

퍼지 동조에 의한 SRM의 속도제어

김상균*, 신성락, 이동희, 권영안
부산대학교 전기공학과

Speed Control of SRM Using Fuzzy Tuning

S. K. Kim, S. L. Shin, D. H. Lee and Y. A. Kwon*
Pusan National University

Abstract - Switched reluctance motor generally operates in the magnetically saturated region because the saturation gives several benefits to its performance.

This paper investigates the modelling and fuzzy tuning PI control of a nonlinear switched reluctance motor. The modelling is performed through neural network technique. Fuzzy auto-tuning PI control is designed for a robust performance in load and speed variations. Simulation and experimental results indicate better performances compared with simple PI control.

1. 서 론

SRM은 에너지 이용률 등의 장점으로 인해 철심의 자기 포화영역까지 운전영역을 확장하게 되므로 다른 전동기와는 달리 비선형에서 시스템에 대한 정확한 해석 및 모델링이 요구되어진다[1,2].

본 연구에서는 최근 시스템 모델링등에 많이 활용되는 신경회로망을 이용하여 쇄교자속 모델링을 확립한다. 신경회로망의 입력층에는 전류값과 회전자 위치각을 입력하는 2개의 신경 세포를 두었으며, 은닉층은 2개의 층으로 나누어서 각각 6개의 신경 세포를 두었다. 출력층은 회전자의 위치와 전류의 크기에 따른 인덕턴스 값에 해당하며 1개의 신경 세포를 두었다. 전이 함수로는 시그모이드 함수를 사용하였다. 이러한 신경회로망에 의한 전동기 모델링에서 본 논문에서 제시된 퍼지논리에 의한 SRM의 자동동조 PI 속도제어 시스템의 시뮬레이션 및 실험이 수행된다.

한편, PI 제어기는 구조가 간단하고 설정치의 추적 성능이 양호하여 SRM의 속도제어에서도 널리 사용되고 있으나 외부조건이 변동하면 제어 이득계수를 다시 설정하거나 속도 추적이 시간이 많이 걸리는 등의 문제점을 가진다[3]. 본 연구에서는 이러한 PI제어기의 문제점을 해결하고 외부조건 변동에도 양호한 속도 추적성능을 보일 수 있는 PI 속도제어기의 제어이득을 퍼지논리를 이용하여 자동동조하는 방식을 연구한다. 퍼지제어기의 전건부 변수는 속도오차와 속도오차 변화분이 되며 이에 대한 소속함수는 삼각형 함수를 사용하였다. 퍼지제어기의 후건부 변수는 비례이득과 적분이득이 되며 이에 대한 소속함수는 지수형 함수를 사용하였다.

본 연구에서는 비선형 SRM에 적용되는 모델링 및 자동동조 PI 속도제어 시스템을 제작하고 시뮬레이션 및 실험을 수행하여 본 시스템의 성능을 제시하였다.

2. 쇄교자속 모델링

그림 1은 본 연구에서 사용되는 3상, 12/8극, 7.5kW SRM의 단면 및 한 상에 대한 스위칭 회로도이다.

SRM은 상권선 상호간에 자속이 무시되는 구조로서 상권선 상호간에 결합이 없는 전압 방정식을 이루며, 에

너지 이용률 등의 장점으로 인해 운전영역을 철심의 자기 포화영역까지 확장하게 되므로 식 (1)과 같은 비선형 전압 방정식을 이루게 된다.

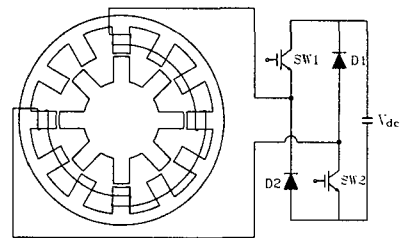


그림 1. 3상, 12/8극 SRM의 단면 및 스위칭 회로도

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (1)$$

$$= Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(i, \theta)}{dt}$$

단, v : 상전압, R : 상권선 저항, i : 상전류
 λ : 상권선 쇄교자속, θ : 회전자 위치각

본 연구에서 사용하는 SRM의 고정자 극호와 회전자 극호는 각각 15° 이며, 회전자 위치가 0° 인 지점이 한 상에 대한 고정자의 극과 회전자의 극이 완전히 어긋나는 상태이고 22.5° 인 지점이 고정자의 극과 회전자의 극이 완전히 일치하는 상태가 된다.

그림 2는 자속포화를 고려하는 비선형 전동기에서 회전자 위치 및 전류치에 따른 쇄교자속을 나타낸다.

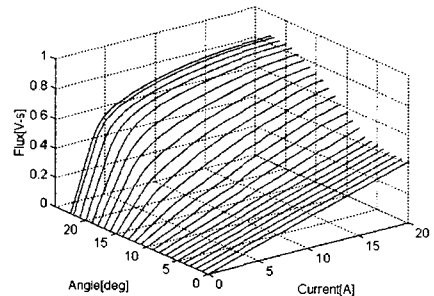


그림 2. 회전자 위치 및 전류에 대한 쇄교자속

그림 2에서 회전자 위치 및 전류의 증가에 따라 쇄교자속이 포화하고, 따라서 회전자 위치 및 전류에 따라 인덕턴스의 변화량이 달라짐을 알 수 있다.

추정치로부터 학습을 위한 신경회로망의 구성은 그림 3과 같이 입력층, 2개의 은닉층, 출력층으로 구성되며,

이를 통하여 본 연구에서 사용되는 SRM의 수식모델을 구하였다.

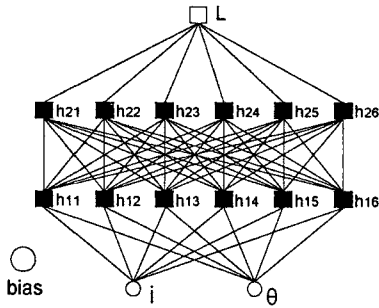


그림 3. 모델링을 위한 신경회로망 구성

3. 퍼지 자동동조 PI 제어기의 구성

본 연구에서 제시하는 퍼지논리를 PI 제어기에 적용한 퍼지 자동동조 PI 제어 시스템의 구성도는 그림 4와 같다.

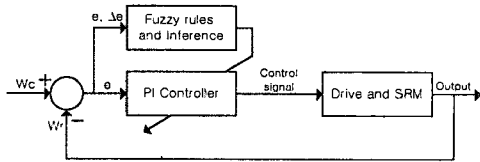


그림 4. 퍼지 자동동조 PI 제어 시스템의 블록도

퍼지 제어기는 퍼지화, 제어규칙, 퍼지추론, 비퍼지화로 구성되며, 퍼지변수로서는 전진부 변수로서는 속도오차와 이의 변화분을 정규화한 $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$, 후진부 변수로서는 PI 제어기의 비례이득 및 적분이득 K_p 와 K_i 를 정규화한 K'_p 와 K'_i 를 선택하였다.

그림 5는 $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 에 대한 퍼지집합들의 소속함수를 나타낸다. 소속함수는 가장 일반적이고 계산이 용이한 삼각형 형태를 사용하였으며 그림 5에서와 같이 5개의 소속함수를 가지도록 했다.

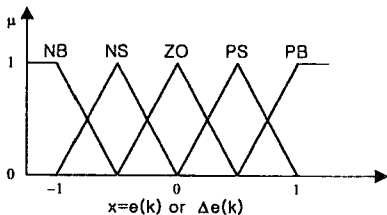


그림 5. $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 의 소속함수

그림 6은 K'_p 과 K'_i 에 대한 퍼지집합들의 소속함수를 나타낸다. 여기서 변수 $x=(K'_p \text{ or } K'_i)$ 와 적분도 μ 사이에는 식 (2)의 관계가 있도록 하였다.

$$\begin{aligned} \mu_{\text{Small}}(x) &= -\frac{1}{2.5} \ln x & \text{for Small} \\ x_{\text{Small}}(\mu) &= e^{-2.5\mu} \\ \mu_{\text{Big}}(x) &= -\frac{1}{2.5} \ln(1-x) & \text{for Big} \\ x_{\text{Big}}(\mu) &= 1 - e^{-2.5\mu} \end{aligned} \quad (2)$$

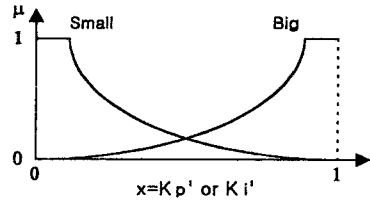


그림 6. K'_p 과 K'_i 에 대한 소속함수

초기에는 $e(k) = \text{positive}$ 이고 $\Delta e(k) = \text{zero}$ 이어서 오차를 줄이기 위해 가속이 요구되므로 큰 비례이득이 필요하며 퍼지집합에서 Big으로 표현된다. 적분이득은 침투치를 작게 하기 위하여 작은 적분이득이 필요하며 퍼지집합에서 Small로 표현된다. 따라서 초기에는 제어규칙을 다음과 같이 결정하였다.

If $e(k)$ is PB and $\Delta e(k)$ is ZO,
then K'_p is Big, K'_i is Small.

정상상태 부근에서는 $e(k) = \text{zero}$ 이고 $\Delta e(k) = \text{negative}$ 이어서 편차를 줄이기 위해서는 감속이 요구되므로 작은 비례이득이 필요하며, 정상상태 오차를 줄이기 위하여 큰 적분이득을 필요로 한다. 따라서 퍼지규칙은 다음과 같다.

If $e(k)$ is ZO and $\Delta e(k)$ is NB,
then K'_p is Small, K'_i is Big.

이상의 방식으로 결정된 출력 변수에 대한 퍼지 제어규칙은 표 1 및 표 2와 같다.

표 1. K'_p 에 대한 퍼지규칙

		$\Delta e(k)$				
		NB	NS	ZO	PS	PB
$e(k)$	NB	B	B	B	B	B
	NS	B	B	B	B	B
	ZO	S	S	S	S	S
	PS	B	B	B	B	B
	PB	B	B	B	B	B

표 2. K'_i 에 대한 퍼지규칙

		$\Delta e(k)$				
		NB	NS	ZO	PS	PB
$e(k)$	NB	S	S	S	S	S
	NS	S	S	B	S	S
	ZO	B	B	B	B	B
	PS	S	S	B	S	S
	PB	S	S	S	S	S

그리고, 본 연구에서는 퍼지추론 함수로 직접법에 속하는 Mamdani의 min-max 방식을 사용하였으며 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을 사용하였다.

4. 시뮬레이션

상기한 모델링 및 퍼지논리를 이용한 SRM의 자동동조 속도제어 방식으로 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 7과 8은 각각 지령속도 500rpm 및 1000rpm으로 운전중에 10Nm의 부하를 인가하였을 경우의 속도 응답으로서 단순 PI 제어시와 퍼지동조 PI 제어시의 시뮬레이션 결과이다.

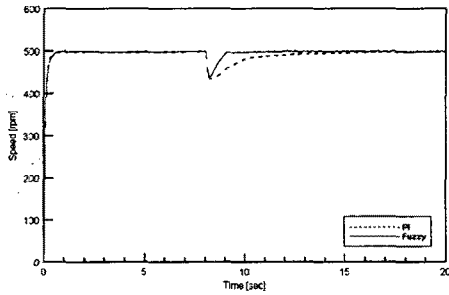


그림 7. 부하변동시의 속도응답 시뮬레이션 (500rpm, 10Nm)

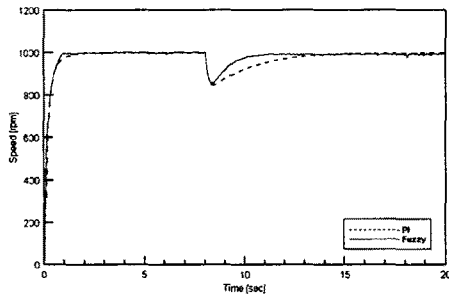


그림 8. 부하변동시의 속도응답 시뮬레이션 (1000rpm, 10Nm)

5. 실험결과 및 검토

그림 9는 퍼지논리를 이용한 SRM의 자동동조 PI 속도제어를 위한 시스템의 전체 구성도를 나타낸 것으로 전동기, 인버터, 위치 및 속도 검출기 그리고 제어를 수행하는 소프트웨어 부분으로 구성되어 있다.

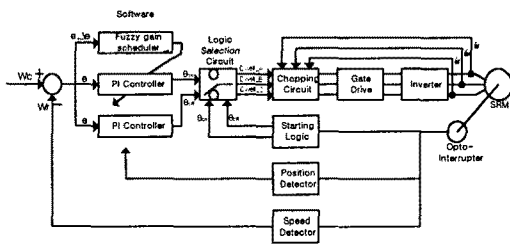


그림 9. 전체 시스템 구성도

퍼지 이득 동조는 한 샘플링 구간에서 속도오차 e 와 오차의 변화분 Δe 를 입력으로 받아 PI 제어기의 이득을 결정한 후 다음 상의 점호각을 결정하게 된다.

SRM의 전류파형은 스위치가 턴온되어 있는 구간이 일정하다라도 점호각 및 소호각의 위치에 따라 크게 달라진다. 본 연구에서는 기동 초기나 부하인가시 속도 추적성능을 향상시키기 위하여 점호각은 퍼지 자동동조 PI 제어를 이용하여 결정하고 소호각은 역토크의 발생을 최소화할 수 있는 범위 내에서 최대의 위치로 고정시킨 후 속도가 정상상태에 빨리 도달할 수 있도록 하였다. 속도가 정상상태 부근에 도달하면 맥동 토크를 줄이기 위하여 점호각을 고정시키고 소호각만을 PI 제어를 이용하여 제어하였다.

그림 10과 11은 각각 지령속도 500rpm 및 1000rpm에서 운전중에 10Nm의 부하를 인가하였을 경우의 속도응답으로서 단순 PI 제어시와 퍼지동조 PI 제어시의 실험 결과

과이다. 시뮬레이션 및 실험결과에서 나타난 바와 같이 퍼지동조 PI 제어시 양호한 성능을 보이고 있다.

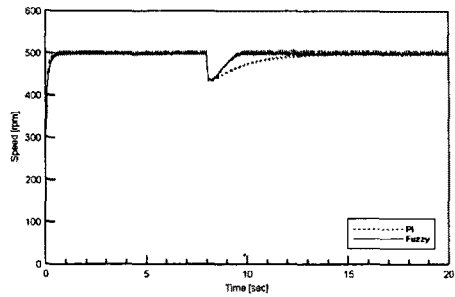


그림 10. 부하변동시의 속도응답 실험결과 (500rpm, 10Nm)

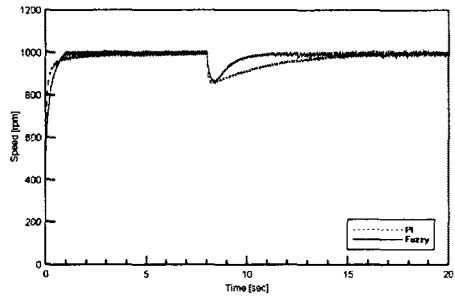


그림 11. 부하변동시의 속도응답 실험결과 (1000rpm, 10Nm)

6. 결론

본 연구에서는 최근 시스템 모델링 등에 많이 활용되는 신경회로망을 이용하여 쇠교자속 모델링을 수행하고 SRM의 속도제어 방식으로 퍼지동조 PI제어 방식을 연구하였다. 신경회로망의 입력층은 전류값과 회전자 위치각으로 구성하고 은닉층은 2개의 층으로 나누어서 구성하였으며 출력층은 인덕턴스 값으로 구성하여 양호한 수식 모델을 얻어냈다. 퍼지동조의 전전부 변수로는 속도오차와 속도오차 변화분으로 설정하였고 이에 대한 소속함수는 삼각형 함수를 사용하였다. 퍼지제어기의 후건부변수는 비례이득과 적분이득이 되며 이에 대한 소속함수는 지수형 함수를 사용하였다. 본 연구에서는 설계된 퍼지동조 PI제어 SRM 구동시스템을 제작하고 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며 결과에서 나타난 바와 같이 단순 PI제어 보다 양호한 속도응답을 나타내었다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.J.Lawrenson, J.M.Stephenon, P.T.Blenkinsop, J.Corda and N.N.Fulton, "Variable-speed switched reluctance motors," Proc. IEE, Vol.127, Pt-B, No4, pp.253-265, July 1980.
- [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] S.K.Panda, X.M.Zhu and P.K.Dash, "Fuzzy gain scheduled PI speed controller for switched reluctance motor drive," IEEE/IECON, Vol.3, pp.989-994, 1997.