

SRM의 비선형적인 인덕턴스 측정방법

노정민, 김재혁
원광대학교

Non-linear Inductance Measurement of a Switched Reluctance Motor(SRM)

Jeongmin Noh, Jaehyuck Kim
Wonkwang University

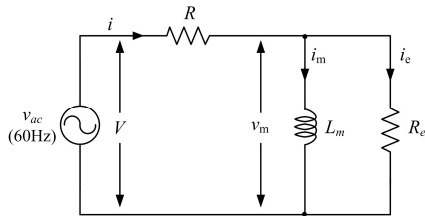
Abstract - 본 논문은 Switched Reluctance Motor(SRM)의 보다 정확한 제어를 위한 인덕턴스 측정에 대해 설명한다. 기존의 인덕턴스 측정방법에는 등가회로를 이용하여 측정하는 방법과 시정수를 이용하여 측정하는 방법이 사용되어왔고 본 논문에서는 기존의 인덕턴스 측정방법과 자동화된 전압적분법을 이용하여 인덕턴스를 측정하였고 실제 측정 데이터 및 유한요소해석(FEA : Finite Element Analysis) 데이터와의 비교를 통하여 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

SRM은 저렴하고 친환경적이면서도 직류직권전동기와 유사한 속도-토크 특성을 가지고 있어 다양한 분야에 적용되고 있다. 단점인 고유의 토크 리플과 소음문제는 지속적인 연구개발을 통하여 개선되고 있다.[1] 이러한 SRM의 최적제어를 위해서는 필수적으로 정확한 인덕턴스의 값을 측정하는 것이 중요하다. SRM의 인덕턴스는 회전자 위치와 여자 전류의 함수로써 드라이브의 성능을 결정하는 중요한 파라미터이다.[2] 본 논문에서는 등가회로를 이용한 측정법(ECM : Equivalent Circuit Method)과 시정수를 이용한 측정법(TCM : Time Constant Method), 전압 적분법(VIM : Voltage Integration Method)을 비교분석하였다.

2. 등가회로를 이용한 SRM의 인덕턴스 측정법

와전류를 고려한 SRM의 한 상의 등가회로를 이용하여 인덕턴스를 측정하는 방법[3]은 <그림 1>에 도시된 바와 같다.



<그림 1> 와전류가 포함된 SRM 한 상의 등가회로

여기서 V 는 입력전압(v_{ac})의 실효치, i 는 상전류, v_m 은 권선의 유도성 전압, i_m 은 자화 전류, i_e 는 와전류, R 은 고정자 권선의 저항, R_e 는 와전류가 흐르는 저항, L_m 고정자 권선의 인덕턴스이다.

<그림 1>의 등가회로에서의 전력 관계는 다음과 같다.

$$P = P_R + P_{R_e} = I^2 R + I_e^2 R_e \quad (1)$$

$$P_{R_e} = P - P_R \quad (2)$$

여기서 P 는 전체 유효전력(W), P_R 은 동손(W), P_{R_e} 는 와전류손(W)이다. v_m 과 P_{R_e} 의 관계는 다음과 같다.

$$v_m = v - iR, \quad P_{R_e} = \frac{v_m^2}{R_e} \quad (3)$$

여기서 V_m 은 v_m 의 실효치이며, R_e 은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$R_e = \frac{V_m^2}{P_{R_e}} \quad (4)$$

옴의 법칙에 의하여 아래와 같이 와전류와 자화전류를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$i_e = \frac{v_m}{R_e} \quad (5)$$

$$i_m = i - i_e \quad (6)$$

최종적으로 고정자 권선의 인덕턴스는 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$L_m = \frac{V_m}{\omega I_m} \quad (7)$$

3. 전압적분법을 이용한 SRM의 인덕턴스 측정법

SRM의 전압방정식을 적분하여 쇄교자속을 얻는 방법[4]을 이용하여 인덕턴스를 계산하는 전압적분법은 다음과 같다.

$$\frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} = v - Ri \quad (8)$$

여기서, λ 는 쇄교자속, i 는 상전류, θ 는 회전자 위치각이다.

$$\lambda_\theta(i(t_f)) = \int_{t_0}^{t_f} (v(t) - Ri(t)) dt \quad (9)$$

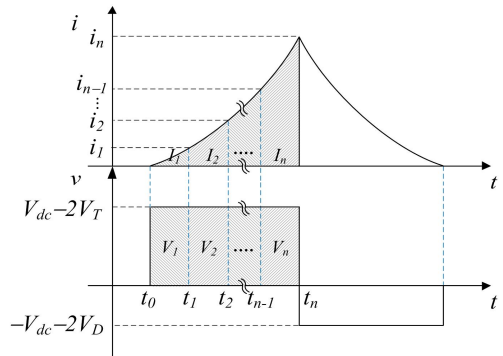
인덕턴스는 식(9)의 쇄교자속을 전류로 나누어 얻을 수 있다.

$$L_\theta(i(t_f)) = \frac{\lambda_\theta(i(t_f))}{i(t_f)} \quad (10)$$

식(9) 우변의 적분은 <그림 2>와 같이 상전압과 상전류 파형의 정적분을 통하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\lambda_\theta(i_k) = \sum_{j=1}^k (V_j - I_j R) \quad (11)$$

여기서 $i_k (k=1, 2, \dots, n)$ 는 측정하고자하는 상전류 지령치(i_1, i_2, \dots, i_n)이며, 최대지령전류를 i_n 로 설정한다. 상권선에 전압을 인가하면 전류가 상승하면서 i_n 에 도달할 때까지 각 전류지령치에 도달할 때마다 그 구간($t_{k-1} < t < t_k$)에서의 상전류와 상전압 파형의 면적은 각각 V_k 과 I_k 이다.



<그림 2> 전압적분법에 의한 SRM의 상전압 및 상전류 파형

4. 시정수를 이용한 SRM의 인덕턴스 측정법

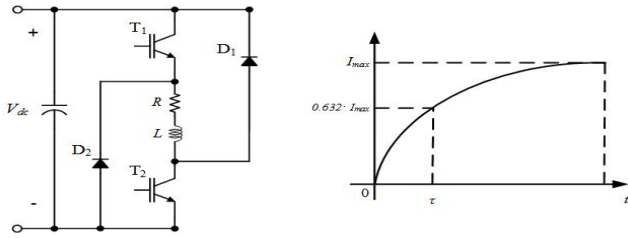
SRM의 한상에 흐르는 전류의 시정수를 이용하여 인덕턴스를 구하는 방법은 <그림 3>에 도시된 바와 같다.

$$V_{dc} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (12)$$

여기서, V_{dc} 는 입력전압, R 은 고정자 권선의 저항, T_1, T_2 는 스위치, i 는 상전류, L 은 인덕턴스이다. 스위치 T_1, T_2 On 일 때 최종전류(I_{max})의 63.2%에 도달하는 시간 τ 에서 인덕턴스를 산출한다.

$$I = \frac{V_{dc}}{R} (1 - e^{-tR/L}) \quad (13)$$

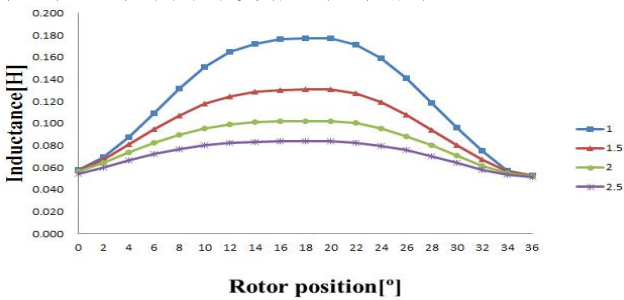
이때 시정수 $\tau = \frac{L}{R}$ 이며 인덕턴스 $L = R \cdot \tau$ 이다.



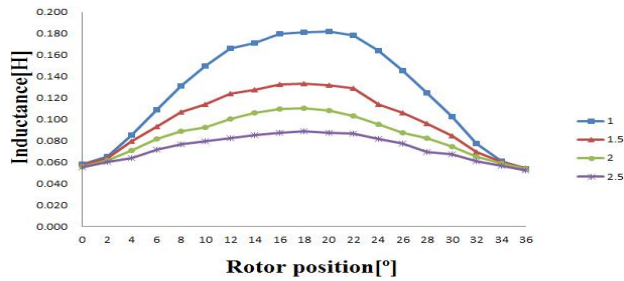
〈그림 3〉 SRM 한상의 등가회로와 시정수를 구하는 전류 파형

3. 실험 결과

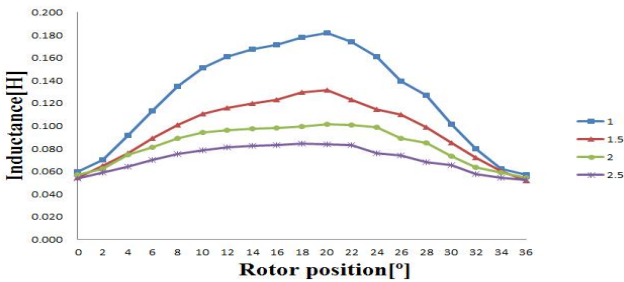
본 논문에서 소개된 ECM, VIM, TCM을 이용한 기존의 인덕턴스 측정 방법으로 측정하였고 FEA 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 인덕턴스 측정에 사용한 2상 8/10 SRM의 여자주기는 36°이므로 2°씩 회전자 위치를 변화시켜 인덕턴스를 측정하였다. 아래 실험 결과에서 보여주는 바와 같이 FEA와 세가지 측정방법을 비교해보았다.



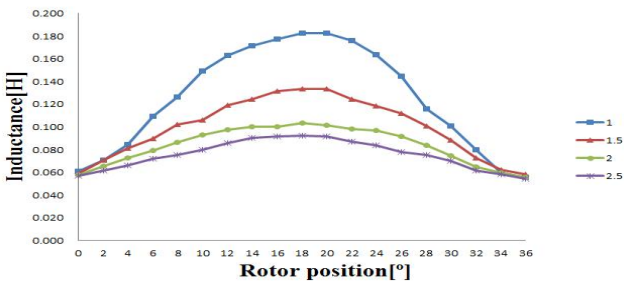
〈그림 4〉 FEA를 이용한 시뮬레이션



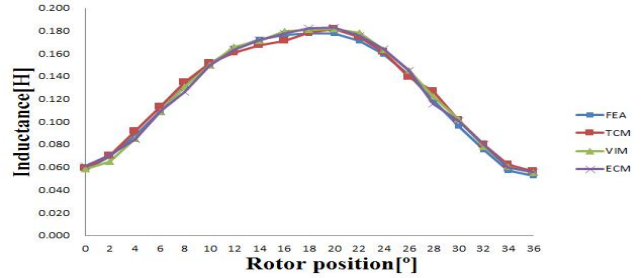
〈그림 5〉 VIM을 이용한 시뮬레이션



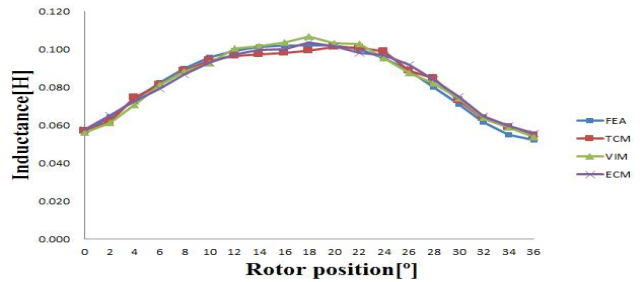
〈그림 6〉 TCM을 이용한 시뮬레이션



〈그림 7〉 ECM을 이용한 시뮬레이션



〈그림 8〉 1A 측정 결과 비교



〈그림 9〉 2A 측정 결과 비교

〈표 1〉 FEA와 ECM, VIM, TCM의 오차 비교

Current [A]	Position [°]	Measuring Method				ECM Error [%]	VIM Error [%]	TCM Error [%]
		ECM [H]	VIM [H]	TCM [H]	FEA [H]			
1	0	0.0559	0.0534	0.0568	0.0526	6.27	5.32	7.89
	4	0.0802	0.0781	0.0802	0.0752	6.65	3.86	6.66
	8	0.1158	0.1225	0.1267	0.1187	2.44	3.20	6.73
	12	0.1638	0.1632	0.1613	0.1594	2.76	2.38	1.18
	16	0.1826	0.1817	0.1816	0.1774	2.93	2.42	2.37
2	0	0.0558	0.0536	0.0546	0.0523	6.69	2.49	4.42
	4	0.0649	0.0639	0.0637	0.0617	5.19	3.57	3.21
	8	0.0841	0.0821	0.085	0.08	5.13	2.63	6.25
	12	0.0968	0.0953	0.0989	0.0956	1.26	0.31	3.43
	16	0.1015	0.1062	0.1012	0.102	2.45	1.18	0.77

4. 결 론

SRM의 최적제어를 위해 필수적인 인덕턴스를 측정하기 위해 위에서 제시한 세가지 방법을 사용하여 측정하였다. 세가지 방법을 비교한 결과 고정자와 회전자간의 정렬(aligned)위치보다 비정렬(unaligned)위치에서 오차가 크게 발생한다. MCU를 사용하여 센싱된 값을 이용해 계산한 VIM은 오차율이 적은 반면 나머지 두가지 ECM, TCM 방법은 계측장비를 통해 측정된 값을 계산하여 VIM보다 큰 오차가 발생하는 결과를 보였다. 향후 ECM 및 TCM의 자동화 된 측정방법을 적용하여 보겠다.

본 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2012R1A1A1015767) 및 중소기업청 산학협력력 기술개발사업(No.C0219312)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Motor Drives Recent Progress and Perspective", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 56, No. 2, pp. 581-588, Feb 2009.
- [2] R. Krishnan and P. Materu, "Measurement and Instrumentation of a Switched Reluctance Motor", IEEE IAS Annual Meeting, vol. 1, pp. 116-121, October 1989.
- [3] K. Ha, S.-G. Oh, B. MacCleery, and R. Krishnan, "An automated reconfigurable FPGA-based magnetic characterization of switched reluctance machines," in Proc. IEEE ISIE, pp. 839-844, June 2005.
- [4] Benjamin Rudolph, "Nonlinear Deadbeat Current Control of a Switched reluctance Motor", MS thesis, Virginia Tech, Nov. 2009.