

# 교차 결합 현상을 고려한 매입형 영구자석 전동기의 인덕턴스 특성 해석

論 文
55B-4-1

## Inductance Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Cross-Coupling Effect

李相燁<sup>\*</sup> · 郭尙燁<sup>\*</sup> · 金在光<sup>\*\*</sup> · 鄭炫敎<sup>\*\*\*</sup>  
(Sang-Yub Lee · Sang-Yeop Kwak · Jae-Kwang Kim · Hyun-Kyo Jung)

**Abstract** - In this paper, the inductance characteristics of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) considering cross-coupling effect is analyzed. It is known that the IPMSM has its operating point at the saturated region. So the cross-coupling effect exists, therefore cross-coupling inductance exists. With the application of Fixed Permeability Method (FPM), we can obtain more exact inductance characteristics of IPMSM. In this paper, a novel method based on the FPM is proposed, which can consider the cross-coupling effect. And the cross-coupling inductance which is the analysis result is shown. Finally, the validity of proposed method is verified by the comparison with the experimental result.

**Key Words** : Cross-Coupling Effect, d- and q-axis Inductance, Fixed Permeability Method, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

### 1. 서 론

일반적으로 돌극성이 있는 전동기의 경우, 계산의 편리성 때문에 고정자 기준 좌표계보다는 회전자 기준 좌표계를 이용하여 해석하는 기법이 많이 사용되고 있다. 회전자 기준 좌표계의 경우 통상적으로 a, b, c 상을 d, q축으로 변환시켜서 전동기 특성을 분석하는 d, q축 좌표 이론 (dq reference frame theory) 이 널리 사용되고 있다. 여기서 d, q축은 서로 자기적으로 90°의 위상차를 가지게 되고, 따라서 d, q축은 자기적으로 서로 독립이라고 가정할 수 있게 된다. 하지만 매입형 영구자석 전동기의 경우 심한 포화 영역에서의 동작이 불가피하고, 이로 인해 일반적으로 가정하는 d, q축 간의 자기적 독립성이 지켜지지 않게 된다.

매입형 영구자석 전동기의 경우, 포화 영역에서의 동작이 불가피하고, 일반적으로 q축 인덕턴스는 q축 전류의 증가에 따른 철심의 자기 포화로 인해 점차 그 크기가 감소하는 경향을 보인다. 이는 d축 전류의 증가에 따라 철심이 포화되면서 q축 자속의 통로도 포화되어 발생하는 교차 결합 (cross-coupling) 현상으로 인해 그 값이 감소하게 되며, 이는 d축 인덕턴스에서도 나타나게 된다. 정확한 d, q축 인덕턴스 값의 예측을 위해서는 위에서 언급한 현상들에 대한 고려가 필수적이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 정확한 d, q축 인덕

턴스 계산을 위해서 교차 결합 현상뿐만 아니라 동적 상호작용 현상에 기인한 d, q축 상호 인덕턴스를 고려해야 함을 보이고 있다.

### 2. 해석모델

본 논문에 소개된 해석 모델은 42V ISG (Integrated Starter/Generator) 시스템에 적용될 다층 매입형 영구자석 전동기 (multi-layer interior permanent magnet synchronous motor)이다. ISG 시스템의 특성상 시스템에 사용되는 전동기는 낮은 전압 제한 조건 (42V)에서 높은 기동 토크, 넓은 정 출력 영역을 만족시켜야만 한다. 다층 매입형 영구자석 전동기는 영구자석 전동기와 동기 형 릴럭턴스 전동기의 장점을 모두 가지고 있다. 영구자석 전동기 (permanent magnet motor)는 높은 파워밀도와 높은 효율을 그 특징으로 하고 동기 형 릴럭턴스 전동기 (synchronous reluctance motor)는 추

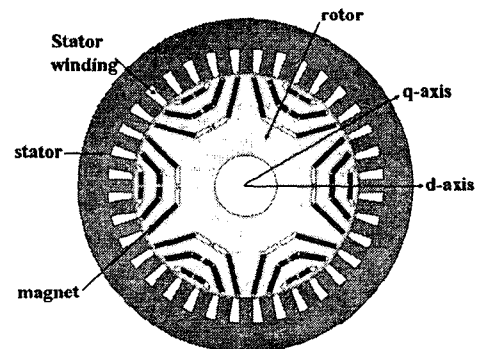


그림 1 해석 모델의 단면  
Fig. 1 Cross-sectional view of the analysis model

† 교신저자, 正會員 : 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 박사과정  
E-mail : 1stonion@elecmech.snu.ac.kr  
\* 正會員 : 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 박사과정  
\*\* 正會員 : 현대 자동차 선행개발센터 선임 연구원  
\*\*\* 正會員 : 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 정교수  
接受日字 : 2006年 1月 5日  
最終完了 : 2006年 3月 6日

표 1 해석 모델의 주요 설계 값

Table 1 Basic specifications of the analysis model

변수 명	변수 값
극수	6
회전자 내경	30[mm]
회전자 외경	110[mm]
고정자 내경	111[mm]
고정자 외경	164[mm]
공극	0.5[mm]
축 방향 길이	67[mm]
슬롯 수	36
영구자석 재질	bonded NdFeB ( $B_r=5500[G]$ )
역기전력 상수	0.0109[V <sub>peak</sub> /rad/sec]
상당 권선 저항	9.6[mΩ]

가적인 자기저항 토크를 그 특징으로 한다.

다층 매입형 영구자석 전동기는 기본적으로 영구자석 전동기의 장점들을 가지고 있고, 자석을 다층으로 매입하여 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스의 비율인 돌극비 (saliency ratio)를 최대로 하였기 때문에 동기 형 릴럭턴스 전동기의 장점 역시 가지고 있다. 또한 자석을 회전자 내부에 삽입하였기에 기계적 안정성이 보장되어 고속 운전에 적합하고, 고정자 권선에서 발생하는 열이 자석에 직접적으로 영향을 미치지 않으므로 열적 안정성 또한 보장된다. 또한 약계자 제어 (field weakening operation)가 가능하여 광범위한 정출력 영역에서의 운전이 가능하다. 본 해석 모델의 출력은 정격 출력 4[kW], 최대 출력 6[kW]이고 1620-16200[rpm]의 속도 범위를 가진다.

표 1.에서는 해석 모델의 주요 설계 사항을 나타내었고, 그림 1.에서는 해석모델의 단면도가 나타나있다. 그림 1.에서 보듯이, 돌극성을 최대로 키우기 위해서 자석을 3층으로 매입하였고, 정현적인 (sinusoidal) 역기전력 파형을 위해서 각 층마다 자석을 부분적으로 삽입하였다.

### 3. 교차 결합 현상을 고려한 인덕턴스 추출

#### 3.1 고정 투자율 법

일반적으로 영구자석 기기의 경우, 영구자석과 전류에 의해 이중여자 된 상태에서 동작하게 된다. 이와 같은 이중 여자 상태에서의 정확한 전동기 파라미터를 추출하기 위해서는 전체 쇄교자속을 영구자석에 의한 부분과 고정자 전류에 의한 부분으로 나누는 것이 중요하다. 이러한 중요성 때문에, 본 논문에서는 정확한 인덕턴스 값을 구하기 위해서 고정 투자율 법을 사용하였다. 그림 2.은 고정 투자율 법의 설명을 위한 철심의 B-H 곡선 도를 나타내고 있다.

기존의 방법의 경우, 영구 자석으로부터 유도된 자속이 포화 정도에 관계없이 일정하다고 가정한 상태에서 해석을 수행한다. 다시 말해서 고정자 전류와 영구 자석에 의해 이중 여자된 상태를 비선형 해석하고, 영구 자석에 의한 단일여자 상태를 비선형 해석한 후, 두 결과의 차이를 전류에 의한 인덕턴스 분이라고 생각하는 것이 기존의 방법이다. 기존의 방법을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

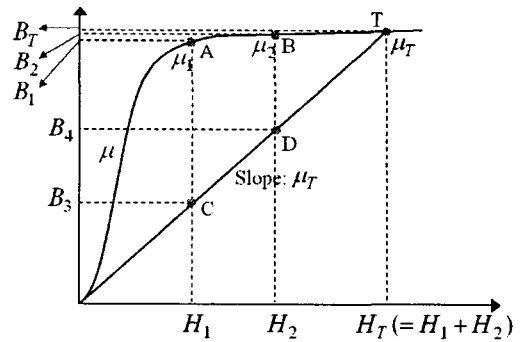


그림 2 고정 투자율 법을 위한 B-H 곡선도

Fig. 2 B-H curve for fixed permeability method

$$L_{ds} = \frac{\lambda_{ds}(i_{ds}, i_{qs}) - \lambda_{md}}{i_{ds}} \quad (1)$$

$$L_{qs} = \frac{\lambda_{qs}(i_{ds}, i_{qs}) - \lambda_{mq}}{i_{qs}} \quad (2)$$

$\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{qs}$  : 전류와 영구 자석에 의해 이중 여자되었을 때의 d, q축 쇄교자속

$\lambda_{md}$ ,  $\lambda_{mq}$  : 영구자석에 의해서 단일 여자되었을 때의 d, q축 쇄교자속

따라서 동작점에서의 전체 쇄교자속 (T점)은 영구 자석 개별 여자에 의한 쇄교자속 (A점)과 고정자 전류 개별 여자에 의한 쇄교자속 (B점)으로 나누어지게 된다. 따라서 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$B_T = (\mu_1 H_1 + \mu_2 H_2) \quad (3)$$

전동기가 T점에서 동작하고 있으므로 그 때의 각 요소 별 투자율은  $\mu_T$  이지만, 전동기 파라미터 (d, q축 인덕턴스, 역기전력 상수)들은 투자율이 다른 각각의 개별 여자 상태 ( $\mu_1$ ,  $\mu_2$ )에서 구해지게 된다. 결론적으로 기존의 방법을 이용한다면, 투자율의 변화가 없고 포화 현상이 잘 일어나지 않는 경우는 큰 문제없이 정확한 전동기 파라미터를 구할 수가 있으나, 포화 현상이 심한 매입형 영구자석 전동기의 경우, 정확한 동작점에서의 전동기 파라미터를 구할 수가 없다.

고정 투자율 법이란 시스템이 자기적으로 포화 상태에 있을 때 각 요소 별 동작 지점의 투자율을 고정하여 선형적으로 시스템을 재해석하는 방법으로 두 가지 이상의 자계 원에 의해 포화가 발생 할 경우, 철심내의 자계 비선형 문제를 보다 정확하게 해석할 수 있다.

고정 투자율 법으로 인덕턴스를 구하는 과정을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$L_{ds} = \frac{\lambda_{ds}(i_{ds}, i_{qs})}{i_{ds}} \quad (4)$$

$$L_{qs} = \frac{\lambda_{qs}(i_{ds}, i_{qs})}{i_{qs}} \quad (5)$$

$\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{qs}$  : 고정 투자율 법으로 구한 전류 단일 여자 상태에서의 d, q축 쇄교자속

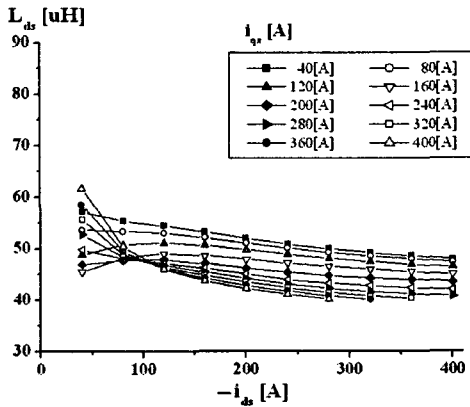


그림 3 기존의 해석 방법으로 해석한 d축 인덕턴스  
Fig. 3 D-axis inductance using conventional method

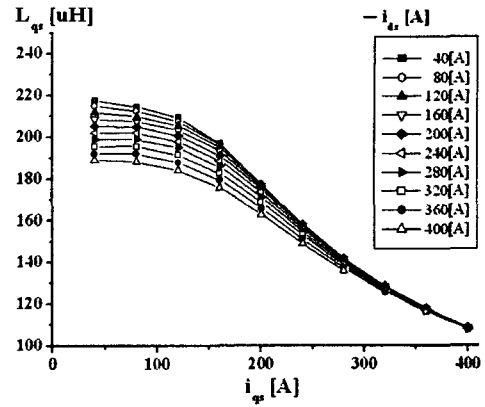


그림 4 기존의 해석 방법으로 해석한 q축 인덕턴스  
Fig. 4 Q-axis inductance using conventional method

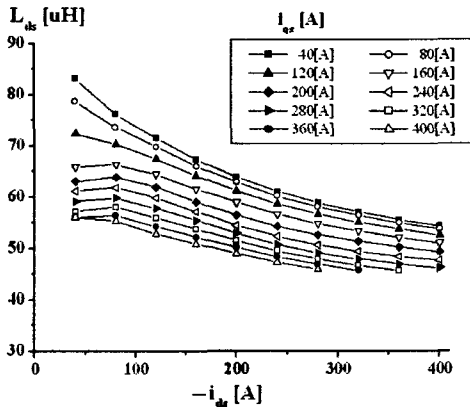


그림 5 고정 투자율 법으로 해석한 d축 인덕턴스  
Fig. 5 D-axis inductance using fixed permeability method

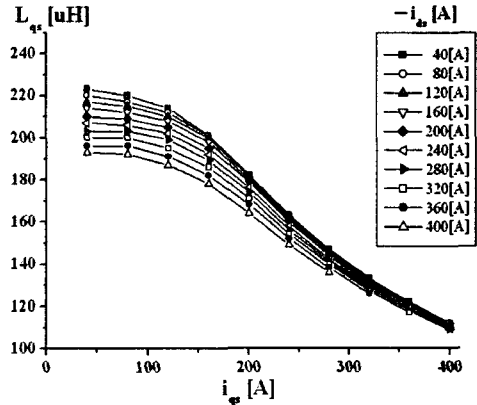


그림 6 고정 투자율 법으로 해석한 q축 인덕턴스  
Fig. 6 Q-axis inductance using fixed permeability method

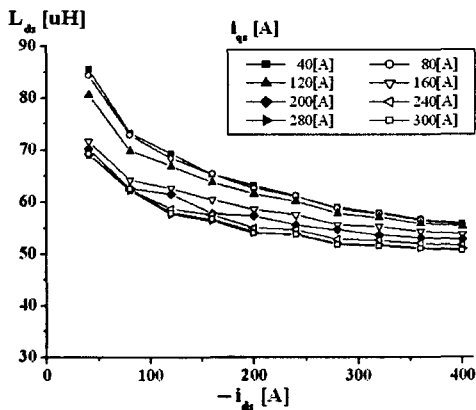


그림 7 d축 인덕턴스 (실험결과)  
Fig. 7 d-axis inductance (experimental result)

고정 투자율 법에서는 전체 쇠교자속 (T점)이 영구 자석 개별 여자에 의한 쇠교자속 (C점)과 고정자 전류에 의한 쇠교자속 (D점)으로 나누어지게 되고, 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$B_T = B_3 + B_4 = \mu_T(H_1 + H_2) \quad (6)$$

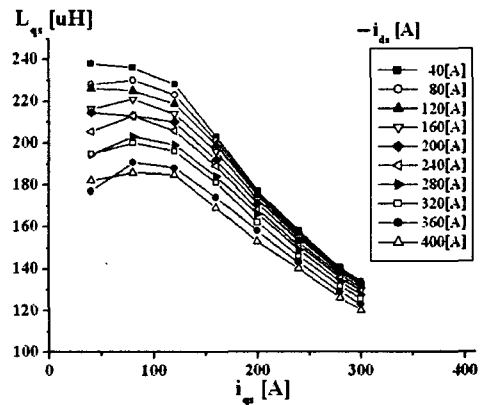


그림 8 q축 인덕턴스 (실험결과)  
Fig. 8 q-axis inductance (experimental result)

따라서 T점에서 동작하는 전동기의 전동기 파라미터가 동작점에서의 포화 정도에 맞는 상태, 즉 투자율  $\mu_T$ 에서 구해지게 되므로, 고정 투자율 법을 이용한다면 동작점의 포화 상태를 고려한 좀 더 정확한 값을 구할 수 있다. 간단히 말해서 고정 투자율 법은 포화 상태를 고려해서 전체 쇠교자속을 각각의 개별 여자원으로부터의 쇠교자속으로 분리해낼 수 있는 기법이라고 할 수 있다.

기존의 방법으로 해석한 d, q축 인덕턴스를 그림 3.와 그림 4.에서 볼 수 있고, 고정 투자율 법을 적용한 d, q축 인덕턴스의 해석 결과는 그림 5.와 그림 6.에 나타나있다. 그리고 실험 결과는 그림 7.과 그림 8.에 나타나있다.

먼저 그림 3.와 그림 4.에서 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 교차 결합 현상을 고려한 그림 5.와 그림 6.의 경우, 전류에 따른 변화폭이 더 커짐을 알 수 있다. 그리고 약계자 제어 (field weakening operation)를 가정한 동작점에서 자석에 의한 d축 쇄교자속은 고정자 전류에 의한 쇄교자속의 반대 방향이고, 자석에 의한 포화 정도보다 이중 여자되었을 때의 포화 정도가 더 작기 때문에  $L_d^* > L_d$  가 성립하게 되고 이는 위 그림 3.와 그림 5.에서 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. 여기서 (\*)는 고정 투자율 법을 적용한 해석을 의미한다.

마찬가지로 고정 투자율 법을 이용해서 영구 자석만 개별 여자 시켜서, d, q축 전류 조합에 따른 영구 자석에 의한 쇄

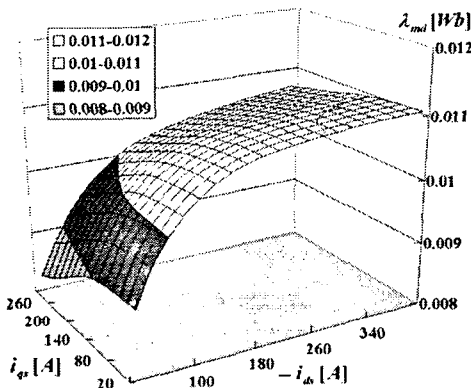


그림 9 영구 자석에 의한 d축 쇄교자속  
Fig. 9 D-axis flux linkage due to permanent magnet

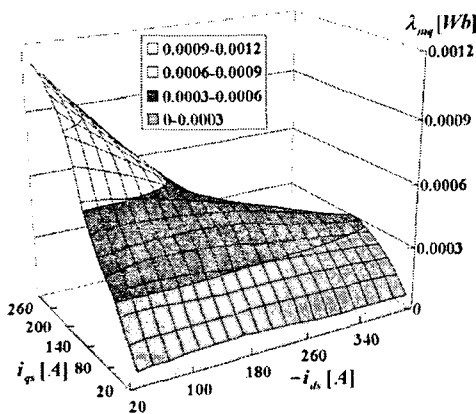


그림 10 영구 자석에 의한 q축 쇄교자속  
Fig. 10 Q-axis flux linkage due to permanent magnet

교자속 (permanent magnet flux linkage) 역시 구할 수 있다. 그 해석 결과는 그림 9.과 그림 10.에 나타내었다.

$\lambda_{md}$ 의 경우, d축 전류가 증가할 경우 그 값은 커지게 되고, q축 전류가 증가할 경우 그 값은 줄어들게 된다.  $\lambda_{mq}$ 에서도 같은 현상을 확인할 수 있는데, 이는 교차 결합 현상에 기인한 것으로, 교차 결합 현상이 고정자 전류에 의한 d, q축 인덕턴스에만 일어나는 것이 아니라 영구 자석에 의한 쇄교자속에도 발생한다는 것을 알 수 있다.

여기서 기존의 방법으로 해석한 d, q축 인덕턴스 결과와 고정 투자율 법으로 해석한 d, q축 인덕턴스 결과를 실험 결과와 비교해보면, 고정 투자율 법으로 해석한 결과가 좀 더 실험결과와 근접함을 알 수 있다. 하지만 고정 투자율 법으로 해석한 결과가 아직까지 실험 결과와 약간의 차이를 보이는 것은 사실이다. 기존의 실험은 전압 방정식의 영구 자석에 의한 쇄교자속을 상수 취급하고 일정 전류와 일정 속도를 인가한 상태에서 얻어지는 단자전압을 측정하게 되고 이를 전압 방정식에 적용하여서 d, q축 인덕턴스를 얻게 되는데, 실제로 위의 해석 결과 (그림 9.와 그림 10.)에서 알 수 있듯이, 영구 자석에 의한 쇄교자속은 d, q축 전류에 의한 변수임을 알 수 있다. 따라서 영구 자석에 의한 쇄교자속을 d, q축 전류에 따른 참조표 (Look-Up Table: LUK) 형식으로 만들어서 실험을 수행한다면 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그리고 해석 모델의 축 방향 길이 (stacking depth)는 일반적인 매입형 영구자석 전동기보다 그 길이가 짧다. 따라서 끝부분 누설 자속(end turn leakage flux)이 일반적인 모델보다 더 크게 되는데, 이 점이 해석 부분의 오차로 보인다. 따라서 3차원 유한 요소 해석을 통해서 누설 자속 부분을 해결할 수 있을 것이다.

### 3.2 교차 결합 인덕턴스

한편, 포화 현상이 심할 경우 3.1절에서 언급했듯이 교차 결합 현상이 발생하게 되고, 이로 인해서 d, q축 사이의 교차 결합 인덕턴스가 존재하게 되는데, 고정 투자율 법을 응용해서 교차결합 인덕턴스를 구할 수가 있다. 그림 11.은 교차 결합 인덕턴스 (cross-coupling inductance)를 구하기 위한 순서도이다. 앞에서 언급한 고정 투자율 법을 이용한 인덕턴스 해석이 그림 11.의 “제 1차 고정 투자율 법 적용”에 해당한다.

본 논문에서 교차 결합 인덕턴스를 구하기 위해서 제안하는 방법은 다음과 같다.

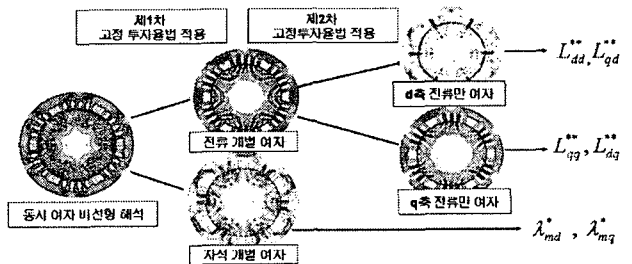


그림 11 교차 결합 인덕턴스를 구하기 위한 순서도  
Fig. 11 Flow chart for calculating cross-coupling inductance

고정 투자율 법은 포화 상태를 고려해서 전체 쇄교자속을 각각의 개별 여자원으로부터의 쇄교자속으로 분리해낼 수 있는 기법이라고 할 수 있다.

따라서 고정 투자율 법을 한 번 적용한 전류 개별 여자 상태에서 고정 투자율 법을 한 번 더 적용하여 전류 개별 여자 상태를 d축 전류 개별 여자 상태와 q축 전류 개별 여자 상태로 분리할 수 있다.

여기서 d축 전류만 여자된 상태에서 d축 자기 인덕턴스 ( $L_{dd}$ )를 구할 수 있고, d축 전류에 의해 발생된 자속이 q축에 쇄교하는 성분인 교차 결합 인덕턴스 ( $L_{qd}$ )를 구할 수 있다. 마찬가지로 q축 전류만 여자된 상태에서 q축 자기 인덕턴스 ( $L_{qq}$ )를 구할 수 있고, q축 전류에 의해 발생된 자속이 d축에 쇄교하는 성분인 교차 결합 인덕턴스 ( $L_{dq}$ )를 구할 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$L_{dd} = \frac{\lambda_{dd}(i_{ds}, i_{qs})}{i_{ds}} \quad (7) \quad L_{qd} = \frac{\lambda_{qd}(i_{ds}, i_{qs})}{i_{ds}} \quad (8)$$

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

$\lambda_{dd}, \lambda_{qd}$  : d축 전류를 인가하였을 때 d, q축 쇄교자속  
 $\lambda_{qq}, \lambda_{dq}$  : q축 전류를 인가하였을 때 d, q축 쇄교자속

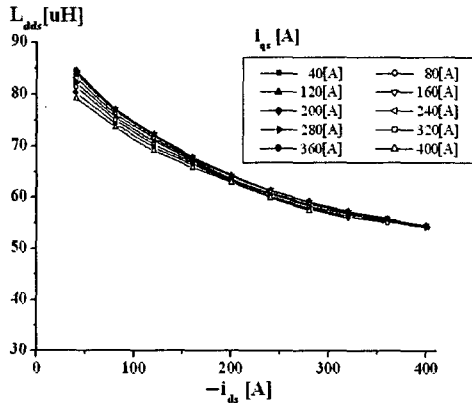


그림 12 d축 자기 인덕턴스  
 Fig. 12 D-axis self inductance

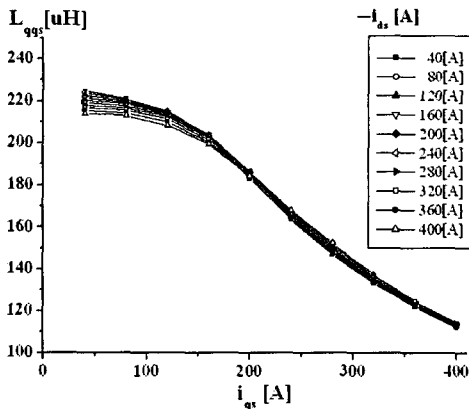
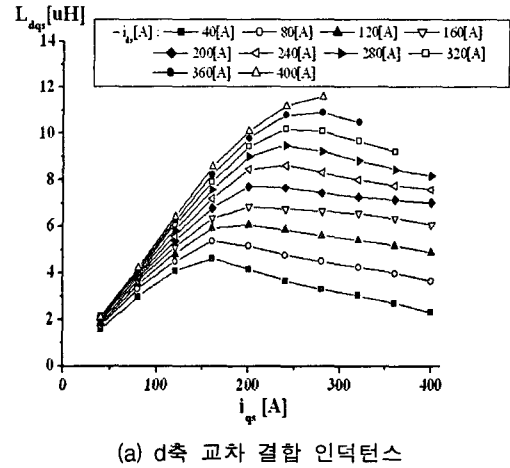
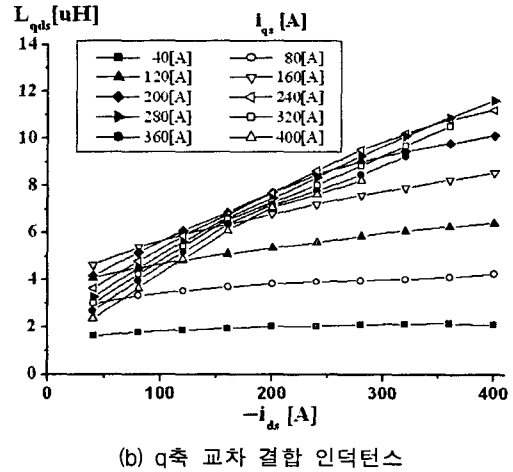


그림 13 q축 자기 인덕턴스  
 Fig. 13 Q-axis self inductance



(a) d축 교차 결합 인덕턴스



(b) q축 교차 결합 인덕턴스

그림 14 교차 결합 인덕턴스  
 Fig. 14 Cross-coupling inductance

제안된 방법을 이용해서 구한 d, q축 자기 인덕턴스는 그림 12와 그림 13에 나타내었고, d, q축 교차 결합 인덕턴스는 그림 14에 나타나있다.

일반적인 인덕턴스 그래프의 경우, 교차 결합 현상 때문에, 반대 축 전류가 증가함에 따라서 그 값이 점차 줄어들게 되는 것이 당연하다. 앞선 그림 5와 그림 6에 나타나 있는 d, q축 동기 인덕턴스와 그림 12와 그림 13에 나타나 있는 d, q축 자기 인덕턴스를 비교해 볼 때, 자기 인덕턴스의 경우가 반대 축 전류의 증가에 의한 인덕턴스 값의 감소폭이 더 적음을 알 수 있다. 반대 축 전류에 의해 인덕턴스 값이 변화하는 현상을 교차 결합 현상이라고 생각할 수 있고, 제안된 방법을 이용해서 동기 인덕턴스를 자기 인덕턴스와 교차 결합 인덕턴스로 분리했기 때문에 그 감소폭이 더 적은 것은 타당하다고 볼 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\lambda_{ds}(i_{ds}, i_{qs}) = \lambda_{dd}(i_{ds}, i_{qs}) + \lambda_{dq}(i_{ds}, i_{qs}) \quad (11)$$

$$= L_{dd}(i_{ds}, i_{qs})i_{ds} + \lambda_{dq}(i_{ds}, i_{qs})i_{qs}$$

$$\lambda_{qs}(i_{ds}, i_{qs}) = \lambda_{qq}(i_{ds}, i_{qs}) + \lambda_{qd}(i_{ds}, i_{qs}) \quad (12)$$

$$= L_{qq}(i_{ds}, i_{qs})i_{qs} + \lambda_{qd}(i_{ds}, i_{qs})i_{ds}$$

위 수식을 통해서 d축 쇠교자속은 d축 전류에 의한 d축 쇠교자속과 q축 전류에 의한 d축 쇠교자속으로 나누어지게 됨을 알 수 있다. 마찬가지로 q축 쇠교자속은 q축 전류에 의한 q축 쇠교자속과 d축 전류에 의한 q축 쇠교자속으로 나누어지게 된다.

일반적인 상호 인덕턴스의 경우, 그 값이 서로 같게 되지만, 그림 14.에 나타나 있는 d, q축 교차 결합 인덕턴스의 경우 그 값이 서로 같지 않다. 이를 통해서, 해석 모델이 d, q 축 사이의 비대칭적인 자기 포화 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한, 그 크기가 자기 인덕턴스의 1/5~1/15 정도이며, 무시할 수 없는 수준이라고 볼 수 있다. 게다가 각 축 전류 값이 증가하면서 교차 결합 현상이 심화되고, 따라서 교차 결합 인덕턴스의 크기도 전류의 증가에 비례하는 것을 그림 14.을 통해 알 수 있다.

따라서 이러한 교차 결합 인덕턴스를 고려한 새로운 전압 방정식을 세울 수 있다. 기존의 매입형 영구자석 전동기의 전압 방정식은 다음과 같고,

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + L_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} - \frac{d\theta}{dt} (L_{qs} i_{qs} + \lambda_{mq}) \quad (13)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{d\theta}{dt} (L_{ds} i_{ds} + \lambda_{md}) \quad (14)$$

$V_{ds}, V_{qs}$  : d, q축 단자 전압

$R_s$  : 권선 저항

$i_{ds}, i_{qs}$  : d, q축 전류

$L_{ds}, L_{qs}$  : d, q축 동기 인덕턴스

$\lambda_{md}, \lambda_{mq}$  : 영구자석에 의한 d, q축 쇠교자속

(11)식과 (12)식을 기존의 매입형 영구자석 전동기의 전압 방정식에 대입하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + L_{dds} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qs}}{dt} - \frac{d\theta}{dt} (L_{qs} i_{qs} + \lambda_{mq}) \quad (15)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + L_{qqs} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{qd} \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{d\theta}{dt} (L_{ds} i_{ds} + \lambda_{md}) \quad (16)$$

$V_{ds}, V_{qs}$  : d, q축 단자 전압

$R_s$  : 권선 저항

$i_{ds}, i_{qs}$  : d, q축 전류

$L_{dds}, L_{qqs}$  : d, q축 자기 인덕턴스 (self inductance)

$L_{dq}, L_{qd}$  : d, q축 교차 결합 인덕턴스 (cross-coupling inductance)

$\lambda_{md}, \lambda_{mq}$  : 영구자석에 의한 d, q축 쇠교자속

기존의 전압 방정식의 경우, d축 전압 방정식에는 d축 전류에 의한 미분 항이 하나만 존재하고, 미분 항의 인덕턴스가 기존의 동기 인덕턴스로 이루어져있고, q축 전압 방정식도 마찬가지다. 하지만 본 논문에서 제안한 전압 방정식의 경우, d축 전압 방정식에는 기존의 d축 동기 인덕턴스가 d축 전류에 의해 영향을 받는 d축 자기 인덕턴스 항과 q축 전류에 의해 영향을 받는 교차 결합 인덕턴스로 나누어져 있음을 알 수 있고, q축 전압 방정식도 마찬가지로 d축 전류에 의해 영향을 받는 교차 결합 현상을 고려한 교차 결합 인덕턴스가

존재함을 알 수 있다.

본 논문에서 교차 결합 인덕턴스를 구함으로써 궁극적으로 제안하는 것은 제어 성능의 향상이다.

교차 결합 인덕턴스가 전류의 미분 항에만 포함되어 있으므로, 전류의 미분 항을 무시하는 정상 상태 (steady state)에서는 기존의 전압 방정식과 새로운 전압 방정식이 동일하다. 하지만 과도 상태 (transient state)의 경우 전류의 미분 항이 사라지지 않게 되고, 이러한 교차 결합 인덕턴스를 고려한 전압 방정식으로 제어를 수행하는 것이 좀 더 효과적이고, 정밀한 제어를 보장할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 자기 포화 현상이 존재할 경우 발생하는 교차 결합 현상을 고려한 교차 결합 인덕턴스를 추출하는 법을 제안하였다.

고정 투자율법의 특성을 이용하여 교차 결합 인덕턴스를 추출하는 방법을 제안하고, 이를 이용하여 교차 결합 현상을 고려한 d, q축 교차 결합 인덕턴스를 추출할 수 있었다. 그리고 이러한 교차 결합 현상에 기인하여, 영구 자석에 의한 쇠교자속 역시 d, q축 전류 조합에 따라서 그 값이 변화한다는 것을 알 수 있었다.

또한 교차결합 인덕턴스를 고려한 매입형 영구자석 전동기의 전압 방정식을 새롭게 제안하였다. 새로운 전압 방정식을 이용하여 교차결합 현상을 고려하는 제어가 행해진다면 좀 더 정확한 과도상태 (transient state) 제어가 가능할 것이다. 추가적으로 기존에 상수로 취급되었던 역기전력 상수를 d, q축 전류에 따른 참조표 (Look-Up Table: LUK) 방식으로 바꾸어서 제어를 수행한다면, 좀 더 정확하고 세밀한 제어가 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 설승기, 전기기기 제어론, 홍릉 과학 출판사, 2005.
- [2] 서장호, 정상용, 정현교, "고정 투자율 법을 적용한 자계 포화특성 해석에 관한 연구", 대한 전기학회 하계학술대회논문집, pp997-999, 2003년 7월.
- [3] 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.
- [4] S. Y. Kwak, J. K. Kim and H. K. Jung, "Characteristic analysis of multi-layer buried magnet synchronous motor using fixed permeability method," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 20, pp. 549-555, Sept. 2005
- [5] E. Levi and V. A. Levi, "Impact of dynamic cross-saturation on accuracy of saturated synchronous machine models," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 15, pp. 224 - 230, June 2000.
- [6] Stumberger. B, Stumberger. G, Dolinar. D, Hamler. A, Trlep. M, "Evaluation of Saturation and Cross-Magnetization Effects in Interior Permanent Magnet

Synchronous Motor," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 39, pp. 1264-1271, Sept. 2003.

[7] P. Vas, K. E. Hallenius, and J. E. Brown, "Cross-saturation in smooth-air-gap electric machines," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. EC-1, pp. 103-109, Mar. 1986.

[8] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors. Oxford, 1994.

[9] T.J.E.Miller, J.R. Hendershot Jr, Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives. Oxford, 1989.

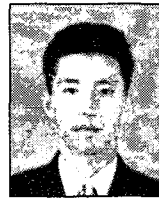
[10] S. J. Salon, Finite Element Analysis of Electrical Machines. Kluwer Academic Publishers, 1995.

저 자 소 개



**이 상 엽(李相燁)**

1981년 2월 6일생. 2004년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2006년 동 대학원 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 박사과정  
 Tel : 02-880-7262  
 Fax : 02-878-1452  
 E-mail : lstonion@elecmech.snu.ac.kr



**김재광(金在光)**

1971년 7월 10일생. 1999년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 졸업(공학석사). 2006년 동 대학원 졸업(공학박사). 현재 현대 자동차 선행개발센터 선임연구원  
 Tel : 031-899-3132  
 Fax : 031-899-3332  
 E-mail : belight@hyundai-motor.com



**곽상엽(郭尙燁)**

1974년 5월 20일생. 2002년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2004년 동 대학원 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 박사과정  
 Tel : 02-880-7262  
 Fax : 02-878-1452  
 E-mail : aceonepair@elecmech.snu.ac.kr



**정현교(鄭炫敎)**

1955년 8월 17일생. 1979년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 1981년 동 대학원 졸업(공학석사). 1984년 동 대학원 졸업(공학박사). 1985-1994년 강원대학교 전기공학과 교수. 1987-1989년 NY Polytech Univ. 방문 연구원. 현재 서울대학교 전기 컴퓨터 공학부 정교수  
 Tel : 02-880-7262  
 Fax : 02-878-1452  
 E-mail : hkjung@snu.ac.kr