

오차 · 되먹임 비선형 보상기를 이용한 SR 모터의 견실한 속도 제어

A Robust Speed Control of SR Motor Using Error · Feedback Nonlinear Compensator

이 태 규, 허 욱 열
(Tae Gyoo Lee, Uk Youl Huh)

Abstract : The speed of SR(Switched Reluctance) motor can be controlled by switching angle. However, since the relation between speed and switching is nonlinear, it is difficult for simple adjustment schemes to achieve the desired performances. In this paper, an error · feedback nonlinear compensator with robustness is proposed for improving the performances of the switching angle controlled SR motor. The proposed controller consists of integral type control and relay type control. The integral type controller which operates regulation, is derived by the steady · state I/O(input/output) map and the relay type controller which works tracking, is designed by Lyapunov stability theory. The validities of the proposed controller are confirmed with the experimental results.

Keywords: SR motor, switching angle, error · feedback nonlinear compensator, steady · state I/O map

I. 서론

SR 모터는 기동 토크가 크고 가변속이 용이할 뿐만 아니라 그 범위가 매우 넓으며 구조가 간단하고 신뢰도가 높다는 장점 때문에 많은 산업 영역에서 이용되고 있다. 그런데 SR 모터는 단순한 구조에 기인하는 회전자 위치에 대한 인덕턴스의 심한 변화에 따른 비선형 특성 때문에 제어를 하는데 문제점을 가진다[1][2].

SR 모터의 속도는 상 전류와 스위칭 각에 의하여 제어될 수 있다. 상 전류에 의한 제어는 토크의 맥동을 줄이기 위하여 회전자 위치에 대한 인덕턴스의 형태를 가정하고 전류의 형태를 조정함으로써 토크 맥동을 줄임으로써 깨끗하게 속도를 제어하는 방법이 주로 연구되고 있다[3][4]. 그런데 고속의 운전이 요구될 경우 역기전력의 증가로 인하여 상 전류를 제어하는데 어려움이 따른다. 따라서 고속에서는 회전자 위치에 대한 여자 구간만을 조절하는 스위칭 각에 의한 제어가 이루어진다[5]. 그런데 스위칭 각에 의한 속도 제어시, 스위칭 각과 속도의 관계를 명확히 결정짓기가 어렵다. 또한, SR 모터의 인덕턴스가 모터의 구조에 의하여 결정되므로 모터의 설계 형태에 따라 스위칭 각에 대한 속도 특성이 변화하게 된다. 따라서 스위칭 각에 의한 속도 제어를 위해서는 모터에 대한 스위칭 각 특성을 다양한 실험을 통하여 먼저 파악하여야 한다. 그러나 일반적으로 스위칭 각 · 속도 특성이 비선형적으로 주어져 단순한 여자 구간만을 조절하는 형태일지라도 적절한 제어 이론을 통한 보상이 필요하다.

본 논문에서는 비선형 스위칭 각 · 속도 특성을 가지는 SR 모터의 제어를 위하여 적분 형태를 가지는 오차 되먹임 비선형 보상기를 전개한다. 그런데 제시된 제어기는 수렴이 늦어진다는 단점을 가지게 된다. 따라서 이러한 문제의 해결을 위하여 불연속 입력으로 설계되는 견실한 제어 기법을 병행하여 스위칭 각에 의한 SR 모터의 속도 제어 성능과 견실성을 높이는 제어기를 제안하였다. 제시된 제어기는 마

이크로 프로세서를 이용한 6/4 SR 모터에 대한 실제 실험을 통하여, 간단하게 설계될 수 있으며, 효율적임을 보였다.

표 1. SR 모터 모델의 파라미터.

Table 1. The parameters of SR motor model.

p	p 번째 상 $p=1,2,\dots,n$	θ	회전자 위치 [rad]
		ω	회전자 속도[rad/sec]
i_p	전류 [A]	B	점성 마찰 계수[Nm/rad s ⁻¹]
$L_p(\theta)$	인덕턴스[H]	J	관성 모멘트[kg m ²]
R	권선저항[Ω]	τ	발생 토크[Nm]
V_p	인가전압[V]	τ_l	부하 토크[Nm]

II. SR 모터 모델과 스위칭 각

이절에서는 일반적인 SR 모터의 모델링과 스위칭 각에 의한 토크 특성에 대하여 설명한다.

SR 모터는 자기적으로 선형적인 영역에서 동작하고 상호 인덕턴스를 무시한다면 다음과 같이 모델링된다[4][6].

$$\frac{di_p}{dt} = -L_p^{-1}(\theta) [R + \frac{\partial L_p(\theta)}{\partial \theta}] i_p + L_p^{-1}(\theta) V_p \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{B}{J} \omega + \frac{1}{J} (\tau - \tau_l) \quad (3)$$

(1)~(3)의 각각의 파라미터에 대한 정의는 표1에 나타나 있다. 그리고 (3)의 SR 모터의 발생 토크는 다음과 같이 주어진다[2][3].

$$\tau = \sum_{p=1}^n \frac{\partial L_p(\theta)}{\partial \theta} i_p^2 \quad (4)$$

여기서 n 은 상(phase)의 수이다. (4)에서 알 수 있듯이 SR 모터의 토크는 회전자 위치에 대한 인덕턴스의 변화량과 전류의 제곱에 의하여 결정된다. 만약, SR 모터의 속도가 회전자 위치에 대한 여자 구간에 의하여 제어된다면, 임의의 상에 대하여 전기적인 주기($\lambda=2\pi/N_r$, N_r 은 회전자 극수)에서 여자되는 구간이 결정될 것이다[1][3]. 따라서 한 주기에 발생하는 토크의 평균은 다음과 같이 표현할 수 있다.

접수일자 : 1996. 3. 14., 수정완료 : 1996. 9. 30.

이태규, 허욱열 : 인하대학교 전기공학과

* 본 연구는 1996년도 인하대학교 연구비지원에 의하여 수행되었습니다. 박사후 과정을 지원해주신 인하대 산업과학 기술연구소에 감사드립니다.

$$\tau_a(\alpha, \theta_s) = \frac{1}{\lambda} \left[\int_a^{\theta_s} \tau(\theta) d\theta + \int_{\theta_s}^{\lambda-a} \tau(\theta) d\theta \right] \quad (5)$$

여기서, $a \sim \theta_s$ 는 인가 전압이 가해지는 여자 구간으로 스위칭 각이라 정의하고, a 는 상이 ON되는 회전자의 위치를 나타낸다. 이를 ON각이라 하면, a 는 SR 모터의 회전자와 고정자의 위치로부터 설계자에 의하여 결정될 수 있다. 그리고 θ_s 는 상이 OFF되는 회전자의 위치로 이를 OFF 각이라 정의하면, SR 모터의 토크는 ON각(a)와 OFF각(θ_s)에 의하여 제어될 수 있다. 그림 1은 6/4 SR 모터의 구조와 A-A' 상에 대하여 회전자와 고정자가 완전히 어긋난 경우를 $a=0$ 이라 선정했을 때 a 와 θ_s 그리고 λ 를 도시하였으며, 그림 2는 구동 회로인 비대칭형 인버터에서의 (5)의 각각의 구간에 대한 전류의 흐름을 나타내었다[7]. 그림 3은 실험에 의한 전류의 형태와 게이트(Gate) 신호 그리고 그림1의 구조에서 정의된 구간을 표시하였다. 결국, SR 모터는 a 또는 θ_s 에 의하여 전류의 형태와 인덕턴스의 변화량이 다르게 설정되어, 평균 토크가 변화하게 된다. 이때 SR 모터는 자기 저항을 최소로 하는 방향, 즉 반시계 방향으로 회전한다[2][3].

결국, ON각(a)를 고정시키고, OFF각(θ_s)에 의하여 SR 모터를 제어한다면, (3)의 SR 모터의 속도는 스위칭 각에 의한 평균 토크에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\omega}{dt} = -a\omega + b[\tau(\theta_s) - \tau_l] \quad (6)$$

여기서, a 와 b 는 미지의 정(+의 상수이며, $\tau(\theta_s)$ 는 미지의 함수로 가정한다.

III. 오차·되먹임 비선형 보상기

이절에서는 오차·되먹임 보상기의 설계 및 그 문제점을 파악하고 이를 해결하기 위한 방법에 대하여 설명한다.

(6)의 SR 모터 모델은 스위칭 각에 의하여 원하는 속도로의 제어가 가능하다. 따라서 다음과 같은 정상 상태 입·출력 함수(I/O map)가 존재한다.

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{b}{a} [\tau(\theta_s) - \tau_l] \\ &= M(\theta_s) \end{aligned} \quad (7)$$

(7)은 (6)에서 $\dot{\omega}$ 를 0으로 하여 전개한 정상 상태 함수이다. 따라서 $M(\theta_s)$ 를 알 수 있다면 손쉽게 원하는 속도로의 제어가 가능하다. 그런데 (7)은 미지의 함수에 의하여 구성되어 있으므로 $M(\theta_s)$ 를 파악하는데 어려움이 따른다.

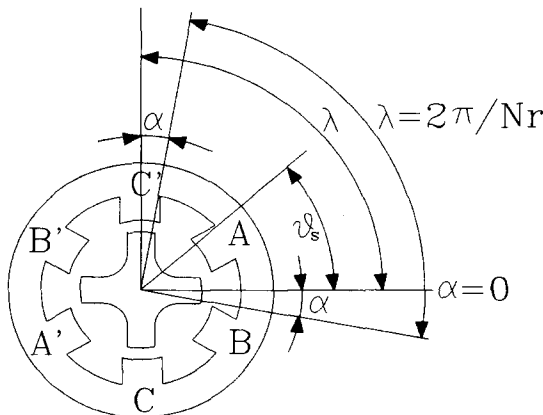


그림 1. SR 모터의 구조와 스위칭 각.
Fig. 1. The structure of SR motor and switching angle.

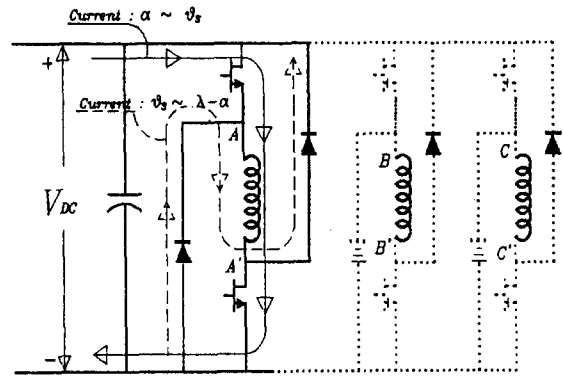


그림 2. 비대칭형 인버터와 상전류.
Fig. 2. The asymmetric inverter and the phase current.

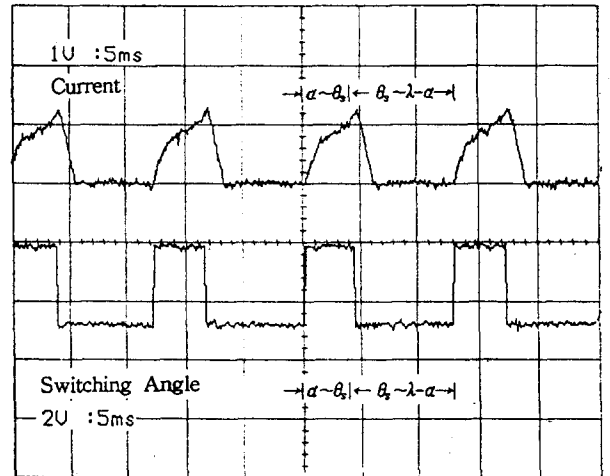


그림 3. SR 모터의 상 전류와 스위칭 각.
Fig. 3. The phase current and switching angle of SR motor.

정리 1: 만약, (8)을 만족하는 근사 함수, $\tilde{m}(\theta_s)$ 를 선정할 수 있다면, (9)와 같은 오차·되먹임 보상기에 의하여 속도 오차($e = \omega - \omega_r$)는 0으로 수렴한다.

$$x = m(\theta_s) \tilde{m}(\theta_s)^{-1} > 0 \quad (8)$$

$$\dot{\theta}_s = -\varepsilon \tilde{m}(\theta_s)^{-1} e \quad (9)$$

$$m(\theta_s) = \frac{\partial M(\theta_s)}{\partial \theta_s}, \quad \tilde{m}(\theta_s) = \frac{\partial \tilde{M}(\theta_s)}{\partial \theta_s} \quad (10)$$

여기서, ε 은 충분히 작은 정(+의 상수이며, ω_r 은 일정 속도지령치이다.

증명: ε 은 충분히 작은 정(+의 상수이므로 입력의 변화가 매우 느리므로 ω 는 $M(\theta_s)$ 상에 존재한다. 따라서 다음이 성립한다[8][9].

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{\omega} - \dot{\omega}_r \\ &= \frac{\partial M(\theta_s)}{\partial \theta_s} \dot{\theta}_s \end{aligned} \quad (11)$$

결국, (9)에 의하여 (11)은 다음과 같이된다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -\varepsilon [m(\theta_s) \tilde{m}(\theta_s)^{-1}] e \\ &= -\varepsilon x e \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 e_x 는 정(+)의 값이므로 오차는 0으로 수렴한다. ■
 정리 1에서 만약 $m(\theta_s)$ 가 항상 정(+) 또는 부(-)의 값을 가진다면, $\tilde{m}(\theta_s)$ 를 일정한 정(+) 또는 부(-)의 값으로 정하여 원하는 속도로의 제어가 가능하다. 이 경우 제어기는 단순한 적분 제어기가 된다. 그리고 (9)에 의한 제어는 정상 상태 입 · 출력 함수의 근처에서 국부 안정하다는 조건이 만족되면 외란에 대하여 견실하다는 장점을 가진다. 그런데 정리1에서 ε 는 충분히 작은 값을 가짐으로써 정상 상태 입 · 출력 함수를 따라 제어가 이루어지게 되므로 수렴이 늦어진다는 단점을 갖는다.

정리 2: 만약, (13)과 같은 제어 입력을 선정할 수 있다면, 오차는 0으로 수렴한다.

$$\theta_s = \tau^{-1}(-\text{sgn}(e) \rho_{\max}) \quad (13)$$

$$\rho_{\max} = \frac{1}{|b|_{\min}} (|a\omega|_{\max} + |b\tau_l|_{\max}) \quad (14)$$

$$\text{sgn}(e) = \begin{cases} 1 & e > 0 \\ 0 & e = 0 \\ -1 & e < 0 \end{cases} \quad (15)$$

증명: 다음과 같은 Lyapunov 함수를 선택한다.

$$V = \frac{1}{2} e^2 \quad (16)$$

(16)의 도함수는 지령 속도가 일정하므로 (6)에 의하여 다음과 같이된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e \dot{e} \\ &= e(-a\omega - b\tau_l) + e b \tau(\theta_s) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, $\tau(\theta_s)$ 를 다음과 같이 선택한다.

$$\tau(\theta_s) = -\text{sgn}(e) \frac{1}{|b|_{\min}} (|a\omega|_{\max} + |b\tau_l|_{\max}) \quad (18)$$

(18)에 의하여 (17)은 다음과 같이된다[10][11].

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e(-a\omega - b\tau_l) \\ &\quad - e \cdot \text{sgn}(e) \frac{b}{|b|_{\min}} (|a\omega|_{\max} + |b\tau_l|_{\max}) \\ &< 0 \end{aligned} \quad (19)$$

결국, Lyapunov 함수의 도함수는 항상 부(-)의 값을 가지게 되어 오차는 0으로 수렴한다. 따라서 (18)로 부터 (13)을 얻을 수 있다. ■

(13)의 제어 입력은 (9)의 제어 입력에 비하여 모터에 대한 실험을 통하여 보다 간단하게 얻을 수 있으며 견실한 제어가 가능하게 한다. 그러나 정리 2에 의한 제어 입력은 불연속으로 구성되어 떨림(chattering) 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제는 정리 1과 정리 2의 제어기를 결합함으로써 해결할 수 있다[11] [12]. 즉, 제어 입력을 다음과 같이 설계한다.

$$\theta_s = \begin{cases} \tau^{-1}(-\text{sgn}(e) \rho_{\max}) \\ -\varepsilon \int \{ \tilde{m}(\theta_s)^{-1} e \} dt, & |e| > \delta \\ -\varepsilon \int \{ \tilde{m}(\theta_s)^{-1} e \} dt, & |e| < \delta \end{cases} \quad (20)$$

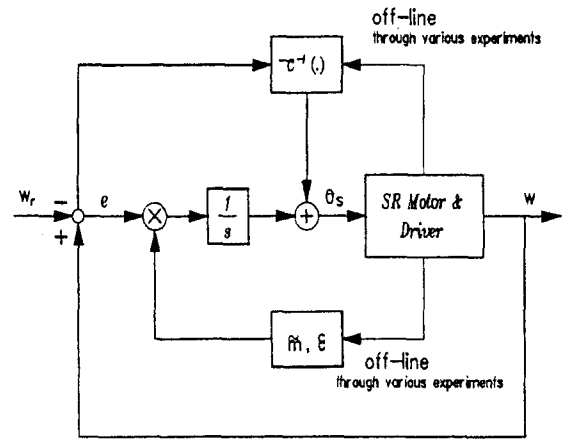


그림 4. 제시된 제어기의 개념도.

Fig. 4. The block diagram of proposed controller.

여기서 δ 는 설계자에 의하여 결정되는 정(+)의 상수이다. 결국, (20)은 빠른 수렴을 하면서 떨림을 방지할 수 있는 제어 입력으로서 동작할 수 있다. 그림 4에 (20)에 의한 제어기의 블록 선도를 도시하였다.

IV. 실험

이절에서는 (20)에 의한 제어기의 성능을 6/4 SR 모터에 대한 마이크로 프로세서 8097을 이용한 실험을 통하여 평가한다. 그림 5에 실험 장치의 구성도를 나타내었다.

그림 6은 OFF각(θ_s)과 ON각(a)에 따른 SR 모터의 정상 상태 속도를 실험을 통하여 얻은 결과이다. 이때 작은 전기 각을 나타낸다. 6/4 SR 모터의 경우, 기계각 90°]가 전기 각 360°]에 해당한다. 그림에서 알 수 있듯이 SR 모터는 OFF각(θ_s)과 ON각(a)에 의하여 속도의 제어가 가능하다. 본 연구에서는 ON각(a)을 고정하고 OFF각(θ_s)을 이용하여 제시된 제어기를 실현한다. 그림 6의 OFF각(θ_s)에 의한 특성 곡선으로 부터 알 수 있듯이 C를 기준으로 (10)의 $m(\theta_s)$ 의 부호가 변화하게 된다. 따라서 C~E구간을 제어 영역으로 선정한다면 정리 1의 제어 입력에 의하여 원하는 속도로의 제어가 가능하다. 그런데 이 구간에서 속도 · 스위칭 각 특성이 곡선의 형태를 가지므로 함수 $M(\theta_s)$ 를 정확히 정하는 데는 어려움이 있으며, $m(\theta_s)$ 가 매우 작은 B~D의 영역에서 최대 속도 점인 C가 변화를 가질 수 있으므로 이러한 문제를 피하기 위하여 D~E의 영역을 제어 구간으로 선정한다. 따라서 정리1에 의한 제어를 위하여 D~E구간에서 $m(\theta_s)$ 는 부(-)의 값을 가지므로 $\tilde{m}(\theta_s)$ 를 부(-)로 정하면 (8)을 만족하게됨으로 (9)의 제어 입력에 의하여 제어가 가능하다.

그림 7은 $\tilde{m}(\theta_s)=-1$ 로 선정할 경우, ε 값에 따른 속도 응답 특성을 나타내고 있다. 정리1에서 ε 는 매우 작은 값을 가져야 한다. 따라서 ε 이 작은 경우, 즉 $\varepsilon=0.625$ 의 값을 가지는 경우는 과도 상태의 진동이 거의 없이 원하는 속도로 수렴하는 것을 볼 수 있으나, 상승 시간이 매우 늦어짐을 알 수 있다. 그리고 ε 이 커지는 경우, 즉 $\varepsilon=10$ 또는 2.5를 가지는 경우, 상승 시간은 개선이 되나 진동이 심해지는 것을 파악할 수 있다. 또한 ε 이 작은 경우 입력, 즉 스위칭 각이 포화 영역에 도달하지 않지만 ε 이 큰 값을 가질 때는 포화 영역에서 스위칭 각이 형성됨을 알 수 있다. 이는 그림 7의 기울기의 변화점인 C가 외란에 의하여 변화를 가진다고 할 때 포화 영역에서 동작을 하면 문제가 될 수 있다. 따라서 제어 특성에 맞는 적절한 ε 의 선정이 중요하다. 그

림 8은 ϵ 을 2.5로 선정한 경우 지령 속도의 변화를 주어졌을 때 응답 특성이다. 그림 8과 그림 7에서 알 수 있듯이 $m(\theta_s)$ 가 큰 경우에 과도 응답 특성이 저하됨을 알 수 있다. 결국, SR 모터의 비선형 특성에 의하여 제어기의 성능이 영향을 받으나, 원하는 제어가 가능함을 알 수 있다. 그리고 그림 9는 외란이 인가되었을 때 응답을 나타낸다. 그림에서 커다란 오버슈트후 지령 속도로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다.

결론적으로 정리 1의 제어기는 (8)을 만족하는 근사 $\tilde{m}(\theta_s)$ 를 정할 수 있으면 원하는 제어를 이룰 수 있으나 비선형 특성과 외란에 의하여 과도 상태 특성이 저하됨을 알 수 있다. 이러한 문제의 해결을 위하여 (20)을 이용할 수 있다.

(20)의 δ 를 3[rps]로 선정하였다고 하면, 그림7의 D와 E로 부터 오차가 3[rps]보다 클 때 $\tau^{-1}(-\text{sgn}(e)\rho_{\max})$ 를 120 [°]로 오차가 -3[rps]보다 작을 때 $\tau^{-1}(-\text{sgn}(e)\rho_{\max})$ 를 70 [°]로 선정하면 된다. 그리고 $\tilde{m}(\theta_s)$ 와 ϵ 은 앞의 실험을 통하여 정한 -1과 2.5의 값을 그대로 이용할 수 있다. 그림 10은 이렇게 설계된 제어기의 응답을 나타내고 있다. 그림 8과 비교하여 상승 시간이 빨라지고, 과도 상태 응답 특성이 개선됨을 볼 수 있다. 그리고 그림 11은 외란을 인가하였을 경우의 실험 결과이다. 그림 9와 비교하여 응답 특성이 매우 개선되었음을 알 수 있다.

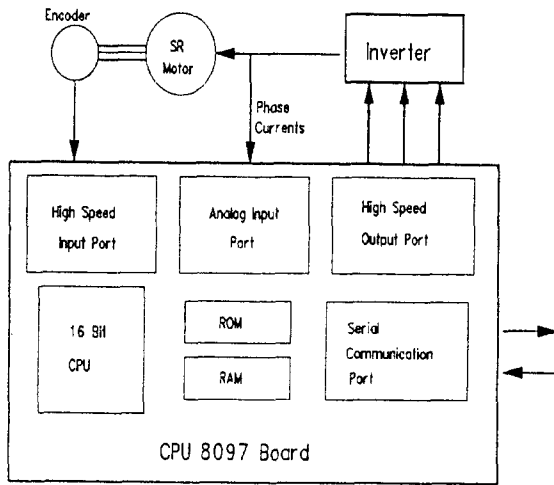


그림 5. SR 모터 실험 장치의 구성도.
Fig. 5. The block diagram of experimental system.

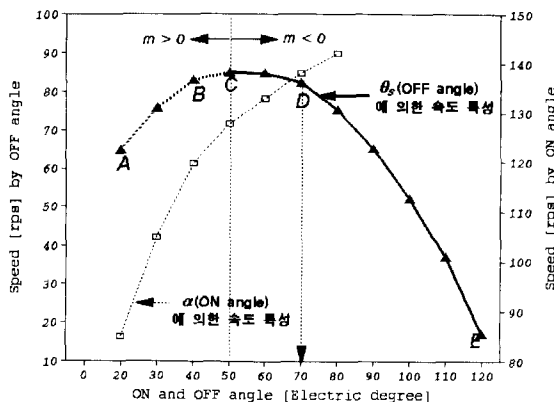


그림 6. SR 모터의 스위칭 각 · 정상 상태 속도 특성.
Fig. 6. Switching angle · steady state speed of SR motor.

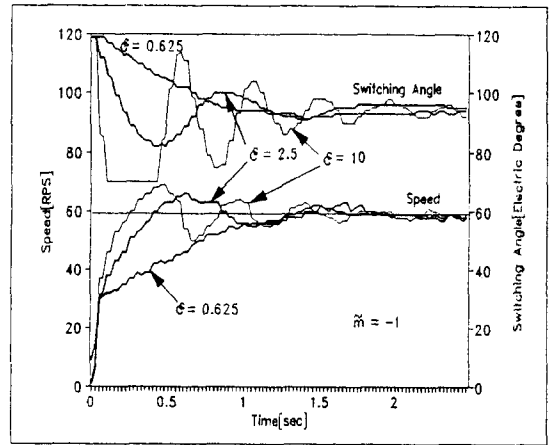


그림 7. (9)에 의한 SR 모터의 속도 · 스위칭 각.
Fig. 7. The speed · switching angle of SR motor using (9).

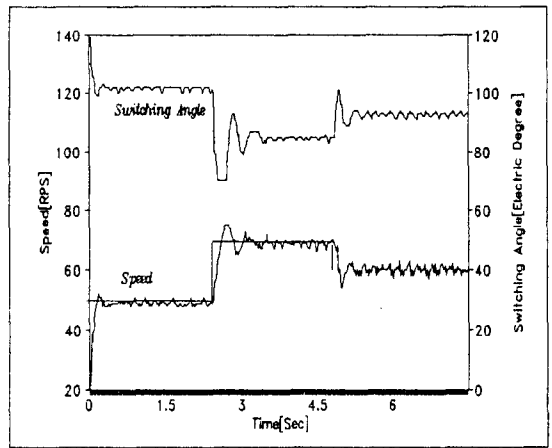


그림 8. 지령치 변화를 가질 때 (9)에 의한 속도 · 스위칭 각($\epsilon=2.5$ & $\tilde{m}=-1$).
Fig. 8. The speed · switching angle with varying commands using (9) ($\epsilon=2.5$ & $\tilde{m}=-1$).

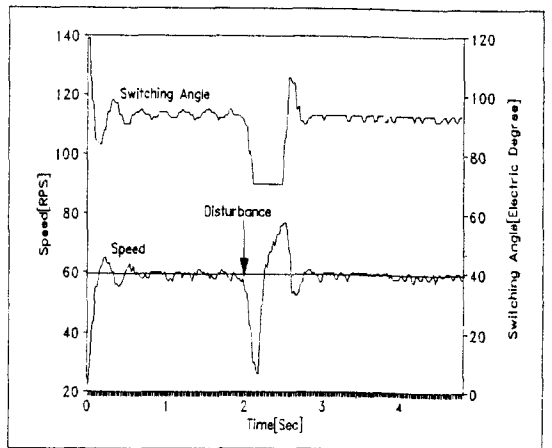


그림 9. 외란 인가시 (9)에 의한 속도 · 스위칭 각 ($\epsilon=2.5$ & $\tilde{m}=-1$).
Fig. 9. The speed · switching angle with disturbance using (9) ($\epsilon=2.5$ & $\tilde{m}=-1$).

이상의 실험으로부터 비선형 특성을 가지는 SR 모터에 대하여 제시된 (20)의 제어기가 효율적으로 동작할 수 있음을 파악하였다.

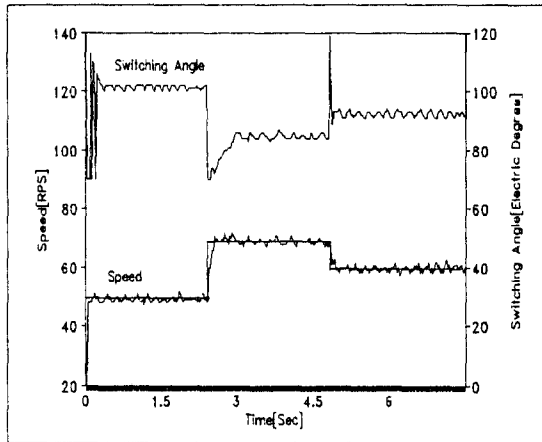


그림 10. 지령치 변화를 가질때 (20)에 의한 속도 · 스위칭 각 ($\epsilon=2.5, \tilde{m}=-1$ & $\delta=3$).

Fig. 10. The speed · switching angle with varying commands using (20) ($\epsilon=2.5, \tilde{m}=-1$ & $\delta=3$).

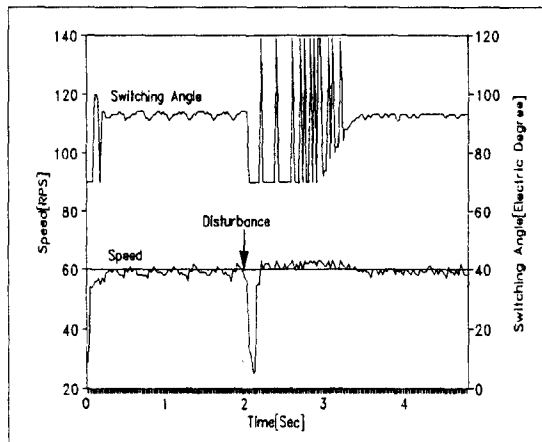


그림 11. 외란 인가시 (20)에 의한 속도 · 스위칭 각 ($\epsilon=2.5, \tilde{m}=-1$ & $\delta=3$).

Fig. 11. The speed · switching angle with disturbance using (20) ($\epsilon=2.5, \tilde{m}=-1$ & $\delta=3$).

V. 결론 및 고찰

본 논문에서는 SR 모터의 속도 제어를 위하여 적분 형태의 제어기와 릴레이 형태의 제어 입력을 병행하는 제어를 제시하였다. 제시된 제어기는 간단하게 설계되지만, 이론적 해석과 실제 실험을 통하여 비선형 특성에 대하여 원하는 제어를 행할 수 있으며 견실성을 가짐을 보였다.

제시된 제어기는 SR 모터에 대한 특성 시험에 의하여 정리 1과 정리 2에서 나타난 조건을 만족하는 제어 영역을 선정하여야 한다. 즉, 그림 6의 C점에 대한 정보가 중요하다. 만약 SR 모터의 스위칭 각과 속도 특성이 부하나 외란에 의하여 변화를 갖는다고 할 때, C점의 위치가 변화한다고 하면 이론적으로 제시된 제어기의 안정도에 영향을 미칠 수

있으므로 이러한 문제를 충분히 고려하여 제어기를 설계하여야 한다.

참고문헌

- [1] T. J. Miller, *Brushless Permanent-magnet and Reluctance Motor Drives*, Clarendon Press, Oxford, 1989.
- [2] D. G. Manzer, M. Varghese and J. S. Thorp, "Variable reluctance motor characterization," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 56-63, Feb., 1989.
- [3] M. I. Spong, R. Marino, S. M. Peresada and D. G. Taylor, "Feedback linearizing control of switched reluctance motors," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. AC-32, no. 4, pp. 56-63, pp. 371-379, Apr., 1992.
- [4] M. I. Spong, T. J. Miller, S. R. Macminn and J. S. Thorp, "Instantaneous torque control of electric motor drives," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. PE-2, no. 1, pp. 55-61, Jan., 1987.
- [5] D. O'Kelly, *Performance and Control of Electrical Machines*, McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1991.
- [6] D. G. Taylor, "Pulse-width modulated control of electromechanical systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 37, no. 4, pp. 524-528, Apr., 1992.
- [7] S. Vukosavic and V. R. Stefanovic, "SRM inverter topologies : a comparative evaluation," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 27, no. 6, pp. 1034-1047, Nov./Dec., 1991.
- [8] H. C. Tseng, "Servomechanisms in nonlinear systems : the integral manifold approach," in *American Control Conference*, San Diego, CA, pp. 3052-3053, 1990.
- [9] A. Isidori and C. I. Byrnes, "Output regulation of nonlinear systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 35, no. 2, Feb., 1990.
- [10] R. Marino, "High gain feedback in non-linear control systems," *Int. J. Control*, vol. 42, no. 6, pp. 1369-1385, 1985.
- [11] S. Gutman, "Uncertain dynamical systems-a lyapunov min-max approach," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 24, no. 3, pp. 437-443, May., 1979.
- [12] L. X. Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall International, Inc. 1994.

**이 태 규**

1964년 9월 10일생. 1987년 2월 인하대학교 전기공학과(학사) 졸업. 1989년 2월 인하대학교 전기공학과(기기 및 제어 전공) 대학원(석사) 졸업. 1996년 2월 전기공학과(기기 및 제어 전공) 대학원 졸업(박사). 현재 인하대학교 산업과학기술연구소 박사후 연구원. 주관심 분야는 Adaptive, Fuzzy and Neural Control, Servo Motor Control.

허 욱 열

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 2권, 제 1호 참조.