

SRM의 정속도 운전방식에 관한 연구

정 태 옥*, 오 석 규, 황 영 문
부산대학교 전기공학과

Study on Constant Speed Drive Method of SRM

Tae-Uk Jung, Seok-Gyu Oh, Young-Moon Hwang
Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University

Abstract - The SRM has high efficiency, a wide speed range, high speed capability and DC-series Motor characteristics. So the SRM has been studied as adjustable speed machine. The speed of SRM can be adjusted to switching angle and exciting voltage.

This paper suggests an constant speed drive method of SRM. In this method, the speed is controlled by voltage regulation using PI control and the torque is controlled by advance angle in accordance with load torque variation.

1. 서 론

SRM은 운전특성면에서는 기동특성이 우수하고 비토크(specific torque)가 크며 넓은 속도범위에서의 운전이 원활하다. 그러므로, SRM을 가변속 구동시스템으로 활용하기 위한 연구가 진행중이다.

SRM은 일정 부하토크에서는 전압과 속도가 거의 선형적인 비례관계를 가짐으로 인해 속도가 전압에 종속된다. 그러나, 직류직권 전동기와 유사한 토크-속도특성을 가지므로 부하가 가변하면 일정전압에 대한 속도가 변동하는 문제점이 있다.

그러므로, 정속도 운전을 하기 위해서는 부하토크의 변동에 따른 전동토크의 제어가 이루어져야 한다. SRM의 토크는 상전류의 자속에 비례하므로 부하토크의 변동에 따라 여자전류를 조정하여야 한다.

본 연구에서는 SRM의 정속도 운전을 위해 부하토크의 변동을 고려한 스위칭각도의 조정에 의해 직류분권전동기의 토크-속도특성을 가지게 하는 정속도 운전방식을 제안하고자 한다. 이 때 부하토크의 변화에 따른 스위칭각도의 조정기준을 최적의 평활전류(flat-topped current) 여자조건[1~4]에 등으로써 효율을 개선할 수 있을 것으로 예측된다.

2. 고정 스위칭각도 운전에서의 토크-속도특성

SRM의 스위칭각도는 운전특성에 큰 영향을 미치며, 이에 따라 전류파형이 현저하게 달라진다.

그림 1에서와 같이 고정된 스위칭각도 운전조건에서는 부하토크에 따라 상전류의 파형이 다양하게 변화함을 알 수 있다.

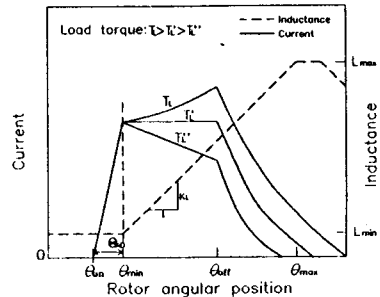


그림 1 스위칭각도와 부하토크에 따른 상전류의 파형

SRM에서 자기회 구조로 인해서 상호인덕턴스의 성분을 무시하면 토크는 상전류와 회전자의 위치각에 따른 인덕턴스의 변화량으로써 다음과 같이 쓸 수 있다[1,2].

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

여기서, T : 토크 i : 상전류
 L : 인덕턴스, θ : 회전자의 위치각,
 K_L : 인덕턴스의 기울기

상전압 방정식에 의해 전류 i 는 식(2)와 같이 유도할 수 있다.

$$i = \frac{1}{K_L} \left(\frac{E}{\omega} - L \frac{di}{d\theta} \right) \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입하여 정리하면 토크는 다음과 같이 정리된다.

$$T = \frac{1}{2K_L} \left(\frac{E}{\omega} - L \frac{di}{d\theta} \right)^2 = \frac{1}{2K_L \omega^2} \left(E - L \frac{di}{dt} \right)^2 \quad (3)$$

위의 식에서 토크와 속도의 관계를 정리하면 식(4)와 같이 직류직권전동기의 토크-속도 특성을 가짐을 알 수 있다.

$$T \propto \frac{1}{\omega^2} \quad (4)$$

그림 2는 피시험 전동기에서의 일정전압과 고정된 스위칭각도의

운전조건인 토오크-속도특성을 전압별로 보여주고 있다.

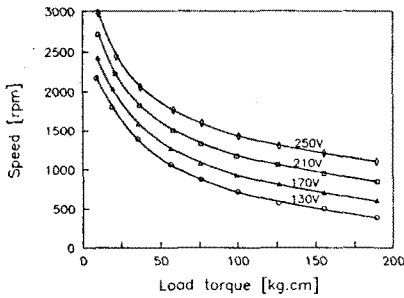


그림 2 고정 스위칭각도에 의한 토오크-속도 특성

일정토오크에 대한 전압과 속도의 관계를 해석하기 위하여 식(3)을 속도에 대한 전압의 식으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\sqrt{2K_L T} + L \frac{di}{d\theta} = \frac{E}{\omega} \quad (5)$$

위의 식에서와 같이 부하토오크와 부하전류가 일정한 경우에는 좌변의 값이 일정하므로 그림 3과 같이 전압과 속도는 선형 비례관계를 가진다.

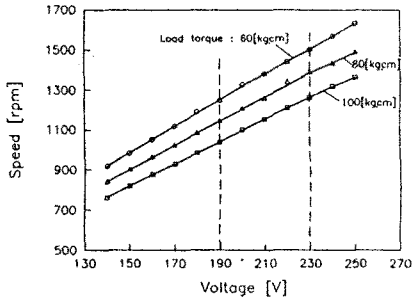


그림 3 고정 스위칭각도에서 전압-속도의 특성

그러나, 부하토오크가 변하는 경우에는 동일전압에 대해 부하토오크의 변동분만큼 속도가 변하므로, 정속도 운전을 위해서는 부하토오크의 변동에 따른 진동토오크의 제이가 요구된다.

본 연구에서는 스위칭각도의 조절에 의해 부하토오크의 변동분에 해당하는 여자전류를 진동기에 공급함으로써 토오크를 제어하려고 한다.

3. 스위칭각도와 전압의 조절에 의한 정속도 운전방식

3.1 스위칭각도 조절에 의한 토오크제어

전압방정식에 의해 인덕턴스가 증가하기 시작하는 각 θ_{min} 에서 확립되는 전류는 다음과 같다.

$$i = \frac{E}{\omega L_{min}} (\theta_{min} - \theta_{on}) = \frac{E}{\omega L_{min}} \theta_{AD} \quad (6)$$

최소인덕턴스 구간에서 확립되는 전류는 식(6)과 같이 속도에 반비례하며 전압과 advance각도에 대해서는 비례한다.

토오크 T 와 부하토오크 T_L 에 의한 속도변화는 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$T - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

임의의 토오크, 속도의 상태에서의 부하토오크의 변동분은 토오크식 (1)에서와 같이 부하전류의 변화분의 자승과 비례적인 관계를 가지게 된다. 그러므로, 식(8)과 같이 advance각도를 부하전류의 변동분에 대응되도록 조정하면 부하토오크의 변동에 무관하게 속도는 일정하게 유지된다.

$$\Delta i = \Delta \theta_{AD} \cdot \frac{E}{\omega} \cdot \frac{1}{L_{min}} \quad (8)$$

그러므로, 속도에 대한 전압의 비 E/ω 는 부하토오크의 크기에 관계없이 거의 일정하게 유지되므로 식(9)와 같이 K_E 라는 상수로 둘 수 있다.

$$\frac{E}{\omega} = K_E \quad (9)$$

그림 4는 피시험 진동기를 부하토오크의 변동에 대해 스위칭각도를 조정하여 항상 평활전류에 운전한 경우의 토오크-속도 특성을 보여주고 있다.

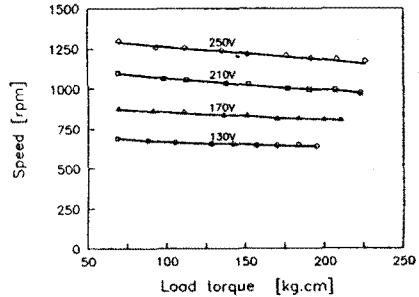


그림 4 스위칭각도 조절에 의한 토오크-속도 특성

그림 4에서와 같이 부하토오크의 변동에 대해 스위칭각도를 조절할 때에는 직류분권진동기의 토오크-속도 특성을 가지게 되므로 부하토오크의 변화에 관계없이 정속도 운전이 가능하다.

3.2 평활전류 여자조건에 의한 토오크제어

본 연구에서는 효율개선을 위하여 스위칭각도의 조절을 최적의 진류파형인 평활전류 여자조건[3,4]을 기준으로 행하고자 한다. 식(6)으로부터 평활전류 I_f 를 확립하기 위한 advance각도 θ_{AD} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_{AD} = L_{min} \cdot \left(\frac{\omega}{E}\right) \cdot I_f \quad (10)$$

식(10)에서와 같이 평활전류를 확립하기 위한 advance각도 θ_{AD} 는 I_f 에 비례하는 특성을 갖는다.

부하토오크와 부하전류 I_f 는 직류링크전류 I_{dc} 와 직접적인 관계가 있으므로 식(10)을 직류링크전류 I_{dc} 의 함수로서 정리할 수 있다. 우선, $\theta_{AD}=0$ 이라도 전류는 흐르기 때문에 그 때의 전류를 I_{dc0} 라고 가정하면 advance각도 θ_{AD} 에 대하여 다음과 같이 정리할 수 있다[4].

$$\theta_{AD} = a \cdot I_{dc} - b \quad (11)$$

그리고, 식(11)의 a , b 는 다음과 같이 속도의 함수로 정의된다.

$$a = \frac{\omega L_{min}}{E} \quad (12)$$

$$b = \frac{\omega L_{min}}{E} I_{d0} \quad (13)$$

그림 4는 피시험 전동기의 직류링크전류와 평활전류 여자를 위한 적정 advance각도의 관계를 나타내고 있다.

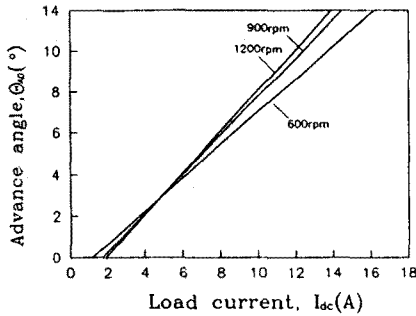


그림 5 속도와 부하전류에 따른 적정 advance각도

그림 5에서와 같이 일정전압에 의해 일정속도로 운전되는 경우에는 직류링크전류와 advance각도가 선형비례관계를 가짐으로 a, b 의 값은 상수이다. 그러나, 속도에 따라서 자기포화 등의 비선형적 요소에 의해 a, b 가 변화한다. 그러므로, 가변속 운전에서 평활전류를 유지하기 위해서는 속도에 따라서 스위칭각도 제어함수의 a, b 를 적절히 조정해야만 한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 시스템의 구성

본 연구에서의 정속도 운전시스템은 그림 6과 같이 구성되며, 토크제어를 위한 스위칭각도 조정은 속도와 직류링크전류의 피드백입력을 갖는 스위칭제어기(switching controller)에 의해 이루어진다.

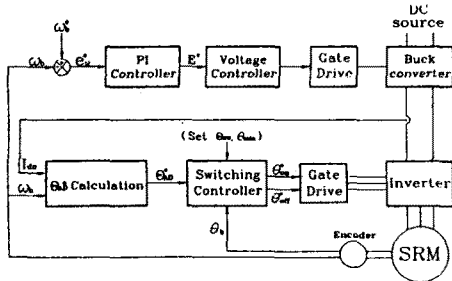


그림 6 정속도 운전시스템의 구성

스위칭각도의 조정에 있어서 스위치-오프각의 조정은 자기포화의 영향과 부토크를 방지할 수 있어 안정된 운전이 가능한 dwell각도 일정제어방식을 채택하였다[4].

Advance각도의 조정에 의한 토크 제어에 있어서 발생하는 정상상태의 속도오차는 속도지령치와 실제속도를 비교하여 PI제어기에 의해 직류링크단의 buck컨버터에 대한 듀티비(duty ratio)를 적절히 가변 조정함으로써 제거할 수 있다.

제안된 정속도 운전방식으로 운전하였을 때의 각각의 부하토크에 따른 전압과 속도의 관계를 그림 7에 나타내었다.

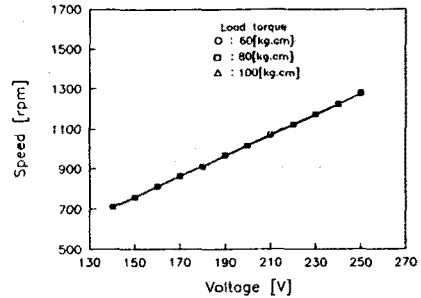


그림 7 가변속운전 시스템의 전압-속도의 특성

본 정속도 운전방식에서는 부하토크에 대응되는 부하전류를 전동기에 공급할 수 있도록 advance각도를 비례적으로 조정하면 부하에 관계없이 속도는 전압에 종속되므로 가변속 운전이 가능하다.

5. 결론

본 연구에서는 SRM의 정속도 운전방식에 대해 고찰하였다.

본 정속도 운전방식에서는 부하토크에 따른 속도변동을 스위칭각도 조정에 의한 토크제어에 의해 억제함으로써 직류분권전동기의 특성을 갖게 하였다.

그리고, 부하토크의 변동에 대한 스위칭각도의 조정기준을 평활전류 여자조건으로 설정하고, 단일펄스의 평활전류로써 SRM을 여자함으로써 효율을 개선하였다.

향후의 연구과제로서 정속도 운전시스템의 안정성과 속응성을 높이기 위한 연구가 요구된다.

참고 문헌

- [1] P.J.Lawrenson, J.M.Stephenson, "Variable-speed switched reluctance motors", Proc. of IEE Pt.B, vol.127, no.4, pp.253-265, July 1980.
- [2] J.M.Stephenson, J.Corda, "Comparison of torque and current in doubly salient reluctance motors from nonlinear magnetization data", Proc. of IEEE, Vol.126, No.5, pp.393-396, May 1979.
- [3] Timothy J.E. Miller, "Converter Volt-Ampere Requirements of the Switched Reluctance Motor Drive", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.IA-21, No.5, Sep./Oct. 1985.
- [4] 황영문, 공관식 외, "SRM의 고효율 구동을 위한 가변 스위칭각도 조정방식에 관한 연구" 대한전기학회 논문지, 제 44권 1호, pp.25-33, 1995.1.