

유한요소법을 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 직접토크제어 특성에 관한 연구

이문주*, 김솔*, 이주*, 고권민**, 김태덕**, 오상경**
 * : 한양대학교 전기공학과, ** : 삼성전자

Direct Torque Control of a Synchronous Reluctance Motor Using the Finite Element Method

Moon-Ju Lee*, Sol Kim*, Ju Lee*, Kwon-Min Ko*, Tea-Duk Kim*, Sang-Kyeong Oh*.
 * : Dept. of Electrical Eng., Hanyang University., ** : Samsung Electronics.

Abstract - Reluctance torque is generated by the rotor of the rugged construction in Synchronous Reluctance Motor. Its construction is simple, and it is very economic because a rotor in existed AC motor can be used. As the Synchronous inductance in Synchronous Reluctance Motor is an element that is proportional to torque, the exact value must be experimentally or analytically found for controlling and the performance development of motors.

In this paper, direct torque control simulation to maximize the torque of the Synchronous Reluctance Motor and fast response characteristics was carried out with the inductance value by the Finite Element Method. For the simulation results, there are torques and fluxs response characteristics when controlling speed.

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 회전자의 돌극구조에 의한 릴럭턴스 토크가 발생하는 전동기로서 회전자에 영구자석이나 권선이 없어 구조가 간단하여 고속 또는 장시간의 운전이 가능하며, 기존 교류전동기의 고정자를 이용할 수 있어 경제적이고, 정현파 회전자계를 가지므로 유연한 토크특성 및 정속 운전이 가능하다. [1]~[3]

이러한 장점에도 불구하고 오랫동안 저 효율, 저 출력 특성으로 크게 실용화되지 못했으나 최근의 많은 관심과 연구로 단점이 보완되면서 많은 관심을 받고 있다.

SynRM은 동기 인덕턴스가 토크에 비례하는 요소이므로 전동기의 제어 및 성능 향상을 위해 실험 또는 해석적으로 정확한 인덕턴스 값을 구해야 한다.[4][5]

그러나, 실험적으로 구할 경우 오차 값이 크고, 철손 및 포화현상등의 여러 가지 고려해야할 사항이 많으므로 유한 요소법에 의해 구한 인덕턴스 값을 제어에 적용하여 효율성을 높일 수 있다. 또한, 전력전자 기술의 발달로 산업분야에서는 직류전동기의 분야가 교류전동기로 대체되면서 벡터제어 이론을 도입한 교류전동기 제어가 여러 분야에서 사용되고 있다.

하지만, 벡터제어의 경우 제어 알고리즘이 복잡하고, 산술연산에 많은 시간이 요구되는 등 건설한 제어기 구현이 어려우므로 최근에는 복잡한 제어연산을 구현하지 않아도 최적의 스위칭 테이블에 의한 단순한 디지털 형태의 제어구조를 갖는 직접 토크제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[6][7]

따라서, 본 논문에서는 유한 요소법에서 구한 인덕턴스 값을 사용하여 SynRM의 빠른 토크응답 특성을 위한 직접 토크제어 시뮬레이션을 수행하였으며, TMS320C32 DSP을 사용하여 실험을 통해 직접 토크제어의 타당성을 검증하였다. 결과로서 속도 제어시 토크 및 자속의 응답 특성을 보인다.

2. 본 론

2.1 SynRM의 수학적 모델링

그림 1은 동기좌표계로 나타낸 SynRM의 전류 및 쇠교자속의 공간벡터도를 나타낸 것이다.

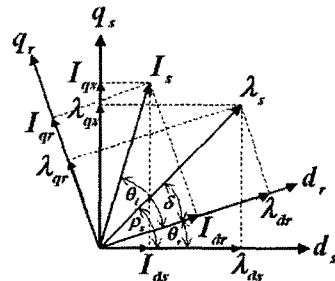


그림 1. SynRM의 전류 및 쇠교자속 공간벡터도

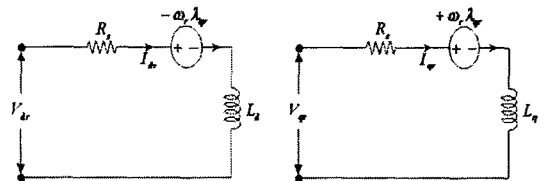


그림 2. SynRM의 이상적인 등가회로

그림 2는 SynRM의 이상적인 등가회로이며, 자기포화를 무시한 전압방정식 및 운동방정식을 동기좌표계로 표현하면 식(1),(2)가 되고, 쇠교자속과 토크는 식(3),(4) 유도할 수 있다.

$$V_{dr} = R_s I_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - \omega_r \lambda_{qr} \quad (1)$$

$$V_{qr} = R_s I_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + \omega_r \lambda_{dr}$$

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega_r}{dt}, \quad \omega_r = \int \left(\frac{T_e - T_l}{J} \right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= L_s I_{ds} + L_{md} I_{ds} = L_d I_{ds} \\ \lambda_{qs} &= L_s I_{qs} + L_{mq} I_{qs} = L_q I_{qs} \\ |\lambda_s| &= \sqrt{(\lambda_{ds})^2 + (\lambda_{qs})^2} \\ &= I_s \sqrt{(L_d)^2 \sin^2 \theta_i + (L_q)^2 \cos^2 \theta_i} \end{aligned} \quad (3)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) I_{dr} I_{qr} \quad (4)$$

$$= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) I_s^2 \frac{\sin(2\theta_i)}{2}$$

2.2 SynRM 특성 해석

SynRM의 설계시 고려할 변수들은 고정자의 슬롯과 공극, 회전자와 리프와 자속장벽이다. 인덕턴스의 차와 비를 증가시켜 고 토크·고 역률 특성을 얻기 위해 이들 주요 변수들의 최적값을 결정해야 한다.

표 1은 본 연구에 적용된 SynRM의 해석모델 사양이며, 유한 요소법을 이용한 해석에 따른 d, q축 자속분포와 전류에 따른 인덕턴스를 그림 3과 같이 구하였다.

표 1. SynRM의 주요사양

항목	값	단위	항목	값	단위
정격 출력	220	W	정격 속도	3600	rpm
정격 전압	220	V	회전자 적층길이	50	mm
1차 저항	4.2	[Ω]	공극 길이	0.32	mm
극수	4	Poles	자속 장벽의 수	3	개
상수	3	Phase	슬롯수	24	개

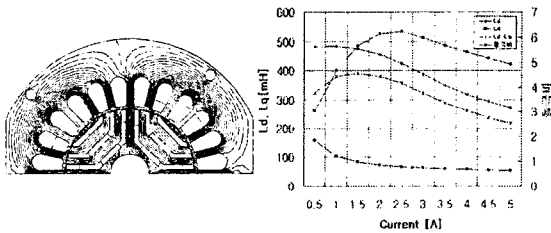


그림 3. d, q축 자속분포 및 전류에 따른 인덕턴스 특성

유한 요소법에 의한 해석결과 d, q축 인덕턴스의 차이가 가장 큰 곳은 전류가 1.5 A에서 최대 값을 보이고, d, q축 인덕턴스의 돌극비는 2.5A에서 최대값을 갖는다. 즉 제어시 최대토크 및 최대역률을 얻기 위해서는 1.5 A~2.5 A의 전류가 인가될 때임을 유추할 수 있다.

2.3 SynRM의 직접 토크제어

직접토크제어는 각 샘플링 시간동안, 적절한 전압 벡터가 토크와 고정자 쇄교자속의 순시오차값이 히스테리시스 밴드 내에 존재하도록 선택되어 진다.

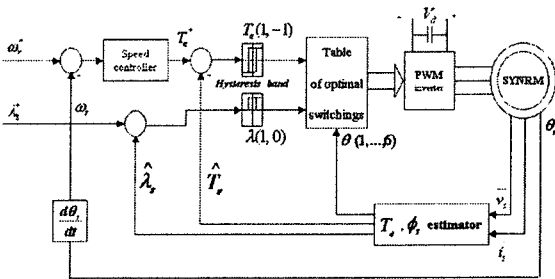


그림 4. 속도제어시 직접 토크제어의 구성도

그림 4는 SynRM의 속도제어시 직접토크제어원리를 보여준다. 피드백 되는 실제토크와 고정자 쇄교자속은

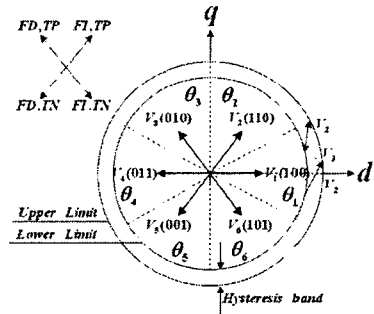
기준토크 T_e^* 와 기준고정자 쇄교자속 λ_s^* 와 비교하여 그 오차값이 히스테리시스 제어기에 입력된다.

최적의 스위칭 전압벡터는 기준토크와 기준 고정자 쇄교자속에 의해 설정된 히스테리시스 밴드내에서 실제 토크와 실제 고정자 쇄교자속이 항상 존재하도록 선택되어 진다. 표 2는 최적의 스위칭 벡터 테이블을 보여주며, 스위칭 테이블의 입력으로 토크 및 쇄교자속오차, 위치정보 θ 가 주어지고, 출력으로 스위칭 정보에 따른 전압벡터가 인버터에 인가된다.

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

표 2. 최적의 스위칭 전압벡터 테이블

ϕ	T	θ					
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	1	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$
	-1	$V_4(100)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_5(010)$	$V_6(011)$	$V_3(001)$
0	1	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$
	-1	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$



FI: flux increase; FD: flux decrease
TP: torque positive; TN: torque negative

그림 5. 고정자 자속벡터의 움직임

고정자 쇄교자속의 크기를 제어하기 위한 전압벡터는 그림 5와 같이 6개의 영역으로 나누며, 각 영역에서는 최소의 스위칭 주파수를 발생하는 2개의 전압벡터가 고정자 쇄교자속의 크기를 제어하기 위해 선택된다. 즉, 회전방향이 반시계 방향이고, 고정자 쇄교자속이 영역 θ_1 에 위치한다면, 전압벡터 V_2 와 V_3 가 λ_s 의 크기를 증가 혹은 감소시키기 위해 선택된다.

2.4 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 ASCL(Advanced Simulation Contin Language)을 사용하였고 유한 요소법에 의해 구한 d, q축 인덕턴스를 사용하여 자속을 계산하였다

속도제어에 따른 직접 토크제어는 그림 4와 같이 구성하였다. 실제 속도에 따른 지령속도의 오차는 PI제어에 의해 추정토크를 발생하고 전동기의 실제 발생토크는 연산되어진 추정토크에 추종하게 되어 속도제어가 이루어 진다.

직접 토크제어의 무부하 속도제어시 속도 및 토크 시뮬레이션 파형과 부하시의 속도제어에 의한 속도와 토크

시뮬레이션 파형을 그림 6에서 보여준다.

그림 7은 속도 제어시 고정자 쇄교자속파형이며, 토크 히스테리시스 밴드폭 이득값과 고정자 자속 히스테리시스 밴드폭 이득값은 각각 0.1와 0.05로 설정하였다.

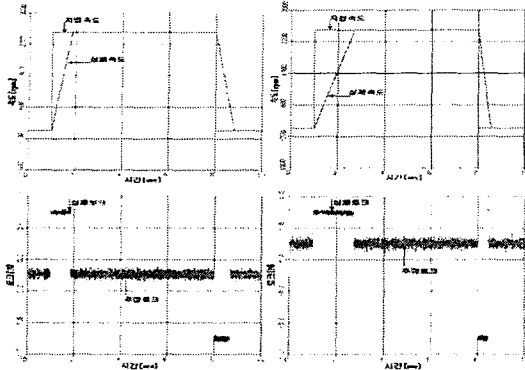


그림 6. 무부하 & 부하 속도제어시 속도 및 토크 응답

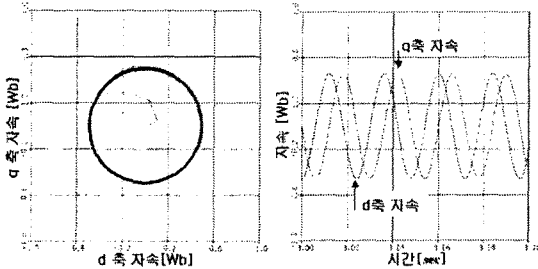


그림 7. 속도제어시 고정자 쇄교자속

지령속도는 2500(rpm)을 기준으로 하였으며, 무부하, 하시 모두에서 토크응답 및 자속응답이 거의 일정한 밴드폭에서 제어가 됨을 알 수 있다.

2.4. 실험 결과

본 논문에서 제시한 직접 토크제어의 성능과 신뢰성을 검증하기 위해 그림 8과 같이 TMS320C32 DSP를 사용하여 실험하였으며, 회전자 위치검출을 위해 엔코더를 사용하였다.

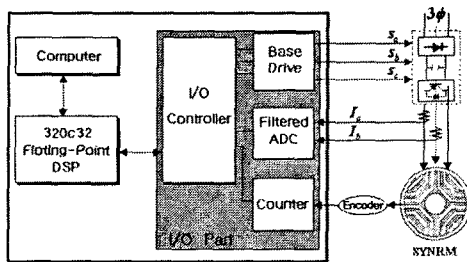


그림 8. 실험 장치 구성도

제어기의 제어 입력에 의해 동기형 릴럭턴스 전동기에 전력을 공급하는 인버터 주회로부, 속도와 상전류 검출부, 기타 변수들의 감시기능을 하는 I/O부, 직접 토크제어 및 PI제어 등의 알고리즘을 수행하는 DSP부가 있다. SynRM이 시작기임을 감안하여 속도는 2500rpm을 설정하였으며, 무부하시 0.01Nm와 0.4Nm부하시의 속도제 직접 토크제어 실험을 수행하였다.

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.

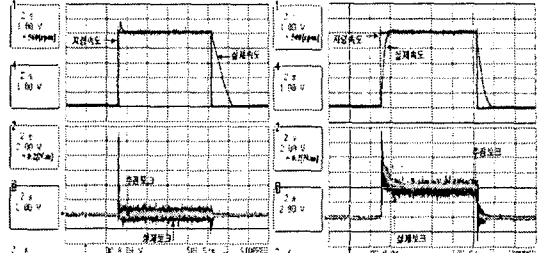


그림 9. 무부하 & 부하 속도제어시 속도 및 토크 응답

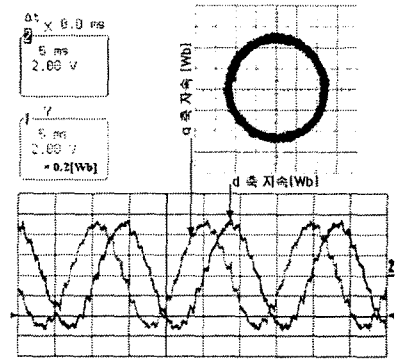


그림 10. 속도제어시 고정자 쇄교자속

3. 결론

본 논문에서는 쇄교자속 및 토크에 직접적인 영향을 주는 인덕턴스 값을 유한 요소법을 사용하여 간단하고 보다 정확하게 구하여 SynRM의 직접 토크제어를 통한 구동 방법을 제시하였으며, 시뮬레이션 및 실험을 통해 직접 토크제어시 빠른 응답특성을 보임을 검증하였다. 그러나, 토크리플이 큰 것은 직접토크제어의 단점으로서 개선해야 할 과제이며, 향후 경제성을 고려한 Sensorless 직접 토크제어 알고리즘 등의 연구가 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] I. Boldea, "Reluctance Synchronous Machines and Oxford university Press Inc., New York, 1996.
- [2] R.E. Betz, "Control of Synchronous Reluctance Ma IEEE-IAS Annual Meeting, Detroit, pp.456-462, Se
- [3] T.A.Lipo, A.Vaqati, L.Malesani, and T.Fukao, "Syn Reluctance motors and drives a new alterna IEEE-IAS Annual Meeting, Tutorial, Oct. 1992.
- [4] M. Jovanovic, "Sensorless control of synchr reluctance motor," Ph.D. thesis, University of New 1997.
- [5] V.B.Honsinger, "The inductance L_d and L_q of relu machines," IEEE Transactions on Power Apparatu Systems, vol PAS-90, no. 1, pp. 298-304, 197.
- [6] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque C Oxford Press, 1998.
- [7] M.R. Zolghadri, D.Diallo, D. Roze, "Direct Torque System for Synchronous Machine," EPE'97, Trond pp.3.694-3.699, 1997.