

비정현적인 역기전력을 가진 IPMSM의 토크리플 저감과 최대토크 제어에 관한 연구

홍인표, 이상훈, 최 철, 김장목, 김철우
부산대학교

A Study of Torque Ripple Minimization and Maximum Torque Control for IPMSM with Non Sinusoidal Back-EMF

In-Pyo Hong, Sang-Hun Lee, Cheol Choi, Jang-Mok Kim, Cheul-U Kim
Pusan National University

ABSTRACT

In this paper the electromagnetic torque developed in IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) is analyzed. If flux distributions in the motor are not sinusoidal, a sinusoidal current produces important torque ripple. Torque ripple causes vibration and noise of motors. The optimized current waveforms for ripple free is able to be obtained by analysis of Back-EMF and torque equation. The method to find the optimal current is based on numerical predetermination. In this paper proposes current waveform which can eliminate the torque ripple, and the validity is verified through the simulation.

제어할 수 있게 된다. 본 논문에서 다루게 될 IPMSM은 역기전력이 비 정현적인 형태를 취하고 있다. 그 때문에 정현적인 전류를 흘렸을 때 전동기에서 발생하는 토크는 리플성분을 가지게 된다. 이러한 리플은 곧 전동기의 진동으로 이어지고 그 진동으로 인해 전동기에서 소음이 발생하며, 전동기 수명이 단축된다. 토크 식은 역기전력과 전류의 곱의 형태를 취하고 있으므로 역기전력으로 인한 리플은 전동기에 정현파 전류가 아닌 리플을 줄일 수 있는 비정현적인 전류를 흘려줌으로 줄일 수 있다[3].

그래서 본 논문에서는 비정현적인 역기전력을 가진 IPMSM 에서 토크리플을 저감하고 단위전류당 최대토크 제어를 할 수 있는 최적의 전류 파형을 찾는 방법을 제안한다. 그리고 이를 전동기에 인가했을 때 토크리플이 얼마만큼 감소하는 가를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

1. 서 론

최근 제어기술 및 스위칭 소자의 발달로 인해 영구자석형 전동기의 가정용 및 산업용 수요가 크게 증가하고 있다. 이러한 영구자석형 전동기는 회전자의 영구자석의 형태와 특성이 모터의 전체특성을 좌우하는 중요한 요소가 된다[1]. 그래서 회전자 영구자석의 설계에 따라 전동기를 몇가지의 형태로 구분하게 된다. 영구자석을 회전자의 표면에 부착하는가 내부에 삽입하는가에 따라 SPM(Surface Permanent Magnet) 타입과 IPM (Interior Permanent Magnet)타입으로 나뉘게 되고, 모터에서 발생하는 역기전력이 정현적인가 정현적이지 못한가에 따라서도 BLAC(Blushless AC Motor)타입과 BLDC(Blushless DC Motor)타입으로 구분하게 된다[2].

위 타입중 영구자석이 회전자 내에 매입되어 있는 형태를 가진 IPMSM은 SPMSM과 달리 magnetic torque 성분외에도 reluctance torque 성분이 존재하므로 벡터제어를 하는 SPMSM에서와 같이 동기좌표계에서의 d축 전류를 0으로 해서는 단위전류당 최대 토크제어가 되지 않는다[4]. 즉 reluctance torque 성분을 고려할 수 있는 적절한 d축전류 제어를 통해 단위전류당 최대 토크를

2. 본 론

2.1 IPMSM의 수학적 모델링

IPMSM은 회전자가 영구자석으로 되어 있으므로 수학적 모델링에 있어서 고정자 측만을 고려하여 모델링하게 된다. 2극기를 기준으로 볼 때 고정자 측 전압방정식은 식 (1)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + [L] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} : \text{역기전력}$$

$$L_{aa} = L_0 - L_2 \cos 2\theta \quad L_{bb} = L_0 - L_2 \cos(2\theta + \frac{2}{3}\pi)$$

$$L_{cc} = L_0 - L_2 \cos(2\theta - \frac{2}{3}\pi)$$

$$L_{ab} = L_{ba} = -\frac{1}{2} L_0 - L_2 \cos(2\theta - \frac{2}{3}\pi)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -\frac{1}{2} L_0 - L_2 \cos(2\theta)$$

$$L_{ca} = L_{ac} = -\frac{1}{2}L_0 - L_2 \cos(2\theta + \frac{2}{3}\pi)$$

IPMSM은 기계적으로는 비돌극이나 전기적으로 돌극성을 지니므로 위와 같은 인덕턴스 성분이 나타난다. IPMSM의 정상상태 해석 및 동특성 모델을 얻기 위해서는 2상 좌표계로 불리는 고정자측을 기준으로 하는 고정좌표계와 동기속도로 회전하는 동기좌표계의 변환이론이 주로 이용된다. 식 (1)을 동기 좌표계로 변환 시켜보면 식 (2)와 식 (3)으로 나타난다.

$$V_{ds}^r = R \cdot i_{ds}^r + L_d \frac{di_{ds}^r}{dt} - \omega_r L_q i_{qs}^r + e_{ds}^r \quad (2)$$

$$V_{qs}^r = R \cdot i_{qs}^r + L_q \frac{di_{qs}^r}{dt} + \omega_r L_d i_{ds}^r + e_{qs}^r \quad (3)$$

$$L_d : \frac{3}{2}(L_0 - L_2) \quad L_q : \frac{3}{2}(L_0 + L_2)$$

2.2 IPMSM의 토크식 분석

동기 좌표계로 변환된 IPMSM의 토크식은

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \left((L_d - L_q) i_{qs}^r i_{ds}^r + \frac{e_{ds}^r}{\omega_r} i_{ds}^r + \frac{e_{qs}^r}{\omega_r} i_{qs}^r \right) \quad (4)$$

p : 극수

위의 식 (4)로 나타난다. IPMSM은 전기적인 돌극의 특성을 가지고 있으므로 식 (2), (3)에서 보듯이 L_d, L_q 의 값이 각기 다르다. 그리고 일반적으로 IPMSM은 $L_d < L_q$ 이므로 $i_{ds}^r < 0$ 으로 제어할 때 최대 토크제어를 할 수 있게 된다. 그 때 역기전력이 정현적이면 $e_{ds}^r = 0$, $e_{qs}^r = Constant$ 로 나타나므로 토크식은 다음과 같이 나타난다.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \left((L_d - L_q) i_{qs}^r i_{ds}^r + \phi_f i_{qs}^r \right) \quad (5)$$

$$\phi_f = \frac{e_{qs}^r}{\omega_r} : \text{자속쇄교량}$$

본 논문에 사용된 전동기는 역기전력이 비정현적인 경우이므로 e_{ds}^r, e_{qs}^r 가 0이나 일정값이 아닌 θ 에 따라 가변하는 값을 가지게 되므로 이 항을 무시하고 계산할 순 없다. 정확한 e_{ds}^r, e_{qs}^r 의 값을 알기 위해서는 모터가 가진 역기전력의 정확한 분석이 필요하다. 그림 (1)은 본 논문에 적용된 IPMSM의 측정된 역기전력 FFT분석을 토대로 역기전력을 복원해 본 파형이다

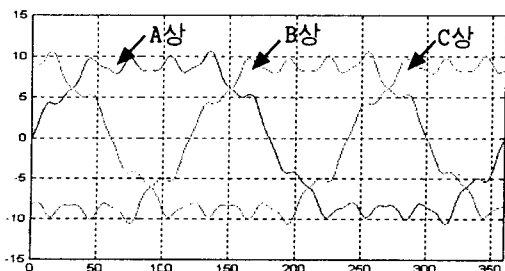


그림 1 FFT복원을 통한 역기전력 파형

A) x-axis : Angle [degree]

B) y-axis : Back-EMF [V]

위 역기전력을 동기좌표계로 변환시켜 보면 θ 에 의해 가변하는 e_{ds}^r, e_{qs}^r 의 값을 확인할 수 있다. 그 파형을 나타낸 것이 그림 (2)이다.

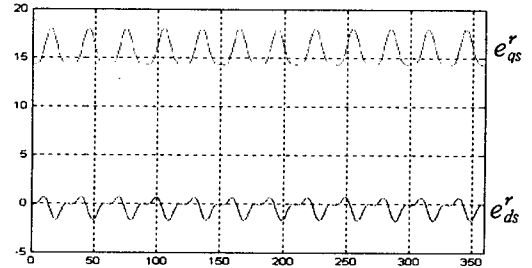


그림 2 e_{ds}^r, e_{qs}^r 의 파형

A) X-AXIS : Angle [degree] B) Y-AXIS : Back-EMF [V]

이와같이 θ 에 따라 변화하는 e_{ds}^r, e_{qs}^r 요소로 인해 정현파를 동기좌표계로 변환했을 때의 일정 i_{ds}^r, i_{qs}^r 는 토크 리플을 유발하게 된다.

2.3 단위 전류당 최대 토크제어

앞에서 본 토크식 중 역기전력이 정현파인 경우를 먼저 생각해 보자. 그 때 e_{ds}^r, e_{qs}^r 은 0과 일정값으로 나타나게 되고, i_{ds}^r 을 X축으로 보고, i_{qs}^r 을 Y축으로 볼 때 일정토크를 내기 위한 두 전류간의 궤적은 식 (5)에서 볼 때 쌍곡선의 방정식으로 나타난다. 그리고 i_{ds}^r, i_{qs}^r 의 벡터합을 $i_{mag} = \sqrt{i_{ds}^r^2 + i_{qs}^r^2}$ 로 나타낼 때 (3-A)는 그 두 곡선을 표현한 그래프가 된다.

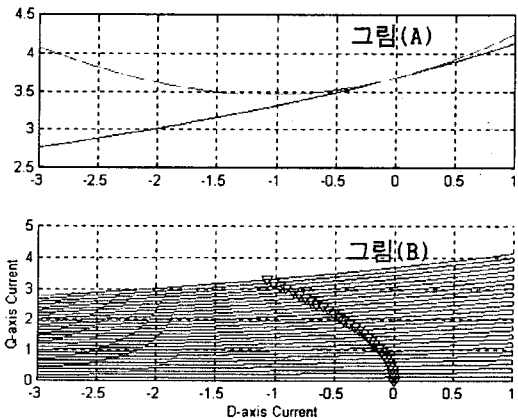


그림 3 일정토크를 발생하는 고정자 전류

A) 일정토크를 발생하는 전류파형과 i_{mag} 파형

B) 토크가변시 단위전류당 최대토크 전류곡선

그림 (3-A)에서 볼 때 i_{ds}^r 에 대한 i_{mag} 가 그리는 곡선의 최소가 되는 점이 최소 i_{mag} 값이며, 이 값이 단위전류당 최대토크를 발생시킬 수 있는 전류값이 된다. 그림 (3-B)는 토크가변시의 전류곡선과 그 때마다 발생하는 최소 i_{mag} 값(∇)을 나타낸 그림이다.

2.4 토크리플 저감방법

위와 같이 역기전력이 비 정현적인 경우에 토크리플을 저감하는 방법으로 feeding current 방식에 대해 많은 연구가 있어 왔다. 그러나 일반적으로 feeding current 방식에 적용된 모터는 SPMSM으로 L_d, L_q 의 값이 동일하여 reluctance torque 성분이 나타나지 않는다. 그 때문에 i_{ds}^r 도 0으로 제어할 수 있게 되며, 토크식도 다음과 같이 간단히 나타낸다.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \left(\frac{e_{qs}^r}{\omega_r} i_{qs}^r \right) \quad (8)$$

여기서 리플이 없는 토크를 내기 위한 전류는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{qs}^r = \frac{2}{3} \frac{2}{p} \left(\frac{\omega_r}{e_{qs}^r} T_e \right) \quad (9)$$

그러나 IPMSM의 경우에는 i_{ds}^r, i_{qs}^r 성분의 간섭항 및 개별항이 존재하기 때문에 위와 같은 간단한 방법으로는 원하는 전류파형을 찾아낼 수 없다. 그래서 본 논문에서는 리플이 없는 토크를 내기 위한 전류를 구하기 위해 위와는 다른 방법을 제안하여 최적전류를 찾고자 한다. 그림 (3-A)는 e_{ds}^r, e_{qs}^r 가 일정한 경우의 전류파형이나 그림 (4)는 역기전력이 비정현적이어서 e_{ds}^r, e_{qs}^r 가 θ 에 의해 가변되는 경우의 그래프가 된다.

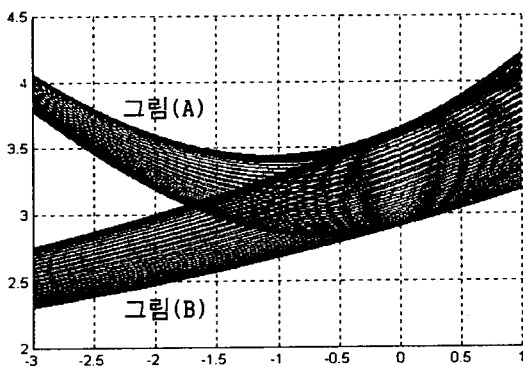


그림 4 θ 마다 가변하는 i_{ds}^r, i_{qs}^r 곡선과 i_{mag} 곡선

A) i_{mag} 곡선 B) 일정토크를 위한 고정자전류곡선

그림 (4)는 각각의 θ 마다 나오는 그림 (3)의 그래프를 여러개 모아둔 것과 같다. 그 때 최소가 되는 점들을 모두 모아보면 일정값은 아니지만 θ 마다 가변하는 DC 레벨의 i_{ds}^r, i_{qs}^r 값을 확인할 수 있다. 그리고 이 각각의 점들은 모두 일정토크를 내기 위한 전류로 리플을 발생

시키지 않는 전류이고, 단위전류당 최대토크를 낼 수 있는 포인트이므로 어떤 θ 에 대해서도 단위전류당 최대토크를 낼 수 있는 최적화 전류이다. 그림 (5)는 위의 방법으로 구해진 i_{ds}^r, i_{qs}^r 이다.

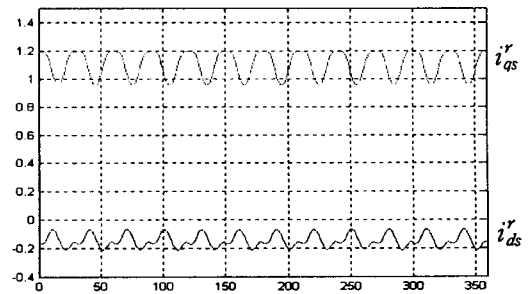


그림 5. 최적화 방법을 통해 구한 i_{ds}^r, i_{qs}^r

이 전류를 그림 (3-B)와 같이 토크를 가변했을 때 적용시켜본 그래프가 그림 (6)이 된다.

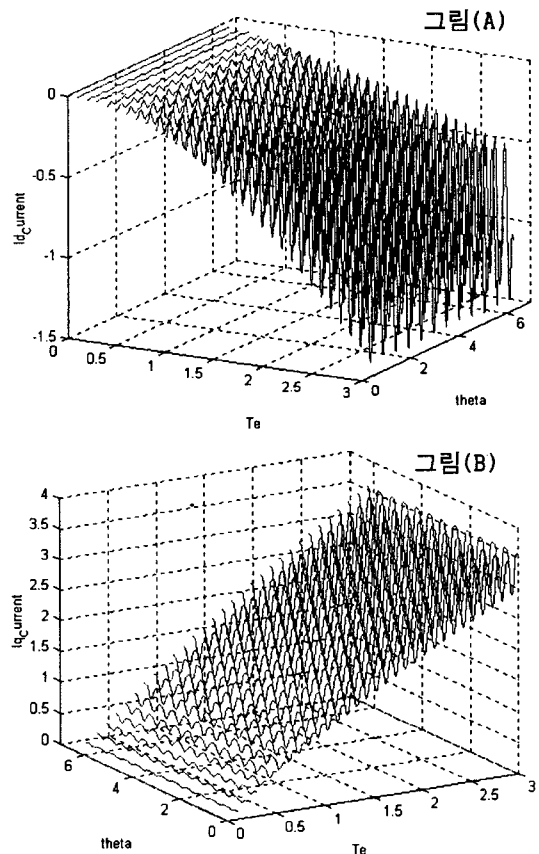


그림 6 토크가변시의 최적화 전류

A) i_{ds}^r 의 파형 B) i_{qs}^r 의 파형

토크가 증가함에 따라 d축 전류는 음의 방향으로, q축은 양의 방향으로 그림 (6)과 같은 파형형태를 취하면서 증가한다. 이 전류를 모터에 인가함으로써 토크리플의 저감을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2.5 시뮬레이션

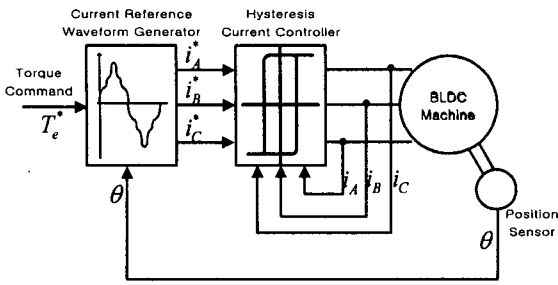


그림 7 Block Diagram

위에서 설명한 역기전력의 리플성분을 모터의 수식적 모델링에 대입한 후 위와 같은 제어도에 의해 시뮬레이션을 해 보았다. 토크지령과 모터가 회전하면서 엔코더에서 나오는 θ 를 통해 최적의 전류파형을 발생하여 실제 전류와 비교하여 실제 전류를 최적 전류파형에 가깝게 발생하도록 제어를 한다. 시뮬레이션에서 사용된 모터의 정격은 다음과 같다.

고정자 저항	4.3[Ω]
고정자 L_d	0.035[mH]
고정자 L_q	0.065[mH]
회전자 관성모멘트	0.00018[Kgm ²]
극수	4

위에서 말한 특성을 가진 모터의 경우 정현파전류를 통해서 토크에 상당한 리플이 나타나게 된다. 그림 (8)은 정현파 기준전류와 그 때의 실제 전류를 나타내는 것이고 그림 (9)는 그 때의 토크파형이 되겠다.

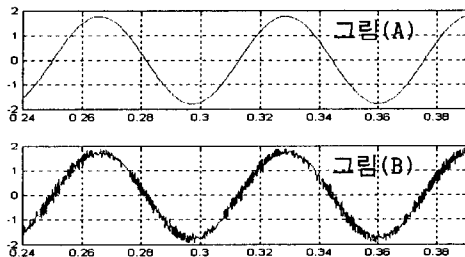


그림 8 정현파 기준전류와 실제전류
A) 기준전류 B) 실제전류

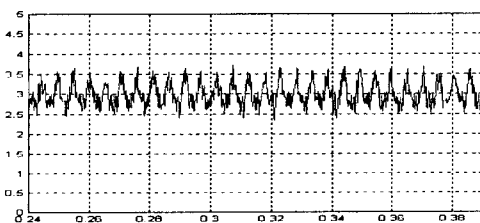


그림 9 정현파 전류인가시 토크파형

그림 (10)은 위에서 설명한 방법을 통해 구해진 모터의 기준 전류가 될 최적 전류파형과 실제 전류를 보여주고 있다. 그림 (11)는 그 전류를 인가했을 때의 토크파형이다.

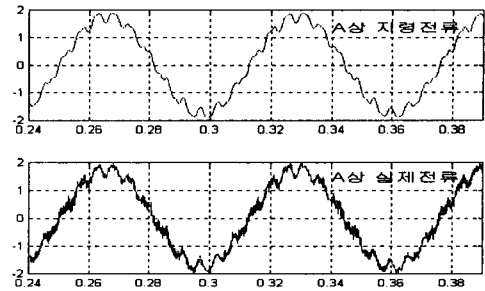


그림 10 최적화 전류 지령값과 실제값

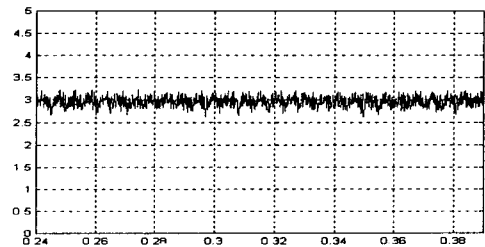


그림 11 최적화전류 인가시 토크파형

그림 (9)와 그림 (11)에서 보듯이 최적화 전류를 인가하였을 때 토크의 리플이 줄어들음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 역기전력이 비정현적인 IPMSM에서 단위전류당 최대토크를 발생시킬 수 있고 또한 토크가 가지는 리플을 줄일 수 있는 최적화 전류를 찾았다. 그리고 정현파 전류를 인가하였을 때와 최적화 전류를 인가하였을 때의 토크파형을 비교함으로써 토크의 리플이 감소됨을 시뮬레이션을 통해서 확인해 볼 수 있었다. 향후 과제로는 본 연구에 제안된 방식을 실험을 통해 검증해 보는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Pragasen PILLAY, Ramu krisnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol, 25, No. 2, 1989.
- [2] J.P Karunadasa A.C Renfrew, "Design and Implementation of microprocessor based sliding mode controller for brushless servomotor", IEE Proceedings, Vol. 138 No. 6 July/August, 1991.
- [3] J.Y Hung, Z.Ding, "Design of Currents to reduce torque ripple in brushless Permanent Motor" IEE Proceedings, Vol. 140 No. 4 July, 1993.
- [4] Bimal. K. Bose, "A High-Performance Inverter-fed Drive System of an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol, 24, No. 6, 1988.