

퍼지 PI 제어기를 이용한 SRM 속도 응답 특성에 관한 연구

박희성^{0*}, 최재동^{**}, 오인석^{***}, 황영성^{*}, 성세진^{*}

*충남대학교 전기공학과, **한국항공우주연구소, ***한국원자력연구소

A Study of SRM Speed Responce Characteristics Using Fuzzy PI Controller

H.S.Park^{0*}, J.D.Choi^{**}, I.S.Oh^{***}, Y.S.Hwang^{*}, S.J.Seong^{*}

*Dept. of Electrical Eng. Chungnam National Univ., **KARI, ***KAERI

Abstracts : In this paper, it deals with Switched Reluctance Motor(SRM) which has fuzzy logic contoroller(FLC). The modeling and FLC of SRM are presented. The results of simulation show the speed responce characteristics of SRM with FLC.

As a result, the SRM controller with FLC is verified by comparison between PI controller and fuzzy logic controller.

본 논문은 SRM의 퍼지 로직 제어에 관한 연구로서 2절에는 SRM을 모델링 하였고 3절에서는 퍼지 로직 제어기를 SRM에 적용하는 시스템 구성에 대하여 논한다. 마지막으로 퍼지 로직 제어기를 이용한 전체시스템 속도 응답 특성을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 기존의 PI 제어기로 제어 하였을때보다 좋은 응답 특성을 얻을수 있었다.

2. SRM 모델링

1. 서론

가변속 구동에 사용되는 Switched Reluctance Motor(SRM)는 전력 스위칭 기구와 디지털 제어기의 발전과 더불어 급속히 발전 하였다. SRM은 고유의 속도 제어 가능성과 넓은 범위의 운영 속도에서 전 토오르크를 생산할 수 있는 능력 때문에 많은 응용 분야에서 사용되고 이에 대한 많은 연구가 이루어 지고 있다[1-3]. 하지만 SRM의 속도-토오르크 특성은 기존의 직류직권 전동기와 유사하여 부하에 대한 속도의 변동률이 크기 때문에 SRM을 가변속 제어 시스템에 적용하기 위해서는 외부로 부터의 적절한 속도-토오르크 제어기법이 요구된다.

이러한 제어기법으로 전통적인 PI 제어기가 많은 응용 분야에 적용되었는데 이는 간단하고 안정적이라는 장점을 가지고 있다. 하지만 PI 제어기는 파라미터의 변화나 외란의 영향으로 강인한 특성을 얻기 어렵다[5]. 이 문제를 해결하기 위하여 기존 PI 제어기에 퍼지 로직 제어를 도입하여 속도 응답 특성을 향상시켰다.

SRM은 이중 돌극을 갖는 자기적 구조에 고정자에 만 집중권선을 갖는 간단한 전기-기계적 에너지 변환 기구로서, 적절한 펄스 전원을 인가하여 브러쉬리스 전류 작동을 하는 가변 토오르크-속도 특성의 전동 기구이다.

SRM의 자계구조는 전동기가 회전함에 따라 릴럭턴스의 변화가 큰 돌극형 구조로 되어있어 연속적인 토오르크를 발생하기 위해서는 회전 방향의 일정한 회전구간마다 그에 적합한 연속적인 펄스 여자 전원의 인가가 필요하다. 그림1은 3상, 6고정자, 4회전 자극을 갖는 SRM의 구조를 나타내고 있다.

그림 1에서 회전자가 정지해 있을 때 스위치 S_1 과 S_2 를 닫으면 전류가 확립되어 직류 전원으로부터 $S_1 \rightarrow A \rightarrow S_2 \rightarrow a$ 의 경로를 따라 에너지가 상권선에 공급된다. 그리고 상권선이 여자되어 전동기가 구동하고 있는 상태에서 스위치 S_1 과 S_2 를 열면 상권선에 흐르던 전류는 다이오드 D_2 를 통해서 흐르므로 자기에너지가 전원으로 전달된다.

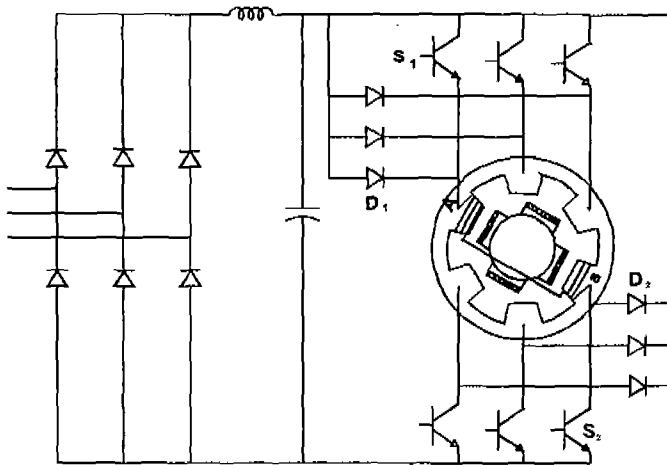


그림 1. 3상 6/4 SRM의 단면도

상권선에 전압이 인가될 때 상권선의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_s = Ri(t) + \frac{d\lambda}{dt} = Ri(t) + \frac{d[L(\theta)i(t)]}{dt} \quad (1)$$

여기서, $\frac{\partial \lambda}{\partial i} = L(\theta)$ 이며 $\frac{d\theta}{dt} = \omega_m$ 으로 표현 되었다.

다. $\frac{\partial \lambda}{\partial i} = L(\theta)$ 는 권선의 인덕턴스 변화를 나타내

며, $\frac{d\theta}{dt} = \omega_m$ 는 기계적 속도를 나타낸다.

식(1)에서 상권선의 인덕턴스는 인덕턴스 프로파일과 같이 회전자 위치에 따라 변하는 회전자 위치각의 함수로 주어지므로 식(1)을 식(2)와 같이 표현 할수 있다.

$$V_s = Ri(t) + L(\theta) \frac{di(t)}{dt} + i(t) \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega \quad (2)$$

여기서 오른쪽 첫번째 항은 내부저항에서의 전압강하이며, 두번째 항은 트랜스포머의 전압을 나타내며, 마지막 항은 회전자 전압을 나타낸다.

이때, 전동기에 공급되는 순시에너지는 식(3)과 같이 나타낼수 있다.

$$v_s i(t) = Ri(t)^2 + i(t)^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega + L(\theta) i(t) \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

$$= Ri(t)^2 + \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} L(\theta) i(t)^2 \right] + \frac{1}{2} i(t)^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega \quad (4)$$

식(4)에서 보여지는 것처럼 입력에너지의 일부는 자기 에너지를 축적시키고 일부는 기계적 출력으로 변환된다.

3. SRM 구동을 위한 FLC 설계

그림 2는 제어시스템의 흐름을 나타낸다. 점선의 부분이 퍼지 로직 제어기 부분으로써 퍼지화, 추론,

비퍼지화의 순서로 설계되었다.

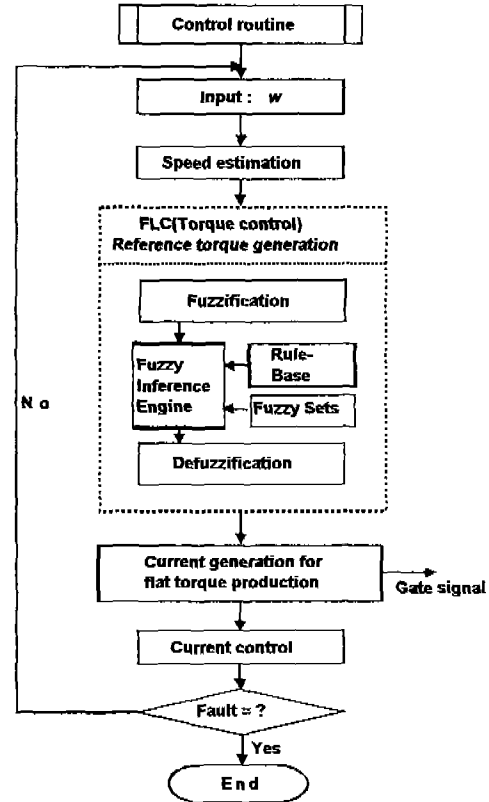


그림 2. 시스템 제어 흐름도

퍼지 로직 제어를 위하여 우선적으로 제어기를 위한 입력과 출력의 변수가 분명히 정의 되어야 한다. 본 연구에서는 SRM의 속도 제어를 위한 퍼지 로직 제어기의 입력 조건 변수로 속도 오차(e)와 속도 오차의 시간에 따른 변화량(ce)으로 선정하였고 출력 변수로는 SRM의 속도를 제어하기 위해 입력전압 조작량 Δu 이다.

이들 입력 조건 변수는 각각의 샘플링 지점 (s)에서 다음과 같은 (5)과 (6)의 식으로 표현된다.

$$e(s) = \omega_{ref}(s) - \omega_{real}(s) \quad (5)$$

$$ce(s) = e(s) - e(s-1) \quad (6)$$

여기서 ω_{ref} 는 SRM의 속도 지령이고 ω_{real} 은 실제 속도이다.

입력 조건 변수들은 퍼지 제어를 하기 위하여 퍼지 언어 변수로 퍼지화 되어야 한다. 본 연구에서는 퍼지 언어 변수로 다음과 같이 7단계로 선택하였다.

NL : Negative large PL : Positive large

NM : Negative medium PM : Positive medium

NS : Negative small PS : Positive small

ZE : Zero

이에 대한 멤버십 함수는 그림 3과 같이 각 양자화

레벨에 값이 있는 이산 함수로 사용하였다. 양자화 단계는 15 단계로 하였다.

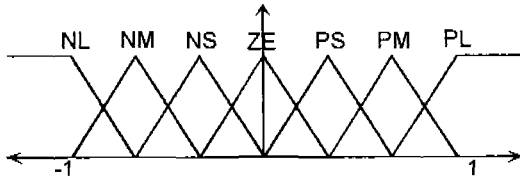


그림 3. 멤버쉽 함수

본 논문에서 입력 조건 변수 e와 ce에 따른 퍼지 제어율은 표 1과 같이 작성하였다.

표 1 제어 룰 테이블

ce \ e	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NM	NM	NS	ZE
NM	NL	NL	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NL	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PM	PL
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PL	PL
PL	ZE	PS	PM	PM	PL	PL	PL

다음으로 퍼지 추론을 수행하는데 이 부분에서는 다음과 같은 예처럼 표1의 퍼지 제어 룰을 이용하여 퍼지 입력에 대한 퍼지 출력을 추론하는 장치이다.

예) if e is NL and ce is NL then Δu is NL

본 연구에서는 Mandani가 제안한 최소최대법을 사용하였다. 즉, 한 개의 입력 변수에 대해 각각의 제어 룰에 의한 출력의 최대값으로 이루어지는 집합을 구성하였다.

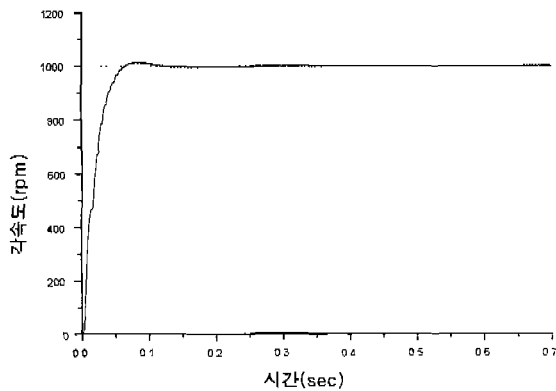


그림 5. 지령 속도 1000rpm일 때 퍼지 제어기에 의한 SRM 속도 응답 특성

마지막으로 추론에 의해 얻어진 퍼지 출력의 멤버쉽 함수를 시스템의 실제 입력으로 바꾸는 비퍼지화 작업이 이루어졌다. 비퍼지화에서는 확률적인 평균이 되는 무게 중심법(Center of Gravity)을 이용하여 적절한 값을 얻었다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta u = \frac{\sum_{j=1}^N m_j \mu(m_j)}{\sum_j \mu(m_j)} \quad (7)$$

위의 식에서 $\mu(m_j)$ 는 퍼지 추론에 의한 퍼지 결과의 멤버쉽 함수이고 N은 제어 룰의 수이다.

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 사용된 SRM은 3파력의 6고정자 4회전자이며 최대 인덕턴스는 1A에서 394[mH], 최소 인덕턴스는 1A에서 36[mH], 상당 저항은 1.055[Ω]이다. 본 논문에서 시뮬레이션된 전체 시스템 블록 다이어그램은 그림4와 같다.

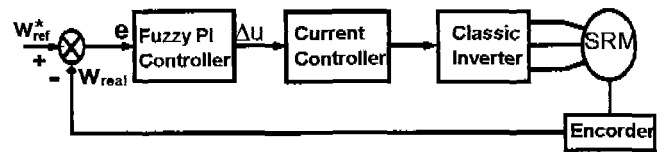


그림 4. 전체 시스템 블록도

그림 5와 그림 6은 1000rpm 속도 지령에 대한 퍼지 제어기와 PI 제어기를 사용하였을 때 SRM의 속도 응답 특성을 보여준다. 그리고 그림 7과 그림 8은 500rpm, 1000rpm, 1500rpm으로 스텝 변화 할때의 속

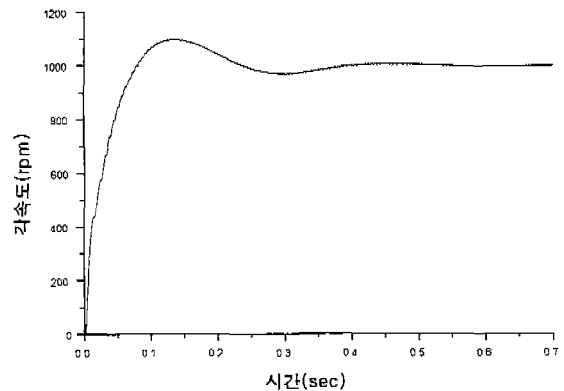


그림 6. 지령 속도 1000rpm일 때 PI 제어기에 의한 SRM 속도 응답 특성

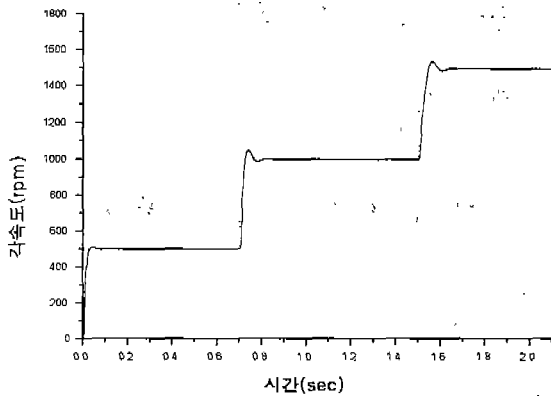


그림 7. 스텝 입력 변화에 따른 퍼지 제어기 속도 응답 특성(500, 1000, 1500rpm)

도 응답 특성을 보여준다.

시뮬레이션 결과 퍼지 제어기를 사용하였을 때가 기존의 PI 제어기를 사용하였을 때 보다 rising time, overshoot, settling time의 속도 응답 특성이 우수한 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문은 퍼지 PI 제어기를 이용한 SRM의 구동에 관한 연구로서 SRM의 수학적 모델링 결과가 제시되었고 제안된 퍼지 PI 제어기의 속도 응답 특성에 관한 시뮬레이션 결과가 제시되었다. 이 연구결과를 통해 기존의 PI 제어기보다 속도 응답 특성이 향상되었음이 확인되었다.

참고문헌

- [1] Silverio Bolgnani, "Fuzzy Logic Control of a Switched Reluctance Motor Drive", IEEE Transactions on Industrial Application, Vol. 32, No. 5 PP. 1063- 1068, 1996.9/10
- [2] Yifan Tang, "Vector Control and Fuzzy Logic Control of Doubly Fed Variable Speed Drives with DSP Implementation", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No.4, PP. 661 -668, 1995.12
- [3] Mohamed N. AbdulKadir, "MAXIMUM EFFICIENCY OPERATION OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR BY CONTROLLING SWITCHING ANGLES", International Con

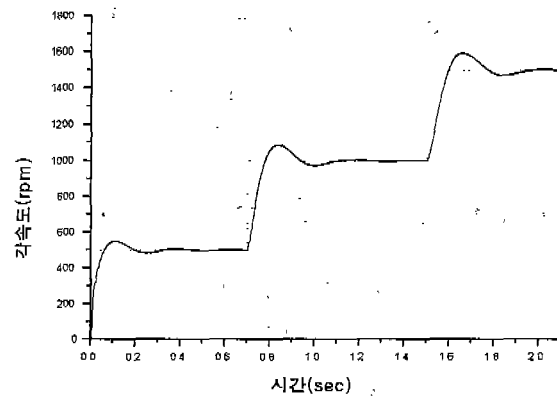


그림 8. 스텝 입력 변화에 따른 PI 제어기 속도 응답 특성(500, 1000, 1500rpm)

-ference on Power Electronics and Drive Systems Proceedings, PP.199-204, 1997.5

- [4] 고종선, "퍼지 속도 제어기를 이용한 BLDD 모터의 디지털 위치제어", 전기학회 논문지, 44권 8호, PP. 1010-1017, 1995.8
- [5] 변증남, "퍼지논리 제어", 홍릉과학출판사, 1997
- [6] 이광형, "퍼지 이론 및 응용 I, II", 홍릉과학출판사, 1991