

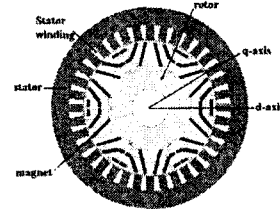
매입형 영구자석 동기 전동기의 인덕턴스 리플 특성 분석

이상엽, 광상엽, 정현교
 서울대학교 전기 컴퓨터 공학부 전기역학 연구실

Analysis of Inductance Variation Characteristics in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Sang-Yub Lee, Sang-Yeop Kwak, and Hyun-Kyo Jung
 Electromechanics Lab., Department of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

Abstract - In the case of the interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM), it is important to know the accurate machine parameters in the design step. In particular, d- and q- axis inductance are expected to have ripple characteristics, due to the mechanical structure and the degree of magnetic saturation. In this paper, this feature is expressed as inductance variation. Inductance variation of the IPMSM is calculated with finite element analysis, and the reason for inductance variation is identified. Finally the validity of this paper is verified by the comparison with the experimental results.



<그림 2> 해석 모델의 단면도

1. 서 론

현재, 자동차 내에서의 기동과 발전에 이용되는 전동기는 직류 전동기나 권선형 동기전동기가 대부분이다. 그러나 점차 증가하는 자동차의 전력 수요에 기인하여, 좀 더 높은 출력을 낼 수 있는 전동기가 요구되고 있다. 따라서 기동을 담당하는 부분과 발전을 담당하는 부분을 하나의 기동-발전기로 통합하는 기술이 제안되고 있다. 여기서 주목 받는 분야가 42V ISG (Integrated Starter/Generator) 시스템이라고 할 수 있다. 이러한 시스템의 요구조건을 충족시키기 위해서는, 높은 파워 밀도가 필수적이기 때문에 매입형 영구자석 동기 전동기 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM)가 최근 이런 추세에 부합하는 전동기로 각광 받고 있다.

매입형 영구자석 전동기의 특징은 다음과 같다. 기본적으로 d, q축 간의 자기저항 차이가 존재하기 때문에, 회전자와 자속과 고정자의 전류의 상호 작용 토크뿐만 아니라 d, q축 간의 자기저항 차이에 기인한 자기저항 토크가 존재하게 된다. 또한 약계자 제어가 가능하다. 이런 여러 가지 특징들로 인해서 매입형 영구자석 동기 전동기는 높은 효율, 높은 파워 밀도, 높은 토크 밀도를 가지게 되고, 약계자 제어로 인한 광범위한 정 출력 영역이 보장된다.

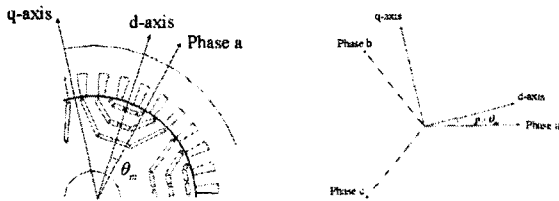
이러한 장점을 가지는 매입형 영구자석 전동기는 그 구조적으로 포화 영역에서의 동작이 불가피하다. 따라서 전동기의 특성을 결정짓는 전동기 파라미터 (d, q축 인덕턴스, 역기전력 상수)들의 비선형 특성이 존재하게 되는데, 이런 특성들을 정확하게 파악하는 것이 전동기의 설계와 제어에서 가장 중요하다고 할 수 있다. 하지만 전동기 파라미터들, 특히 d, q축 인덕턴스는 포화의 정도, 다시 말해서 d, q축 전류 조합에 따라서 그 값이 수십%에서 수백%까지 변하게 되고, 그 값을 정확하게 파악하는 것이 힘들다 [1][2]. 또한 역기전력과 토크와 마찬가지로, 인덕턴스 역시 리플 특성을 가지고 있기 때문에 그 값을 예측하는 것이 더욱 어렵다고 할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 먼저 인덕턴스 리플 특성을 유한 요소 법으로 계산하였고, 각 전류 조합 별로 인덕턴스 리플 특성을 규명하였다. 다음으로 인덕턴스 리플 특성의 원인을 규명하였고 마지막으로 실험 결과와의 비교 분석을 통해서 그 타당성을 검증하였다.

2. 해석 방법과 해석 모델

2.1 해석 방법

그림 1은 매입형 영구자석 전동기의 좌표축 모델을 나타내고 있다. 인덕턴스 리플을 추출하기 위해서는 회전자의 위치변화에 따른 인덕턴스 값을 계산할 수 있어야 한다. 회전자의 위치가 변함에 따라서 d축과 a상의 축 사이의 각이 변하게 되고, 따라서 각 상당 쇄교자속을 구한 후, 다음과 같은 좌표 변환 식을 통하여 d, q축 인덕턴스를 구할 수 있다 [3].



<그림 1> 인덕턴스 계산을 위한 좌표 변환 축

$$\lambda_d = \frac{2}{3} [\cos\theta_e \lambda_a + \cos(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) \lambda_b + \cos(\theta_e + \frac{2}{3}\pi) \lambda_c] \quad (1)$$

$$\lambda_q = \frac{2}{3} [-\sin\theta_e \lambda_a - \sin(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) \lambda_b - \sin(\theta_e + \frac{2}{3}\pi) \lambda_c] \quad (2)$$

$$\theta_e = p\theta_m, L_{ds}(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{\lambda_d(i_{ds}, i_{qs})}{i_{ds}}, L_{qs}(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{\lambda_q(i_{ds}, i_{qs})}{i_{qs}} \quad (3)$$

여기서, L_{ds} , L_{qs} 는 d, q축 인덕턴스이고, p 는 극 쌍수를 나타내고, θ_e 는 전기각, λ_a , λ_b , λ_c 는 a, b, c상 쇄교자속을 나타낸다.

매입형 영구자석 d, q축 인덕턴스를 구하기 위해서는 각 상당 쇄교자속을 구하는 것이 선행되어야만 한다. 따라서 각 상당 쇄교자속은 각각의 권선부 단면의 벡터 포텐셜을 평균함으로써 얻어질 수 있고, 이는 다음 식에 잘 나타나 있다.

$$\lambda = \left[\frac{\iint_{S_1} A_1 dS}{S_1} - \frac{\iint_{S_2} A_2 dS}{S_2} \right] l \quad (4)$$

여기서, l 은 축방향 길이, S_1 , S_2 는 (+), (-)전류가 흐르는 권선의 총 단면적이다.

각각의 상당 쇄교자속은 슬롯부를 쇄교하는 자속을 이용해서 구해지기 때문에 공극을 통과하지 않는 자속, 즉 누설 자속도 이에 포함되게 된다. 따라서 위의 식으로부터 구하는 인덕턴스 값 역시 누설 인덕턴스 (Leakage inductance)를 포함하게 된다.

실험으로부터 얻어지는 인덕턴스 값은 IPMSM의 전압 방정식을 이용해서 구할 수 있다. 전압 방정식에서의 d, q축 인덕턴스는 동기 인덕턴스 (Synchronous inductance)이고, 이는 누설 인덕턴스를 포함하고 있다. 따라서 슬롯 쇄교자속 법으로 구한 인덕턴스 값을 실험값과 비교하는 것이 타당하다.

2.2 해석 모델

본 논문에서 적용된 해석 모델은 다중 매입형 영구자석 전동기로서, 앞서 언급했듯이 높은 기동 토크와 넓은 정출력 영역을 그 특징으로 한다. 회전자 내부에 영구 자석이 삽입되어 있기 때문에, 기계적, 열적 특성이 우수하고, 자석 형상과 삽입 부분을 조절하여 정적인 역기전력 파형을 얻을 수 있다. 해석모델의 단면도를 그림 2에 나타내었다.

3. 인덕턴스 리플 특성의 분석

3.1 인덕턴스 리플 특성

대부분의 전동기는 슬롯 부분의 기계적인 구조에 기인한 토크, 역기전력 리플 특성이 발생하게 된다. 기기를 정확하게 설계하고 제어하기 위해서는 이러한 특성들을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 토크나 역기전력과 마찬가지로 인덕턴스 역시 리플 특성을 보이게 되는데, 이러한 리플 특성은 기기의 정확한 설계에 악 영향을 주게 되고, 이러한 리플 특성을 정확하게 파악하는 것 역시 중요하다. 먼저 인덕턴스 리플 특성이 나타나는 형태를 살펴보기 위해, 전류 입력을 200 [Apeak] 위상각을 170 [deg]로 고정된 채로 기계각을 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 여기서 기계각은 고정자와 회전자 사이의 각도라고 정의한다. 해석 결과는 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 기계각에 따른 d, q축 인덕턴스

	$L_d [\mu H]$	$L_q [\mu H]$
$\theta_m = 3^\circ$	59.2961	64.9105
$\theta_m = 9^\circ$	181.4763	180.2232

표 1에서 알 수 있듯이 기계각이 변화함에 따라 d축에서 인덕턴스 값의 변화가 보이는 것을 알 수 있다. 이렇게 인덕턴스가 고정자와 회전자 위치 차이 때문에 그 값이 변화하는 것을 인덕턴스 리플 특성 (inductance variation)이라고 부르기로 한다. 다음에 나올 3.2절에서는 다양한 전류영역에서 인덕턴스를 추출하여 인덕턴스 리플 특성의 특성과 그 원인을 알아보기로 한다.

3.2 인덕턴스 리플의 원인

앞서 언급한 인덕턴스 리플 특성의 원인으로 다음과 같은 2가지를 생각할 수 있다.

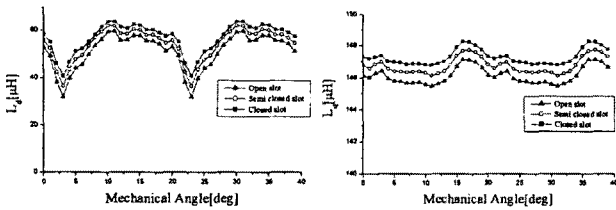
1. 슬롯 부의 기계적인 구조
2. 각 축 전류에 따른 자기 포화 정도의 차이

일반적으로 슬롯 부의 형태를 폐 슬롯이나 반 폐 슬롯으로 설계하여서 역기전력이나 토크의 리플을 줄이는 기법은 널리 사용되고 있다. 마찬가지로 슬롯 부의 기계적 구조 때문에 인덕턴스 리플이 발생한다고 가정한다면, 슬롯 부의 형태를 바꾸어가면서 인덕턴스 변화 특성을 살펴볼 필요가 있다. 따라서 슬롯 형태를 오픈 슬롯, 반 폐 슬롯, 폐 슬롯으로 바꾸어가며 인덕턴스 변화 특성을 살펴보았다. 해석모델에 대해서 d축 전류를 -40[A], q축 전류를 280[A]를 인가하여서 그 변화 특성을 살펴보았다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 슬롯 형태가 변화함에 따라서 인덕턴스의 정량적 크기는 어느 정도 변화함을 알 수 있었다. 하지만, 인덕턴스의 크기는 바뀐다고 하더라도, 그 변화 패턴, 즉 인덕턴스 리플은 변화가 없음을 알 수 있다. 다시 말해서 슬롯 형태와 인덕턴스 변화 특성은 관계가 없다는 것을 알 수 있다.

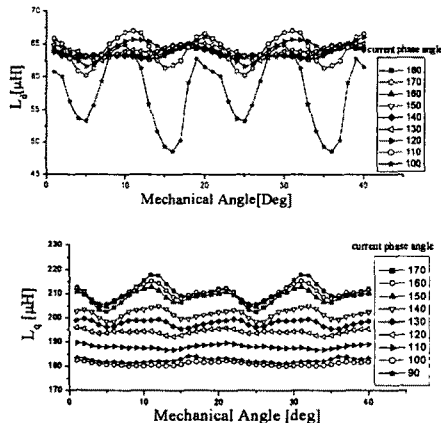
그리고 그림 3에서 보면 알 수 있듯이, d축 인덕턴스는 리플 특성이 심하게 나타나지만, q축에서는 리플 현상이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 이 현상은 d축 전류가 크기 때문에 d축에 자기 포화 현상이 두드러지게 나타나고, q축 전류는 작기 때문에 q축에는 자기 포화 현상이 별로 없기 때문이다. 여기에 대한 자세한 설명과 분석은 두 번째 인덕턴스 리플의 근거인 "각 축 전류에 따른 자기 포화 정도의 차이"로 설명될 수 있다.

두 번째 인덕턴스 리플의 이유로 각 축 전류에 의한 축 간의 자기 포화 정도의 차이를 생각할 수 있다. 이를 위해서 해석 모델에 대해서 전류 크기는 200[A]로 고정시킨 후 전류 위상각을 10[deg]씩 변화시켜 가며 인덕턴스를 계산하였고, 그 해석 결과는 그림 4에 나타내었다. 결과에 대한 물리적인 의미를 분석하기 위해서 먼저 전류 위상각이 큰 상태를 가정해보자.

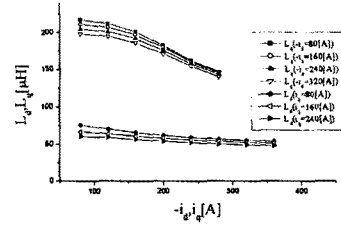
그림 4에서 알 수 있듯이, 전류 위상각이 큰 경우에 d축 인덕턴스의 변화 폭은 작다. 그러나 전류 위상각이 줄어들어 따라, d축 인덕턴스의 변화 폭도 점점 증가함을 알 수 있다. 전류 위상각이 크다는 사실은 d축 전류가



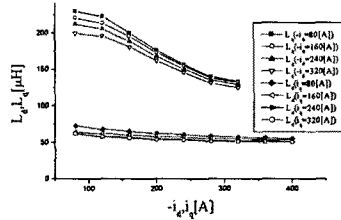
〈그림 3〉 슬롯 형태에 따른 d, q축 인덕턴스 리플 특성



〈그림 4〉 d, q축 인덕턴스 리플 특성



〈그림 5〉 인덕턴스 리플 특성을 고려한 d, q축 인덕턴스



〈그림 6〉 실험으로 얻어진 d, q축 인덕턴스

크고, q축 전류가 작다는 것을 의미하고, 전류 위상각이 작다는 사실은 d축 전류가 작고, q축 전류가 크다는 것을 의미한다. d축 전류가 크고 q축 전류가 작을 때, 다시 말해서 전류 위상각이 큰 경우에, d축 자로 (magnetic path)는 q축보다 더 포화되게 되고, 대부분의 자속은 d축 자로를 통과하게 된다. 그리고 q축 전류에 의해서 유도된 나머지 자속들은 q축 자로를 지나가게 되는데, 포화된 d축은 회전자와 고정자의 위치 변화에 대해서 그 자속의 양이 고정되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 고정자와 회전자 사이의 기계적인 위치는 d축 인덕턴스보다 q축 인덕턴스에 더 많은 영향을 끼치게 된다. 이는 d축 자로가 q축 자로보다 더 심한 포화 상태이기 때문이다.

결론적으로 전류 위상각이 큰 경우, q축 인덕턴스는 d축 인덕턴스보다 기계적인 위치에 더 민감하게 되고, 따라서 q축 인덕턴스의 변화는 d축 인덕턴스의 변화보다 그 양이 더 크게 된다.

하지만 전류 위상각이 작은 경우, 앞에서 언급한 현상은 모두 반대로 나타나게 되는데, 이는 q축 인덕턴스의 변화 폭이 d축 인덕턴스의 변화 폭보다 훨씬 적어지게 되고, 이는 q축 자로가 d축 자로보다 훨씬 더 심하게 포화되었기 때문이다. 이는 그림 4에서 확인할 수 있다.

3.3 인덕턴스 리플 특성을 고려한 인덕턴스 계산

인덕턴스 리플 특성을 고려한 인덕턴스는 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$L_{d/avg}(i_d, i_q) = \frac{\sum_{\theta_m=0}^{N-1} L_d(i_d, i_q, \theta_m)}{N}, \quad L_{q/avg}(i_d, i_q) = \frac{\sum_{\theta_m=0}^{N-1} L_q(i_d, i_q, \theta_m)}{N} \quad (5)$$

여기서 $L_{d/avg}$, $L_{q/avg}$ 는 인덕턴스 리플 특성을 고려한 인덕턴스의 평균 값이고, N 은 각각의 해석 결과의 개수이다.

각각의 전류 조합 별로 구해진 d, q축 인덕턴스 리플 특성을 이용해서, 전체 전류 영역에서의 d, q축 인덕턴스를 구할 수 있다. 이는 그림 5에 나타내었다. 그리고 실험으로 얻어진 d, q축 인덕턴스는 그림 6에 나타내었다. 그림 5, 6에서 알 수 있듯이, 해석 결과와 실험값은 상당히 근접한 결과를 보여줌을 알 수 있다.

4. 결 론

매입형 영구자석 전동기의 경우, 정확한 설계를 위하여, 설계 단계에서 정확한 기기 파라미터를 추출하는 것은 매우 중요하다. 따라서 설계 단계에서부터 인덕턴스 리플 특성을 고려해서 기기설계가 이루어진다면, 좀 더 정확한 기기 설계가 가능할 것이다. 따라서 본 논문에서는 인덕턴스 리플 특성이 일어나는 원인을 규명하였고, d, q축 인덕턴스 리플 특성을 고려한 d, q축 인덕턴스를 유한 요소 법을 통해서 구하는 방법을 제시하였다. 마지막으로 실험값과의 비교를 통해서 그 타당성을 검증하였다.

〈참고 문헌〉

[1] 이 상영, 박 상엽, 김 재광, 정현교, "교차 결합 현상을 고려한 매입형 영구자석 전동기의 인덕턴스 특성 해석", 전기학회논문지 제 55B권 제 4호, 189-195, 2006년 4월
 [2] S. Y. Kwak, J. K. Kim, and H. K. Jung, "Characteristic analysis of multilayer-buried magnet synchronous motor using fixed permeability method," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, pp. 549-555, September 2005.
 [3] P. C. Krause, Analysis of Electric Machinery, IEEE PRESS, 1995, pp. 36-54.