

대전류 SRM의 진상각 제어

허성재* 박종훈* 허욱일* 장준현** 이병석** 정우용**
 *인하대학교 **대우중합기계

Advanced angle control
 of industrial high current switched reluctance motor

S.J.Huh* U.Y.Huh* Jong-Hun Park* J.H.Jang** B.S.Lee** W.Y.Chung**
 *inha University **Daewoo heavy industries

Abstract - In this paper, advance angle control is described to drive an industrial low voltage SRM(Switched reluctance motor) for a forklift truck by changing velocity and torque. The high current SRM is designed and its phase resistance and phase inductance are very low to inject high current into the phase windings. In 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. We analyze the changes of the advance angle as its torque and velocity are changed in the real SRM driving experiment. And we propose the way to improve the SRM performance by using the advance angle control.

1. 서 론

현대 산업에서 사용되는 지게차의 구동용 전동기는 주로 정류자 전동기가 많이 사용되고 있다. 그러나 정류자 전동기는 회전자의 권선에 의한 관성 모멘트가 크고 고속으로 회전시 뱀런싱의 문제를 가지고 있다. 또한 정류자 전동기는 기계적 정류에 의한 브러쉬와 정류자의 마모로 인해 수명이 짧다. 브러쉬 없는 직류 전동기는 고속 회전에 의한 영구 자석의 감자 현상이 일어 날 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 여자되는데, 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 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 구간

에 들어가기 전에 상전류를 빨리 상승시키고 상스위치를 도통시키는 진상각을 크게 해야 한다. 그러나 진상각이 어느 각 이상 커지면 기동 시 회전 토크를 발생시키지 못하는 구간을 포함하게 된다.[1][2]. 또한, 저전압 SRM의 경우는 전원전압이 낮은 대신 큰 전류가 흘러야 하기 때문에 전류의 크기를 고려하여 저저항, 저인덕턴스로 설계하게된다. 그러므로 진상각에 따른 전류의 변화가 매우 크다. 게다가 고정자와 회전자의 위치가 변함에 따라 인덕턴스의 값도 비선형적으로 변하게 된다. 따라서 이런 비선형성을 고려하여 최적의 진상각을 실험을 통해 얻어내었다.

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 릴럭턴스가 줄어드는 방향으로 움직이게 된다. 따라서 고정자의 각 상에 연속적으로 펄스 전류를 인가하여 주면 각 모터는 회전하게 된다.

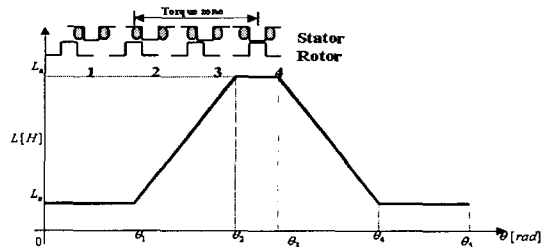


그림 1. 회전자와 고정자의 위치에 따른 인덕턴스 변화

그림 1은 회전자가 회전시 한 상에서의 인덕턴스 변화 과정을 나타낸 것이다. 하지만 여기서의 인덕턴스 파형은 SR모터의 fringing 효과와 saturation을 무시하였을 경우이다. 그림1에서와 같이 인덕턴스의 형상은 4개의 영역으로 나눌 수 있다. 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

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

이고 토크 방정식은

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

이다. 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 SR모터가 고속으로 회전 할 경우와 인가 전류가 클 경우의 두가지 경우에서의 진상각 가변은 모터의 최대 토크 발생에 큰 영향을 준다.

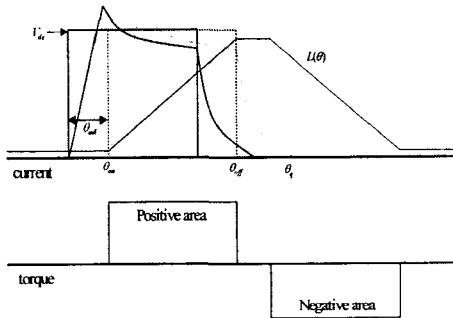


그림 2. 인덕턴스 변화에 따른 전류인가

전자인 SR모터가 고속으로 회전 할 경우는 인덕턴스 주기가 더욱 빨라지므로 전류의 상승속도 또한 빨라야 한다. 때문에 그림 2 에서와 같이 전류 파형을 θ_{ad} 만큼 당겨 주어 인덕턴스가 상승시점에 원하는 크기의 전류를 만들어 준다. 또 후자인 SR모터에 큰 부하가 걸려 전류를 크게 인가 해줄 경우에는 충분한 전류의 상승시간을 얻기 위해 전류 파형을 앞으로 당겨 주어야 한다.

2.2 대전류 SRM의 특성

SR모터의 경우 식 (3)에서와 같이 토크값이 전류의 제곱에 비례하므로 전류량이 토크값에 큰 영향을 준다. 따라서 SR모터의 경우는 대전류 저전압 인가시 큰 토크를 낼 수 있다. 여기서 높은 전류를 인가하기 위해서는 우선 전류의 크기를 조절하기 위한 쇼핑 작업이 중요하다.

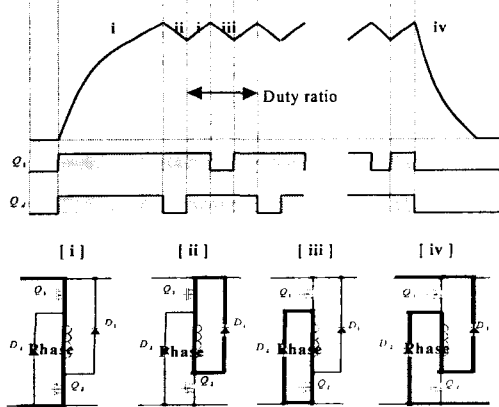


그림 3. PWM을 이용한 전류의 소프트 쇼핑

SR모컨버터와 모터에 대전류가 흐르므로 컨버터를 보호하기 위해서 전류제어가 필요하다. 그리고 최대 토크를 내기 위해서 고속에서도 평탄화 시키기위한 전류의 쇼핑 작업이 필요하다. 그림 3에서 보면 전류의 소프트 쇼핑이 나와 있다. (i)구간에서는 모터에 전류를 흘려주고 (ii),(iii) 구간에서는 컨버터의 free wheeling 구간이다. 그리고 (iv)구간에서 전류의 스위치를 모두 turn off 시켜준다. 이러한 방식으로 전류가 토크구간에서 평탄전류 파형이 되도록 제어 해준다. 그런데 여기서 (ii) 구간에서 전류의 갑작스런 감소는 권선에 역기전력을 유발한다. 이는 전류의 평탄화를 만드는데 어려움을 준다. 그러므로 전류의 쇼핑 및 진상각 제어를 할 때 역기전력을 고려해 주어야한다. 그리고 대전류 SR모터는 전류가 높기 때문에 전류의 상승시간과 하강 시간이 길기 때문에 진상각의 가변에 의한 토크 변화가 크다.

3. 실험 결과 및 고찰

위의 이론을 기반으로 실시한 10KW급 SR모터의 진상각 실험에서는 일반의 SR모터에 비해 대전류 SR모터는 진상각을 더 고려하여야 됨을 예상하였다. 또한 대전류의 인가에 의한 역기전력 발생으로 전류평탄화의 어려움을 고려하였다.

일정한 전류와 속도시 진상각에 따른 토크값의 변화를 측정 하였으며 아래 그림들은 각각의 전류와 속도에서 최대 토크가 나오는 시점과 그 전후의 파형을 측정 한 것이다.

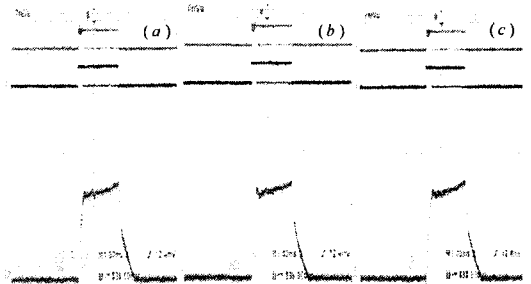


그림 4. 전류 150[A], 속도 1000RPM 에서 (a) 진상각 2.0, 토크 20.1N (b) 진상각 2.5, 토크 20.6N (c) 진상각 3.0, 토크 20.2N

그림 4에서 보는 바와 같이 전류가 평탄하게 제어 되었을 경우가 토크 값이 가장 좋을 것을 보여주고 있다. 또한 그림 5와 비교 하였을 경우 같은 전류 크기에서 속도를 증가하였을 경우 최대토크가 나오는 시점은 진상각을 더 많이 주었을 때임을 보여준다.

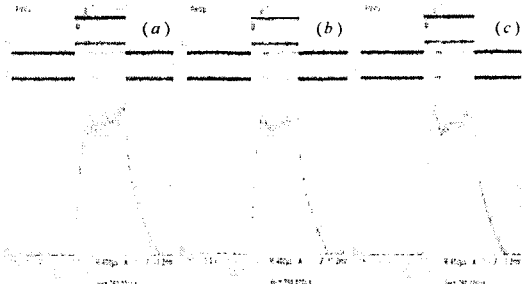


그림 5. 전류 150[A], 속도 2000RPM 에서 (a) 진상각 4.0, 토크 15.6N (b) 진상각 4.5, 토크 15.8N (c) 진상각 5.0, 토크 15.0N

그림 5과 그림 6은 같은 속도에서 전류의 크기만을 다르게 해주었을 경우이다. 전류의 상승시간을 보충하기 위해 그림 7에서 전류 파형을 앞으로 더 당겨 주는 것을 보여 준다.

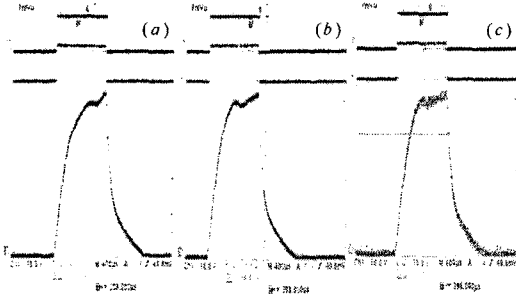


그림 6. 전류 300[A], 속도 2000RPM 에서 (a) 진상각 7.0, 토크 38.2N (b) 진상각 7.5, 토크 38.6N (c) 진상각 7.73, 토크 38.5N

그림 7은 전류 및 속도의 변화 따라 최대토크가 나오는 시점의 진상각을 측정 한 것이다. 진상각의 변화가 거의 선형적임을 보여주고 있다.

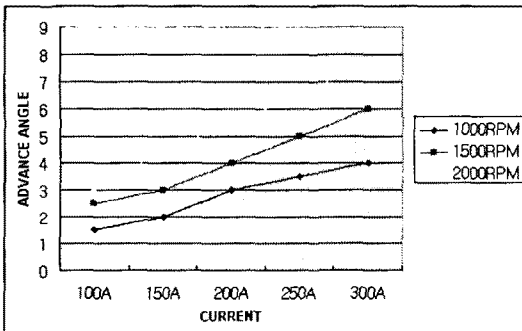


그림 7. 최적토크에 대한 진상각 변화

4. 결 론

본 논문에서는 대전류 SRM의 전류제어를 통해 전류와 속도의 변화에 따른 최대 토크가 나오는 진상각을 측정 하였다. 위의 이론과 같이 전류의 속도 및 부하 증가시키려 할 때에는 입력 전류의 증가도 중요하나 속도 및 부하가 클수록 진상각에 변화에 크게 영향을 받으며 입력전류의 크기가 클수록 진상각을 더욱더 당겨 주어야 함을 확인하였다. 그리고, SR 모터는 이들의 결과로부터 진상각의 변화가 속도와 전류에 대해 거의 선형적으로 변화함이 확인되었다. 이러한 결과를 통해 대전류 SR 모터 구동을 위한 진상각 변화에 대한 알고리즘 구현에 이용할 수 있을 것이라 사려된다.

본 연구는 에너지 관리공단의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

[1]T.J. Emiller, switched reluctances motor and their control. Magna Physics Publishing and Clarendon

Pressm1993
 [2]R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, 2001
 [3]안진우, 황영문, "스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용", 1998
 [4]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
 [5]추영배, 박성준, 김선구, 신홍교, 황영문, "SRM Drive by Single Pulse Current with Flat-topped Waveform",KIEE, Vol. 47, No. 10, OCT, 1998
 [6]Uk-Youl Huh, Tae-Gyoo Lee "Fuzzy Logic Cased Switching Angle Controller For SR Motor Speed Control" 1995, ISIE '95., Proceedings of the IEEE International Symposium on , Volume: 2 , 1995
 [7]P. J. Lawrenson et al., "Variable speed switched reluctance motor." Proc. Inst. Elec. Eng.,July 1980, pp.253-265
 [8]M. F. K. Vergalle et al., "Exitation advanced control schemes for switched reluctance motor." IEEE IAS Annual Meetings, 1992, pp. 257-264
 [9]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.
 [10]Silverio Bolognani, Enrico Ornibeni, Mauro 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