특수동기전동기

이 민 명*
(*대전산업대 전기공학과 부교수)

1. 서 언

최근 산업사회의 급속한 발전과 함께 그 구조가 점차 세분화, 전문화됨에 따라 특수동기 전동기(VRM : Variable Reluctance Motor, PM : Permanent Magnetic Motor, Hystersis Motor 등)의 용도가 점차 증가되고 있는 추세이다. 또한 가정생활의 수준이 향상됨에 따라 가정용 전기기기에 사용되는 소형전동기의 수도 상당수에 이르고 있다.

그 동안 전자공학의 획기적인 발전으로 말미암아 정밀성을 요구하는 서보 전동기의 고속화, 소형화를 비롯 고정밀도의 전동기 제작이 가능하게 되어 그 용도는 앞으로도 계속 강세를 보일 것으로 생각된다.

본고에서는 앞으로 동기전동기중 소형전동기로서 산업사회에 크게 공헌할 것으로 생각되는 VRM의 회전자를 2중돌극(double salient pole) 형태로하여 전기에너지를 효율적으로 공급받는 SRM(switched reluctance motor)과 PM Motor를 중심으로 현재의 상황과 그 전망에 대해 서술하고자 한다.

2. 소형전동기의 종류와 특성

소형전동기를 분류하는데에는 몇가지 기준이 있을 수 있으나 본고에서는 구조적인 면을 고려하여 다음표에 나타낸 바와 같이 분류하였으며 그 중 SRM과 PM Motor에 대해 기술하고자 한다.

우선 전동기의 회전자 운동형태로 분류하면 아래와 같이 대별할 수 있다.

A) Rotary motor

B) Linear motor

회전형 전동기를 구조적인 면으로 세분하면 다음 표1과 같다.

표 1. 소형 전동기의 분류

소형전동기
- (A) Motors having brushes and commutator
  - DC Motor
    - PM Motor
      - Slotted type
      - Slotless type
      - Coreless type
      - Moving coil type
      - Flat Motor
        - Print Motor
        - Pancake Motor
    - EM Motor
      - Series type
      - Shunt type
      - Separately exited type
  - AC Motor
    - Universal motor
    - Repulson motor
    - Schrage motor
- (B) Motors with AC motor construction no commutator
  - AC motor
    - Synchronous motor
      - Hysterisis Motor
      - Reluctance Motor
      - Wound field Motor
      - PM Motor
    - Asynchronous Motor(Induction Motor)
      - Squirrel — Cage Induction Motor
      - Eddy current Motor
  - DC Motor(Driver DC or an electronic drive circuit)
    - Brushless DC motor
    - SRM(switched reluctance motor)
- (C) motors with a stepping motor construction
  - Stepping motor
    - VR type
    - PM type
    - Hybrid type
    - Claw-tooth type
    - Disc magnet type
  - Ultra-low speed Synchronous motor
- (D) Piezo electric ceramics motor
  - Ceramic actuator
  - Ultrasonic - wave motor

3. SRM(Switched Reluctance Motor)

3.1 릴럭턴스(Reluctance)전동기의 발달과정

릴럭턴스 전동기는 현상학적인 방법에서 유래되었으므로 그 기원을 확실히 추적하기는 어렵지만 Ampere에 의해 발견된 자기적인 현상에 그 기준을 두고 있다. 1820년 프랑스의 Ampere의 이론에 근거하여 철심형솔레노이드에 전류를 흘리면 자기적인 면에서 영구자석과 같은 역활을 하므로 여자전류의 크기를 적절히 조절하면 영구자석에서 발생하는 힘과 동일한 힘을 철심형 솔레노이드에서 얻을 수 있다는 데에서 처음 출발하였다.

릴럭턴스 전동기는 구조적인 면에서 매우 간단하여 고정자는 일반 유도전동기와 비슷하지만 회전자에는 권선이 없다.

구동원리는 여자된 자기회로의 자기저항이 최소가 되는 방향으로 가동자가 힘을 받게 되므로서 회전력이 발생하게 된다. 이와 같은 현상은 계에 저장된 에너지를 기계적 에너지로 변환하므로서 계의 에너지를 최소화하려는 물리적 의미를 내포하는 것이다. 이와같은 원리를 이용한 장치로는 간단한 액튜에이터로서 인양자석, 선형 솔레노이드, 계전기, 스텝 스위치 등이 이에 속한다.

릴럭턴스 전동기가 개발되어 사용되기 시작하면서 부터 1920년까지 약 100여년간 릴럭턴스 전동기의 해석은 단지 동기전동기의 특별한 경우로 취급하였다.

그 이후에는 효율과 역율은 좋지 못하지만 권선형 동기전동기의 구조를 다소 변경시켜 릴럭턴스 전동기를 제작하므로서 저렴한 가격으로 전동기를 공급할 수 있게 되었다.

1930년대 릴럭턴스 전동기는 실제적인 서보계통에 처음 사용되었으며 스텝 전동기에도 응용되었다. 이 시기 부터 영국 해군에서 회전식 송신기 추적자로 사용하므로서 본격적인 서보계통에 활용되기 시작하였다.

제2차 세계대전이 시작되자 미해군에서도 이 메카니즘을 사용하므로서 전세계에 널리 알려지게 되었다.

1944년부터 1957년까지 근 13년간 폐루프 제어계의 서보기구로 주로 직류전동기가 사용되어 왔으나 복잡한 궤환으로 인하여 그 이후에는 제어 설계가 비교적 간단한 폐루프 제어방식이 채택되었다. 이에 따라 전동기 부피가 작고 속도가 높으며 회전력이 큰 새로운 전동기를 필요로 하게 되었다. 이와 같은 목적에 포함되는 제어용 전동기가 VRM (variable reluctance motor)과 스텝 전동기이다.

대용량 릴럭턴스 전동기 설계는 대부분 스텝 전동기의 개발형태를 많이 인용하였다. 이때까지만 해도 릴럭턴스 전동기의 회전자는 돌극형이었으며, 고정자는 유도전동기의 구조와 같았다.

릴럭턴스 전동기의 개발의 설계에 크고 공헌한 사람은 Lawrenson이다. Lawrenson은 릴럭턴스 전동기가 저주파에서 직축과 횡축 리액턴스의 차에 비례한다는 이론을 정립하였고, 이 이론에 근거하여 S.K. Gupta는 돌극형 회전자를 segmental형으로 설계한 것을 비롯하여 V.B.Honsinger는 회전자에 자속장벽(flux barier)과 절단부(cut out)를 만들어 직축 리액턴스와 횡축 리액턴스의 차를 크게 하였다. 이들은 회전자의 형태를 변형하여 종래의 전동기보다 단위 체적당 회전력을 개선하므로서 정현파 60Hz에서 5KW미만인 릴럭턴스 전동기의 특성을 결정짓는데 크게 기여하였다.

1960년대 이전까지 전동기의 가변속 운전은 주파수 변환기를 이용한 정류자형 직류전동기로 비교적 광범위한 속도조절이 가능하였다.

1960년 후반부터 반도체 소자의 개발에 힘입어 싸이리스터로 제어되는 농형 유도전동기가 전기차의 동력원으로 소개되어 높은 효율로 광범위하게 속도 제어도 가능하게 되었다.

이 당시 사용된 인버터 회로는 복잡하고 값도 비쌌지만 교류기에 처음 응용되었다는 점에서 상당한 의미를 가지고 있었다. 그러나 곧이어 L.E.Unnewehr와 Koch는 교류기의 구동장치에 필요한 인버터 회로의 반도체 수를 상당 한개로 줄임으로서 가격의 절감은 물론 인버터의 스위칭 손실을 줄일 수 있었을 뿐만 아니라 고장률이 적어 전동기의 신뢰도가 높아졌다. 이때부터 가변 릴럭턴스 전동기(variable reluctance motor) 구동에 싸이리스터를 이용하게 되어 마침내 Koch에 의해 단중적(single stack) 3상 VRM이 고찰되었다.

Ramaoty Rao은 VRM의 최대출력, 최대자속, 전류밀도 그리고 역률과 온도 상승에 관한 최적 설계를 위하여 설계변수로 회전자 반경, 슬롯폭, 공극길

이, 상당 권선 수를 선정하여 최적조건을 얻어냈다.

1980년대 중반이후 부터 현재에 이르기까지 인버터 회로의 발달과 더불어 산업사회가 다변화되고 급속한 자동화 추세에 따라 기동과 정지가 빈번하거나 높은 신뢰도를 필요로하는 특수 목적의 용도에 알맞은 SR 전동기가 최근 많은 연구자들에 의해 집중적으로 연구가 수행되고 있다.

3.2 SRM의 구동원리

그림2.1과 같이 VRM(variable reluctance motor)의 회전자는 돌극형으로 권선이 없는 구조이고, 고정자는 대개 유도 전동기와 흡사하며 적층 철심으로된 고정자극이 여자되면 회전자의 자기저항이 최소가 되도록 자기회로를 구성하려는 성향 때문에 회전력이 발생하게된다.

회전력을 발생하는 고정자 극성은 각상 전류의 극성과는 무관하게 단극(unipolar excitation)으로 여자되며 고정자의 어느 일정 위치에 센서를 부착하여 이 센서에 의해 검출된 회전자의 위치 정보에 따라 집중권으로 감겨진 고정자 각상의 여자권선에 순차적으로 전류가 도통되므로서 회전자는 동기속도로 회전하게 된다.

즉 회전자가 그림 3.1과 같은 위치에 있을 때 고정자 권선 전류가 흐르면 자기회로에 인덕턴스가 과도적으로 증가하게 되므로 회전자는 인덕턴스가 최대인 위치로 회전하게 되는 것이다.

3.3 SRM의 구조

SR 전동기의 구조에는 여자권선이 있으나 회전자에는 권선이 없을 뿐 아니라 브러시는 없는 상태로 성층철심으로 되어 있고, 이것은 비자성체로

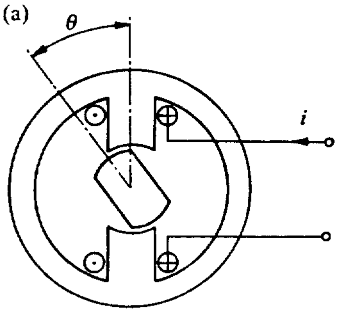


그림 3-1 2극돌극기의 구성

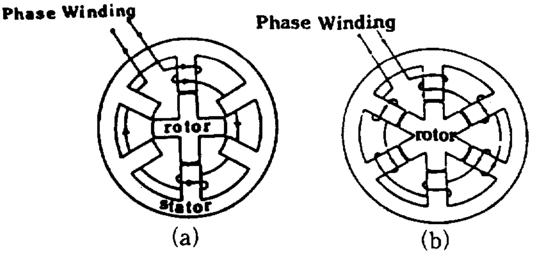


그림 3-2 (a) 다중적(multistack) SR전동기의 구성도
(b) 단중적(single stack)

된 축에 고정되어 있다. 고정자와 회전자의 극수는 그림 3.2(a)와 같은 다중적(multi stack)인 경우로 6/4극과 8/6극이 보통이고 10/8, 12/10극을 가진 전동기도 있다. 고정자의 권선은 집중권으로 되어 있고, 고정자 극의 권선은 서로 대각선으로 마주보는 극에 서로 반대 방향으로 직렬로 연결되어 있으므로 전류가 흐르면 항상 2극(N, S) 자계가 형성되도록 구성된다. 그림 3.2(b)는 단중적(single stack)인 경우로 여기서는 그림 3.2(a)의 다중적(multi stack)인 형태에 대하여 서술하기로 한다.

고정자 권선의 형태로 인하여 상과 상사이에 존

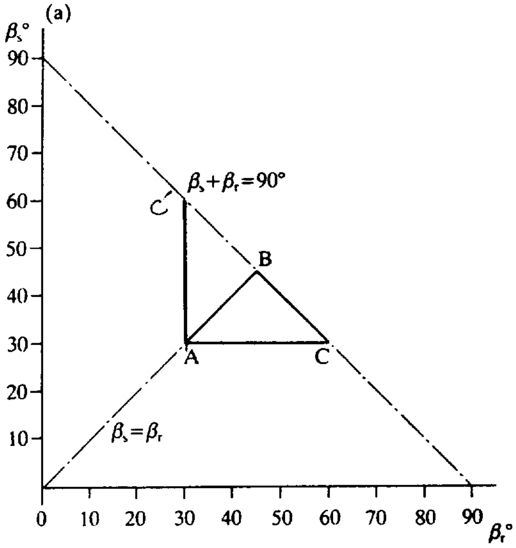


그림 3-3 회전자와 고정자 극호 크기에 대한 제약조건

재하는 상호 인덕턴스는 거의 무시할 수 있는 정도로서 기계의 출력을 극대화 시키려는 관점에서는 매우 바람직한 현상이다.

한편 고정자 극간격 사이의 중간점에 회전자의 위치를 검출할 수 있는 홀(Hall) 소자로된 센서가 부착되어 있다. 콘버터회로는 이 센서로부터 검출된 신호가 콘버터회로에 전달되므로서 회전자가 동기속도로 회전할 수 있도록 고정자 권선에 순차적으로 여자 전류를 공급하게 된다.

아울러 이 센서는 회전자의 회전방향을 일정하게 할뿐 아니라 회전력의 리플을 줄이는 역활도 한다.

또한 회전자 극호와 고정자 극호에 대한 중심각의 상호관계는

$$\beta r+\beta \leq \frac{2\pi}{Nr} \qquad (3.1)$$

(β_r : 회전자 극호/회전자 극피치, β_s : 고정자 극호/고정자 극피치)의 관계가 성립하므로 β_{smax}와 β_{rmax}의 한계치는 그림 3.3과 같이 ΔAC′C안에 있어야 한다. $\overline{AB}$ 선상에서는 $\beta_s=\beta_r$이기 때문에

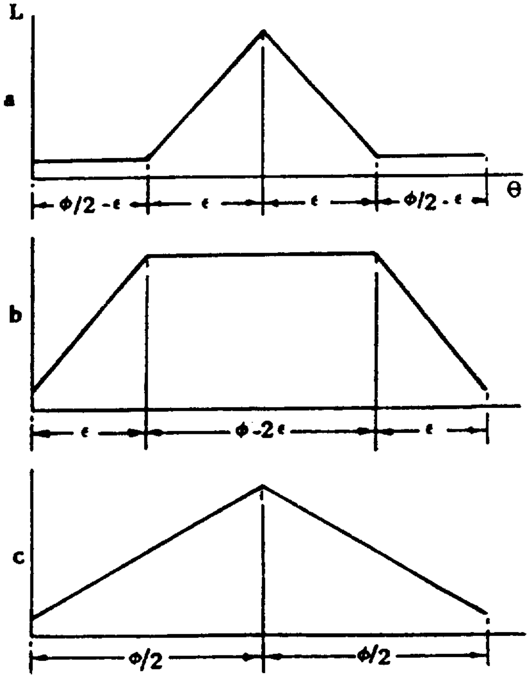


그림 3-4 AC′C점에 있어서의 인덕턴스 변화도

그림 3.4(a)와 같이 인덕턴스의 dead zone이 없으나 β_s와 β_r가 최소값이므로 인덕턴스의 최소치를 갖는 구간이 길어진다. A점이 C′나 C축방향으로 이동하면 β_s와 β_r의 차이가 커지므로 β_s와 β_r가 겹치는 구간이 길어져 그림 3.4(b)와 같이 인덕턴스의 dead zone이 생기게 되나 C점에서는 β_r가 최대이고 β_s가 최소치를 갖게 되므로 고정자에 권선을 감을 공간이 최대로 넓어지게되므로 인덕턴스의 dead zone이 커져 회전력의 리플이 증가할 수 있다.

반대로 C′점에서는 고정자 권선을 감을 수 있는 공간이 없어지게 되어 기계제작이 불가능하게 되므로 β_s와 β_r과의 관계는 일반적으로 대량생산이나 기계의 특성을 고려하여 ΔABC범위내인 $\beta_s<\beta_r$값을 택한다.

3.4. SRM의 구동

회전자 위치 센서로 검출된 동기 신호에 의해 고정자 권선이 여자되므로서 대각선상에 있는 한쌍의 고정자 극사이의 자기저항은 회전자가 고정자축과 일치하는 방향으로 움직일 때 자기저항은 감소하므로 최소릴럭턴스가 되는 방향으로 회전력이 발생하게 된다. 이때 인덕턴스는 자기저항에 반비례하기 때문에 회전자가 고정자축과 일치할 때 최대이고 완전히 어긋나 있을 때는 최소가 된다. 그림 3.5에서와 같이 구동용 콘버터 회로에서 공급된 구형파 전류가 자기회로의 인덕턴스를 증가시킬 때는 정방향의 회전력이 발생하고 회전자극과 고정자극이 겹쳐져있는 동안에는 인덕턴스의 변화가 없는 dead zone으로 회전력 발생은 거의 없게 된다.

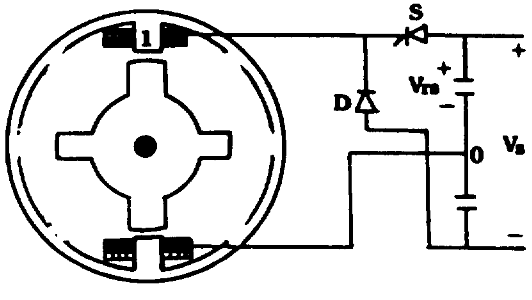


그림 3-5 1상당 1개의 스위칭 구동회로를 가진 SR전동기

회전자극단(pole end)이 고정자극단을 지나게 되면 인덕턴스의 감소가 생기고 이때는 부방향의 회전력이 발생하게 되므로 전류를 차단하여야 한다. 즉 회전자극이 고정자극의 일정위치에 접근 할 때 고정자권선이 여자 되어야 하고 회전자와 고정자극의 중심축이 일치하기 직전에 콘버터 회로의 전류는 턴오프 되면서 다음 상권선의 전류가 턴온된다. 이때 회전자 주기의 각은 $\theta_r=2\pi/N_S$이므로 1회전당 12번의 전류 펄스를 공급하여야 한다. 이와 같은 과정이 반복되므로서 연속적인 운전이 가능하다.

주어진 속도에서 전류의 입력 pulse는 그림 3.6과 같이 인덕턴스가 증가하는 유효영역(motoring 구간)에서는 정방향 회전력을 발생하고 인덕턴스가 감소하는 영역(generating 구간)에서는 부방향의 회전력을 발생하므로 일정한 전압원에서 전류와 회전력은 스위칭 회로의 도통각과 도통기간에 의존한다.

그러므로 평균회전력은 전류의 크기와 콘버터 스위칭 각의 함수관계를 갖게되어 일정한 전압과 일정한 스위칭 각에서 SR 전동기의 토크-속도특성은 직류 직권전동기와 유사한

$$T_{ave}=\frac{K}{\omega_m^2}$$

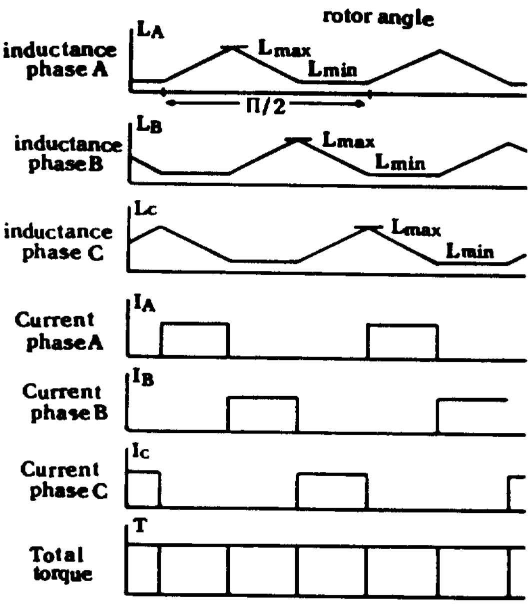


그림 3-6 6/4 SR 전동기의 인덕턴스파형

의 특성을 갖는다.

여기서 ω_m은 기계 각속도이고 k는 전기자 입력에 비례하는 값이다.

3.5. SRM의 최근 연구동향

현대 산업 사회가 점진적으로 자동화 추세이고 반도체 분야의 급진적인 발달로 인하여 지난 15년간 소형 전동기에 대한 연구 개발이 활발히 진행되어 왔으며, 특히 최근에 SR 전동기의 설계, 특성, 제어및 응용에 많은 관심이 집중되고 있다. 이와 같은 현상은 SR 전동기의 구조가 간단하고 견고하며 전력밀도가 크고, 또 간단한 전자제어 회로로도 구동과 제어가 용이하기 때문이다. SR 전동기의 구조적인 면을 살펴보면 고정자극에는 일반 직류전동기와 같이 집중권을 시행하지만 회전자 성층철심에는 권선이 감겨있지 않기 때문에 브러시와 기계적 정류자가 없어 구조가 간단하여 전동기의 크기가 작아지므로 무게가 가벼워 진다. 따라서 대량생산시 가격이 저렴하게 될 뿐아니라 고장률이 적어 신뢰도가 높고 보수의 감소로 우지비가 적게 드는 장점을 갖고 있다.

일반적으로 전동기는 공급전압의 변동에도 불구하고 일정한 속도가 필요한 경우가 많이 있다. 유도전동기는 견고하지만 정속도 운전이 어려운 반면 동기전동기는 일정속도를 유지하지만 여자전원을

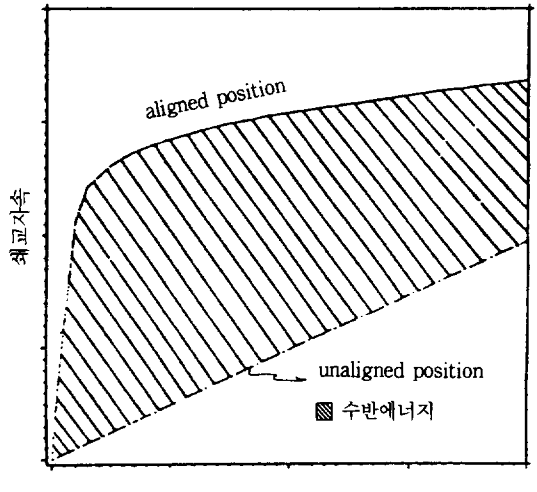


그림 3-7 회전자의 특정위치에서의 쇄교자속과 수반에너지

위하여 슬립링과 브러시와 같은 복잡한 구조를 필요로 한다.

SR 전동기는 이와 같은 유도전동기와 동기전동기의 단점을 없애고 이들의 장점인 견고성과 정속도 특성을 가지고 있으므로 전기시계와 축음기에서부터 기계공구의 정밀 제어, 방적, 유리, 섬유, 펄프, 종이산업에 이르기까지 광범위하게 사용되고 있다.

SR 전동기의 용도가 이렇게 다양한 것은 다음에 열거한 몇가지 장점이 크게 작용하기 때문이다.

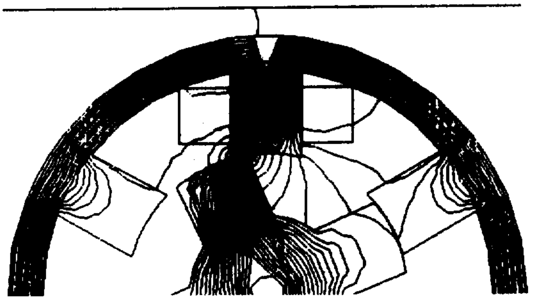
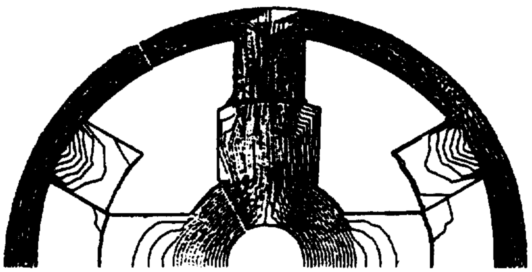
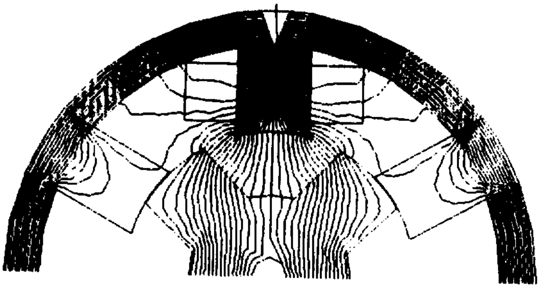


그림 3-8 회전자와 고정자 극단에서의 자속분포



(a)



(b)

그림 3-9 회전자 a) 직축인 경우와
b) 횡축인 경우의 자속분포도

1) SR 전동기는 고정자와 고정자 사이의 슬롯이 넓어 적층이 쉽고 회전자 권선이 없어 대량생산이 용이하여 생산비가 저렴하게 든다.
2) 회전자에 권선이 없으므로 회전자에는 최소한의 열만이 발생하므로 전동기를 냉각시킬 때 여타 전동기에 비해 유리하다.
3) 구동시 단극여자(unipolar excitation)만 필요로 하기 때문에 인버터회로의 구성상 간단할 뿐 아니라 인버터 생산비도 적게 든다.

지금까지 SR 전동기의 효율적 운용을 위한 인버터 회로의 개발을 비롯하여 회전자 모양의 기하학적 변형등 특성개선에 많은 효율을 경주하여 왔으나 앞으로의 연구주체의 흐름은

1) 기계설계와 구조(machine design and structure)
2) 컨버터(converter) 설계
3) 제어장치(control device) 설계

에 관한 것으로 관심이 모아지고 있다.

3.6. SRM의 특성

SR 전동기의 순간 특성이나 정상상태의 운전 특성은 회전자 위치에 따른 수반에너지 변화에 영향을 받으므로 이를 예측하기 위하여는 쇄교자속을 여자 전류와 회전자의 위치함수로 표현해야 한다. 그러나 회전자의 위치가 이동함과 동시에 쇄교자속과 수반에너지는 철심의 자기포화로 인하여 비선형으로 변화하므로 회전자가 고정자와 겹치기(overlap)시작하면 인덕턴스는 여자전류의 함수가 된다.

변위전류를 무시할 수 있는 준정상상태에서 전류밀도 J와 자계의 세기 H와의 사이에는

$$\nabla \times H = J \tag{3.3}$$

인 관계가 있으며 자계의 세기 H와 자속밀도 B와의 사이에는

$$H = \gamma B = (1/u)B \tag{3.4}$$

가 성립한다. 여기서 u는 투자율이며 γ는 자기저항의 역수이다. 또한 자속밀도는 연속적 성질을 가졌으므로

$$\nabla \times B = 0 \tag{3.5}$$

임을 알 수 있다.

또 $\nabla\times(\nabla\times A)=0$ (3.6)

식(3.6)에서

$$B=\nabla\times A \quad (3.7)$$

를 얻을 수 있고

$$A=(u/4\pi)\int\int\int (J/R)dv \quad (3.8)$$

식을 얻게 된다.(A는 벡터 포텐셜이다)
그러므로 식(3.8)로 부터

$$\frac{\partial}{\partial x}[\gamma\frac{\partial A}{\partial x}]+\frac{\partial}{\partial x}[\gamma\frac{\partial A}{\partial y}]=-Jz \quad (3.9)$$

인 비선형 poisson의 방정식을 얻을 수 있다.

식(3.9)를 활용하여 벡터 포텐셜 A를 구하므로서 SR전동기의 자속을 결정할 수 있다.

그림 3.8은 회전자가 직축인 위치와 횡축인 위치 사이의 상당 수반에너지 변화를 나타낸 것이다.

pole arc /pole pitch의 비를 최적치에 놓고 회전자축과 고정자축이 일치된 직축인 위치와 일치되지 않은 횡축인 위치에서의 쇄교자속 분포를 유한요소법으로 구하면 다음 그림 3.9와 같다. 또한 전류특성을 고려하여 β값의 변화에 따른 수반에너지 면적의 변화량을 수치적분으로 계산하므로서 평균회전력을 산출할 수 있다.

3.7. 앞으로의 발전전망

SR전동기는 가변속 운전을 목적으로 하고 특수한 형태의 전동기를 필요로 하는 곳에서 상당히 각광을 받고 있다. 그것은 SR전동기의 회전자에 권선이 없는 특성 때문에 용도에 따라 특정한 모양으로 설계가 용이하기 때문이다.

현재 이 전동기의 용도로는 영국의 Leeds대학에서 개발한 사무실이나 가정용 Ceiling fan을 비롯하여 가정용 환풍기, 펌프등 다양하고 특히 영국 및 유럽국가 일부와 북미국가중 캐나다와 미국에서 추진하고 있는 전기차 추진기(EVP)의 동력원으로서 이미 시험 단계를 넘어 섰으며 재래식 전기구동방식에 비해 전기적인 면이나 기계적인 면에서 경쟁력이 있는 소형 여객용 전기차 개발에 필요한 구동용으로 최대 축속도 1600[rpm]이하 출력 10~60[kw] 전원전압 DC 240[V] 중량 70[kg]이하의 제품이 거의 완성 단계에 와 있다.

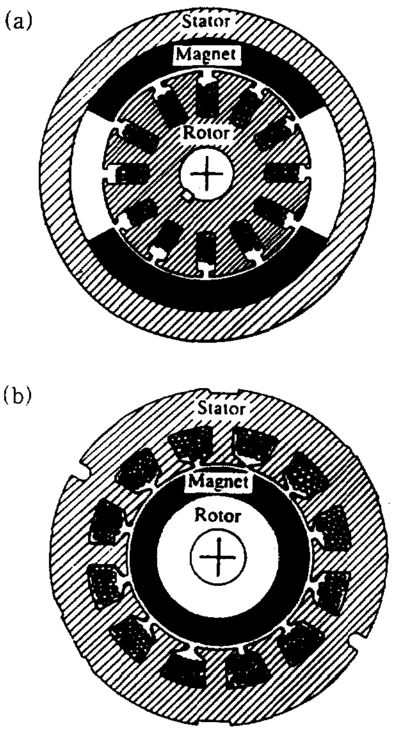


그림 4-1. (a) PM d.c. 정류자 전동기와
(b) 브러시레스 d.c. 전동기의 구조

앞으로 자기 특성에 관한 포화효과가 완전히 모델화되지 않았으므로 bulk포화와 함께 부분적인 포화(pole tip부분)에 기본을 두고 설계를 해야 하겠지만 가장 중요한 설계변수는 회전자와 고정자의 극피치에 대한 비(β)이며 가끔 무시되기 쉬운 슬롯에서의 누설과 단부효과 등을 고려한 기술축적이 이루어지면 disk Type 릴럭턴스 전동기를 비롯한 리니어 릴럭턴스 전동기 제작에도 상당한 발전이 있을 것으로 전망된다.

4. PM Motor (Permanent Magnet Motor)

산업용기기의 구동용으로 공작기계나 로보트, VTR등 정밀 속응제어를 목적으로 하는 운전용으로 구조적인 면에서 보수유지가 유리한 브러시레스 전동기가 많이 쓰이고 있는 추세이다. 브러시레스 전동기는 크게 영구자석 동기전동기(Permant

magnetic Synchronous Motor : PMSM), 브러시레스 직류전동기(Brushless Direct Current Motor : BDCM), 유도전동기(Induction Motor : IM), 릴럭턴스 전동기(reluctance Motor : RM) 등 여러 가지가 있다.

영구자석형 전동기는 IM에 비해 소형이고, 저관성, 고효율인 장점을 가지고 있는데에다 근년에 영구자석 재질의 개발과 더불어 서보 운전용으로 크게 두각을 나타내고 있다.

그림 4.1은 영구자석을 이용한 전동기의 구조를 나타낸 것으로 그림 4.1(a)의 경우는 직류기로서 영구자석이 외부 고정자가 되어 영구자석의 자속이 계철(YOKE)로 집중될 수 있기 때문에 저급 자석을 사용할 수 있는 장점을 가지고 있으나 체적이 커지므로서 중량이 증가한다. 그러나 브러시레스 구조인 회전자계형에서는 영구자석을 회전자에 고정시키고 고정자가 전기자가 되므로서 자석의 체적이 감소하여 중량이 작아지고 전기가 슬롯 면적이 넓어져 전기장하를 크게 할 수 있다. 또한 전기자가 외부에 있어 냉각측면에서도 유리하다.

4.1 영구자석 동기전동기의 구조

PMSM은 위치결정 제어용의 서보 전동기로 NC 공작 기계나 Robot에 사용토록 개발되었다. 이 전동기는 고분해능의 위치센서(sensor)가 필요하고 전원 투입시 전동기의 초기 위치를 결정하는 적당한 방법이 없다는 것이 결점이기도 하다. 그러나 일반적으로 고정도, 고분해능이 있어 서보 시스템에서 자주 이용되고 있다.

이 PMSM은 회전자의 자석 취부 방법에 따라 그림 4.2와 같이 SPMSM(Surpace PMSM)과 IPMSM(Interior PMSM)으로 나누어지는데 SPMSM은 영구자석을 회전자 표면에 접합시킨 형태로 직축 인덕턴스인 L_d와 횡축인덕턴스인 L_q가 동일하기 때문에 특정 조건에 따라서 최대 토크비운전이 가능하고 일정 속도 토오크에서 동손을 가장 적게하는 운전 특성이 있다. 단점으로는 기계적 구조가 약하다는 것이다.

한편 IPMSM은 자석을 회전자 내부에 삽입하는 구조를 가진 것으로서 L_q가 L_d보다 2~3배 큰 특성을 갖는다.

또 SPMSM에 비해 운전 범위가 넓고 기계적 내

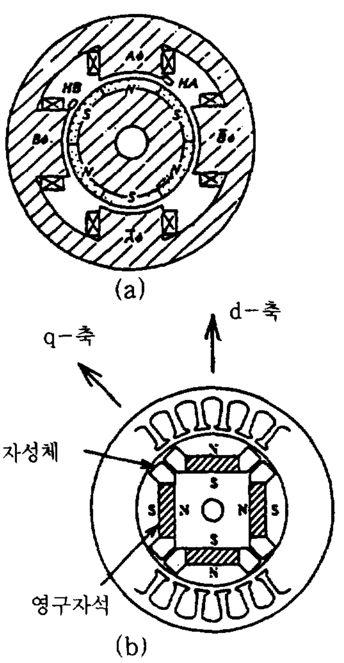


그림 4-2. (a) SPMSM과 (b) IPMSM의 단면도

구성이 크며 공극이 작고 감자내력이 크다. 따라서 동일 SPMSM보다 부피가 작으므로 경제적 설계가 가능하여 회전력/관성비를 크게 할 수 있다.

또한 기계적 구조가 강하여 SPMSM에 비해 고속 운전이 가능하며, 동손이 최소가 되는 운전점에서 최대 회전력 운전이 가능하다.

4.2 회전력 발생원리

그림 4.3은 2극 전동기의 모델을 나타낸 것으로 영구자석을 최적인 형상이 되도록 하고 공극 자속밀도를 정현파 분포로 하였을 때 회전력은 다음과 같이 표현된다.

$$Tm = Ki_u \times \phi Sin\theta r + i_v \times \phi Sin(\theta r - \frac{2\pi}{3}) + i_w \times \phi Sin(\theta r - \frac{4\pi}{3}) \qquad (4.1)$$

여기서 K는 상수, i_u, i_v, i_w : u, v, w상의 상전류.

ϕ : 유효 쇄교자속 θ_r : 회전자 자극위치

회전자의 자극 위치를 위치 센서를 사용하여, 정현파 3상 전기자 전류가 만든 자속이 자계의 자속과 직교하도록 전류의 위상을 제어하여 높은 역률

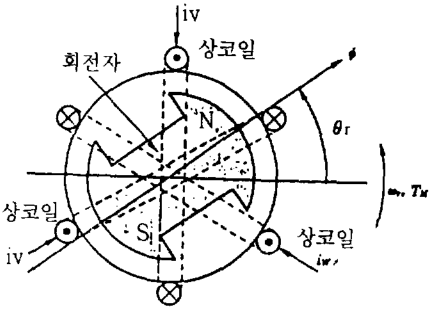


그림 4-3. 2극 PM전동기의 모델

과 효율로 전동기를 구동할 수 있다.

$$i_u = I_a \, Sin\theta_r$$

$$i_v = I_a \, Sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \quad (4.2)$$

$$i_w = I_a \, Sin(\theta_r \frac{4\pi}{3})$$

식(4.2)를 식(4.1)에 대입하면

$$T_m = 3/2 \times k \times I_a \times \phi \quad (4.3)$$

로 되어 전동기의 회전 위치에 관계없이 회전력이 전류 I_a와 자속 ϕ의 곱에 비례하는 일정한 값을 얻게 되기 때문에 전류의 크기에 의해 회전력을 조정할 수 있다.

4.3 전동기의 설계

영구자석의 자기 특성과 전동기 특성간에는 밀접한 관계가 있지만 여기서는 기본적인 방향에 대해

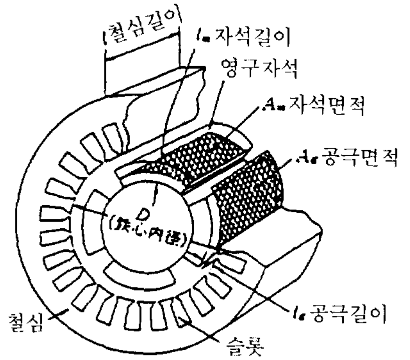


그림 4-4. 영구자석 전동기의 개략도

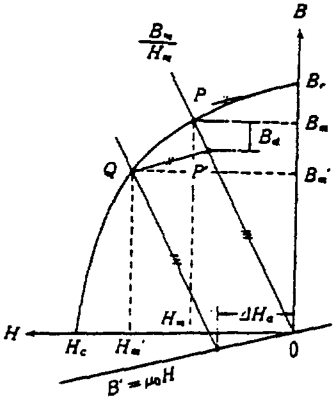


그림 4-5. 영구자석의 동작점

서만 서술하고자 한다.

다음 그림 4.4는 AC서보 전동기인 SPMSM의 개략도를 나타낸 것으로 그림 4.5와 같은 감자 특성을 가진 영구자석이 회전자측에 취부되어있다. 이 영구자석에는 자기회로의 촌수와 형상에 따라 결정되는 감자자계와 전기자 전류에 의해 발생된 감자자계가 함께 존재하므로 이것을 고려하여 운전중의 동작점을 구해야 한다.

그림 4.5의 P점을 영구자석의 감자자계에 의한 동작점이라하면 이때의 자계는 H_m, 자속밀도는 B_m이 되고 누설자속과 철심등을 고려한 계수를 k_1이라 하면 자기회로의 ohm의 법칙으로 부터

$$\frac{B_m}{H_m} = K_1 (\frac{H_g}{A_m})(\frac{l_m}{l_g}) \quad (4.4)$$

의 관계를 얻는다.

전기자 전류에 의한 감자자계는 전기자 반작용이므로 이것을 고려한 동작점은 전기자 반작용 감자자계를 ΔH_a라 할 때 그림 4.5에서 Q점에 해당한다. 우전이 QP′ 선상에서 이루어진다면 그림 4.5에서 보여준 예는 처음의 감자곡선보다 B_d만큼 감소하게 된다.

한편 영구자석의 체적은

$$V_m = K_1 (\frac{B_g^2 V_g}{B_m H_m}) \quad (4.5)$$

식(4.5)에서 (BH)의 값을 최대로 하면 자석의 체적 V_m을 최소화 할 수 있음을 알 수 있다. 또한 전

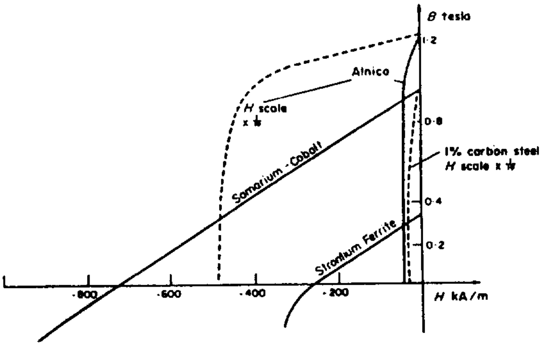


그림 4-6. 대표적인 자석의 감자곡선

동기의 회전력 T와 각종 설계 정수와의 관계는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T=K(a\ c)\ B_g D^2_\ell \qquad (4.6)$$

여기서 K는 상수이며 B_g는 자기비장하이다. (ac)는 전기비장하이고 이것은 전기자 전류와 코일권 횟수와의 곱을 전기자 철심 원주의 단위 길이당 값으로 나타낸 것이다. 이(ac)는 반작용에 비례하며 $\Delta H_a \infty (ac)$의 관계가 있기 때문에 영구자석의 감자특성도 고려하여 결정할 필요가 있다.

식(4.6)에서 B_g와 (ac)를 크게하므로서 철심 체적에 상당하는 D^2_ℓ을 작게 할 수 있다. 일반적으로 영구자석 전동기의 설계는 이 자석이 갖고 있는 자기 에너지를 최대로 이용하는 것이 목적이다.

그래서 처음의 운전 동작점을 (BH)값이 최대값이 되도록 자기회로의 형상과 촌수등을 결정하는 것이다. 그 다음 주어진 조건에 대하여 자석체적 V_m과 철심체적 $D_2\ell$이 최소가 되도록 수정하여 최종의 형상과 촌수를 결정한다. 따라서 $(BH)_{max}$가 매우 큰 희토류 자석을 이용하면 소형경량화나 회전력 특성에 매우 효과적일 수 있다. 더욱이 희토류 자석인 경우 그림 4.6과 같은 직선감자 특성 때문에 그림 4.5의 B_d에 상당하는 감자가 거의 없다. 이때문에 착자나, 단락등의 과도현상에 대하여 보다 안정한 특성을 얻을 수 있다. 그러므로 (BH)값이 최대가 되도록 하면 기기를 소형화 시킬 수 있어 관성이 작아야 하는 고응답계에 사용할 경우 제어 성능을 향상시킬 수 있는 등의 잇점이 있다.

4.4 PM 전동기의 개발동향

고성능 영구자석을 응용하여 대출력화와 소형화를 이룩한 최근의 예를 들어보고자 한다.

4.4.1 PM 전동기의 대출력화

전동기나 발전기의 출력은 회전력과 회전속도의 곱에 비례하여 증가하게 되고 회전력은 식(4.6)으로 부터 철심의 체적$D^2\ell$에 거의 비례하기 때문에 전동기의 출력을 크게하려면 고속회전하는 전동기를 제작하는 편이 회전력을 크게 하는 것보다 효과적이다.

일반적으로 고속회전기는 원심력에 견딜 수 있도록 영구자석의 외경을 비자성체인 강철링등으로 지지하고 있다. 이 부분이 식(4.4)에서 공극길이 ℓ_g의 일부가 되므로 고속 대출력화로 될수록 주변 속도와 영구자석의 중량도 증가하기 때문에 강철링이 두껍게 되어 자속밀도가 크게 저하하게 된다. 따라서 고속 대출력화가 되기 위해서는 보자력과 $(BH)_{mzx}$값이 우수한 희토류 자석을 이용하여 제작하여야 한다. 현재 개발된 예로서 출력이 종래의 10배 이상되는 1000Kw 1500[rpm]의 동기 전동기가 있다.

또한 축방향 공극형(Axial air gap type)인 초고속 전동기도 개발되어져 있으며 회전력을 대형화한 예로서는 독일 지멘스사에서 제작한 선박의 스크류 구동용 동기전동기(1095Kw−230rpm)로서 45[KN.M]의 출력을 낼 수 있을 뿐 아니라 크기도 종래의 직류기에 비하여 1/2정도로 어느 정도 소형화를 이룩하였다.

4.4.2 PM 전동기의 소형화

전동기의 소형화는 영구자석의 자기 특성과 함께 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 NdFeB계의 자석을 이용하므로서 이미 소형 경량화나 저관성의 특징을 가진 고성능의 서보 전동기등을 개발하여 폭넓게 사용하고 있다.

이미 개발되어 사용되고 있는 것은 의료계등에서 마이크로 기기용에 알맞은 직경 수 ㎜이하의 초소형 전동기가 있으며 앞으로 점차 소형경량화화 되어 가고 있는 추세이다.

또한 과학문명의 발전에 대한 역작용으로 나타난

심각한 환경오염 문제를 해결하기 위한 수단으로 무공해 운송수단인 전기 자동차나 태양열자동차의 개발이 필수적인데 지금 이를 구동시키기 위한 전동기의 개발이 진행되고 있으며 이것은 특히 소형 경량화와 동시에 고효율 특성이 요구되므로 앞으로 엄격한 주행조건에 대한 고온 특성을 철저히 검토하여 S_m-C_o계나 N_d-Fe-B계 자석을 활용하는 연구가 필요하다고 하겠다.

영구자석의 자기 특성이나 기계적 특성이 진보함에 따라 이것을 응용한 전동기도 소형화나 대출력화가 실현되어 이 결과 응용범위가 대폭적으로 넓어지고 또 성능도 대폭 향상되었다. 이와 같은 발전

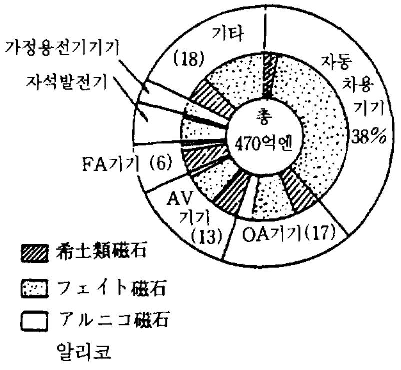


그림 4-7. 회전기기의 용도별 구성

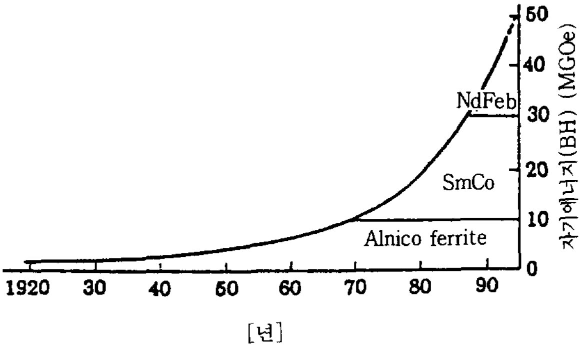


그림 4-8. 영구자석의 연도별 발전현황

은 영구자석재료는 물론 그 주변 기술인 해석 기술이나 제어 기술의 진보로 인한 것으로 생각된다.

앞으로 성능이 우수한 영구자석을 이용한 전동기능의 다양한 전기기들이 더욱 발전할 것으로 기대가 된다.

4.5 최근 영구자석의 개발동향

지난 10년간에 걸친 자석의 발전으로 자석의 에너지가 약 2배로 증가하여 현재에는 45[MGOe]의 NdFeB자석이 시제품으로 출하되고 있다. 일반적으로 정상적인 환경에서는 NdFeB(Neodymium) 자석이 주로 사용되고 고온 다습하고 방사선이 상존하는 등의 특수한 환경에서는 SmCo(Cobalt magnet) 자석이 사용된다. NdFeB자석은 고에너지를 가지고 있을 뿐 아니라 100℃ 이상에서도 고온특성이 좋고 보자력이 큰 자석으로서 현재도 더욱 특성이 좋은 제품개발이 계속되고 있다.

위의 희토류자석은 소결 자석이지만 수지로 성현된 고에너지의 본드자석도 연구개발 단계에 있으며, 이제품의 특징은 두께가 극히 얇고 복잡한 형상의 제품제조가 용이하며 충격적 응력에도 강한 특성이 있다. 대표적인 것으로는 SmFeN자석이 있는데 이것이 실용화되면 30[MGOe]정도의 본드자석 제작이 가능하다.

최근 또다른 새로운 자석으로 PrFBCu자석이 있는데 이 자석의 에너지는 비록 30[MGOe]이지만 주조 및 압연제조가 가능하기 때문에 대량생산효과는 매우 클 것으로 예상된다.

이들을 응용한 것으로는, AV(Audio visual)기기나 OA(office automation) 기기류, 자동차의 소형전동기등 다수의 영구자석을 이용한 전기기기들이 있고, 1인당 사용하고 있는 것만도 수십 개에 달한다고 볼 수 있으며 최근에 네오미디움(Nd) 희토류자석이 시장에 나온 1984년 이후 그 동안 생산량이 많았던 Ferrite 자석 생산량은 거의 보합상태이나 Alnico 자석은 작년 년평균 10%를 넘는 높은 신장을 가져 왔다.

이중에서 Nd계 자석은 1990년에 Samarium (Sm)계 자석의 생산량을 추월하는등 높은 성장율을 보였다. 이들의 작년도 생산 구성비를 시장 점유율과 용도별로 보면 그림 4.7과 같이 회전기기용이 거의 반수 정도를 점하고 있고 OA, FA(Factory

automation), AV기기류를 중심으로 희토류 자석이 많이 사용되고 있음을 알 수 있다.

이것은 OA기기의 보급및 산업용 로보트의 신장과 함께 소형화나 대회전력의 요구가 높아진 결과로서 희토류자석을 이용한 소형 전동기의 수요가 증대했기 때문이다.

다음 그림 4.8은 영구자석이 발전된 년도별 과정을 나타낸 것이다.

4.6 앞으로의 발전전망

영구자석의 성능향상으로 보자력이 크게 되어 내감자특성이 향상되고 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)소자가 실용화되어 인버터의 대용량화가 가능하게 되었다. 이에 따라 영구자석 전동기는 대출력화가 가능하게 되었고 이에 대한 연구개발도 진행되고 있다.

80년대에는 공작기계용 100W~5KW의 서보 전동기가 중심이 되어 개발되었으나, 90년 전후에는 저속(60~300rpm) 대회전력 전동기와 최고속도 10000~30000[rpm]인 대출력 전동기의 축소 모델이 개발되어 2000년에는 실용화될 수 있도록 계획단계에 있다. 앞으로 수백[KW] 이상의 대출력 전동기를 비롯하여 특수기능을 가진 전동기등 새로운 형태의 전동기 개발이 연구되어 점차 부가가치가 높은 제품으로 광범위하게 보급될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] Kenjo.T., Electric motors and their controls, OXFORD UNIVERSITY PRESS. 1991.

[2] J.Hindmarsh, Electrical machines and their applications. PERGAMON PRESS. 1984.

[3] 和人. 伊藤 聲, 最近の 永久磁石回轉機, (株)東芝 重電技術研究所, 1993. 3.

[4] 長坡長彦, 制御用小形電動機, 電學誌, 110卷3號, 平成2年.

[5] 金東浩, 精密小形 모우터의 基礎와 應用, 韓信文化社, 1987.

[6] T.J.E.MILLER, Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motors Drives, OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS, 1989.

[7] Lawrenson, P. J. and Agu, L.A.(1964). Theory and performance of polyphase reluctance machines. *Proceedings IEE*, 111, pp. 1435-45.

[8] Lawrenson, P.J. and Bowes, S.R.(1971). Stability of reluctance machines. *Proceedings IEE*, 118, pp. 356-69.

[9] Lawrenson, P.J., Stephenson, J.M., Blenkinsop, P.T., Corda, J., and Fulton, N. N.(1980). Variable-speed switched reluctance motors. *Proceedings IEE*, 127, Pt. B, pp. 253-65.(See also Discussion, ibid., pp. 260-8.)

[10] Richardson, K. M. and Spooner, E. (1987). magnetization procedures for Nd-Fe-Bmagnets in electrical machines. In *IEE Conference Publication No. 282, Electrical Machines and Drives*, pp. 250-64.

[11] Stephenson, J. M. and Corda, J.(1979). Computation of torque and current in doubly salient reluctance motors from nonlinear magnetization data. *Proceedings IEE*, 126, pp. 393-6.

[12] Hoang Le-Huy, Philippe Viarouge, "A novel unipolar converter for swithed Reluctance Motor", IEEE. Trans., on power Electronics, Vol.5, No.4, Oct. 1990.

[13] J.T.Bass, M.Ehsani, T.J.E. miller and L.Steigerwald, "Development of pment of Unipolar Component for Variable Reluctance Motor Drives", IEEE Transaction on Industry Application, Chicago, pp. 1062-1068, Oct. 1984.

[14] R.Krishnan and P.Materu, Measurement and Instrumentation of the switched reluctance motor", IEEE-IAS Annual Meeting, San-Dicgo, Oct. 1989.

[15] S.K.Gupta, B.E, "Developments in the performance and theory of segmental rotor reluctnace motors", proc. IEE., Vol.

114, No.5, pp.645-656, 1967
[16] M.Moallem, Student Member, "Predicting the torque of a switched Reluctance Machine from its finite element field solution", IEEE. Trans.on Energy conversion, Vol.5, No.4, 1990.

이민명(李敏明)
1943년 4월 11일생. 1971년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 대전산업대 전기공학과 부교수.