

Switched Reluctance Motor의 응용

오석규*, 박성준**, 안진우***

(*진주산업대 조교수, **동명대 조교수, ***경성대 부교수)

1. 서론

반도체 기술의 발전에 따라 산업기술의 형태가 아날로그 방식에서 디지털방식으로 전환되고 있으며, 전력변환 기술의 반도체화와 IC화는 우리의 생활방식과 산업구조를 획기적으로 변화시키게 되었다. 아울러 사회 전반의 전력활용은 다기능화 및 고효율화 되고 있다.

한편, 에너지의 동력화에 바탕이 되고 있는 전동력 응용은 스위칭 기술의 발전으로 인한 교류전동기의 직류전동기화 및 영구자석의 개발로 인한 브러쉬리스화로 그 활용형태가 획기적으로 바뀌게 되었으며, 산업구조의 다기능화에 대응하기 위하여 분산 제어시스템용 직접구동 전동기의 활용이 두드러지게 되었다.

이러한 전동력 응용기술 추세에 따라 새로이 개발되고 있는 전동력 기기 중 전동기의 전자구조를 펄스전압 스위칭 전원으로 재구성한 것이 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM이라 함)이다. 이는 종래의 아날로그형 정현과 전원에 적합한 전동기의 전자구조를 디지털 펄스형태의 인가전압에 적합한 릴럭턴스 토크로 구동되는 전자구조로 재배치한 것이다.

릴럭턴스 토크를 활용하는 전동기구는 회전자의 회전에 의하여 발생하는 가변릴럭턴스를 극대화하는 동시에 뮤우추열 토크를 최소화하는 자기구조를 갖는다. 즉, 릴럭턴스 토크를 활용하는 전동기구는 고정자와 회전자 모두 돌극형으로 하며 고정자극에만 집중권으로 감겨져 있는 권선에 의하여 여자되는 단일여자방식으로 구동한다.

SRM은 가변 릴럭턴스 토크로 구동되는 전동기로 전자기적

구조가 간단하고 제작 경비가 저렴하며, 고효율, 고토크/관성비, 넓은 범위의 가변속 운전 등의 장점을 가지고 있어 산업기기, 항공기기, 자동차, 가전기기 등의 응용분야에서의 적용 범위를 넓혀가고 있다.

본고에서는 최근에 가변속 전동기로서 관심의 대상이 되는 SRM의 개발 역사와 응용에 대해 기술하고자 한다.

2. SRM의 개발역사

전자기구를 매개로 하는 전기기계적 에너지 변환기계에는 공극에서 일정여자에 의한 상호 토크 방식과 가변여자에 의한 릴럭턴스 토크 방식이 있다. 전자는 대부분 동력용 전기 기계에, 후자는 소형기계에서 단순 토크를 이용하는 기계에 주로 이용되어 왔다. 릴럭턴스 토크를 사용한 전동기는 긴 역사를 가지고 있으며, 최근 전동력 응용범위의 확대, 전력전자기술의 발전으로 이러한 스위칭 여자에 의한 릴럭턴스 토크 전동기가 서보용 뿐만 아니라 동력용으로도 상용화되게 되었다.

스위치드 릴럭턴스라는 용어는 1969년 Nasar가 사용한 variable reluctance motor에서 유래되었으며, 그 후 Miller의 brushless reluctance motor, electronically commutated reluctance 등의 다양한 용어가 제안되면서 Lawrenson 교수가 처음 사용하였다.

최초의 SRM 원리는 1838년 영국의 Davidson이 제안한 전동기라 알려져 있다. 이 전동기는 Edinburgh - Glasgow간의 기차에 적용된 것으로 기차의 무게는 6톤이고 배터리 구동으로 4mile/h의 속력으로 운전하였다. 비슷한 시기에 영국의

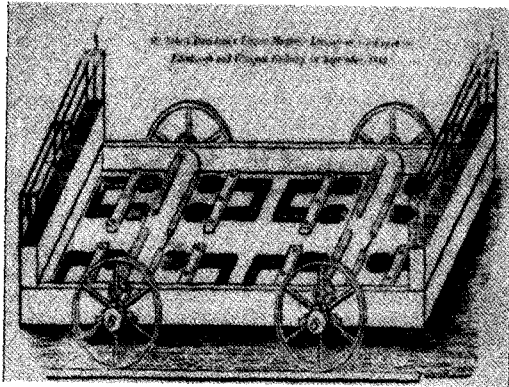


그림 1 Davidson의 전동기가 장착된 기관차

Taylor가 "Obtaining Motive Power"(1939)라는 특허를 출원하였다.

1850년대 미국의 Grafton이 8마력용 switched field machine을 제작하였으나 전극이 납과 백금이어서 경제성이 없었다. 이와 같이 초기의 SRM 관련 특허들은 1840년대에 발견할 수 있으나, SRM의 실질적인 응용사례는 1935년의 영국 해군의 포조정기(gun direction repeater)로 사용된 가변릴럭턴스 스텝전동기라 여겨진다. 그 후 1950년대 Thyristor가 나오면서 다시 스위칭 여자방식의 기기에 대한 연구가 활성화되기 시작했다.

Nasar 교수의 variable reluctance motor는 스위칭되는 전자석에 철심판을 위치시켜 회전력을 얻도록 한 것으로 그림 2와 같은 구조이다.

1950년대 synchronous reluctance motor의 개발, 70년대 GM에 의해 현재와 같은 형태의 SRM이 개발되면서 이후 이 기기의 상업적 잠재력에 의해 연구가 활성화되었다. 1971년과 1972년에 Bedford와 Hoft에 의해 제출된 두 개의 미국 특허에서 회전자의 위치와 정확히 동기하고 실제의 전자적인

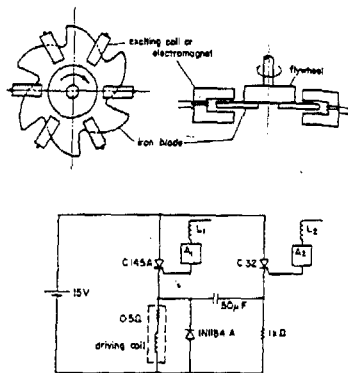


그림 2 Nasar교수의 전동기 구조와 구동회로

정류작용을 하는 현대 SRM의 필수적인 여러 특성들이 설명되었다.

최근의 역사에서 중요한 디딤돌 중의 하나는 Ford 자동차의 Unnewehr과 Koch에 의해 제작되고 다른 작업들은 Bausch에 의해 행해진 사이리스터 제어전동기이다.

유럽에서 Byrne과 Lawrenson은 SRM의 상업적인 잠재력을 인식했으며, SRDL(Switched Reluctance Drive Ltd.)에 의한 급속한 개발과 기술적인 발전은 특히 1980년대 초 기술적 관심을 불러일으키는데 선두적인 역할을 했다. SRDL의 초기 특허 중에서 가장 잘 알려진 것은 Tasc Drives(지금은 Graseby Controls)로서 산업응用に 쓰이는 범용 가변속 Switched Reluctance Drive를 만들었다. 이들 주철구조의 틀을 가진 전동기들은 방폭형으로 4kW에서 80kW 범위에 걸쳐 사용이 가능하다.

1950년대 중반 이후 꾸준히 연구를 진행해 온 SRDL의 Lawrenson은 1980년대 SRM 연구를 체계화한 연구결과를 발표하면서 응용연구 및 실용화가 본격적으로 시작되었으며, 초기의 전동기 구동시스템, 제어방식, 컨버터 토폴로지 등에 대한 연구에서 최근에는 고효율, 저소음화 및 적용성 연구가 활발하게 진행되고 있다.

3. SRM의 적용분야

SRM은 낮은 제작비, 높은 토크/효율, 높고 넓은 속도범위, 직류직권전동기의 속도-토크특성을 가지고 있어 다양한 전동기 분야에 적용되고 있다. 또한 SRM의 최대 단점인 높은 수준의 소음과 진동 등이 많은 연구 개발을 통하여 가전기기에도 적용이 확대되고 있는 실정이다. 다음은 각 적용분야에 있어서 SRM의 강점을 보여주고 있다.

표 1 SRM의 적용장점

분야	강점
운송수송	높은 토크/질량, 높은 효율, 강력한 제동능력
가전기기	높은 속도범위, 높고 안정된 효율곡선, 저가의 제조비용
산업기기	강인한 구조, 높은 토크능력, 직접 구동능력, 4상한 동작, 강인한 내환경성, 정밀한 속도토크 제어성
항공, 군수	저 질량, 높은 속도, 강인성, 높은 출력/질량, 높은 내온도특성

3.1 미국의 동향

세계적으로 스위치드 릴럭턴스 전동기 기술에 순식간에 신

퇴성을 높여준 사건이 1994년 6월 말에 일어났다. 세계적인 제조업체인 Emerson Electric은 유럽과 세계의 기술 선봉에 있는 SRDL을 인수했다. Warner-Superior Electric같은 주요 회사의 SR 제조활동이 감소했으나, 거대 Emerson의 SR기술로의 진입은 그렇지 않았다. Emerson은 전기 자동차, 전자제품들과 펌프, 산업용 전동기와 드라이브, 의료용과 항공기 응용분야 같은 SR기술의 수 많은 응용분야에 목표를 두었다.

그림 3은 7.5W에서 375kW의 SRDL의 SR전동기와 드라이브를 보여준다.

미국에서 SRM관련 특허와 논문은 1982년에 약 10개에서 1993년에 200개여개 였으며, 최근에는 450건 이상의 출판물과 특허들이 나와 SRM에 관한 연구가 크게 활발해졌음을 알 수 있다.

SR전동기가 가변속 드라이브(VSDS)에 사용된 직류직권 전동기보다 더 큰 최고, 동작 토크를 갖는다. 이러한 응용분야는 SR전동기 동작 특성과 저가의 시스템 비용을 유일하게 결합하여 사용하고 있다. 미국 로봇 제조회사인 Adept Technology는 새로 출시된 Adept One-MV와 Adept Three-MV5 axis SCARA 로봇에 사용하기 위하여 그들 자체의 SRM을 개발하였다.

Westinghouse의 전동기 스쿠터는 SR전동기의 능력과 응용 요구 조건과 잘 부합하는 뛰어난 예이다. 요구되는 축의 속도에서 요구되는 토크 레벨을 얻기 위해 두 개의 넓게 떨어지는 토크-속도 점이 필요하다. 4상 SR전동기는 가속시 800rpm에서 13.2Nm를 내었고 고속 동작시 3.0Nm를 내었다. 4상 SR전동기는 24Volt DC 배터리 입력과 4개의 FET 구동의 독립전력단을 사용하는 특정한 구조를 가진다. 불행히도 체인 드라이브 Linkage로 알려진 문제와 일부 상업적 문제로 아시아에서 이러한 스쿠터를 사용하기 위해서 제작한 후

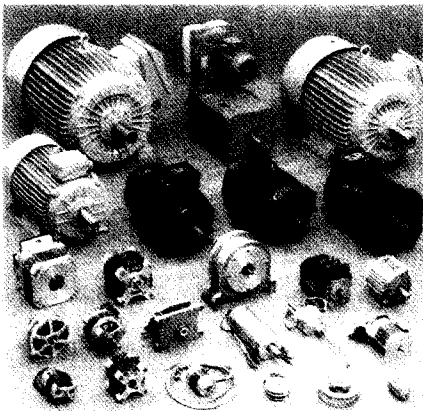


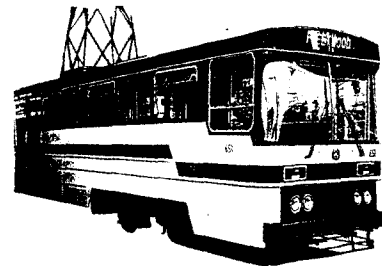
그림 3 SRM 제품(SRDL/Emerson,UK)



그림 4 SRM을 적용한 scooter(Westinghouse)

이러한 설계방식은 중단상태가 되었다. 차후 2년 후에 아시아 시장을 위해 새로운 전기 스쿠터 설계방식이 개발될 것으로 기대된다. 그의 운반기계에 적용된 예는 그림 5에 보여준다.

Emerson은 미국 내 가전시장에 SRM을 적용하려하고 있다. 미국의 시장잠재력은 1995년 867만대의 새로운 냉장고와 690만대의 신형 세탁기와 183만대의 전기청소기나 상점의 진공청소기와 같은 가전시장의 크기를 예로 보아도 상당하다. 그림 6은 세탁기에 적용된 예로 12/8극, 700W급으로 직접구동방식에 의해 기존방식에 비해 에너지 절약이 최대 65%, 물사용량을 최대 40%까지 절약할 수 있는 것으로 알려져 있다.



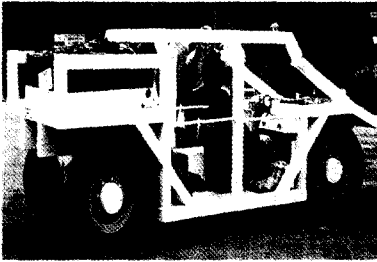
(a) Bus(GEC traction)



(b) Truck (SRDL, UK)



(c) Electric car(HIL, UK)



(d) Mining carrier(British Jeffrey Diamond)



(e) Solar car "Red Shift" (Ohio State Univ./Emerson)

그림 5 SRM을 적용한 운반기계

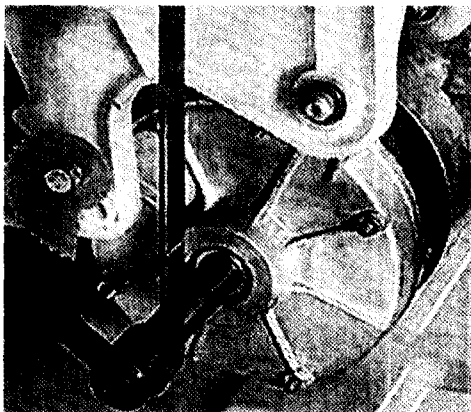


그림 6 세탁기에 적용된 SRM(Maytag/Emerson)

3.2 유럽의 동향

SR전동기와 드라이브 기술의 발전은 역국에서 시작되었다. 리즈대학의 Lawrensoq박사의 연구에서 시작하였다. T.J.E Miller 박사가 뉴욕 북부에 있는 General Electric R&D 센터를 떠나 1987년에 Glasgow 대학의 전자·전기공학과에 합류하였다. Miller 교수는 SR기술을 포함한 광범위의 대용량 산업용 전동기와 드라이브에 초점을 둔 연구로 미국의 General Electric에서 매우 왕성한 활동을 하였다. Miller교수는 단기간 내에 대학 연구팀과 임원 기업들이 결합된 공동체인 SPEED(Scottish Power Electronics and Electric Drives)를 조직하였다. SPEED 컨소시엄은 모든 분야의 전동기 드라이브 기술에 대한 소프트웨어 설계 프로그램의 개발에 중요한 역할을 수행했다. 1994년에 전세계 20개 이상의 기업들이 SPEED의 회원이 되었다. 모든 기본적인 정보들은 컨소시엄 회원들에서 공유되었지만 SPEED 연구소가 하드웨어의 노하우를 가지고 있다. 이외에 독일의 Maccon, 이탈리아의 Sicomotori 등이 SRDL의 라이선스로 전동기를 생산 판매하고 있다.

1983년 OULTON이라는 상품명으로 최초의 범용 SRM을 발매되었다. 4개의 IEC TEFC 프레임은 처음으로 개발하였다(4kW에서 22kW의 정격으로 112, 132, 160, 180 프레임 크기). 폐회로 제어속도 범위는 100 : 1이고 SR전동기 구동 시스템은 15rpm이하까지 매끄럽게 동작했다. 전체 동작 속도범위(15~1,500rpm)에서 일정토크 특성을 가지고 기본 속도는 1,500rpm이었다.

Alpha Romeo 자동차사에서 SR 전동기를 사용하는 전자식 조향장치 시스템의 개발에 성공한 TRW사는 대형 미국 자동차에 사용되는 SR전동기를 사용한 전전자식 운전시스템을 지금 개발하고 있다. 새로운 운전시스템의 주안점은 유압에 의한 동력보조장치를 완전히 제거하는 설계에 있다. 대신에 그것은 SR전동기와 유도 토크 센서 같은 전자제어기를 도입한다.

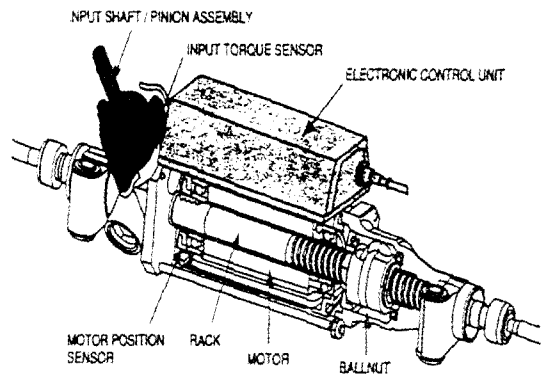


그림 7 SR전동기를 사용한 조향장치(TRW)

유럽에서도 시장판매분야 선두로 공장자동화 분야의 규모가 거의 3억 4천만 달러에 이른다. 1994년 유럽에서 판매된 SR전동기와 드라이브는 총 2천만 달러에 이른다. 2000년 SR전동기와 드라이브를 3,500백만 달러 정도 판매되리라 예상되며, 이는 미국의 예상치 1억달러에 비하면 시장잠재력이 매우 높다고 하겠다.

3.3 국내 동향

국내 SRM분야의 연구개발수준은 아직 초기단계이며 기업, 대학 등에서 소규모로 이루어지고 있는 실정이다. 최근 몇몇 업체에서 상용화를 목표로 개발중이거나 저용량의 경우 개발을 완료하여 상품화한 경우가 보고되고 있다. 최근 L전자에서 송풍기 등 가전부품으로, 몇몇 업체에서 전동지게차, 전기

표 2 SRM drive의 개발현황

제 작 회 사	응 용 사 례	대 치 기 종	제 작 회 사	응 용 사 례	대 치 기 종
Emerson(SRDL)	Industrial VSD		Magna Physics/ Wstinghouse(U.S.A)	Electric Motor Scooter	Gasoline engine
Radio Energie (France) *	Pallet Truck	Wound field Brush dc motor	MagnaPhysics/ Sunstrand(U.S.A)	Highspeed motor/ generator engine starter	Hydraulics
Sicme Motori (Italy) *	Industrial VSD	Brush dc motor	MagnaPhysics/ Sunstrand(U.S.A)	High speed aircraft engine pump	Hydraulics
Picanol (Belgium) *	Textile Looms	AC induction motor	GE Drives(U.S.A)	High speed aircraft enginepump	Hydraulics
Besam (Sweden) *	Automatic Door Opener	AC induction gear motor	GE Drives(U.S.A)	Generator engine starter	Hydraulics
Warner/Superior Electric.(U.K)	Pump for electric steering assist for Alpha Romeo cars	Hydraulic System	A.O. Smith(U.S.A)	Heating,ventilation Aircondition	AC motor
Jeffrey Diamond (U.K) *	Heavyduty conveyer system for mines	Brush dc motor	Beckman(U.S.A)	Centrifuger	
Broomeway (U.K) *	Electric driven air compressor	Pneumatic driven compressor	H.P(U.S.A)	Draftmaster plotter	step motor
General Motors (U.S.A)	Primary Vehicle Drive	AC induction motor	Allied Signal Aerospace Co.(U.S.A)	Aerospaceactu- ator M/G system	
Emerson Electric (U.S.A)	Refrigerator Compressor	AC induction motor	Grasby control(U.K)	Textiles & Forming mfg.	
Emerson Electric (U.S.A)	Washing Mach. Agitator	AC induction motor	TRW(U.S.A)	Electrically power sreering	Hydraulic steering
Emerson Electric (U.S.A)	Shop Vacuum Cleaner	AC induction motor	NSK Megatorque (U.S.A)	Direct Drive Robots, Rotary Tables, etc.	Brush DC Servo Motor&Resolvers
Warner/Superior Elecetric.(U.S.A)	Direct Drive Steering	Hydraulics	Adept. Tech (U.S.A)	Direct Drive Robots, Rotary Tables, etc.	Brush DC & BLDC Servos & Resolvers
Warner/Superior Electric.(U.S.A)	Cruise Control Drive	Brush DC motor	Semifusion	2-axis positioner	
NMB Hansen (U.S.A)	Textile	Brush DC or BLDC motor	Allenwest(U.K)	Industrial drive	
Emerson(U.S.A)	Centrifuger	AC motor or BLDC motor	Brother(Japan)	Industrial sewing machine	sewing machine
Servo Products (U.S.A)	End Mill Table Drives	Brush DC motor	Honeywell(U.S.A)	controller, sensorless drive	

* Licensee of SRDL

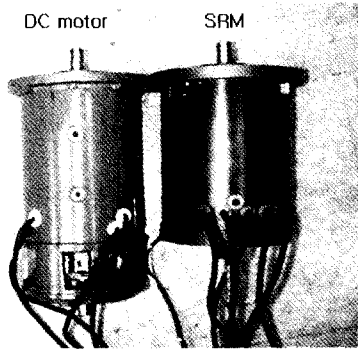


그림 8 전동지게차용 SRM과 동급 직류기(동진정공/경성대)

자동차, EPS(Electrically Powerd Steering)용으로 개발하고 있다.

그러나 최근 SRM의 우수성에 착안하여 가전, 견인구동, 송풍기, 차량부품, 군수용 등에 적용하기 위한 연구개발과 기술표준에 대한 연구 등을 추진하고 있다.

4. 결 론

SRM의 국내 연구의 실적은 10여년 정도 밖에 되지 않아 세계최고 기술과는 격차가 없을 수 없다. 특히 Emerson은 이 분야를 전략연구과제로 정하고 집중투자하여 많은 연구성과를 거두었으며, 최근 SRM의 단점인 소음, 진동문제를 상당히 극복한 것으로 보고되고 있다. 기존의 전동기 산업에서는 우리의 독자기술 개발여건을 가지지 못하였으나 SRM의 경우 개발여건과 능력이 충분하다고 판단되며 보다 많은 연구와 적용을 위한 개발이 진행되어야 할 것이다. ㉠

참 고 문 헌

- [1] Nasar, S. A., "DC Switched reluctance motor", Proceedings IEE, Vol.116, No.6, 1969, pp. 1048~1049.
- [2] Lawrenson, P.J.etal, "Variable-speed switched reluctance motors", Proceedings IEE, Vol.127, Pt.B 253-265. 1980, pp. 260~268.
- [3] Miller, T.J.E., "Switched reluctance motor drives" PCIM Reference Book,Intertec Communications, 1988.
- [4] 안진우, 스위치드 릴럭턴스 전동기, 오성미디어, 2001.1

〈 저 자 소 개 〉



오석규(吳錫奎)

1967년 6월 2일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 졸업(석사). 1997년 8월 동 대학원 졸업(공학박사). 1993년~1994년 (주)현대중공업 근무. 1998년~현재 진주산업대 산업자동화공학과 조교수.



박성준(朴晟濬)

1964년생. 1991년 부산대 전기공학과졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과졸업(공학박사). 1997년~1999년 거제대 조교수. 2000년~현재 동명대 전기전자계열 조교수.



안진우(安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 12월~1996년 1월 영국 글래스고대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신(매디슨)대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자컴퓨터공학부 부교수.