

전기 스쿠터용 매입형 영구자석 동기전동기의 온도보상에 의한 전류 보정 제어

임종빈*, 함상환*, 조수연*, 오세영*, 유광현*, 안한웅*, 이주*
한양대학교*

Current Revision Control according to Temperature of IPMSM in Electric Scooter

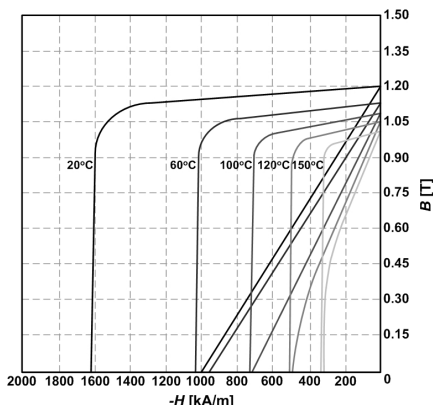
Jong-Bin Im*, Sang-Hwan Ham*, Su-Yeon Cho*, Se-Young Oh*, GwangHyeon Ryu*, Han-Woong Ahn*
Hanyang University*

Abstract - 매입형 영구자석 동기전동기는 강건한 회전자 구조와 킬러턴스 토크를 사용할 수 있다는 점, 약계자 제어를 하기 쉽다는 점에서 넓은 속도와 토크를 필요로 하는 하이브리드 차량이나 전기 차량에 적합한 전동기이다. 영구자석의 감자곡선은 온도에도 의존하기 때문에 온도에 따라 전동기의 자속과 토크가 변하게 된다. 이 논문은 전기 스쿠터에 사용되는 매입형 영구자석 동기전동기의 온도에 따른 지령 전류 보정에 의한 제어법에 대해 연구하였다. 토크 리플을 줄이기 위해서 속도-토크 곡선과 감자곡선을 이용하여 구하였으며, 보정된 지령 전류를 구하기 위해 Lagrange 보간법과 재귀 최소자승(Recursive Least Square : RLS)법을 사용하여 전류맵을 만들었다. 이 지령 전류는 토크와 인버터 출력 전류값을 계산하는데 사용된다. 전류맵을 만들기 위해서 측정된 온도는 20, 80, 100도이다. 본 논문에서 제안한 제어법을 이용하여 토크 리플이 줄어들음을 시뮬레이션과 실험을 통해서 확인할 수 있었다.

1. 서 론

세계 경제의 발전으로 인해 공해와 환경오염 문제가 이 더욱 더 심해지고 있다. 하이브리드 전기 자동차는 이러한 문제를 해결할 수 있는 하나의 방법으로 높은 에너지 효율과 적은 유해 가스 배출로 인해 여러 국가들의 이목이 집중되고 있다.[1],[2] 현재 하이브리드 전기자동차용 전동기로 사용되고 있거나 개발 중인 전동기는 직류기와 유도기, 영구자석 동기기, 스위치드 릴럭턴스 전동기 등이 있다. 이 중에 유도기와 영구자석 동기기는 많이 쓰이는 반면에 직류기는 쓰임이 줄어들고 있고 스위치드 릴럭턴스 전동기는 요즘 많은 관심을 받고 있다.[3] 이 중에 영구자석 동기기는 다른 전동기에 비해 높은 파워 밀도와 효율 등 많은 이점이 있다. 그러므로 영구자석 동기기는 하이브리드용 전동기 중 가장 각광 받고 있는 추세이다.

영구자석의 특성은 여러 가지 요인에 의해 결정되는데 온도는 그중에 중요한 요인 중 하나이다. 매입형 영구자석 동기기는 회전자에 있는 영구자석의 자속을 이용하여 토크를 발생시킨다. 그러나 위에서 언급한 논문들은 온도의 효과를 고려하지 않았다. 여러 온도에 대한 영구자석의 감자특성을 그림 1에서 나타내었다.



<그림 1> NdFeB-35SH의 온도변화에 따른 감자곡선

본 논문은 하이브리드 전기자동차용 매입형 영구자석 동기기의 온도에 따른 전류 보정 알고리즘을 제안하였다. 전류의 제어성을 향상시키기 위해 20도와 80도, 100도를 가지고 보간법을 이용하여 지령 전류를 만들었다.

2. 본 론

2.1 매입형 영구자석 동기기의 수학적 모델

영구자석은 자기 자신이 가지고 있는 자속을 가지고 토크를 만든다. d-q축 기준좌표계에서, 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_d = R_s i_d + \left(\frac{d\Phi_d}{dt}\right) - \omega_r L_q i_q \quad (1)$$

$$v_q = R_s i_q + \left(\frac{d\Phi_q}{dt}\right) + \omega_r (L_q i_q + \Phi_m) \quad (2)$$

토크 식은 다음과 같이 주어진다.

$$T = \frac{3}{2} p \{ [L_d(i_d, i_q) - L_q(i_d, i_q)] i_d i_q + \Phi_m i_q \} \quad (3)$$

2.2 매입형 영구자석 동기기의 온도보상 알고리즘

2.2.1 보간법

보간법은 알려진 데이터의 분산된 조합의 범위 내에서 새로운 데이터를 얻는 수치해석법이다. 몇 개의 알고 있는 데이터로부터 보간을 통해 간단한 함수를 얻을 수 있다. 일반적으로 다차 보간법은 다음과 같이 주어진다.

$$f(x) = f(x_0)L_0(x) + f(x_1)L_1(x) + f(x_2)L_2(x) \quad (4)$$

여기서

$$L_0(x) = \frac{[(x-x_1)(x-x_2)]}{[(x_0-x_1)(x_0-x_2)]} \quad (5)$$

$$L_1(x) = \frac{[(x-x_0)(x-x_2)]}{[(x_1-x_0)(x_1-x_2)]} \quad (6)$$

$$L_2(x) = \frac{[(x-x_0)(x-x_1)]}{[(x_2-x_0)(x_2-x_1)]} \quad (7)$$

이다.

식 (4)는 보간 다항식에 대한 Lagrange 식이라고 부르고 L_0, L_1, L_2 는 Lagrange 보간 기본함수라고 부른다.

2.2.2 전압과 전류 제한

일반적으로 매입형 영구자석 동기기는 인버터에 의해서 구동된다. 그러므로 전압과 전류의 제한은 다음과 같이 인버터의 용량에 의해서 정해진다.

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{am} \quad (8)$$

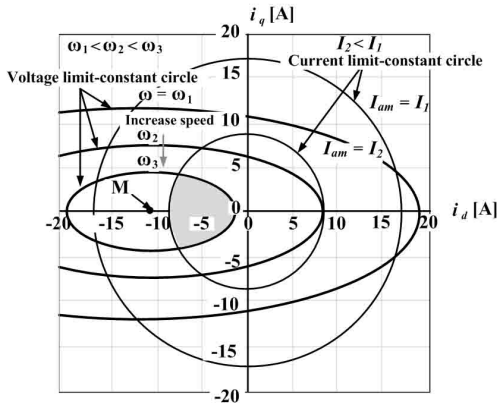
$$V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq V_{am} \quad (9)$$

간단하게 만들기 위해 전압 제한 값을 유기전압의 제한으로 바꾸면 다음과 같이 된다.

$$V_0 = \omega \sqrt{(L_d i_d + \Phi_m)^2 + (L_q i_q)^2} \leq V_{om} \quad (10)$$

만약 식 (10)을 만족시킨다면, 식 (13) 역시 $V_{om} = V_{am} - R_s I_{am}$ 이라고 하면 만족을 한다. 그림 2는 식 (12)의 전류 제한과 식 (14)의

전압 제한을 $d-q$ 축 상에서 나타낸 것이다.



〈그림 2〉 전류와 전압제한

$$i_d^2 + i_q^2 = I_{am}^2 \quad (11)$$

$$(L_d i_d + \Phi_m)^2 + (L_q i_q)^2 = \left(\frac{V_{om}}{\omega}\right)^2 \quad (12)$$

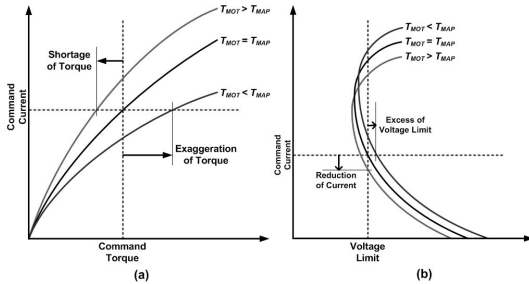
전류는 식 (15)의 전류 제한된 내에 있어야 하고 전압은 전압 제한타원 내에 있어야 한다.

2.2.3 속도에 따른 운전

앞서 살펴본 것과 같이 전압 제한은 식 (14)에 의존한다. 즉, 속도가 올라갈수록 전압 제한타원은 적어진다.

저속 영역에서는 전압제한이 운전에 영향을 미치지 않는다. 그러나 기준 맵 온도와 전동기의 온도가 다른 경우 영구자석의 자속이 변하여 원하는 토크가 나오지 않게 된다. 저속에서의 토크 특성은 그림 3의 (a)에서 보여준다. 모터의 실제 온도가 맵 온도보다 높다고 한다면 지령 전류에 의한 실제적인 토크는 원하는 토크보다 적게 나오게 된다. 또한 모터의 실제 온도가 맵 온도보다 낮다면 지령 전류에 의한 실제적인 토크는 원하는 토크에 비해 더 많이 나오게 된다.

고속 영역에서는 전압제한이 속도에 따라 그림 3의 (b)와 같이 변한다. 그러므로 모터의 온도가 맵 온도보다 높다면 지령 전류에 의한 토크는 적게 발생한다. 그러므로 지령 전류는 온도에 따라 변할 필요가 있다.



〈그림 3〉 속도에 따른 토크 특성 (a) 저속 (b) 고속

2.3 실험결과

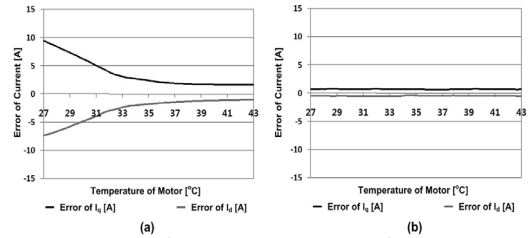
실험을 통해서 20도와 80도, 100도, 150도의 데이터를 이용하여 보간법을 수행하여 얻은 전류 맵으로부터 지령 전류를 결정하였다. 전류 제어 성능을 확인하기 위해서 시뮬레이션과 실험을 실시하였다. 전동기의 사양은 Table 1과 같다.

그림 4는 정격운전점(1500[rpm], 9.55[Nm])에서의 전류 오차를 시뮬레이션 한 파형이다. (a)는 전류보상전의 파형이고 (b)는 전류 보상 이후의 파형이다. 그림 5는 정격운전점에서의 전류 오차에 대한 실험 파형이다. 그림 4와 5에 의해서 시뮬레이션과 실험이 일치함을 알 수 있다. 그림 6은 정격운전점에서의 토크 리플을 보여준다. 전류 보상을 한 제어기가 보상전의 제어보다 전류 오차 및 리플이 줄어들음을 확인할 수 있었다.

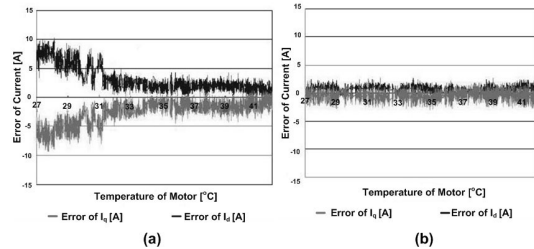
〈표 1〉 전동기의 사양

	단위	값
정격 출력	kW	1.5

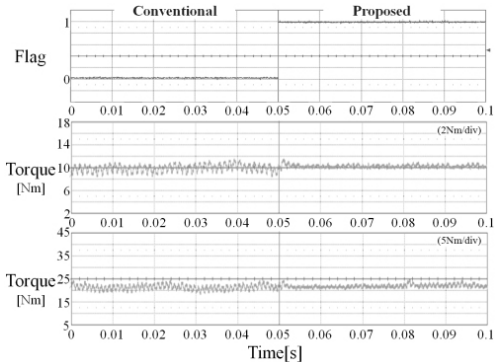
정격토크	Nm	10
정격속도	rpm	1500
최대속도	rpm	6000
배터리 전압	V	48
정격전류	A	9.55



〈그림 4〉 정격운전점(1500[rpm], 9.55[Nm])에서의 전류 오차를 시뮬레이션 한 파형 (a) 전류보상 전 (b) 전류보상 후



〈그림 5〉 정격운전점(1500[rpm], 9.55[Nm])에서의 전류 오차에 대한 실험 파형 (a) 전류보상 전 (b) 전류보상 후



〈그림 6〉 정격운전점(1500[rpm], 9.55[Nm])에서의 토크 리플

3. 결론

이 논문에서는 48V로 구동되는 하이브리드 자동차용 매입형 영구자석 동기기의 온도에 따른 토크 제어를 위한 전류보상 알고리즘을 제시하였다. 매입형 영구자석 동기기의 온도에 대한 영향을 줄이기 위해서 특정 온도에서의 데이터를 다항식 보간법에 적용하여 지령 전류를 만들었다. 이를 통해 토크 제어가 잘 이루어짐을 확인할 수 있었다. 그러나 약간의 전류오차와 토크 리플이 발생됨을 확인할 수 있는데, 이는 자석 부분이 아니라 고정자에서 온도 측정을 하여 이에 의한 오차라고 추측이 된다.

[참고 문헌]

- [1] B. Kou, L. Li, S. Cheng, and F. Meng, "Operating Control of Efficiently Generating Induction Motor for Driving Hybrid Electric Vehicle", IEEE Trans. Magn., Vol.41, no.1, pp.488-491, Jan.2005.
- [2] S. I. Kim, G. H. Lee, J. P. Hong, and T. U. Jung, "Design Process of Interior PM Synchronous Motor for 42-V Electric Air-Conditioner System in Hybrid Electric Vehicle", IEEE Trans. Magn., Vol. 44, no. 6, pp. 1590-1593, Jun. 2008.
- [3] M. Zeraouia, M. Benbouzid, and D. Diallo, "Electric Motor Drive Selection Issue for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study", IEEE Trans. Veh. Technol., Vol.55, no.6, pp.1756-1764, Nov.2006.