

Cross-Magnetization을 고려한 매입형 영구자석 동기전동기의 d-q축 쇄교자속 추출

김민석*, 광상엽**, 정현교**, 한성진*, 정상용*
 *동아대학교 전기공학과, **서울대학교 전기컴퓨터 공학부

D-Q Flux Linkage Identification for Interior Buried Permanent Magnet Synchronous Motor considering Cross-Magnetization

Min-Seok, Kim*, Sang-Yeop Kwak**, Hyun-Kyo Jung**, Sung-Chin Hahn*, Sang-Yong Jung*
 *Department of Electrical Engineering, Dong-A University
 **School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 자기포화특성이 두드러진 매입형 영구자석 동기전동기의 특성해석, 설계 및 제어에 응용할 수 있는 통합변수인 d-q축 쇄교자속(Flux Linkage)의 추출에 대하여 나타낸다. 특히, 영구자석과 전기자전류에 의한 Cross-Magnetization을 고려한 특성을 유한요소법(F.E.M)을 통하여 나타내며, 제작된 시작기 실험을 통하여 제안된 추출기법의 타당성을 나타낸다.

매입형 영구자석 동기전동기는 그림 1과 같이 약자속제어성을 향상할 수 있는 돌극비(d-q축 인덕턴스 비율) 증대를 위한 회전자 다중 매입 구조로 인하여 국부적인 자기포화특성이 불가피한데, 특히 센터포스트(Center Post)나 브리지(Bridge)에서 두드러지게 나타난다. 이와 같은 자기포화특성은 d-q축의 교호작용(Cross-Magnetization)을 나타내는데, 다음과 같이 전압방정식에 반영된다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)는 약자속제어성을 증대하기 위하여 영구자석이 회전자의 내부에 다중으로 매입된 구조를 많이 사용하는데, 이로 인해 회전자의 국부적 자기포화특성이 두드러진다.[1],[2] 자기포화특성은 영구자석 및 전기자전류에 의한 자속형성을 비선형적으로 구성하면서 상호 교호작용을 나타내는데, 이를 Cross-Magnetization이라 한다. 이와 같은 Cross-Magnetization으로 인해 전압방정식에서 사용되는 d-q 인덕턴스 및 역기전력상수 등의 회로정수가 입력조건에 따라 변동하는데, 본 논문에서는 통합적으로 d-q축 쇄교자속에 반영하여 나타내고자한다. 즉, 입력조건(d-q축 전압 및 전류의 크기 및 위상각)별로 d-q축 쇄교자속을 추출하여 맵(Map)을 구성하고, 이를 참조(Mapping)하는 d-q축 전압방정식 및 토크방정식을 재정의 할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} V_d &= R_s i_d - w_r L_{qq} i_q - w_r L_{qd} i_d - w_r \lambda_{mq} \\ V_q &= R_s i_q + w_r L_{dd} i_d + w_r L_{dq} i_q + w_r \lambda_{md} \end{aligned} \quad (1)$$

일반적으로 매입형 영구자석 동기전동기 모델링에서는 d-q축간의 독립성으로 L_{qd} , L_{dq} , λ_{mq} 등을 고려하지 않았지만, Cross-Magnetization을 고려할 때 이를 반영해야 한다. 따라서, d-q축 전류(L_{qq} , L_{qd} , L_{dd} , L_{dq})와 영구자석(λ_{md} , λ_{mq})의 여자에 의한 회로정수를 추출해야하며, 본 논문에서는 이를 위해 유한요소법 기반의 고정투자율법(Fixed Permeability Method)을 적용하였다. 고정투자율법은 d-q축 전류와 영구자석을 동시에 여자하여 비선형 해석을 수행한 후 각 요소별 투자율을 고정시키고, 이어서 d-q축 전류와 영구자석을 개별 여자 시켜서 선형해석을 각각 수행하여 각 회로정수를 추출하게 된다.

본 논문에서는 d-q축 쇄교자속을 추출하는 기법으로 고정투자율법(Fixed Permeability Method)을 적용하였다. 이는 입력조건별로 영구자석과 전기자전류를 모두 여자한 후 비선형해석을 하여 각 분할요소별 투자율을 파악한 후, 이를 고정시킨 상태에서 영구자석과 전기자전류를 각각 여자하여, 역기전력상수와 인덕턴스를 구하는 방법이다. 특히, d-q축 전기자전류에 대해서도 동일한 방법을 적용하여 회로정수를 추출할 있어, d-q축간의 Cross-Magnetization을 나타낼 수 있다.[3]-[5]

2.2 d-q축 쇄교자속 추출

식 (1)에서 응용되는 회로정수(L_{qq} , L_{qd} , L_{dd} , L_{dq} , λ_{md} , λ_{mq})는 고정 투자율법을 적용하여 추출할 수는 있어도, 실험적으로 입증하기위한 동일조건을 구현하기가 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 d-q축에 쇄교하는 개별성분을 통합적으로 표현하고자 d-q축 쇄교자속을 바탕으로 다음과 같이 재정의하고자 한다.

$$\begin{aligned} \lambda_d(i_d, i_q) &= L_{dd}(i_d, i_q)i_d + L_{dq}(i_d, i_q)i_q + \lambda_{md} \\ \lambda_q(i_d, i_q) &= L_{qq}(i_d, i_q)i_q + L_{qd}(i_d, i_q)i_d + \lambda_{mq} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, λ_d , λ_q 는 고정투자율법을 적용하여 이론적으로 추출가능하며, 아울러 다음과 같이 실험적으로 추출할 수 있다.

$$\lambda_d^* = (V_q^* - R_s i_q^*)/w_r, \quad \lambda_q^* = (-V_d^* + R_s i_d^*)/w_r \quad (3)$$

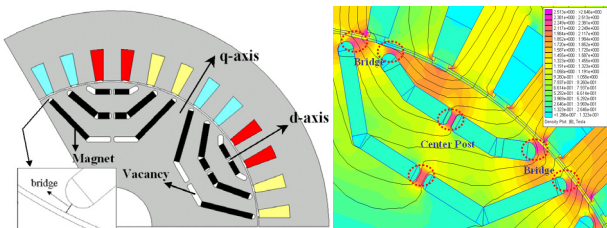
여기서, λ_d^* , λ_q^* , i_d^* , i_q^* 는 철손을 회피할 수 있는 저속에서의 정속운전조건하에서 측정된 값들이며, 토크방정식은 총 d-q축 쇄교자속으로 다음과 같이 재정의된다.

한편, 고정투자율법을 적용하면 세부적으로 d-q축 인덕턴스와 역기전력상수를 모두 추출할 수 있지만, 동일조건 실험구현이 불가능하여 제시된 해석치의 정확도를 파악하기 힘들게 된다. 그러나 본 논문에서 도입하는 d-q축 쇄교자속은 실험을 통한 측정치 추출이 가능하므로 정확성 검증 문제를 해결할 수 있게 된다. 본 논문에서는 다양한 운전조건을 지닌 전인전동기 응용으로 개발된 시작기에 대하여 d-q축 쇄교자속의 수치해석적 추출 및 실험을 통한 측정치와 비교검증을 통하여 유효성을 입증하였다.[6]

아울러, 본 논문에서는 통합변수인 d-q축 쇄교자속을 응용한 매입형 영구자석 동기전동기 설계 및 제어에서의 효용성에 대해서도 나타내고자 하는데, 가령 정출력 속도영역 확대를 위한 약자속제어성 극대화 설계 및 전류제어기 구성에서의 Flux Decoupling 전향보상 등을 예로 들고자 한다.[7],[8]

2. 본 론

2.1 매입형 동기전동기의 Cross-Magnetization을 고려한 d-q축 쇄교자속(Flux Linkage)



<그림 1> 매입형 영구자석 동기전동기의 자기포화특성

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \{ \lambda_{md} i_q - \lambda_{mq} i_d + L_{dq} i_q^2 - L_{qd} i_d^2 + (L_{dd} - L_{qq}) i_d i_q \} \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - i_d \lambda_q) \end{aligned} \quad (4)$$

한편, d-q축 쇄교자속 계산은 다음과 같이 각 권선단면적의 벡터포텐셜(A) 평균값으로 가능하다.

$$\lambda = \left[\frac{\iint_{S_1} A_1 dS}{S_1} - \frac{\iint_{S_2} A_2 dS}{S_2} \right] l \quad (5)$$

여기서, l 은 축 방향 길이, S_1 과 S_2 는 전류방향별 N 번 감긴 권선의 총 단면적을 나타낸다.

한편, 본 논문에서는 회전자 이동에 따른 슬롯 및 치 구조에 따른 쇄교자속의 변화분을 고려하기 위하여 다음과 같은 평균치를 적용하였다.

$$\lambda_{d,avg}(i_d, i_q) = \frac{\sum_{\theta_m=0}^{N-1} \lambda_d(i_d, i_q, \theta_m)}{N}, \lambda_{q,avg}(i_d, i_q) = \frac{\sum_{\theta_m=0}^{N-1} \lambda_q(i_d, i_q, \theta_m)}{N} \quad (2)$$

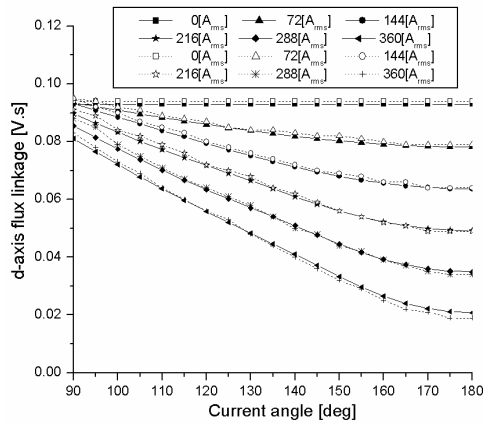
여기서, $\lambda_{d,avg}$ 와 $\lambda_{q,avg}$ 는 회전자의 움직임을 고려한 d축과 q축의 쇄교자속의 평균값이며, N 은 회전자 이동주기별 이산화 개수이다.

2.3 실험을 통한 d-q축 쇄교자속 검증

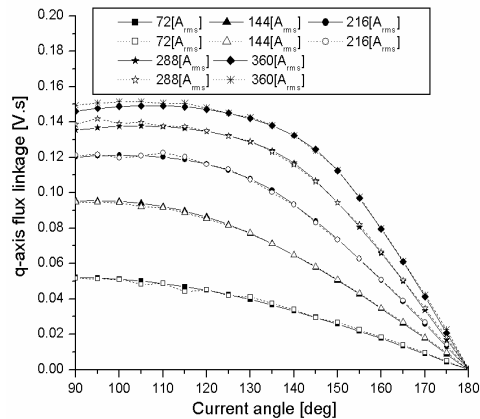
본 논문에서는 다양한 운전조건을 지닌 견인용 매입형 영구자석 전동기를 적용하여 d-q축 쇄교자속 추출하였으며 시작기를 제작 및 실험하여 결과를 비교 검증하였다. 표 1에서는 적용된 전동기의 사양을 나타내었다.

<표 1> 적용된 매입형 영구자석 동기전동기 사양

전동기 항목	전동기 사양
극 수	6
공극 길이	1[mm]
회전자 외경	170[mm]
고정자 외경	240[mm]
고정자 내경	172[mm]
철심장	230[mm]
슬롯 수	27
영구자석	Bonded NdFeB [Br=1.2T]
고정자 상 저항	0.0055[ohm]



(a) d축 쇄교자속(λ_d)



(b) q축 쇄교자속(λ_q)

<그림 2> 전류위상각별 d-q축 쇄교자속 비교 (해석치: 실선, 실험치: 점선)

그림 2에는 표 1의 사양을 지닌 시작기에 d-q축 입력전류의 크기와 위상각(angle)에 대하여 d-q축 쇄교자속을 고정투자율법을 적용하여 추출한 해석치와 실험을 통해 측정된 시험치를 비교하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 추출된 해석치는 실험치와 매우 유사한 결과를 보이므로 제안된 해석치의 타당성을 입증할 수 있다.

2.4 매입형 영구자석 동기전동기 d-q축 쇄교자속 효율성

본 논문에서 도입된 통합형 d-q축 쇄교자속의 이론적 타당성을 바탕으로 매입형 영구자석 동기전동기의 설계와 제어에서 이를 응용한 다양한 효율성을 나타낼 수 있는데, 본 논문에서는 설계에서의 정출력 속도 영역을 확대할 수 있는 약계자제어성 극대화 설계기준 및 제어에서의 전류제어기 Flux Decoupling 전향보상에 대해 언급하고자 한다.

우선, 매입형 영구자석 동기전동기 설계에서 인버터에서 공급하는 전압과 전류 제한하에 정출력 속도영역을 증가시키기 위한 약자속제어성 극대화를 위해서는 $|\lambda_d^*(i_d = I_{max})|$ 를 최소화하는 방향으로 수행가능하다. 이는 d-q축 전압연계적인 타원의 중심과 전류연계적인 원의 중심사이의 거리 최소화를 의미한다.

아울러, 전류제어기 설계에서는 이론적으로 d-q축 쇄교자속을 데이터베이스화한 맵(Map)을 구성하여 이를 활용하는 Flux Decoupling 전향보상기를 구현가능하며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} e_d^* &= -w_r \lambda_{qs}^* (= L_{qq} i_q + L_{qd} i_d + \lambda_{mq}) \\ e_q^* &= w_r \lambda_{ds}^* (= L_{dd} i_d + L_{dq} i_q + \lambda_{md}) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 λ_{ds}^* , λ_{qs}^* 는 다양한 d-q축 입력전류 조합에 따른 참조(Mapping)로 결정되므로 기존 전류제어기에서 cross-coupling과 EMF decoupling 등이 불필요하게 된다.

3. 결 론

본 논문에서는 자기포화가 두드러진 매입형 영구자석 동기전동기의 Cross-Magnetization을 고려한 통합변수인 d-q축 쇄교자속의 추출에 대해서 나타내었다. 특히 유한요소법 기반의 고정투자율법을 적용하여 쇄교자속을 추출하였으며 제작된 시작기의 실험치와의 비교를 통하여 타당성을 입증하였다. 아울러, 도입된 d-q축 쇄교자속의 설계 및 제어분야 효율성에 대해서도 살펴보았다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Satho, S. Akutsu, T. Miyamura, H. Shinoki, "Development of Traction motor for Fuel Cell Vehicles," SAE Technical Paper Series, January, 2001.
- [2] Mehrdad Ehsani, Khwaja M. Rahman, Hamid A. Toliyat, "Propulsion System Design of Electric and Hybrid Vehicles," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 44, NO. 1, February 1997.
- [3] 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. on Energy Conversion, vol. 20, pp. 549-555, Sept. 2005.
- [4] Rahman K. M, Hiti S, "Identification of machine parameters of a synchronous motor", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 41, issue 2, pp. 557-565, Mar-Apr. 2005.
- [5] 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. on Industry Applications, vol.39, issue 5, pp.1264 - 1271, Sept-Oct. 2003.
- [6] Yukio Honda, Tomokazu Nakamura, Toshiro Higaki, Yoji Takeda, "Motor Design Consideration and Test Results of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles," Proc. of IEEE Industry Application Annual Meeting, pp. 75-82, October, 1997, New Orleans, USA.
- [7] Wen L. Soong, Mesimi Ertugrul, "Field-Weakening Performance of Interior Permanent-Magnet Motors", IEEE Trans. on IA, Vol. 38, No.5, September 2002
- [8] Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, "Practical design criteria of interior permanent magnet synchronous motor for 42V integrated starter-generator," Proc. of IEEE International Electric Machines and Drive Conference. Vol. 2, pp. 656-662, 2003.