 적분 시 dc drift와 saturation 문제가 발생하므로 1차 LPF (2)가 대신 사용된다.

$$\lambda_{s_LPF} / E_s = 1/(s+a) \quad (2)$$

LPF는 순수 적분에 대하여 위상과 크기 오차를 갖기 때문에 넓은 속도 범위에서 오차를 줄이기 위해서는 극점 a 를 매우 낮게 설정해야 하는데 이는 dc drift 문제를 더욱 심각하게 만든다. LPF의 문제점을 해결하기 위하여 전동기 속도에 비례하는 극점을 갖고, 크기와 위상 보상을 갖는 PLPF (3)가 제안되었다. 크기와 위상 보상은 추정 동기 각속도가 실제 값과 일치한다는 가정에서 이루어진다.

$$\hat{\lambda}_s = \frac{1}{s+k|\hat{\omega}_e|} E_s \cdot (1+jk \cdot \text{sgn}(\hat{\omega}_e)) = \lambda_{s_LPF} \cdot (1+jk \cdot \text{sgn}(\hat{\omega}_e)) \quad (3)$$

2.2 기존 PLPF 사용시 문제점 분석

추정 동기 각속도가 실제 값과 일치하지 않게 되면 PLPF는 순수 적분기로서의 동작을 만족하지 못하게 된다.

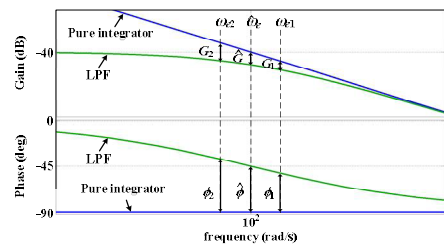


그림 1. 동작 주파수에 따라 필요한 크기 G 와 위상 ϕ 보상

그림 1은 PLPF가 동작 주파수에서 순수 적분기로서 동작하기 위해 필요한 크기 보상과 위상 보상을 보여준다. 실제 동기 각속도가 $\omega_e = \omega_{e1}$ 으로 추정 값 $\hat{\omega}_e$ 보다 큰 경우 이득 G_1 와 위상 ϕ_1 이 보상되어야 한다. 하지만 실제로 시스템에서 보상되는 위상과 크기는 $\hat{\omega}_e$ 에 의해 결정되기 때문에 $\hat{G} (>G_1)$ 과 $\hat{\phi} (>\phi_1)$ 이 보상된다. 따라서 PLPF는 자속을 정확히 추정할 수 없고, 추정되는 동기 각속도 역시 오차를 발생하게 된다. 그림 2는 동기 각속도 오차와 위상 지연 오차의 관계를 명확하게 보여준다. 먼저 $\omega_e = \omega_{e1}$ 으로 $\Delta\omega > 0$ 인 경우를 살펴본다. 그림 2 (a)에서 고정자 자속이 역기전력에 대하여 90° 위상 지연을 갖기 위해서는

3. 시스템 구성 및 실험결과

표 1. 유도 전동기 파라미터

P (pole number)	2	L_s [H]	0.2343
R_s [Ω]	0.84	L_r [H]	0.2331
R_r [Ω]	0.9714	L_m [H]	0.2289

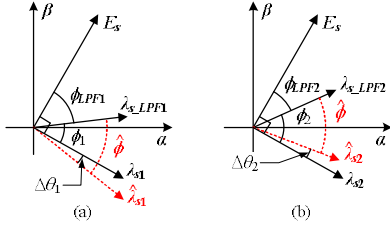


그림 2. PLPF 벡터 다이어그램: (a) $\Delta\omega > 0$ (b) $\Delta\omega < 0$

LPF의 출력 λ_{s_LPF1} 에 대하여 추가적인 위상 지연 ϕ_1 (4)이 필요하다. 하지만 실제로 ϕ_1 보다 더 큰 $\hat{\phi}$ (5)이 더해지고 있다. 따라서 고정자 자속의 위상 지연은 90° 보다 크게 된다. 반대로 그림 2 (b)에서 $\omega_e = \omega_{e2}$ 로 $\Delta\omega < 0$ 인 경우, 90° 위상 지연을 만족시키기 위해서는 LPF의 출력 λ_{s_LPF2} 에 ϕ_2 (4)의 추가적인 위상 지연이 요구된다. 하지만 실제로는 그보다 작은 $\hat{\phi}$ 이 더해지고 있으므로 고정자 자속의 위상 지연은 90° 보다 작게 된다. 위 분석은 동기 각속도 오차 $\Delta\omega$ 와 위상 지연 오차 $\Delta\theta$ 는 $\Delta\omega > 0$ 일 때 $\Delta\theta > 0$ 이고, $\Delta\omega < 0$ 일 때 $\Delta\theta < 0$ 의 관계로 연결되고 있음을 보여준다.

$$\phi_{1or2} = -\text{sgn}(\hat{\omega}_e) \cdot \frac{\pi}{2} - \left(-\tan^{-1} \frac{\hat{\omega}_e + \Delta\omega}{k \cdot |\hat{\omega}_e|} \right) \quad (4)$$

$$\hat{\phi} = -\text{sgn}(\hat{\omega}_e) \cdot \frac{\pi}{2} - \left(-\tan^{-1} \left(\frac{1}{k} \cdot \text{sgn}(\hat{\omega}_e) \right) \right) \quad (5)$$

2.3 동기 각속도 오차의 계산과 보상

동기 각속도 오차와 위상 지연 오차의 수학적 관계를 유도하기 위해 위상 지연 오차는 PLPF의 전달함수의 위상 응답을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\theta = -\text{sgn}(\hat{\omega}_e) \cdot \frac{\pi}{2} - (\phi_{LPF} + \hat{\phi}) = \tan^{-1} \frac{\hat{\omega}_e + \Delta\omega}{k \cdot |\hat{\omega}_e|} - \tan^{-1} \frac{\text{sgn}(\hat{\omega}_e)}{k} \quad (6)$$

역기전력을 이용한 전압 모델은 전동기 속도가 충분히 큰 영역에서 사용되므로 이 때 추정 동기 각속도는 동기 각속도 오차보다 충분히 크다고 할 수 있으며 (6)의 arctangent 항의 $(\hat{\omega}_e + \Delta\omega)/(k \cdot |\hat{\omega}_e|)$ 는 $1/k$ 와 같다고 가정할 수 있다. 따라서 k 값에 따라서 오프 라인으로 결정되는 γ 를 이용하여 $\tan^{-1}(1/k) = (1/k)\gamma$ 를 정의할 수 있고, (6)은 (7)로 근사화가 가능하다. (7)을 정리하면 동기 각속도 오차를 위상지연 오차로서 (8)으로 표현할 수 있다. (8)은 실시간으로 계산되며 추정된 동기 각속도에 더해진다. 이는 다음 샘플링 시간에서 PLPF의 극점으로서 사용된다. 그림 3은 제안된 보상 기법을 적용한 PLPF 블록도이다.

$$\Delta\theta \approx \frac{\hat{\omega}_e + \Delta\omega}{k \cdot |\hat{\omega}_e|} \cdot \frac{1}{\gamma} - \frac{\text{sgn}(\hat{\omega}_e)}{k} \cdot \frac{1}{\gamma} = \frac{\Delta\omega}{k \cdot |\hat{\omega}_e|} \cdot \frac{1}{\gamma} \quad (7)$$

$$\Delta\omega = k \cdot \gamma \cdot |\hat{\omega}_e| \cdot \Delta\theta \quad (8)$$

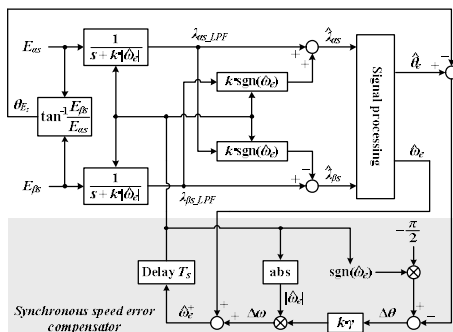


그림 3. 제안한 동기 각속도 오차 보상을 갖는 자속 추정기

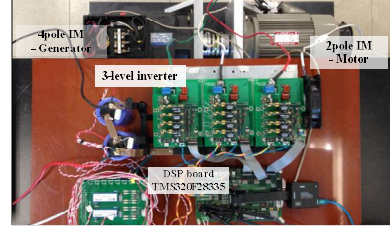


그림 4. 3상 유도전동기 실험 MG 세트 구성

본 논문에서는 표 1의 파라미터를 갖는 그림 4의 유도 전동기 실험세트를 구성하였다. 그림 5는 기존의 PLPF를 사용하는 경우, 발생하는 동기 각속도 오차가 고정자 자속의 위상 지연 오차와 비례함을 보여준다. 그림 6은 제안한 동기 각속도 오차 보상기법을 적용한 경우, 동기 각속도 오차 및 위상 지연 오차가 상당히 감소하고, 0으로 수렴하는 시간 역시 상당히 줄어들었음을 보여주고 있다.

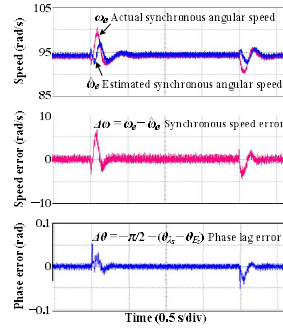


그림 5. 기존 PLPF 실험 결과

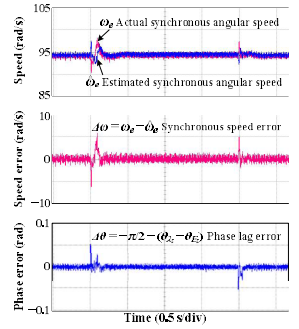


그림 6. 제안한 PLPF 실험 결과

4. 결론

본 논문에서는 PLPF를 이용한 전압 모델로서 추정한 고정자 자속의 위상 지연 오차가 동기 각속도 오차와 비례함을 분석하였다. 분석을 바탕으로 두 오차의 수학적 관계식을 유도, 계산된 동기 각속도 오차를 실시간으로 추정 동기 각속도에 보상하는 방법을 제안하였다. 제안한 보상기법의 타당성은 실험을 통하여 검증되었다.

참고 문헌

- [1] M. H. Shin, D. S. Hyun, S. B. Cho, S. Y. Choe, "An improved stator flux estimation for speed sensorless stator flux orientation control of induction motors," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 15, no. 2, pp. 312–318, Mar. 2000.
- [2] Z. Xing, Q. Wenlong and L. Haifeng, "A new integrator for voltage model flux estimation in a digital DTC system," *In TENCON 2006, IEEE Region 10 Conference*, PP. 1–4, Nov. 2006
- [3] J. Hu and B. Wu, "New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 13, no. 5, pp. 969–977, Sep. 1998.