

퍼지제어기를 이용한 SRM의 속도제어 성능향상에 관한 연구

김성민, 김윤현, 김솔, 이주
한양대학교 전기공학과

The Improvement of Speed Control Performance for Switched Reluctance Motor Drive Using Fuzzy Logic Controller

Sung-Min Kim, Youn-Hyun Kim, Sol Kim, Ju Lee
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper presents improved performance on the speed control of Switched Reluctance Motor(SRM) by using fuzzy logic speed controller. The nonlinear model of SRM is used and the motor used in experiment is a 6/4 SRM. In order to prove the superiority of the fuzzy logic controller, it is applied to make use of Matlab simulation program. And to implement the control method on the SRM drive, DSP(TMS320F240) based SRM speed controller is designed and fabricated. The simulation and experiment results show that FLC is effective in settling time, maximum overshoot and torque ripple.

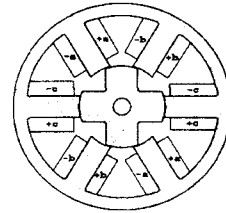


그림 1 SRM의 실험모델 단면도

1. 서 론

오늘날 널리 활용되고 있는 교류전동기는 정현파 전원에 의한 구동에 적합하도록 그 전자계 구조의 설계가 최적화되어 있다. 그러나 SRM(Switched Reluctance Motor)시스템의 구동 메카니즘은 스위칭에 의한 펄스파 전원에 적합한 전자계의 구조를 가지고 있고, 톨릭턴스 토오크를 이용하므로 톨릭턴스 변화와 자기회로의 비선형성 및 포화영향이 커 전압원 여자 방식 이용시에 적합한 여자전류를 인가하기가 힘들다.

본 논문에서는 SRM의 속도제어시 여자각도를 제어하기 위해 리아프노프(Lyapunov)의 안정도 판별법을 이용해 주었으며, 속도 및 속도오차의 변화율에 따라 퍼지제어기(FLC)에서 기준 토오크를 얻은후 SRM의 전자자기적인 비선형성을 고려하여 기준토오크로부터 전압을 구해 전압제어를 구현 하였다. 또 속도제어시 기존의 PI제어기를 이용하여 전압제어를 했을 경우와 퍼지제어 이론을 사용한 경우 최대오버슈트(maximum overshoot), 정착시간(settling time) 및 토오크리플(Torque ripple)면에서 PI제어기보다 퍼지제어기가 효과적인 특성을 나타냄을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였고, 퍼지제어기의 고유 특성인 안정한 과도응답특성 및 강인성을 시뮬레이션과 실험을 통해 보여주었다.

2. SRM의 기본사항 및 구동원리

2.1 SRM의 기본사항 및 구조

본 논문에서는 고정자 극수 및 회전자 극수의 비가 6 : 4이고 고정자 극호 및 회전자 극호의 비가 30 : 50 인 SRM (Switched Reluctance Motor)을 이용하였다. SRM의 기본 구조는 고정자 권선은 집중권이며, 회전자에는 권선이 없는 브러시리스 형이다.

표 1 기본설계 모델의 주요사항

항 목	값	단위	항 목	값	단위
정격출력	22	W	코일선경	0.75	mm
정격전압	12	V	고정자극호(β_s)	30	deg
동작속도	300	rpm	회전자극호(β_r)	50	deg
정격전류	6	A	회전자반지름(R_2)	20×2	mm
상 수	3	Phase	권선저항	1.0	Ω
고정자극수	6	Poles	공극길이	0.3	mm
회전자극수	4	Poles	최대인덕턴스	29.641	mm
턴 수	90	T/P	최소인덕턴스	4.879	mm

2.2 SRM의 모델링 및 구동원리

SRM(Switched Reluctance Motor)은 기계적 구조가 매우 간단하고 견고한 이중 볼극형 구조의 전동기로서 고정자 권선에 전류를 인가하여 톨릭턴스(또는 인덕턴스)의 변화를 일으켜 그 변화값이 최소(또는 최대)가 되는 방향으로 토오크를 발생한다. SRM은 인덕턴스 변화에 따라 스위칭각(Turn on, Turn off)을 조절함으로써 전류파형과 속도-토오크 특성을 각각 다르게 변화시킬 수 있다. 그러므로 발생토오크의 크기 및 효율을 개선하기 위해 스위칭각의 제어는 필수적이다.

본 논문에서는 스위칭각 제어 알고리즘을 포함한 Fuzzy제어기를 이용하여 SRM의 속도를 제어하였으며, 인덕턴스 프로파일을 얻기 위해 FEM(Finite Element Method)을 사용하였고, 전압제어를 위해 PWM(Pulse Width Modulation)에 의한 초퍼회로(인버터 회로)를 이용하였다.

SRM의 기본 회로 방정식은 다음 식들로 나타낼 수 있다.

$$V_n = R_n i_n + L \frac{di_n}{dt} + \omega \frac{dL_n}{d\theta} i_n \quad (1)$$

$$\lambda_n = L_n i_n \quad (2)$$

$$T_n = \left[\frac{\partial W}{\partial \theta} \right] = \frac{1}{2} i_n^2 \frac{dL(i_n, \theta)}{d\theta} \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^3 (T_n - T_L) = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (5)$$

$$V_n = R_n i_n + L \frac{di_n}{dt} + \omega \frac{dL_n}{d\theta} i_n \quad (6)$$

- λ : 자속(flux linkage)
- V : 상 전압(phase voltage)
- i : 상 전류(phase current)
- R : 고정자 상당 저항(stator phase resistance)
- ω : 회전자 각속도(rotor angular speed)
- θ : 회전자 각(rotor angle)
- T : 상 토크(phase torque)
- T_L : 부하 토크(load torque)
- J : 관성 모멘트(moment of inertia)
- n : 각 상 ($n=1,2,3$)

3. 퍼지제어기

3.1 전압제어법

본 논문에서는 속도오차와 속도오차의 변화율을 입력 받아 제어기에서 기준 토크를 얻은후 이 값에 의해 단자전압의 크기를 결정하여 여자시켜주는 전압원 여자 방식을 퍼지제어기에 적용하여 제어기를 설계하였다.

SRM의 인덕턴스 상승구간에서 식(1)은 다음과 같아진다.

$$V_n = R_n i_n + \omega \frac{dL_n}{d\theta} i_n = R_n i_n + \xi_i \omega i_n \quad (7)$$

($\xi_i = \frac{dL_n}{d\theta}$: 전류에 따르는 자기포화 정도에 따라 값이 비선형적으로 변함)

식(7)에 의해 상전류는 다음과 같게된다.

$$i_n = \frac{V_n}{R_n + \xi_i \omega} \quad (8)$$

그러므로 기준토크에 따른 상전압은 다음과 같다.

$$V_n = \sqrt{\frac{2T}{k_i}} (R_n + \xi_i \omega) \quad (9)$$

ξ_i 는 SRM의 전자기적인 비선형성으로 인하여 전류(i)와 위치(θ)에 따라 비선형적으로 변하게 된다. 본 논문에서는 인덕턴스($L(i, \theta)$) 및 토크의 프로파일을 FEM(Finite Element Method)을 이용해 실제 SRM 모델에 맞게 구한 후 이 값들을 룩업 테이블을 이용해 시뮬레이션에 적용시켰다. 그리고 비선형적인 ξ_i 값을 전류크기에 따라 단계별로 나누고, 각 단계 사이에는 일정한 비율로 인덕턴스 변화율이 바뀌는 방법을 적용하여 포화율을 고려하였다.

3.2 여자각도 제어법(스위칭각 제어법)

본 논문에서는 점호각중 스위치 온(Turn on)각을 고정시키고, 스위치 오프(Turn off)각을 시스템이 안정한 방향으로 퍼지 제어를 이용해 제어해 주었다. 여기서 시스템의 안정도를 판별하기 위해 Lyapunov 함수를 이용하였으며, 안정화 되도록 스위치 오프각을 퍼지제어 이론에 의해 튜닝(Tuning)해 주었다.

Lyapunov 함수(V)를 다음과 같이 정의하자.

$$V = \frac{1}{2} e_\omega^2 + \frac{1}{2} \dot{e}_\omega^2 \quad (10)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{B}{J} \omega + \frac{1}{J} (T(i, \theta) - T_L) \quad (11)$$

(B : 점성계수(viscous damping), J : 관성 모멘트

(moment of inertia))

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -\frac{1}{\alpha} (\alpha^2 e - \alpha^2 \omega_r + \alpha \beta (T(i, \theta) - T_L))^2 \cdot \\ & + (\alpha^2 e - \alpha^2 \omega_r + \alpha \beta (T(i, \theta) - T_L)) \cdot \\ & (e - \beta \hat{T}(i, \theta)) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\left(\text{단, } \alpha = \frac{B}{J}, \beta = \frac{1}{J} \right)$$

식(12)이 음의 한정이 되기 위해 $e - \beta \hat{T}(i, \theta) = 0$ 이어야 한다. 그러므로

$$e = \beta \hat{T}(i, \theta) \quad (13)$$

$$\frac{d\theta_{off}}{dt} = \frac{e}{\beta} \left(\frac{dT_{off}(i, \theta)}{d\theta} \right)^{-1} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \theta_{off}(k) &= \theta_{off}(k-1) + \Delta \theta_{off}(k) \\ &= \theta_{off}(k-1) + r e \Delta t \end{aligned} \quad (15)$$

$$= \theta_{off}(k-1) + \xi e$$

본 논문에서는 식(15)을 이용하여 퍼지제어기로 속도 오차에 따라 ξ 를 tuning해 주었으며 이 값에 따라 $\Delta \theta_{off}(k)$ 를 구해 스위칭각(Turn off angle)을 변화시켜 주었다.

3.3 퍼지제어기

퍼지제어기의 입력변수인 속도오차와 오차의 변화율에 따라 퍼지 제어기를 통해 기준토크를 얻어 이로부터 여자전압 및 스위칭 각을 산출하여, SRM의 속도를 제어하였으며, 그림2, 그림3은 기준토크를 산출하기 위한 퍼지제어기의 입력 변수(멤버십함수)를 나타내고 있다.

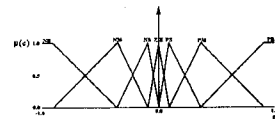


그림 2 속도오차에 대한 멤버십 함수

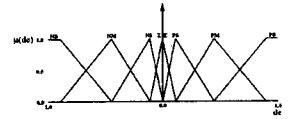


그림 3 속도오차 변화율에 대한 멤버십 함수

각각의 퍼지집합은 소속도 μ 의 최대값이 1이 되도록 정규화 하였다. 여기서 퍼지레이블(Fuzzy Label)의 의미는 다음과 같다.

- PB : Positive Big
- PM : Positive Medium
- PS : Positive Small
- ZE : Zero
- NS : Negative Small
- NM : Negative Medium
- NB : Negative Big
- μ : 퍼지 집합의 각 원소들의 소속정도를 계산해 주고 이것을 숫자로써 나타내는 소속 함수(Membership Function)

본 논문에서 여자각도 제어법 및 전압제어법에서 사용된 퍼지제어규칙은 표2, 표3과 같으며, 추론결과에 대한 비퍼지화 출력값을 구하기 위해 사용된 무게중심법(Center of Gravity Method)은 식(16)과 같다.

표 2 스위칭각에 대한 제어규칙

e_ω	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
ξ	PB	PS	PS	ZE	NS	NS	NM

표 3 기준 토오크에 대한 제어규칙

$d e_{\omega}$	e_{ω}	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	PS	PS	PM	
NM	NB	NB	NB	NS	PS	PM	PM	
NS	NB	NB	NM	ZE	PM	PM	PM	
ZE	NB	NM	NM	ZE	PM	PM	PB	
PS	NM	NM	NM	ZE	PM	PB	PB	
PM	NM	NM	NS	PS	PB	PB	PB	
PB	NM	NS	PM	PB	PB	PB	PB	

$$U_o = \frac{\sum_k [u_k \cdot \mu(u_k)]}{\sum_k \mu(u_k)} \quad (16)$$

다음은 퍼지제어기의 블럭선도를 나타내고 있다.

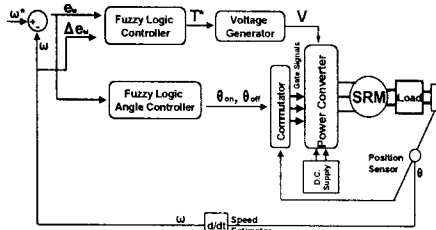


그림 4 퍼지제어기의 블럭선도

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서는 MATLAB을 이용하여 SRM의 속도제어기를 구성하였으며, SRM의 전자기적인 비선형 특성으로 인하여, 인덕턴스(L) 및 토오크(T)를 수식에 의해 구하지 않고, FEM(Field Element Method : 유한요소법)을 이용하여 실제의 전동기 특성에 맞춰 전류 및 위치에 따른 인덕턴스(L(θ, I)) 및 토오크(T_n =

$\frac{1}{2} i_n^2 \frac{dL(i_n, \theta)}{d\theta}$)를 구해서 룩업테이블 방법을 이용해 시뮬레이션을 구현 하였다.

그림5는 PI제어기를 이용한 속도 및 토오크 파형을 나타내고 있다.

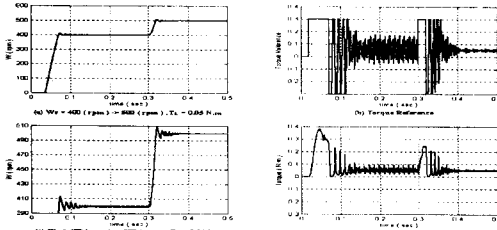


그림 5 PI제어기를 이용한 속도파형

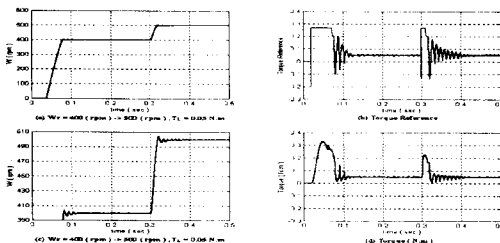


그림 6 퍼지제어기를 이용한 속도파형

그림6은 퍼지제어기를 이용한 속도 및 토오크 파형을 나타내고 있는데, PI제어기를 이용한 경우보다 정착시간, 토오크 리플, 최대오버슈트에서 좋은 성능을 나타내고 있다.

4.2 실험 및 결과

본 논문에서는 기준속도가 400rpm일 경우에 퍼지제어기와 PI제어기의 속도 추종능력과 그 때의 기준토오크의 파형을 비교하였다. 그림 7은 기준속도가 400rpm 일때의 PI제어기의 속도 및 기준 토오크 파형을 나타내고 있고, 그림 8은 퍼지제어기를 이용한 속도 및 기준 토오크 파형을 나타내고 있다.

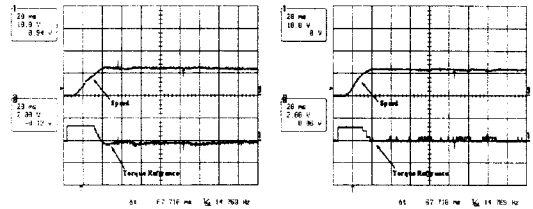


그림 7 PI제어기를 이용한 속도파형 그림 8 퍼지제어기를 이용한 속도파형

그림 7과 그림 8의 과도응답특성을 비교하면 퍼지제어기를 사용했을 경우가 PI제어기를 사용했을때 보다 최대오버슈트(maximum overshoot)가 현저히 줄어들었고, 정착시간(settling time)은 10ms가 줄어들었다.

5. 결 론

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor)의 속도 제어를 위해 퍼지제어기를 제시하였다. SRM은 비선형적인 전자기적인 특성으로 원하는 속도를 얻기 위한 토크제어가 쉽지 않고, 또 스위칭각에 따른 토오크의 리플문제로 인하여 원하는 동적인 특성을 얻기가 힘들었으나, 퍼지제어기를 이용하여 이러한 문제점들을 해결하고 향상된 속도제어를 수행하였다.

이 연구는 한국과학기술재단 지정 국제공동연구
(과제번호:1-00-047)의 지원에 의해 수행되었습니다.

(참고 문헌)

- [1] R. Orthmann, H.P. Schoner, "Turn-off Angle Control of Switched Reluctance Motors for Optimum Torque Output," Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, vol. 6, pp.20-25, 1993.
- [2] H. Uk-Youl, L. Tae-Gyoo, "Fuzzy Logic Based Switching Angle Controller for SR Motor Speed Control," Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE '95, vol. 2, pp.809-814, 1995.
- [3] M.G. Rodrigues, W.I. Suemitsu, P. Branco, J.A. L.G.B. Dente, Rolim, "Fuzzy Logic Control of a Switched Reluctance Motor," Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE '97, vol. 2, pp.527-531, 1997.