

고정 투자율법을 적용한 매입형 영구 자석 전동기의 특성 해석

이상엽, 곽상엽, 김재광, 정현교
 서울대학교 전기역학 연구실

Characteristic Analysis of Interior Permanent Magnet Motor using Fixed Permeability Method.

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

Abstract - 고정 투자율법이란 (Fixed Permeability Method : FPM) 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 구분지어 포화시 철심내의 자계 비선형 문제를 해석할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 고정 투자율법을 적용하여 자기 포화가 발생하는 영역까지를 운전 영역에 포함하는 매입형 영구 자석 전동기의 특성 값들을 추출하는 방법을 제시하였으며, 실험값과의 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다.

과, 열적 안정성을 동시에 가지는 것도 그 특징이다. 그림 1에서 해석 모델의 단면을 나타내었다. 돌극성을 최대한 높이기 위해서 아래와 같은 자석 배치를 가지고, 정현적인 역기전력 파형을 얻기 위해서 부분적으로 자석을 매입하였다.

1. 서 론

최근 높은 효율(High efficiency)과 광범위한 속도 영역에서의 정출력 영역을 얻기 위해서 회전자의 d,q축 인덕턴스 차이, 즉 돌극성(salience)을 동시에 가지는 매입형 영구자석 전동기의 응용 분야가 확대되고 있다. 일반적으로 매입형 영구 자석 전동기는 돌극성으로 인한 추가적인 리럭턴스 토크(Reluctance torque)를 가지기 때문에, 높은 기동 토크를 가질 수 있다. 그리고 정격속도 이상에서 공극 자속의 크기를 줄이는 약계자 제어(field weakening operation)를 행하여 광범위한 정출력 영역을 얻을 수 있다. 이런 매입형 영구 자석 전동기의 특징을 최대화하기 위해서는 포화 영역에서의 동작이 불가피한데, 이를 위해서는 기기 설계 시 d, q축 인덕턴스 값의 정확한 예측이 필요하다[1].

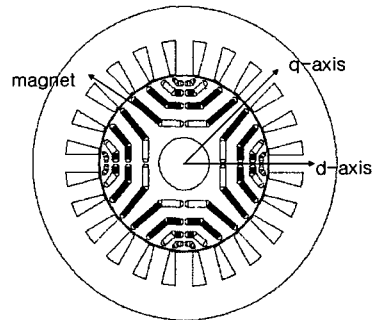


그림 1. 해석 모델의 단면

본 논문에서는 매입형 영구 자석 전동기의 d,q축 인덕턴스 계산의 새로운 해석 방법을 소개한다. 일반적으로 q축 인덕턴스는 q축 전류의 증가에 따른 철심의 자기 포화로 인해 점차 그 크기가 감소하는 경향을 보인다. 또한 d축 전류의 증가에 따라 철심이 포화되면서 q축 자속의 통로도 포화되어 발생하는 상호 포화(cross-saturation)현상으로 인해 그 값이 감소하게 되며, 이는 d축 인덕턴스에서도 나타난다. 그리고 포화가 더 극심할 경우에 d축 전류의 증가에 따라 d축 자속이 q축에 쇄교하게 되는 동적 상호 자화(dynamic cross magnetization)현상까지 발생하게 되고 이는 q축에서도 나타난다. 정확한 d,q축 인덕턴스 값의 예측을 위해서는 위에서 언급한 현상들에 대한 고려가 필수적이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 정확한 d,q축 인덕턴스 계산을 위해서 상호포화 현상뿐만 아니라 동적 상호 자화 현상에 기인한 d,q축 상호 인덕턴스를 고려해야함을 보이고 있다.

2.2 해석방법

앞에서 언급했듯이 전기기기 시스템이 자기포화영역에서 동작하는 경우, 각 자계원으로부터의 영향을 구분지어 해석할 필요가 있다. 그림 2에서 고정투자율법을 적용하는 과정을 나타내었다. 전류와 영구 자석을 동시에 인가하여 비선형 해석을 한 후, 각 요소별 투자율을 고정시킨 후, 자석과 고정자 전류에 의한 영향을 분리해서 해석하는 과정이 필요하다. 여기서 영구 자석을 개별 여자 시켰을 경우의 자속($\lambda_{md}^*, \lambda_{mq}^*$)과 전류만 개별 여자 시켰을 경우의 자속($\lambda_{d0}^*, \lambda_{q0}^*$)을 구할 수 있다. 그러나 이것만으로는 포화영역에서 d축 자속이 q축에 쇄교하게 되는 동적 상호 자화 현상을 고려할 수는 없다. 본 논문에서 제안하는 방법은 고정투자율법을 한 번 더 적용하여 고정자 전류를 d축 전류와 q축 전류로 분리시키는 것이다. 따라서 d축 전류만을 여자 시킬 경우에 q축에 쇄교하게 되는 상호인덕턴스(L_{dq}^{**})를 구할 수 있고, q축 전류만을 여자 시킬 경우에 d축에 쇄교하게 되는 상호인덕턴스(L_{dq}^{**})를 구할 수 있다.

2. 해석 모델 및 해석 방법

2.1 해석 모델

본 논문에 소개되는 해석 모델은 다층 매입형 영구 자석 전동기로서, 높은 기동토크와 광범위한 정출력 영역을 가지는 것이 그 특징이다. 영구 자석을 회전자 철심 내부에 매입함에 따라 고속 운전시의 기계적인 안정성

2.2.1 기존의 수치 해석 방법

기존의 수치 해석 방법은 영구 자석으로부터 유도된 자속의 효과를 선형적으로 고려한다. 다시 말해서 전류와 영구 자석에 의해 이중 여자 된 상태와 영구 자석에 의해 단일 여자 된 상태를 비선형 해석하는 것이다. 이후 인덕턴스 계산을 위해서 비선형 해석을 통한 전체 자속에서 영구 자석으로부터 유도된 자속을 빼주는 방식이다. 영구 자석으로부터 유도된 자속의 효과를 선형적으로 고려했다는 것은 다시 말해서 전동기의 포화효과를 고려하지 않은 것으로서 자기 포화가 없을 때에는 잘 적

용될 수 있지만, 본 논문에서 다루는 매입형 영구 자석 전동기의 경우는 포화 영역에서 동작하므로 기존의 수치 해석 방법이 전동기의 정확한 인덕턴스 값을 계산하지 못한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$L_d(i_d^r, i_q^r) = \frac{\lambda_d(i_d^r, i_q^r) - \lambda_{md}}{i_d^r} \quad (1)$$

$$L_q(i_d^r, i_q^r) = \frac{\lambda_q(i_d^r, i_q^r) - \lambda_{mq}}{i_q^r} \quad (2)$$

λ_d, λ_q : 전류와 영구자석에 의해서 이중 여자 되었을 때의 각 축 쇄교자속

$\lambda_{md}, \lambda_{mq}$: 전류를 인가하지 않고, 자석에 의해서 단일 여자 되었을 때의 각 축 쇄교자속

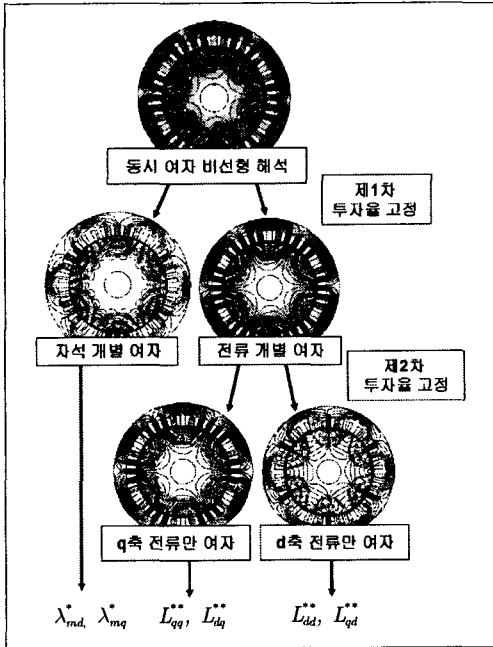


그림 2. 해석 방법의 흐름도

2.2.2 고정 투자율법을 적용한 해석

실제 단계에서 영구 자석 기기의 성능을 정확하게 예측하기 위해서는 영구 자석에 의한 쇄교자속(λ_m)과 d,q 축 인덕턴스(L_d, L_q)의 정확한 계산이 필요하다. 영구 자석 기기는 고정자 전류와 영구 자석에 의해 이중 여자 되고, 동작점에서의 정확한 파라미터(λ_m, L_d, L_q) 값을 얻기 위해서는 전체 쇄교자속을 영구자석에 의한 부분과 고정자 전류에 의한 부분으로 나누어서 고려하는 것이 필수적이라고 할 수 있다.

고정투자율법이란 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 구분지어 포화 시 철심내의 자계 비선형 문제를 해석할 수 있다[2].

먼저 영구 자석과 고정자 전류를 동시에 여자 시킨 후 비선형 해석을 수행하여서 각 요소별 상대투자율 값을 구한다. 그 다음 요소별 투자율 값을 고정시킨 상태에서 고정자 전류만을 여자 시켜서 선형 해석을 하여, 각 축 쇄교자속(λ_d^*, λ_q^*)을 구한 후 각 축 인덕턴스 값을 구할 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다[3].

$$L_d^*(i_d^r, i_q^r) = \frac{\lambda_d^*(i_d^r, i_q^r)}{i_d^r} \quad (3)$$

$$L_q^*(i_d^r, i_q^r) = \frac{\lambda_q^*(i_d^r, i_q^r)}{i_q^r} \quad (4)$$

λ_d^*, λ_q^* : 고정투자율법으로 구한 각 축 쇄교자속

2.2.3 새롭게 제안된 고정투자율법을 적용한 해석

고정투자율법이 기존의 수치해석방법으로는 고려하지 못한 포화영역에서 동작점을 가지는 경우에 대해서 그 포화 영역에서의 자계 분포를 고정자 전류에 의한 여자 와 자석에 의한 여자로 분리시켜서 예측할 수 있다. 하지만 실제로 전동기가 포화 영역에서 동작할 경우 d축 자로(magnetic flux path)가 포화가 되어서 d축 자속이 q축에까지 영향을 미쳐서 q축에 쇄교하게 되는 동적 상호 자화 효과가 존재하게 되고 이는 d축에서도 나타난다. 따라서 이를 고려하기 위해서는 우선 고정자 전류만 인가한 상태를 선형 해석 한 후, 이 때 다시 한번 투자율을 고정시키고, 각 축 전류를 개별적으로 인가한 상태에서 자속 분포를 구하게 되면, 실제로 d축 전류에 의한 자속이 q축으로 쇄교하게 되고 q축 전류에 의한 자속이 d축으로 쇄교하는 현상을 고려할 수 있게 된다. 여기서 d축 전류에 의한 q축의 상호 인덕턴스(L_{dq}^{**})와 q축 전류에 의한 d축의 상호인덕턴스(L_{dq}^{**})를 다음과 같은 수식을 통해 구할 수 있다.

$$L_{dd}^{**}(i_d^r, i_q^r) = \frac{\lambda_{dd}^{**}(i_d^r, i_q^r)}{i_d^r} \quad (5)$$

$$L_{qd}^{**}(i_d^r, i_q^r) = \frac{\lambda_{qd}^{**}(i_d^r, i_q^r)}{i_q^r} \quad (6)$$

$$L_{qq}^{**}(i_d^r, i_q^r) = \frac{\lambda_{qq}^{**}(i_d^r, i_q^r)}{i_q^r} \quad (7)$$

$$L_{dq}^{**}(i_d^r, i_q^r) = \frac{\lambda_{dq}^{**}(i_d^r, i_q^r)}{i_d^r} \quad (8)$$

여기서, $\lambda_{dd}^{**}, \lambda_{dq}^{**}$ 는 d축 전류만 흘려주었을 때의 쇄교자속을 고정투자율법을 한 번 더 적용해서 자기분 (self-flux linkage term)과 상호분(mutual-flux linkage term)으로 나눈 것이고, $\lambda_{qq}^{**}, \lambda_{qd}^{**}$ 는 q축 전류만 흘려주었을 때의 쇄교자속을 고정투자율법을 한 번 더 적용해서 자기분과 상호분으로 나눈 것이다.

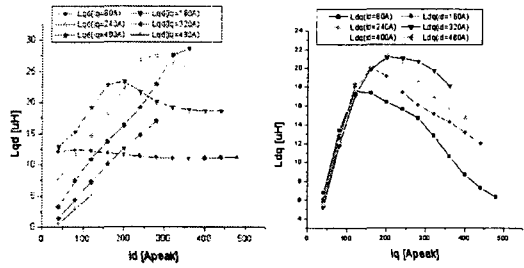
3. 해석 결과 및 분석

그림 3은 기존의 수치 해석방법으로부터 계산된 d,q 축 인덕턴스를 나타내고 있고, 그림 4는 고정투자율법으로 계산된 d,q축 인덕턴스 값을 나타내고 있다. 먼저 그림 3에서 전류 값이 증가함에 따라 인덕턴스 값이 작아지는 현상을 확인할 수 있으며 이는 기존의 수치 해석 방법이 철심의 포화 특성을 고려하고 있음을 알 수 있다. 그러나 d축 전류의 증가에 따라 q축 자속 경로도 포화가 되는 상호 포화 현상을 고려한 그림 4의 경우 전류에 따른 변화폭이 더 커짐을 알 수 있다. 그리고 동작점에서 자석에 의한 d축 쇄교자속은 고정자 전류에 의한 쇄교자속의 반대 방향이고, 자석에 의한 포화정도보다 이중 여자 되었을 때의 포화정도가 더 크기 때문에 $L_d^* > L_d$ 가 성립하게 되고 이는 위 그림 3,4에서 잘 나타난다. 그러나 q축 인덕턴스의 경우는 영구 자석의 q축 쇄교자속에 대한 영향은 상대적으로 더 적기 때문에 L_q^* 와 L_q 사이에는 거의 차이가 없다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 고정투자율법을 한 번 더 적용해서 각 축 전류의 개별 여자를 통해서 계산된 각 축의 자기 인덕턴스를 나타낸 것이다. 위의 고정투자율법을 한 번만 적용한 경우와 비교해볼 때, 같은 고정투자율법을 적용한 경우이기 때문에 그 값에서 정량적인 차이는 많이 나지 않는다. 그러나 중요한 것은 동적 상호 포화 현상이 일어난다는 것이고, 이상적인 경우 상호 인덕턴스가 전혀 없어야 하지만, 실제로 d,q축 사이에는 각 축에 의한 상호 인덕턴스(L_{qd}^{**}, L_{dq}^{**})가 나타나게 된다. L_{dq}^{**} 의 경우, d축 전류가 증가할 경우 실제적인 L_{dq}^{**} 의 증가는 없다고 볼 수 있지만, 자속 통로를 미리 포화시켜놓는 역할을 하게 되고, 이로 인해 q축 전류의 증가로 인한 자기 포화 정도가 증가할 경우, 상호 인덕턴스 값을 증가시켜주는 역할을 하게 된다. 이를 그림 6(b)에서 확인할 수 있다. 그리고 고정투자율 법을 두 번 적용한 그림 5에서의 인덕턴스(L_{dd}^{**}, L_{qq}^{**})값이 고정투자율 법을 한번 적용한 그림 4에서의 인덕턴스(L_d^*, L_q^*)값보다 반대 축 전류에 대한 변화 폭이 더 작음을 알 수 있다. 두 값의 차이가 동적 상호 포화 현상에 의한 상호 인덕턴스(L_{qd}^{**}, L_{dq}^{**})라고 볼 수 있고, 본 논문에서는 이를 자기분과 상호분으로 나누어서 설명하고 있다. 일반적인 경우 상호 인덕턴스는 서로 같아야 하나 본 논문에서 제시한 모델의 경우, d,q축의 포화정도가 서로 다르기 때문에 L_{dq}^{**} 와 L_{qd}^{**} 의

값이 서로 같지 않다. 또한, 그림 5,6에서 볼 수 있듯이, 상호 인덕턴스의 크기는 각 축 자기 인덕턴스 크기의 1/5-1/15 정도이며, 무시할 수 없는 수준이라고 볼 수 있다.

요소별 투자율을 고정 시킨 후 영구 자석만 개별 여자시켰을 경우에 나타나는 각 축 쇠교자속($\lambda_{md}^*, \lambda_{mq}^*$)은 그림 7에 나타내었다. λ_{md}^* 의 경우 d축 전류가 증가할 경우 그 값은 커지게 되고, q축 전류가 증가할 경우 그 값이 줄어드는 현상을 볼 수 있고, λ_{mq}^* 에서도 같은 현상을 확인할 수 있다. 이는 상호 포화(Cross-saturation)현상이 고정자 전류에 의해서만 일어나는 것이 아니라 영구 자석에 대해서도 일어난다는 것을 나타내고 있다.



(a) L_{qd}^{**} (b) L_{dq}^{**}
 그림 6. 이중 고정투자율 법으로 계산된 d,q축 간의 상호 인덕턴스

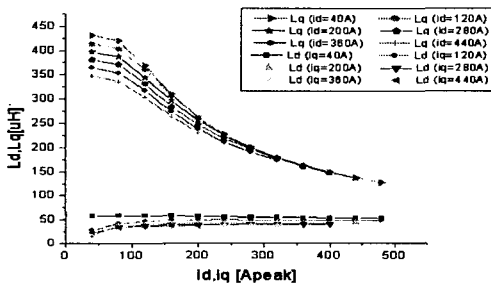


그림 3. 기존의 수치해석 방법으로 계산된 d,q축 인덕턴스

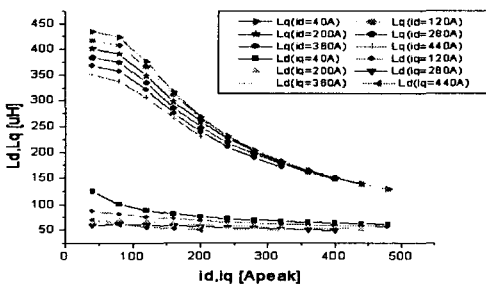


그림 4. 고정투자율 법으로 계산된 d,q축 인덕턴스

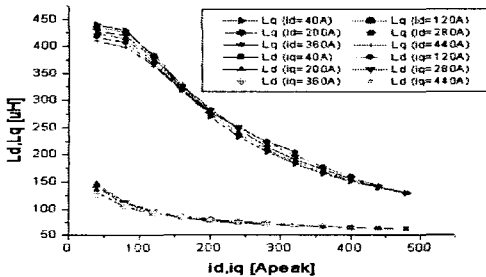
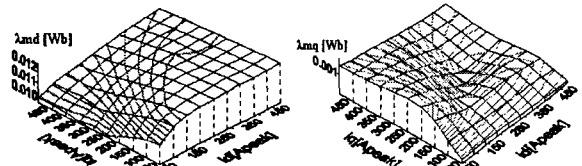


그림 5. 이중 고정투자율 법으로 계산된 d,q축 인덕턴스



(a) λ_{md}^* (b) λ_{mq}^*
 그림 7. 자석을 개별 여자시켰을 때의 자속($\lambda_{md}^*, \lambda_{mq}^*$)

4. 결 론

본 논문에서는 영구 자석 기기, 특히 매입형 영구 자석 전동기에서 발생하는 d,q축 간의 상호 포화 현상을 고려한 d,q축 인덕턴스의 값을 구하는 방법을 제시하였고 동적 상호 자화(dynamic cross magnetization)에 기인한 d,q축 상호 인덕턴스 값을 수치 해석적 방법으로 구하는 방법과 그 해석 결과들을 나타내었다. 즉, 자기 포화 영역에서의 정확한 파라미터 값들을 도출하기 위해서는 각각의 d,q축 전류 조합별 영구자석에 기인한 쇠교자속과 동적 상호 자화 현상에 기인한 상호 인덕턴스를 고려해야하며 이를 실제 기기 제어측면에서 어떤 방법으로 고려해야 할지는 앞으로 연구해야 할 과제이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 광상엽, 김재광, 정형교, "IPM의 자계 Cross Coupling 특성에 관한 연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp991-993, 2003년 7월.
- [2] 서장호, 정상용, 정형교, "고정 투자율법을 적용한 자계 포화특성 해석에 관한 연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp997-999, 2003년 7월.
- [3] 서장호, 광상엽, 김재광, 정형교, "매입형 영구 자석 기기의 출력 특성에 관한 연구," 대한 전기학회 춘계학술대회 논문집, pp55 pp57, 2004년 4월.