

LC 발전 공진법을 이용한 매입형 영구자석 동기 전동기의 파라미터 계산

장익상, 김승주, 진창성, 이주  
한양대학교 전기공학과

Computation of  $L_d, L_q$  parameters of IPMSM by LC Generate Resonance Method

Ik-Sang Jang, Chang Sung Jin, Seung Joo Kim, and Ju Lee  
Dept. of Electrical Engineering at Hanyang Univ.

**Abstract** - Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) produces two kind of torque that Magnetic and Reluctance torque. The permanent magnet linkage flux  $\Psi_a$  and d-axis and q-axis inductances have an important influence on the torque characteristic of IPMSM. Thus their accurate prediction is essential for predicting performance aspect such as the torque and flux-weakening capabilities. In this paper,  $L_d, L_q$  is calculated by LC resonance method with FEM. The results are validated by comparison the  $L_d, L_q$  calculated by another method.

1. 서 론

IPMSM은 구조적으로 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크가 합성된 토크를 발생하기 때문에, 자석에 의한 높은 토크를 낼 수 있으며, 적절한 돌극성을 갖도록 회전자를 설계하면 자석 발생토크를 대신할 수 있어, 약자속 제어법을 이용하면 SPMSM에 비해 고속에서도 운전할 수 있다. 또한 IPMSM은 SPMSM에 비하여 높은 토크 밀도와 파워밀도를 가지고 효율이 높은 많은 장점이 있기 때문에, 그 응용분야가 점점 증가하고 다양해지고 있다. 그 대표적으로 초고속 공작기계와 같은 산업용 분야와 에어컨, 냉장고 및 세탁기와 같은 가전용 분야로 나뉠 수 있다. 초고속 공작기계에서는 IPMSM이 스피들 모터로 사용됨으로써 고속절삭이 가능하여 가공 속도를 증가시키고 절삭저항이 줄어들어 가공 정밀도도 대폭 향상된다. 에어컨과 냉장고의 경우는 고효율화가 주목표로 IPMSM으로 컴프레서를 이용할 경우 전체 운전 영역에 대하여 고효율을 얻을 수 있어 유리하다. 또한 세탁기 구동 모터인 경우는 세탁시 저속 고토크 특성과 탈수시 고속특성이 요구되므로 IPMSM 응용이 점차 증가되고 있다. IPMSM은 이상과 같이 여러 가지 장점 때문에 앞으로 응용분야는 점점 더 증가할 것으로 예상되나 BLDCM이나 SPMSM에 비해 상대적으로 구조 및 제어 시스템이 복잡하고 전동기 설계, 파라미터 및 특성 해석법, 가변속 제어 알고리즘 및 구동회로 측면에서의 종합적 연계 연구가 미비한 실정이다. IPMSM은 기본적으로 영구자석의 전기자 쇄교자속  $\Psi_a$  와 d, q축 인덕턴스인  $L_d, L_q$ 로 표현된다. 여기서  $\Psi_a$  마그네틱 토크에 기여하고,  $L_d, L_q$ 는 풀극차  $L_q - L_d$ 에 의한 릴럭턴스 토크에 영향을 미치는 파라미터이다. 따라서 이 3가지 파라미터를 알게 되면 그에 따른 IPMSM 특성을 알 수 있다. 이러한 특성 파라미터를 계산 또는 측정하는 방법중의 하나로, LC 공진법을 이용한 인덕턴스의 측정법을 IPMSM에 적용하여 계산하였다. 실험에 앞서 그 유효성을 검증하기 위하여, 유한요소법을 이용하여 외부회로와 연동하여 LC 공진법을 시뮬레이션 하였

으며, 전류 위상벡터 제어법과, 직류 전류 감소 시험법의 결과와 비교하여 그 유효성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 IPMSM 해석 모델

그림 1에 해석 모델의 단면도를 나타내었고, 표 1에 해석에 사용된 IPMSM의 제원을 나타내었다. 해석에 사용된 모델은 3상 8극 12슬롯의 모델을 사용하였으며, 상 저항은  $7.7\Omega$ 이다. 정격전류는 3.5A이며 최대 전압은 190 Vpeak 이다. 영구자석의 양쪽으로는 길이 약 6.5mm의 배리어가 있어, 영구자석으로부터의 자속이 누설되지 않고 고정자 권선과 최대한 쇄교하도록 설계되어있다. 본 모델의 기저속도는 400rpm으로 그 이상의 속도에서는 약자속 제어를 통하여 고속에서도 동작할 수 있다.

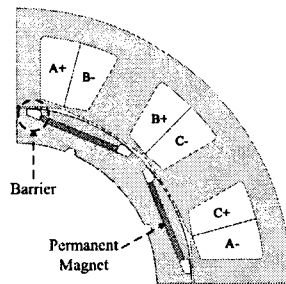


그림 1. IPMSM 해석 모델

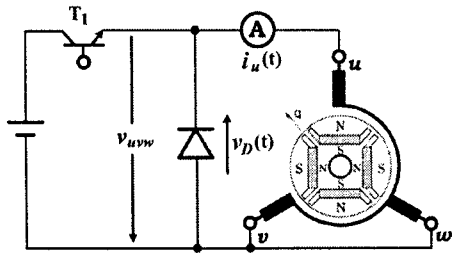
<표 1> 해석 IPMSM 사양

항목	단위	IPMSM
극수/슬롯수/상수		8 / 12 / 3
배리어 길이	mm	6.5
상 저항	$\Omega$	7.7
정격 전류	A	3.5
최대 전압	V <sub>peak</sub>	190
기저 속도	rpm	400

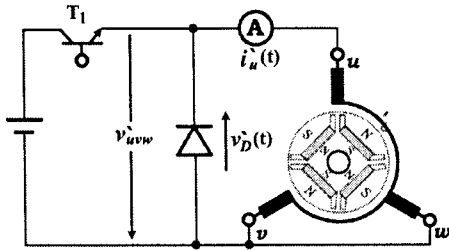
2.2 인덕턴스 측정법

2.2.1 직류 전류 감소 시험법

직류전류 전류 감소 시험법은 고정자 a상에 회전자를 d축 또는 q축으로 고정시키고, a상의 dc전류가 초기치에서 영(zero)까지 감소하는 것을 측정하여 인덕턴스를 구하는 실험법이다. 이때 철손 성분은 고려하지 않는다.



(a) d축 정렬



(b) q축 정렬

그림 2. 직류 전류 감소 시험법

그림 2에서  $T_1$ 이 꺼졌을 때 초기값 전류  $i_{ao}(i'_{ao})$ 와 식 (1)은 식 (2)로 표현되고, 고정자 저항  $R_s$ 는 직류 전류 감소 시험을 하기 전에 측정하여야 한다.

직류 전류 감소 시험법에서 그림 2의 (a)와 같이 회전자를 d축에 정렬시킨 후 초기값 전류로부터  $L_d(i_d)$ 를 구하고, (b)와 같이 회전자를 q축에 정렬시킨 후 같은 방법으로  $L_q(i_q)$ 를 구한다.

$$i_d R_s - V_d = -\frac{d\lambda_d}{dt}, \quad i_q = 0, \quad \lambda_d = L_d(i_d)i_d \quad (1)$$

$$i_q R_s - V_q = -\frac{d\lambda_q}{dt}, \quad i_d = 0, \quad \lambda_q = L_q(i_q)i_q$$

$$L_d(i_{do}) = \frac{\left[ \int_0^{\infty} \frac{2}{3} V_D(t) dt + R_s \int_0^{\infty} i_u(t) dt \right]}{i_{uo}} \quad (2)$$

$$L_q(i_{qo}) = \frac{\left[ \int_0^{\infty} \frac{2}{3} V'_D(t) dt + R_s \int_0^{\infty} i'_u(t) dt \right]}{i'_{uo}}$$

### 2.3.2 전류 위상벡터 제어법

$L_d, L_q$ 는 그림 3에 나타난 정상시의 자속벡터도와 그림 4에서의 유기전압 파형으로부터 위상차  $\alpha$ 를 구하고 이를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

① 모터단자를 개방하고, 부하축으로부터 모터를 구동한 상태를 가정하여 유한요소법으로 회전자를 회전시켜, U상 권선에 쇄교하는 자속 또는 U상의 유기전압의 변화를 계산한다.

② 모터에 전류를 흘린 상태를 가정하고, 인덕턴스를 계산하고 싶은 전류값  $I_s$ 를, 임의의 전류위상  $\beta$ 로 입력한다. ①과 같은 방법으로 회전자를 회전시키고 U상 권선에 쇄교하는 자속 또는 U상의 유기전압 변화를 계산한다.

③ ①, ②로부터 얻어진 파형의 기본파성분의 실효값  $\psi_{uo}, \psi_{uo}$  및 위상차  $\alpha$ 를 계산한다.

④ ③에서 얻어진 값으로부터 식 (3)~(5)을 이용하여 산

출한다.

$$i_d = -I_s \sin \beta, \quad i_q = I_s \cos \beta \quad (3)$$

$$\Psi_a = \sqrt{3} \Psi_{ua}, \quad \Psi_o = \sqrt{3} \Psi_{uo} \quad (4)$$

$$L_d = \frac{\Psi_o \cos \alpha - \Psi_a}{i_d}, \quad L_q = \frac{\Psi_o \sin \alpha}{i_q} \quad (5)$$

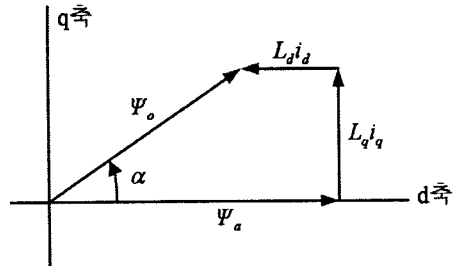


그림 3. IPMSM의 벡터도

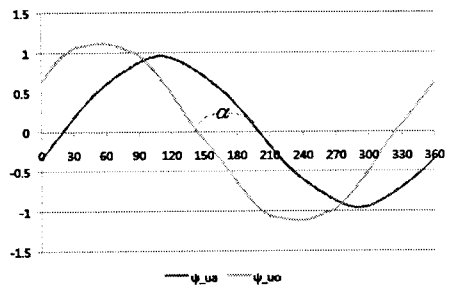


그림 4. U상 유기전압 파형

### 2.3.3 LC 발전 공진법

그림 5에 LC 발전 공진법의 결선도를 나타내었다. 모터의 출력단에 공진용 커패시터를 접속하고 한 상의 전압과 전류를 전력분석계를 이용하여 측정한다. 정확한 회전자의 위치를 파악하기 위해서 모터의 회전자에 엔코더를 부착하고 엔코더의 절대위치를 회전자의 d축에 일치시킨다. 엔코더에서 얻어진 위치 정보를 이용하여 모터에서 출력되는 전압, 전류 파형을 d축과 q축으로 분해하여 각 전압과 전류의 정확한 d축 및 q축 성분을 계산해낼 수 있다.

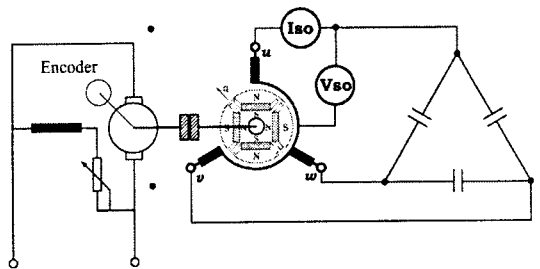


그림 5. LC 발전 공진법

회전자의 d축과 엔코더의 절대위치 펄스(z-pulse)의 발생위치를 동일하게 조정해 놓으면 회전자 회전시에도 회전자의 d축의 위치를 정확히 알 수가 있다. 따라서 z 펄스의 위치를 d축 자속의 위치로 간주할 수 있고, 그 위치를 특정 한 상 권선과 일치시켜 놓으면 무부하시 일치된 권선에 흐르는 전류를 자속분 전류, 즉 d축 전류로 간주할 수 있다. 따라서 공진 발생시에 손실분에 의한

위상의 지연은 일치된 권선의 상전류와 z 펄스를 측정하면 구할 수가 있고 측정된 위상과 전류치를 이용하여 자속분 전류와 손실분 전류를 분리하여 측정할 수 있다.

상전압 또한 마찬가지로 생각할 수 있는데, 모터의 출력단에 용량성 부하를 부착하기 때문에 진상역률이 되어 상전류와 전압이 90°의 차이를 가지게 된다. 하지만 부하단에서 적은 양이기는 하지만 소모되는 에너지가 있기 때문에 90°미만의 위상 차이를 보이게 된다. 따라서 엔코더 신호와 함께 상전압을 측정하면 이러한 부하단의 손실분까지 고려하여 d축과 q축 전압으로 분리해낼 수 있으며 이렇게 측정한 데이터로부터 d, q 동기좌표계로 변환한 전압방정식으로부터 인덕턴스를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

$$\Psi_a = \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_f = \sqrt{3} \Psi_e$$

$\Psi_e$  : U 상에 쇄교되는 전기자 쇄교자속의 실효값

$v_d, v_q$  : 전기자 전압의 d, q축 성분

$i_d, i_q$  : 전기자 전류의 d, q축 성분

$R_a$  : 권선 저항

상전압과, 상전류, 그리고 d, q축 전압, 전류의 관계는 다음과 같다.

$$V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}, \quad I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (7)$$

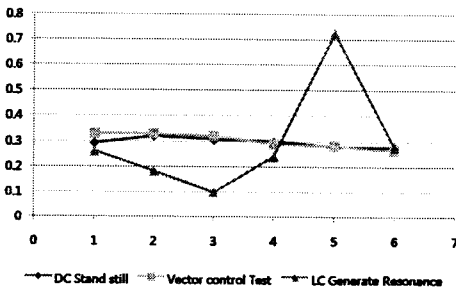
정상상태로 동작할 때는 미분항이 0이 되므로 식 (6) 으로부터 인덕턴스를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_d = \frac{V_q - R_a i_q - \omega \Psi_a}{\omega i_d}, \quad L_q = \frac{R_a i_d - V_d}{\omega i_q} \quad (8)$$

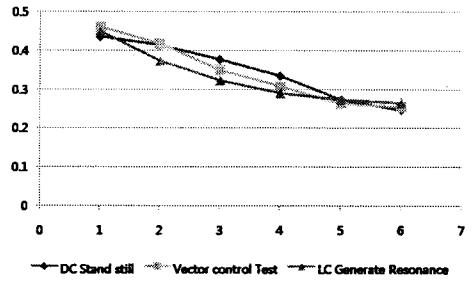
### 3. 해석 결과

해석 대상인 IPMSMd에 용량 650 uF의 커패시터를 Δ 결선하여 외부회로를 꾸몄으며, 각 전류별 인덕턴스를 계산하기 위하여, 회전속도 45rpm, 65 rpm, 80 rpm, 95 rpm, 105 rpm, 200 rpm에서 해석하였다.

그림 6에 LC 발전 공진법에 의한 인덕턴스 값을 나타내었으며, 직류 전류 감소 시험법과, 전류 벡터 제어법에 의한 결과와 비교하여 나타내었다.



(a) d축 인덕턴스



(b) q축 인덕턴스

그림 6. d, q축 인덕턴스

q축 인덕턴스의 경우는 다른 시험 방법과 그 값이 크게 다르지 않다. 하지만 d축 인덕턴스의 경우는 전류의 크기별로 그 인덕턴스차이가 크다. 이것은 공진 주파수 아래 지점에서의 d축 인덕턴스는 오차가 크다는 것을 나타내고 있다. 따라서 정확한 d축 인덕턴스 측정을 하기 위해서는, 공진주파수 근처에서의 파라미터를 해야 한다. LC 발전 공진법은 직류 전류 감소 시험법과는 다르게 교차 포화에 의한 영향을 확인할 수 있다는 장점이 있다. 또한 전류 벡터 제어법과 같이 별도의 인버터 회로가 필요하지 않고, 커패시터만으로도 간단히 실험 장비를 구축할 수 있어, 실험을 수행하기에 보다 용이하다는 장점이 있다.

### 4. 결 론

IPMSM의 정밀한 제어를 위해서는 모터 파라미터를 정확하게 파악하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 IPMSM의 인덕턴스를 측정하는 방법 중에서, LC 발전 공진 시험법을 IPMSM에 적용하여 측정하는 것을 제안하였다. LC 발전 공진 시험법은 실제 실험을 하기 앞서, 실험과 동일한 외부회로를 전자계 해석 프로그램과 연동하여 해석함으로써, 그 유효성을 증명하였다. 측정된 파라미터의 유효성을 검증하기 위하여, 벡터 컨트롤과 직류감소 시험법을 통하여 측정된 인덕턴스값과 비교하였으며, 그 결과로 보아 LC 발전 공진법의 유효성이 입증되었다. 추후로 실제 LC 발전 공진법에 대한 실험을 실시하여 해석결과와 비교할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] JoonSeon Ahn, Ki-Chan Kim, and Ju Lee, "Parameter measurement of synchronous reluctance motor using LC resonance", Journal of Applied Physics, 99권 8호, 2006
- [2] 한양대학교 에너지변환연구실 譯, "매입자석 동기모터의 설계 및 제어", 인터뷰전, 2007
- [3] I. Boldea, Reluctance Synchronous Machines and Drives, Oxford university Press Inc., New York, 1996
- [3] I. Boldea, N. Munteanu, and S. Deaconu - Distributed anisotropy rotor synchronous (DARSYN) motor-identification and performance, Record of ICEM, 1992, Manchester, UK, 13-15 Sept. 1992, vol. II, pp. 542-546