

영구자석 쇠교 자속 변화를 고려한 매입형 영구자석 동기전동기의 MTPA 제어 알고리즘 개발

MTPA control algorithm for an IPMSM drive reflecting the PM flux linkage variation

최성민*, 류성호**, 이재석***

Sungmin Choi*, Seong-ho Ryu**, Jae Suk Lee***

Abstract

This paper presents a Maximum Torque per Ampere (MTPA) control algorithm for an interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) drive considering the permanent magnet (PM) flux linkage variations due to PM temperature variation. PM flux linkage are estimated in real time via a Gopinath style stator flux linkage observer and a torque error correction factor is calculated from the estimated PM flux linkage. A 2-dimensional (2D) MTPA look-up table (LUT) is developed to achieve the MTPA trajectory reflecting PM flux linkage variation for compensating torque error occurred by parameter variation. The proposed IPMSM control algorithm is verified through simulations.

요약

본 논문에서는 온도 변화로 인한 영구자석 쇠교 자속 변화를 고려한 PMSM 드라이브의 MTPA(Maximum Torque per Ampere) 제어 알고리즘을 제시한다. 영구자석 쇠교 자속은 고정자 쇠교 관측기를 통해 실시간으로 추정되고, 추정된 영구자석 쇠교 자속으로부터 토크 오차 보정 계수가 계산된다. 2차원 MTPA look-up table(LUT)은 토크 오차를 보상하기 위해 영구자석 쇠교 자속 변화를 반영하는 MTPA 전류 궤적을 달성하기 위해 개발되었다. 제안된 PMSM의 MTPA 제어 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 검증된다.

Key words : PMSM drive, MTPA, PM flux linkage, Flux observer, Torque error

* Dept. of Electrical Engineering, Jeonbuk National University

** CEO, BT Telecom

★ Corresponding author

E-mail : jaesuk@jbnu.ac.kr, Tel : 063-270-2398

※ Acknowledgment

This research was supported by a grant(RA2022-01-C3-04) from「Jeonbuk Research&Development」Program funded by Jeonbuk Province.

Manuscript received Nov. 23, 2022; revised Dec. 15, 2022; accepted Dec. 16, 2022.

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.

1. 서론

PMSM은 영구자석을 사용하여 일정한 회전자 자속을 발생시켜 여자 권선으로 인한 동손이 발생하지 않아 고효율 운전이 가능하다. 또한 IPMSM은 구조적 특징으로 인하여 영구자석 토크와 함께 릴럭턴스 토크를 활용할 수 있으며, 약제자 제어를 통한 정격속도 이상의 속도에서 운전이 가능하다. 이러한 특징들로 인하여 PMSM은 EV, 중장비, 선박 등 다양한 분야에 채택되어 사용되고 있다. 그러나 PMSM의 전력밀도와 토크가 높아지고 소형화됨에 따라 내부 발열로 인한 문제를 피할 수 없다. MTPA 제어는 특정 토크를 발생시키기 위한 최소 크기를 가지는 전류 지령을 사용함으로써 PMSM 드라이브의

동손을 최소화하는 제어방법 중 하나이다. 일반적으로 MTPA 전류 궤적은 PMSM의 파라미터를 사용하여 계산 되기 때문에, 동작 조건에 따른 파라미터 변화에 의해 전류 궤적이 변화한다. 이로 인해 파라미터의 변화가 MTPA 제어에 반영되지 않는 경우 PMSM 드라이브에 토크 오차가 발생한다. 영구자석 토크는 PMSM 토크 발생에 큰 비중을 차지하기 때문에, 회전자 온도 상승으로 인한 영구자석 자속 쇄교의 변화는 PMSM 드라이브의 토크 발생에 큰 영향을 미친다. 파라미터 변화에 의한 토크 오차를 보상하기 위해 여러 방법들이 연구되었다. 실시간 파라미터 추정 방법은 PMSM의 파라미터들을 추정하여 MTPA 전류 궤적을 계산함으로써 토크 오차를 보상할 수 있지만, 구현이 복잡하고 계산 부하가 증가한다[1]. 고주파 신호 주입 방법은 주입된 고주파신호를 Band Pass Filter(BPF)와 수학적 계산을 통해 MTPA 전류궤적의 각도를 실시간으로 계산함으로써 MTPA를 달성할 수 있다[2]. 하지만 하드웨어의 추가적인 손실과 진동, 노이즈가 발생한다. 영구자석 온도 추정 방법은, 영구자석 온도와 쇄교 자속 변화의 관계를 통해 간접적으로 영구자석 쇄교 자속을 추정할 수 있다[3-5]. 열 모델을 사용한 방법은 전동기와 냉각시스템 등에 대한 정밀한 지식이 요구되며[3], 역기전력 방법은 영속 및 저속에서 추정 성능이 저하된다[4]. 고주파 신호 주입 방법은 영속에서 고속까지 모든 속도 영역에 적용될 수 있으나, 주입된 고주파 신호로 인한 진동과 노이즈가 발생한다. 또한 역기전력 방법과 고주파 주입 방법을 결합한 방법이 제안되었으나 PMSM의 토크 오차 저감은 고려되지 않았다[5]. 본 논문에서는 Gopinath style 고정자 쇄교 자속 관측기를 사용하여 영구자석 쇄교 자속을 추정하고, 추정된 영구자석 쇄교 자속을 사용하여 보정 계수가 계산된다. 보정계수는 2-D MTPA LUT에 반영되어 토크 오차를 보상한다. 제안된 알고리즘은 다양한 운전 조건에서 시뮬레이션을 통해 검증된다.

II. 본론

1. IPMSM의 MPTA 전류 궤적

MTPA 제어는 일반적으로 PMSM의 파라미터들을 이용하여 수식을 통해 최적의 전류 궤적을 계산하여 사용하는 방법으로 크게 두가지 방법으로 구분된다. 첫 번째로, 토크 지령에 대한 최적의 전류 지령을 실시간으로 계산하여 제어하는 online MTPA 제어 방법이다. MCU의 성능이 발전함에 따라 MTPA 전류 궤적을 실시간으로

계산하여 최적의 전류를 계산할 수 있게 되었지만, 제품 제작 시 고성능 MCU를 사용함에 따라 원가 상승을 무시할 수 없다. 이러한 이유로 산업계에서는 LUT를 사용한 MTPA 제어 방법을 채택하고 있다. (1)과 (2)는 MTPA 전류 궤적을 계산하기 위한 d축 및 q축 전류 지령 수식을 나타낸다[6].

$$i_d^r = \frac{\lambda_{pm} - \sqrt{\lambda_{pm}^2 + 8(L_q - L_d)^2 i_s^2}}{4(L_q - L_d)} \quad (1)$$

$$i_q^r = \sqrt{i_s^2 - i_d^{r2}} \quad (2)$$

그림 1은 영구자석 쇄교 자속 변화에 따른 IPMSM의 MTPA 전류 궤적을 나타낸다. 파란색과 빨간색 실선은 각각 영구자석 쇄교 자속이 1[p.u]와 0.8[p.u]일 때의 MTPA 전류 궤적을 나타내며, 초록색 실선과 점선은 각각 영구자석 쇄교 자속이 1[p.u]와 0.8[p.u]일 때의 토크를 나타낸다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 파라미터의 변화가 MTPA LUT에 반영되지 않을 경우 정확한 MTPA 제어를 달성할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 영구자석 쇄교 자속 변화를 반영한 MTPA 제어 알고리즘을 제안한다.

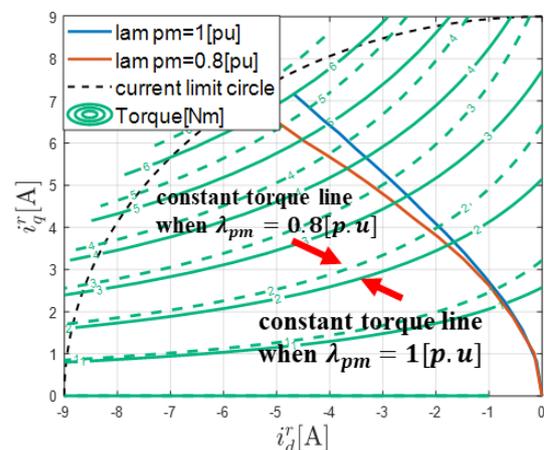


Fig. 1. IPMSM MTPA trajectory according to PM flux linkage variation.

그림 1. 영구자석 쇄교 자속 변화에 따른 IPMSM MTPA 전류 궤적

2. Gopinath style 고정자 쇄교 자속 관측기 및 보정계수 계산

그림 2는 Gopinath style 고정자 쇄교 자속 관측기와 보정계수 계산 알고리즘의 블록 다이어그램을 보여준다. Gopinath style 고정자 쇄교 자속 관측기는 전류 및 전압모델 기반 자속 관측기와 제어기로 구성된다. 전류 및

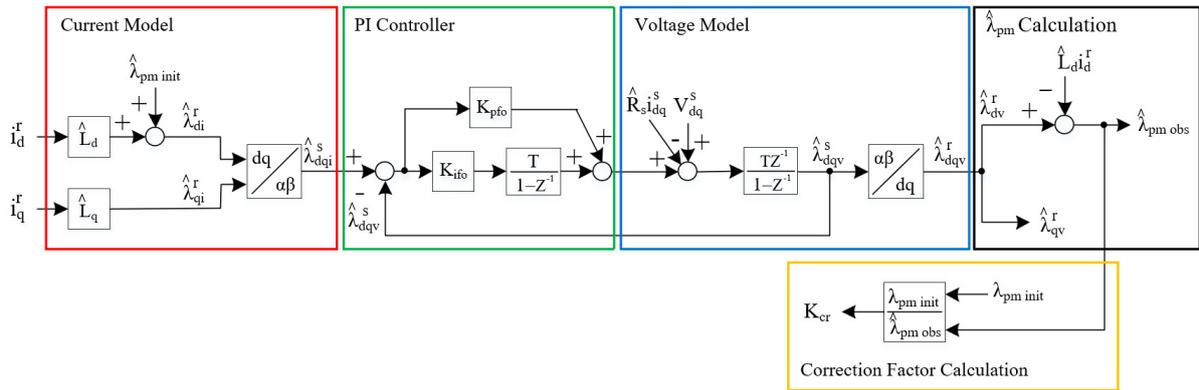


Fig. 2. A block diagram of the Gopinath style stator flux linkage observer and correction factor calculation.

그림 2. Gopinath style 고정자 쇄교 자속 관측기와 보정 계수 계산 알고리즘 블록 다이어그램

전압 모델 자속 관측기는 (3)~(5)의 수식을 기반으로 구현된다.

$$\hat{\lambda}_{di}^r = \hat{\lambda}_{pm} + L_d i_d^r \quad (3)$$

$$\hat{\lambda}_{qi}^r = L_q i_q^r \quad (4)$$

$$\hat{\lambda}_{qdv}^s = \int (V_{qds}^s - R_s i_{qds}^s) dt \quad (5)$$

수식에서 알 수 있듯이, 전류모델 기반 자속 관측기는 파라미터 변화에 의해 추정 성능이 저하되지만 인버터 비선형성 또는 노이즈와 같은 외부 요인에 의한 영향은 받지 않는다. 전압모델 기반 자속 관측기는 추정 성능이 파라미터 변화에 의해 영향을 받지 않지만, 역기전력의 크기가 작은 영속 및 저속 영역에서 외부 요인에 의해 추정 성능이 저하되는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고 장점을 활용하기 위해 Gopinath style 고정자 쇄교 자속 관측기는 영속 및 저속에서 전류 모델 기반 자속 관측기를, 고속에서 전압 모델 기반 자속 관측기를 사용하여 자속을 추정한다. 저속과 고속을 구분하는 교차

주파수는 관측기 제어기의 대역폭으로 결정된다. 영구자석 쇄교 자속은 관측기를 통해 추정된 d축 자속으로부터 (3)을 통해 추정된다. 영구자석 쇄교 자속 초기 추정값과 (3)을 통해 추정된 쇄교 자속을 사용하여 보정 계수가 (6) 같이 계산된다.

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

3. 시뮬레이션 결과

그림 3은 제안하는 MTPA 제어 알고리즘의 시스템 블록 다이어그램을 보여준다. 시뮬레이션에서 관측기의 대역폭은 10[Hz]로 IPMSM 정격속도의 0.1[p.u]로 설계 및 구현되었다. 영구자석 쇄교 자속과 보정계수는 Gopinath style 고정자 쇄교 자속 관측기를 통해 실시간으로 계산되며, 계산된 보정계수는 2-D MTPA LUT에 반영되어 영구자석 쇄교 자속 변화로 인한 토크 오차를 보상한다. 표 1은 시뮬레이션 및 실험에 사용된 IPMSM의 사양을 보여준다.

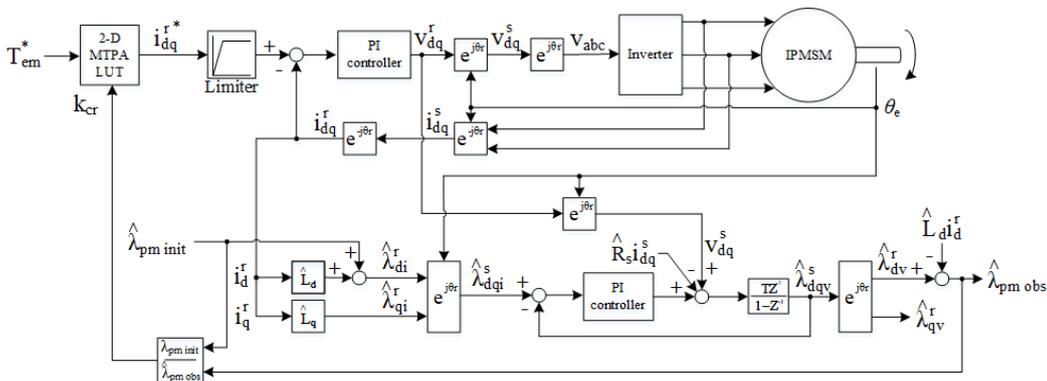


Fig. 3. Overall system block diagram of MTPA control system for IPMSM reflecting PM flux linkage variation.

그림 3. 영구자석 쇄교 자속 변화를 반영한 IPMSM의 MTPA 제어 알고리즘 시스템 블록 다이어그램

Table 1. Specifications of the IPMSM.

표 1. IPMSM의 사양

Parameters	Value
Stator resistance, R_s	0.15[Ω]
d axis inductance, L_d	1.15[mH]
q axis inductance, L_q	1.46[mH]
Permanent magnet flux linkage, λ_{pm}	64.78[mWb]
Number of poles	8
Rated power	1.3[kW]
Rated speed	1500[rpm]
Rated torque	3.75[Nm]
Moment of inertia	14.51[10 ⁻⁴ kg · cm ²]

그림 4는 영구자석 쇄교 자속 추정 정확도에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 결과에서 알 수 있듯이, 관측기 대역폭 이하의 속도 영역에서 쇄교 자속 추정 정확도는 파라미터 변화에 민감하며, 관측기 대역폭 이상의 속도 영역에서는 파라미터 변화에 관계없이 영구자석 쇄교 자속이 정확히 추정됨을 알 수 있다.

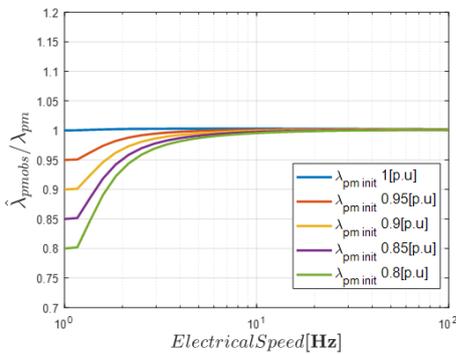
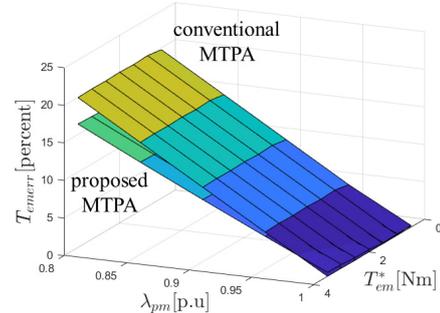


Fig. 4. Simulation results of the permanent magnet flux linkage estimation accuracy.

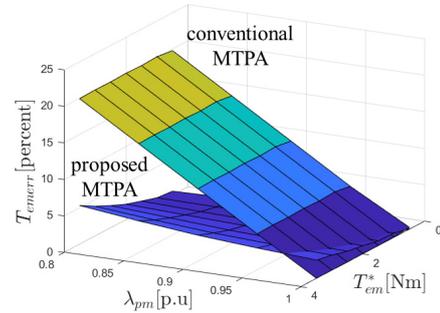
그림 4. 영구자석 쇄교 자속 추정정확도 시뮬레이션 결과

그림 5(a)와 5(b)는 각각 저속과 고속 운전 영역에서 토크 오차 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 5(a)에서 알 수 있듯이, 저속 영역에서 영구자석 쇄교 자속은 전류 모델 자속 관측기로부터 추정되기 때문에 쇄교 자속의 변화가 2-D MTPA LUT에 정확히 반영되지 않는다. 고속 영역에서 제안된 알고리즘이 적용된 경우, 전압 모델을 통해 추정된 영구자석 쇄교 자속을 사용하여 계산된 보정계수가 2-D MTPA LUT에 반영되기 때문에, 영구자석 쇄교 자속 변화로 인한 토크 오차가 저감된다. 저속 및 고속에서 최대 토크 오차는 각각 16.4%, 5.3%로

제안된 MTPA 제어 알고리즘이 고속 영역에서 토크 오차 저감 성능이 효과적임을 검증하였다.



(a)



(b)

Fig. 5. Simulation results of torque error for the proposed MTPA and conventional MTPA (Operating conditions : (a) $\omega_r = 6.6$ [Hz], (b) $\omega_r = 100$ [Hz]).

그림 5. 제안하는 MTPA와 conventional MTPA의 토크 오차 시뮬레이션 결과(운전 조건 : (a) $\omega_r = 6.6$ [Hz], (b) $\omega_r = 100$ [Hz])

4. 실험 결과

그림 6은 실험 셋업을 보여준다. IPMSM은 기계적으로 연결된 부하 모터를 통해 속도가 제어된다.

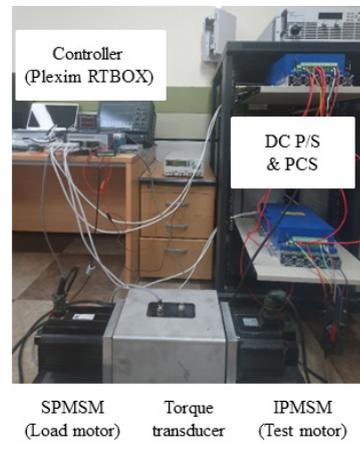


Fig. 6. Experimental setup.

그림 6. 실험 셋업

그림 7(a)와 7(b)는 제안하는 MTPA와 conventional MTPA의 정상상태 토크 응답 실험 결과를 보여준다. conventional MTPA는 영구자석 쇄교 자속 변화로 인하여 토크 오차가 21.7[%] 발생한다. 제안된 알고리즘이 적용된 경우 토크 오차는 1.7[%]로 영구자석 쇄교 자속 변화로 인한 토크 오차가 효과적으로 보상되었다.

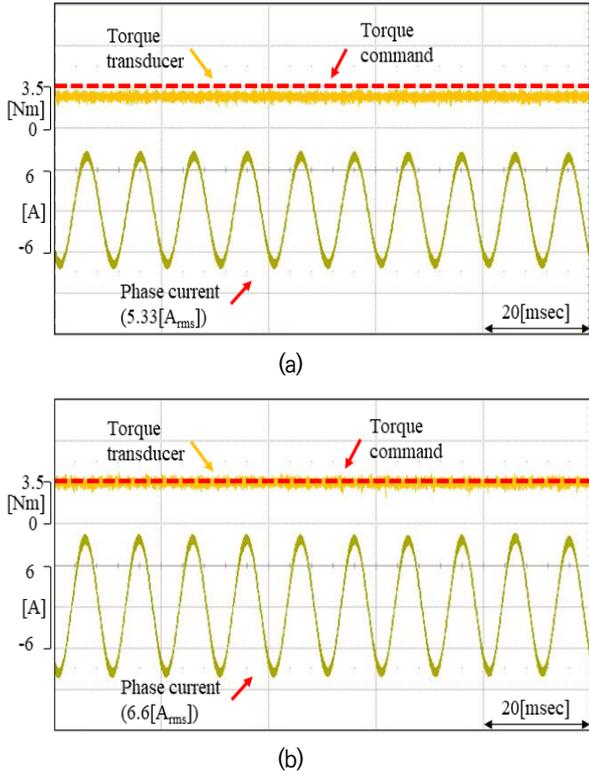


Fig. 7. Experimental results of torque response for the proposed MTPA and conventional MTPA (a) conventional MTPA, (b) proposed MTPA (Operating conditions : $\omega_r=100$ [Hz], $T_{em}^*=3.5$ [Nm], $\lambda_{pm}=0.8$ [p.u]).

그림 7. 제안하는 MTPA와 conventional MTPA의 토크 응답 실험 결과 (a) conventional MTPA, (b) 제안하는 MTPA(운전 조건 : $\omega_r=100$ [Hz], $T_{em}^*=3.5$ [Nm], $\lambda_{pm}=0.8$ [p.u])

그림 8(a)와 8(b)는 각각 저속과 고속 운전 영역에서 제안하는 MTPA와 conventional MTPA의 토크 오차 실험 결과를 보여준다. 그림 7(a)에서 알 수 있듯이, 제안하는 알고리즘이 적용된 경우 저속 영역에서 토크 오차가 conventional MTPA보다 소폭 증가한다. 고속 영역에서 제안하는 알고리즘의 최대 및 평균 토크 오차는 1.5[%], 0.9[%]로 MTPA 영역에서 영구자석 쇄교 자속 변화로 인한 토크 오차가 효과적으로 보상됨을 검증하였다.

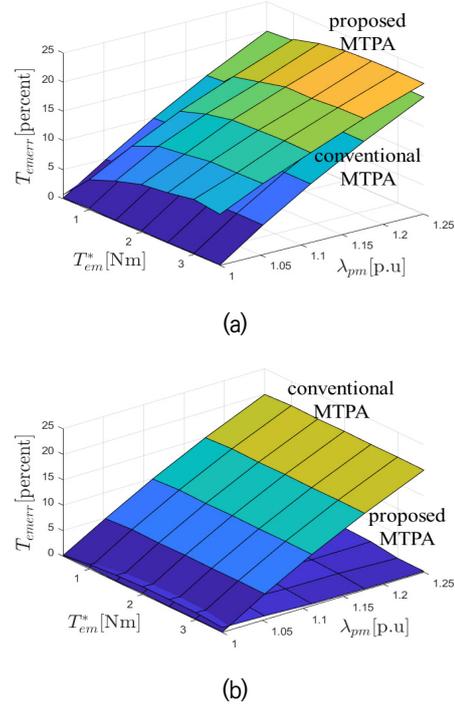


Fig. 8. Experimental results of torque error for the proposed MTPA and conventional MTPA (Operating conditions : (a) $\omega_r=6.6$ [Hz], (b) $\omega_r=100$ [Hz]).

그림 8. 제안하는 MTPA와 conventional MTPA의 토크 오차 실험 결과(운전 조건 : (a) $\omega_r=6.6$ [Hz], (b) $\omega_r=100$ [Hz])

III. 결론

본 논문에서는 영구자석 쇄교 자속 변화를 반영한 IPMSM의 MTPA 제어 알고리즘이 제안되었다. 영구자석 쇄교 자속과 보정계수는 Gopinath style 고정자 쇄교 자속 관측기를 통해 추정 및 계산되었으며, 보정 계수는 2-D MTPA LUT에 반영되어 영구자석 쇄교 자속 변화를 MTPA 전류 궤적에 반영하였다. 제안된 MTPA 제어 알고리즘이 저속 영역에서 성능이 제한되지만, 고속 영역에서 성능이 효과적임을 시뮬레이션 및 통해 검증하였다.

References

[1] Q. Liu and K. Hameyer, "High-Performance Adaptive Torque Control for an IPMSM With Real-Time MTPA Operation," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.32, no.2, pp.571-581, 2017. DOI: 10.1109/TEC.2016.2633302

[2] S. Bolognani, R. Petrella, A. Prearo and L. Sgarbossa, "Automatic Tracking of MTPA Trajectory in IPM Motor Drives Based on AC Current Injection," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.47, no.1, pp.105-114, 2011.

DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316066

[3] C. Kral, A. Haumer and S. B. Lee, "A Practical Thermal Model for the Estimation of Permanent Magnet and Stator Winding Temperatures," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.29, no.1, pp.455-464, 2014.

DOI: 10.1109/TPEL.2013.2253128

[4] A. Specht, O. Wallscheid and J. Böcker, "Determination of rotor temperature for an interior permanent magnet synchronous machine using a precise flux observer," *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)*, pp.1501-1507, 2014.

DOI: 10.1109/IPEC.2014.6869784

[5] D. Reigosa, D. Fernandez, T. Tanimoto, T. Kato and F. Briz, "Comparative Analysis of BEMF and Pulsating High-Frequency Current Injection Methods for PM Temperature Estimation in PMSMs," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.32, no.5, pp.3691-3699, 2017.

DOI: 10.1109/TPEL.2016.2592478

[6] Jang-Mok Kim and S. -K. Sul, "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.33, no.1, pp.43-48, 1997. DOI: 10.1109/28.567075

Seoung-ho Ryu (Member)



2003~Present : CEO of BT Telecom

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 : Associate Professor at the Department of Electrical Engineering, Jeonbuk National University.

BIOGRAPHY

Sungmin Choi (Member)



2018 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.

2020 : MS degree in Electrical Engineering, Jeonbuk National University.

2020~Present : PhD degree in Electrical Engineering, Jeonbuk National University.