

VVS구동 스위치드 릴럭턴스 전동기의 동작특성

안 영주*, 안 진우**, 조철제***, 황 영문*

* 부산대, **경성대, ***부산공업대

Performance of Switched Reluctance Motor driven by Variable Voltage Source

Y.J. An*, J.W. Ahn**, C.J. Joe***, Y.M. Hwang*

* PNU, **KSU, ***PNUT

Abstract- This paper suggests a SRM control scheme driven by a variable voltage source. This scheme shows that it is unnecessary to introduce a switch to control dc-link voltage and to limit a phase current. And its vary easy to build-up flat-topped phase current which is advantageous to the high torque and efficiency drive of a SRM. Experimental tests are shown to verify this suggestion.

1. SRM의 구동 방식

SRM의 발생 토크는 상전류와 인덕턴스의 변화율로 표시된다. 그러므로 전동기의 토크는 상전류의 크기와 여자 구간으로 제어해야 한다. 상전류는 전동기의 속도, 상 스위치의 동작 시기를 결정하는 θ_{on} 과 θ_{off} 각도, 그리고 구동용 인버터의 토폴로지와 동작방식에 따라 변한다.

SRM을 구동하기 위한 전원으로는 전류원과 전압원이 있다. 이들은 그 전원의 특성으로 인해 토크-속도 특성 등 전동기의 구동특성에 영향을 미친다.

1.1 전류원 구동 방식

그림 1은 전류원 구동 시스템의 전형적인 상전류 파형 예이다. 상여자를 위한 전류는 θ_{on} 에서 흐르고, θ_{off} 에서 제거된다.

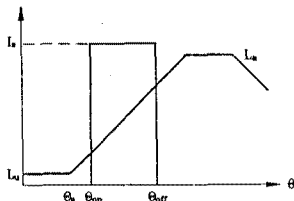


그림 1 전류원 구동 SRM의 상전류
Fig. 1 Phase current driven by a current source

전류원 구동 시스템에서의 토크는 식 (1)과 같다.

$$T_a = \begin{cases} \frac{1}{2} K I_N^2 & , \omega \leq \omega_N \\ \frac{1}{2} K I_N^2 \frac{\omega_N^2}{\omega^2} & , \omega > \omega_N \end{cases} \quad (1)$$

전류원 구동방식은 토크 특성이 우수하고, 제어원리가 간단하여 바람직한 구동방식이나, 전력용 전류원을 구성하기가 쉽지 않으며, 범용 구동장치로 검토되는 SRM의 전원으로는 비경제적이다.

1.2 전압원 구동 방식

전압원 구동방식은 적절한 회전자 위치에서 일정한 크기의 전압을 권선 양단에 인가함으로써 권선에 전류를 확립하고, 전류를 감소시킬 경우에는 음의 전압을 인가하여 전류 감쇄를 빠르게 한다. 그리고 전류 확립이나 상전류를 조정하기 위한 인가 상전압의 조정은 상 스위치의 쇼팅동작이나 혹은 별도의 강압형 쇼퍼를 사용하여 상 전압의 평균 크기를 가변시켜 행한다. 전압원에 의해 구동되는 SRM 시스템의 전력회로의 구성은 비교적 간단하나 상전류 및 토크의 제어가 쉽지않다.

그림 2는 전압원 구동 SRM의 전형적인 상전류 파형을 나타내며, 전압원 구동시의 토크 T_a 는 식 (2)와 같다.

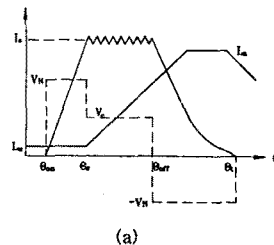
$$T_a = T_1 + T_2 + T_3 \quad (2)$$

$$T_1 = \frac{qK}{2a_r} \int_{\theta_a}^{\theta_{a'}} i^2 d\theta \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{qK}{2a_r} \int_{\theta_{a'}}^{\theta_{a''}} i^2 d\theta \quad (4)$$

$$T_3 = -\frac{qK}{2a_r} \int_{\theta_{a''}}^{\theta_{a'''}} i^2 d\theta \quad (5)$$

식 (3)은 전류원 구동에서와 같이 전류 크기를 제어하면 토크의 제어가 가능함을 보여준다. 식 (4)는 상 스위치를 오프한 후 전류 감소 기간 동안의 전류에 의한 토크이며, 식 (5)는 상전류가 인덕턴스의 감소구간까지 남아있어 발생하는 토크 성분으로 음의 값이다.



(a)

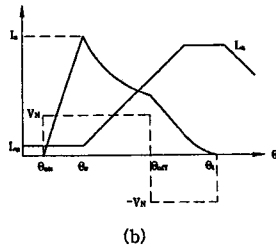


그림 2 전압원 구동 SRM의 상전류
Fig. 2 Phase current driven by a voltage source

식 (1)과 (2)를 사용하여 나타낸 전류원 및 전압원 구동 SRM의 토크-속도 특성은 그림 3에 나타내었다.

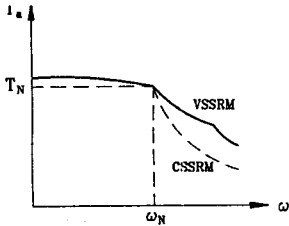


그림 3 전류원 및 전압원 구동 SRM의 토크-속도 특성
Fig. 3 Torque-speed characteristics driven by a voltage and current source

1.3 가변 전압원 구동 방식

일정 전압원에 의한 SRM 구동 방식은 전동기의 토크를 제어하기 위해서 상전류의 크기를 제한하여야 하고, 이를 위해서는 상스위치를 동작시켜 권선의 평균 상전압을 제어해야 한다. 낮은 속도 영역에 있어서는 전동기에서 발생하는 속도 기전력이 매우 낮으므로 상 스위치가 온 될때 급격한 상전류의 상승으로 전류 제어가 쉽지 않다. 또한 빠른 스위칭 동작을

필요로 하기 때문에 고속의 스위칭 능력을 가진 전력용 스위치가 요구된다.

전류원 구동의 잇점을 이용한 가변 전압원 구동 방식의 SRM 시스템은 앞에서 검토한 두 구동방식의 장점을 모두 활용할 수 있다. 전동기가 필요로 하는 토크를 기준으로 하여 토크 발생에 필요한 상 전류 값을 계산하고 이를 이용하여 속도와의 관계에서 필요한 적류 전압을 계산한다.

$$V_c = K I_c \omega_c \quad (6)$$

여기서, ω_c 는 전동기의 회전 속도이며, I_c 는 토크 발생에 필요한 상 전류의 크기, 그리고 V_c 는 그 때의 상 전압이 된다. 여기서 권선의 저항에 의한 전압 강하 및 상 스위치의 전압 강하분을 무시한다.

식 (6)은 적절한 스위치 온 각을 설정하였을 때, 상 권선에 평탄 전류가 흐르게 되는 조건식이다. 이러한 평탄 전류는 전동기에서 발생하는 맥동 토크를 감소시킬 뿐 만이 아니라 저속 운전 영역에서 상 전류를 제어하기 위한 상스위치의 초평을 필요로 하지 않는다. 따라서 상 스위치의 동작에 따른 스위칭 손실이 적다. 또한 전류의 상승이 급격하지 않기 때문에 스위치 및 권선의 전기적인 충격도 줄어든다.

그림 4는 전형적인 가변 전압 구동 SRM에서의 상전류 파형이다. 이전의 전압원 구동 방식에 있어서 전류의 크기를 강제

적으로 조정하는 방식 대신에 전류의 크기에 해당하는 전압을 가변하는 것이다. 그러므로 전압은 항상 주어진 속도와 토크에 대하여 평탄 전류를 흘릴 수 있는 크기로 제어된다. 이 전압의 최대 크기는 전동기의 기준 전압인 V_N 까지 이다.

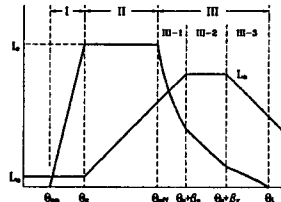


그림 4 가변 전압 구동 SRM에서의 상전류
Fig. 4 Phase current of a variable voltage source

전류의 확립 및 소멸에 대한 각각의 변화 구간을 나누면 그림 4와 같이 3개의 구간으로 대별된다. 상여자 기간은 $(\theta_{off} - \theta_{on})$ 이며, 이 기간 동안은 적절하게 제어된 적류 전압의 크기로서 여자된다. 또한 $(\theta_c - \theta_{off})$ 기간은 전류가 감소하는 기간으로서, 전원 전압의 크기가 상권선에 역방향으로 인가되는 기간이다. 전동기의 회전 속도가 ω_c 이고 단자 전압이 V_c 일 때, θ_s 의 순간에 상전류의 크기는 I_c 의 값에 도달한다. 먼저 I)의 구간에 대한 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_c = iR + L_u \frac{di}{dt} \quad (7)$$

이 식의 전류에 대한 해는,

$$i = \frac{V_c}{R} [1 - \exp(-\frac{R}{L_u} t)] \quad (8)$$

으로 주어진다. 식 (8)은 회전자의 위치가 $\theta_{on} < \theta < \theta_s$ 인 구간 동안은 유효하다. II)의 구간은 상권선에 인가된 전압의 크기와 전동기에서 발생하는 속도 기전력의 크기가 같은 구간으로 상전류의 변화는 없으며 전류원 구동시의와 토크 특성이 같은 구간이다. 이때의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_c = K \omega_c I_c \quad (9)$$

III)의 구간은 상 스위치를 오프하여 상전류가 감소하는 구간으로 그림 4에서와 같이 다시 3 개의 구간으로 세분한다. III-1)의 구간은 인덕턴스가 상승하는 구간임에도 불구하고 전류의 빠른 감소를 위하여 미리 상 스위치가 오프되는 구간이다. 구동용 인버터에 따라 다르지만 여기서는 전류 감소 기간 동안에는 V_c 전압과 크기는 같고 방향만 반대인 전압이 상권선에 인가되는 것으로 한다. 이 때의 전압 방정식은 식 (10)과 같으며, 회로의 저항 및 스위치에 의한 전압강하를 무시하고 전류를 구하면 식 (11)과 같다.

$$-V_c = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + K \omega_c i \quad (10)$$

$$i = I_c (2e^{-\frac{K \omega_c}{R} t} - 1) \quad (11)$$

단, 이 식은 회전자의 위치가 $\theta_{off} < \theta < (\theta_s + \beta_s)$ 의 구간에서

만 유효하다. III-2)의 구간은 고정자의 자극과 회전자의 자극이 완전히 겹쳐지는 구간으로 두 자극의 크기가 다를 경우에 발생하며, 상전류가 감소하는 기간 동안에 음의 토크 발생을 억제하기 위하여 존재한다. 이 기간 동안에 있어서의 전압 방정식과 전류는

$$-V_c = Ri + L_a \frac{di}{dt} \quad (12)$$

$$i = -\frac{V_c}{L_a} t + I_0 \quad (13)$$

이 식은 $(\theta_s + \beta_s) < \theta < (\theta_s + \beta_r)$ 기간에서는 유효하며, 인덕턴스의 변화가 없으므로 속도 기전력의 함은 영이다. 또한 $I_0 = i(\theta_s + \beta_s)$ 는 이 구간에서의 초기 전류값이다.

III-3)의 구간은 인덕턴스의 변화율이 음의 값을 갖는 구간으로서, 상의 전류가 완전히 영으로 되지 않을 경우 상당한 음의 토크를 발생한다. 이 토크는 전동기의 평균 토크를 줄이게 하는 작용을 하므로 가능한 한 이 구간까지는 전류가 남지 않도록 해야 한다. 이 구간에 있어서의 전동기의 속도 기전력은 음의 값으로 되며, 전압 방정식은 다음과 같다.

$$-V_c = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} - K \omega_c i \quad (14)$$

단, 회전자의 위치가 $(\theta_s + \beta_r) < \theta < \theta_t$ 인 구간 동안에 유효하다.

여기서, 저항 R에 의한 전압강하분을 무시하고 전류의 초기값 $I_{01} = i(\theta_s + \beta_r)$ 이라 할 때 전류는

$$i = I_c - [I_c - I_{01}] e^{\frac{K \omega_c}{L(\theta)} t} \quad (15)$$

전동기의 속도가 ω_c 이고 전압 V_c 가 인가될 때, 토크 T_a 는 각 구간의 합으로 나타낼 수 있다.

$$T_a = T_1 + T_2 + T_3 \quad (16)$$

$$T_1 = \frac{qK}{2\alpha_r} I_c^2 (\theta_{off} - \theta_s) \quad (17)$$

$$T_2 = \frac{qK}{2\alpha_r} \int_{\theta_{on}}^{\theta_s} i^2 d\theta \quad (18)$$

$$T_3 = -\frac{qK}{2\alpha_r} \int_{\theta_s}^{\theta_t} i^2 d\theta \quad (19)$$

식에서 알 수 있는 바와 같이 식 (17)은 전류원 구동에 있어서의 토크 발생식과 같으며 이 기간 동안은 일정한 토크를 얻을 수가 있다. 식 (18)과 (19)는 전압원 구동 시스템에서 나타나는 토크로서 가변 전압원 구동 시스템에서도 토크 증가에 이용하게 된다. 토크 식 (18)은 양의 토크를 발생하고, (19)는 전동기의 회전 방향에 대하여 음의 토크를 발생한다. 이 값들은 θ_{off} 각도의 선정에 따라 발생하는 것으로서 적절한 각도의 선정이 필요하다는 것을 의미한다.

2. 실험 및 결과

위상제어형 컨버터와 클래식 인버터를 이용하여 전동기구동 시스템을 구성하였다. 그림 5는 가변전압원 구동시스템의 상전류들, 그림 6은 효율특성을 보여주고 있다.



그림 5 가변전압원 구동시 상전류(5[ms/div], 4[A/div])
Fig. 5 Phase current of VSS driven SRM (5[ms/div], 4[A/div])

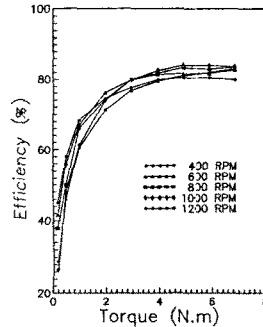


그림 6 일정 속도 운전시 효율
Fig. 6 Efficiency at constant speed drive

3. 결론

본 논문은 SRM구동시스템에서 가변전압원 구동방식을 제안하고 이 구동 방식의 타당성을 확인하기 위하여 가변 전압원 과 구동 인버터로서 SRM 시스템을 구성하여 실험을 행하였다. 제안한 방식은 전 운전구간에서 평탄 상전류로 구동하였으며 구동 토크가 크고 운전효율이 높아 바람직한 구동방식임을 확인하였다.

참고문헌

- [1] P.J.Lawson, J.M.Stephenson, P.T.Blenkinsop, J.Corda, N.N.Fulton " Variable-speed switched reluctance motors" IEE Vol.127, Pt.B, No.4,July,pp.253-265, 1980
- [2] J.W Ahn, G.S. Gong, Y.M. Hwang, "Predicting the Torque Characteristics of Switched Reluctance Motor by using Nonlinear Inductance Profile" IEEE-TENCON Conf. pp 580-584, 1993
- [3] J.W. Ahn, Y.B.Choo, Y.M. Hwang "A Design Method for High Efficiency SRM Drive" IMPEC'94, Beijing, China, 1994