

LC 공진을 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 파라미터 측정

김승주*, 안준선, 김기찬, 김솔, 이주
한양대학교 전기공학과

Parameter Measurement of Synchronous Reluctance Motor Using LC Resonance

SEUNGJOO KIM*, JOONSEON AHN, KICHAN KIM, SOL KIM, JU LEE
HANYANG UNIVERSITY

Abstract - As Synchronous Reluctance Motor gives reluctance torque, An inductance is an important parameter that is proportional to torque. To achieve the high performance in sensorless control, it is necessary to consider exact inductance values because the inductance is not a constant parameter anymore. Therefore, this paper shows the inductance measurement using DC current decay test and Generator-Resonance test.

1. 서 론

SynRM은 상 인덕턴스가 회전자 위치에 따라 변화하는 구조적 특징 때문에 상 인덕턴스를 전동기의 구동주파수에 동기하여 시불변 값으로 나타내는 것이 모터의 제어에 있어서 필수적이다. 따라서 상 인덕턴스를 등가적으로 d축과 q축으로 나누어 측정하여 그 값을 사용한다.

SynRM의 파라미터 중에서 인덕턴스의 값이 전류 및 토크 특성에 미치는 영향이 매우 크므로 이의 정확한 값의 추출이 요구되어, 이에 대한 해석법 및 측정법이 많이 연구되어 왔다. 일반적으로 모터의 성능지수인 d , q 축 인덕턴스를 구하는 방법은 여러 가지가 있으나 크게 다음의 3가지로 나누어진다.

이상적인 자기회로 모델에서 퍼미언스법으로 인덕턴스를 구하는 해석적인 방법과 유한요소법 또는 등가 자기 회로망법과 같은 수치해석적 방법, 그리고 실험에 의한 측정 방법이 있다. 인덕턴스 측정 시험법은 크게 정지상태시험법과 운전상태시험법으로 나누어진다.

정지상태시험법에는 DC 전류감소 시험법, AC 정지 시험법 등이 있는데, DC 전류감소 시험법은 고정자의 임의의 상에 회전자를 d축 또는 q축으로 고정시키고 상 전류를 인가한 후, 전원부와 차단시켜 상 전류값이 0으로 감소하는 것을 측정하여 인덕턴스는 구하는 시험법이다. AC 정지 시험법은 시험법이 매우 간단하여 인덕턴스 측정에 많이 사용되는 방법이지만, 이 방법 또한 정지시 SynRM의 인덕턴스를 측정한 것으로 회전자 인덕턴스 값과는 차이가 있을 수 있다. 그러므로 정지상태 시험법 상의 오차를 최소화 하는 시험법인 운전상태 시험법이 필요하다.

기존의 운전상태 시험법에는 Zero Power Running Test와 Zero Torque Test 및 Generator Test가 있다. Zero Power Running Test의 경우 벡터제어 인버터를 이용하여 q축 전류를 0이 되게 제어함으로 해서 등가회로를 단순화하여 동기 인덕턴스를 측정하는 방법이다. Zero Torque Test의 경우도 Zero Power Running Test

와 마찬가지로 q축 전류 성분이 0이 되게 전류 위상각을 조정하여 동기 인덕턴스를 측정한다. Generator Test의 경우 벡터제어 인버터가 필요없이 회전자를 여자시킨 후에 회전자를 외부에서 회전시켜 출력되는 역기전력을 이용하여 파라미터를 측정한다. 이러한 시험법들은 회전자를 회전시키면서 파라미터를 측정하기 때문에 다른 시험법에 비해서 비교적 정확한 데이터를 얻을 수 있는 것으로 평가되고 있다. 하지만 벡터제어 인버터를 필요로 하거나 아니면 역기전력의 크기가 작을 경우 측정이 매우 어려운 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 운전상태시험법인 Generator 시험법을 응용하여, Generator 시험법에서 모터의 부하단에 부착하는 외부 커패시터와 모터의 상 인덕턴스간의 공진 현상을 이용한 Generator-Resonance 시험법을 제안하였다. 공진 상태를 이용하면 모터에서 발생되는 상전류 및 상전압의 크기가 커지기 때문에 측정이 매우 용이하며, 공진 주파수를 변경시킴에 따라서 공진 전류값이 변하기 때문에 다양한 전류값에서 동기 인덕턴스를 측정할 수 있다. 본 제안된 측정법을 이용하여 시험 모터의 동기 인덕턴스를 측정하고 DC 정지 시험법을 이용한 측정결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 SynRM 수학적 회로 모델

철손을 고려한 SynRM의 등가회로 모델은 그림 1과 같다. SynRM의 과도상태에서의 순시 인덕턴스 L_{dt} 는 식 (1)과 같다.

$$L_{dt}(i_d) = L_d + \frac{\partial L_d}{\partial i_d} i_d \quad (1)$$

쇄교자속을 무시하면 SynRM의 d-q방정식은 식(2)와 식(3)과 같다.

$$L_d \frac{di_d}{dt} = V_d - i_d R_s + w_r L_q i_q \quad (2)$$

$$L_q \frac{di_q}{dt} = V_q - i_q R_s - w_r L_d i_d \quad (3)$$

동기 인덕턴스 L_d , L_q 는 속도기전력에 의해 발생하고, 순시 인덕턴스 L_{dt} 는 d축에 의한 변압기 기전력에 의해 발생된다.

고정자 철손은 전체 속도기전력에 병렬로 연결된 저항 R_{m1} 으로 표현된다. q축 자계의 고조파에 의해 생성된 철손은 q축에 변압기 기전력과 d축의 속도기전력에 병렬 연결된 저항 R_{m2} 로 표현된다.

정상상태 운전시 그림1의 등가회로에서 미분항이 소거되므로 이를 고려한 등가회로를 그림 2에 나타내었다.

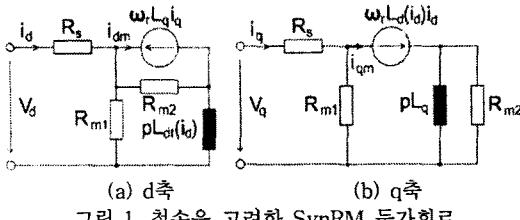


그림 1. 철손을 고려한 SynRM 등가회로

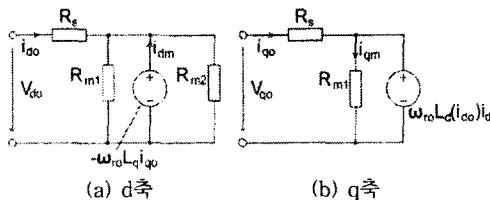


그림 2. 정상상태에서의 SryRM 등가회로

2.2 SynRM Generator-Resonance 시험

그림 3에 Generator-Resonance 시험법의 결선도를 나타내었다. 회전자를 여자시킨 후 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.

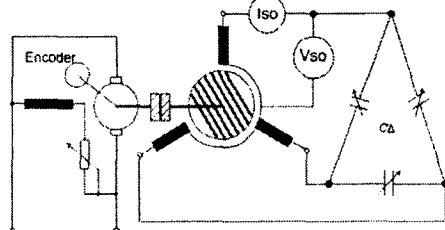


그림 3. Generator-Resonance 시험법

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 특정한 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 미찬가지로 생각할 수 있는데, 모터의 출력단에 용량성 부하를 부착하기 때문에 전상역률이 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 데이터를 이용하여 동기 인덕턴스를 구할 수 있다.

그림 2로부터 발전 모드에서의 d축 및 q축 인덕턴스를 구하면 다음 식과 같다.

$$L_d(i_d) = \frac{V_q}{\omega_r i_d} \quad (4)$$

$$L_q = \frac{V_d}{\omega_r i_q} \quad (5)$$

공진을 이용한 인덕턴스 실험은 다음과 같이 행한다. 처음 순서로 회전자에 정격전류를 흘려 여자시킨 후, 모터의 출력단에 그림 3과 같이 커패시터를 결선한다. 여자시킬 때 인가하는 권선에 회전자가 정렬되므로 이 위치를 고정자 권선 대비 회전자의 d축 위치로 정하고 이때 커패시터는 가급적 주파수 특성이 우수하며 극성이 없는 것으로 사용한다. 본 실험에서는 메탈 적층 커패시터를 사용하였다. 또한 커패시터 용량을 조절할 때에 커패시터 자체의 등가 직렬저항의 값을 낮추기 위해서 병렬로 여러 개를 부착하여 시험하였다.

이와 같이 회로를 구성한 후, 커패시터 용량을 조정해가며 각 커패시터마다 공진 주파수에서 공진이 실제로 일어나는지 회전자를 그 주파수에 맞게 회전시키며 공진 발생 여부를 확인한다.

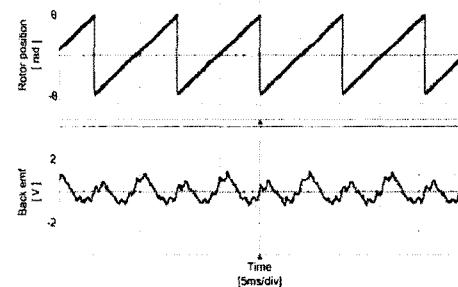


그림 4. 비공진시의 회전자의 위치와 역기전력 파형(운전속도: 2900[RPM])

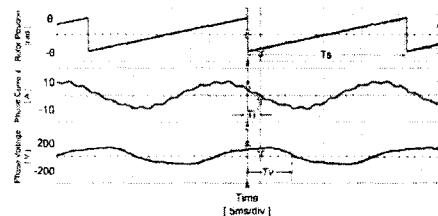


그림 5. 공진시의 회전자의 위치와 상전류 및 상전압 파형(운전속도: 1532[RPM])

3. 측정 결과

표 1에 본 실험에서 사용한 시험 모터의 시방을 들었다. 모터의 부하측에 연결한 커패시터의 용량이 커짐에 따라 공진주파수가 낮아지는 것을 그림 6의 공진 커패시터 대비 공진 주파수 그래프에서 볼 수가 있다. 따라서 회전자 구동용 다이나모 시스템의 성능을 고려하여 적절한 커패시터의 값을 정하는 것이 필요하다. 본 실험에서는 80, 100μF의 두 가지 값에 대해서 측정을 행하였다. 또한 그림 7에는 공진 커패시터 용량 대비 공진 전류 및 공진 전압을 나타내었다. 공진 전류는 거의 일정한 값을 유지하고 있으며 이는 공진시의 임피던스가 최소치로 유지되고 있음을 보여준다. 커패시터의 용량이 커짐에 따라서 더 적은 전압에서도 공진이 가능하게 되고 따라서 공진시의 상전압의 값이 감소하고 있다.

그림 8에는 선정한 커패시터를 이용하여 공진상태에서 상전압 및 상전류를 측정하고 다이나모의 구동 주파수를 공진주파수에서 점차 감소시키며 상전압 및 상전류를 관찰하여 이 값을 사용하여 식 (4),(5)에 의해서 d축 및 q축 동기 인덕턴스를 계산한 결과이다. 공진주파수에서 회로의 임피던스는 최소치를 가지며, 공진점으로부터 주파수가 증가하거나 감소함에 따라서 임피던스가 증가하게 된다. 따라서 임피던스의 증가에 따라 공진 전류와 전압이 감소하게 된다. 이를 이용하여 회로의 전류를 조정하여 원하는 전류치에서의 인덕턴스를 계산하였다.

또한 DC 정지 시험법[5]을 행하여 본 시험법과의 비교를 행하였다.

표 1. SynRM 모델의 주요사양

항 목	값	단위	항 목	값	단위
정격 입력력	220	W	상 수	3	Phase
1차 저항	2.95	[Ω]	회전자 적층길이	50	mm
극 수	4	Poles	공극 길이	0.4	mm

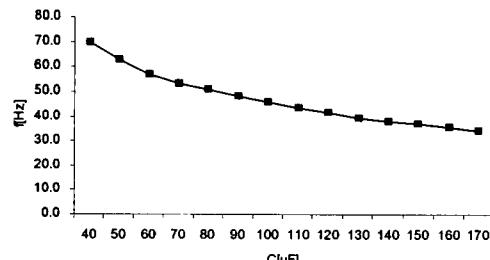


그림 6. 공진커패시터의 변화에 따른 공진주파수의 변화

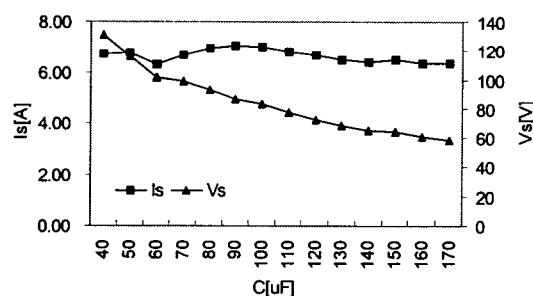


그림 7. 공진 커패시터의 변화에 따른 상전압 및 상전류의 변화

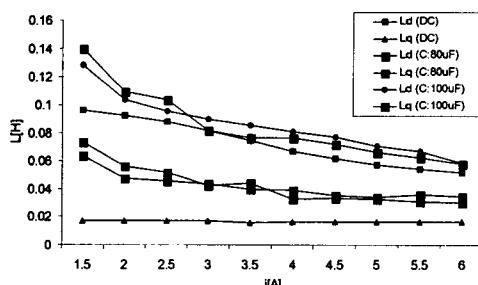


그림 8. 전류에 따른 인덕턴스의 변화

4. 결 론

SynRM의 제어성능의 향상을 위해서는 파라미터를

정확하게 파악하는 것이 필수적이다. 기존의 시험법의 경우 정지 상태에서의 시험법은 일부 시험법의 경우 철손이 고려되지 못하는 단점이 있었다. 운전시험법의 경우 동손 및 철손을 동시에 고려하는 것이 가능하기 때문에 바람직한 시험법이지만 기존의 시험방법은 시험 절차가 복잡하다는 단점이 있다. 본 논문에서 제안한 시험법은 공진시의 임피던스가 낮아지는 현상을 이용하여 전류 대비 d축 및 q축 인덕턴스를 비교적 용이하게 계산할 수 있는 장점이 있다. 향후 기존의 측정법과 좀 더 정밀한 비교를 시행하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 중점추진 과제인 신·재생에너지 발전의 계통연계 기초기술개발 연구 (과제번호 : R 2004 B 125)의 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] I. Boldea, Reluctance Synchronous Machines and Drives, Oxford university Press Inc., New York, 1996.
- [2] I. Boldea, N. Muntean, and S. Deaconu - Distributed anisotropy rotor synchronous (DARSYN) motor-identification and performance, Record of ICEM, 1992, Manchester, U K, 13-15 Sept. 1992, vol. II, pp. 542-546.
- [3] I. Boldea, Z. Fu, and S.A. Nasar - Performance evaluation of axially-laminated anisotropic (ALA) rotor reluctance motors, Record of IEEE-IAS-1992, part I, pp. 212-218.
- [4] L. Xu, X. Xu, T.A. Lipo, and D.W. Novotny - Vector control of a synchronous reluctance motor including saturation and iron losses, Record of IEEE-IAS-1990 Annual Meeting, pp. 359-364.
- [5] 윤준보, “동기형 릴럭턴스 전동기의 파라메터 측정”, 대한전기학회 학술대회 논문 B권, 2003, pp. 930-932.