

# 퍼지제어기를 이용한 대전류 SRM의 토크리플제어

## Torque ripple control of High Current SRM using Fuzzy Controller

오동준, 허옥렬

Dong jun OH, Uk youl HUH

Abstract - The SRM is more robust and lower cost than other type motors. The inverter for SRM cannot have shoot through fault, since a phase winding of SRM is independent of other phase windings. The SRM has high starting torque and high power density. But it has torque ripples due to nonlinear magnetic characteristics. Therefore, SRM has highly non-linear torque producing characteristics. Because fuzzy logic is a flexible and general-purposed method for implementing non-linear dynamic functions, it is effective for the control of high current SRM. We design the fuzzy controller and demonstrate the fuzzy control system by MATLAB.

**Key Words** : Fuzzy, Switched Reluctance Motor(SRM)

### 1. 서 론

현대 산업에서 사용되는 지게차의 구동용 전동기는 주로 정류자 전동기가 많이 사용되고 있다. 그러나 정류자 전동기는 회전자 권선에 의한 관성 모멘트가 크고 고속으로 회전시 벨런싱의 문제를 가지고 있다. 또한 정류자 전동기는 기계적 정류에 의한 브리쉬와 정류자의 마모로 인해 수명이 짧다. 브리쉬 없는 직류 전동기는 고속 회전에 의한 영구 자석의 감자 현상이 일어 날 수 있다. 반면 Switched Reluctance Motor(SRM)은 회전자에 권선이나 영구자석이 없으므로 구조가 간단하고 기계적으로 안정되어 있어 고속용으로 적합하다.[1]

SRM의 구조는 여자권선으로 고정자를 구성하고 돌극형의 자기적 회전자를 가지며 회전자에는 권선이 없다. 따라서 SRM는 DC와 AC의 전원을 투입함으로써 바로 회전하지 않는다. SRM의 회전은 고정자에 감긴 각상에 순차적으로 전류가 흘러서 생기는 자속에 회전자 위치하러는 데서 생기기 때문이다. 그러므로 각 상이 전류에 의해 여자되는데, 각 상에 전류를 어떻게 인가하느냐는 SR 모터 제어에서 아주 중요하다.[2]

SRM은 적용분야에 따라 토크, 속도 특성을 적절하게 설계할 수 있다. 각각의 회전자 권선이 직렬로 연결되어 있기 때문에 구동기에서 Shoot-through fault가 없다. 그러나 SRM은 인덕턴스가 매우 클 뿐 아니라 변화가 심하여 구동회로 설계시 여러 가지 문제점을 가지고 있으며 기동시에 분계점이 발생할 경우도 있다.[1]. 그러므로 SRM을 제어하기

위해서는 적합한 각제어가 필요하다. 즉, 정격속도 정격 부하에서는 최대전류가 여기전력에 의해 제한되는데 이때에는 여기전력이 인가 전압보다 높으므로 전류의 상승률이 낮고 전류가 전류(Commutation) 이전부터 감소될 수 있다. 따라서 고속에서 더 많은 전력을 얻기 위해서는, 점호각을 정렬되지 않은 위치 앞으로 당겨서 인덕턴스가 증가하는 구간에 들어가기 전에 상전류를 빨리 상승시키고 상스위치를 도통시키는 진상각을 크게 해야 한다. 그러나 진상각이 어느 각 이상 커지면 기동시 회전 토크를 발생시키지 못하는 구간을 포함하게 된다.[1][3]. 또한, 저전압 SRM의 경우는 전원전압이 낮은 대신 큰 전류가 흘러야하기 때문에 전류의 크기를 고려하여 저저항, 저인덕턴스로 설계하게 된다. 그러므로 진상각에 따른 전류의 변화가 매우 크다. 게다가 고정자와 회전자의 위치가 변함에 따라 인덕턴스의 값도 비선형적으로 변하게 된다. 따라서 이런 비선형성을 고려하여 SRM을 모델링하였고, 모터제어에 필요한 제어를 설계하여 응답 특성을 시뮬레이션하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 SRM의 구동 원리 및 조건

기본적인 SRM의 구조는 고정자와 회전자가 모두 돌극 구조로 되었으며 고정자에만 집중권의 권선이 감겨 있다. 고정자에 감긴 권선에 전류를 흘려주어 고정자를 여자 시켜주면 회전자는 필럭턴스가 줄어드는 방향으로 움직이게 된다. 따라서 고정자의 각 상에 연속적으로 펄스전류를 인가하여 주면 각 모터는 회전하게 된다.

그림 1은 회전자 회전자 한 상에서의 인덕턴스 변화곡선을 나타낸 것이다. 하지만 여기서의 인덕턴스 곡선은 SR모터의 fringing 효과와 saturation을 무시하였을 경우이다. 그림 1에서와 같이 인덕턴스의 형상은 4개의 영역으로 나눌 수

저자 소개

\* 吳 東 俊 : 仁荷大學校 工科學 碩士課程

\*\* 許 旭 烈 : 仁荷大學校 工科學 教授 · 工博

있다.

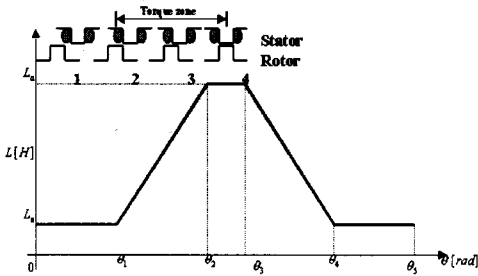


그림 1. 회전자와 고정자의 위치에 따른 인덕턴스 변화

회전자 돌극과 고정자 돌극이 마주보고 있는 최대 인덕턴스 구간, 두 돌극이 완전히 어긋나 있는 최소 인덕턴스 구간, 두 돌극이 만나기 시작하는 증가구간, 두 돌극이 어긋나기 시작하는 감소구간의 4개 영역이다.

다음 식 (1)은 SR모터의 전압 방정식이다.

$$V = Ri + \frac{dL(\theta)i}{dt} \quad (1)$$

여기서 상권선의 인덕턴스를 회전자의 위치각의 함수로 나타내면 다음 식 (2)와 같다.

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

이고 토크 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\tau = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (3)$$

식(3)에서와 같이 토크는 전류의 제곱과 인덕턴스의 변화율에 비례한다. 따라서 그림 1에서 토크 발생구간은  $\theta_1 \sim \theta_2$  이고 토크는 인덕턴스의 변화율이 양의 방향이면 정 토크가 발생하며 음의 방향이면 역 토크가 발생한다. 하지만 식(1)에서 전류의 제곱에 비례하므로 전류의 방향과 토크는 무관함을 알 수 있다. 토크를 크게 하게 위해서는 정 토크 발생구간인  $\theta_1 \sim \theta_2$  에서 전류가 커야하는데 이를 위해서는 인덕턴스가 증가하기 전에 전류를 인가해 주어 토크 구간에서 원하는 전류량이 되게 해준다. 이렇게 전류인가 시점을 앞당겨 주는 것을 진상각 가변이라 한다. 특히 SRM이 고속으로 회전 할 경우와 인가 전류가 클 경우의 두 가지 경우에서의 진상각 가변은 모터의 최대 토크 발생에 큰 영향을 준다. 다음 그림 2는 모델링된 inductance profile이다.

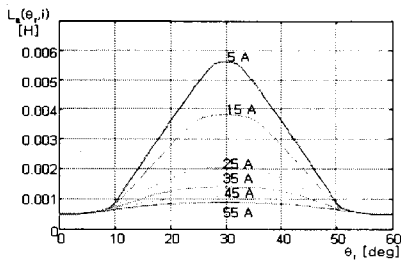


그림 2. Inductance Profile

## 2.2 Fuzzy Controller 설계

앞에서 나타난 인덕턴스 프로파일과 같이 대전류 SRM은 전류의 변화에 따른 inductance 변화가 비선형적이다. 즉, 이런 비선형성에 유연하게 제어할 수 있는 Fuzzy Controller를 적용하여 제어를 설계하였다. 퍼지제어기는 입력되는 값을 퍼지화(Fuzzifier)과 퍼지룰베이스(Fuzzy Rulebase)를 이용한 추론(inference)과정을 거쳐 원하는 출력을 얻기 위한 비퍼지화(Defuzzifier)과정을 거치는 제어기다. 우선, 룰베이스를 다음과 표 1과 같이 구성하였다.

		e				
		NL	NS	Z	PS	PL
e	NL	NL	NL	NS	NS	Z
	NS	NL	NS	NS	Z	PS
	Z	NS	NS	Z	PS	PS
	PS	NS	Z	PS	PS	PL
	PL	Z	PS	PS	PL	PL

표 1. Rule Base

\*NL: Negative large NS : Negative small

Z: Zero PS: Positive small PL: Positive large

표(1)의 룰베이스는 원하는 속도와 피드백되는 속도와의 error와 error의 변화에 따라 만들어졌다. 다음 그림 3은 Membership Function이다.

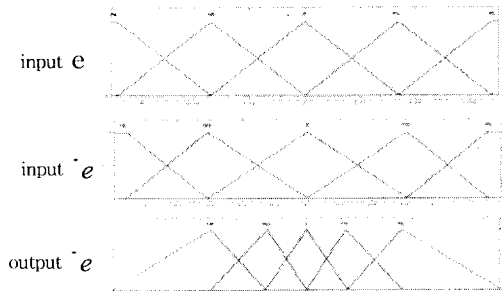


그림 3. Membership Function

퍼지 추론 과정에서는 (i)union결합을 이용한 독립적인 룰베이스 추론 (ii) Mamdani의 최소함의(minimum implication) (iii) t-norm연산자에 대한 min과 s-norm연산자에 대한 s-norm 을 이용하여 최소추론엔진(Minimum Inference Engine)을 사용하여 구성하였다.[4]

## 3. 시뮬레이션

### 3.1 제어 블록선도

대전류 SRM으로부터 회전되는 속도로부터 회전되고 있는 각도와 속도를 이용하여 제어가 동작되도록 하였으며, 제어기 값을 통하여 대전류 SRM에 적용되는 전류값을 제어할 수 있도록 퍼지 제어기를 설계하였다. 전체 제어 블록선도는 다음 그림 4와 같다.

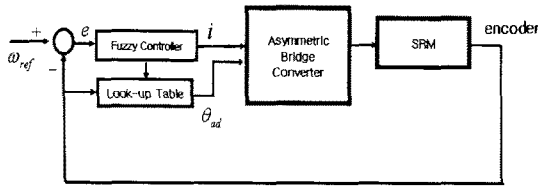


그림 4. 시뮬레이션 블록 선도

그림 4에서 SRM과 Converter는 실 구동에 사용될 모터와 같은 조건으로 구성하였으며, encoder를 이용하여 회전속도를 계산하도록 하여 원하는 입력 속도와 비교하도록 하였다.

### 3.2 시뮬레이션 결과

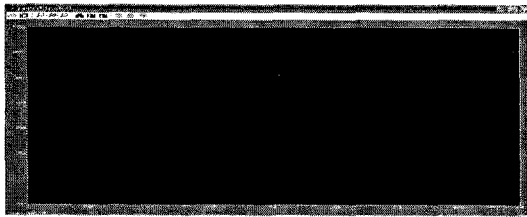


그림 5. 퍼지제어기 (부하=5[N])

그림 5는 퍼지제어기를 이용하여 1000rpm에서 동작하도록 시뮬레이션 하였을때의 출력이다. 위와 같은 구성에서 PI제어기를 사용하였을때의 출력 파형은 그림 6과 같다.

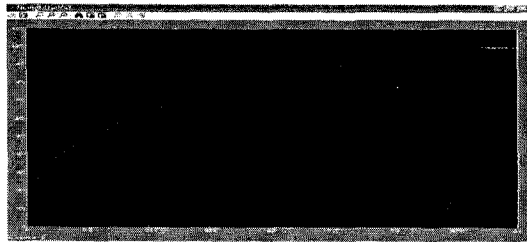


그림 6. PI제어기 (부하=5[N])

위의 그림 5와 그림 6을 비교하여 보면 PI제어기와 응답 특성에 차이가 없음을 볼 수 있다.

SRM의 구동중에 5[N]의 부하가 스텝형식으로 걸렸을때 PI제어기와 퍼지제어기의 응답속도를 보기위한 출력 파형은 그림 7과 그림 8과 같다.

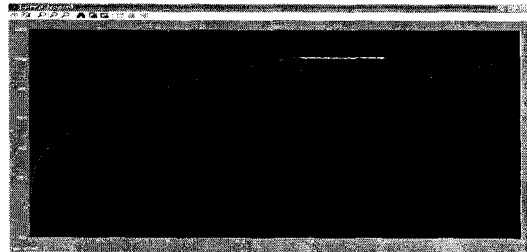


그림 7. 퍼지 제어기 (부하=5[N])

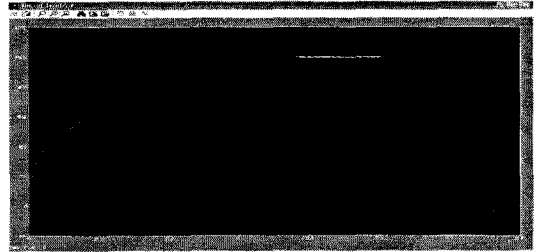


그림 8. PI 제어기 (부하=5[N])

그림 7과 그림 8에서와 같이 PI제어기보다 퍼지제어기에서 부하에 대한 응답이 빠르게 나타남을 볼 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 모델링된 대전류SRM을 이용하여 퍼지제어기를 이용하여 구동하였으며, 시뮬레이션 결과 부부하시 퍼지제어기가 PI제어기보다 빠르고 안정된 응답 성능을 가짐을 보였다. 또한, SRM이 구동중에 부하가 있을시 응답되는 특성이 PI제어기보다 퍼지제어기가 빠르게 응답하게 되는것을 보였다. 이와 같은 결과를 바탕으로 실 시스템에 퍼지제어기를 적용하여 보도록 하는 후행 과제가 필요하겠다.

### 참고 문헌

- [1] T.J. Emiller, "switched reluctances motor and their control". Magna Physics Publishing and Clarendon Pressm, 1993
- [2] 안진우, "스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용" 2001
- [3] Kyu-Dong Kim; Doo-Jin shin; Uk-Youl Huh "Application modified C-dump converter for industrial low voltage SRM "Industrial Electronics, 2001. Proceedings. ISIE 2001. IEEE International Symposium on , Volume: 3 , 2001
- [4] Li-Xin Wang, "A course in fuzzy systems and control" Prentice-Hall, 1997
- [5] Ion Boldea, S.A.Nasar "Electric Drives" CRC Press, 1999
- [6] R.Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives" CRC Press, 2001