

특집

스위치드 리럭턴스 전동기 및 컨버터의 개발동향

장도현

(호서대학교 전기공학과)

1. 서론

근래에 와서 값싼 전력용 반도체의 출현과 이에 대한 제어기술이 발달함에 따라 전동기구에 관한 연구도 다양하게 진행되고 있다. 이러한 상황을 배경으로 종래에는 스위칭 기술의 어려움으로 응용면에서 위축되어 있던 리럭턴스 토오크를 동력용으로 이용하고자 하는 연구개발이 이루어졌으며 이를 실용화시킨 것이 스위치드 리럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor : 이하 SRM)이다.

SRM은 직류전압으로 구동되며, 토오크의 방향은 전류의 방향과는 무관하다. SRM의 동작 원리는 일반적인 전동기에 적용되는 플레밍의 왼손 법칙을 기초로 한 것이 아니라 자기회로를 응용하고 있다. 이러한 자기회로는 전동기의 고정자와 회전자 사이에서 이루어지며, 구동에 요구되는 이상적인 자기회로를 형성하기 위하여 회전자와 고정자는 그림1과 같이 이중 돌극형(Doubly salient)구조로 제작된다. 회전자는 자기회로에 전원 공급과 자기저항 변화에 따른 인덕턴스를 형성하기 위하여 고정자권선은 집중권(concentrated winding)의 형태로 감겨져 있으며, 회전자는 자화를 위한 권선이나 자성체가 필요 없다.

SRM의 기본개념은 1838년 경에 이미 발표되었으나 기술적인 문제로 실현되지 못하다가 반도체 기술과 전자기 설계 기술이 확립되기 시작한 근래에 들어서야 실현이 가능하게 되었다. 1960년대 중반이후 SRM에 대한 새로운 연구가 시작되었으며 이는 직류전동기나 유도전동기 또는 브래시리스 직류전동기 등과 성능면에서 경쟁적인 관계가 될 만큼 발전을 이룩하였다.

다른 전동기와 비교하여 SRM은 다음과 같은 장점을 가진다.

(1) 전자기구(電磁機構)가 간단하다; 전동기구 중 자기 구조가 유도전동기보다 간단하여 제작비가 20-30[%]정도 절감된다. 즉, 고정자의 스롯과 회전자의 스롯이 없으므로 권선 작업이 간단하다.

(2) Brushless 형이다; 그 동안 다기능화 및 브러시리스화를 위하여 영구자석형 동기전동기 및 무정류자형 직류전동기가 개발되어 실용화되고 있으나 이들의 전력변환 회로가 복잡하며 영구자석의 이용으로 전동시스템 전체의 가격상승을 가져와 범용성을 잃고 있다.

(3) 고효율성(高效率性) 전동시스템이다; 효율은 표준 유도전동기보다 7-10[%] 높고 고효율 유도전동기보다 5[%]정도 높은 값을 갖는 반면에 생산가격은 상대적으로 낮다. 그리하여 비싼 고효율 전동기를 개발하는 것보다 경제적 측면에서도 유리하다.

(4) 경제성(經濟性)이 높다; 전동기 구동용 컨버터가 필요하나 토오크가 극성에 무관하므로 구동회로에서 스위칭 소자의 갯수를 줄일 수 있어 컨버터의 제작비를 감소시킬 수 있다.

(5) 시스템 제어성(制御性)이 강하다; 토오크 특성이 우수한 스텝전동기(Step motor)의 고유 특성과 직권 전동기의 기동 특성을 가지고 있어 기동에서 정상 가변 속도까지 원활한 운전이 가능하다.

(6) 대부분의 발열이 고정자에서 나타나므로 냉각이 빠르고 용이하다.

(7) 기동토오크가 크다.

(8) 초고속이 가능하다.

그러나 SRM을 구동하기 위해서는 컨버터와 제어기, 회전자 위치를 검출해야 하는 센서가 필요하다. 또한, 인덕턴스 변화에 따른 비선형 특성이 커서 구동회로 설계시 유의하여야 하며 스위칭 형태가 SRM구조에 따른 인덕턴스 변화를 고려하지 않을 경우 큰 토크 리플(torque ripple)이 생기는 단점이 있다[1],[2]. 이러한 토크 리플은 가청 소음, 및 진동을 발생하는 요인으로써 부하에 큰 영향을 미치는 요소이나 다행히도 저속에서는 토크 리플을 줄이기 쉽다. 그러나 초핑 주파수를 가청 주파수 내에 두어야 하는 대형 시스템의 경우에는 심각한 문제가 될 수가 있다.

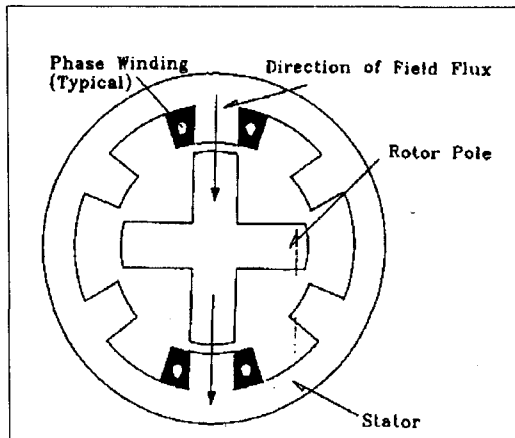


그림 1. 8/6극 SRM의 고정자 및 회전자 구조

2. 연구배경

SRM의 기원을 살펴보면 1924년 전자기관(electromagnetic engine)으로 시작된다. 그후 1880년대의 직류 및 교류 전자기관(DC 및 AC Electric machines), 1960년대의 동기 리럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor)와 1973년대 미국 General Motors사의 Axial-Airgap, Multistack 형태를 갖는 현재와 같은 SRM이 개발되었다. 1970년대 후반에서 1980년대에 이르러 영국의 로렌슨(P. J. Lawrenson)등 여러 과학자들에 의해 기본적인 이론이 정립되었으며, 1983년도에 영국의 Oulton SRM Drive사에 의해서 기업화되었고, 1980년대 중반에 이르러 Micro Processor based SRM 구동장치, 각종 컨버터 토폴로지를 개발하기 시작하였다. 전동기 설계시 CAD와 FEM 이론을 적용하여 고성능 제어 개념이 도입되었다[2]. 1988년도에는 제2세대 SRM이 개발되어 효율 향상을 도모하였고, 1990년대에

이르러 제3세대 SRM이 개발되어 토크 리플과 소음 감소를 위해 연구가 진행되고 있다.

제2세대 SRM은 4극의 유도 전동기에 비해 출력 면에서는 15%, 저속 토크에서는 80%정도가 더 높은 것으로 나타났으며 효율도 4~7%정도 우수한 것으로 비교되었는데 이러한 수치는 중용량 전동기의 경우 소비 전력 면에서나 열 발산 측면에서 중요한 의미를 갖는다.

이상과 같은 SRM의 잇점 때문에 현재 선진국에서는 이미 10년 이상의 연구 개발을 통하여 소형으로는 가전제품과 자동차용 전동기구로써 가장 유력시되고 있으며 막대한 전동기구 시장에서 상당한 수요비중을 차지할 것으로 보인다.

3. SRM 구동용 컨버터 토폴로지

컨버터 토폴로지 개발의 목적은 스위칭 소자수를 줄여 컨버터의 비용을 줄이려는 것과 제어성능을 향상시키려는 두가지로 나눌 수 있다. 본 절에서는 대표적인 컨버터 토폴로지에 대하여 간단히 소개하겠다.

(a) 비대칭 브릿지 컨버터(Asymmetric Bridge Converter)

비대칭 브릿지 컨버터는 그림 2(a)과 같이 상당 두개의 스위치와 두개의 환류 다이오드를 가지는 구조로 효율이 높고 다양한 제어가 가능하며, 각 상의 전류제어가 독립적이어서 두 상의 전류 중첩이 가능하다. 또한 한 상의 고장 발생 시에도 다른 상에 큰 영향이 없으며, 소자의 정격전압이 상대적으로 낮아지는 등 제어성능이 가장 우수한 것으로 알려져 있다. 고전압, 대용량 SRM의 구동에 특히 유리하며, 단점으로는 소자수가 상대적으로 많고 드라이브 회로가 복잡해지는 것을 들 수 있다.

(b) 분리전원형 컨버터(Split-source Converter)

분리전원형 컨버터는 상당 하나의 스위치 및 다이오드를 갖는 구조로 그림 2(b)에 나타내었다. 컨버터 회로가 간단하여 가격이 저렴하고, 컨버터의 손실이 적은 것이 큰 장점이나 각 상의 전류제어가 독립적이지 못해, 각 상이 균형을 이루도록 신경을 써야 하고, 각 상이 균형을 이루도록 신경을 써야

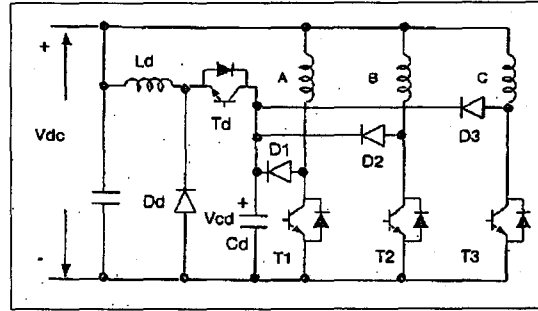
하고 소프트 초핑이 불가능하다. 한 상에 이상이 있을 경우 타격이 크고 전압 이용율이 0.5밖에 되지 않는 단점이 있다.

(c) 커패시터 덤프 컨버터 (C-dump Converter)

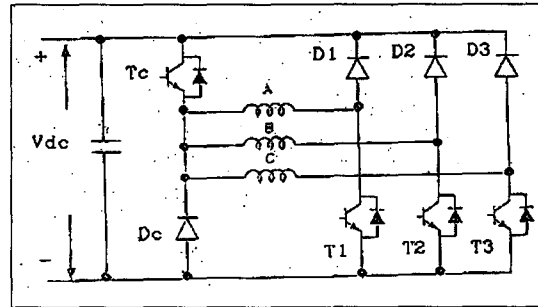
그림 2(c)에 나타낸 커패시터 덤프 컨버터는 상수보다 하나씩 더 많은 스위치 및 다이오드를 지니고, 부가적으로 커패시터와 인덕터가 추가되는 구조로, 에너지를 커패시터에 저장하였다가 직류전원에 환원하는 방식의 컨버터이다. 기술적으로는 효과적이나 제어가 복잡해지며, 덤프회로에 고장이 생길 경우 덤프 커패시터 cd에 아주 높은 전압이 충전되기 쉽고, 그 피해가 커지게 될 위험이 있다.

(d) (n + 1)스위치 컨버터

그림 2(d)는 상수보다 스위치와 다이오드가 한개씩 더 많은 구조의 컨버터로 에너지를 전원측으로 환원시킬 수 있다. 상의 전류가 완전히 소호된 후, 상을 여자시켜 줄 수 있으므로 제어성능이 떨어지고 두 상의 전류중첩이 생기지 않도록 주의해야 하며, 공통스위치의 발열로 인한 사고시 내성이 약한 단점이 있다.



(c)



(d)

그림 2. SRM 컨버터의 여러가지 형태

- (a) 비대칭 브릿지 컨버터 (b) 분리전원형 컨버터
- (c) 커패시터 덤프 컨버터 (d) (n+1)스위치 컨버터

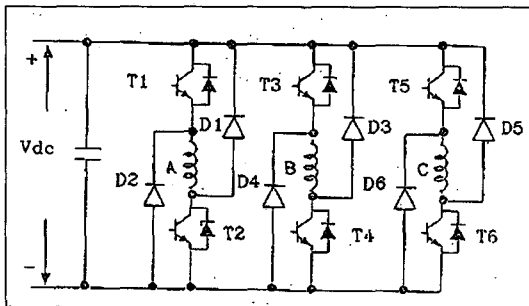
4. SRM 컨버터의 연구동향

그 SRM 컨버터는 전동력 응용에서 현용 전동력 시스템을 보다 실용성있는 구동형태 - 예를들어, 초고속 운전범위의 확대, 저가격화 - 로 전환하는데 개발목표로 하고 있다. 이를 위하여 시스템은 단순하고 견고하면서도 운전특성은 고품질화 되도록 하여야 한다.

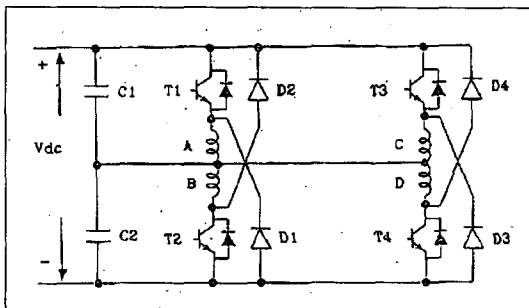
4-1. 운전특성의 고품질화에 관한연구

앞에서 언급한 바와 같이 SRM의 심각한 단점중의 하나는 동작특성상 토오크 리플이 크게 발생하여 소음, 및 진동이 비교적 크다는 점이다. 이러한 운전특성을 개선하기 위한 개발연구로는 다음과 같은 과제들이 있다.

- (a) 등가적인 전류원의 형성의 개선 : flat-top 전류를 형성시키는 스위칭 제어방식과 스위칭 오프시



(a)



(b)

잔여에너지를 신속히 회수하는 방법이 연구되고있다.

(b) 맥동토포크 및 소음억제 방안의 연구 : 스위칭 고주파전류에 의해 맥동토포크 및 소음이 발생한다. 이를 제거하기 위하여 다단계 스위칭 오프방식 및 랜덤스위칭방식을 적용하고 있다.

(c) 운전특성 개선을 위한 제어방식에 관한 연구 : 현재 SRM 컨버터의 자기회로는 비선형적인 특성을 많이 내포하므로 제어용 전동기로 활용하기는 부적당하다. 이러한 운전특성을 개선하기 위한 연구가 현재 진행되고 있다.

4-2. 회전자 위치검출방식의 개선

회전자 위치검출에는 SRM 컨버터에서 중요한 구성요소이며, disc 와 photo-interrupter로 된 간단한 장치로 구성할 수 있다. 최근에는 이러한 장치도 생략할 수 있는 sensorless화에 관한 연구개발이 다방면으로 행해지고 있으나 실효성에 관해서는 의문이다.

5. 맺 음 말

스위치드 릴럭턴스 전동기 및 컨버터는 산업용, 업무용 및 가정용의 전동력화의 급격한 신장의 추세를 이루고 있다. 따라서, 현재 사용되는 전동시스템의 대체적인 전동시스템으로써 가까운 장래에 그 활용범위가 크게 확대될 것으로 전망된다. 뿐만 아니라, 국내에서도 그 실용화를 위한 개발연구가 활성화되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. Krishnan and P. Materu, "Design of a single switch per phase converter for switched reluctance motor drives," in *IEEE-IECON Con., Rec.*, 1988, pp.773-779.
- [2] R. Krishnan and S. Lee, "Analysis and design of a single switch per phase converter for switched reluctance motor drives," in *IEEE-PESC Conf. Rec.*, 1994, pp.485-492.
- [3] H. H. Moghbelli, G. E. Adams, and R. G. Hoft, "Prediction of the instantaneous and steady state torque of the switched reluctance motor using the finite element method," *IEEE-IAS Conf.*

Rec., 1988, pp.59-69.

[4] P.J. Lawrenson, and *et al.*, " Variable speed reluctance motors," *Proc. IEE*, vol.127, pt.B, no.4, pp.253-265, July 1980.

[5] T.J.E. Miller, *Switched Reluctance Motors and Their Control*. Oxford, England: Oxford Press 1993

[6] S. Vukosavic and V.R. Stefanovic, "SRM inverter topologies: A comparative evaluation," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol.27, no.6, pp.1034-1047, 1991.

[7] 임근희, " Switched reluctance motor의 개발 및 응용", 전기공업 9월호, pp. 29 ~ 43, 1993

[8] 이기철, " 가변속 스위치드 릴럭턴스 모우터 구동시스템의 효율향상", 박사학위논문, 서울대학교, 1994

[9] A.E. Fitzgerald, and *et.al.*, " Electric Machinery", 5th Edition, McGraw-Hill, pp. 446~487, 1992

[10] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", *IEEE Proc. of APEC'91*, 1991

[11] P.J. Lawrenson, and *et.al.*, " Variable Speed Switched Reluctance Motors", *Proc. of IEE* pp. 253'256, vol.127, July 1980

[12] 황영문, " 릴럭턴스 토포크 동력의 발달동향," *Proceedings of KIEE*. Vol. 45., No.12, Dec. 1996



장도현 (張都鉉)

1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).

1993년 ~1994년 미국 Texas A&M Univ. 전기공학과 객원교수. 현재 호서대 공대 전기공학과 부교수. 당학회 편집위원