

전압적분법을 이용한 SRM의 자동화된 인덕턴스 측정

Automated Inductance Measurement of a Switched Reluctance Motor Using Voltage Integration Method

노 정 민* · 김 재 혁†
(Jeongmin Noh · Jaehyuck Kim)

Abstract - This paper describes the accurate inductance measurement of a switched reluctance motor (SRM). Conventionally, the inductance of the SRM is measured using the equivalent circuit of a stator phase or time constant of exponential current transient. This paper presents an effective method to measure the SRM inductance accurately and rapidly using automated voltage integration. The proposed method is validated experimentally by comparison with the existing equivalent circuit method (ECM) and the FEA(finite element analysis) simulation.

Key Words : Inductance measurement, Switched reluctance motor, Voltage integration method

1. 서 론

SRM은 가격이 저렴하고 고신뢰성, 고내구성, 단순한 구조 등의 장점과 함께 직류직권전동기와 유사한 속도-토크 특성을 가지고 있어 산업기기, 항공기, 선박 뿐만 아니라 자동차 전동부품 등의 다양한 분야에 점차 적용이 확대되고 있다[1]. 단점인 고유의 토크 리플과 소음은 지속적인 연구개발을 통하여 개선되고 있으며, 토크 리플을 극대화하기 위해 회전자와 고정자 모두 돌극형의 구조를 가지며 권선은 고정자에만 집중권으로 감겨 있어 전자계 구조상 여자 전원이 각 상 권선에 독립적이고 순차적으로 인가되어 구동 되므로 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하여 고속운전이 가능한 장점이 있는 반면 회전자 위치에 따른 적절한 스위칭 동작을 위해서는 회전자 위치각에 대한 정보를 검출하기 위한 위치 검출 장치가 필수적이라는 취약점을 가지고 있다[2]. 이러한 SRM의 최적제어를 위해서는 필수적으로 정확한 인덕턴스의 값을 측정하는 것이 중요하다. SRM의 인덕턴스는 회전자의 위치와 여자 전류의 함수로서 드라이브의 성능을 결정하는 중요한 파라미터이다[3]. 기존의 인덕턴스 측정방법에는 등가회로를 이용하여 측정하는 방법, 시정수를 이용하여 측정하는 방법, 쇄교자속을 직접 측정하는 방법[4], 전류를 초핑하여 측정하는 방법[5], AC중첩방법(AC Superposition)[6] 등이 있다. 등가회로 방법은 정밀한 AC 전압공급기가 필요하며 SRM 고주파 스위칭에 대한 주파수 응답 특성을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있으며 시정수 방법은 적절한 시정수 조절을 위해 외부 저항이

필요하다. 쇄교자속을 직접 측정하는 방법은 자기 센서를 이용하여 모터가 조립될 때 모터의 내부에 설치해야하는 불편과 높은 비용으로 인한 단점이 있고 전류를 초핑하여 측정하는 방법은 초핑구간에서의 제한된 스위칭 주파수와 일정하지 않은 증가시간과 감소 시간에서의 계산으로 인한 오차가 발생한다. AC중첩방법(ACS)은 DC전류에 작은 진폭의 AC 전류를 중첩시킨후 AC 전류는 고정밀 전류계로 AC 전압은 멀티미터로 측정되는 값을 계산하여 인덕턴스를 얻는다. 본 논문에서는 등가회로를 이용한 측정법(ECM : Equivalent Circuit Method)과 본 논문에서 제시할 전압적분법(VIM : Voltage Integration Method)을 비교 분석하였다.

2. 등가회로를 이용한 SRM의 인덕턴스 측정법

와전류를 고려한 SRM의 한 상의 등가회로를 이용하여 인덕턴스를 측정하는 방법[7]은 그림 1에 도시된 바와 같다.

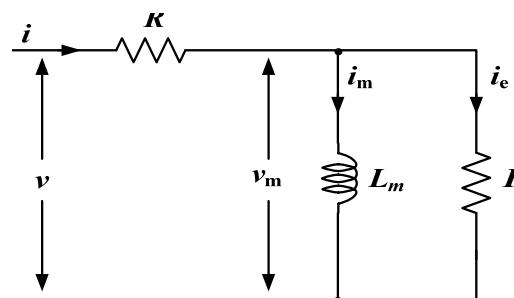


그림 1 와전류가 포함된 SRM 한 상의 등가회로

Fig. 1 Per-Phase equivalent circuit of an SRM including the eddy current

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering
Wonkwang University, Korea

E-mail : jaehkim@wku.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Wonkwang University, Korea

Received : March 2, 2015; Accepted : July 27, 2015

그림 1은 정지된 상태에서 SRM의 등가회로이며, v 는 상전압, 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 1의 등가회로에서의 전력 관계는 다음과 같다.

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

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

$$P = VI \cos \theta, P_R = I^2 R \quad (3)$$

여기서 P 는 전체 유효전력, P_R 은 동손, P_{R_e} 는 와전류손, I 는 상전류의 실효치이다. v_m 과 P_{R_e} 의 관계는 다음과 같다.

$$v_m = v - iR, P_{R_e} = \frac{V_m^2}{R_e} \quad (4)$$

여기서 V_m 은 v_m 의 실효치이며, 식 (4)로부터 R_e 는 아래와 같다.

$$R_e = \frac{V_m^2}{P_{R_e}} \quad (5)$$

P , V , I 및 V_m 은 오실로스코프를 통하여 직접 측정을 할 수 있고, 식 (3)으로부터 P_{R_e} 를 얻을 수 있으며 옴의 법칙에 의하여 아래와 같이 와전류와 자화전류를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$i_e = \frac{v_m}{R_e} \quad (6)$$

$$i_m = i - i_e \quad (7)$$

최종적으로 고정자 권선의 인덕턴스는 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$X_{L_m} = \omega L_m, \omega L_m = \frac{V_m}{I_m} \quad (8)$$

$$L_m = \frac{V_m}{\omega I_m} \quad (9)$$

여기서 I_m 은 i_m 의 실효치이다.

3. 전압적분법을 이용한 SRM의 인덕턴스 측정법

SRM의 전압방정식을 적분하여 쇄교자속을 얻는 방법[3, 8]은 등가회로를 이용한 방법에 비하여 좀 더 빠르고 정밀하게 인덕턴스를 측정할 수 있으며, 그림 2에 도시된 본 논문에서 제안하는 자동화된 전압적분법은 다음과 같다.

SRM의 한 상의 쇄교자속의 시간에 따른 변화율은 다음과 같

이 표현되며

$$\frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} = v - Ri \quad (10)$$

여기서, λ 는 쇄교자속, i 는 상전류, θ 는 회전자 위치각이다. 임의의 시간 t_f 에서 쇄교자속을 산출하기 위해 식 (10)의 양변을 적분하면

$$\lambda(\theta(t_f), i(t_f)) = \lambda(\theta(t_0), i(t_0)) + \int_{t_0}^{t_f} (v(t) - Ri(t)) dt \quad (11)$$

이며 이때 $\lambda(\theta(t_0), i(t_0))$ 는 초기 쇄교자속이다. 만약 초기 쇄교자속이 0이고 회전자의 위치를 알면 쇄교자속은 전류만의 함수로 표현할 수 있다.

$$\lambda_\theta(i(t_f)) = \int_{t_0}^{t_f} (v(t) - Ri(t)) dt \quad (12)$$

또한 인덕턴스는 식 (12)의 쇄교자속을 전류로 나누어 얻을 수 있다.

$$L_\theta(i(t_f)) = \frac{\lambda_\theta(i(t_f))}{i(t_f)} \quad (13)$$

식 (12) 우변의 적분은 그림 2와 같이 상전압과 상전류 파형의 정적분을 통하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\lambda_\theta(i_k) = \sum_{j=1}^k (V_j - I_j R) \quad (14)$$

여기서 $i_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 는 측정하고자 하는 상전류 지령치

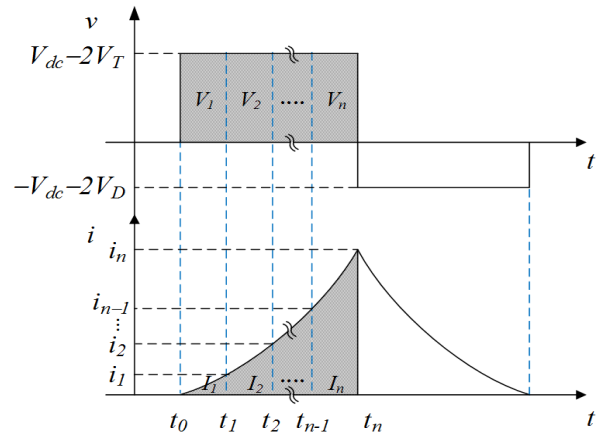


그림 2 전압적분법에 의한 SRM의 상전압 및 상전류 파형
Fig. 2 Phase voltage and current waveforms of an SRM by the voltage integration method

(i_1, i_2, \dots, i_n) 이며, 최대지령전류를 i_n 로 설정한다. 그림 2와 같이 상권선에 전압을 인가하면 전류가 상승하면서 최대지령치 전류 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 3은 전압적분법에 의해 SRM의 인덕턴스 측정을 위한 실제 상전압 및 상전류 파형이며 상권선에 전압을 인가하여 전류지령치에 도달했을 때 스위치를 오프하여 지령치에 도달했을 때까지의 전압 파형 면적과 전류 파형의 면적을 연산처리하여 각 지령전류에서의 인덕턴스를 얻을 수 있다.

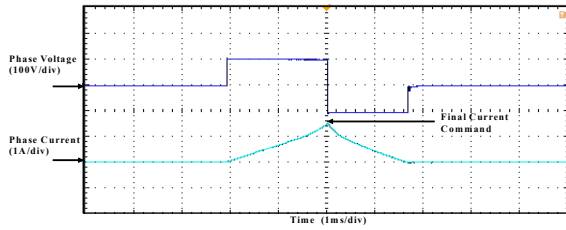


그림 3 전압적분법에 의한 SRM의 상전압 및 상전류 실험파형
Fig. 3 Measured phase voltage and current waveforms of an SRM by the voltage integration method

그림 4는 전압적분법을 이용하여 인덕턴스를 측정하기 위한 장치에 대한 개념도이다. 그림 5에 나타난 모터 구속장치를 사용하여 SRM의 회전자를 고정시키고, 비대칭 브리지 컨버터를 사용하여 한 상의 권선에 펄스전압을 인가하여, 이때의 흐르는 상전류와 상전압을 측정한다. 미리 설정해 놓은 전류지령치에 도달할 때 실제 상전류와 상전압을 측정하고 적분 연산을 수행하여 인덕턴스를 자동으로 계산하여 메모리에 저장시킨다. 따라서, 주어진 회전자 위치에 대하여 최대전류 범위의 내의 다양한 전류변화에 따른 쇄교자속 및 인덕턴스를 얻을 수 있게 된다. 이와 같은 자동화된 연속적인 측정프로세스를 마이크로컨트롤러에 프로그래밍하여 SRM의 인덕턴스를 보다 정확하고 빠르게 측정할 수 있게 된다.

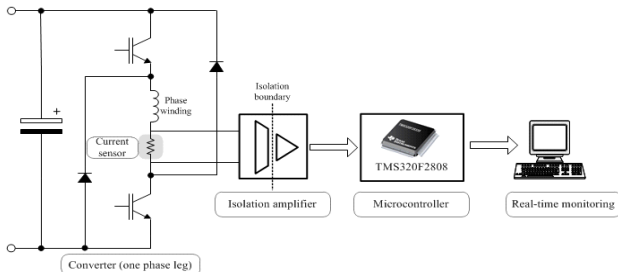


그림 4 다양한 상전류에 대한 인덕턴스 값을 얻기 위해 SRM의 상전압 및 상전류 측정
Fig. 4 Measurement of phase current and voltage to obtain inductance data with respect to difference current

측정하고자하는 SRM의 회전자를 그림 5와 같은 구속시험장치에 고정시킨 후 회전자의 위치를 1° 단위로 변화시켜 인덕턴스를 측정하였다.

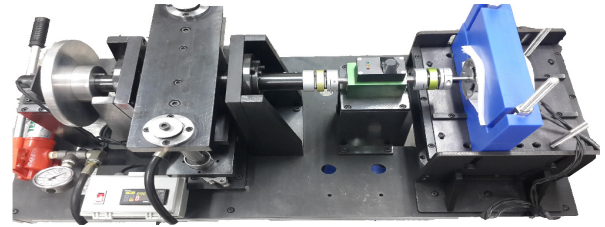


그림 5 모터 회전자 구속 시험장치
Fig. 5 Locked rotor test equipment

4. 실험 결과

제한한 VIM을 검증하기 위해 2개의 시제품 SRM의 인덕턴스를 ECM과 VIM을 이용하여 각각 측정하였다. 측정한 결과를 유한요소해석(Finite element analysis, FEA) 시뮬레이션을 통하여 얻어낸 인덕턴스 데이터와 비교하였다.

4.1 15kW 3상 SRM의 인덕턴스 측정

그림 6과 표 1은 인덕턴스 측정에 사용한 첫 번째 시제품 모터인 15kW 3상 SRM의 형상과 제원이다.

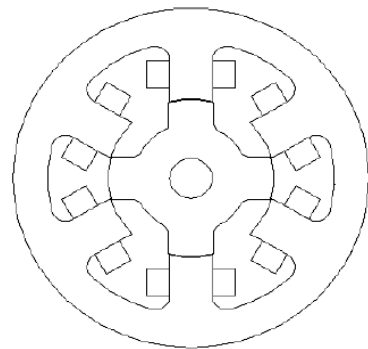


그림 6 인덕턴스 측정을 위한 15kW SRM 모델
Fig. 6 15kW SRM for Inductance measurement

15kW 3상 SRM의 여자주기는 90°이며 5°씩 회전자 위치를 변화시켜 인덕턴스를 측정하였다. 그림 7은 FEA 시뮬레이션을 통하여 얻어낸 10A, 15A, 20A, 25A의 상전류 변화에 따른 인덕턴스 그래프이다. 그림 7의 인덕턴스 그래프에서 각각의 상전류는 포화상태에 도달하지 못해 상전류 변화에 따른 인덕턴스 값에 큰 차이가 나지 않는다. 그림 7과 그림 8은 ECM과 VIM을 이용하여 각각 측정한 인덕턴스 그래프이며, 회전자가 고정자와 정렬(aligned)된 위치인 0°에서 부터 비정렬(unaligned)된 위치인 45°를 지나 그 다음 정렬(aligned)된 위치인 90°까지 인덕턴스의

표 1 15kW SRM 제원

Table 1 15kW SRM Specification

Parameter	Value	Unit
Input voltage	300	V
Rated power	1,500	W
Rated speed	12,000	r/min
Number of phases	3	-
Number of stator poles	6	-
Number of rotor poles	4	-
Stator outer diameter	180	mm
Stack length	60	mm
Phase winding resistance	0.0362	Ω

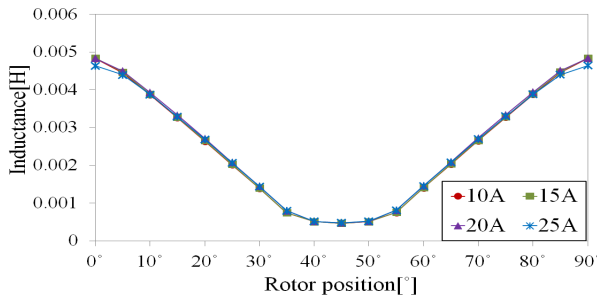


그림 7 FEA 시뮬레이션을 이용하여 얻은 15kW SRM의 인덕턴스 프로파일

Fig. 7 Inductance profiles of 15kW SRM obtained from FEA simulation

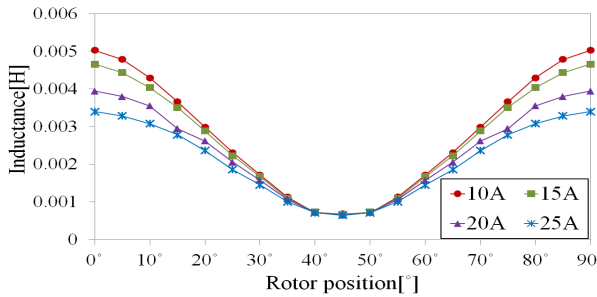


그림 8 ECM을 이용하여 측정된 15kW SRM의 인덕턴스 프로파일

Fig. 8 Measured Inductance profiles of 15kW SRM using ECM

프로파일을 보여준다. 그림 7의 ECM 측정 결과를 FEA와 비교해 볼 때 정렬(aligned)된 위치일수록 오차가 심해지는 반면 그림 8의 VIM은 FEA와 유사한 프로파일 경향을 보인다. 측정결과를 좀더 자세히 비교하기 위해 상전류 10A와 25A에서 FEA, ECM, VIM 측정 결과를 비교한 그래프는 그림 10과 그림 11과 같다. 10A 일 때 인덕턴스 프로파일 비교결과 비정렬(unaligned)된 위

치에서 ECM과 VIM 모두 FEA와 근소한 차이를 보였으며 ECM의 경우 정렬(aligned)된 위치에서 FEA와 VIM 비교 결과보다 오차가 큼을 알 수 있다. 25A일 때 인덕턴스 프로파일 비교결과 비정렬(unaligned)된 위치에서 ECM과 VIM 모두 FEA와 근소한 차이를 보였으며 ECM의 경우 정렬(aligned)된 위치에서는 10A에서의 FEA와 VIM 비교결과 보다 오차가 더욱 큼을 알 수 있다.

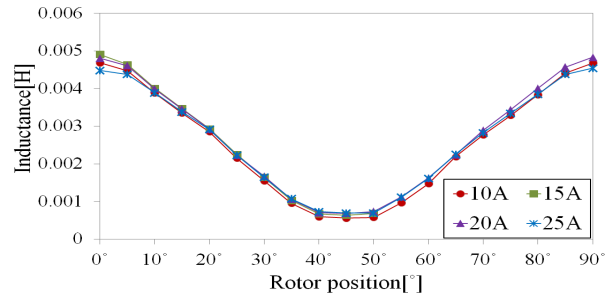


그림 9 VIM을 이용하여 측정된 15kW SRM의 인덕턴스 프로파일

Fig. 9 Measured Inductance profiles of 15kW SRM using VIM

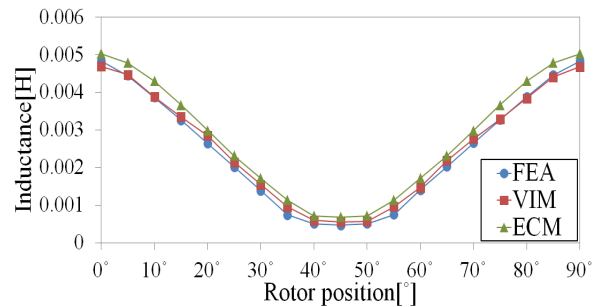


그림 10 10A에서 세가지 방법에 의한 15kW SRM의 인덕턴스 프로파일 비교

Fig. 10 Comparison of inductance profiles of 15kW SRM at 10A by three different methods

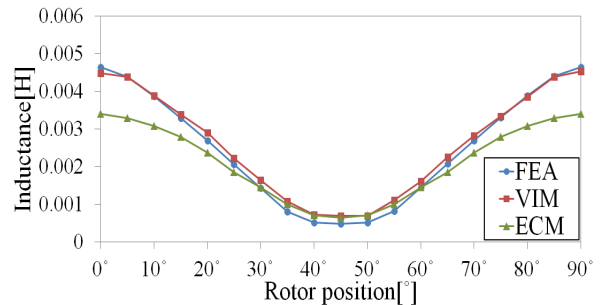


그림 11 25A에서 세가지 방법에 의한 15kW SRM의 인덕턴스 프로파일 비교

Fig. 11 Comparison of inductance profiles of 15kW SRM at 25A by three different methods

4.2 50W 2상 SRM의 인덕턴스 측정

그림 12와 표 2는 인덕턴스 측정에 사용한 두 번째 시제품 모터인 15kW 2상 SRM의 형상과 제원이다.

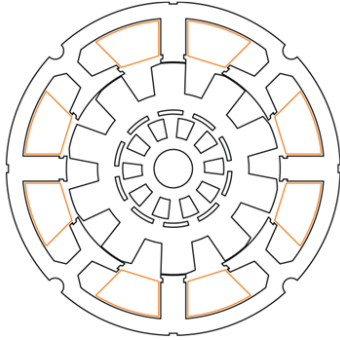


그림 12 인덕턴스 측정을 위한 50W SRM 모델
Fig. 12 50W SRM for Inductance measurement

표 2 50W SRM 제원
Table 2 50W SRM Specification

Parameter	Value	Unit
Input voltage	170	V
Rated power	50	W
Rated speed	1,600	r/min
Number of phases	2	-
Number of stator poles	8	-
Number of rotor poles	10	-
Stator outer diameter	82.5	mm
Stack length	16	mm
Phase winding resistance	12.89	Ω

50W 2상 SRM의 여자주기는 36°이며 2°씩 회전자 위치를 변화시켜 인덕턴스를 측정하였다. 그림 13은 FEA 시뮬레이션을 통하여 얻어낸 1A, 1.5A, 2A, 2.5A의 상전류 변화에 따른 인덕턴스 그래프이다. 그림 14와 그림 15는 ECM과 VIM을 이용하여 각각 측정한 인덕턴스 그래프이며, 회전자가 고정자와 정렬(aligned)된 위치인 0°에서 부터 비정렬(unaligned)된 위치인 16°를 지나 그 다음 정렬(aligned)된 위치인 36°까지 인덕턴스의 프로파일을 보여준다. 그림 14의 ECM 측정 결과를 FEA와 비교해 볼 때 정렬(aligned)된 위치에서 다음 정렬(aligned)된 위치까지 오차가 발생한 반면 그림 15의 VIM은 FEA와 유사한 프로파일 경향을 보인다. 측정결과를 좀더 자세히 비교하기 위해 상전류 1A와 1.5A에서 FEA, ECM, VIM 측정 결과를 비교한 그래프는 그림 16과 그림 17과 같다. 1A 일 때 인덕턴스 프로파일 비교결과 정렬(aligned)된 위치에서 ECM과 VIM 모두 FEA와 근소한 차이를 보였으며 ECM의 경우 비정렬(unaligned)된 위치에서 FEA와 VIM 비교 결과보다 오차가 큼을 알 수 있다. 1.5A일 때 인덕턴

스 프로파일 비교결과 정렬(aligned)된 위치에서 다음 정렬(aligned)된 위치까지 FEA와 근소한 차이를 보였으나 ECM의 경우 FEA와 VIM 비교결과 보다 오차가 큼을 알 수 있다.

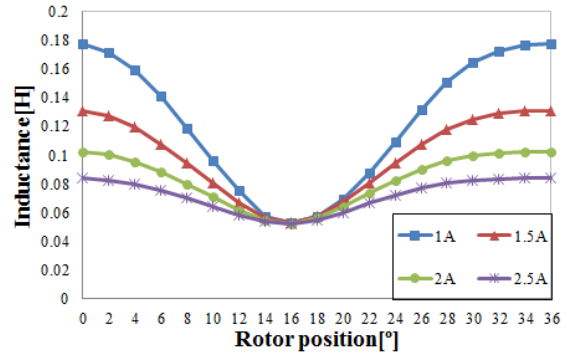


그림 13 FEA 시뮬레이션을 이용하여 얻은 50W SRM의 인덕턴스 프로파일

Fig. 13 Inductance profiles of 50W SRM obtained from FEA simulation

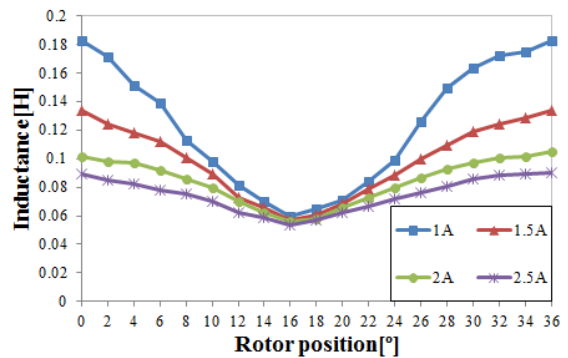


그림 14 ECM을 이용하여 측정한 50W SRM의 인덕턴스 프로파일
Fig. 14 Measured Inductance profiles of 50W SRM using ECM

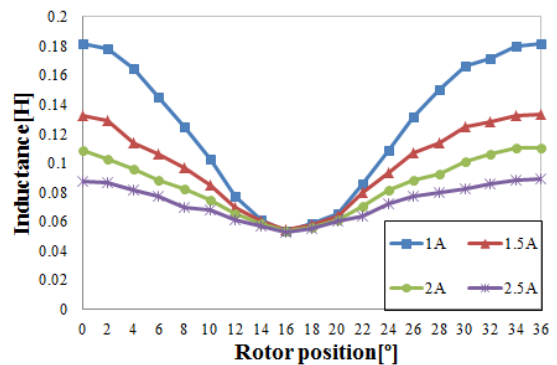


그림 15 VIM을 이용하여 측정한 50W SRM의 인덕턴스 프로파일
Fig. 15 Measured Inductance profiles of 50W SRM using VIM

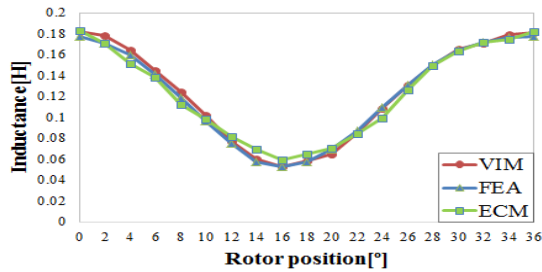


그림 16 1A에서 세가지 방법에 의한 50W SRM의 인덕턴스 프로파일 비교

Fig. 16 Comparison of inductance profiles of 50W SRM at 1A by three different methods

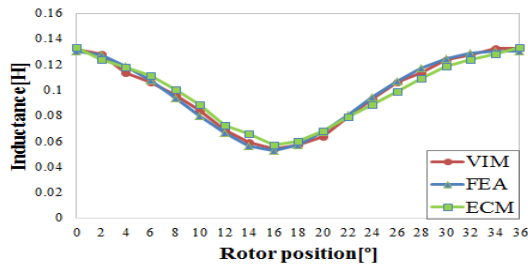


그림 17 1.5A에서 세가지 방법에 의한 50W SRM의 인덕턴스 프로파일 비교

Fig. 17 Comparison of inductance profiles of 50W SRM at 1.5A by three different methods

5. 결 론

본 논문에서는 SRM의 인덕턴스를 측정하기 위하여 등가회로를 이용한 측정법과 전압적분법을 이용한 측정법을 제시하였다. 15kW SRM과 50W SRM 두 시제품을 이용하여 제시한 두 가지 방법을 비교한 결과 고정자와 회전자간의 정렬(aligned)구간에서 비 정렬(unaligned)구간 그리고 전류가 높아질수록 마이크로컨트롤러를 사용하여 자동화된 전압적분법을 이용한 측정법이 등가회로를 이용한 측정법 보다 정확한 결과를 보였다. 등가회로를 이용한 측정법이 전압적분법 보다 오차가 발생한 이유는 등가회로를 이용한 측정법은 전류 및 전압을 계측기를 통하여 측정자가 수동으로 측정하고 계산하는 과정에서 측정오차가 발생하였고 이 부분이 오차발생의 가장 큰 요인 중 하나이다. 두 측정방법 모두 측정시험동안 높은 전류에서의 온도상승에 따른 상 권선의 저항 변화는 고려되지 않았고 추가로 개선하기 위해 차폐 회로 및 오차를 좀 더 개선할 수 있는 방안을 모색할 필요가 있다.

References

[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] M. Ehsani, I. husain, and A.B. Kulkarni, "Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched Reluctance Motor Drives", IEEE Trans on IA, Vol. 28, pp. 128-135, Feb 1992.

[3] R. Krishnan and P. Materu, "Measurement and Instrumentation of a Switched Reluctance Motor", IEEE IAS Annual Meeting, vol. 1, pp. 116-121, October 1989.

[4] J. C. Prescott and A. El-Khavashi, "A method for measuring self inductances applicable to large electrical machines," Proc. Inst. Electr. Eng., vol. 106, pt. A, pp. 169-173, Apr. 1959.

[5] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives -Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. Boca Raton, FL :CRC, 2001.

[6] R. Gobbi, N.C. Sahoo, and R. Vejian, " Experimental Investigations on Computer-Based Method for Determination of Static Electromagnetic Characteristics of Switched Reluctance Motors," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.57, no. 10, pp.2196-2211, Oct. 2008.

[7] 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.

[8] Benjamin Rudolph, "Nonlinear Deadbeat Current Control of a Switched reluctance Motor", MS thesis, Virginia Tech, Nov. 2009.

저 자 소 개



노 정 민 (Jeongmin Noh)

1985년 4월 30일 생. 2012년 원광대 전기 전자 및 정보공학부 졸업. 2013년~2014년 Hexpower system, 기술지원팀 2014년~ 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
Tel : 063-850-6733
Email : rismajung7@gmail.com



김 재 혁 (Jaehyuck Kim)

1973년 4월 25일 생. 1992년 한양대 전기공학 학과 졸업. 1998년 ~ 2000년 UL Korea, Engineer, 2004년 Univ. of Wisconsin at Madison 졸업(석사), 2010년 Virginia Tech 졸업(박사), 2010년 Ramu Inc. Senior Engineer, 현재 원광 대학교 전기공학과 교수
Tel : 063-850-6733
E-mail : jaehkim@wku.ac.kr