

모터 운전 주파수에 동기화된 차단주파수를 갖는 High Pass Filter를 적용한 영구자석 동기전동기 자속기반 센서리스의 추정자속 DC offset 제거 기법

강지훈, 조관열⁺, 김학원
한국교통대학교 제어계측공학과

Eliminating Method of Estimated Magnetic Flux Offset in Flux based Sensorless Control of PM Synchronous Motor using High Pass Filter with variable cutoff frequency

Ji Hun Kang , Kwan Yuhl Cho⁺, Hag Won Kim
Korea National University of Transportaion

ABSTRACT

쇄교자속 기반 센서리스 제어는 저속에서 위치 추정 특성이 우수해 낮은 속도의 운전 영역을 가지는 애플리케이션에 많이 쓰인다. 그러나 계측 정보 오차와 모터 파라미터 변동으로 DC offset이 발생하는 문제가 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해 운전 주파수를 고려한 낮은 차단주파수를 갖는 HPF를 사용했으나, 낮은 DC 저감률로 인해 추정 자속에 DC 성분이 남는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 HPF의 차단주파수를 모터 운전주파수에 동기화하여 DC offset 저감률을 높이고 DC offset이 시스템에 미치는 정도에 따라 선택적으로 차단주파수를 가변함으로써 위상 앞섬도 감소시키는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 Matlab/Simulink에 의해 검증된다.

1. 서론

영구자석 동기전동기(PMSM)는 위치 센서를 기반으로 벡터 제어를 하지만 센서로 인한 가격을 상승 문제로 센서리스 제어가 연구되고 있다.^[2] 지금까지 연구된 모델 기반 센서리스 제어 중에서 쇄교자속 기반 센서리스 제어는 PMSM의 특성 덕분에 저속에서 비교적 정확한 위치 추정 특성이 있지만, 모델을 기반으로 하므로 파라미터 변동에 취약한 단점이 있다. 본 논문에서는 세탁기의 저속에서 회전자 위치 검출 특성이 우수한 쇄교자속 기반 센서리스 제어를 기반으로 서술한다. 쇄교자속 기반 센서리스 제어는 정확한 계측 정보 및 초기 위치 정보가 필요하다. 하지만 이러한 정보들의 오차로 인해 발생한 DC offset 성분은 회전자 위치 추정기 내부에 존재하는 적분기에 의해 누적되고 회전자 위치 추정에 오차를 유발하고 이는 전동기의 속도 및 토크 제어 성능을 저하한다.^[1] [REF1]는 HPF(High Pass Filter)를 자속 추정기에 적용하여 DC offset을 감소시켰지만 HPF가 모터의 운전 주파수를 고려해 Cutoff Frequency를 낮게 설계되어 DC 성분을 완전히 제거하지 못하는 단점을 가졌다. 따라서 본 논문에서는 운전 주파수에 따라 능동적으로 차단 대역을 가변하여, 높은 DC offset 저감률을 가지는 알고리즘을 제안한다.

2. 본론

2.1 쇄교자속 기반 위치 추정 방정식

PMSM의 회전자 위치는 식(1)과 같이 고정자 전압 방정식

을 정지좌표계 변환을 통해 수식적으로 유추할 수 있다. 회전자의 위치 정보는 고정자 쇄교자속 성분에서 얻을 수 있는데 $\lambda_{m\alpha\beta}$ 는 영구자석의 자속을 나타내며 회전자 위치 정보를 가지고 있다. 식(2)를 $\lambda_{m\alpha\beta}$ 에 대해서 정리하면 식 (2),(3)와 같이 회전자 위치를 구할 수 있다. $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta}$ 는 추정 자속을 $\hat{\theta}_r$ 는 추정된 위치를 의미한다.

$$V_{\alpha\beta} = R_s i_{\alpha\beta} + L_s \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} + \frac{d\lambda_{m\alpha\beta}}{dt} \quad (1)$$

$$\hat{\lambda}_{m\alpha\beta} = \int (V_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta}) dt - L_s i_{\alpha\beta} \quad (2)$$

$$\hat{\theta}_r = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\lambda}_{m\beta}}{\hat{\lambda}_{m\alpha}} \right) \quad (3)$$

2.2 기존 위치 추정기 문제점

그림(1)은 기존 쇄교자속 기반 위치 추정기를 나타낸다. 쇄교자속 기반 위치 추정기는 모터에 인가되는 전류 및 전압과 모터 파라미터값을 기반으로 위치를 추정한다. 하지만 전류 계측 센서의 비교기 오차와 구동 중 열로 인한 모터 파라미터값 변동, 초기위치 오차로 인해 DC offset 성분이 나타난다. 기존 논문에서는 서론에서 언급했듯이 차단주파수가 낮은 HPF를 적용하여 추정 자속에 DC offset이 남아 추정된 위치를 왜곡시키는 문제점을 가지고 있다.

2.3 제안하는 위치 추정기

앞서 제시한 문제점을 해결하기 위해 모터 운전 주파수에 특정 비율로 동기화된 차단주파수를 갖는 HPF를 제안한다. 특정 비율을 선정하면서 고려되어야 할 점은 센서리스의 안정적인 전환조건과 가변 차단주파수를 갖는 HPF의 특성이다. 센서리스의 안정적인 전환 조건은 초기 회전자 위치를 추정하는 초기기동 알고리즘을 기반으로 한다. 초기기동 알고리즘은 Align, Open Loop, Closed Loop로 구성되며 Align과 Open Loop는 초기 회전자 위치 정보를 추정하기 위한 구간이고 Closed Loop는 센서리스 제어 구간이다. 본 논문에서 적용된 애플리케이션의 부하변동이 큰 특성을 고려해 센서리스 전환 조건을 위치 오차 15° 미만으로 선정한다. 그리고 가변 차단주파수를 갖는 HPF의 특성을 살펴보면 운전주파수가 증가함에 따라 DC offset 저감률은 증가하고 위상 앞섬은 일정하다. 본 논문에서는 앞서 제시한 두 가지 조건과 센서리스 전환 시 운전 주

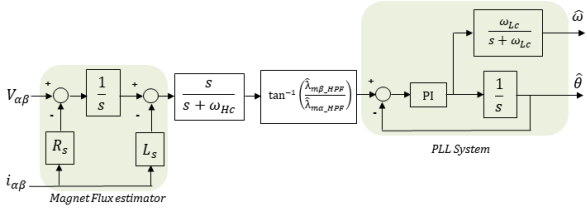


그림1 기존 쇄교자속 기반 위치 추정기

과수를 고려해 식 5와 같이 비율을 선정한다. ω_{HC} 는 HPF의 차단주파수를 의미하며 ω_r 은 운전주파수를 의미한다.

2.3.3 가변 차단주파수를 갖는 HPF 적용 방법

식(4)의 비율을 가지고 지속해서 차단주파수를 증가시켰을 때 DC offset 저감률은 증가한다. 하지만 차단주파수가 특정 값에 도달하면 DC offset이 시스템에 끼치는 영향이 적고 위상 앞섬은 유지되어 고속 운전 영역에서도 일정한 위상차를 가지게 된다. 따라서 특정 값에서 차단주파수를 고정해 위상 앞섬을 감소시키는 방법이 필요하다. 그림 2는 운전주파수에 따른 HPF 적용 방법을 나타낸다. ω_{min} 은 Closed Loop 전환 시점에서 HPF 차단주파수를 의미하고 ω_{max} 는 고정할 차단주파수 값을 의미하며 35rad/s로 선정하였다. 제안된 방법은 Matlab/Simulink를 통해 그 효과를 검증하였다. 그림 3은 고속 운전영역에서 추정 자속과 실제 자속의 파형을 나타내고 이를 통해 기존보다 오프셋의 저감률이 증가한 것을 알 수 있다. 그림 4는 저속운전영역에서 비교 파형을 나타낸다. 제안하는 방법은 기존보다 추정된 자속에 오프셋이 더 많이 제거되었기 때문에 추정된 위치의 왜곡률이 감소하고 속도 추정 특성이 향상된다.

$$\omega_{HC} = 0.124\omega_r \quad (4)$$

표1 모터 모의해석 파라미터 값

	R_s	L_s	Pole	ϕ_f	f_s
값	6.3[Ω]	28.14[mH]	48	0.143[wb]	16[kHz]

3. 결론

쇄교자속 기반 센서리스 방식은 2.2절에서 언급한 요인들로 인해 DC offset이 발생해 위치 추정 특성에 악영향을 준다. 이를 방지하기 위해 기존에서는 운전주파수를 고려한 낮은 HPF를 적용한 결과 DC offset이 추정 자속에 남아 위치 오차를 증가시켰다. 따라서 본 논문에서는 모터 운전주파수에 HPF의 차단주파수를 동기화시켜 DC offset 저감률을 높이는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 높은 DC offset 저감률을 가지므로 추정 자속에 포함된 DC offset을 기존에 비해 상대적으로 많이 제거해 속도 및 토크 제어 특성을 향상시킨다.

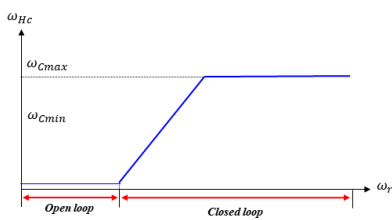


그림2 가변 차단주파수를 갖는 HPF 적용방법

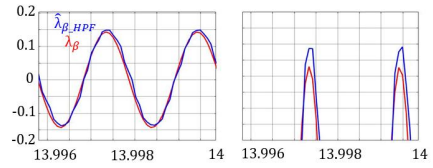


그림3-a 기존 자속 추정기(고속)

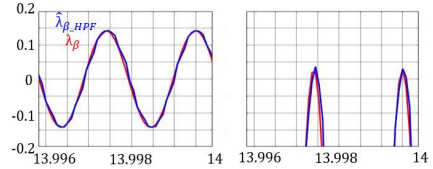


그림3-b 제안하는 자속 추정기(고속)

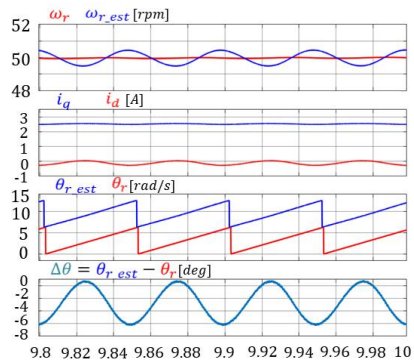


그림4-a 기존 HPF 저속 운전 영역

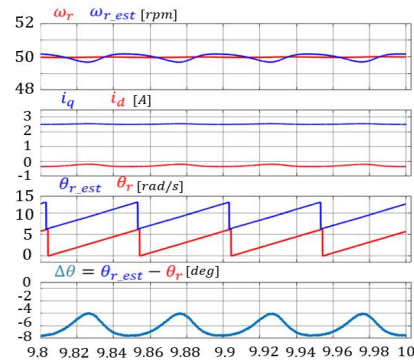


그림4-b 제안하는 HPF 저속 운전 영역

이 논문(저서)은 2016년도 에너지인력양성사업의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.20164030201100)

참고 문헌

- [1] 김학준, 조관열, 김학원, 이광운. (2017). 표면부착형 영구자석 동기전동기의 자속기반 센서리스 제어 알고리즘의 추정자속 옵셋 제거 기법. 전력전자학회논문지, 22(3), 216-222.
- [2] Y. Zhang, C. Liu and L. Zhang, "Sensorless control of SRM based on improved simplified flux linkage method," 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, 2014, pp. 722-726.