

차세대 전동차용 직구동형 영구자석 전동기 설계기술

Direct Drive PM Motor Design for Next Generation Locomotive

김민석* 박지성* 김대광** 김정철** 정상용*
Kim, Min-Seok Park, Ji-Seong Kim, Dae-Kwang Kim, Jung-Chul Jung, Sang-Yong

ABSTRACT

The propulsion for locomotive application has changed from the DC motor system to the induction motor system. Although the induction motor system has almost reached the stage of maturity, this system also needs to be changed to the PM motor system for the direct drive without using reduction gear. Thus, the IPMSM(Interior buried Permanent Magnet Synchronous Motor) has been adopted to meet the locomotive driving specification. In this paper, the design of IPMSM satisfying driving specifications for the direct drive has been performed using the advanced F.E.M.

1. 서 론

전동차 구동용 견인시스템은 전력전자와 제어기술의 발달로 저항제어에 의한 직류전동기 방식에서 쇼퍼 및 인버터 제어에 의한 유도전동기 제어방식으로 획기적인 발전을 이루었다. 이러한 발전은 기술적 완성 단계에 들어서면서, 기존 시스템에서 보다 개선된 방향을 기대하기가 어렵지만 전력전자 기술의 급속한 발전으로 고속 스위칭이 가능한 IGBT가 상용화되면서, 개별제어가 가능하게 되어 철도차량용으로 직구동형 동기전동기의 적용이 가능하게 되었다. 동기전동기 중에서도 차세대 주전동기로 주목 받는 것은 소형, 경량화가 유리하면서도 효율이 높은 전폐형 영구자석 동기전동기이다. 직접 구동형 영구자석 전동기는 간접 구동형 유도전동기에 이어 소형, 경량화 및 유지보수 비용 절감 등의 이점이 있다.

전동차 구동용 전동기는 전동차시스템의 운전특성을 고려하여 구조적 강건성, 높은 출력 및 토크밀도, 넓은 운전 속도영역, 우수한 내환경성(내진, 내열, 내부식 등), 고효율 운전제어성 등의 다양한 성능사양을 만족해야 한다. 이와 같은 특징에 부합할 수 있는 고급형 전동기로는 고에너지 희토류계 영구자석(Rare-Earth Permanent Magnet)을 사용하는 영구자석전동기로, 그 중에서 특히 매입형 영구자석 동기전동기(Interior buried Permanent Magnet Synchronous Motor)는 영구자석이 회전자에 매입되어 있어 구조적으로 안정성이 크며, 자기적 돌극성(Magnetic Saliency)이 좋아 넓은 속도영역 운전을 위한 약계자제어성(Field-Weakening Controllability)과 출력/토크 밀도가 우수하여 고효율 운전이 가능하다.

한편 매입형 영구자석 동기전동기는 구성하고 있는 요소부품의 자기적 물성 및 구성형태에 따라 구조적 자기포화(Magnetic Saturation) 특성이 두드러진다. 즉, 대부분의 운전점이 비선형적인 자기포화영역에 존재하며 적용된 비선형 해석기법에 따라 추출된 등가회로 파라미터(저항, 역기전력상수, 인덕턴스 등)에 대하여 민감도가 높은 특성을 보인다. 따라서 정밀도가 높은 특성해석(운전특성 예측 및 최적설계 응용)을 위해서는 자기적 포화특성에 기인한 민감성을 반영할 수 있는 고급화된 비선형 수치해석기법(Nonlinear Numerical Analysis)이 필수 수반되어야 한다.

본 논문은 차세대 전동차에 장착되는 영구자석 전동기를 대상으로 전동기의 특성분석과 해석 및 설계 기술을 나타내며 국내 차세대 전동차에 적합한 영구자석 전동기를 개발할 수 있는 요소기술을 마련하기 위한 것이다.

* 동아대학교, 전기공학과, 회원

** (주)현대로템 기술연구소

E-mail : syjung@dau.ac.kr

TEL : (051)200-6945 FAX : (051)200-7743

2. 매입형 영구자석 동기전동기

2.1 매입형 영구자석 동기전동기의 구조

매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 형상을 그림 1에 나타내었다. 회전자의 영구자석 배치는 N, S극이 번갈아 가며 놓여있으며 회전자의 영구자석에 의한 자화 방향은 반경 방향의 중심축에 평행한 방향으로 자화되어 있다. 자석에 의한 자속의 방향을 고려하여 반경 방향의 자석 중심축을 d축으로, d축으로부터 전기각으로 90°만큼 떨어져 있는 자석 사이의 중심을 q축으로 정의한다. d축의 자로는 철심, 자석, 공극으로 이루어져 있으며, q축은 공극과 철심만으로 이루어져 있다. 일반적으로 페라이트나 희토류 계통 영구자석의 투자율은 공극과 거의 같으므로 영구자석에 의한 공간을 공극으로 취급하여도 무방하다. IPMSM은 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 있어 회전자 표면의 기계적인 구조는 대칭이지만 자기적으로 q축과는 달리 d축은 공극이 d축 자로에 존재하는 효과가 있다. 그러므로 자석을 통과하지 않는 q축 자로에 비해 d축 자로의 자기저항이 크므로 q축의 인덕턴스가 d축보다 크다. 따라서 IPMSM은 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 회전자에 돌극성이 생기기 때문에 여러 가지 특성을 갖는다.

IPMSM은 영구자석이 회전자 내부에 매입된 구조로 영구자석에 의한 토크 성분(alignment torque)뿐만 아니라 d-q축 자기저항 차이에 의한 토크성분(reluctance torque)을 가지므로 단위체적당 큰 토크를 얻을 수 있는 장점을 지닌다. 또한, 자기적 성질이 공극과 유사한 회전자 내부의 자석으로 인해 d-q축 인덕턴스 분포의 차이가 현저하며, 이러한 돌극비(saliency ratio, L_q/L_d)에 비례하여 약계자 제어를 통한 광범위한 가변속 운전 특성을 지니므로 IPMSM은 영구자석이 회전자의 내부에 다층으로 매입된 구조로 돌극성을 크게 설계한다. 아울러, 영구자석이 매입된 구조로 회전자의 기계적 견고함이 우수하여 견인전동기로써의 그 응용범위가 확대되고 있다.

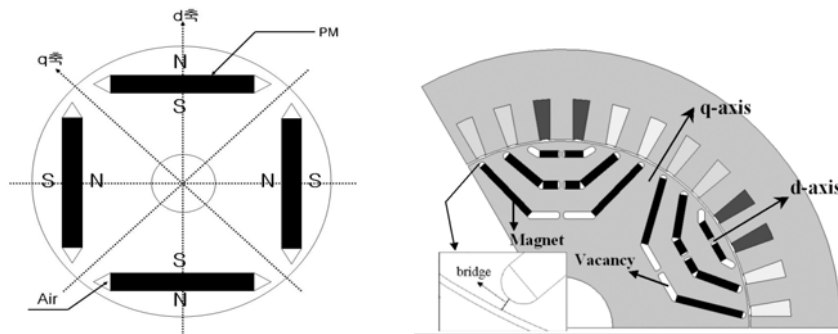


그림 1. 매입형 영구자석 동기전동기의 구조

2.2 IPMSM의 자기포화특성 및 교차자화작용

IPMSM의 발생토크는 영구자석 토크와 자기저항 토크의 합으로 나타나므로 d축 전류를 제어하여 자기저항 토크를 적절히 이용함으로써 전동기의 속도-출력 특성을 개선할 수 있는 장점이 있으며, 이러한 약계자 제어성을 증대하기 위해 회전자는 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스 분포의 차이인 돌극성(saliency)을 크게 키울 수 있도록 설계한다. 돌극성을 키우기 위해서는 그림 2와 같이 영구자석이 다층으로 매입된 구조가 유리한 반면, 이와 같은 구조는 공극과 자석 사이의 브릿지(Bridge)나 자석과 자석 사이의 센터포스트(Center-Post) 등에서 자기포화가 현저하게 나타나도록 한다.

일반적으로 자기적 비포화 영역에서 운전되는 IPMSM의 전압방정식은 영구자석 여자에 의한 쇄교자속 및 전기자 전류에 의한 쇄교자속에 의한 전압강하의 선형적인 합으로 구성되며, 이는 각각의 쇄교자속이 상호 영향을 주지 않는 독립적인 관계를 의미한다. 하지만, 자기적 포화 영역에서는 상호 영향을 주는 교차자화작용(Cross-Magnetization)이 발생하여 선형적인 합으로 구성되기 어렵다. 특히, 고정자 전류의 d축과 q축 간에도 서로 영향을 끼쳐 d-q축 상호 인덕턴스 성분이 나타나게 된다. ($L_{dq} \neq L_{qd} \neq 0$)

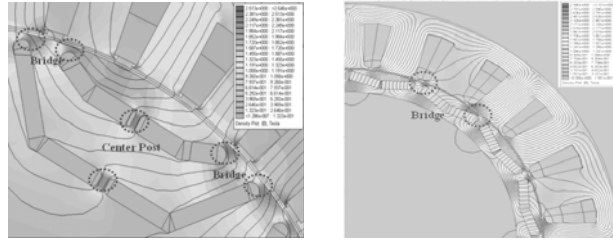


그림 2. IPMSM의 자기포화 특성

따라서, IPMSM의 교차자화작용을 고려한 d-q축 전압방정식 및 토크방정식은 자기포화 조건하에서 d-q축 전류와 영구자석의 여자에 의한 쇄교자속으로 식 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \{ \lambda_{md} i_q - \lambda_{mq} i_d + L_{dq} i_q^2 - L_{qd} i_d^2 + (L_{dd} - L_{qq}) i_d i_q \} \quad (2)$$

일반적으로 IPMSM의 벡터제어에서는 L_{qd} , L_{dq} , λ_{mq} 등을 고려하지 않지만, 자기적 포화영역에서의 교차자화작용을 고려하기 위해서는 이를 필히 고려해야하며, 아울러 원활한 벡터제어를 수행하기 위해서는 서로 독립적인 관계를 가지는 d-q축 전류($L_{qq} i_q$, $L_{qd} i_d$, $L_{dd} i_d$, $L_{dq} i_q$)와 영구자석(λ_{md} , λ_{mq})의 여자에 의해 교차자화된 쇄교자속들을 추출할 수 있는 수치해석적 기법이 필요하다.

즉, 자기적 비포화 영역에서 운전되는 영구자석 동기전동기의 대표적 회로정수인 d-q축 인덕턴스와 역기전력 상수를 수치해석적으로 추출하는 경우, 영구자석만을 여자하여 역기전력 상수를 구하고, d-q축 전류만을 여자하여 인덕턴스를 구하는 선형적인 방법이 적용되었다. 그러나 IPMSM에서와 같이 영구자석과 d-q축 전류 간의 교차자화작용이 두드러진 모델에서는 기존의 선형적인 방법으로 접근하기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 부하조건 동작점(Operating Point)에서의 투자율을 고정하는 FEM을 적용하여 정밀하고 체계적인 설계를 수행하였다.

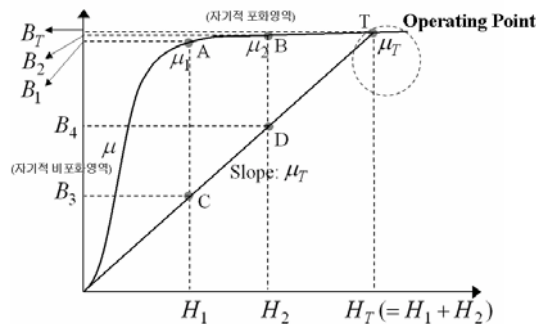


그림 3. 자기적인 포화영역에서 전동기 파라미터 상관관계

그림 3과 같이, IPMSM이 자기적 포화상태(T지점, $B_T = \mu_T H_T$)에서 비선형 FEM을 수행하면, 각각 독립여자 조건(동작점 A, B)에서 비선형 해석을 수행한 결과와 비교할 때, $B_T = \mu_T (H_1 + H_2) \neq B_1 (= \mu_1 H_1) + B_2 (= \mu_2 H_2)$ 가 되면서, 동작점 투자율은 μ_T 가 된다. 이어 각 요소별 투자율(μ_T)을 고정하여, H_1 과 H_2 를 개별여자 시켜 선형해석을 수행하면, C와 D점으로 귀결되어, $B_T = B_3 (= \mu_T H_1) + B_4 (= \mu_T H_2)$ 과 같은 결과를 도출할 수 있어 포화 영역에서도 선형적인 관계로 표시될 수 있는 회로정수를 추출할 수가 있다. 따라서 제안된 수치해석 기법 적용을 통하여 IPMSM에서 식 (1)과 (2)를 구성하는 모든 회로정수를 추출할 수 있으며, 기존의 벡터제어기법을 동일하게 적용할 수 있다.

3. 통합형 쇄교자속(λ_d, λ_q)

제안된 수치해석 기법 적용을 통하여 식 (1)과 (2)의 교차자화작용을 고려한 IPMSM의 회로정수를 다양한 부하조건(d-q축 전류 및 위상각)에 따라 수치해석적으로 추출할 수 있지만, 동일한 조건의 현실적 구현이 불가능하므로 실험적으로 타당성을 증명하기 어려워 추출된 결과의 신뢰성을 확보하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 실험적으로 구현이 가능한 새로운 변수인 통합형 d-q축 쇄교자속으로 IPMSM을 새롭게 정의하고자 한다. 이는 자속 발생원에 관계없이 교차자화 작용이 고려된 영구자석 및 d-q축 전류에 의한 개별자속을 통합화 시킨 것으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_d(i_d, i_q) = L_{dd}(i_d, i_q)i_d + L_{dq}(i_d, i_q)i_q + \lambda_{md} \quad (3)$$

$$\lambda_q(i_d, i_q) = L_{qq}(i_d, i_q)i_q + L_{qd}(i_d, i_q)i_d + \lambda_{mq}$$

이를 바탕으로 d-q축 전압지배방정식 및 토크방정식도 아래와 같이 재정의 된다.

$$V_d = R_s i_d - w_r \lambda_q, \quad V_q = R_s i_q + w_r \lambda_d \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (5)$$

제안된 통합형 d-q축 쇄교자속(λ_d, λ_q)의 추출은 앞서 제안된 투자율을 고정하는 FEM을 적용하여 다양한 부하조건별로 수치해석적 추출이 가능한데, 그림 4에 흐름도를 도식화하였다.

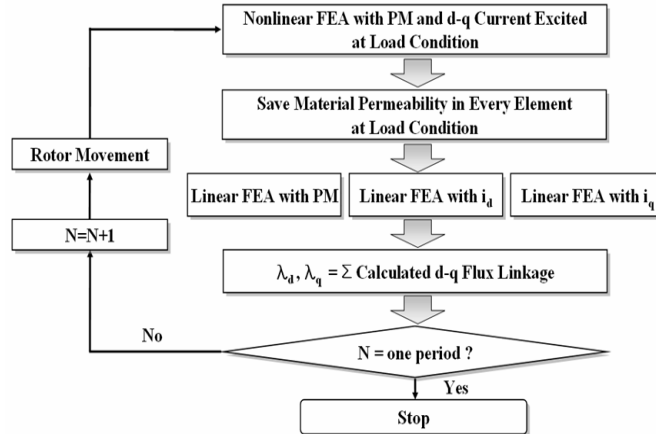


그림 4. 수치해석적인 쇄교자속 추출을 위한 흐름도

아울러, 실험을 통한 제안된 통합형 쇄교자속 추출은 아래 식을 적용하여 다양한 부하조건별로 d-q축 전압과 전류를 측정하여 간접적으로 얻을 수 있으며, 수치해석적으로 추출된 값과 비교하여 유효성을 입증할 수 있다.

$$\lambda_d^* = (V_q^* - R_s i_q^*)/w_r, \quad \lambda_q^* = (-V_d^* + R_s i_d^*)/w_r \quad (6)$$

여기서, λ_d^* , λ_q^* , i_d^* , i_q^* 는 정상상태 운전조건하에서 실험적으로 측정된 값이다.

4. 직구동형 IPMSM의 가변속 운전특성

IPMSM은 돌극비(saliency ratio, L_q/L_d)에 비례하여 약계자 제어를 통한 광범위한 가변속 운전 특성

을 지닌다. 이러한 직구동형 견인전동기의 운전영역에 따른 제어방법은 전류 크기와 전류 위상각을 제어하는 방법을 많이 사용한다. 직구동형 IPMSM의 운전영역은 그림 5에 나타낸 것과 같이 정토크 영역(Constant Torque)과 정출력 영역(Constant Power)으로 나눌 수 있다. 일반적으로 정토크 영역에서는 최대토크제어를 통해서 높은 기동토크를 얻고 정출력 영역에서는 전류 위상각 제어를 통해서 운전 속도 범위를 확장할 수 있다. 차세대 전동차의 직구동형 설계에서는 정토크 영역의 최대토크 제어특성을 해석하고 정출력 영역의 전압제한을 고려하여 약계자 제어특성을 해석하여 출력특성을 살펴보았다.

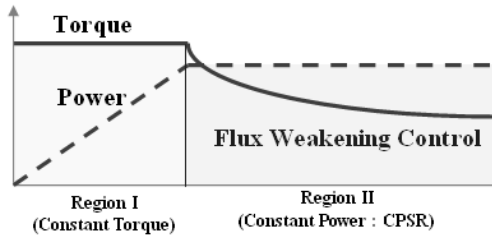


그림 5. IPMSM의 가변속 운전그림

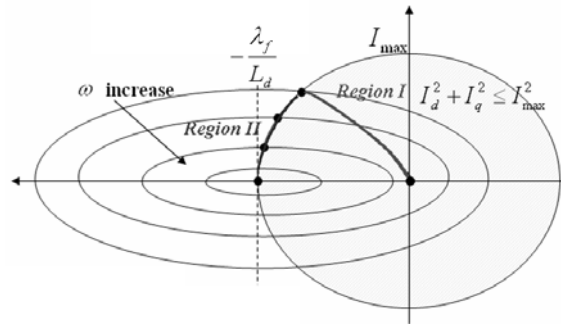


그림 6. IPMSM의 운전조건(MTPA and Max. CPSR)

4.1 정토크 운전 : 단위전류당 최대토크 제어(Maximum MTPA)

정토크 운전영역(저속)에서는 전류 제한 조건 아래에서 높은 기동토크를 얻는 것이 중요하므로 이 때 사용되는 제어 방식이 단위전류당 최대 토크 제어이며, 같은 토크를 발생하는 여러 가지 전류조합 중에서 최소가 되는 전류궤적을 따라 운전하는 것을 말한다. 따라서 정토크 운전영역에서 식 (7)의 토크방정식과 같이 통합형 d-q축 쇄교자속은 직구동형 IPMSM의 설계에 확대 적용될 수 있다.

$$\text{Maximum MTPA} = \text{Max} \left[\frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) / I_{\text{max}} \right] \quad (7)$$

4.2 정출력 운전 : 약계자 제어(Maximum CPSR)

정출력 운전영역(고속)에서는 전압과 전류가 동시에 제한되어 높은 속도와 큰 토크를 얻기 위하여 음의 방향으로 d축 전류를 흘리는데 이 때 사용되는 제어 방식이 약계자 제어이다. 이론적으로 약계자 제어시 운전점은 그림 6과 같이 전류제한 원과 전압제한 타원의 교차점을 따라 이동한다. 따라서 정출력 속도영역의 약계자 제어성능 극대화를 위한 설계는 전압제한 타원의 중심과 최대전류 사이의 거리가 최소화 되도록 설계를 할 수 있다.

$$\text{Maximum CPSR} = |\lambda_d^*(i_d = i_{\text{max}})| \quad (8)$$

5. 직구동형 견인전동기 설계 기술

제안된 이론을 바탕으로 차세대 전동차용 직구동 견인전동기(320kW, 11,250Nm, 884rpm)를 설계하였으며, 통합형 d-q축 쇄교자속을 수치해석기법을 적용하여 추출하였다. 다양한 부하조건에 대응하는 여러 가지 d-q축 전류조합($\theta = 90^\circ \sim 180^\circ$, $i_d = I_{\text{max}} \cos\theta$, $i_q = I_{\text{max}} \sin\theta$)별로 수치해석적으로 추출된 d-q축 쇄교자속 값 및 토크특성을 아래의 그림에 나타내었다.

직구동형 견인전동기가 자기적인 포화영역에서 운전하더라도 IPMSM의 회로정수들을 영구자석과 전기자전류 그리고 d-q축 간의 독립성을 유지하면서 선형적인 형태로 추출할 수 있으므로 자체 포화특성이 현저한 직구동형 IPMSM의 모델링 및 특성해석이 효과적으로 수행될 수 있으며, 기존의 벡터제어로직을 쉽게 적용하면서 정밀도 높은 직구동형 IPMSM의 운전제어가 가능할 것이다.

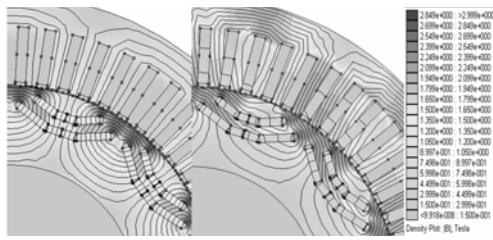


그림 8. 무부하조건($\lambda_d=2.14$), 부하조건($\lambda_d=1.65$, $\lambda_q=5.17[V \cdot s]$) 자속분포 및 통합형 d-q축 쇠교자속

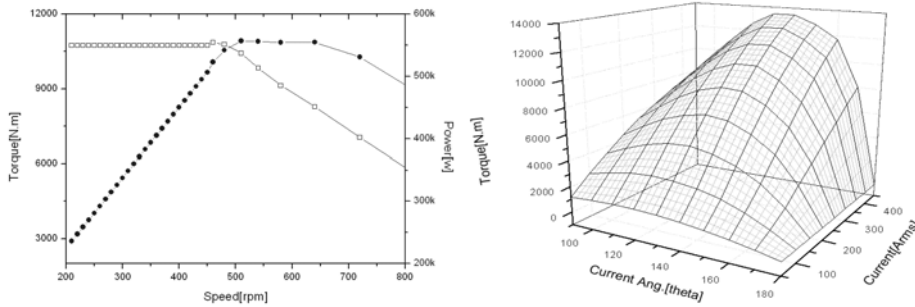


그림 9. 토크 및 출력특성

4. 결론

직접 구동형 영구자석 전동기는 간접 구동형 유도전동기에 이어 소형, 경량화 및 유지보수 비용 절감 등의 이점이 있다. 아울러 차세대 주전동기로 주목 받는 것은 소형, 경량화가 유리하면서도 효율이 높은 전폐형 영구자석 동기전동기이다. 본 논문은 차세대 전동차에 장착되는 직구동형 영구자석 전동기를 대상으로 전동기의 특성분석과 특성해석 및 설계기술을 나타내었다. 특히, IPMSM의 벡터제어에서 고려하지 않았던 L_{qd} , L_{dq} , λ_{mq} 등을 고려하였으며 원활한 벡터제어를 수행하기 위해서 서로 독립적인 관계를 가지는 d-q축 전류($L_{qq}i_q$, $L_{qd}i_d$, $L_{dd}i_d$, $L_{dq}i_q$)와 영구자석(λ_{md} , λ_{mq})의 여자에 의해 교차자화된 쇠교자속들을 추출할 수 있는 수치해석적 기법을 소개하였다. 마지막으로 실험적으로 추출가능하고 교차자화작용 또한 고려할 수 있는 통합형 d-q축 쇠교자속을 적용한 견인전동기의 운전특성 및 설계기술을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도 기술개발 사업의 연구비 지원 (과제 번호 07 차세대 고속철도 A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Yoshida, Abiko, et. al., Development of Main Circuit System using Direct Drive Motor(DDM), 38th Railway Cybernetic Symposium
2. 김민석, 광상엽, 정현교, 정상용(2007년), “교차자화작용을 고려한 매입형 영구자석 동기전동기의 통합형 d-q축 쇠교자속 추출”, Trans. KIEE. Vol. 56, No. 12, DEC, 2007
2. 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.