

# 쇄교자속관측기를 이용한 저속 영역에서의 표면부착형 영구자석 동기전동기의 토크 오차 보상기법

## Torque error compensation of SPMSM drives with a stator flux linkage observer at low speed

최성민, 박창석, 이재석<sup>★</sup>

Sung-min Choi, Chang-Seok Park, Jae-Suk Lee<sup>★</sup>

### Abstract

A compensation algorithm targeting for torque development from a SPMSM including a low speed operation is presented in this paper. As known, PM flux linkage in SPMSM is varied by temperature. Maximum Torque per Ampere (MTPA) uses the calculated PM flux linkage, and torque error occurs due to change of PM flux linkage. In the manuscript, estimated PM flux linkage is obtained using a stator flux observer. The torque error is corrected using the estimated PM flux linkage. The proposed algorithm is implemented and verified in simulation and experiment.

### 요약

본 논문은 저속 운전을 포함한 영구자속의 자속 추정을 통하여 Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM)의 토크 오차를 보상하는 기법에 대해 기술한다. 영구자속의 자속은 온도에 따라 변화한다. 동손을 최소화하기 위해 적용되는 Maximum Torque per Ampere (MTPA)는 영구자속의 자속 추정값을 이용하여 구현되기 때문에 영구자속의 자속이 변화할 경우, 토크 오차가 발생한다. 본 논문에서는 쇄교자속관측기를 이용하여 영구자속의 자속을 실시간으로 추정하여 제어알고리즘에 적용함으로써 토크 오차를 보상하는 기법을 제안한다. 제안된 기법은 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

*Key words* : Torque error, Gopinath flux observer, SPMSM drives, Kalman filter, Low speed operation

### 1. 서론

영구자석동기전동기(PMSM)는 고효율, 고전력밀도 등의 장점으로 인하여 다양한 분야에 널리 사용되고 있다. PMSM은 회전자의 구조에 따라 매입형

영구자석 동기전동기(IPMSM)와 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)로 분류한다. PMSM은 위와 같은 장점이 있는 반면에 온도 또는 동작조건 등 외부환경에 따라 파라미터들이 변하는 특징이 있다 [1]. MTPA를 이용한 제어기법은 영구자석

\* Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk University

★ Corresponding author

E-mail : zpfzpfzpdls@gmail.com, Tel : +82-63-270-2398

※ Acknowledgment

This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (No.2017R1D1A1B03031979)

Manuscript received Dec. 7, 2018; revised Dec. 13, 2018; accepted Dec. 19, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

동기전동기의 효율적인 운전을 위하여 사용하는 기법이다. MTPA는 일반적으로 인덕턴스, 영구자석자속 등의 파라미터값을 이용하여 look-up table (LUT)형식으로 구축되기 때문에 파라미터 변화가 반영이 되지 않는 경우는 토크 오차가 발생한다 [2, 3]. 특히, 영구자석의 자속은 토크발생이 큰 영향을 미치는데 영구자석은 온도가 상승함에 따라 감소되어 자속이 감소하는 특징을 가지고 있다. 온도 변화에 따른 토크 오차를 보상하기 위해 여러 가지 방법들이 연구되어왔다. 실시간 파라미터 추정기법을 MTPA에 반영하여 오차보상이 가능하지만 일반적으로 구현상의 어려움이 있다 [4, 5]. 전압모델 기반 쇄교자속관측기의 특성상 저속에서 성능이 떨어질 것으로 예상된다 [6]. 전류모델과 전압모델 기반으로 설계된 Gopinath 쇄교자속관측기를 이용한 경우에도 저속영역에서는 자속추정 정밀도가 낮아지는 것이 확인되었다 [7]. 본 논문에서는 Gopinath 쇄교자속관측기와 저속영역에서의 자속추정정밀도 향상을 위한 알고리즘을 이용하여 영구자석의 자속을 추정하였고, 추정자속은 SPMSM의 토크 오차 보상을 위해 사용된다. 본 논문에서는 저속운전을 포함한 다양한 온도조건에서의 시뮬레이션과 실험결과를 통하여 제안하는 기법을 검증하였다.

## II. 본론

### 1. Gopinath 쇄교자속관측기

Gopinath 쇄교자속관측기는 유도전동기 및 영구자석전동기의 제어 목적으로 적용되고 있다 [8]. 영구자석 동기전동기에 적용되는 Gopinath 쇄교자속관측기는 그림 1과 같이 전류모델과 전압모델로 구성되어 있다.

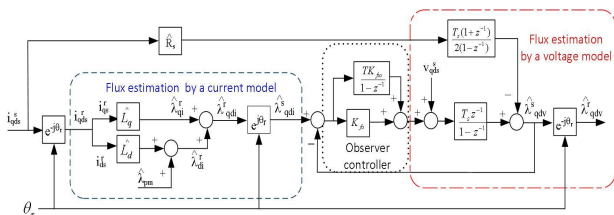


Fig. 1. A block diagram for a stator flux linkage observer implemented for the proposed compensation algorithm [8].

그림 1. 제안된 토크 보상 알고리즘을 위해 구현된 고정자 쇄교자속관측기 블록 다이어그램 [8]

저속운전에서 전압의 경우 센서로부터 데드타임 및 잡음으로 인한 왜곡으로 인하여 자속추정을 위해 사용하기 적절하지 않다. 따라서, (1)과 (2)에서 볼 수 있듯이 저속운전영역에서는 전류모델을 통하여 자속을 관측한다.

$$\hat{\lambda}_{di}^r = \hat{\lambda}_{pm}^r + \hat{L}_d i_d^r \quad (1)$$

$$\hat{\lambda}_{qi}^r = \hat{L}_q i_q^r \quad (2)$$

그림 1에서 전류모델의 경우 개방 루프에서 자속이 추정된다. 따라서, 자속 추정에 사용되는 파라미터들의 변화에 영향을 받는 단점이 있다. 고속운전의 경우 SPMSM의 높은 역기전력으로 인해 데드타임 등과 같은 외부요인을 무시할 수 있다. 또한, 고속운전에서는 고정자 저항의 전압 강하는 무시될 수 있다. 따라서 (3)을 기반으로 개발된 전압모델을 통해 자속을 추정할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_{qdv}^s = \int (V_{qds}^s - R_s i_{qds}^s) dt \quad (3)$$

저속운전영역과 고속운전영역의 기준은 전류모델과 전압모델 사이에 위치한 제어기의 대역폭을 통하여 결정한다. 그림 2는 쇄교자속관측기의 주파수 응답 시뮬레이션 결과를 보여준다. 전류모델과 전압모델 사이의 교차주파수는 test SPMSM 정격속도의 0.1[p.u]이다. 쇄교자속관측기의 추정정확도는 저속에서 파라미터 변화에 영향을 받으며, 교차주파수 이후에는 자속 추정 정확도가 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다.

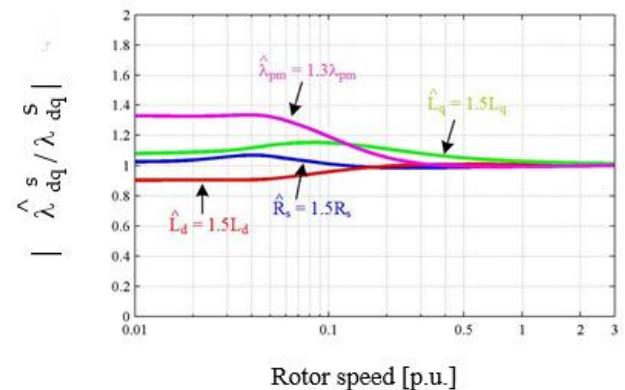


Fig. 2. Estimation accuracy in a frequency domain of the stator flux linkage observer while parameter varies [8].  
그림 2. 파라미터 변화에 따른 주파수 영역에서의 자속추정기의 추정 정확도 [8]

2. 저속에서의 토크 오차 보상 기법

SPMSM은 구조상  $L_d \cong L_q$ 의 특징을 가지고 있기 때문에 토크 방정식은 (4)과 같이 단순화 할 수 있다.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_{pm} i_q^r \quad (4)$$

(4)에서  $T_{em}$ 은 SPMSM에서 발생하는 토크이며  $\lambda_{pm}$ 은 회전자에 위치한 영구자석의 자속을 나타낸다. SPMSM의 경우는 d축 전류를 '0'으로 제어하기 때문에 토크는 q축 전류를 통해 발생한다. 영구자석의 자속은 온도에 따라 변하고 이러한 자속의 변화는 MTPA에 반영되지 않는다. 따라서 실제로 발생하는 토크에 오차가 발생한다. 본 논문에서는 그림 1의 쇄교자속관측기를 통해 영구자석의 자속 변화를 MTPA LUT에 반영함으로써 토크의 오차를 보상하는 기법을 제안하였다. d축 추정 자속은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_{dv}^r = \hat{\lambda}_{pm}^r + \hat{L}_d i_d^r \quad (5)$$

SPMSM에서는 d축 전류를 0전류로 제어하기 때문에 (5)의 d축 추정 자속은 곧 영구자석의 추정 자속이 된다. 토크 오차 보상 변수는 (6)과 같이 나타낼 수 있으며 MTPA에 반영된다.  $\hat{\lambda}_{pm\,init}$ 은 MTPA LUT 제작에 사용된 영구자석 자속의 초기 추정값이고,  $\lambda_{pm}$ 은 영구자석 자속의 추정값이다.

$$K_{cr} = \frac{\hat{\lambda}_{pm\,init}}{\hat{\lambda}_{dv}^r} = \frac{\hat{\lambda}_{pm\,init}}{\hat{\lambda}_{pm}} \quad (6)$$

위의 알고리즘은 저속운전에서 파라미터 변화에 취약한 단점이 있으나, 칼만 필터를 시스템에 추가함으로써 해결할 수 있다. d축 전류를 0으로 가정하면, 정상상태에서의 영구자석의 자속을 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_{pm2} = \frac{V_q^r - R_s i_q^r}{\omega_r} \quad (7)$$

(7)을 통한 자속 추정 시 q축 전압의 데드 타임 등의 외부요인에 의해 왜곡되기 쉽다. 따라서 추정된 자속의 고조파 신호 및 노이즈를 제거하기 위해 칼만 필터를 사용한다. 이 방법을 사용하면 토크

오차는 저속운전영역에서도 보상될 수 있다. 이 방법은 칼만 필터에 의하여 동적 성능의 저하가 발생하므로, 토크 오류 최소화와 동적 성능 저하의 균형을 맞추기 위하여 자속의 선택은 그림 3의 순서도에 따라 결정된다.

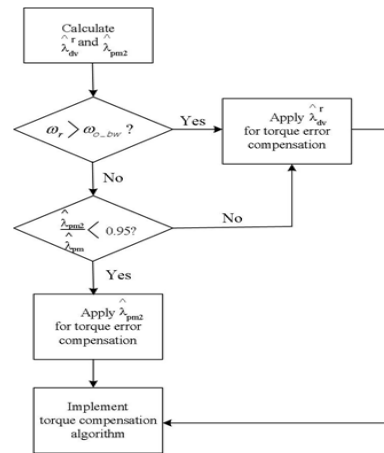


Fig. 3. Flow chart to select the estimated PM flux linkage to be applied to the proposed torque compensation algorithm.

그림 3. 제안된 토크 보상 알고리즘에 적용 할 영구자석 자속 선택 순서도

그림 3의 순서도에 따라 MTPA LUT에 사용된 초기 자속 추정값과 관측기를 통해 추정된 자속값의 오차가 5%보다 작은 경우 추정된 자속값이 사용되고, 5%보다 큰 경우 (7)을 사용한 자속 추정값이 토크 오차 보상 알고리즘에 사용된다. 이 과정을 적용하면 영구자석 온도 변화로 인한 토크의 오차를 저속운전영역에서 정격 속도까지 보상할 수 있다.

3. 실험 결과

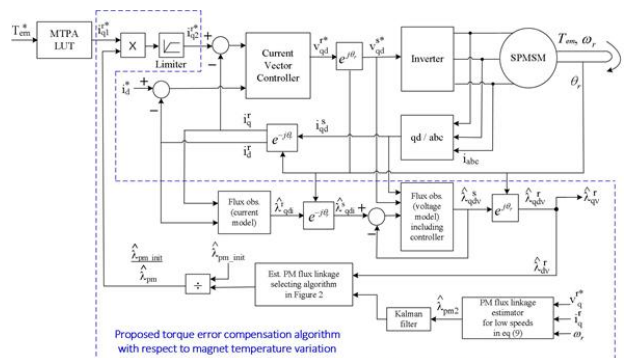


Fig. 4. Block diagram of the proposed torque error compensation control system for the SPMSM drive. 그림 4. SPMSM 드라이브를 위한 제안된 토크 오차 보상 제어시스템 블록 다이어그램

그림 4는 토크 오차 보상 제어시스템의 블록 다이어그램을 보여준다. q축 전류지령  $i_{q1}^*$ 는 쇄교자속관측기를 통해 추정된 자속을 사용하여 변경된다. 변경된 q축 전류지령  $i_{q2}^*$ 는 시스템의 최대 전류값을 초과하지 않도록 제한된다.

실험에 사용한 SPMSM 및 드라이브의 사양을 표 1에 정리하였다. 그림 5는 실험 셋업을 보여준다. 부하 모터는 속도제어모드로 동작하며 SPMSM에 기계적으로 연결되어있다. PWM 주파수가 10[kHz]인 모터 드라이브에서 구현되었으며, SPMSM 내부에 비접촉 온도계를 삽입하여 Fluke 멀티미터를 통해 회전자 온도를 측정하였다.

Table 1. Specifications of the test SPMSM drives.

표 1. 실험에 사용된 SPMSM 및 드라이브 사양

Parameters	Value
Stator resistance	0.75[Ω]
Stator inductance	0.85[mH]
PM flux linkage	0.128[T]
Poles	4
Rated torque	0.127[N·m]
Rated voltage	25[V]
Rated current	2.8[A]
Rated speed	620[rad/sec]
Torque sensor capacity	0.5[N·m]
PWM sampling time	100[usec]

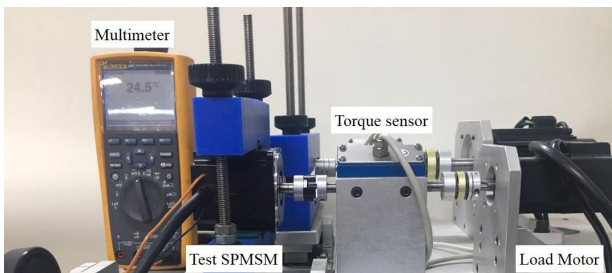
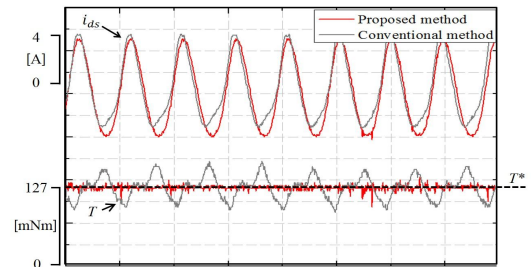


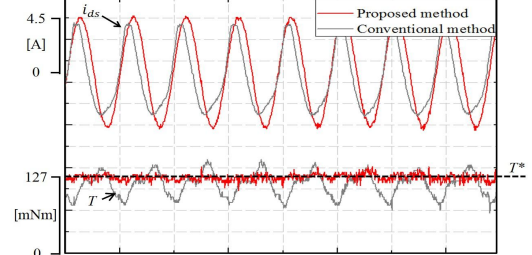
Fig. 5. Experimental setup of SPMSM drive system [8].

그림 5. SPMSM 구동 시스템 실험 셋업 [8]

SPMSM 드라이브의 과도상태 및 정상상태 동적 성능실험은 25[°C]와 100[°C]의 온도 조건에서 저속운전영역에서의 성능을 확인하기 위하여 쇄교자속관측기의 교차주파수 보다 낮은 속도에서 실험을 진행하였다. 본 논문에서 제안된 알고리즘과 [4]에서 제시된 방법을 저속운전영역에서 실험을 통해 비교하였다.



(a) temperature of permanent magnet = 25[°C]



(b) temperature of permanent magnet = 100[°C]

Fig. 6. Steady state response of current-voltage model and voltage model (Operating conditions :  $\omega_r = 65$  [rad/sec], Torque command : 127[mNm]).

그림 6. 전류-전압모델 및 전압모델의 정상 상태 응답

(운전조건 :  $\omega_r = 65$ [rad/sec], 토크지령 : 127[mNm])

그림 6 (a)는 제안된 알고리즘이 기존 방법을 이용하여 추정된 자속에 비하여 왜곡이 적은 것을 보여준다. 25[°C]에서는 자속의 변화가 없기 때문에 추정자속의 평균값은 두 방법 모두 동일함을 확인할 수 있다. 그림 6 (b)는 100[°C]에서의 실험 결과를 보여준다. 기존 알고리즘을 이용한 경우 자속변화가 반영이 되지 않았기 때문에 토크지령보다 낮은 토크가 출력되지만 제안된 알고리즘을 적용할 경우 토크오차가 보상되는 것을 확인할 수 있다. 그림 6의 저속운전영역 실험 결과를 통하여, 제안된 알고리즘이 기존 방법보다 왜곡 및 정상상태 오차가 개선된 토크를 발생하는 것을 확인하였다.

### III. 결론

본 논문에서는 SPMSM의 영구자석 온도 변화로 인한 자속의 변화에 의해서 발생하는 토크 오차 보상 알고리즘이 제안되었다. Gopinath 쇄교자속관측기를 사용하여 SPMSM의 자속을 추정하였고, 칼만 필터를 사용하여 저속운전에서 영구자석 온도 변화로 인한 토크 오차 보상 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 토크 오차 보상 알고리즘은 수정된 전압모델 기반의 자속 추정법을 적용하여 기존 방

법에 비해 개선된 토크 응답을 보여주는 것을 실험을 통해 확인하였다.

## References

- [1] B. Sneyers, D. W. Novotny and T. A. Lipo, "Field-weakening in buried permanent magnet AC motor drives," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, IA-21, pp.398-407, 1985. DOI:10.1109/TIA.1985.349661
- [2] J. Kim and S. Sul, "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," *IEEE Trans. on Ind. Appl.* vol.33, no.1, pp.43-48, 1997. DOI:10.1109/28.567075
- [3] S. Morimoto, M. Sanada and Y. Takeda, "Wide-speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high performance current regulator," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol.30, no.4, pp.920-926, 1994. DOI:10.1109/28.297908
- [4] H. Kim and R. D. Lorenz, "Using on-line parameter estimation to improve efficiency of IPM machine drives," *IEEE Power Electr. Specialist Conf.* pp.815-820, 2002. DOI:10.1109/PSEC.2002.1022554
- [5] F. Alonge, F. D'ippolito, G. Feranta and F. M. Ramondi, "Parameter identification of induction motor model using genetic algorithms," *Proc. of IEEE control theory and appl.* vol.145, no.6, pp.587-593, 1998. DOI:10.1049/ip-cta:19982408
- [6] Y. Kim and S. Sul, "Torque control strategy of an IPMSM considering the flux variation of the permanent magnets," *IEEE Ind. Appl. Society Annual Meeting*, pp.1301-1307, 2007. DOI:10.1109/07IAS.2007.202
- [7] C. Park and J. Lee, "A torque error compensation algorithm for surface mounted permanent magnet synchronous machines with respect to magnet temperature variations," *Energies*, 2017.
- [8] J. Lee and R. D. Lorenz, "Robustness analysis of deadbeat direct torque and flux control for IPMSM drives," *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, vol.63, no.5, pp.2775-2784, 2016. DOI:10.1109/EPE.2013.6634663

## BIOGRAPHY

### Sungmin Choi (Member)



2018 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.  
2018~Present : Graduate student in School of Electrical Engineering, Chonbuk National University.

### Chang-Seok Park (Member)



2012 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.  
2014 : MS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.  
2018 : PhD degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.

2018~Present : Senior Engineer, LG Electronics Control Lab.

### Jae Suk Lee (Member)



2006 : BS degree in Electrical Engineering, Inha University.  
2009 : MS degree in Electrical Engineering, the University of Wisconsin-Madison.  
2013 : PhD degree in Electrical Engineering, the University of Wisconsin - Madison.

2014~2015 : Electrical Engineer, General Electric global research, USA.

2015~2017 : Assistant Professor in Department of Electrical Engineering, Kyungnam University.

2017~Present : Assistant Professor in Department of Electrical Engineering, Chonbuk National University.