

# Affine Projection 알고리즘을 이용한 표면 부착형 영구자석 전동기의 온라인 파라미터 추정

문병훈<sup>1</sup>, 김형우<sup>1</sup>, 최준영<sup>†</sup>

## Online Parameter Estimation of SPMSM using Affine Projection Algorithm

Byung-Hun Moon<sup>1</sup>, Hyoung-Woo Kim<sup>1</sup>, and Joon-Young Choi<sup>†</sup>

### Abstract

We propose an online parameter estimation method for surface-mounted permanent-magnet synchronous motor (SPMSM) using an affine projection algorithm (APA). The proposed method estimates parameters with two APAs based on the discrete-time model equation of SPMSM during motor operation. The first APA is designed to estimate inductance, and the second APA is designed to estimate resistance and flux linkage. However, in case when the d-axis current is controlled to 0A, the second APA cannot estimate resistance and flux linkage simultaneously because the matrix rank in APA becomes deficient. To overcome this problem, we temporarily inject a negative reference current input to the d-axis control loop, and the matrix in the APA then becomes full rank, which enables the simultaneous estimation of resistance and flux linkage. The proposed method is verified by PSIM simulation and an actual experiment, and the results reveal that SPMSM parameters can be estimated online during motor operation.

**Key words:** APA(Affine Projection Algorithm), Online parameter estimation, PI control, SPMSM(Surface-mounted Permanent-Magnet Synchronous Motor)

### 1. 서 론

최근 permanent-magnet synchronous motor(PMSM)는 높은 전력 밀도 및 토크, 고효율, 간단한 구조로 인한 장점으로 산업용 서보 드라이버, 전기 자동차, 풍력 발전 등 많은 분야에서 사용되고 있다. 모터 파라미터는 오류 진단, 고정자/회전자 온도 감시뿐만 아니라 고성능 제어를 위해 사용된다. 하지만 파라미터 값은 온도, 자속포화, 모터의 노화와 같은 요소들에 영향을 받아 변하게 되고 실제 파라미터 값과 공칭 값의 차이는 제어 성능을 감소시키는 원인이 된다. 그러므로 고성능 제어와 사고 진단, 상태 감시, 토크제어, 센서리스 제어를 위해 정확한 파라미터 값을 얻는 것이 중요하다. 지금까지 많

은 파라미터 추정 방법들이 제안되어 왔고 크게 오프라인과 온라인 방식으로 나눌 수 있다<sup>[1]-[3]</sup>.

오프라인 방식은 별도로 주어진 특정 시간 동안 파라미터를 추정한다. 하지만 추정 종료 후에는 구동 중에 발생하는 온도변화, 자속포화 등과 같은 주변 환경에 따라 변화하는 파라미터는 반영하지 못한다. 이러한 오프라인 방식의 단점을 극복하기 위해 실시간으로 파라미터를 업데이트 할 수 있는 방법들이 사용되고 있다<sup>[4]</sup>.

온라인 파라미터 추정을 위해 model reference adaptive system(MRAS)<sup>[5]</sup>, recursive least square(RLS)<sup>[6]</sup>, observer-based methods, extended Kalman filter(EKF)<sup>[7]</sup>, neural network(NN)와 같은 방법들이 주로 사용되고 있다<sup>[8]</sup>. 기존의 방법에서는 특정한 파라미터를 알고 있다고 가정할 후 나머지 파라미터를 추정하거나<sup>[5]</sup>, 전기 파라미터를 일부만 추정하고<sup>[7]</sup>, 표면 부착형 영구자석 전동기의 경우 추정 시 발생하는 계수부족 문제 해결을 위해 d축 전류가 0일 때와 0이 아닐 때의 전압 전류 측정값이 동시에 요구되는 단점이 있다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 surface-mounted permanent-magnet synchronous motor(SPMSM)의 이산시간 d-q모델 식과

Paper number: TKPE-2018-23-1-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: jyc@pusan.ac.kr, Dept. of Electronics Engineering, Pusan National Univ. Tel: +82-51-510-2490 Fax: +82-51-515-5190

<sup>1</sup> Dept. of Electronics Engineering, Pusan National Univ. Manuscript received Nov. 27, 2017; revised Dec. 19, 2017; accepted Jan. 19, 2018

적용필터의 한 종류인 affine projection algorithm(APA)을 이용하여 온라인으로 파라미터를 추정하는 방법을 제시한다. Recursive least square(RLS) 알고리즘은 빠른 수렴속도를 가지고 있지만 높은 복잡성으로 실제 적용 시 많은 계산량이 요구되므로, 간단한 구조와 낮은 복잡성을 갖는 least mean square(LMS) 알고리즘을 혼합한 형태의 APA를 알고리즘을 이용한다. 따라서, APA는 LMS의 특징인 간단한 구조 및 적은 계산량에 RLS의 장점인 빠른 수렴속도의 특징을 가지고 있으며 외부 잡음 신호에 강인한 성능을 보여준다<sup>[9],[10],[12]</sup>. [4]에서는 interior permanent-magnet synchronous motor(IPMSM) 파라미터 추정을 위하여 APA를 적용하였고 실험결과를 통하여 RLS 대비 APA의 우수한 성능을 검증하고 있다.

본 논문에서는 APA를 SPMSM에 적용하여 전기 파라미터 추정을 위한 두 개의 APA식을 구성하고, 이때 발생하는 계수부족 문제를 해결하여 모터의 파라미터를 온라인으로 추정한다. 첫 번째 식으로 인덕턴스를 추정하고 이를 바탕으로 저항과 자속을 추정한다. SPMSM 제어 시, 단위 전류 당 최대 토크(Maximum Torque per Ampere, MTPA) 제어를 위해 자속 성분 전류인  $i_d$ 를 0으로 제어하고 모든 고정자 전류를 토크 성분 전류인  $i_q$ 가 되도록 한다.

이 경우 SPMSM 모델 식을 이용하여 저항과 자속을 구하기 위해서는 계수부족(Rank-Deficient) 문제가 발생하게 되는데, 기존의 방법에서는 이 문제를 해결하기 위해 한 개 또는 두 개의 파라미터 값을 고정시키고 추정하는 방법들이 제안되었다. 하지만 구동 상태에 따라 PMSM의 파라미터들은 변하기 때문에 공칭 값으로 고정시킨 파라미터들의 변화는 추정 오차의 원인이 된다.

본 논문에서는 계수부족 문제의 해결을 위해 모터에 전류를 인가하는 방법을 이용한다. 이 방법에서는 온라인 파라미터 추정을 위해 d축에 전류를 주입함으로써 추가적인 정상상태 식을 얻을 수 있다. 전기 파라미터 추정을 위한 일시적인 음의 d축 전류 인가는 속도 및 토크의 순간적인 변화를 발생시킬 수 있으나 속도 및 전류 제어기에 의하여 바로 원래의 속도와 토크로 수렴하는 동시에 계수부족 문제를 해결하여 정확한 파라미터를 추정할 수 있어 결과적으로 제어 성능의 향상을 도모할 수 있다<sup>[4],[8],[11]</sup>. 본 논문에서는 제안하는 방법의 성능을 검증하기 위해 PSIM(Powersim)을 이용한 모의 실험 및 SPMSM을 이용한 실험을 수행하였다.

## 2. SPMSM D-Q모델 및 제어 구조

그림 1은 본 논문에서 사용한 전체 구동 시스템의 블록 다이어그램이다. d-q변환을 통해 벡터 제어(Vector Control)를 하였고, 전류 및 속도 제어는 PI제어기를 이

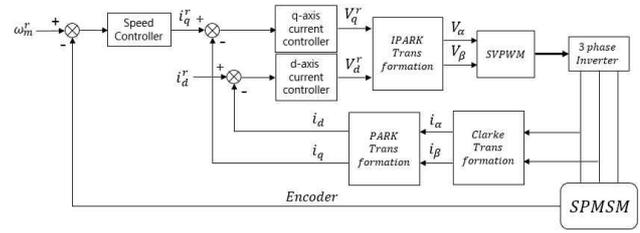


Fig. 1. Structure of SPMSM control system.

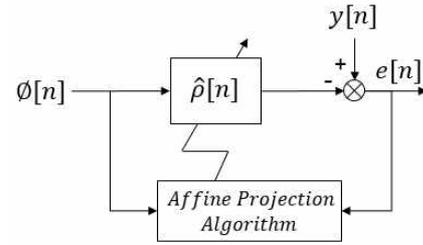


Fig. 2. Affine projection algorithm.

용하였으며 인버터는 공간 벡터 전압 변조(SVPWM) 기법을 사용하여 제어하였다. SPMSM 연속시간 d-q모델을 샘플링 타임  $T_s$ 를 가지는 이산시간 모델로 나타내면 식 (1), (2)와 같다<sup>[4]</sup>.

$$L_s(i_d(k+1) - i_d(k)) = T_s V_d - T_s R_s i_d(k) + T_s L_s \omega(k) i_q(k) \quad (1)$$

$$L_s(i_q(k+1) - i_q(k)) = T_s V_q - T_s R_s i_q(k) - T_s \omega(k)(L_s i_d(k) + \lambda_m) \quad (2)$$

$i_d, i_q, V_d, V_q$ 는 d-q축 고정자 전류 전압이고,  $R_s, L_s, \lambda_m, \omega$ 는 고정자 저항, 인덕턴스, 회전자 자속 그리고 전기적 회전자 속도이다.

## 3. Affine Projection algorithm을 이용한 파라미터 추정

그림 2는 APA의 구조이며 수식은 다음과 같다. 출력  $y$ 와 입력  $\phi$ 에 의한 출력 오차를 최소화하는 파라미터 추정 값을 다음 알고리즘을 통해 구할 수 있다<sup>[4],[9]</sup>.

$$y(k+1) = \Phi^T(k+1)\rho(k+1) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \hat{\rho}(k+1) &= \hat{\rho}(k) + \gamma \Phi(k+1)[\eta I + \Phi^T(k+1)\Phi(k+1)]^{-1} \\ &\quad \times [y(k+1) - \Phi^T(k+1)\hat{\rho}(k)] \\ &= \hat{\rho}(k) + \gamma \Phi(k+1)[\eta I + \Phi^T(k+1)\Phi(k+1)]^{-1} \\ &\quad \times e(k+1) \end{aligned}$$

$y$ 는 출력신호 벡터,  $\phi$ 는 입력신호 행렬,  $\rho$ 는 알려지지 않은 파라미터 벡터,  $\hat{\rho}$ 은 파라미터 추정치,  $\gamma, \eta$ 는 이득 행렬,  $e$ 는 출력 오차를 나타낸다.

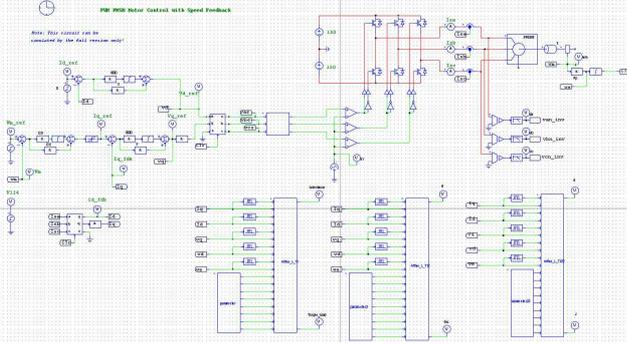


Fig. 3. PSIM schematic for simulation.

APA를 적용하여 전기 파라미터를 추정하기 위하여 식 (1)과 (2)로 구성되는 SPMSM 이산시간 모델 식 (3)과 같은 형태로 변형한다. 먼저 이산시간 모델 식 (1)에서 추정하고자 하는 파라미터를 인덕턴스  $L_s$ 로 정하면 (3)식의 관점에서  $\rho$ 는  $L_s$ 가 되고 (1)식은 다음과 같이 변형이 된다.

$$y_L(k+1) = \Phi_L^T(k+1)\rho_L(k+1) \quad (5)$$

위 식에서 각항은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} y_L(k+1) &= -T_s R_s i_d(k) + T_s V_d(k) \\ \Phi_L^T(k+1) &= i_d(k+1) - i_d(k) - T_s \omega_e(k) i_q(k) \\ \rho_L &= L_s \end{aligned}$$

이번에는 이산시간 모델 식 (1), (2)에서 저항  $R_s$ 와 자속  $\lambda$ 를 추정하고자 하는 파라미터로 정하고  $\rho$ 벡터로 표현하면 (1)과 (2)식은 다음과 같이 APA의 (3)식 형태로 변형이 된다.

$$y_{R\lambda}(k+1) = \Phi_{R\lambda}^T(k+1)\rho_{R\lambda}(k+1) \quad (6)$$

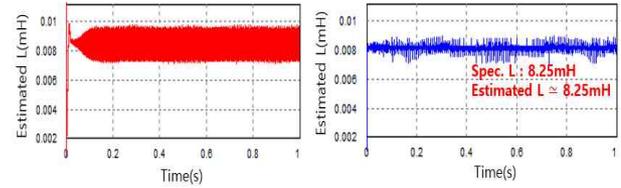
위 식에서 각항은 다음과 같이 얻어지고  $\hat{L}_s$ 은 (5)식을 적용한 APA에서 추정되는 인덕턴스  $L_s$ 의 추정 값을 나타낸다.

$$\begin{aligned} y_{R\lambda}(k+1) &= \begin{bmatrix} \hat{L}_s(i_d(k+1) - i_d(k) - T_s V_d(k)) - T_s \hat{L}_s \omega_e(k) i_q(k) \\ \hat{L}_s(i_q(k+1) - i_q(k) - T_s V_q(k)) + T_s \hat{L}_s \omega_e(k) i_d(k) \end{bmatrix} \\ \Phi_{R\lambda}^T(k+1) &= \begin{bmatrix} -T_s i_d(k) & 0 \\ -T_s i_q(k) & -T_s \omega_e(k) \end{bmatrix} \\ \rho_{R\lambda} &= \begin{bmatrix} R_s \\ \lambda_m \end{bmatrix} \end{aligned}$$

APA를 적용할 수 있는 형태 식 (5)와 (6)으로 변형한 후 각각의 경우에 대하여 식 (4)와 같은 파라미터 추정식을 구현하여 각 파라미터를 추정한다. 먼저 d축 전류를 0으로 제어하며 모터 구동 시 식 (5)의  $-T_s R_s i_d(k)$ 항은 0이 되어 나머지항을 이용하여 인덕턴스 값을 추정

Permanent-magnet sync. machine		Display
Name	PMSM31	<input type="checkbox"/>
Rs (stator resistance)	1	<input type="checkbox"/>
Ld (d-axis ind.)	8.25m	<input type="checkbox"/>
Lq (q-axis ind.)	8.25m	<input type="checkbox"/>
Vpk /krpm	74	<input type="checkbox"/>
No. of Poles P	8	<input type="checkbox"/>
Moment of Inertia	0.005	<input type="checkbox"/>
Mech. Time Constant	1	<input type="checkbox"/>
Torque Flag	1	<input checked="" type="checkbox"/>
Master/Slave Flag	1	<input type="checkbox"/>

Fig. 4. SPMSM parameter for simulation.



(a) Without APA

(b) With APA

Fig. 5. Simulation result of inductance estimation.

할 수 있고, 이를 바탕으로 식 (6)의 저항과 자속을 추정한다. 하지만 d축 전류를 0으로 제어하게 되면 식 (6)에서  $\Phi^T$  행렬의 계수가 부족하게 되어 추정하고자 하는 두 개의 파라미터를 정확하게 추정할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 모터 구동 중 d축에 임의의 전류를 일시적으로 인가하여 계수 부족 문제를 해결하여 저항과 자속을 추정할 수 있다.

#### 4. PSIM 모의실험

그림 3은 PSIM 모의실험 도식도이다. 알고리즘 블록은 Visual studio 2017을 이용하여 DLL로 구현하였다.

그림 4는 모의실험에 사용한 SPMSM 파라미터 값이며 그림 5는 인덕턴스 추정 모의실험 결과이다. 그림 5(a)는 모터가 정상상태 일 때 모델 식을 이용하여 인덕턴스를 계산한 것이며 그림 5(b)는 APA 적용 후 추정값의 진동이 감소한 결과를 나타내며 초기 설정하였던 인덕턴스 값 8.25mH를 정확하게 추정하는 것을 검증하고 있다.

그림 6은 저항과 자속 추정 결과이다. d축 전류를 인가하기 전에 (6)식으로 표현되는 APA에서 오차를 최소로 하는 저항과 자속 값이 추정되므로 자속이 어느 정도 추정되는 것처럼 보이지만 계수부족 문제로 저항과 자속 추정 값이 실제 값으로 수렴하지 않는 결과를 나타내고 있다. 그러나 각속도 100[rad/s]로 구동 중 1초 시점에 d축에 (-)1A 전류를 인가하면 일시적인 속도 변화가 발생하지만 지령속도를 곧바로 유지했으며 저항과 자속 값을 정확하게 추정하고 있음을 확인할 수 있다.

APA의 파라미터 추정식 (4)를 구현하기 위해서는 d-q

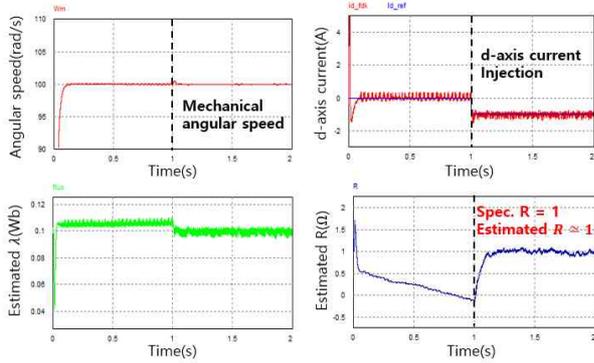


Fig. 6. Simulation result of resistance and flux estimation.



Fig. 7. Experiment setup.

전압과 전류 값이 필요한데 그림 5와 6은 d-q 전압 값으로 전류 제어기 출력 값을 전류 값으로는 모터로부터 피드백되는 실제전류를 사용하여 얻어진 결과이다. 또한 전류 값으로 실제 전류 대신에 지령 전류를 사용하여 모의실험을 수행하였고 그 결과는 그림 5, 6과 거의 차이가 없는 것을 확인하였다.

### 5. 실험

제안하는 파라미터 추정 방법을 검증하기 위해 그림 7과 같이 실험 환경을 구성하였다. 제어 대상 모터는 Estun사의 750W급 SPMSM이고 모터 드라이버는 TI사의 TMS320F28035 DSP를 기반으로 하는 TMDSHVMTRPFCKIT를 사용하였다. 부하 측 모터 및 서보 드라이버는 파나소닉사의 제품을 이용하여 1[N·m] 토크제어를 하였다. 실험에 사용된 모터의 자세한 사양은 표 1, 2와 같다.

모의실험으로 검증한 내용을 바탕으로 TI사의 PC기반 통합 개발 환경인 CCS(Code Composer Studio)를 이용하여 펌웨어로 알고리즘을 구현하였고 직렬통신을 이용해 5ms 주기로 데이터를 측정하였다. APA의 파라미터 추정식 (4)를 구현하기 위해 d-q 전압으로 전류 제어기 출력 값을 전류 값으로는 모터로부터 피드백되는 실제전류뿐만 아니라 지령전류를 각각 사용하여 실험을 수행하였다.

그림 8과 그림 10은 각각 피드백전류와 지령전류를 사용하여 d축 전류를 0으로 제어하면서 1200RPM으로

TABLE I  
CONTROL MOTOR  
SPECIFICATION(EMJ-08-APB22)

Parameter	Value
Rated power	750 [W]
Rated speed	3000 [RPM]
Stator resistance	1 [Ohm]
Stator inductance	8.25 [mH]
Rotor flux linkage	0.102 [Wb]
Pole pairs	4

TABLE II  
LOAD MOTOR SPECIFICATION(MDME152GCH)

Parameter	Value
Rated power	1.5 [kW]
Rated speed	2000 [RPM]
Rated current	9.4 [A(rms)]
Rated torque	7.16 [N·m]
Inertia	0.000799 [kgm <sup>2</sup> ]

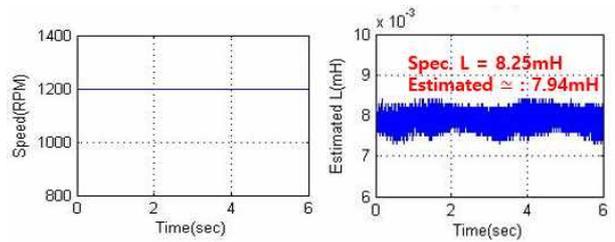


Fig. 8. Experiment result of inductance estimation using feedback current.

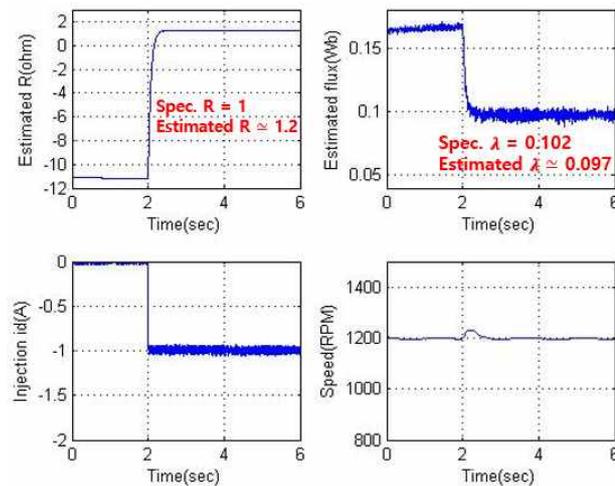


Fig. 9. Experiment result of resistance and flux estimation using feedback current.

구동할 때 인덕턴스 추정 결과이다. 그림 9와 11은 피드백전류와 지령전류 사용 시, 저항 및 자속 추정 결과이다. d축 전류를 0으로 제어하면 계수 부족문제로 인

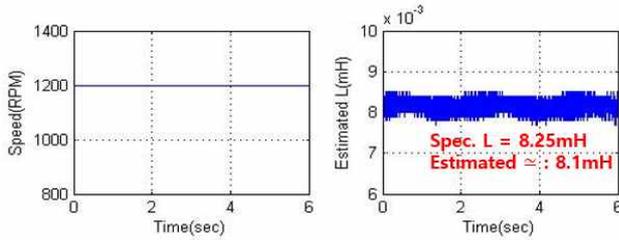


Fig. 10. Experiment result of inductance estimation using reference current.

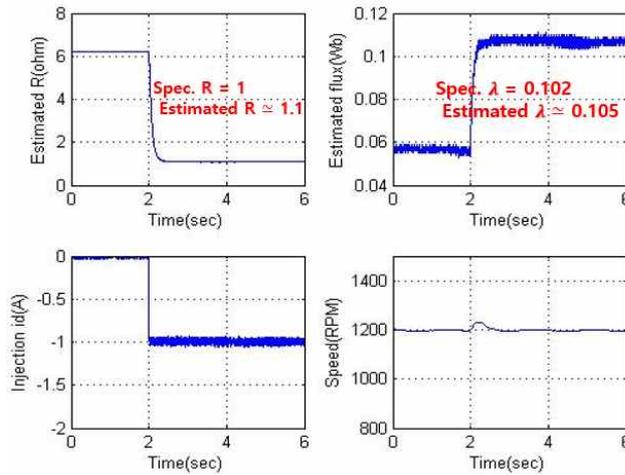


Fig. 11. Experiment result of resistance and flux estimation using reference current.

하여 파라미터 값이 추정되지 않지만 2초 시점에 d축에 (-)1A 전류 인가하게 되면 일시적인 속도 변화가 발생하지만 계수 부족문제를 해결할 수 있고 약 400ms 이내에 추정 값이 수렴하며 저항과 자속을 온라인으로 추정하는 것을 확인할 수 있다.

모의실험에서는 APA 구현 시 피드백전류를 사용하거나 지령전류를 사용해도 결과에 차이가 없었다. 그러나 실제 실험에서는 지령전류를 사용하면 추정 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과의 원인을 분석해 보면, PI 전류제어기에 의하여 안정상태에서 지령전류와 피드백 전류의 평균값은 거의 일치하지만 피드백 전류는 측정 과정에서 많은 잡음이 포함되어 파라미터 추정 성능을 악화시키는 것으로 파악할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 모터 구동 중 온도변화, 자속포화, 모터의 노후 등의 원인으로 발생하는 파라미터의 변화를 온라인으로 추정할 수 있는 방법을 제안하였다.

SPMSM 이산시간 모델을 기반으로 Affine Projection 알고리즘을 이용하여 간단하고 빠르게 모터의 파라미터를 추정 하였다. 먼저 일정한 속도로 구동하는 상태에서 인덕턴스를 추정하고 추정된 인덕턴스를 저항과 자속

추정을 위한 알고리즘에 사용하였다. 이때 SPMSM의 모델 식에서 발생하는 계수 부족문제는 d축에 전류를 일시적으로 인가함으로써 해결하였다.

추정된 전기 파라미터들은 모터 제어 성능 향상 및 고장 진단에 사용할 수 있으며 PSIM 모의실험 및 실험을 통해 제안하는 온라인 파라미터 추정 방법의 타당성을 검증하였다.

본 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2015R1D1A1A01056843)

## References

- [1] W. Deng, C. Xia, Y. Yan, Q. Geng, and T. Shi, "Online multiparameter identification of surface-mounted PMSM considering inverter disturbance voltage," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 32, No. 1, pp. 202-212, Mar. 2017.
- [2] K. Liu and Z. Q. Zhu, "Online estimation of rotor flux linkage and voltage source inverter nonlinearity in permanent magnet synchronous machine drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 1, pp. 418 - 427, Jan. 2014.
- [3] K. Liu, Z. Q. Zhu, and D. A. Stone, "Parameter estimation for condition monitoring of PMSM stator winding and rotor permanent magnets," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 60, No. 12, pp. 5902 - 5913, Dec. 2013.
- [4] D. Q. Dang, M. S. Rifaq, H. H. Choi, and J. W. Jung, "Online parameter estimation technique for adaptive control applications of interior PM synchronous motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 63, No. 3, pp. 1438 - 1449, Mar. 2016.
- [5] Y. hang, Z. Yin, X. Sun, and Y. Zhong, "On-line identification methods of parameters for permanent magnet synchronous motors based on cascade MRAS," *in Proc. 9th Int. Conf. Power Electron. ECCE Asia*, Seoul, Korea, pp. 345 - 353, Jun. 2015.
- [6] D. Tadokoro, S. Morimoto, Y. Inoue, and M. Sanada, "Method for auto-tuning of current and speed controller in IPMSM drive system based on parameter identification," *in Proc. IEEE Power Electron. Conf.*, pp. 390 - 394, May 2014.
- [7] Z. Q. Zhu, X. Zhu, and P. D. Sun, "Estimation of winding resistance and PM flux-linkage in brushless AC machines by reduced-order extended kalman filter," *in Proc. IEEE Int. Conf. Netw., Sens. Control*, pp. 740 - 745, 2007.
- [8] X. Zhang and Z. Li, "Sliding mode observer-based mechanical parameter estimation for permanent-magnet synchronous motor," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31,

No. 8, pp. 5732-5745, Oct. 2015.

- [9] S. L. Gay and S. Tavathia, "The fast affine projection algorithm," in *Proc. Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process.*, Detroit, MI, pp. 3023 - 3026, May 8 - 12, 1995.
- [10] S. G. Sankaran and A. A. Beex, "Convergence behavior of affine projection algorithms," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 48, pp. 1086 - 1096, Apr. 2000.
- [11] G. Feng, C. Lai, and N. C. Kar, "A novel current injection-based online parameter estimation method for PMS Ms considering magnetic saturation," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 52, No. 7, pp. 1 - 4, Jul. 2016.
- [12] S. Sitgongsataporn "Adaptive reduced-rank affine projection algorithm based on joint optimisation," in *Proc. 14th Int. Conf. ECTI-CON*, Phuket, Thailand, pp. 702 - 705, Jun. 2017.



### **문병훈(文炳勳)**

1989년 4월 9일생. 2014년 부산대 전기전자컴퓨터공학과 졸업. 2018년 동 대학원 전기전자컴퓨터공학과 졸업(석사).



### **김형우(金兄禹)**

1988년 1월 26일생. 2012년 부산대 전기전자컴퓨터공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기전자컴퓨터공학과 졸업(석사) 2015년 ~ 현재 동 대학원 전기전자컴퓨터공학과 박사과정.



### **최준영(崔峻暎)**

1970년 11월 17일생. 1994년 포항공과대학교 전기전자공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공박). 2005년 ~ 현재 부산대 전자공학과 교수.