

인덕턴스를 이용한 Switched Reluctance Generator의 위치센서 없는 구동에 관한 연구

오승보\*, 김영석\*, 김영조\*\*, 유완식\*\*\*  
 인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부\*, 유한대학교\*\*, 특허청\*\*\*

A Study on Sensorless Control of Switched Reluctance Generator Using Instantaneous Inductance  
 <글씨 크기 11Point, 글씨체 신명 디나루, 진하게>

Sung-bo Oh\*, Young-seok Kim\*, Young-jo Kim\*\*, Wan-sik You\*\*\*  
 Inha University\*, Youhan Technical College\*\*, KIPO(Korean Industrial Property Office)\*\*\*

**Abstract** - A Switched Reluctance Generator attracts much attention in the generator because of high efficiency, simplicity, and ruggedness. However, they require rotor position information to operate. In many systems, the rotor position sensor is expensive, limited and undesirable. This paper describes a new approach to estimating the rotor position of a SRG from the measured terminal voltage and current for rotor position sensorless control. The proposed method is based on the instantaneous inductance of the SRG. The proposed technique is very simple and it is able to apply to high speed operation under the stable condition because of its simplicity. The initial rotor position estimation algorithm is efficient and reliable. The proposed method is verified by computer simulation.

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, 특히 SRM(Switched Reluctance Motor)의 경우는 속도 제어 및 토오크 제어 등 상당한 연구개발이 진행되어 왔다. 그러나 SRM과 비슷한 특성을 가지고 있는 SRG(Switched Reluctance Generator)의 연구는 그다지 활발히 진행되고 있지 않다.

SRG는 다른 발전기에 비해서 회전자에 권선이나 영구자석을 가지고 있지 않으므로 여자 전류를 고정자 권선에 공급해 주어야 한다. SRM과 유사하게 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 하는 단점이 있다. 그밖에, 위치검출기를 SRG에 부착함으로써 인한 기기 크기의 증가 및 가공성의 저하 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 사용하여 고속에서도 구동이 가능하며, 초기위치를 추정하는데 있어서도 신속하고 정확한 위치추정이 가능하다. 여

기에서는 컴퓨터를 이용한 모의실험을 통하여 증명하였다.

2. 본 론

2.1 인덕턴스를 이용한 SRG의 센서리스 구동

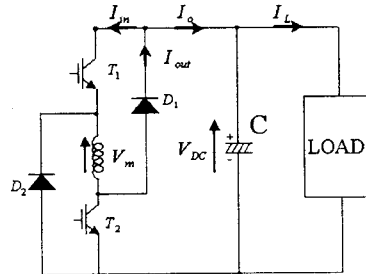


그림 1 한 상에 대한 SRG의 회로

그림1은 SRG의 주회로이다. 사용된 SRG는 고정자의 극수가 8극이고 회전자의 극수가 6극인 기기를 사용하였다. 또한, DC링크 콘덴서를 사용하여 발전을 하기 위한 여자의 전원으로 사용함과 동시에 발생된 전력을 저장시켜 부하와의 전력불평형을 제거시키기 위하여 사용되었다.

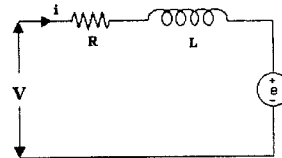


그림 2 한 상에 대한 SRG의 등가회로

SRG의 센서리스 구동을 하기 위하여 각각의 상에 대하여 순시적인 인덕턴스를 전압과 전류를 이용하여 구하였다. 각 상과 상사이의 상호 인덕턴스는 무시하였다. 위의 그림2에서 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 자속쇄계수( $\lambda_m$ )는 인덕턴스와 전류의 곱으로 나타내

어 지고 총 자속과 같기 때문에 인덕턴스에 대하여 나타내어 보면 m번째 상의 인덕턴스는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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 회전자 위치를 나타내는 각도이다. 이들의 관계를 수식적으로 나타내기 위해서는 회전자와 고정자에서의 히스테리시스 손실과 eddy current에 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.

### 2.1.1 SRG의 특성해석

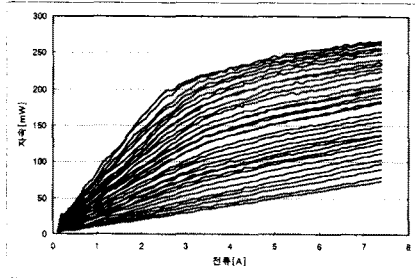


그림 3 전류에 따른 자속곡선

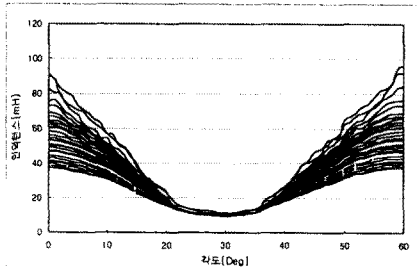


그림 4 회전자의 위치에 따른 인덕턴스곡선

위의 그림3은 전류값의 크기를 변화시키면서 자속을 간접적인 방법으로 측정된 결과를 나타낸다. 자속은 전류에 비례하여 일정구간 증가하는 형태를 보이나 약 3A에서 자속포화가 시작되어 비선형구간이 나타남을 볼 수 있다. 또한 그림4에서 보면 회전자의 위치를 변화시켜가면서 각도의 변화에 따른 인덕턴스를 간접적인 방법으로 측정하였다.

고정자 극수	8 극	정격출력	1 Hp
고정자 극호	22.8 도	권선저항	1.25 $\Omega$
고정자 극간 간격	22.2 도	정격 전류	5 A
회전자 극수	6 극	정격 전압	DC 240 V
회전자 극호	22.6 도	정격 회전수	4000 rpm
회전자 극간 간격	35.4 도	최대 전류	8 A

표 1 시스템에 사용된 SRG사양

위의 표1은 사용하고 있는 SRG의 실제 사양이다.

### 2.1.2 SRG의 센서리스 구동원리

위의 실험에 의하여 구하여진 인덕턴스와 위치의 관계를 소프트웨어적인 방법을 이용하여 Look-up Table을 생성하였다. 배열을 이용하여 각도와 그 위치에서의 인덕턴스를 대응시켜서 3차원 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 각도와와의 관계를 나타내는 Look-up Table을 이용한다면 회전자의 위치를 알아낼 수 있다. 그러나, 이러한 알고리즘에서 위치추정 오차를 고려하여 볼 때 전류의 크기가 작은 부분에서 위치를 추정하게 되면 그림5에서 보듯이 미소한 전류에서 측정된 자속값의 오차가 인덕턴스에 영향을 미치게 되고 그 결과 위치의 오차가 커진다. 따라서 위치추정시에 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. 그림5의 블록도를 이용하여 제안한 방법을 간략하게 나타내었다.

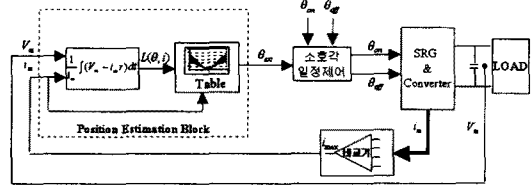


그림 5 인덕턴스를 이용한 SRG센서리스 블록도

### 2.1.3 초기위치 검출 알고리즘

센서를 제거하고 SRG를 구동시키려면 초기에 위치를 파악하여야 하기 때문에 초기위치를 추정하는 방법을 필요로 한다. 초기위치를 추정하기 위하여 전류를 흘려주고 순시적인 인덕턴스를 계산하여 Look-Up Table에 의해 초기위치를 검출하는 방법을 제안한다.

SRG가 회전하는 상태에서 초기위치를 추정하여야 알맞은 각도에서 고정자권선을 여기시켜서 발전을 할 수 있다. 그러나 초기상태에서는 권선에 전류의 흐름이 없으므로 인덕턴스를 검출하기 위하여 SRG의 고정자권선에 전류를 흘려준다. 이때 권선에 흐르는 전류와 단자전압을 알 수 있고 인덕턴스의 순시치를 계산에 의해 알아낼 수 있다. 계산된 인덕턴스는 기존에 만들어진 인덕턴스와 그에 따른 각도의 조합으로 이루어진 Look-up Table을 통하여 어떤전류값에서 계산되어진 인덕턴스에 해당하는 각도를 읽어올 수 있다. 그러나, 초기에 파악

된 위치는 전류의 크기가 작은 부분에서 계산된 값이므로 약간의 오차가 발생하지만 일단 위치가 파악되면 고정자의 상 중에서 어느 한 상의 여기구간에 해당될 것이다. 그렇다면 위치가 파악되는 즉시 현재 여기구간인 상에 턴오프까지 전류가 흐르게 되고 여기된 전류에 의하여 발전이 이루어지며 전류의 값은 초기의 값보다 더욱 상승하게 된다. 전류의 값이 상승하게 되면 위치파악이 더욱 용이해 지고 보다 정확한 위치를 추정할 수 있다. 이렇게 추정된 위치정보를 가지고 다음 상을 여자시키게 되고 정상상태의 운전영역으로 들어가게 된다. 이러한 방법으로 초기위치를 추정하는 것은 간단한 알고리즘에 의하여 가능하고 신속하게 초기위치를 추정하여 SRG를 정상상태로 동작시킬 수 있다.

### 2.2 모의실험 결과

다음은 실제의 실험을 하기 위한 모의실험 결과이다. 이 결과에서는 자속포화시의 현상을 시뮬레이션으로 표현하기는 난해하기 때문에 자속이 포화되지 않는 영역의 결과를 나타내었고 자속포화시의 현상은 실험을 통하여 증명할 예정이다. 아래의 결과는 SRG를 3600rpm으로 회전시켰을 때의 실제 위치값과 제안한 방법을 적용하여 추정된 위치값을 나타내었다. 그리고, 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 오차값을 나타내었다.

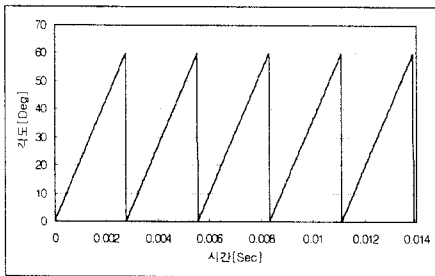


그림 6 실제 회전자의 위치

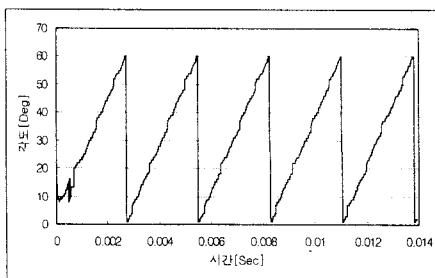


그림 7 추정된 회전자의 위치

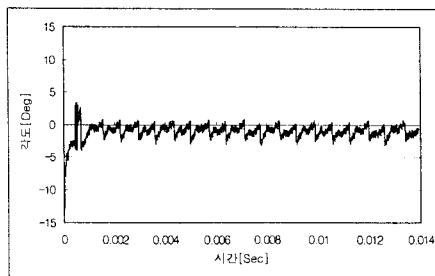


그림 8 추정된 회전자와 실제값과의 오차

위의 실험결과에서 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.

### 3. 결 론

본 논문에서는 위치센서를 제거한 SRG구동을 위하여 각 상의 단자전압과 전류를 이용하여 순시적으로 인덕턴스를 구하고 실험에 의하여 만들어진 각도와 인덕턴스의 조합을 통하여 위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션에 의하여 모의실험을 수행한 결과 초기위치를 파악하는데 있어서 신속하고 간단한 알고리즘에 의해 추정이 용이하게 되었고 정상상태에서의 동작에서도 약 3도 정도의 위치오차를 보이며 실제위치에 가깝게 추정이 되는 결과를 보였다. 이러한 방법은 간단한 알고리즘에 의하여 위치추정이 가능하고 연산량이 작아 마이크로프로세서에서의 연산속도가 빠르기 때문에 고속에서 구동이 가능하다. 그리고, 인덕턴스는 자속포화영역 외에서는 위치에 따라서만 그 값이 변하기 때문에 위치함수로 볼 수 있으므로 정확한 위치추정이 가능하다. 위의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실험에 의하여 계속 연구할 예정이다.

이 논문의 연구는 에너지기술 학술진흥사업의 지원에 의해서 수행되었음.

### [참 고 문 헌]

- [1] M. Stiebler, K. Liu, "Rotor Position Estimation of A Switched Reluctance Generator", ENE97, No. 3, pp575 ~ 579, 1997
- [2] J.P.Lyons, S.R.MacMinn, M.A.Preston, "Flux/Current Method For Rotor Position Estimation", IEEE, June 1, pp482 ~ 487, 1991
- [3] PP Acarnley, CD French, IH Al-Bahadly, "Position Estimation in Switched-Reluctance Drives", ENE95, No. 3, pp765 ~ 770, 1995
- [4] Stephen R.Jones, Barry T.Drager, "Sensorless Switched Reluctance Starter/Generator Performance", IEEE Industrial Applications Magazine, November/December, pp33 ~ 38, 1997
- [5] Arthur Radun, "Generating With the Switched Reluctance Motor", Proceedings APEC, pp41 ~ 47, 1994
- [6] Iqbal Husain, Mehrdad Ehsani, "Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motor Drives by Measuring Mutually Induced Voltages", IEEE Trans, No. 3, pp665 ~ 672, 1994