

회전각 보상방식을 이용한 스위치드 리럭턴스 전동기의 센서리스 속도제어

신규재*, 윤경용**, 권영안**
 *순천제일대학, **부산대학교 전기공학과

Sensorless Speed Control of Switched Reluctance Motor
 Using Rotor Angle Compensation Method

K.J.Shin*, K.Y.Yoon** and Y.A.Kwon**
 *Suncheon First College, **Pusan National University

Abstract - Switched reluctance motor(SRM) has the advantages of simple structure, low rotor inertia and high efficiency. However, position sensor is essential in SRM in order to synchronize the phase excitation to the rotor position. The position sensors increase the cost of drive system and tend to reduce system reliability. This paper investigates the speed control of sensorless SRM in which the phase current and change rate are utilized in position decision, and the period of dwell angle is variable by compensating the rotor angle. The proposed system consists of position decision, phase locked loop controller, switching angle controller and inverter. The performances in the proposed system are verified through experiments.

1. 서 론

스위치드 리럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 회전자에 권선이나 영구자석이 없으므로 제작비용이 저렴하고 회전자 관성이 작으며 넓은 범위의 속도에서 고효율 운전이 가능할 뿐만 아니라 구동 회로가 간단한 점등 여러 가지 장점을 가지는 전동기이다[1-3]. SRM의 속도제어를 위해서는 회전자의 위치각에 대한 정보가 필수적이므로 위치각 정보를 검출하기 위한 센서로써 옵토센서 또는 엔코더가 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 이러한 위치센서로 인하여 SRM의 가격상승, 위치검출회로 인하여 제어회로가 복잡해지는 문제, 열악한 작업환경에서 센서의 신뢰성 문제와 센서 부작을 위한 전동기의 가공문제 등이 발생하게 된다. 따라서 경제성 및 신뢰성 향상을 위하여 센서리스 제어에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 센서리스 SRM 속도제어 방식으로는 상전류 파형 측정에 의한 순시 기전력 측정방식과 인덕턴스 변화량 검출방식, 개루프 제어 방식, 자속 추정방식, 상태관측기를 적용한 방식과 주파수 변조 및 위상변조를 적용한 방식, 상호유도 기전력 측정방식 등이 있다 [4-9].

상기 방식에서 개루프 제어방식 및 상전류 검출에 의한 위치각 추정방식은 간단하고 경제적이거나 고투크를 발생하기 위하여 도통각을 크게 할 경우 역토크가 발생하여 효율이 감소하게 되며 도통각을 좁게 할 경우 효율은 개선되지만 제어의 안정성이 저하된다. 상전류 측정에 의한 순시 기전력 검출방식은 저속에서는 제어가 어렵고 인덕턴스 변화량 검출방식은 전류초평 구간에서 발생하는 고조파를 포함한 상전류의 변화율로 인하여 회전자 위치각 정보의 신뢰성이 저하되는 문제가 발생된다. 또한 상태관측기 방식은 실시간 제어를 위해서는 고가의 프로세서가 필요하며 주파수 변조 및 위상변조를 적용한 방식은 비어자 상태의 상에 자기전단용 필스를 주입하기 때문에 역토크가 발생되어 구동장치의 성능이 저하되고

회로구성이 복잡하다. 상호유도 기전력 측정방식은 저속에서 속도제어가 어렵고 가변 속도제어를 위해서 고정자 저항, 상호인덕턴스, 자기인덕턴스의 정보들을 필요로 한다.

본 논문에서는 센서리스 SRM의 안정된 속도제어 시스템을 설계하기 위하여 회전자 위치검출을 상전류 및 변화율 검출로부터 회전자 위치를 결정하고 기준 상신호와 검출된 상신호와의 위상차에 의하여 도통각 주기폭을 변동하는 위상 고정형의 속도제어 시스템을 제안한다. 설계된 SRM의 속도제어 시스템은 실험을 통하여 성능을 검증한다.

2. SRM 동작

4상 8/6극 SRM의 구조와 스위칭 회로는 그림 1과 같으며 a상의 스위칭 구성을 나타낸다. 선형구간에서 자속은 식(1)과 같다. 또한 회전자 위치에 대한 4상 SRM의 이상적인 인덕턴스 곡선은 그림 2와 같다.

$$\lambda = L(\theta)i \tag{1}$$

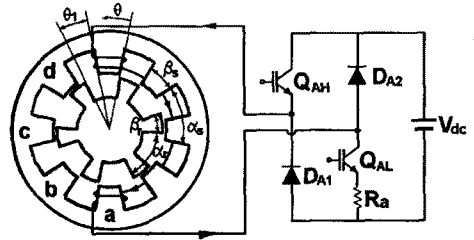


그림 1. 4상 SRM 단면 및 스위칭 회로

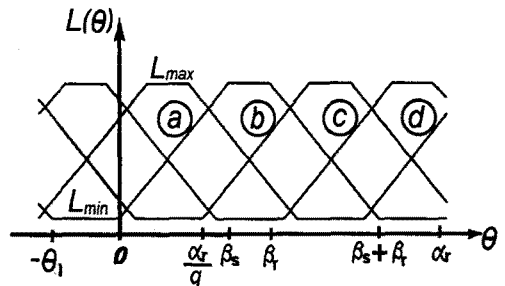


그림 2. SRM의 이상적인 인덕턴스 곡선

SRM에서 전기-기계 에너지 변환은 그림 2와 같이 회전자 위치각 변화에 대한 시변 인덕턴스에 의해서 결정된다. SRM의 동작은 각상의 전압과 발생토크 방정식에 의해서 나타낼 수 있으며 저항에 의한 전압강하와 포화특성을 무시하면 상전압은 식(2)와 같고 인덕턴스는 회전자 위상각의 함수이다. 이때 순시전력은 식(3)과 같다.

$$v = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2)$$

$$= L(\theta) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega$$

단, $\omega = \frac{d\theta}{dt}$

$$p = Li \frac{di}{dt} + i^2 \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (3)$$

회전자의 각속도가 일정하다고 가정하면 식(3)은 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$p = \frac{1}{2} L(\theta) \frac{di^2}{dt} + \omega i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{dt} - \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

$$= \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} L(\theta) i^2 \right] + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega$$

식(4)는 저장에너지의 미분치와 발생 출력의 합으로 나타낼 수 있고 발생출력으로부터 토크는 식(5)와 같다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (5)$$

식(5)를 위치에 따른 순시토크로 나타내면 식(6)과 같다.

$$T = \begin{cases} 0 & -\theta_1 \leq \theta \leq 0 \\ \frac{1}{2} K i^2 & 0 \leq \theta \leq \beta_s \\ 0 & \beta_s \leq \theta \leq \beta_r \\ -\frac{1}{2} K i^2 & \beta_r \leq \theta \leq \beta_r + \beta_s \end{cases} \quad (6)$$

식(6)에서 비정렬구간 ($-\theta_1 \leq \theta \leq 0$)과 정렬구간 ($\beta_s \leq \theta \leq \beta_r$)에서는 토크가 발생하지 않으며 인덕턴스가 증가하는 구간 즉 $\frac{dL}{d\theta} > 0$ 에서는 정토크가 발생되고 인덕턴스가 감소하는 $\frac{dL}{d\theta} < 0$ 에서는 역토크가 발생하게 된다. 발생 토크는 전류의 면적분에 비례하므로 평균 토크 T_{av} 는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{av} = \frac{q}{\alpha_r} \int_{-\theta_1}^{\alpha_r - \theta_1} T d\theta \quad (7)$$

단, q : SRM의 상수

SRM의 동작은 식(6)과 같이 상인덕턴스가 증가하는 구간에서 상권선을 통전하여 정토크를 발생하고 상인덕턴스가 감소하는 구간에서 상권선을 소호시킴으로써 일정한 방향의 토크를 얻게 되며 동일방향의 연속적인 상여자

신호에 의해서 전기에너지는 기계에너지로 변환하게 된다. 따라서 회전자 위치각에 적절한 상여자 신호를 동기화시키기 위한 위치정보를 필요로 한다.

3. 제안된 센서리스 SRM 구동시스템

3.1 회전자 위치검출

센서리스 SRM의 속도제어를 위해서는 식(8)과 같이 전류변화율을 측정하여 인덕턴스를 추정함으로써 회전자의 위치정보를 구할 수 있다. 식(8)에서 저항에 대한 전압강하와 기전력이 무시된다면 di/dt 와 i 의 관계식으로 나타낼 수 있으며 따라서 상전류변화율 검출에 의해서 상인덕턴스 크기에 대한 정보를 구할 수 있다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{v - Ri - \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt}}{l} \quad (8)$$

단, l 은 상인덕턴스

3.2 도통각 제어

도통각을 결정하기 위하여 먼저 SRM이 일회전하는 데 필요한 분해각을 설정하고 가변 운전조건에서 역토크를 억제할 수 있도록 도통각이 결정되어야 한다. 본 연구에서 사용되는 4상, 8/6극 SRM 회전자각 1회전하는 데 24스텝의 여자신호가 필요하며 이 신호의 한스텝에 대한 각도는 15° 가 된다. 그리고 도통각 신호에서 고토크를 발생하기 위하여 도통각을 크게 할 경우 역토크가 발생하여 효율이 감소하게 되며 또한 도통각을 좁게 할 경우 효율은 개선되지만 제어범위가 저하된다. 도통각 제어를 위하여 그림 3과 같이 A, B, C, D의 4구간으로 분류하여 4상에 대해 연속적인 신호를 발생하게 한다.

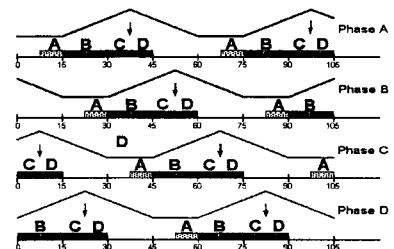


그림 3. 도통각 제어

3.2.1 정상상태 운전

정상상태 운전에서는 기본적으로 도통각이 22.5° 가 되도록 하고 다음 상과 중복각을 7.5° 가 되도록 한다. 이때의 도통각의 점토각은 기준 상권선 여자발생신호와 회전자 위상오차 신호에 의해서 결정되고 점토각은 상전류 검출을 통한 전류변화율에 의해서 도통각이 제어된다.

3.2.3 회전자 보상방식

안정된 속도제어 시스템을 구성하기 위하여 회전자 보상방식을 제안한다. 속도명령에 의하여 상권선의 여자신호를 발생하고 검출된 상전류에 의하여 회전자의 위치결정과 출력된 도통각 범위가 결정된다. 이 신호들은 위상

검출기와 루프필터를 통하여 위상각이 보상됨으로써 위상고정루프형 제어(Phase Locked Loop Control, PLL)가 실현된다. 따라서 위상각 오차에 의하여 그림 4의 A구간 도통신호의 접호각이 보상되며 소호각은 상전류 변화율을 검출하여 역토크 발생하는 D구간 이전에 결정된다. 따라서 급가변속 제어 및 부하인가 시에 발생할 수 있는 탈조문제를 해결할 수 있다.

4. 실험결과 및 검토

설계된 센서리스 SRM 구동시스템의 성능을 검증하기 위하여 그림 4와 같이 센서리스 SRM의 실험을 구성하였다. 제안된 속도제어 시스템은 기준 상신호 발생기, 속도 및 회전각 보상을 위한 위상 검출기와 루프필터의 PLL 제어기, 단상 속도신호를 4상으로 변환하는 상변환회로, 각상의 도통각을 보상하는 스위칭각 제어기, 상전류 검출에 의한 위치각 검출회로, 전류채핑회로와 4상 전압제어형 인버터로 구성된다. 그림 5는 4상 전압제어형 인버터 회로도이다. 그림 6은 지령속도 1500rpm, 3000rpm에서 속도응답을 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 양호한 속도응답을 보이고 있다.

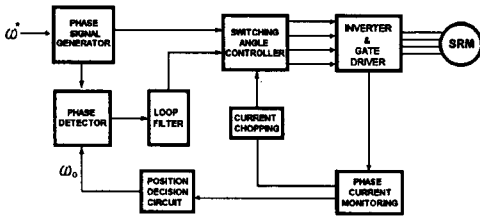


그림 4. 전제시스템 블록도

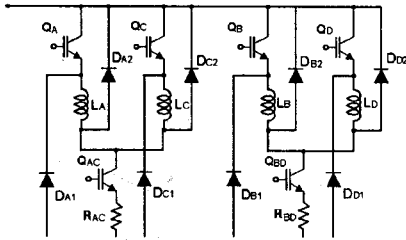
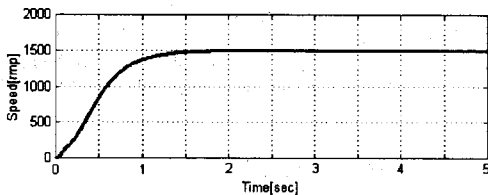
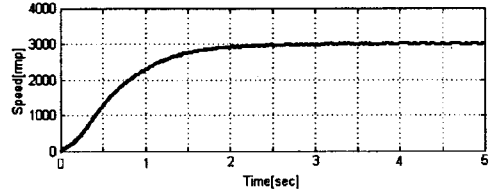


그림 5. 인버터 회로



(a) 지령속도 1500rpm



(b) 지령속도 3000(rpm)

그림 6. 속도응답 실험결과

5. 결론

SRM의 속도제어를 위하여 사용되는 위치 및 속도 센서는 구동시스템의 가격상승 및 열악한 환경에서 신뢰성이 저하되는 문제를 가지게 된다. 본 논문에서는 센서리스 SRM의 안정된 속도제어를 위하여 상전류와 상전류 변화율에 의한 위치각 결정 및 회전각 보상방식 알고리즘을 제시하고 회전각 위상오차에 대하여 도통각의 주기폭을 변동하는 새로운 속도제어 시스템을 제안하였다. 제안된 센서리스 알고리즘은 회로구성이 간단하여 경제성이 뛰어나며 비선형 요소인 자속포화에 대한 고려가 필요없이 속도제어를 수행하는 장점을 가진다. 그리고 제안된 SRM 센서리스 속도제어 시스템은 실험을 통하여 안정된 성능과 추종성이 우수함을 확인하였다.

(참고 문헌)

- [1] Y.A.Kwon and K.Reichert, "Choppingless Operation of a Nonlinear Switched Reluctance Motor", Int Conf on Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines, pp.451~454, 1991.
- [2] Y.A.Kwon "Computation of Optimal Excitation of a Switched Reluctance Motor Using Variable Voltage", IEEE, IE-45, no.1, pp.177-180, 1998.
- [3] T.J.E. Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Oxford Univ. Press, 1993.
- [4] P. P. Acarnley, R. J. Hill and C. W. Hooper, "Detection of Rotor Position in Stepping and Switched Motors by Monitoring of Current Waveforms", IEEE, IE-32, no.3, pp.215-222, 1985
- [5] J.T. Bass, M. Ehasani and T.J.E. Miller, "Robust Torque Control of Switched Reluctance Motor Without a Shaft-Position Sensor", IEEE, IE-33, no.3, pp212-216, 1986.
- [6] A. Lumsdaine and J. H. Lang, "State Observers for Variable-Reluctance Motors", IEEE, IE-37, no2, pp.133-142, 1990.
- [7] C.Elmas and H.Zelaya-De La Parra, "Application of a full-order extended Luenberger observer for a position sensorless operation of a switched reluctance motor drive", IEEE Proc. Control Theory Appl. Vol. 143, No.5, pp.401~408, 1996.
- [8] I. Husain and M. Ehsani, "Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motor Drives by Measuring Mutually Induced Voltages", IEEE, IA-30, no3, pp.665-672, 1994.
- [9] Bin-Yen Ma, Tian-Hua Liu, Ching-Guo Chen, Tsen-Jui Shen and Wu-Shiung Feng, "Design and Implementation of a sensorless switched reluctance drive system", IEEE Proc. PE Vol.1, pp.174~180, 1997