

## 순시 인덕턴스를 이용한 SRG의 센서리스 제어

오승보\*, 김영석\*, 신재화\*\*, 김영조\*\*\*

인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부\*, 인천전문대학교\*\*, 유한대학교\*\*\*

### Sensorless control of Switched Reluctance Generator using Instantaneous inductance

Sung-bo Oh\*, Young-seok Kim\*, Jae-hwa Shin\*\*, Young-jo Kim\*\*\*

In-Ha University\*, In-Cheon College\*\*, Yu-Han College\*\*\*

#### ABSTRACT

Switched reluctance generators(SRGs) attract much attention in the generator because of high efficiency, simplicity, and ruggedness. They require rotor position information to determine the turn-on and turn-off angle, but the rotor position sensor is less tolerant of extreme environmental conditions, such as high temperature or dust, so the position sensor is limited and undesirable. This paper describes a new approach to estimate the rotor position from the measured terminal voltages and currents of the SRG. The proposed method is based on the instantaneous inductance of the SRG. The proposed method is verified by computer simulations and experiments.

#### 1. 서 론

SR기기(Switched Reluctance Machine)는 회전자의 구조가 적층구조철심으로 이루어져 있어 강인한 구조와 기기 제작에 있어 저 비용, 그리고 높은 효율성 때문에 적용범위가 확대되고 있다. 하이브리드 전기자동차 및 무정전 전원공급장치, 풍력발전소등에서의 응용이 연구되어지고 있는 실정이다. 그러나, SRG를 구동함에 있어서 회전자의 위치정보를 알아야 하기 때문에 단점으로 지적되고 있다.

SRG는 다른 발전기에 비해서 회전자에 권선이나 영구자석을 가지고 있지 않으므로 여자 전류를 고정자 권선에 공급해 주어야 한다. 스위치 턴-온을 통한 전원을 상에 인가시키는 여자 동작과 스위치 턴-오프에 의하여 다이오드를 통해 발전된 전류를 전원으로 회생하는 발전 동작으로 나누어서 이루어진다. 따라서 SRG를 구동시키기 위해서는 항상 회전자의 정확한 위치를 알아야 한다. 회전자의 위치는 회전자축에 Encoder나 Resolver를 이용하면 알 수 있다. 하지만 이들 위치검출기는 일반적으로 비용이 고가일 뿐만 아니라 주위환경의 영향을 많이 받고, 별도의 복잡한 하드웨어 제어가 구성되어야 하

는 단점이 있다. 그밖에도, 위치검출기를 SRG에 부착함으로써 인한 기기 크기의 증가 등의 문제가 발생하게 된다. 이러한 단점들을 극복하기 위하여 센서없이 구동하는 방법을 적용할 필요가 있다. 본 논문에서는 순시 인덕턴스를 이용한 새로운 센서리스제어를 제안한다. 제안한 방법은 순시적인 인덕턴스를 전류와 전압을 이용하여 구하고 기존의 Look-up Table과 비교하여 위치를 추정하는 간단한 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 컴퓨터를 이용한 모의실험을 통하여 제안한 알고리즘의 타당성을 확인하고 실험을 통하여 증명하였다.

#### 2. 인덕턴스를 이용한 SRG의 센서리스 구동

##### 2.1 SRG 센서리스 알고리즘

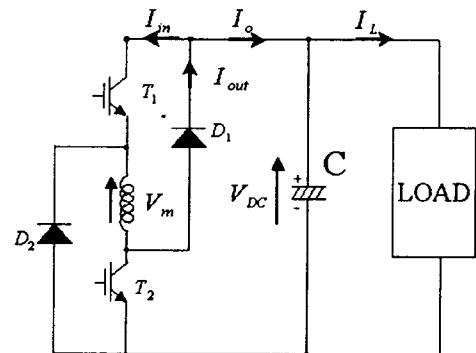


그림 1 한 상에 대한 SRG의 회로

그림 1은 SRG의 주회로도이다. 사용된 SRG는 고정자의 극수가 6극이고 회전자의 극수가 4극인 기기를 사용하였다. 또한, DC링크 콘덴서를 사용하여 발전을 하기 위한 여자시의 전원으로 사용함과 동시에 발생된 전력을 저장시켜 부하와의 전력불평형을 제거시키기 위하여 사용되었다.

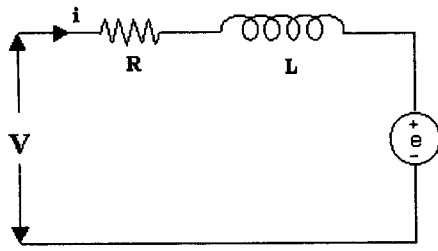


그림 2 한 상에 대한 SRG의 등가회로

SRG의 센서리스 구동을 하기 위하여 각각의 상에 대하여 순시적인 인덕턴스를 전압과 전류를 이용하여 구하였다. 각 상과 상사이의 상호 인덕턴스는 무시하였다. 위의 그림 2에서 R은 권선저항을 나타내고 L은 권선에서의 인덕턴스 성분이며 역기전력 성분이 나타내어져 있다. 그림에서 한 상에 인가되는 전압은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_m = Ri_m + \frac{d\lambda_m(\theta, i_m)}{dt} \quad (1)$$

여기서,  $V_m$ 은 m번째 상의 단자전압이고,  $i_m$ 은 m번째 상에 흐르는 전류이다. R은 각상의 권선저항이고 여기에는 스위칭소자에서의 전압강하도 포함된다. 위 식에서 자속쇄교수( $\lambda_m$ )는 인덕턴스와 전류의 곱으로 나타내어 지고 총 자속과 같기 때문에 인덕턴스에 대하여 나타내어 보면 m번째 상의 인덕턴스는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_m = \frac{1}{i_m} \int (V_m - Ri_m) dt \quad (2)$$

위의 식에서 구한 인덕턴스 값은 전류와 각도의 함수로 식 (3)과 같이 나타내어 진다.

$$L_m = F(i_m, \theta) \quad (3)$$

여기서  $\theta$ 는 회전자의 위치를 나타내는 각도이다. 이들의 관계를 수식적으로 나타내기 위해서는 회전자와 고정자에서의 히스테리시스 손실과 와전류에 의한 손실 및 기계적 구조에 의하여 나타나는 영향을 고려해야 하고 자속이 포화되었을 때 위의 함수관계가 비선형적으로 나타나기 때문에 위의 관계를 수식적으로 나타내기가 어렵다. 그 관계들은 일반적으로 고차방정식을 사용하여 근사적으로 나타내어 지거나 실험에 의하여 실제값을 구하여 Look-up Table을 사용하여 구한다. 여기에서는 실험 및 시뮬레이션 결과를 정확하게 얻기 위하여 인덕턴스와 전류 및 각도의 관계를 실제실험에 의하여 구하고 Look-up Table을 사용하여 나타내었다.

## 2.2 SRG 특성해석

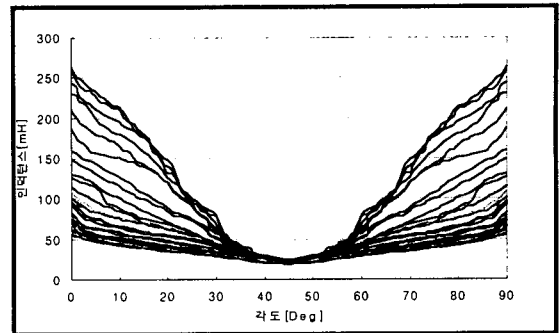


그림 3 회전자의 위치에 따른 인덕턴스 곡선

위의 그림 3은 로터의 위치를 고정시켜 전류값의 크기를 변화시키면서 인덕턴스를 간접적인 방법으로 측정된 결과를 나타낸다. 식 (1)에서 인덕턴스에 관한 식으로 전개하여 보면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 위의 인덕턴스 곡선은 식 (4)를 사용하여 구하였다.

$$L_m = (V_m - Ri_m) \frac{dt}{di} \quad (4)$$

또한, 사용되어진 SRG상수는 표(1)과 같다.

고정자 극수	6 극	정격출력	1 Hp
고정자 극호	31.3 도	권선저항	2.29 $\Omega$
고정자 극간 간격	28.7 도	정격전류	5 A
회전자 극수	4 극	정격전압	DC 240 V
회전자 극호	31.3 도	정격회전수	4000 rpm
회전자 극간 간격	58.7 도	최대전류	8 A

표 1 시스템에 사용된 SRG상양

## 2.3 SRG 센서리스 구동

위의 실험에 의하여 구하여진 인덕턴스와 위치의 관계를 소프트웨어적인 방법을 이용하여 Look-up Table을 생성하였다. 배열을 이용하여 각도와 그 위치에서의 인덕턴스를 대응시켜서 2차원 배열을 형성하였다. 또한, 실시간으로 단자전압과 해당하는 상에 흐르는 전류를 추출하여 식 (2)에 적용하면 순시적인 인덕턴스의 크기를 알아낼 수 있다. 따라서 알아낸 인덕턴스의 크기와 기존의 실험에 의하여 구하여진 인덕턴스와 각도와의 관계를 나타내는 Look-up Table을 이용한다면 회전자의 위치를 알아낼 수 있다. 그러나, 이러한 알고리즘에서 위치추정오차를 고려하여 볼 때 전류의 크기가 작은 부분에서 위치를 추정하게 되면 미소한 전류에서 측정된 자속값의 오차가 인덕턴스에 영향을 미치게 되

고 그 결과 위치의 오차가 커진다. 따라서 위치 추정시에 전류의 크기가 큰 부분에서 인덕턴스를 계산하여 추정하여야 위치의 추정오차를 줄일 수 있다. 여기에서는 한 상의 전류와 단자전압을 이용하여 추정하지 않고 모든 상의 전류를 비교하여 가장 최대값을 가지는 상의 전류와 단자전압을 이용하여 인덕턴스를 구하고 위치를 추정하는 방법을 사용하였다. 그림 4의 블록도를 이용하여 제안한 방법을 간략하게 나타내었다.

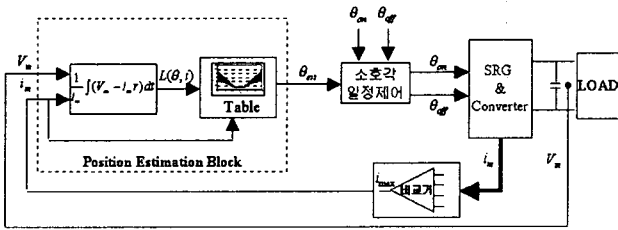


그림 4 인덕턴스를 이용한 SRG센서리스 블록도

## 2.4 모의실험 결과

다음은 실제의 실험을 하기 위한 모의실험 결과이다. 아래의 결과는 실제 위치값과 제안한 방법을 적용하여 추정된 위치값을 나타내었다. 그리고, 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 오차값을 나타내었다.

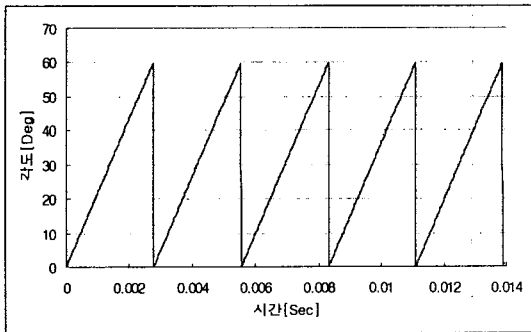


그림 5 실제 회전자 위치

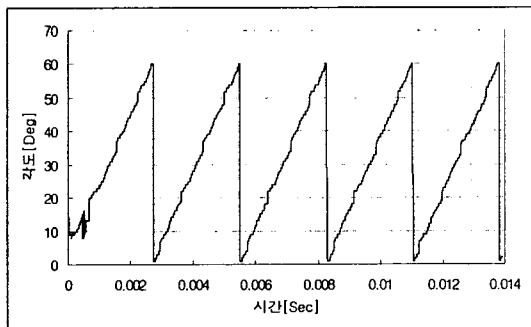


그림 6 추정된 회전자 위치

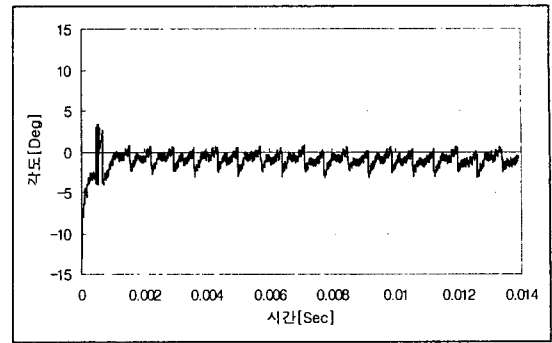


그림 7 추정된 회전자와 실제값과의 오차

위의 모의실험결과에서 볼 때 초기위치 추정시의 위치오차는 약 13도 정도의 큰 오차를 보이고 있다. 초기에는 고정자권선에 흐르는 전류의 크기가 미소하기 때문에 위치의 오차가 커진다. 그러나 이러한 오차는 전류의 크기가 커지게 되면 제거되어진다. 그리고, 정상상태에서의 위치오차는 최대 3도로써 실제값과 비교하여 볼 때 추정이 잘 되고 있음을 볼 수 있다. 또한, 초기위치를 파악하고 정상상태의 운전을 하는데 약 1ms 정도의 시간이 걸리는 것으로 보아 제안한 방법은 신속한 초기위치 검출이 가능하다는 것을 보여준다. 이러한 결과는 제시한 방법으로 위치를 추정하여 SRG를 동작시키는 것이 가능하다는 것을 증명하여 준다.

## 2.5 실험 결과

본 논문에서 제안한 센서리스 방법을 실험에 의하여 입증하기 위하여 DSP(TMS320C31)를 사용하여 제어하였다. SRG의 속도는 1800rpm으로 구동하며 실험하였다.

그림 8은 SRG 한 상에서의 전압값과 전류값을 A/D를 사용하여 DSP로 받아들인 파형이다. 도통각을 26°로 하여 구동하였다.

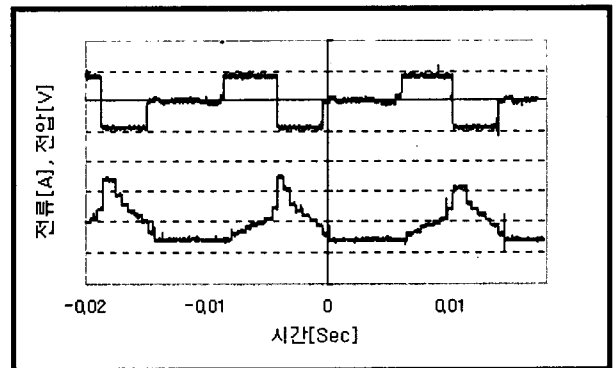


그림 8. SRG 한 상의 전압 및 전류파형  
(150V/div, 4A/div)

전압값과 전류값을 식 (2)에 대입하여 순시적으로 자속값과 인덕턴스값을 계산에 의하여 구하였다. 위치추정 오차를 줄이기 위하여 각 상 중에서 최대의 전류가 흐르는 상의 전압과 전류값을 이용하여 자속과 인덕턴스를 구하였다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 SRG 센서리스 제어를 위하여 상 전압과 권선에 흐르는 전류를 이용하여 순시 인덕턴스를 구하고 위치를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였고 실험을 통하여 확인하였다.

SRG의 회전속도를 1800rpm에서 구동하면서 센서리스 알고리즘을 적용시켜본 결과 실제위치의 추정이  $\pm 3$ 도의 범위내에서 오차를 가지며 동작하는 것을 확인하였다.

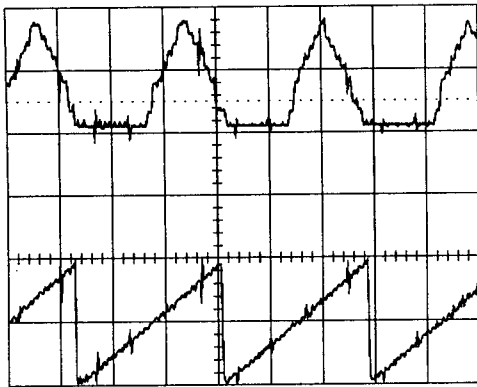


그림 9 SRG 한 상의 자속곡선  
(200mV/div, 45° /div)

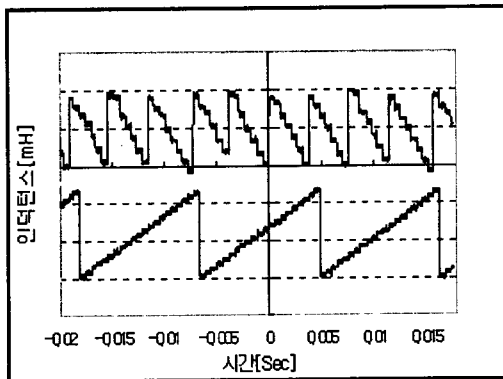


그림 10. 최대 전류상 각각의 인덕턴스 곡선  
(50mH/div)

그림 9는 실시간으로 계산된 자속을 나타내고 그림 10은 각 상의 전류를 비교하여 최대의 전류가 흐르는 상의 인덕턴스를 나타내었다. 구하여진 인덕턴스값을 이용하여 기존에 형성된 테이블값과 비교하여 실제의 각도를 추정한다. 실험에서는 0도의 위치를 추정하여 일정한 간격으로 위치값을 90도 까지 증가시켜 위치를 추정하는 방법을 사용하였다. 그림 11은 실험에 의하여 추정된 회전자의 위치를 나타내었다.

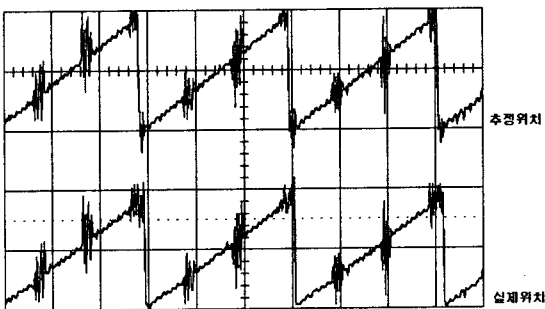


그림 11 회전자의 추정위치  
(5ms/div)

이 논문은 에너지기술 학술진흥사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Stiebler, K. Liu, "Rotor Position Estimation of A Switched Reluctance Generator", ENE97, No. 3, pp. 575~579, 1997.
- [2] J.P.Lyons, S.R.MacMinn, M.A.Preston, "Flux/Current Method For Rotor Position Estimation", IEEE, June 1, pp. 482~487, 1991.
- [3] PP Acarnley, CD French, IH Al-Bahadly, "Position Estimation in Switched-Reluctance Drives", ENE95, No. 3, pp. 765~770, 1995.
- [4] Stephen R.Jones, Barry T.Drager, "Sensorless Switched Reluctance Starter/Generator Performance", IEEE Industrial Applications Magazine, November/December, pp. 33~38, 1997.
- [5] Arthur Radun, "Generating With the Switched Reluctance Motor", Proceedings APEC, pp. 41~47, 1994.
- [6] Iqbal Husain, Mehrdad Ehsani, "Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motor Drives by Measuring Mutually Induced Voltages", IEEE Trans, No. 3, pp. 665~672, 1994.