

퍼지 제어를 적용한 대 전류 SRM의 구동

허성재· 허욱열· 오동준\*

Fuzzy Logic Based Control of High Current SRM

S.J.Huh· U.Y.Huh· D.J.Oh\*  
\*Inha University

**Abstract** - 본 논문에서는 지게차용 12KW급 대전류 SR모터의 전류의 진상각 및 오프각 제어와 속도의 퍼지 제어에 대해 기술하였다. 대전류 SR모터의 경우는 전압이 낮은 대신 큰 전류가 흘러야 한다. 때문에 저 저항, 저 인덕턴스 형태로 설계된다. 따라서 토크가 유발되는 인덕턴스 상승구간에 원하는 크기의 전류를 얻기 위해서는 인덕턴스의 상승구간 이전에 적절히 스위칭 시켜 주어야 하는데 이를 진상각 제어라 하고, 역토크 구간 인 인덕턴스의 감소구간 이전에 스위칭 시켜주는 것을 오프각 제어라 한다. 이러한 내용을 실구동 실험을 통하여 얻은 토크 및 속도의 변화에 따른 진상각 및 오프각의 가변 데이터를 Look-up 테이블로 만들어 시뮬레이션을 통해 실험을 해본다. 또한 실험을 통한 데이터를 바탕으로 퍼지 제어를 구성하여 시뮬레이션을 통해 PI 제어와 비교 분석하여 본다.

1. 서 론

현재 산업용 지게차의 구동용으로 정류자 전동기가 많이 사용되고 있다. 그러나 정류자 전동기는 회전자의 권선에 의한 관성 모멘트가 크고 고속으로 회전시 뱀런스의 문제를 가지고 있다. 또한 정류자 전동기는 기계적 정류에 의한 브러쉬와 정류자의 마모로 인해 수명이 짧은 단점을 가지고 있다. 또한 브러쉬가 없는 직류 전동기는 고속 회전에 의한 영구 자석의 감자 현상이 일어날 수 있다. 반면 SR모터는 회전자에 권선이나 영구자석이 없으므로 구조가 간단하고 기계적으로 안정되어 있어 고속용으로 적합하다.[1]

SR 모터의 구조는 여자권선으로 고정자를 구성하고 돌극형의 자기적 회전자를 가지며 회전자에는 권선이 없다. 따라서 SR 모터는 DC와 AC의 전원을 투입함으로써 바로 회전하지 않는다. SR 모터의 회전은 고정자에 감긴 각상에 순차적으로 전류가 흘러서 생기는 자속에 회전자가 일치하려는 데서 생기기 때문이다. 그러므로 각상이 전류에 의해 여자 되는데, 각 상에 전류를 어떻게 인가하느냐는 SR 모터 제어에서 아주 중요하다.[3]

SR모터는 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 각 제어가 필요하다. 즉, 정격 속도 정격 부하에서는 최대전류가 여기 전력에 의해 제한되는데 이때에는 여기전력이 인가전압보다 높으므로 전류의 상승률이 낮고 전류가 정류(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 상스위칭을 도통시키는 진상각을 크게 해야 한다. 그러나 진상각이 어느 각 이상 커지면 기동시 회전 토크를 발생시키지 못

하는 구간을 포함하게 된다.[1][2]. 또한, 저전압 SRM의 경우는 전원전압이 낮은 대신 큰 전류가 흘러야 하기 때문에 전류의 크기를 고려하여 저저항, 저 인덕턴스로 설계하게 된다. 그러므로 진상각에 따른 전류의 변화가 매우 크다. 게다가 고정자와 회전자의 위치가 변화에 따라 인덕턴스의 값도 비선형적으로 변하게 된다. 따라서 전류의 비선형적 변화에 따른 속도의 제어가 중요시 된다.

2. 본 론

2.1 SRM의 구동 원리 및 조건

기본적인 SRM의 구조는 고정자와 회전자가 모두 돌극 구조로 되어 있으며 고정자에만 집중권의 권선이 감겨 있다. 고정자에 감긴 권선에 전류를 인가하여 고정자를 여자시키면 회전자는 릴럭턴스가 줄어드는 방향으로 움직인다. 따라서 고정자의 각 상에 연속적으로 펄스 전류를 인가하면 모터가 회전하게 된다.

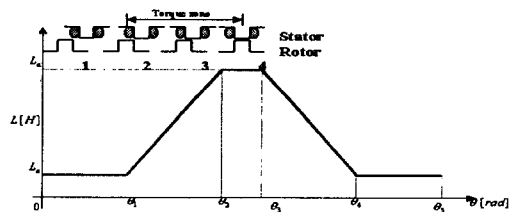


그림 1. 회전자와 고정자의 위치에 따른 인덕턴스 변화

그림 1은 회전자가 회전할 경우 한 상에서의 인덕턴스 변화 추이를 나타낸 것이다. 하지만 그림 1의 인덕턴스 파형은 SR모터의 fringing 효과와 saturation을 무시한 경우이다. 그림 1에 제시한 인덕턴스의 형상은 4개의 영역으로 분류 가능하다. 즉, 분류된 4개의 구간은 회전자 돌극과 고정자 돌극이 완전히 어긋나 있는 최소 인덕턴스 구간, 두 돌극이 만나기 시작하는 인덕턴스 변화 시작 구간, 두 돌극이 교차중인 인덕턴스 증가 구간, 두 돌극이 마주보고 있는 최대 인덕턴스 구간이 된다.

식 (1)은 SR모터의 전압 방정식이다.

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

여기서 상권선의 인덕턴스를 회전자의 위치각에 대한 함수로 나타내면 식 (2)와 같다.

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

이고 토크 방정식은 식 (3)에 나타내었다.

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

식 (3)을 보면 토크는 전류의 제곱과 인덕턴스의 변화율에 비례한다. 따라서 그림 1에서 토크 발생 구간은  $\theta_1 \sim \theta_2$  이다. 인덕턴스의 변화율이 양의 방향이면 정 토크가 발생하고 음의 방향이면 역 토크가 발생한다. 하지만 토크가 전류의 제곱에 비례하므로 전류의 방향과 토크는 무관하다. 토크를 크게 하게 위해서는 정 토크 발생구간인  $\theta_1 \sim \theta_2$  에서 전류가 커야 하는데 이를 위해서는 인덕턴스가 증가하기 전에 전류를 인가해 주어야 구간에서 원하는 전류량이 되게 해준다. 이렇게 전류 인가 시점을 앞당겨 주는 것을 진상각 가변이라 한다. 특히 SRM이 고속으로 회전 할 경우와 SRM에 고 부하가 인가되어 대 전류가 흐를 경우에 대한 진상각 가변 여부는 모터의 최대 토크 발생에 큰 영향을 준다.

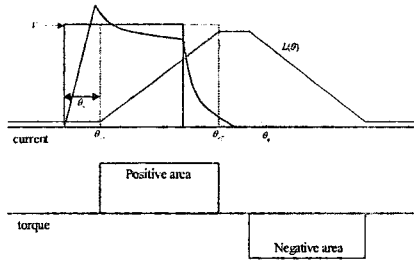


그림 2. 인덕턴스 변화에 따른 전류인가

SRM이 고속으로 회전 할 경우에는 인덕턴스 주기가 더욱 짧아지기 때문에 전류의 상승 시점 또한 빨라져야 한다. 따라서 그림 2 에서와 같이 전류 파형을  $\theta_{ad}$  만큼 시프트하여 인덕턴스의 상승 시점에 맞춰 원하는 크기의 전류를 만들어 준다. 또 SRM에 고 부하가 걸려 대 전류를 인가해줄 경우에는 충분한 전류의 상승 시간을 얻기 위해 전류 인가 시점을 앞당겨야 한다.

## 2.2 Fuzzy Logic 설계

그림 3은 퍼지 제어기의 Membership function이다. 그림 3에서 속도 오차 값과 속도 오차 변화 값의 Membership function은 대칭적 구성으로 이루어져 있다. Membership function과 Rule base의 구성은 실제 구동에 의한 속도 변화에 따른 전류 변화 값을 바탕으로 구성 하였다.

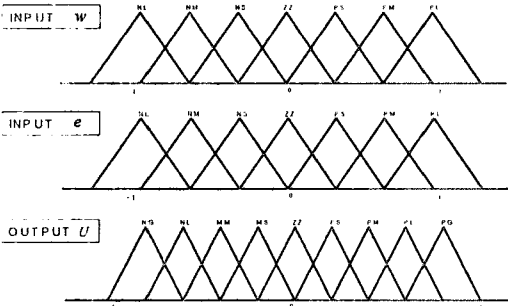


그림 3 Membership function

표 1은 속도 제어를 위한 Rule base이다.

입력	NI	NM	NS	ZZ	PS	PM	PI
NI	NO	NI	NS	NL	NA	NS	ZZ
NM	NI	NO	NL	NM	NS	ZZ	PI
NS	NI	NL	NM	NS	ZZ	PI	PM
ZZ	NL	NM	NS	ZZ	PS	PM	PI
PS	NM	NS	ZZ	PS	PM	PI	PO
PM	NS	ZZ	PS	PM	PI	PO	PO
PI	ZZ	PI	PM	PI	PO	PO	PO

표1 Rule Base

## 2.3 실 구동 실험 결과

진상각 및 오프각의 전류 및 속도 변화에 따른 데이터를 그림 4와 그림 5에 제시한다. 진상각 및 오프각 데이터를 SRM의 리플이 가장 적고 효율이 가장 높을 때를 기준으로 얻은 값이다. 그림 4와 5에 제시된 그래프를 보면 진상각과 오프각의 변화가 거의 선형적이므로 제시된 데이터를 Look-up Table로 구성한다. 그리고 구성된 Look-up Table을 이용한 시뮬레이션을 통해 진상각 및 오프각 제어의 유무에 따른 모터의 성능 변화를 검증한다.

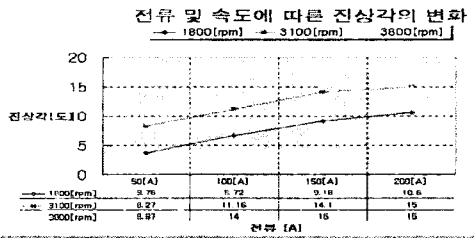


그림 4 전류 및 속도에 따른 진상각의 변화

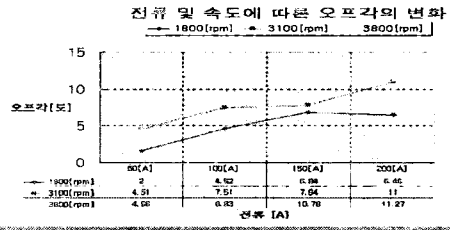


그림 5 전류 및 속도에 따른 오프각의 변화

## 2.3 Simulation 실험 결과

시뮬레이션을 위한 시스템은 그림 6과 같다. 그림 6에 도시한 시스템에서 SRM은 실 구동에 사용된 모터와 같은 조건으로 구성되었으며 퍼지 제어기, 진상각 및 오프각 제어를 연결하여 실험하였다.

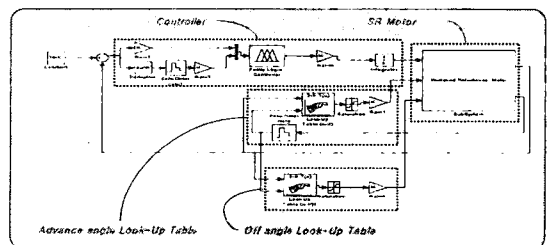


그림 6 시뮬레이션 시스템 구성

그림 7과 8는 진상각 및 오프각 제어 유무에 따른 속도 변화를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 진상각 및 오프각 제어를 연결하지 않은 경우에는 최대 6200rpm 까지 상승하였으나 진상각 및 오프각 제어를 연결한 경우에는 최대 11000rpm까지 상승하였다.

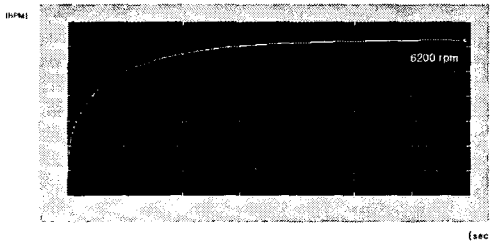


그림 7 진상각 및 오프각 제어를 하지 않았을 때 속도변화 그래프

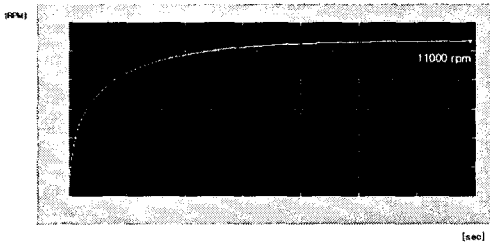


그림 8 진상각 및 오프각 제어를 하였을 때 속도변화 그래프

그림 9과 그림 10은 무부하 상태에서 PI 제어기와 퍼지 제어기의 응답 속도를 비교한 것이다. 퍼지 제어기가 PI 제어기에 비해 over shoot 없이 원하는 속도에 더 빠르게 응답하는 것을 알 수 있다.

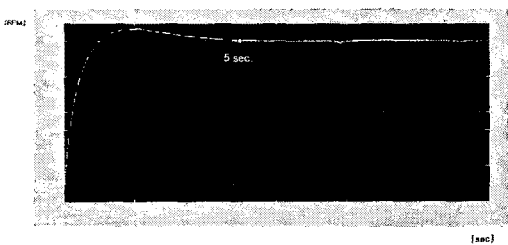


그림 9 PI 제어기 (P gain 0.002, I gain 0.015), 무부하

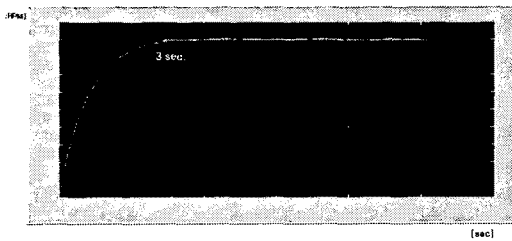


그림 10 퍼지 제어기, 무부하

그림 11와 그림 12는 7초 시점에서 5[N]의 부하를 스텝 형식으로 주었을 때 PI 제어기와 퍼지 제어기의 응답 속

도를 비교한 것이다. 부하가 있는 경우, 퍼지 제어기가 PI 제어기에 비해 속도 변화가 적고 원하는 속도에 더 빠르게 응답하는 것을 볼 수 있다.

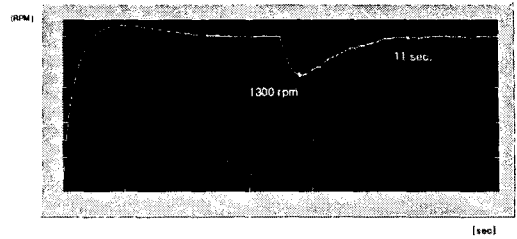


그림 11 PI 제어기 (P gain 0.002, I gain 0.015), 5[N]

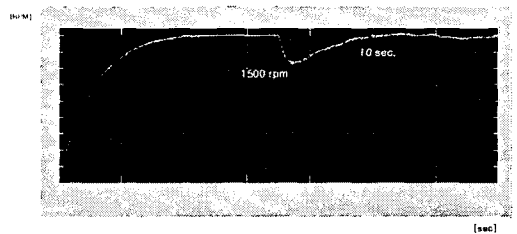


그림 12 퍼지 제어기, 5[N]

### 3. 결 론

본 논문에서는 퍼지 제어기를 이용한 대 전류 SRM의 구동 방법을 제안하였다. 실험 결과, 대 전류 SRM은 진상각 및 오프각 제어 여부에 따라 속도 변화 차이가 많이 나타났으며 무부하 시 퍼지 제어기가 PI 제어기에 비해 빠르고 안정된 응답 성능을 나타내었다. 또한, 부하가 있는 경우에도 부하가 없는 경우와 마찬가지로 퍼지 제어기가 PI 제어기에 비해 부하의 변화에 따른 속도 변화가 적을 뿐만 아니라 빠르게 기준 속도에 도달하였다.

### [참 고 문 헌]

- [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] 안진우, 황영문, "스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용", 1998
- [4] A. Hava, V. Blasko, and T. A. Lipo, "A modified C-dump converter for variable reluctance machines," *IEEE Trans. Ind. applicat.*, vol. 28, Sept./Oct. 1992.
- [5] Silverio Bolognani, Enrico Ornbini, Mauto Zigliotto, "Sliding mode control of the energy recovery chopper in a C-dump switched reluctance motor drive" *IEEE Trans. Ind. applicat.*, vol. 29, Jan./Feb. 1993
- [6] P. J. Lawrenson et al., "Variable speed switched reluctance motor," *Proc. Inst. Elec. Eng.*, July 1980, pp.253-265