

파라미터 변화에 따른 IPMSM 특성

남기용*, 이지영*, 이근호*, 홍정표*, 정연환**
 *창원대학교 전기공학과, **대우정밀(주)

Design and Analysis of Interior Permanent Magnet Type Synchronous Motor

Ki-Yong Nam*, Ji-Young Lee*, Geun-Ho Lee*, Jung-Pyo Hong*, Yeon-Hwan Jung**
 **Changwon National University, **Daewoo Precision Industries CO, Ltd.

Abstract - This paper presents the analysis and the design of IPMSM for high speed limit with constant torque. The characteristics of IPMSM are calculated by using d-q equivalent circuit having the parameters, such as current phase angle, d-q axis inductances, effective turns. These parameters affect the output characteristics. In this paper, the improved IPMSM to widen the operating speed limit are designed by the results.

1. 서 론

자동차의 발전은 수송 수단으로써 사회에 많은 공헌을 하였다. 그러나 환경 및 에너지 고갈 문제가 발생하고 있는 오늘날, 자동차 엔진의 성능향상 및 자동차 탑승자의 안전과 편의를 위해, 자동차의 내연기관과 기계장치가 전동기와 제어장치를 사용하는 전기/전자 시스템으로 전환되는 추세이다[1].

또한, 자동차 전기/전자 시스템에서의 에어컨 구동 전동기는 소형화, 경량화 및 고 효율화를 위해서 에너지 밀도가 높고 운전 영역이 넓은 특성을 요구한다. 그렇기 때문에, 에어컨 구동 전동기로서 d-q축의 자기경로 차이에 의해 톨러턴스 토크를 발생시킬 수 있는 매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM)를 사용했다[1][2].

IPMSM은 표면 부착형 영구자석 동기 전동기(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 SPMSM)와는 달리 영구자석이 회전자 내부에 매입되어 있으며, q-축 인덕턴스가 d-축 인덕턴스보다 크게 되는 역돌극성을 가지게 된다. 이와 같이 돌극성을 가지는 전동기의 특징은 영구자석에 의한 마그네틱 토크뿐만 아니라 d-축과 q-축 사이의 자기저항 차이에 따라 발생하는 톨러턴스 토크 성분이 존재한다는 것이고, 적절한 전류위상제어를 통하여 이 톨러턴스 토크를 이용할 수 있으므로 보다 큰 토크를 얻을 수 있으며 고정자 전류를 이용하여 공급자속을 조절할 수 있다는 것이다. 또한 기계적으로 영구자석이 회전자 내부에 부착되어 있으므로 구조가 견고하다[3-6].

본 논문은 IPMSM의 파라미터 변화에 따른 특성 분석 및 정토크 영역 확보를 위한 설계에 대하여 다룬다.

특성해석 기법은 정상상태의 3상 정지좌표계를 d-q축으로 분해하고, 철손을 고려한 등가회로 및 특성방정식을 이용하였다[3]. 역기전력은 실험치와 유한요소법(Finite Element Method, FEM)으로 구한 해석치를 비교, 분석하여 특성해석 파라미터로 활용하며, d-q축 인덕턴스는 FEM을 이용하여 산정하였다.

기본모델을 대상으로 본 논문에서 제시한 특성해석 기법을 이용하여 특성해석을 수행하였으며 실험치와 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

기본모델의 파라미터를 기준으로 하여 전류위상각, 역기전력, 인덕턴스 변화에 따른 전동기 특성을 분석하였으며,

그 결과를 정토크 속도영역을 증가시키기 위한 전동기 설계에 반영하였다. 개선모델과 기본모델의 특성을 비교하여 정토크 속도영역이 개선되었음을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 IPMSM의 등가회로 및 특성식

3상 BLDC 전동기는 전동기의 회전자에 기준을 둔 기준 d-q 좌표계로부터 전동기를 해석하면 직류기와 같이 전동기 특성해석을 용이하게 할 수 있다. 이것으로부터 철손을 고려한 등가회로로 나타내면 그림 1과 같다. 여기서 R_c 는 등가철손저항을 나타낸다[3-7].

이때, 등가회로로부터 철손을 고려한 d-q축 전류, 전압방정식, 역기전력, 발생토크, 동손은 각각 식 (1), (2), (3), (4), (5)와 같이 표현된다[3].

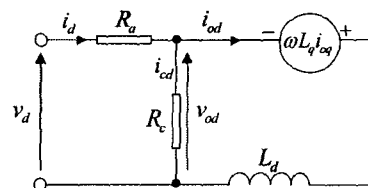
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

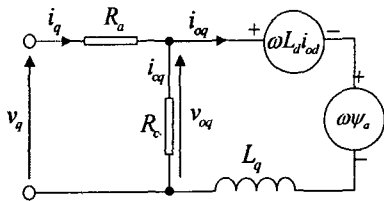
$$V_0 = \sqrt{v_{od}^2 + v_{oq}^2} = \omega \Psi_0 = \omega \sqrt{(L_d i_d + \Psi_a)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T &= P_n \{ \Psi_a i_{oq} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq} \} \\ &= P_n \left\{ \Psi_a I_a \cos \beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) I_a^2 \sin(2\beta) \right\} \\ &= T_m + T_r \end{aligned} \quad (4)$$

$$W_c = R_a I_a^2 = R_a (i_d^2 + i_q^2) \quad (5)$$



(a) d-축 등가회로



(b) q-축 등가회로

그림 1. 철손을 고려한 IPMSM의 등가회로

- Ψ_a : 영구자석에 의한 현상의 쇠교자속의 실효치 $\times \sqrt{3}$
- I_a : 상전류의 실효치 $\times \sqrt{3}$
- v_d, v_q : 전기자 전압의 d-q축 성분
- i_d, i_q : 전기자 전류의 d-q축 성분
- L_d, L_q : d-q축 인덕턴스
- T_m, T_r : 마그네틱 토크, 릴럭턴스 토크
- P_n : 극쌍수

2.2 IPMSM의 가변속 운전 특성

IPMSM의 운전영역은 그림 2에 나타난 것과 같이 정토크 영역과 정출력 영역으로 나눌 수 있으며, 정토크 영역에서는 최대 토크제어, 정출력 영역에서는 약계자 제어를 통해서 운전 속도 범위를 확장할 수 있다[4-6].

2.3 기본 모델 IPMSM 운전 특성

표 1은 IPMSM의 기본모델의 사양을 나타낸 것이고, 그림 3은 운전온도 20°C, 전류 위상각 $\beta=35^\circ$ 로 고정하였을 때의 운전특성해석을 수행한 결과를 나타낸다.

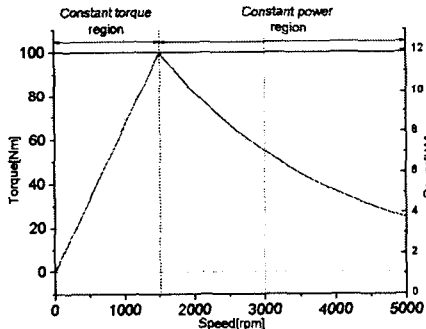


그림 2. IPMSM의 정토크, 정출력 운전특성.

표 1. IPMSM의 사양

파라미터	값	비고
극수/슬롯수	4극 24슬롯	-
최대 단자 전압	28.1V	-
제한 전류	100 A	-
정격 토크	9.8 Nm	-
정격 속도	3500 rpm	-
상 역기전력	3.61 V	1000rpm 무부하 역기전력
상 저항	9.033 mΩ	@ 20°C, 계산치
무부하 손실	51 W	@1000rpm (정격 3500rpm에서 정격 용량의 5%)
철손 저항	5.41 Ω	철손해석으로부터 산정

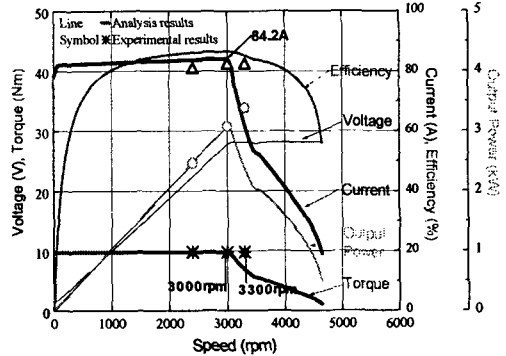


그림 3. 기본모델의 전류위상각 $\beta=35^\circ$ 에서 운전특성 해석
특성 해석 결과에서 10Nm 부하에 대해 전동기의 최대 속도는 3000rpm이었으나, 실험에서는 최대 3300rpm 까지 운전이 가능하였다. 이와 같은 특성 해석 결과와 실험 결과의 차이는 전류위상각, 역기전력, 인덕턴스 등의 파라미터에 대한 정확한 추정값을 반영하지 못한데 원인이 있는 것으로 본다.

2.4 파라미터 변화에 따른 IPMSM 특성

파라미터가 전동기의 운전특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 전류위상각, 역기전력 및 인덕턴스의 변화에 따른 특성 해석을 수행하였다.

그림 4는 전류 위상각 변화에 대해 특성을 나타낸 것이다. 동일속도에서 전류위상각이 증가하면 입력전압은 낮아지게 되어 입력 전압의 여유가 생긴다. 따라서, 일정 부하에서 속도 영역을 증가시킬 수 있게 된다.

그림 5은 인덕턴스 변화에 따른 특성으로서, 인덕턴스가 감소함에 따라 일정한 입력전압에 대해 입력전류가 증가하게 되어, 요구 토크보다 큰 토크를 발생시킬 수 있다.

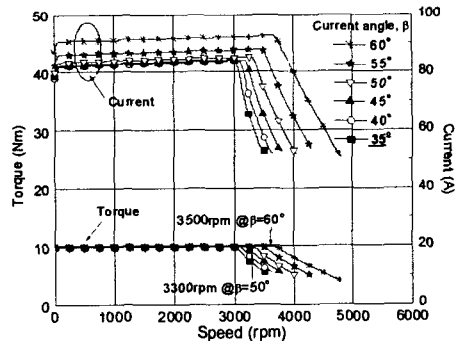


그림 4. 전류 위상각 변화에 따른 속도-토크-전류 곡선

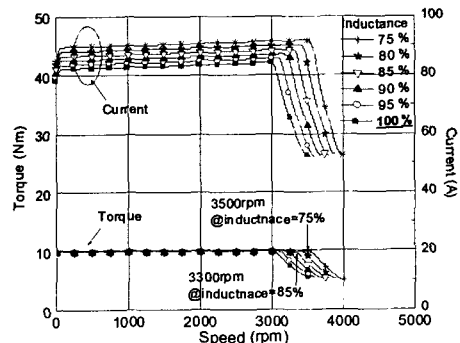


그림 5. 인덕턴스 변화에 따른 속도-토크-전류 곡선

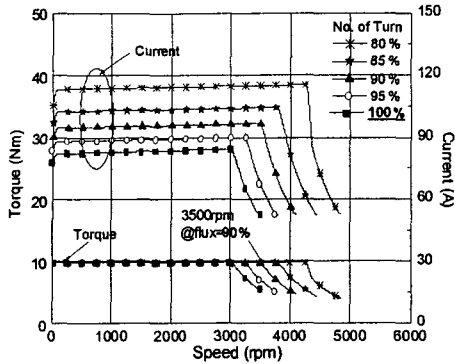


그림 6. 유효 턴수 변화에 따른 속도-토크-전류 곡선 따라서 실제 요구 토크에서 더 작은 전압이 요구되므로 최대 입력전압에 대한 정토크 속도영역을 확장시킬 수 있다. 그림 6은 유효 턴수 변화에 대해 특성을 나타낸 것이다. 유효턴수가 감소하면 역기전력은 유효턴수에 비례하고, 인덕턴스는 유효 턴수의 제곱에 비례하여 감소하므로 그림 5에서와 같이 인덕턴스 감소에 따른 특성과 본 논문에서는 제시하지 않았지만 역기전력만 감소하였을 때의 특성이 복합적으로 나타난다. 그러나 역기전력만 감소하였을 때는 함께 증가된 전류의 영향으로 정토크 속도영역을 향상시킬 수 없다.

2.4 스큐를 이용한 정토크 속도 영역 향상 설계

IPMSM의 기본모델의 운전특성을 검토한 결과, 요구 사양을 만족시키기 위하여, 최대 정토크 운전속도를 향상시키기 위한 전류위상각과 인덕턴스의 변화가 속도영역을 증가시키는 주요 요인임을 알 수 있다.

전류위상각 변화의 경우, 전동기 파라미터를 변화시킬 필요 없이 구동 시스템에서 제어 가능하며, 기본모델에 대해 실험적으로 검토한 결과, 10Nm 부하토크에서 3300rpm 이상 증가하지 못하였으므로, 전동기 파라미터 변경을 통하여 속도영역을 확보함으로써 특성을 개선해야 한다.

본 논문에서는 개선안으로, 기존 전동기의 고정자 요크에 한 슬롯피치만큼 스큐를 부여했다. 고정자 요크에 스큐를 부여함으로써 역기전력 파형이 보다 정현적으로 개선되어지고, 유효 자속량이 감소한다. 유효 자속량의 감소는 역기전력 및 인덕턴스가 감소시켜 유효턴수가 감소하는 효과를 가지므로 속도 영역을 증가시킬 수 있다.

표 2는 기본모델에 대하여 한 슬롯피치의 스큐를 부여하였을 때, 기본모델과 스큐모델의 역기전력 및 d-q축 인덕턴스의 변화를 나타낸 것이다.

그림 8은 스큐에 의해 역기전력과 인덕턴스가 감소했을 때 운전특성해석을 수행한 결과이며, 특성해석 결과는 그림 3의 기본모델보다 50rpm이 증가한 3050rpm이 되었다. 실제 실험에서는 기본모델보다 200rpm이 증가하여 3500rpm을 만족시킬 수 있었다.

여기서 해석치의 경우, 스큐를 주지 않은 기본모델과 비교하기 위해 전류위상각을 35°로 고정하여 속도를 계산한 반면, 실험에서는 최대속도를 발생시키는 전류위상각에서 속도를 측정했기 때문에 해석치와 실험치에서 속도 오차가 발생한 것으로 분석되었다.

표 2. 기본모델과 개선모델의 파라미터 비교

	기본모델	개선모델 (스큐모델)
역기전력의 기본파 [%]	100	99.8
d-q축 인덕턴스 [%]	100	99.7

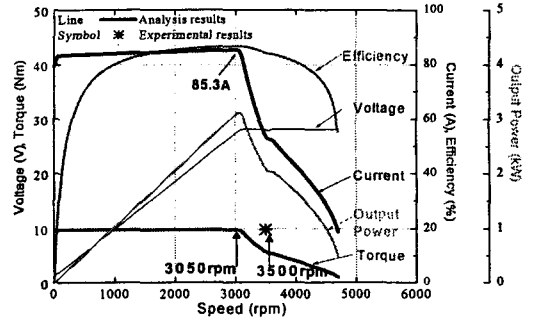


그림 8. 개선모델의 전류위상각 $\beta=35^\circ$ 에서 운전특성해석

3. 결 론

본 논문은 IPMSM의 초기 설계된 모델을 기본모델로 하여, 그 특성을 분석하고 파라미터 변화에 따른 특성 분석을 통하여 정토크 속도영역의 향상을 위한 전동기 특성 개선 방안을 검토하였다.

기본모델이 정격 부하에서 요구 속도에 도달하지 못하는 점을 개선하기 위한 방안으로, 역기전력과 인덕턴스를 감소시키기 위하여 전동기 고정자에 스큐를 주는 모델을 제안하였다.

실험 결과 전동기의 운전 속도 범위가 3300rpm에서 3500rpm으로 200rpm 정도 증가함을 확인하였다.

한편, 본 논문에서 제시한 특성해석 기법에 의한 해석 결과와 실험 결과와는 다소 오차가 발생하였는데, 이것은 실험 과정에서의 전류위상각에 대한 판단을 정확하게 할 수 없었고, 역기전력 특성에서도 다소 오차가 발생하였다.

향후, 전류위상각에 대한 정확한 판단과 역기전력뿐만 아니라 d-q축 인덕턴스를 측정하고, 이를 특성해석에 반영한다면 보다 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Malakondaiah Naidu, and James Walters, "A 4-kW 42-V Induction-Machine-Based Automotive Power Generation System With a Diode Bridge Rectifier and a PWM Inverter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 5, pp. 1287-1293, 2003.
- [2] Chang-Chou Hwang and Y. H. Cho, "Effects of Leakage Flux on Magnetic Fields of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 4, pp. 3021-3024, 2001.
- [3] 武田洋次, "Design and Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(埋込磁石同期モータの設計と制御)" First Edition, 2001.
- [4] Jang-Mok Kim and Seung-Ki Sul, "Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for the Flux Weakening Operation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 1, pp. 43-48, 1997.
- [5] Bojan Stumberger, Anton Hamler, Mladen Tripic, and Marko Jesenik, "Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Designed for Flux Weakening Operation", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 5, pp. 3644-3647, 2001.
- [6] Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, and Yoji Takeda, "Wide Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High-Performance Current Regulator", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, pp. 920-926, 1994.
- [7] Marco Bilewski, Antonino Fratta, Luigi Giordano, Alfredo Vagati, and Franco Villata, "Control of High Performance Interior Permanent Magnet Synchronous Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, pp. 328-337, 1993.