

스위치드 리럭턴스 전동기 에서 자기동조 방식에 의한 최적 턴오프각의 결정

°문진영, 장도현
호서대학교 전기공학과

Self-tuning control of turn-off angle for Switched reluctance motor drive

Jin-Young Moon, Do-Hyun Jang
Dept. of Electrical eng. Hoseo University

Abstract - The control of the switched reluctance motor is usually on the inductance profiles as a function of position. In this paper, a control scheme to maximize the motor torque is proposed by determining optimal turn-off angle with a self-tuning control method.

1. 서론

최근 전력 반도체 소자의 발전에 따라 스위치드 리럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor ; 이하 SRM)와 구동장치는 교류 전동기 혹은 직류 전동기의 가변속 구동장치를 대체할만한 후보 전동기로 등장하였다. SRM은 이중 돌극을 갖는 자기적 구조에 고정자에만 집중권선을 가진 간단한 전기-기계 에너지 변환기구로서, 적절한 펄스전원을 인가하여 브러쉬리스 전류작용(brushless commutation action)을 하며 가변 토크-속도 특성을 갖는 전동기구이다[1],[2].

SRM의 장점은 회전자 구조가 규소강판을 적용한 것에 불과한 간단한 구조로 되어 있으며 제조공정이 쉽고 관성이 매우 작을 뿐 아니라 제작비용 또한 저렴하며 고속 운전이 가능하다. 그리고 고정자 권선이 간단하며, 대부분의 발열이 고정자 권선에 나타므로 냉각이 빠르고 용이하며, 회전자에 영구자석이 없으므로 영구자석형 전동기에 비하여 온도 상승에 따른 문제가 없고 토크가 상 전류의 극성에 무관하므로 구동 회로에서 스위칭 소자의 개수를 줄일 수 있다. 한편 SRM은 여자 방식이 펄스 형태이므로 발생 토크가 리플이 많이 갖게 되어 기청 소음이 있다[4].

또한 4상한 운전이 가능하므로 기동 및 제어를 쉽게 할 수 있고 회전자의 위치각에 따라 턴온 또는 턴오프의 시기를 적당히 조정함에 따라 우수한 토크 특성을 얻을 수 있다[2],[3]. 즉, SRM의 컨버터에서 턴온 또는 턴오프각은 토크 또 속도를 제어하는 변수이다.

본 논문에서는 각 턴온각에 대하여 최대의 인덕턴스 토크를 구할 수 있는 적절한 턴오프각을 자기동조에 의해 구하는 방식을 제시하였다. 예를 들어, 인덕턴스 프로파일의 최대지점에

서 상스위치를 턴오프할 경우, 인덕턴스 감소영역에서 전류 꼬리가 발생한다. 따라서 식(1)에 의해 역토크가 발생하게 되며 총토크는 감소된다. 즉, 턴온각의 위치에 관계없이 턴오프각을 조정하게 되면 역토크를 감소시키게 되며 총토크는 증가하게 된다. 이럴 경우, SRM 시스템의 효율은 개선될 것으로 예상된다.

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

2. SRM의 각도제어

그림 1에는 고속에서 단일 펄스에 의해 제어되는 경우의 파형을 나타내었다. 여기서 인가전압의 점호시점은 비정렬위치에 있으며, 전류값은 극들이 겹치기 시작하는 시점까지는 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 인덕턴스가 증가하는 구간에서는 역기전력이 발생하게 되며, 고속에서는 역기전력의 크기가 인가

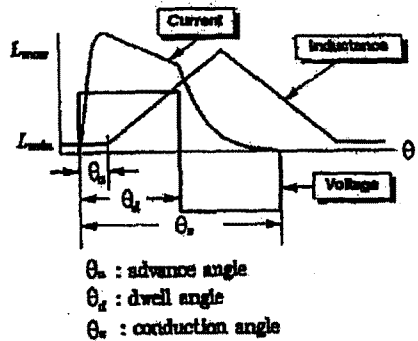


그림 1 SRM의 각도 제어
Fig. 1 Angle control of SRM

전압의 크기보다 커지게 되고, 전류의 크기를 감소시키게 된다. 전류(轉流)시에 이르러서는 인가전압이 역전되므로 전류는 급격히 감소하게 되고, 정렬위치에서 역기전력의 극성은 반전되어 인가전압의 극성과 다시 반대가 되고, 전류의 감소율이 낮아지게 된다. 이 구간에서는 역기전력의 크기가 역전된 인가전압의 크기보다 커져 전류가 다시 증가하게 될 위험도 있다. 이로 인

해 단일 펄스로 동작시킬 때는 인덕턴스가 최대값을 갖기 몇도 전에 전류(轉流)의 시점에 앞당겨져야 한다. 또한 극들이 겹치기 전에 인가전압을 가해주는 점호각의 중요성을 보여준다. 이것은 인덕턴스가 작은 값을 가지고 있을 때 전류를 어느 정도 값까지 상승시켜 주기 위한 것으로 인덕턴스의 변화가 거의 없는 구간에서는 역기전력이 발생되지 않기 때문에 인가전압은 모두 전류를 증가시키는데 사용된다. 고속의 경우 점호각을 많이 앞당겨 주어야 하며 심지어는 앞 영역의 인덕턴스가 감소하는 구간까지 당겨 줄 필요도 있다. 이와 같이 기본속도 이상의 고속 또는 중부하에서는 필요한 충분한 토오크를 얻기 위해서는 어드밴스각(θ_a)과 드웰각(θ_{dwell})을 조절하는 방법을 사용한다. 즉 어드밴스각(θ_a)을 조절하여 점호시점을 앞당겨 충분한 전류의 상승시간을 도모하고, 드웰각(θ_{dwell})을 조절하여 토오크 크기를 최소화시키 역토크 발생을 억제해 주는 각도제어가 필요하다. 또한, SRM의 토오크 극성은 전류의 방향과 무관하고 인덕턴스의 기울기의 부호와 같게 되므로, 전류만을 제어하여 SRM을 역방향으로 회전시키는 것은 불가능하고, 정, 역회전을 위해서는 각도제어를 통해 원하는 회전방향의 토오크를 발생시키는 구간에 전류를 흘려주는 것이 필요하다[5-7].

3. 턴오프각 제어원리

SRM의 속도제어는 PWM방식의 저속제어와 단일펄스방식(unit-pulse operation)의 고속제어에 나눌 수 있다. 단일펄스방식의 고속제어로서 턴온 및 턴오프각의 위치는 SRM의 속도제어의 변수라고 할 수 있다. 기존의 단일펄스방식으로 속도를 제어할 경우, 턴온각(θ_{on})을 제어하고 턴오프각(θ_{off})은 고정된 드웰각(θ_{dwell} ; $\theta_{on} - \theta_{off}$)에 의해 결정된다. 본 논문에서는 기존에서 드웰각(θ_{dwell})을 고정시키는 대신, 턴온각(θ_{on})의 위치 또는 속도에 따라 적절한 드웰각(θ_{dwell})을 encoder, 및 80196 마이크로프로세서에 의해 구한다.

기존의 고정 스위칭각도에 의한 SRM의 운전방식은 전동기의 부하토크가 변함에 따라서 전류의 파형이 다양한 형태로 변하며 효율특성이 좋지 않은 전류의 형상도 갖게 한다. 그러므로 고정된 스위칭 각도에 의한 운전방식은 전출력의 영역에 걸쳐서 고효율을 갖게 할 필요가 있다. 즉, 운전 중의 가변 부하에 대하여 효율을 향상시키려면 각 가변부하에 맞는 적정 전류의 확립을 위한 스위칭각도의 조정이 필요하다[7].

일반적으로 교류전동기는 전류파형이 연속적인 정형파이지만 리턴스 전동기의 전류파형은 펄스 형태의 연속적인 파로서 전압, 속도, 스위칭각도 및 부하토크 등의 운전조건에 따라 전류파형의 형상이 다양하게 변화한다. 이러한 펄스파형의 전류형상은 기존의 교류전동기보다 효율에 미치는 영향이 크다. 특히, 스위칭각도의 조정에 의하여 전류형상을 간단하고 쉽게 변화시킬 수 있으므로 효율을 향상시키는 적절한 전류파형을 스위칭각도의 조정에 의하여 제어하여 전동기의 효율을 개선할 수 있다. SRM의 최대 토오크 출력을 얻기 위해서 적절한 고정자 전

류제어가 수행되어야 한다. 실제 턴오프각을 이동시키는 것이 없다면 토오크가 상당히 감소한다. 게다가 토오크 리플은 증가하고 소음을 많이 발생시킨다. 필요한 최소 전류 크기를 갖도록 전동기를 운전하고 전류의 꼬리를 짧게하면 회전수의 증가를 얻게 될 것이다[8].

그림1은 턴온각 θ_{on} 이 고정되었을 때, 인덕턴스 프로파일, 전류, 전압, 및 토오크를 보여주고 있다. 그림1(a)에서 드웰각 θ_{dwell} 이 커서 턴온각이 인덕턴스 프로파일의 최대치점일 때 전류 파형 및 순시토크를 보여주고 있다. 인덕턴스 감소지역에서 전류꼬리가 길어지며, 따라서 역토크가 발생한다. 이에 따라 속도는 줄어들 것이다.

그림1(b)는 θ_{dwell} 이 작을 경우 전류파형 및 순시 토오크를

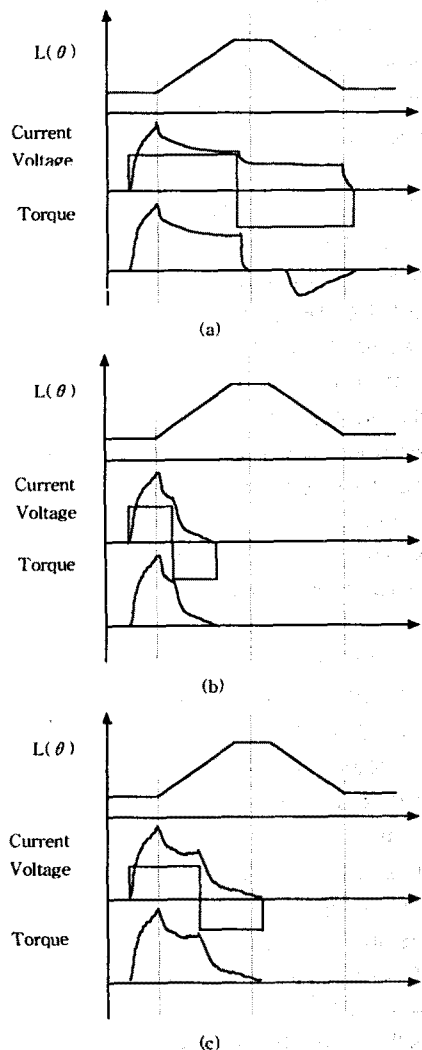


그림 2 턴온각 고정시 드웰각(θ_{dwell})의 크기에 따른 인덕턴스, 전류, 전압, 토오크
Fig. 2 Inductance, current, voltage, torque due to dwell angle of size at fixed turn-on angle

보여주고 있다. 상스위치가 앞의 위치에서 턴오프되어 전류의 크기가 작아지며, 따라서 정토크도 작아진다. 그림1(a) 또는 그림1(b)와 같이 턴오프각의 위치에 따라 총토크의 크기가 작아지며 속도도 늦어진다. 따라서, 그림1(c)와 같이 턴오프각을 조정할 경우 최대의 토크가 발생한다.

흐름도이다. 샘플링 시간동안의 encoder 출력 pulse P를 기준으로 $P(t-1)$ 과 $P(t)$ 와의 차 Diff를 계산하여 θ_{off} 를 앞으로 또는 뒤로 이동한다. $\text{Diff}=(P(t)-P(t-1))$ 가 $-n \leq \text{Diff} \leq +n$ 일 경우, θ_{off} 를 고정시킨다.

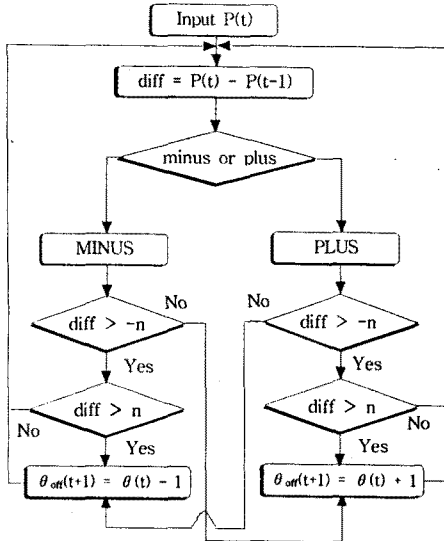


그림 3 자기동조, 제어 흐름도
Fig. 3 Flow chart for self-tuning control

4. 실험

본 논문에서는 그림 4와 같은 1.5n컨버터를 제작하여 1.2 HP, 8/6모형 전동기를 구동하였으며, 전동기 권선의 상인덕턴스는 최대값 27.4[mH], 최소값 3.6[mH]를 갖으며 저항은 0.9[Ω]이다. 스위칭 소자로는 IGBT(SKM 40GD 121D)를 사용하였다. 마이크로프로세서는 80196(MIDAS co.)를 사용하였다.

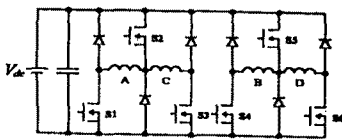


그림 4 1.5n 컨버터
Fig. 4 1.5n switch converter

그림 5는 턴오프각은 4°로 고정하고 턴오프각을 각각 6.5°, 7°, 7.5°, 8°, 8.5°, 9° 주어지고, 각각의 세팅된 턴오프각에 대하여 컨버터 전원 7V, 9V, 11V, 13V가 각각 주어졌을 때 최대 속도가 출력되는 턴오프각을 구하였다. 7V에서는 턴오프각이 10.5°, 9V는 10°, 11V는 10°, 13V에서는 9° 또는 9.5°의 턴오프각이 구하여졌다.

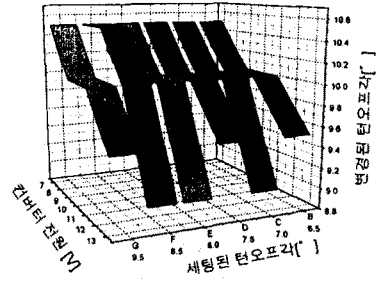


그림 5 컨버터 전원에 따른 턴오프각의 변화
Fig. 5 The variation of turn-off angle due to converter source

5. 결론

본 연구에서 행하는 턴오프각은 고정시키고 자기동조에 의한 적절한 턴오프각에 의해 SRM을 구동할 경우, 토크를 증가시킬 수 있으며, 최초로 세팅되어지는 턴오프각을 달리 하였어도 최대의 속도를 낼 수 있는 턴오프각으로 자기동조에 의해 수정되어졌다. 이로 인해 턴오프각의 위치에 관계없이 턴오프각을 조정하게 되며 역토크를 감소시키게 되며 총토크는 증가하게 된다. 턴오프각은 자동적으로 설정이 되므로 턴오프각만으로 속도제어를 하게 된다.

참 고 문 헌

- [1] P.J. Lawrenson, and *et al.*, " Variable speed reluctance motors," *Proc. IEE*, vol.127, pt.B, no.4, pp.253-265, July 1980.
- [2] T.J.E. Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Oxford University press, 1993
- [3] T.J.E. Miller, and *et al.*, " Four quadrant brushless reluctance motor drive," *IEE Conf., Power Electronics and Variable Speed Drives*, July 1988, pp.273-276
- [4] D. H. Jang, I.Husain, and M. Ehsani, " Modified (n+1) switch converter for switched reluctance motor drives," in *IEEE-PESC Conf. Rec.*, 1995, pp.1121-1127
- [5] 강욱, "스위치드 리럭턴스 전동기의 구동을 위한 새로운 분리 전원형 컨버터에 관한 연구", 박사학위논문, 성균관대학교, 1996
- [6] 이기철, " 가변속 스위치드 리럭턴스 모터 구동시스템의 효율향상", 박사학위논문, 서울대학교, 1994
- [7] 공관식, 황영문, "SRM의 고효율구동을 위한 가변 스위칭각도 조정방식에 관한 연구", *전기학회 논문지*, vol.44, no.1, pp.25-33, 1995
- [8] R.Orthmann, H.P.Schoner, Daimler-Benzag, "Turn-off angle control of switched reluctance motor for optimum torque output", *EPE'93*, pp.20-25, 1993