

저전압 SR모터의 퍼지로직 기반 진상각 제어

김 규 동, 신 두 진, 허 성 재, 허 욱 일*
*인하대학교 전기공학과

Fuzzy logic based advance angle control for low voltage SRM

Kyu-Dong Kim, Doo-Jin Shin, Sung-Jae Huh and Uk-Youl Huh

Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea
Tel : +82-32-860-7394 Fax : +82-32-863-5822 E-mail: g2001104@inhavision.inha.ac.kr

Abstract - In this paper, a fuzzy advance angle control method is described to drive an industrial low voltage SRM (Switched Reluctance Motor) for 10kW forklift truck. SRM has a highly non-linear characteristic that is due to change the rotor and stator. And low voltage SRM is designed that its phase resistance and phase inductance is very low to inject high current into the phase windings. In this reason, the proper current control is necessary to drive the low voltage SRM efficiently. SRM has positive torque at increasing inductance region and negative torque at decreasing inductance region. Due to this reason, the current has to be built up in the increasing phase inductance part as soon as possible. Therefore, the phase switch must be turned on before the phase inductance increases, and this angle is called as the advance angle. Also, the phase current has to be dropped before the phase inductance decreases. Fuzzy logic is a flexible and general-purposed method of implementing non-linear functions and as such it is useful in control applications. Consequently, we designed a fuzzy advance angle controller to control the phase current appropriately.

1. 서 론

Switched Reluctance Motor(SRM)는 회전자와 고정자에 마크네트가 없이 각각 치를 갖는 이중 돌극 구조를 가지며, 고정자와 회전자 사이의 자기저항(Reluctance)의 변화에 의해 토크가 발생되는 모터이다. SRM의 장점은 회전자의 구조가 간단하고 권선이나 영구자석이 없으므로 가격이 저렴하고 Reluctance 토크에 의해 움직이는 모터로 전기자 전류에 의하여 회전자계가 형성되므로 효율이 높다. 기동 토크가 크고 속도 제어 범위가 넓고 고속 운전이 가능하다. 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 기동 시에 문제점이 발생할 경우도 있다.[1]. 그러므로 SRM을 제어하기 위해서는 적합한 각제어가 필요하다. 즉, 정격속도 정격부하에서는 최대전류가 여기전력에 의해 제한되는데 이때는 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 구간에서 들어가기 전에 상전류를 빨리 상승시키고 상스위치를 도통시키는 진상각을 크게 해야 한다. 그러나 진상각이 어느 각 이상 커지면 기동 시 회

전 토크를 발생시키지 못하는 구간을 포함하게 된다.[1][2]. 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 비선형성과 적절한 진상각을 고려하여 퍼지로직 기반의 컨트롤러를 구성하였다.[3][5].

2. 본 론

SRM의 기본적인 구조는 고정자와 회전자가 모두 돌극 구조로 되어 있고 고정자에는 집중권의 권선이 감겨져 있다. 회전자의 위치에 따라서 각상의 인덕턴스가 변화하며, 고정자 권선에 전류를 가하면 자기 회로의 인덕턴스를 크게 하는 방향으로 토크를 발생시킨다. SRM의 인덕턴스는 전류와 회전자의 회전각에 따라 변화하는데 모터의 fringing 영향을 무시하면 인덕턴스 형상은 그림 1에서와 같은 사다리꼴 형상이 된다. 인덕턴스 형상은 4개의 영역으로 나눌 수 있다. 회전자 돌극과 고정자 돌극이 마주보고 있는 최대 인덕턴스 구간과, 두 돌극이 완전히 어긋나 있는 최소 인덕턴스 구간, 두 돌극이 만나기 시작하는 증가구간, 두 돌극이 어긋나기 시작하는 감소구간의 4개 영역이다. SRM의 전압 및 토크 식은 코어가 포화되지 않았을 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

$$T_e = T_i + J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

SRM의 전기적 토크는 식(2)에서 보는 바와 같이 상전류의 방향과는 상관없고 전류의 크기와, 상 인덕턴스의 회전자 위치에 대한 변화량에 비례한다.[2]. 인덕턴스가 증가하는 구간에서는 정 토크가 발생하고 인덕턴스가 감소하는 구간에서는 역 토크가 발생한다. 토크의 크기를 크게 하기 위해서는 인덕턴스가 증가하기 전에 미리 전류를 증가 시켜 인덕턴스가 증가하는 구간에서 최대 토크를 발생하게 해야 한다. 또한 역 토크의 발생을 방지하기 위해서는 인덕턴스가 감소하는 구간에서 전류가 흐르지 않도록 전류를 빨리 감소 시켜야 한다. 이를 위해 상 스위치를 정상적인 turn on 시간보다 미리 turn on 시켜야 하며, 스위치의 turn on 각은 진상각으로 조정

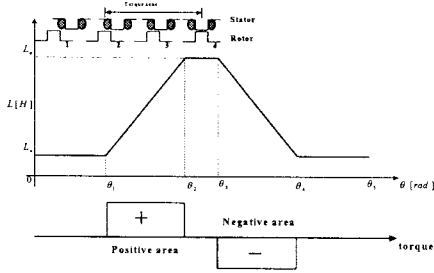


그림 2 회전자의 위치에 따른 인덕턴스형상

한다. 최대 토크를 발생하기 위한 진상각은 상전류의 크기 및 회전자의 속도에 따라서 변한다. 특히 고속으로 운전 시 발생하는 토크는 진상각에 의해 많은 영향을 받으며, SRM을 고속으로 운전하기 위해서는 진상각을 크게 해야 한다. 그러나 진상각을 너무 크게 하면 전동기의 회전자를 처음 가동시킬 때 회전자의 위치에 따라 어느 구간에서는 기동이 되지 않거나 반대로 회전하는 경우가 발생한다. 기동이 되지 않는 구간의 영역은 부하 조건에 의해 영향을 받는다. SRM을 고속으로 운전하기 위해서는 일정한 각도 이상의 진상각이 필요한데 이때, 상 스위치의 conduction overlapping에 의해 기동이 없는 등의 문제를 해결할 수 있다. 기동이 되지 않는 구간을 없애기 위해 필요한 최소의 overlapping 각은 다음과 같이 주어진다.

$$\delta_o = \beta_o - \beta_n \geq \alpha - \frac{2\pi}{N_s} \left(\frac{1}{2} - \frac{N_s - N_r}{N_s} \right) \quad (5)$$

식(5)에서 δ_o 는 overlapping각이고, β_o 와 β_n 은 각각 overlapping시와 overlapping이 없는 정상 상태의 도통각이다. 또한 α 는 진상각이고, N_s 와 N_r 은 각각 고정자와 회전자의 극수를 나타낸다. 기동 시 회전자의 위치가 상 스위치의 Overlap되는 구간에 존재하게 되면 A와 B상이 동시에 여자되고 $\frac{di_a}{dt} \gg \frac{di_b}{dt}$ 이므로 정방향의 기동토크(starting torque)가 발생하게 된다. 그러나 overlapping각이 어느 이상 커지게 되면 상 스위치의 turn off 신호가 너무 늦게 발생하여 인덕턴스가 감소하는 구간에서 전류가 많이 흐르게 되므로 역토크가 커지게 된다. SRM을 고속으로 회전시킬 경우 상 스위치 여자시간은 (s)단위로 매우 짧고, 역기전력은 크므로 각 상에 흐르는 전류를 빨리 상승시키기 위해서는 높은 인가 전압이 필요하게 된다. 동일한 속도로 회전할 때 진상각이 변함에 따라 인가되는 입력 power는 비슷하지만 전압과 전류의 형태는 크게 변한다. 진상각이 작은 경우는 큰 경우에 비해 인가되는 전압은 크게 되고 전류는 작게 된다. 고속으로 회전 시 최대속도는 DC link전압에 의해 제한되므로 진상각이 작은 경우에는 큰 경우에 비해 최대속도가 작게 된다. 진상각이 큰 경우에는 진상각이 작은 경우에 비해 인가되는 전압이 작아도 되므로 속도는 더 증가시킬 수 있지만 전류의 크기가 더 크게 되므로 스위칭 소자의 제한을 받게 된다. 그러므로 주어진 속도로 회전하기 위해서 가장 적합한 진상각은 전압과 전류의 제한을 고려하여 결정해야 한다. (6).

3. 퍼지로지 설계

퍼지이론은 프로세서의 정확한 모델을 구하기 어려워 고전 및 현대제어 방법으로는 효율적으로 제어될 수 없는 프로세서에 매우 유용한 방법이다. 퍼지이론은 인간의 지능과 경험자의 지식을 제어시스템에 부여함으로써 비

모델 특성, 비선형 특성 등을 가지는 시스템에 적합하여 일반적인 제어에 비해 시스템의 파라미터 변동이나 잡음에 대해 강인하고 시스템 성능에 악영향을 미치는 외란에도 대응할 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다.

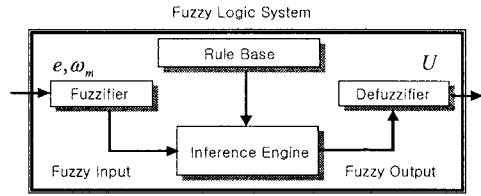


그림 3 퍼지로지 제어기의 구조

퍼지논리에는 제어규칙의 집합에 의해 표현되는 전문가의 제어전략에 기반을 두는데 퍼지화부와, 규칙기반 및 추론부, 비처지화부의 세가지 부분으로 나누어지며 그 구조는 그림(2)와 같다.

I) 퍼지화

퍼지화란 측정 가능한 입력 공간으로부터 특정한 입력 공간에 있는 퍼지 집합으로의 대응 관계로 정의될 수 있다. 일반적으로 측정되어지는 데이터는 크리스프(crisp)한 값을 지니며 퍼지논리제어 내에서의 데이터 연산과정은 퍼지 논리를 바탕으로 하므로 측정된 신호는 퍼지화 추론을 행할 수 있는 퍼지 집합으로 변환되어야 한다. 본 논문에서는 그 입력을 모터의 속도 (ω_m)와 모터에서 나오는 속도값의 차이 (e)를 퍼지화하였으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e = \omega_{ref} - \omega_m \quad (6)$$

$$\text{Rule } R_j : \text{if } e = A_i \text{ AND } \omega_m = B_j$$

$$\text{Then } U = C_j \quad (i=1, \Lambda, 7 \quad j=1, \Lambda, 8) \quad (7)$$

II) 퍼지 추론

퍼지추론은 주어진 규칙과 사실의 모임으로부터 논리적으로 타당한 새로운 사실을 얻어내는 과정이다. 입력신호 ω_m , e 에 대한 멤버십 함수를 그림2, 그림3에 나타내었다. 또한, 퍼지 추론을 K 스텝에서 c 라고 하면

$$\mu_c(u_k) = \max_{i,j} [\min(\omega_j, \mu_{c_j}(u_k))] \quad (8)$$

where, $\omega_j = \min(\mu_{A_i}(e), \mu_{B_j}(\omega))$

로 나타낼 수 있다.

III) 비퍼지화

이것은 추론 결과에 대한 해석이라고도 말할 수 있는 것이고 crisp한 하나의 수치로 변환하는 것이다. 비퍼지화에는 일반적으로 무게중심법, 중심평균법, 최대값법의 3가지가 있으며 이 중에서 가장 많이 사용되는 것은 무게중심법이다. 여기서 R은 rule base의 추론값이고 U는 이때의 출력값이다. 출력은 식 (9)에 의한 무게중심법을 사용하였다.

$$u_k = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(u(i)) \cdot u(i)}{\sum_{i=1}^n \mu(u(i))} \quad (9)$$

4. 데이터 획득

좋은 조건의 진상각을 알기 위해서 먼저 정상상태 모의 실험을 반복하였다. 그림3에 나타난 것처럼 dwell

angle은 일정하게 유지한 상태에서 on각과 off각을 앞으로 이동시키면서 평균전류값과 그 때 발생하는 토크값을 계산하였다. 진상각은 무한히 늘릴 수 있는 것이 아니라 토크가 증가하는 인덕턴스 영역 내에서만 이동해야 한다.

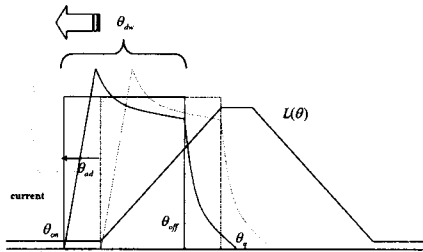


그림 3 진상각에 따른 데이터 획득

속도가 커지면 그에 따라 진상각을 많이 이동시켜 주어야 하고 속도가 감소하게 되면 또 진상각을 당겨 주어야 한다. 그래서 최적의 토크를 낼 수 있는 진상각을 얻는 것이 중요하다. 그림 4는 진상각에 따른 전류의 값을 보여 주고 있다.

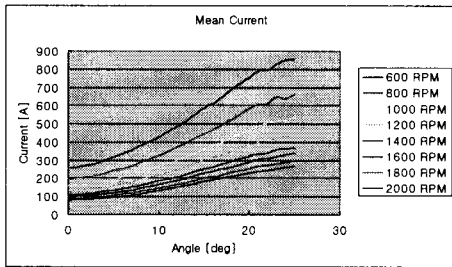


그림 4 진상각에 따른 전류값

정상상태 모의 실험에서는 그림5와 같이 나타났으나 실제 시스템에서는 300[A]이하로 제한 시켜 주어야 한다. 또한, 토크특성을 알아보기 위해 전류값을 얻었던 방법처럼 진상각에 대한 토크값을 정상상태 모의 실험을 통해 구했다.

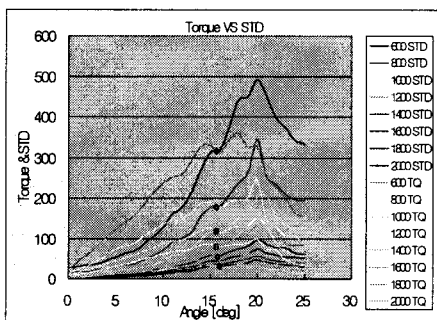
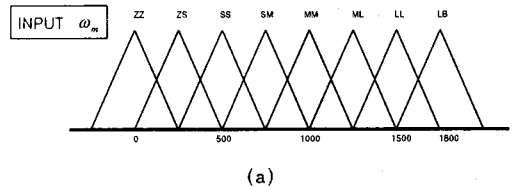


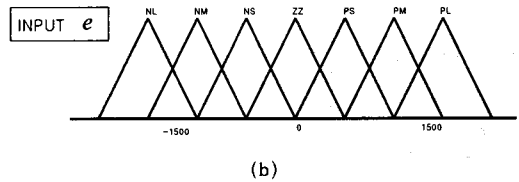
그림 5 진상각에 따른 토크와 표준편차

그리고 토크리플의 정도를 알아보기 위해 표준편차(STD)를 구하였다. 최적의 토크특성을 찾기 위해 평균 토크와 표준편차를 함께 나타낸 것이 그림 5이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 최적의 토크값은 15도 이하에 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 저속도에 고속도까지의 광범위한 속도제어는 진상각을 15도 안에서 능동적으로 조정해 주어야 한다. 정상상태 모의실험을 반복하여 얻은 데이터를 가지고 모터에서 나오는 속도값과 속도값과 지령치와의 오차에 대한 입력 Membership function

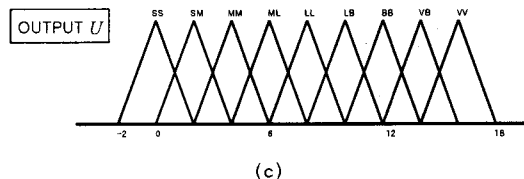
을 그림6 (a), (b)에 나타내었다. 그림6 (a)는 현재 모터로부터 나오는 속도값을 나타내고 있다. 정격 속도가 1800[rpm]이므로 0[rpm]에서부터 2000[rpm]까지 일정한 간격으로 구성하였다. 그림6 (b)는 오차 값에 대한 입력 값이다. 여기서는 정격속도 범위인 -1800[rpm]에서 1800[rpm]으로 오차의 한계를 제한하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 6 퍼지 멤버쉽 함수

(a) 출력속도, (b) 에러값, (c) 진상각

표1 룰베이스

ω_m	ZZ	ZS	SS	SM	MM	ML	LL	LB
e	ZZ	ZS	SS	SM	MM	ML	LL	LB
NL	SS	SS	SS	SS	SM	MM	ML	LL
NM	SS	SS	SS	SM	MM	ML	LL	LB
NS	SS	SS	SM	MM	ML	LL	LB	LB
ZZ	SS	SM	MM	ML	LL	LB	BB	VB
PS	SS	SM	MM	ML	LB	BB	VB	VV
PM	SS	SM	MM	ML	BB	VB	VV	VV
PL	SM	MM	ML	LL	VB	VV	VV	VV

이 입력 값이 지령치 이상일 때는 감속을 해 주어야하고 이하일 때는 늘여 주어야 한다. 이런 규칙들을 표1과 같이 규칙기반을 구성하였다.

5. 모의실험

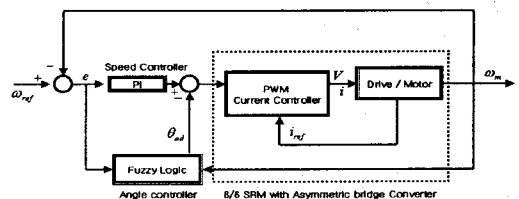


그림 7 퍼지 로직 진상각의 전체구조

그림 7과 같이 퍼지로지시스템을 구성하였다. 속도제어기는 PI제어기를 사용하였고 전류제어는 독립적으로 PWM제어기를 구성하였다. 이 두 제어기와 더불어 적절한 스윙팅타이밍을 결정하게될 퍼지로지기반 각제어기를 구성하였다. 그림 8의 (a)는 reference signal을 1500(rpm)을 주었을 때의 속도 파형을 나타내고 있다.

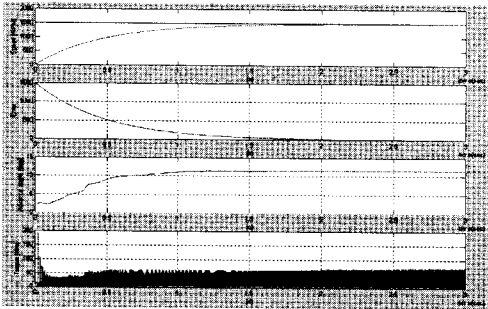


그림 8 퍼지로지진상각에 따른 출력값
(a) 속도값, (b) 에러값, (c) 진상각, (d) 토크파형

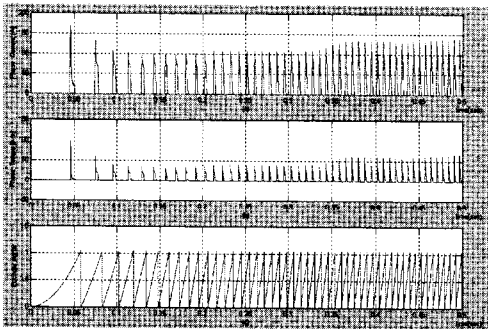


그림 9 한 상에 대한 파형
(a) 전류파형, (b) 토크파형, (c) 회전자의 위치

(b)는 에러 값을 나타내고 있으며 그림 (c)는 속도와 에러값에 대한 진상각의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 증가되는 속도와 에러값에 대해 변화하는 것을 보여주고 있다. 그림 8 (d)는 그때의 토크 파형을 보여 주고 있다. 그림 9는 한 상에 대한 전류, 토크 그리고 로터의 위치를 나타내고 있다.

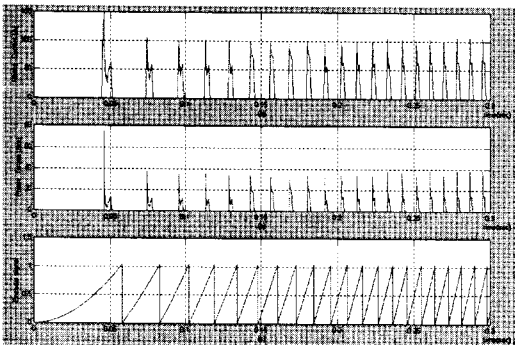


그림 10 PWM 제어를 적용한 한 상에 대한 파형
(a) 전류파형, (b) 토크파형, (c) 회전자의 위치

그림 11은 그림 9와 같은 방법으로 모의 실험하였으나 전류제어기인 PWM을 같이 사용하여 최대 전류값과 리플을 줄였다.

6. 결 론

SRM을 최적의 조건에서 효율적으로 운전하기 위해서는 진상각을 적절하게 변화시켜 주어야 하는데, 여기서는 그 변화를 퍼지로직을 써서 조정해 준 것을 보여주었다. 광범위한 속도 범위에서도 퍼지로지기반 진상각제어기는 능동적으로 스윙팅시간을 조정해 주었으며, PWM 전류제어기를 이용하여 리플 저감과 동시에 최적의 진상각 조건을 맞춰주는 것을 확인하였다.

[참고문헌]

- [1] T. J. E Miller, Switched reluctance motor and their control, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993
- [2] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, 2001
- [3] P. J. Lawrenson et al., "Variable speed switched reluctance motor," Proc. Inst. Elec. Eng., July1980, pp.253-265
- [4] M. F. K. Vergalle et al., "Exitation advanced control schemes for switched reluctance motor," IEEE IAS Annual Meetings, 1992, pp. 257-264
- [5] Reay, D.S, Mirkazemi-Moud, M., Green, T.C. and Williams, B.W., "Fuzzy Adaptive System Applied to the Control of a Switched Reluctance Motor", Proc. IEEE Int. Symposium on Intelligent Control, 1994, pp 81-86
- [6] K. D. Kim, D. J. Shin, U. Y. Huh, "Application Modified C-dump Converter for Industrial low Voltage SRM", ISIE2001, 2001, pp 18041- 1809
- [7] Nesimi Ertugrul, A drian D. Cheok, "Indirect Angle Estimation in Switched Reluctance Motor Drives Using Fuzzy Logic Based Motor Model", IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, NO. 6, pp. 1029044, Nov. 2000