

## 교류 정지시험법을 이용한 동기형 릴렉턴스 전동기의 직접토크제어 특성 연구

윤준보, 김솔, 임진재, 이문주, 이주  
한양대학교 전기공학과

### Direct Torque Control of Synchronous Reluctance Motor Using the AC standstill Test

Jun-Bo Yun, Sol Kim, Jin-Jae Lim, Moon-Ju Lee, Ju Lee  
Dept. of Electrical Eng., Hanyang University

**Abstract** - The Synchronous inductance in Synchronous Reluctance Motor is an element that is proportional to torque, the exact value must be found for controlling and the performance development of motors.

In this paper, the inductances that are obtained by the Finite Element Method and AC standstill Test are compared each other. When controlling the direct torque, the fast response characteristics has been carried out with the inductance by the AC stanstill Test. To test the proposal controller, A Synchronous Reluctance Motor has been desinged and manufactured and the adequacy of the proposal control are comfirmed through simulations and experiments.

### 1. 서 론

동기형 릴렉턴스 전동기(SynRM)의 고정자는 기존의 동기전동기 또는 유도전동기와 동일하며, 회전자는 돌극(Saliency)을 갖는 구조로 되어있다. SynRM의 발생토크는 고정자에 의한 자속에 의해 릴렉턴스가 최소가 되는 방향으로 토크가 발생하며, 그 크기는 회전자의 최대 인덕턴스와 최소 인덕턴스의 차인 돌극비(Saliency Ratio)에 비례한다[1]~[3].

최근 전력전자 기술의 발달로 직류 전동기보다 교류 전동기의 사용이 늘게 되었고, 벡터제어 이론을 도입한 교류 전동기 제어가 여러 분야에서 이용되고 있지만, 벡터제어는 알고리즘이 복잡하고, 연산시간이 많이 요구되는 등의 단점이 있어서 최근에는 최적 스위칭 테이블에 의한 단순 디지털 제어 구조를 가지는 직접 토크제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4][5].

따라서 직접 토크 제어로 전동기를 제어하는데 있어서 정확한 인덕턴스를 구하는 것이 필수적이다[6][7].

본 논문에서는 인덕턴스 값을 구하는 여러 시험법 중 운전 상태 시험법에 비해 철손의 영향이 적고, 실험이 간단한 교류 정지 시험법을 이용하여 인덕턴스를 구했다. 교류 정지 시험값을 유한 요소법에 의한 계산치와 비교 검토하였다. 또한 교류 정지 시험값을 사용하여 직접 토크 제어 시뮬레이션을 수행하였고, TMS320C32 DSP를 사용하여 실험을 통해 직접 토크 제어의 타당성을 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 SynRM의 수학적 모델링

그림 1은 3상 동기형 릴렉턴스 전동기 등가 모델이고, 그림 2는 이상적인 SynRM의 d축, q축 등가회로를 나타낸 것이다.

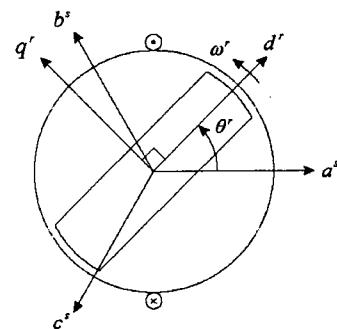


그림 1. 2극 3상 SynRM의 등가모델

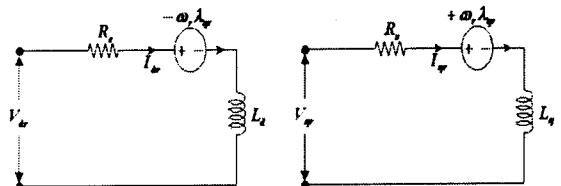


그림 2. 이상적인 SynRM의 d축, q축 등가회로

SynRM의 전압 방정식을 회전 좌표계로 표시하면 식 (1)이 되고, 쇄교자속과 토크는 식 (2), (3)으로 표현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d + L_d \frac{d}{dt} & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_q + L_q \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\lambda_d = L_d I_d \quad \lambda_q = L_q I_q$$

$$\lambda = \sqrt{(L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (2)$$

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

#### 2.2 교류 정지 시험법

SynRM의 인덕턴스 측정방법에는 정지 상태 시험법과 운전 상태 시험법이 있다.[8] 운전 상태 시험법은 철손의 영향이 크며 시험이 복잡한 반면, 정지 상태 시험법은 철손의 영향이 적고 실험이 간단하여 인덕턴스 측정에 많이 사용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 정지 상태 시험법 중 교류 정지 시험법으로 인덕턴스를 측정하였다. 교류 정지 시험법은 그림3과 같이 전동기 권선의 b,

c를 단락 시킨 상태에서 교류 전원을 인가하여 a상 전류, a상 전압, 그리고 입력을 측정하여 식 (4)로부터 인덕턴스를 구한다.

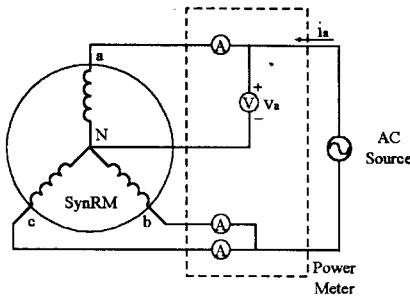


그림 3. 교류 정지 시험법 실험 구성

$$Q_a = \sqrt{(V_a I_a)^2 - P_a^2} \quad X_i = \omega L_i = 2\pi f L_i \\ E = \sqrt{V_s^2 + (R_s^2 + X_i^2) I_a^2} - 2(R_s P_a + X_i Q_a) \\ L_{dq} = L_{dqm} + L_i = \frac{E^2}{\omega(Q_a - X_i I_a^2)} + L_i \quad (4)$$

여기서 기호에 대한 설명은 다음과 같다.

$P_a, Q_a, Q_a$ : 유효전력, 무효전력, 누설 리액턴스  
 $R_s, L_i$ : b, c상 단락시 선간 저항, 누설 인덕턴스  
 $L_{dq}, L_{dqm}$ : d, q축 인덕턴스, d, q축 자화 인덕턴스  
 $V_a, I_a$ : 인가 상전압, 인가 상전류

그림 4는 교류 정지 시험법을 통해 얻은  $L_d$ ,  $L_q$ 와 돌극비, 인덕턴스 차를 나타낸 그래프이다. 적은 전류에서는 자기포화가 일어나지 않으므로  $L_d$ ,  $L_q$  모두 정상적인 값을 갖지 않는다. 즉  $L_d$ 는 적은값을  $L_q$ 는 회전자의 립에서 아직 자기포화가 일어나기 전이므로 큰 값을 가지고 있다.

$L_d$ 의 경우 1.0[A]정도에서 포화가 일어나 감소하기 시작하지만  $L_d$ - $L_q$ 는 1.5[A]까지 증가하는 것을 나타낸다. 보통 교류 정지 시험법에서 주요한 실현상의 오차는 인가 전압의 왜곡과 철손때문인데, 특히 철손의 경우 회전자가 구속되어 있기 때문에 실제 구동 될 때와는 다르게 회전자 축에도 철손이 발생하게 된다. 따라서 본 논문서 사용된 교류 정지 시험법에서는 철손을 감안한 식 (4)를 사용하여도 d축 인덕턴스에 약간의 오차가 있다.

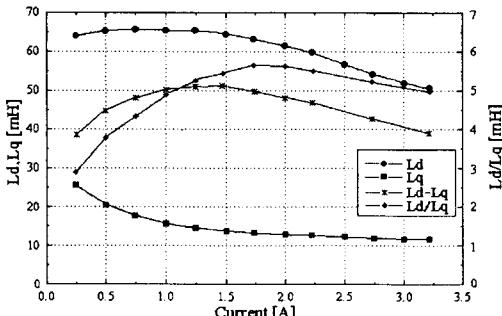


그림 4. 교류 정지 시험법의 d, q축 인덕턴스 및  $L_d-Lq$ ,  $L_d/Lq$

표 1은 앞에서 서술한 교류 정지 시험법과 유한 요소

법으로 구한 인덕턴스를 비교한 결과이다. 교류 정지 시험법은 유한 요소법에 의한 인덕턴스 값에 대해 표와 같은 오차를 보여준다. 이것은 인가전압의 왜곡과 철손의 문제에서 발생한 것이고, 철손의 영향을 받지 않기 위해서는 낮은 주파수의 저 전압을 인가하여야 한다.

표 1. 인덕턴스 측정 결과 비교

전류	측정법 인덕턴스	측정법	
		유한요소법	교류시험법
1[A]	$L_d$ [mH]	72.22	65.85
	$L_q$ [mH]	20.10	17.60
2[A]	$L_d$ [mH]	65.05	61.51
	$L_q$ [mH]	13.60	12.92
3[A]	$L_d$ [mH]	56.01	54.20
	$L_q$ [mH]	12.13	11.41

### 2.3 SynRM의 직접 토크 제어

직접 토크 제어는 각 샘플링 시간동안, 적절한 전압벡터가 토크와 고정자 쇄교자속의 순시 오차 값이 히스테리시스밴드 내에 존재하도록 선택되어진다.

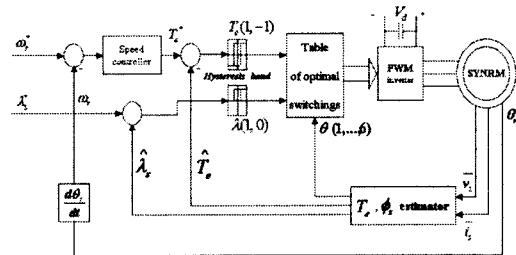


그림 6. 속도 제어시 직접 토크제어의 구성도

그림 6은 SynRM의 속도 제어시의 직접 토크 제어원리를 보여준다. 피드백 되는 실제 토크와 고정자 쇄교자 속은 기준 토크  $T^*$ 과 기준 고정자 쇄교자속  $\lambda^*$ 과 비교하여 그 오차값이 히스테리시스 제어기에 입력된다. 최적의 스위칭 전압벡터는 기준 토크와 기준 고정자 쇄교자속에 의해 설정된 히스테리시스 밴드내에서 실제 토크와 실제 고정자 쇄교자속이 항상 존재하도록 선택되어진다. 최적의 스위칭 벡터 테이블의 입력으로 토크 및 쇄교자 속 오차, 위치정보  $\theta$ 가 주어지고, 출력으로 스위칭 정보에 따른 전압벡터가 인버터에 인가된다.

일반적으로 직접 토크제어는 토크 추정시 전류와 쇄교자속을 이용하는데 고정자 쇄교자속은 전압 방정식으로부터 구할 수 있으며, 각 샘플링 시간동안 전압 벡터는 항상 일정하고 전동기의 정수는 고정자 저항뿐이므로 계산이 간단해 진다.

### 2.4 Simulation

본 논문에서 제안된 교류 정지 시험법을 이용한 직접 토크제어의 타당성을 검증하기 위해 디지털 시뮬레이션을 수행하였다. 전동기의 모델은 제작된 SynRM을 사용하였고 각 파라미터의 값들은 표 2와 같다.

표 2. SynRM 모델의 주요사양

항 목	값	단위	항 목	값	단위
정격 출력	220	W	정격 속도	2500	rpm
정격 전압	220	V	회전자 적층길이	50	mm
1차 저항	4.2	[Ω]	공극 길이	0.32	mm
극 수	4	Poles	자속 장벽의 수	3	EA
상 수	3	Phase	슬롯수	24	EA

시뮬레이션은 시뮬레이션 전용 프로그램인 ASCL(Advanced Simulation Continuous Language)을 사용하여 구현하였다. 시뮬레이션 시 직류 링크단 전압은 300 [V]로 설정하였다. 이는 220 [V]의 전원 전압을 다이오드 정류기로 정류한 경우 이상적으로는 직류 링크단 전압은 약 310 [V] 정도가 되지만 실제로는 전력용 반도체 소자의 전압 강화와 데드 타임의 영향으로 인하여 직류 링크 전압을 완전히 이용할 수 없으므로 이를 고려하여 300 V로 설정하였다.

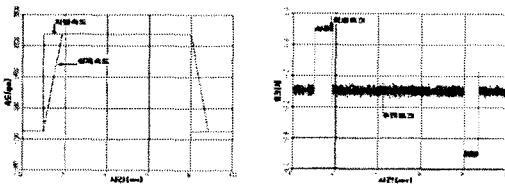


그림 7. 무부하 속도제어시 속도 및 토크 응답

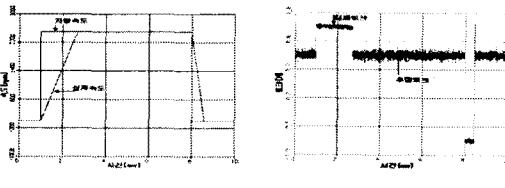


그림 8. 부하 속도 제어시 속도 및 토크 응답

그림 7은 직류 토크 제어의 무부하 0.01Nm에서의 속도제어시 속도 및 토크 시뮬레이션 파형을 보여준다. 정격속도인 2500rpm의 지령 속도에 따라 실제 속도 제어가 잘 되었으며 토크 역시 추정 토크에 따라 실제 토크 제어가 잘 되었다.

본 논문에서 제안된 교류 정지 시험법에 의해 구한 전류에 따른 인덕턴스 값을 토크 계산시에 직접적으로 사용하여 추정토크에 따른 실제 토크가 계산되었다. 그림 8에서는 정격부하 0.4Nm에서의 속도 제어시 속도와 토크 파형을 보여주고 있는데 무부하시와 마찬가지로 지령 속도에 따른 실제속도와 토크제어가 잘 되는 것을 알 수 있다.

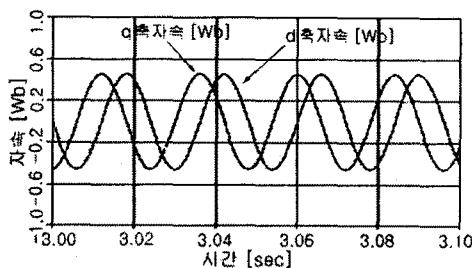


그림 9 속도 제어시 고정자 쇄교 자속

그림 9는 속도 제어시 고정자 쇄교자속 파형이며, 토크 히스테리시스 밴드폭이 득 값을 고정자 자속 히스테리시스 밴드폭 이득 값을 각각 0.1과 0.05로 설정하였다.

## 2.5 실험 결과

동기형 릴렉턴스 전동기는 직입기동이 불가능한 구조로 되어 있으므로 TMS320C32 DSP를 사용하여 직접 토크 제어의 성능과 신뢰성을 검증하였고, 회전자 위치 검출을 위해 엔코더를 사용하였다.

속도는 2500rpm으로 설정하였고, 무부하시 0.01Nm과 0.4Nm 부하시의 속도 제어 직접 토크 제어 실험을 하였다.

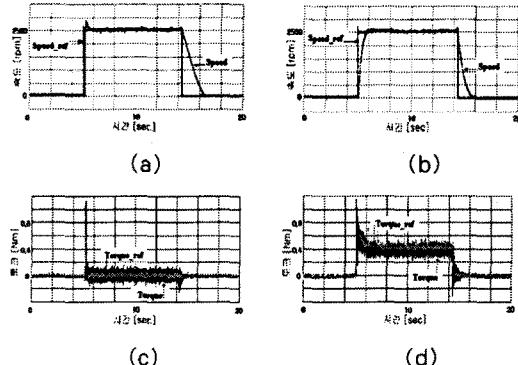


그림 9. 무부하 & 부하 속도제어시 속도 및 토크 응답

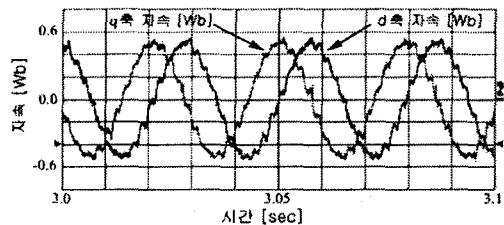


그림 10. 속도 제어시 고정자 쇄교자속

그림 9는 실험에 의한 무부하 및 부하 속도제어시 속도 및 토크 응답특성을 보여 주며, 부하는 히스테리시스 제동기를 사용하였기 때문에 토크파형이 시뮬레이션 파형과 차이가 있다. 그림 10은 고정자 쇄교자속 실험파형이며, 시뮬레이션과 거의 일치함을 알 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 쇄교자속 및 토크에 직접적인 영향을 주는 인덕턴스 값을 교류 정지 시험법을 사용하여 간단하게 구하여 SynRM의 직접 토크제어기를 통한 구동 방법을 제시하였으며, 시뮬레이션 및 실험을 통해 직접 토크제어시 빠른 응답특성을 보임을 검증하였다.

## (참 고 문 헌)

- [1] I. Boldea,"Reluctance Synchronous Machines and Drives," Oxford university Press Inc., New York, 1996.
- [2] R.E. Betz, "Control of Synchronous Reluctance Machines" IEEE-IAS Annual Meeting, Detroit, pp.456-462, Sep.1991.
- [3] T.A.Lipo, A.Vaqati,L.Malesani, and T.Fukao,"Synchronous Reluctance motors and drives a new alternative," IEEE-IAS Annual Meeting, Tutorial, Oct. 1992.
- [4] Peter Vas,"Sensorless Vector and Direct Torque Control," Oxford Press, 1998.
- [5] M.R. Zolghadri, D.Diallo, D. Roye, "Direct Torque Control System for Synchronous Machine," EPE'97, Trondheim, pp.3.694-3.699, 1997.
- [6] M. Jovanovic, "Sensorless control of synchronous reluctance motor," Ph.D. thesis, University of Newcastle, 1997.
- [7] V.B.Honsinger,"The inductance  $L_d$  and  $L_q$  of reluctance machines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS-90, no. 1, pp. 298-304.197.
- [8] E. A. Klingshirn, "DC standstill torque used to measure  $L_d$  og reluctance and synchronous machine," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 5, pp. 1862-1869, 197