

다층 매입형 영구자석 전동기의 파라미터 추출법에 관한 연구

이상엽, 곽상엽, 김재광, 정현교
서울대학교 전기역학 연구실

Research about the Parameter Calculation Method of Multi-layer Interior Permanent Magnet Motor

Sang-Yub Lee, Sang-Yeop Kwak, Jae-Kwang Kim and Hyun-Kyo Jung.
Electromechanics Laboratory, Seoul National University,

Abstract - 다층 매입형 영구자석 전동기의 설계에 있어서 d, q축 인덕턴스는 전동기의 특성을 결정짓는 중요한 파라미터이다. 그러나 심한 자계 포화 영역에서 동작하는 매입형 영구자석 전동기의 특성 때문에, d축 q축 전류 조합별로 그 값들이 다를 뿐만 아니라, 설계 단계에서 정확하게 예측하기가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기의 중요한 파라미터인 d, q축 인덕턴스를 계산하는 몇 가지 방법들을 소개하였다. 또한, 해석 결과와 실험 결과와의 비교를 통하여 제안한 계산 방법의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 다층 매입형 영구자석 전동기 (Multi-layer interior permanent magnet motor)가 많은 분야에 응용되고 있다. 매입형 영구자석 전동기는 높은 파워 밀도 (Power density), 넓은 정출력 영역 (Wide constant power speed range), 높은 기동토크 (Starting torque), 돌극성 (Saliency)으로 인한 추가적인 릴럭턴스 토크(Reluctance torque) 등을 그 특징으로 들 수 있다. 위와 같은 매입형 영구자석 전동기의 여러 특징들을 정확하게 예측하기 위해서는 전동기 특성에 큰 영향을 미치는 전동기 파라미터를 기기 설계 단계에서 정확하게 파악해야 할 필요가 있다. 그러나 대전류와 영구자석의 이중여자를 그 기본으로 하는 매입형 영구자석 전동기의 경우 심한 자계 포화 영역에서 동작하는 것이 불가피하고, 따라서 d축 q축 전류 조합별로 그 값이 다를 뿐만 아니라, 설계 단계에서 정확하게 예측하는 것이 쉽지 않다.

본 논문에서는 다층 매입형 영구자석 전동기의 중요한 파라미터 중의 하나인 d, q축 인덕턴스의 계산법 3가지를 제안하였다. 또한 해석 결과와 실험 결과와의 비교를 통하여 제안한 계산 방법들의 타당성을 검증하고 분석하였다. 또한 자기 포화 영역 (Magnetic saturation region)에서의 인덕턴스 계산을 좀더 정확하게 하기 위해서 고정 투자율 법(Fixed permeability method)을 적용하였다[1].

2. 해석 모델

본 논문에 소개된 해석 모델은 다층 매입형 영구자석 전동기로서, 영구자석형 전동기 (Permanent magnet motor)의 장점인 높은 파워 밀도, 높은 효율과 동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous reluctance motor)의 장점인 회전자 자속과 고정자 전류의 상호 작용 토크(Field Torque)와 자기 저항의 차이에 의한 토크(Reluctance torque)가 동시에 발생하는 특징을 모두 가지고 있다[2]. 또한 영구자석을 회전자 내부에 매입하여, 표면 부착형 영구자석 전동기에서 발생하는 고속 운전시의 기계적 취약성을 극복할 수 있으며, 자석이 회전

표 1. 해석 모델의 주요 설계 값

변수 명	변수 값
극수	6
회전자 외경	110 [mm]
회전자 내경	30 [mm]
공극	0.5 [mm]
고정자 내경	111 [mm]
고정자 외경	164 [mm]
축방향 길이	67 [mm]
슬롯 수	36
영구자석 재질	NdFeB(Br=5500[Gauss])
역기전력 상수	0.0109 [V _{peak} /rad/sec]
상당 권선 저항	9.6 [m]

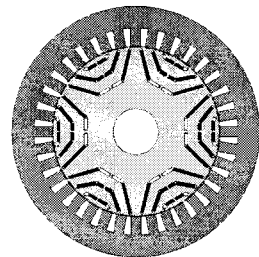


그림 1. 해석 모델의 단면

자 내부에 있어 고정자 권선에서 발생하는 열의 영향을 직접적으로 받지 않아 열적 기계적 안정성이 뛰어나다. 또한 약계자 제어가 가능하여 광범위한 운전 속도에서 일정 출력 운전 영역이 가능하다. 표 1.에서는 해석 모델의 주요 설계 값을, 그림 1.에서는 해석 모델의 단면 구조를 나타내었다. 돌극성을 최대한 키우기 위해 위와 같은 회전자 구조를 가지고, 정현파에 가까운 역기전력 파형이 나오게 하기 위해 각 층마다 부분적으로 자석을 매입하였다.

3. 인덕턴스 계산

본 논문에서는 인덕턴스 계산을 위해서 3가지 쇄교자속 계산법을 제안하였다. 그 첫 번째로 공극에서의 d, q축에 해당하는 코일을 생각하여, 그 코일에 쇄교하는 자속을 구하는 가상 코일 법이고, 두 번째는 공극에서의 a, b, c상에 해당하는 코일을 생각하여, 그 코일에 쇄교하는 자속을 구하는 공극 쇄교자속 법이고, 마지막으로 a, b, c상에 해당하는 슬롯에서 쇄교하는 자속을 구하는 슬롯 쇄교자속 법을 제안하였다.

또한 포화 영역에서의 비선형성을 고려하기 위해서 고

정 투자를 법을 적용하였다. 고정 투자율법이란 시스템이 자기적으로 포화 상태에 있을 때 각 요소별 동작지점의 투자율을 고정하여 선형적으로 시스템을 재해석하는 방법으로, 두 가지 이상의 자계원에 의해 포화가 발생할 경우, 각각의 영향을 구분 지어 포화 시 철심내의 자계 비선형 문제를 해석할 수 있다.

3.1 가상 코일 법

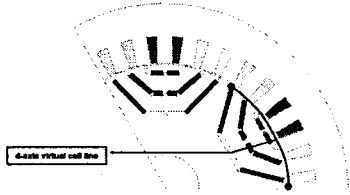


그림 2. 가상 코일 법을 위한 d축 공극 선

가상 코일 법이란 공극에 쇄교하는 자속을 구하기 위해서 그림 2.에서와 같이 공극에서의 가상의 d, q축 코일을 생각하여 그 코일에 쇄교하는 자속을 구하는 방법이다. 가상 코일 법으로부터 d, q축 쇄교자속을 구할 수 있고, 이로부터 d, q축 인덕턴스를 구할 수 있다. 그 수식은 다음과 같다.

$$L_{ds}(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{\lambda_d(i_{ds}, i_{qs})}{i_{ds}} \quad (1) \quad L_{qs}(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{\lambda_q(i_{ds}, i_{qs})}{i_{qs}} \quad (2)$$

여기서 L_{ds}, L_{qs} 는 d, q축 인덕턴스이고 λ_d, λ_q 는 가상 코일 법으로 구한 d, q축 쇄교자속이고 i_{ds}, i_{qs} 는 d, q축 전류이다.

가상 코일 법은 직접적으로 공극을 지나는 자속만을 측정할 수 있는 방법이기 때문에, 공극을 지나가는 자속, 즉 누설이 고려되지 않는 토크에 직접 기여하는 성분만이 계산된다는 특징이 있다. 그 해석 결과는 그림 3.에 나타내었다.

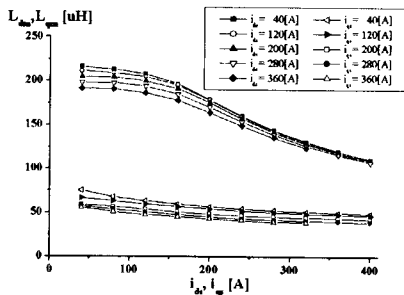


그림 3. 가상 코일 법을 이용한 d, q축 인덕턴스

3.2 공극 쇄교자속 법

공극 쇄교자속 법은 각 상의 상당 쇄교자속을 구하기 위해서 그림 4.와 같이 각 상에 해당하는 가상의 코일을 생각하고 그 코일에 쇄교하는 각 상당 쇄교자속을 구하는 방법이다. 여기서 구한 상당 쇄교자속으로부터 d, q 좌표 변환 이론 (d-q frame theory)을 통하여 d, q축 쇄교자속을 구하게 되고 이로부터 d, q축 인덕턴스를 구할 수 있다. 그 수식은 다음과 같다.

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

$$\lambda_q = \frac{2}{3} [-\sin\theta\lambda_a - \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi)\lambda_b - \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi)\lambda_c] \quad (4)$$

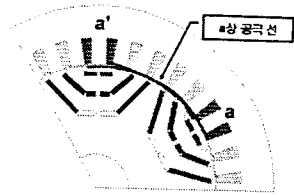


그림 4. 공극 쇄교자속 법을 위한 a상 공극 선

$$L_{ds}(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{\lambda_d(i_{ds}, i_{qs})}{i_{ds}} \quad (5) \quad L_{qs}(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{\lambda_q(i_{ds}, i_{qs})}{i_{qs}} \quad (6)$$

여기서 $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ 는 공극 쇄교자속 법으로 구한 a, b, c상 쇄교자속이고, λ_d, λ_q 는 공극 쇄교자속 법으로 구한 d, q축 쇄교자속이고, L_{ds}, L_{qs} 는 d, q축 인덕턴스이고 i_{ds}, i_{qs} 는 d, q축 전류이다.

앞선 가상 코일 법의 경우, d, q축 쇄교자속을 구하는 데 있어서 평형 3상 (balanced 3 phase)을 가정하고 자속을 구하였다. 하지만 매입형 영구자석 전동기의 경우 국소 포화 현상이 매우 심하고, 이부분에서는 철심의 포화 특성, 다시 말해서 비선형 특성이 존재하기 때문에, 3상평형이 성립하지 않게 되고, 따라서 직접 각 상당 쇄교자속을 통해서 d, q축 쇄교자속을 구하는 공극 쇄교자속 법을 제안하였다. 공극 쇄교자속 법은 각 상에 해당하는 상당 쇄교자속을 가상 코일을 이용해서 구하는 방법이기 때문에, 가상 코일법과 마찬가지로, 누설성분이 포함되지 않는다는 특징을 가진다. 그리고 뒤에서 나올 슬롯 쇄교자속 법과의 직접적인 연산으로 누설 인덕턴스를 구할 수 있다. 그리고 그 해석 결과는 그림 5.에 나타내었다.

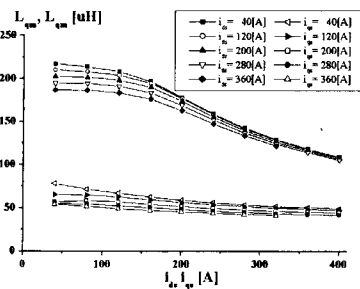


그림 5. 공극 쇄교자속 법을 이용한 d, q축 인덕턴스

3.3 슬롯 쇄교자속 법

슬롯 쇄교자속 법은 각 상의 상당 쇄교자속을 구하기 위해서 a, b, c상에 해당하는 슬롯에서 쇄교하는 자속을 구하는 방법이다. 그림 6.에서는 슬롯 쇄교자속 법을 위한 a상 슬롯의 위치를 나타내었다. 앞의 공극 쇄교자속 법과 마찬가지로 a, b, c상당 쇄교자속으로부터 다음과

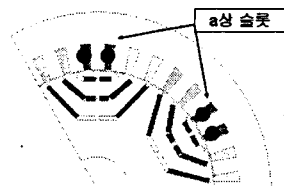


그림 6. 슬롯 쇄교자속 법을 위한 a상 슬롯

같은 d, q 좌표 변환 이론으로부터 d, q축 쇄교자속과 d, q축 인덕턴스를 구할 수 있다.

$$\lambda_d = \frac{2}{3} [\cos\theta\lambda_a + \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi)\lambda_b + \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi)\lambda_c] \quad (7)$$

$$\lambda_q = \frac{2}{3} [-\sin\theta\lambda_a - \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi)\lambda_b - \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi)\lambda_c] \quad (8)$$

$$L_{dq}(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{\lambda_d(i_{ds}, i_{qs})}{i_{ds}} \quad (9) \quad L_{dq}(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{\lambda_q(i_{ds}, i_{qs})}{i_{qs}} \quad (10)$$

여기서 $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ 는 슬롯 쇄교자속 법으로 구한 a, b, c상 쇄교자속이고, λ_d, λ_q 는 슬롯 쇄교자속 법으로 구한 d, q축 쇄교자속, L_{dq}, L_{qs} 는 d, q축 인덕턴스, i_{ds}, i_{qs} 는 d, q축 전류이다.

슬롯 쇄교자속 법은 각 상에 해당하는 슬롯부에서 그 슬롯에 쇄교하는 자속을 구하는 방법이다. 다시 말해서 슬롯 쇄교자속 법은 슬롯에 쇄교하는 자속을 계산하는 방법이기 때문에, 슬롯은 통과하지만 공극을 통과하지 않는 자속, 즉 누설 자속이 쇄교자속 계산 값에 포함될 수 있다는 점에서 앞의 두 방법과는 다르다. 그 해석 결과는 그림 7에 나타내었다.

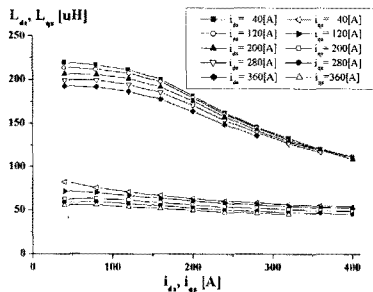


그림 7. 슬롯 쇄교자속 법을 이용한 d, q축 인덕턴스

3.4 비교 분석

가상 코일 법 (그림 3.)과 공극 쇄교자속 법 (그림 5.)을 비교해볼 때 그 값에 있어서 약간의 차이를 보인다. 그 차이는 3상 불평형 (unbalanced 3 phase)에 의한 차이라고 볼 수 있다. 실제로 d축의 방향은 a, b, c상의 전류에 의한 합성자계의 방향이 되고, q축은 d축에 대해서 자기적으로 90° 위상차를 가지는 벡터라고 정의할 수 있다. 하지만 가상 코일 법의 경우 3상 평형을 가정하고 d축을 정의하고 있으므로, 포화 현상 때문에 어느 정도의 3상 불평형이 생기는 경우, 그 값은 정확하지 않을 수 있다. 따라서 각 상당 쇄교자속을 통해서 전체 d, q축 쇄교자속과 d, q축 인덕턴스를 구한 공극 쇄교자속 법의 경우 3상 불평형을 고려하고 있다고 볼 수 있다.

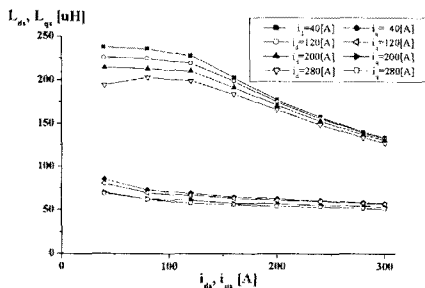


그림 8. 실험에 의한 d, q축 인덕턴스

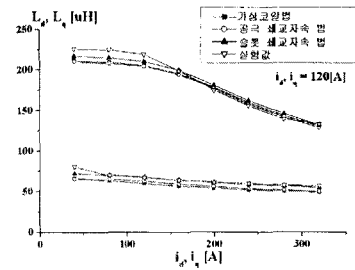


그림 9. $i_d, i_q=120[A]$ 일때 d, q축 인덕턴스 값

또한 같은 상당 쇄교자속을 기반으로 한 공극 쇄교자속 법과 슬롯 쇄교자속 법의 경우, 공극 쇄교자속 법으로 구한 d, q축 인덕턴스는 누설 성분을 포함하고 있지 않는데 반해서, 슬롯 쇄교자속 법으로 구한 d, q축 인덕턴스는 누설성분을 포함하고 있다. 따라서 슬롯 쇄교자속 법으로 구한 인덕턴스 값과 공극 쇄교자속 법으로 구한 인덕턴스 값의 차이를 누설 성분이라고 생각할 수 있다. 따라서 슬롯 쇄교자속 법으로 구한 인덕턴스는 자화 인덕턴스 (Magnetizing inductance), 공극 쇄교자속 법으로 구한 인덕턴스는 동기 인덕턴스 (Synchronous inductance), 그 차이는 누설 인덕턴스 (Leakage inductance)라고 규정할 수 있다.

$$L_{dqm} - L_{dqs} = L_{dql} \quad (11)$$

여기서 L_{dqm} 은 d, q축 자화 인덕턴스이고 L_{dqs} 은 d, q축 동기 인덕턴스이고 L_{dql} 은 d, q축 누설 인덕턴스이다.

그리고 실험값은 그림 8에 제시되어 있고, 그림 9에는 본 논문에 제시된 3가지 방법에 의한 인덕턴스 값과 실험값을 $i_d, i_q=120[A]$ 일때를 기준으로 해서 보여주고 있다. 그림 9에서 보듯이, 슬롯 쇄교자속 법으로 구한 인덕턴스가 실험값과의 오차가 가장 적음을 알 수 있다. 실제로 실험값은 일정한 속도, 일정한 전류를 인가한 상태에서 전압이 측정되어지고, 전압 방정식에 의해서 d, q축 인덕턴스가 계산되어진다. 따라서 외부에서 측정한다 전압에 의해서 인덕턴스가 추출되므로, 누설을 포함한다고 볼 수 있고, 따라서 누설을 포함하고 있는 슬롯 쇄교자속 법으로 구한 인덕턴스가 실험값과 가장 일치한다고 볼 수 있다. 또한 누설을 포함하지 않는 두 방법보다 누설을 포함하는 슬롯 쇄교자속 법과 실험값이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 다층 매입형 영구자석 전동기의 특성 파라미터중 하나인 d, q축 인덕턴스를 구하는 3가지 방법과 그 해석 결과를 제시하였다. 그 3가지 방법을 비교 분석하여 3상 불평형을 고려하였고, 누설 인덕턴스를 추출할 수 있었다. 또한 해석 결과와 실험값의 비교를 통하여 그 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 서장호, 정상용, 정현교, "고정 투자율법을 적용한 자계 포화특성 해석에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp997-999, 2003년 7월.
- [2] Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, "Practical design criteria of interior permanent magnet synchronous motor for 42V integrated starter-generator", Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International, Vol. 2, pp. 656-662, 2003.