

특성 전류의 변화를 반영한 매입형 영구자석 동기전동기의 약계자 제어 알고리즘 개발

Flux-Weakening control algorithm for an IPMSM drive reflecting the Characteristic Current Variations

한 정 현*, 이재 석*

JungHyeon Han*, Jae Suk Lee*

Abstract

This paper presents a flux-weakening control algorithm for Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) drives that reflects the magnitude of the characteristic current. A stator flux linkage observer is utilized to calculate the varying ratio of permanent magnet (PM) flux linkage. The characteristic current magnitude is indirectly calculated using the ratio of the calculated PM flux linkage. The calculated PM flux linkage is used to determine the application of Maximum Torque Per Voltage (MTPV) control for the IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) through a 3D Look-Up Table (LUT). The proposed flux-weakening control method is validated through simulations.

요 약

본 논문은 특성 전류의 크기를 반영한 PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) 드라이브의 약계자 제어 알고리즘을 제시한다. 변화한 영구자석 쇄교 자석의 비율을 계산하기 위해 고정자 쇄교 자속 관측기를 활용하였다. 계산된 영구자석 쇄교 자속의 비율로 특성 전류의 크기가 간접적으로 계산된다. 계산된 영구자석 쇄교 자속은 3D Look-up table (LUT)를 통해 IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 MTPV (Maximum Torque Per Voltage) 제어 사용 여부를 결정한다. 제안된 약계자 제어 방식은 시뮬레이션을 통해 검증된다.

Key words : IPMSM, MTPV, Characteristic Current, PM flux linkage observer, Flux-weakening control

1. 서론

PMSM은 회전자에 자석이 부착되어 있어 회전자 자기장을 생산해야 하는 다른 유도 전동기에 비해 높은 효율을 인정받고 있다. 또한 높은 출력밀도로 인해 소형화가

가능하므로 다양한 산업분야에 널리 사용되고 있다. IPMSM은 회전자 내부에 영구자석이 부착된 매입형 구조로 d축과 q축의 인덕턴스가 서로 달라 모터 드라이브 시 킬러턴스 토크를 발생하게 되어 높은 효율과 넓은 속도 범위에서 사용이 가능하다[1]. 이러한 이유로 IPMSM

* Dept. of Electronics Engineering, Jeonbuk National University

★ Corresponding author

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

※ Acknowledgment

This research was supported by "Regional Innovation Strategy(RIS)" through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(MOE)(2024-FT-FI013)

Manuscript received Aug. 30, 2024; revised Sep. 14, 2024; accepted Sep. 24, 2024.

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.

은 특히 고속 및 고회력이 요구되는 응용 분야에서 주로 사용된다. 그렇기 때문에 IPMSM의 운전영역 확장을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 일반적인 제어 기법으로는 약계자 제어가 있다. 그러나 IPMSM이 고속으로 동작하는 과정에서 내부발열로 인한 파라미터의 변화는 고속 제어 성능에 부정적인 영향을 준다. 대표적으로 열의 영향을 받는 파라미터는 영구자석 쇄교 자속으로 온도가 증가함에 따라 감소하는 특징이 있다[2]. 영구자석 쇄교 자속의 변화는 PMSM 제어 시 토크와 특성전류 오차를 발생시키므로 이에 대응하는 방법이 필요하다.

고주파 신호 주입 방식은 PMSM의 d축으로 고주파 신호를 주입하여 자속을 추정하는 방식이다[3]. 고주파 신호 주입 방식은 저속 영역에서 추정이 가능하지만 고주파 주입시 발생하는 노이즈에 대한 해결 방안이 필요하다. 역기전력 방식은 PMSM의 전압 방정식을 기반으로 회전자 자속과 밀접한 관계가 있는 역기전력 성분을 이용한 고속 운전영역에서의 자속 추정 방식이다[4]. 영구자석 쇄교 자속 관측기는 영구자석 쇄교 자속과 관련있는 파라미터를 이용하여 자속을 추정하는 방식으로 추정된 영구자석 쇄교 자속을 Look-up Table(LUT)에 적용하여 제어 성능을 개선할 수 있다[5]. 그러나 이러한 추정 방식들은 토크 오차 저감 기법으로 주로 사용되어 특성 전류에 대한 제어에는 반영되지 않는다. 고속 운전을 위해 설계되는 PMSM의 경우 특성전류와 모터의 최대 전류가 유사한 값을 갖는다. 이 때 특성전류와 최대 전류의 차이에 따라 고속 영역에서 PMSM의 운전 성능을 위해 MTPV 사용 여부가 결정된다. 따라서 본 논문은 특성 전류 크기를 반영한 IPMSM의 고속 운전 영역에서의 성능 향상을 위한 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 다양한 운전조건에서 검증된다.

II. 본론

1. 영구자석 쇄교자속에 따른 특성 전류의 크기

특성 전류는 PMSM의 약계자 제어 능력과 고속 운전 성능을 결정하는 중요한 파라미터로서 영구자석의 자속을 상쇄시키기 위한 d축 전류의 크기를 의미한다. 특성 전류인 I_{ch} 는 식 (1)을 통해 표현된다.

$$-I_{ch} = -\frac{\lambda_{pm}}{L_d} \quad (1)$$

특성 전류는 전압제한 곡선의 중심점으로 PMSM의 최

대 전류와 유사하게 설정 시 넓은 운전 특성을 얻을 수 있다. 그러나 PMSM 내부 발열로 인해 영구자석 쇄교 자속이 영향을 받으면서 특성 전류가 변하게 된다. 그림 1은 영구자석 쇄교 자속의 변화에 따른 PMSM 제한 곡선이다. 파란 점선과 빨간 점선은 각각 영구자석 쇄교 자속이 1[p.u], 0.8[p.u]인 경우의 전압제한 타원을 의미한다. 그림 1로부터 알 수 있듯이 영구자석 쇄교 자속이 감소하면서 전압제한 타원의 중심점이 0에 가까워진다. 특성전류의 크기가 최대 전류보다 작아질 경우 그림과 같이 전압제한 타원의 중심이 전류제한 원 내부로 이동한다.

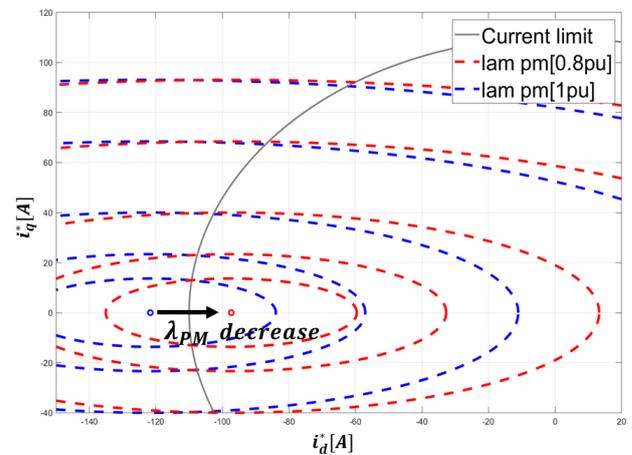


Fig. 1. IPMSM constraint curve for PM flux linkage variations.

그림 1. 영구자석 쇄교 자속 변화에 따른 IPMSM 제한 곡선

2. IPMSM의 MTPV 전류 궤적

그림 2의 (a)와 (b)는 특성 전류와 최대 전류에 대한 IPMSM의 전류 궤적을 나타낸다. 특성전류의 크기가 최대 전류보다 작은 경우 최대 토크 출력을 위해 전류 궤적은 MTPV궤적을 따른다. MTPV의 전류 지령은 PMSM의 파라미터와 전압제한 조건식으로부터 계산된다[6]. 식(2)은 MTPV 전류 궤적을 계산하기 위해 최대 토크에 대한 d축 쇄교 자속 수식을 나타낸다. 식(3)과 (4)는 그 때의 d축 및 q축의 전류 지령 수식을 나타낸다.

$$\lambda_{dmax} = \frac{-L_q \lambda_{pm} + \sqrt{(L_q \lambda_{pm})^2 + 8(L_d - L_q)^2 \left(\frac{V_{smax}}{\omega_e}\right)^2}}{4(L_d - L_q)} \quad (2)$$

$$i_d^* = \frac{\lambda_{dmax} - \lambda_{pm}}{L_d} \quad (3)$$

$$i_q^* = -\frac{\sqrt{\lambda_s^2 - \lambda_{dmax}^2}}{L_q} \quad (4)$$

λ_{pm} 은 영구자석 쇄교 자속, L_d, L_q 는 dq축 인덕턴스, V_{smax} 는 최대 고정자 전압을 의미한다. MTPV 전략은 PMSM의 고속 운전 시 과도한 약제자가 필요하지 않기 때문에 고속 영역에서의 성능 향상에 기여한다.

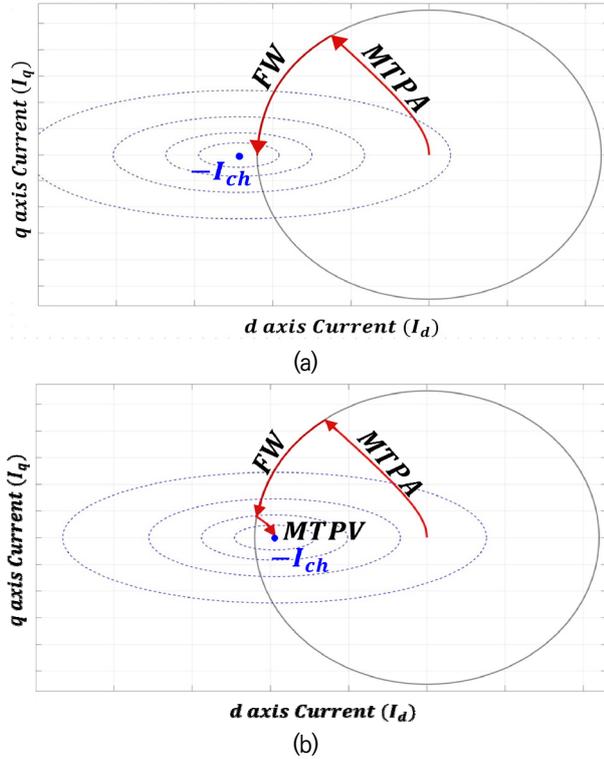


Fig. 2. Current trajectory of IPMSM for Characteristic current variations.

그림 2. 특성전류의 변화에 따른 IPMSM 전류 궤적 (조건 : (a) $-I_{ch} \leq -I_{max}$, (b) $-I_{ch} > -I_{max}$)

3. Gopinath Style 고정자 쇄교 자속 관측기

실시간으로 PMSM의 영구자석 쇄교 자속을 측정하는 것은 어려움이 따른다. Gopinath Style 고정자 쇄교

자속 관측기는 전류 모델과 전압 모델로 구성되어 있다. 전류 모델과 전압 모델은 각각 식 (5)~(6), (7)~(8)을 기반으로 구현된다.

$$\hat{\lambda}_{di}^r = L_d i_d^r + \lambda_{pm} \tag{5}$$

$$\hat{\lambda}_{qi}^r = L_q i_q^r \tag{6}$$

$$\hat{\lambda}_{dv}^s = \int (V_d^s - R_s i_d^s) dt \tag{7}$$

$$\hat{\lambda}_{qv}^s = \int (V_q^s - R_s i_q^s) dt \tag{8}$$

수식에서 알 수 있듯이, 전류모델은 회전자 기준 좌표계에서의 PMSM 전압 방정식에서 유도되고, 전압 모델은 고정자 기준 좌표계에서의 전압 방정식에서 유도된다. 전류 모델의 경우 파라미터의 영향을 많이 받기 때문에 상대적으로 노이즈가 적은 저주파에서 정확도가 높다. 전압 모델은속도와 비례하여 커지는 역기전력 성분을 무시할 수 있기 때문에 고속에서 정확도가 높다[7]. 그림 3은 Gopinath style 고정자 쇄교 자속 관측기와 영구자석 쇄교 자속 변화율 계산 알고리즘의 블록 다이어그램이다. $\hat{\lambda}_{dq}^s$ 은 전류모델에서 구해진 회전자 자속을, $\hat{\lambda}_{dq}^s$ 은 전압모델에서 구해진 회전자 자속을 나타낸다. 먼저, 전류 모델과 전압 모델을 통해 모든 속도 영역에서의 고정자 쇄교자속이 추정된다. 영구자석 쇄교 자속은 고정자 쇄교 자속 관측기에서 출력되는 d축 고정자 쇄교 자속으로부터 계산된다. 식 (9)는 쇄교자속 변화율 계산 방정식으로 영구자석 쇄교 자속의 초기값과 계산된 쇄교 자속을 사용하여 변화율을 계산한다.

$$\lambda_{pm\ ratio} = \frac{\hat{\lambda}_{pm\ init}}{\hat{\lambda}_{pm\ obs}} \tag{9}$$

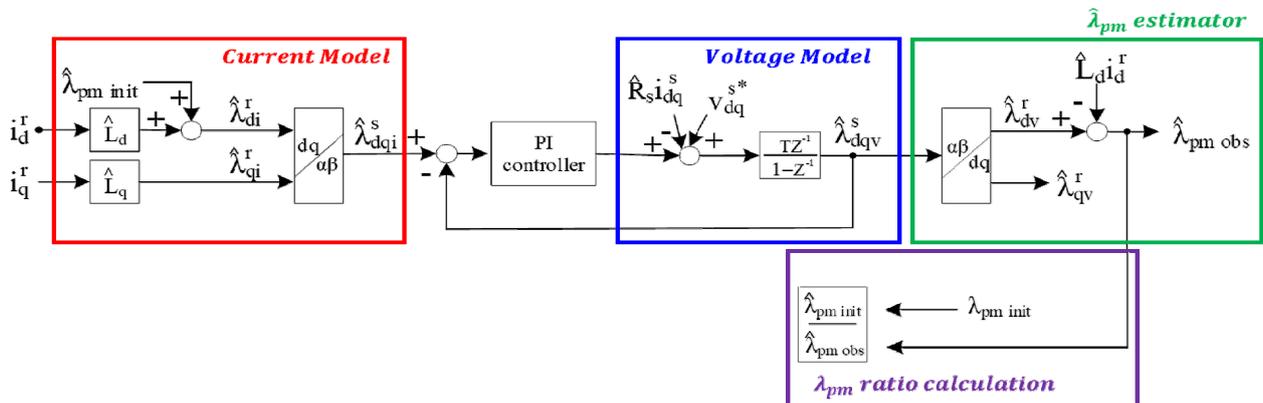


Fig. 3. A block diagram of Gopinath style stator flux linkage observer & PM flux linkage ratio calculator.

그림 3. Gopinath style 고정자 쇄교자속 관측기 & 영구자석 쇄교 자속 변화율 계산 시스템 블록 다이어그램

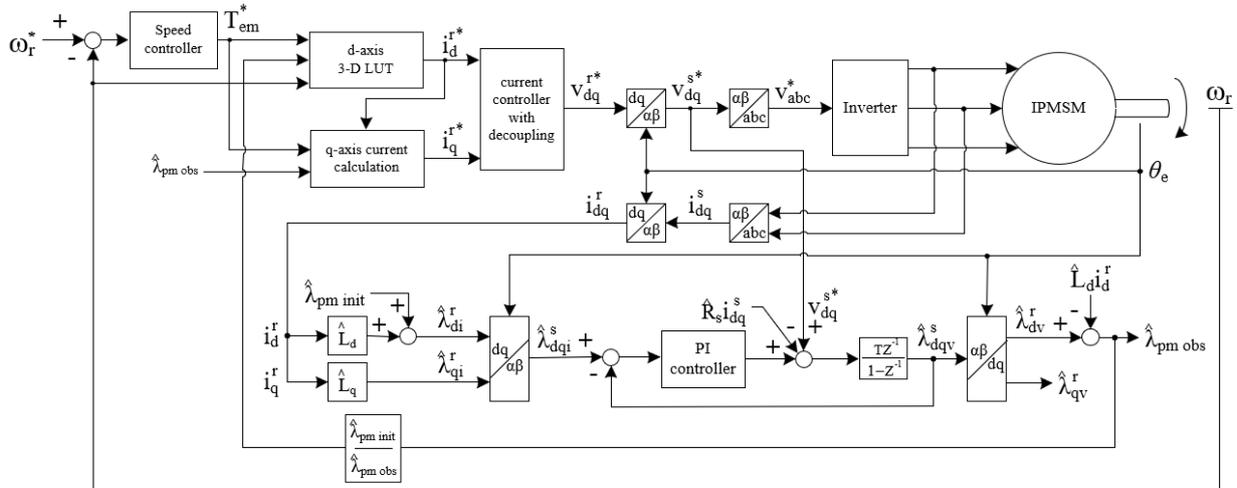


Fig. 4. A block diagram of flux-weakening control system of IPMSM reflecting the permanent magnet flux linkage variation. 그림 4. 영구자석 쇄교 자속 변화를 반영한 IPMSM의 약계자 제어 시스템 블록 다이어그램

4. 시뮬레이션 결과

그림 4은 속도와 토크지령을 입력으로 하는 2D LUT 을 사용하는 기존 약계자 제어 알고리즘에 영구자석 쇄교 자속 변화율을 추가하여 특성 전류의 크기를 반영한 3D LUT로 구성된 약계자 제어 알고리즘의 블록 다이어그램 이다. 영구자석 쇄교자속의 변화율이 계산되어 3D LUT 에 입력변수로 들어가게되어 d축 전류지령이 결정된다. 이후 추정된 영구자석 쇄교자속, 토크, d축 전류지령을 이용하여 q축 전류지령이 토크 방정식을 통해 식 (10)으 로 계산된다. 이 과정을 통해 쇄교자속의 의한 특성전류 의 변화를 자동으로 반영하여 PMSM이 동작하게 된다.

$$i_q^* = \frac{4}{3P} \cdot \frac{T_{em}}{(\lambda_{pm} + (L_d - L_q)i_d^*)} \quad (10)$$

표 1은 시뮬레이션 모델의 파라미터를 나타낸다[8, 9].

Table 1. Specification of IPMSM.

표 1. IPMSM의 사양

Parameters	Value
Stator resistance, R_s	0.0116[Ω]
d axis inductance, L_d	0.503[mH]
q axis inductance, L_q	1.39[mH]
Permanent magnet flux linkage, λ_{pm}	0.0612[Wb]
Number of poles	8
Maximum current	110[A]
Maximum Voltage	220[V]
Rated speed	4059[rpm]
Maximum torque	63.3[Nm]

가. 영구자석 쇄교 자속 추정 정확도

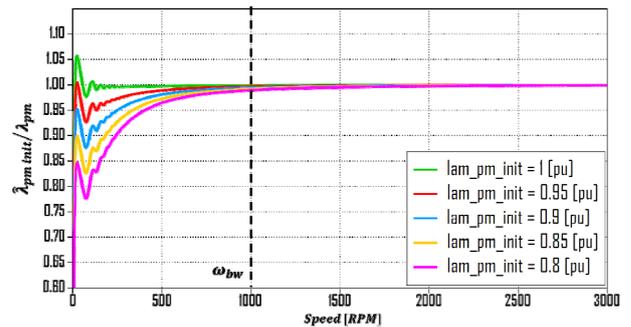


Fig. 5. Simulation results of the permanent magnet flux linkage estimation.

그림 5. 영구자석 쇄교 자속 추정 시뮬레이션 결과

고정자 쇄교자속 관측기의 대역폭에 대한 정확한 기준 은 없지만 전류모델과 전압모델의 민감도 균형에 큰 영 향을 주지 않는 범위에서 선정이 가능하다. 제안한 알고 리즘의 관측기는 모터의 정격속도 이상의 영역에서 추정 정확도를 높이기 위해 모터 정격속도의 약 1/4인 1000 [rpm]으로 대역폭을 설정하였다[10]. 그림 5는 관측기를 통해 계산된 영구자속 쇄교자속의 추정 정확도를 나타낸 다. 대역폭을 기준으로 대역폭 이하의 주파수보다 대역 폭 이상의 주파수에서 추정 정확도가 더 높은 것을 확인 할 수 있다. 이는 주파수가 더 높은 고속 영역에서 특성 전류를 계산하기 위해 제안된 알고리즘에 적합한 것을 알 수 있다.

나. 기존의 방식과 제안된 알고리즘 결과 분석

그림 6(a)는 특성 전류의 크기를 반영하지 않은 기준

의 약계자 제어 방식과 제안된 알고리즘에 대해 IPMSM의 영구자석 쇄교 자속의 크기가 0.8[p.u]일 때 속도가 10[p.u]까지 동작 될 경우 발생하는 동손을 비교한 것이다. (a)의 결과를 살펴보면 기존의 방식보다 제안된 알고리즘이 적용되었을 때 동손이 더 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)는 동일한 조건에서 IPMSM의 각 속도에 대한 전력과 영구자석 쇄교 자속이 0.8[p.u]일 때 제안된 알고리즘에서 MTPV가 적용되는 속도를 나타낸다. 그림 6(b)에서 모터의 속도가 5.75[p.u]에서 10[p.u]에 도달 할 때까지 기존의 방식보다 큰 값으로 출력되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 5.75[p.u]의 속도를 시작으로 MTPV제어가 적용되었음을 알 수 있다.

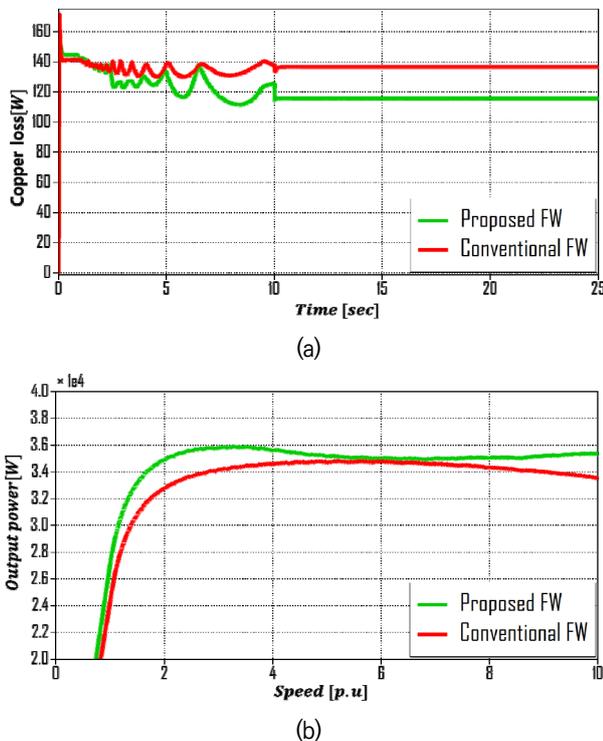


Fig. 6. Comparison of the results of proposed algorithm and conventional flux-weakening method (Comparison value : (a) copper loss, (b) power of IPMSM).

그림 6. 제안하는 알고리즘과 기존 약계자 제어 방식의 결과 비교 (비교 값 : (a) 동손, (b) IPMSM 전력)

III. 결론

IPMSM의 고속 운전으로 인한 내부 발열은 영구자석 쇄교 자속의 크기를 감소시키고 이는 IPMSM의 특성전류의 크기에 영향을 미친다. 특성전류의 크기가 모터의 최대 전류보다 작은 경우 MTPV제어를 통해 고속 운전

에서의 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문은 영구자석 쇄교 자속 추정을 통해 IPMSM의 특성 전류의 크기를 반영한 약계자 제어 알고리즘을 제안한다. 영구자석 쇄교 자속의 추정은 Gopinath Style 고정자 쇄교 자속 관측기를 활용하고 3D LUT을 통해 전류 지령을 설정한다. 설정된 전류 지령은 특성전류의 크기에 따라 전류제한 원 또는 MTPV궤적을 따른다.

제안된 알고리즘은 IPMSM의 특성전류가 전류제한 원 내부에 있는 경우 고속운전에서 동손 감소와 출력 전력 증가를 확인하여 기존 약계자 제어 방식 보다 운전 성능이 향상되는 것을 시뮬레이션을 통해 검증했다.

References

- [1] K. Akatsu, K. Narita, Y. Sakashita and T. Yamada, "Characteristics comparison between SPMSM and IPMSM under high flux density condition by both experimental and analysis results," *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, pp.2848-2853, 2008.
- [2] T. Sebastian, "Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.31, no.2, pp.353-357, 1995. DOI: 10.1109/28.370284
- [3] D. D. Reigosa, D. Fernandez, H. Yoshida, T. Kato and F. Briz, "Permanent-Magnet Temperature Estimation in PMSMs Using Pulsating High-Frequency Current Injection," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.51, no.4, pp. 3159-3168, 2015. DOI: 10.1109/TIA.2015.2404922
- [4] 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
- [5] S. Choi and J. S. Lee, "Maximum Torque per Ampere Control Algorithm for an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Reflecting the PM Flux Linkage Variations," *2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*

(APEC), Orlando, FL, USA, pp.2419-2423, 2023.

DOI: 10.1109/APEC43580.2023.10131521

[6] L. Sepulchre, M. Fadel and M. Pترزak-David, "MTPV for Continuous Flux-Weakening Strategy Control Law for IPMSM," *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Amalfi, Italy, pp.1221-1226, 2018.

DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445329

[7] 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, Sept. 2007.

DOI: 10.1109/07IAS.2007.202

[8] T. A. Huynh and M. -F. Hsieh, "Comparative Study of PM-Assisted SynRM and IPMSM on Constant Power Speed Range for EV Applications," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.53, no.11, pp.1-6, 2017. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2707125

[9] J. G. Hayes and K. Davis, "Simplified electric vehicle powertrain model for range and energy consumption based on EPA coast-down parameters and test validation by Argonne national lab data on the Nissan leaf," in Proc. *IEEE Transp. Electrific. Conf. Expo (ITEC)*, pp.1-6, 2, 2014.

DOI: 10.1109/ITEC.2014.6861831

[10] G. A. Pantoja, "Improving the Gopinath-style Flux Observer for a Deadbeat Direct Torque and Flux Control Drive", Master in Electrical Energy Conversion and Power Systems, University of OVIEDO, 2020.

DOI: 10.13140/RG.2.2.35911.52640

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

JungHyeon Han (Member)



2023 : BS degree in Electrical Engineering, Jeonbuk National University.

2023~present : MS degree in Electrical Engineering, Jeonbuk National University.