

# 릴럭턴스 토오크 動力의 開發動向

황영문

(부산대학교 공대 전기공학과 교수)

## 1. 릴럭턴스 토오크 동력변환 시스템의 개발배경

Reluctance torque 는 회전자계전동기의 mutual torque 와 함께 자기재료를 매개체로 하는 동력변환시스템에서 나타나는 토오크발생의 하나이다. 이러한 릴럭턴스 토오크는 19세기 중반 전동력을 개발할 때부터 있어 왔던 고정자 혹은 회전자의 한쪽에서만 전자계여자를 하는 기구에서는 뚜렷하게 나타나는 토오크로서 그 활용은 그 때부터 현재까지 주로 분수 마력에서만 이루어져 왔다.

한편 뮤어츄얼 토오크는 고정자 및 회전자의 양쪽에 전자계여자를 하였을 때 나타나는 토오크로서 이들은 그 동안 Sinusoidal 파형으로 형성되는 회전자계이론의 개발과 함께 효과적인 동력변환기로 활용되어 왔으며 현존하는 중대형의 발전기 및 전동기와 같이 연속정격이고, 고효율, 다기능의 최적화된 동력변환기로서 동력변환기의 전력화를 촉진시켰으며 동시에 전기기기산업을 비약적으로 발전시킨 계기가 되었다.

반면에 릴럭턴스 토오크는 Sinusoidal 전원으로서는 회전자계 형성이 어렵고, 한편으로 뮤어츄얼토오크와 함께 에너지변환을 할 때는 변환각변위가 달라 맥동토오크로 작용함으로써, 발전기 및 전동기의 설계제작시 이를 극력 억제하는 설계제작이 행하여졌다.

그리하여 릴럭턴스 토오크의 활용은 actuator나 소형분수 마력 전동기의 동력변환으로만 활용되어 왔다. 그리고 동기 발전기 및 동기전동기에서는 동기화탈조를 억제하는 동기화력으로, 소형 동기전동기에서는 기동보상용 토오크로만 활용되어 왔다.

1960대에 와서 반도체 소자의 개발로 전력용 스위칭소자가 실용화 됨에 따라 Pulse 파형의 전력용 전원이 손쉽게 만들어졌고, 이들 전원이 고효율화, 고기능화 및 제어기능이 우수함이 입증됨에 따라 가변속운전을 위한 전동력변환 시스템에 적용하게 되었다. 그 대표적인 것으로 PWM전원

에 의한 가변속전동시스템, Field orientation theory에 의한 Vector controlled induction motor 시스템의 실현을 보았으며, Brushless PM motor 등의 활용이 급속도로 이루어지게 되었다.

그러나, 이러한 기술개발과정에서, 펄스형 전원을 Sinusoidal 전원에 최적화된 회전자계의 동력변환기에 적용시킨 결과, 불규칙한 펄스형 고조파전압, 전류에 의해 유발되어 고조파손실, 기계구조에의 스트레스 및 주변기기와의 잡음고조파의 파급등이 일어나게 된다. 이는 전원과 전자계 구조가 상

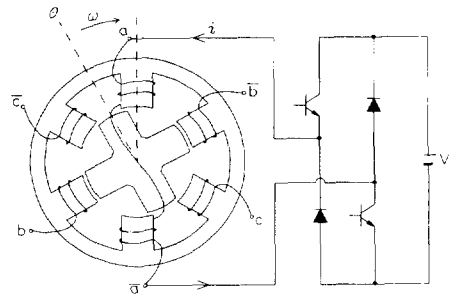


그림 1. Variable reluctance torque drives

호 에너지변환이 효과적으로 이루어지지 않음으로서 생겨나는 문제점이다.

이를 해결하고자 Sinusoidal PWM 전원의 개발, 부하의 자계회로정수에 의존하는 Current source전원의 적용연구가 이루어져 왔으나 실용적인 면에서 성과가 이루어지지 못하여 아직도 그 실용화가 이루어지지 않고 있다. 여기서 전원의 성격에 맞는 전자계구조의 새로운 개발의 필요성이 대두하게 되었다.

1960년대에 출현한 Stepping motor 의 자계구조가 펄스형 전원에 적합한 자계구조임이 입증되었고 그 중 VR 형 Stepping motor 가 펄스형 전원에 적합한 전자계 동력변환 기임이 주목을 받게 되었으며 1970년대말에 전력용 스위칭 소자의 개발로 전력용 펄스형 전원의 실용화 개발의 과정

에 맞추어 VR형 동력변환시스템의 실용화 개발이 이루어지게 되었다.

릴렉턴스 토오크의 동력변환시스템으로는 저속도, 고토오크 출력특성을 갖는 동력용 stepping motor형과 고속도, 고효율 출력특성을 갖는 Switched reluctance motor 및 Synchronous reluctance alternator 에 대한 개발이 현재 활발히 진행되고 있다.

동력용 stepping motor 는 이때까지 제어용으로 사용하고 있던 것을 초저속, 고토오크용으로 개발하여 주로 산업용으로 이용하고 있으며 이는 현재 독일 및 일본을 중심으로 추진하고 있다. SRM드라이브는 3상 6/4극, 4상 8/6극 및 3상 12/8 극으로 step극수를 줄인 가변인덕턴스의 자기구조를 동력화한 것으로 고속 및 초고속에서 고효율특성을 갖는 동력변환기로서 영국의 Leeds 대학에 속했던 SRD Ltd (Switched Reluctance Drivers Ltd) 와 Glasgow 대학에 본부를 둔 SPEED's (Scottish's Power Electronics and Electric Drivers) consortium 이 중심이 된 유럽각국과 GE 등이 중심이 된 미국의 전기기계제작사에서 기술개발이 이루어지고 있으며 주로 가전용 전동력기기에의 활용개발이 추진되고 있다.

## 2. 릴렉턴스 토오크 동력의 효용성개발

### 2.1 SRM드라이브의 기자력특성

그림 1과 같이 고정자와 회전자 salient pole로 이루어져 있고 이때 회전자가 회전하면 인덕턴스는 그림 2와 같이 가변한다. 지금 고정자극에 회전자극이 중첩하기 시작하여 인덕턴스가 증가하기 시작하는 회전자각위치에서 고정자극에 스위칭기자력을 인가하면 토오크가 발생하여 두 극이 align될 때까지 토오크가 발생한다. 그러나, 계속 스위칭기자력을 인가한 상태에서 회전이 계속되면 고정자 및 회전자극이 unalign상태가 됨에 따라 역방향의 회전력이 나타남으로 양극이 align상태 이전에 스위칭기자력을 소호시켜야 함으로 스위칭기자력을 펄스형기자력이 요구된다. 이때의 토오크식은

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

로 스위칭 전류  $i$ 는 일정한 크기를 갖고 릴렉턴스의 변화, 즉 인덕턴스의 회전자에 대한 변화율  $dL(\theta)/d\theta$ 는 일정한 값을 갖게 되면 회전력발생구간에서 일정한 회전력을 갖게 될 것이다.

(A) **Current source SRM** : 그림 1에서와 같이 고정자극과 회전자극의 극수를 다르게하여 a상 고정자극이 회전자와 align 될 때 b상 고정자극이 중첩하기 시작하는 회전자 위치각이 놓이게 되고 여기에 스위칭 기자력을 인가하면 b상 고정자극과 회전자극의 사이에 회전력을 갖게 함

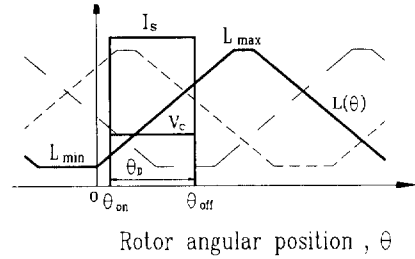


그림 2. Current source SRM drive의 상전류 작용도

으로서 연속적인 회전력을 갖게 될 것이다. 이러한 연속적인 일정 회전력을 얻기 위해서는 그림 2와 같은 구형파의 펄스 전류에 의한 기자력이 요구된다. 즉, 가변릴렉턴스를 갖는 자기구조의 구동용 전원으로서는 펄스형 전류원이 적합하다.

동시에 고정자극과 회전자극이 align하여 회전력을 발생시키기 위하여는 구동용 인버터의 전류신호(commutation signal)를 위한 회전자 위치 검출용 브릿시레스 전자식 전류기구(Electronically Commutation mechanism)가 필요하다.

이때의 토오크값은

$$T = \frac{1}{2} K I_s^2, \quad K \equiv \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} \quad (2)$$

이 되고 속도는

$$\omega_N = \frac{V_c}{K I_s} \quad (3)$$

되며, 그림 3 과 같은 직류기의 직권특성과 유사한 토오크-속도 특성을 갖는다. 여기서는 펄스파의 크기는  $V_c$  전압으로, 펄스파의 폭은 회전자 위치각의 신호에 의한 스위칭 on/off 각으로 조정한다.

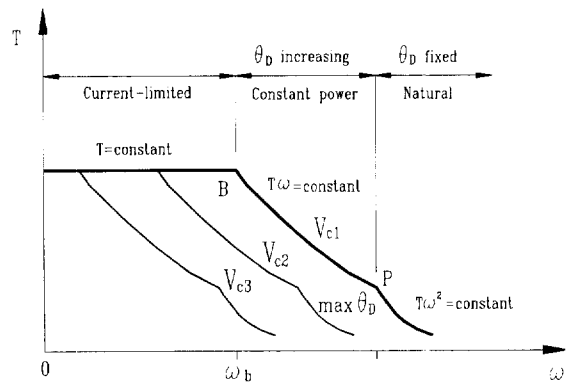


그림 3. CSSRM drive 의 Torque/speed 특성곡선

그러나 이러한 Current source inverter 의 구성은 대단히 복잡하고 동시에 가격이 비싸져서 실용성이 없다.

(B) Voltage source SRM : 현실적으로 펄스형 전원은 직류전원에서 스위칭작용에 의하여 전압형 전원의 생성이 간단하고 쉽게 이루어지므로 실용적이다. 그리하여 Voltage source switching inverter 에 의하여 그림 4와 같이 등가적인 펄스형 전류원의 기자력이 인가되도록 한다. 즉, 토오크 발생 구간( $\theta_o - \theta_m$ )에 앞서  $L_{min}$  구간에서 스위칭동작을 하여 신속한 전류확립을 하게 하고,  $\theta_m$  이후의 역토오크 발생 구간에 앞서 자계구조에 잔여한 기자력에너지를 신속하게 소호시키기 위한 역전스위칭을 행하게 하여 등가적인 펄스형 전류원을 형성하게끔 한다.

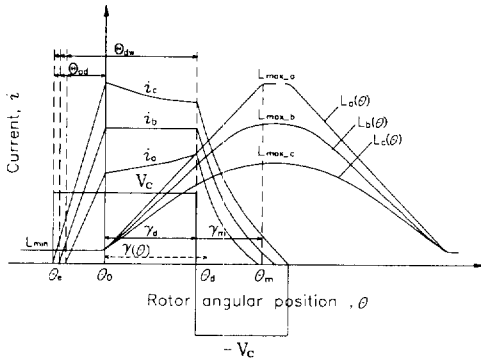


그림 4. Voltage source SRM drive의 상전류 작용도

이때의 인가전류의 특성 및 가변 릴럭턴스의 특성은 그림 4와 같으며, 이때의 전압방정식은

$$v = R \cdot i(\theta) + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt}$$

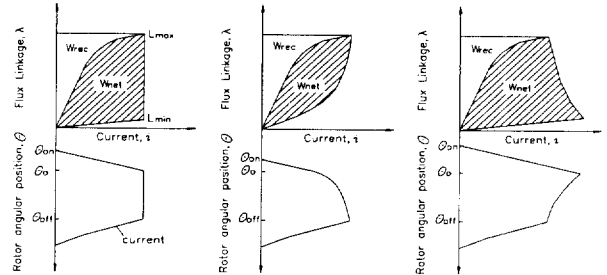
$$= Ri(\theta) + \frac{\partial \lambda(\theta, i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda(\theta, i)}{\partial \theta} \omega \quad (4)$$

로서 첫째 항은 고정자권선의 저항 손실성분이고, 둘째 항은 자기회로에 축적되어지는 에너지의 변환성분이며, 셋째 항이 기계에너지로 변환되는 성분의 값이다.

이때 토오크 발생구간인 가변인덕턴스구간에서 전류변화가 없는 flat-top 전류를 갖게 조정하면  $di/dt=0$  로 되어 토오크의 맥동성분이 없는 효과적인 동력변환이 이루어지게 될 것이고 일정인가전압에서는 일정속도운전이 이루어져 안정운전을 하게 될 것이다. 이러한 flat-top 전류는 가변인덕턴스구간에 앞서 두 극이 unalign 구간에서 행하는 advance 각  $\theta_{ad}$ 의 조정으로 이루어진다.

(C) SRM drive 에서의 에너지변환 : SRM에서의 에너지변환은 한 상당 스위칭기자력인가, 동력변환 및 축적된 자기에너지의 소호 내지 회수의 과정을 연속적으로 되풀이하여 이루어지므로 충분한 스위칭기자력의 인가와 최소한의 귀환에너지를 갖도록 하기 위하여 자기회로를 포화범위까지 확대하여 동력에너지의 변환율(energy ratio)을 크게

한다. 그리하여 일반 전기기계에서는 적용 자속밀도를 1.0[tesla]의 범위에서 동작하게 하는 것이 특징이다. 그림 5는 VSSRM 에서의  $\lambda$ -mmf 의 특성곡선으로 특성곡선의 변환점의 조작은



(a) flat-top current (b) under-current (c) over-current

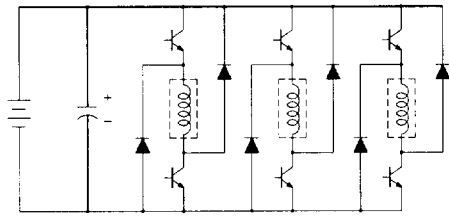
그림 5. 상전류 파형에 따른 에너지변환의 특성

advance  $\theta_{ad}$  기자력소호위치가  $\theta_{off}$ 에 의하여 이루어지며 그림5(a)는 flat-top전류를 형성하게 하여 등가적인 CSSRM로서 토오크의 맥동분을 최소화하여 고효율의 구동을 하게 하는 바람직한 특성도이다.

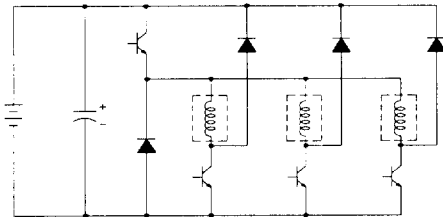
## 2.2 실용성 있는 Switching Inverter Topologies

SRM drive의 제작에 있어서 VR drive의 전자계구조의 단순화로 인한 제작비의 절감비용만으로 switch inverter의 구성비용을 대체할 수 있게 하면, SRM drive의 제작면에서의 실용성은 높아지게 된다. 그러므로, SRM drive에서의 Switching inverter구성의 단순화는 SRM drive의 개발의 대전제가 되고 있다. VR drive에서의 토오크발생은 식(1)과 같이 스위칭 기자력 전류  $i(\theta)$ 의 크기의 자속에 비례하며 기자력 전류의 극성에는 무관하다. 그러므로, Switching inverter의 스위칭소자를 단순화시킬 수 있어 스위칭전원의 구성비용을 절감할 수 있음은 매우 중요하다. 현재까지 개발된 switching inverter topology 들은 그림 6과 같다.

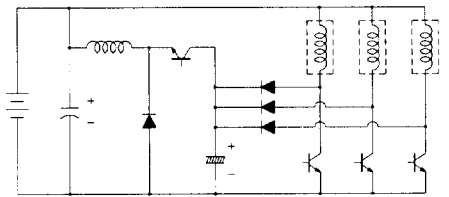
그림 6의 (a)는 Electronically commutated motor, ECM, inverter의 기본회로로써 classic inverter라고도 한다. 여기서, 한 상에 두 개의 switching소자와 두 개의 diode소자는 상 권선에 전압을 인가하고, 동력변환되고 난 후에 나머지의 기자력에너지를 소호 내지 변환하기 위한 기능을 수행하기 위한 것으로, 이러한 기자력에너지의 회수작용은 등가적 전류원 전원의 특성을 개선하여 부성 가변 릴럭턴스 영역에서 Braking토오크 발생을 억제하여 효과적인 동력 변환을 갖게 하기 위해 필요하다. 그림 6의 (b)는 Miller inverter로서, 기자력 전류의 극성에 무관한 동작특성의 효과를 극대화한 것으로 switching inverter의 구성비용의 절감에 크게 기여한다. 그러나, 상 권선간의 스위칭을 중복할 수 없어 동작dwell각을 넓힐 수 없는 점과 토오크 리플의 억제를 효과적으로 행할 수 없는 결점이 있다.



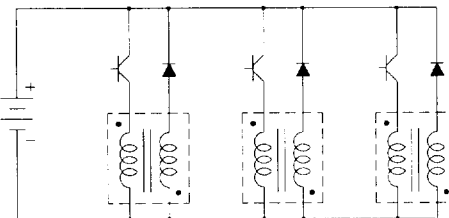
(a) Classic inverter



(b) Miller's inverter



(c) C-dump inverter



(d) Bifilar inverter

그림 6. 3 상 SRM drive의 Switching inverter Topologies

그림 6의 (c)는 C-dump inverter로서 기저력 인가 동작 후 잔여 기저력 회수를 인버터의 C-dump에서 형성시킨 높은 역전압으로 효과적으로 수행하기 위한 개선된 inverter topology로서 그 실용성이 가장 높다. (d)는 VR의 자기구조의 상권선을 2중으로 하여 기저력 인가와 잔여기저력의 회수를 따로따로 행하게 함으로써 스위칭 및 회수용 소자를 반으로 줄여 인버터회로를 단순화하는 Bifilar inverter이나, 그 대신 VR의 전자계의 구성에 부담을 주는 결과를 낳는다.

### 2.3 SRM drive의 효과적인 특징

80년대 초에 그 실용성이 입증되어 실용화를 위한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있는 펄스전압 토오크 동력변환 시스템은 그림 7과 같은 기본 운전시스템의 구성으로 되어 있으며, 이러한 운전시스템은 다음과 같은 유리한 특징을 갖고 있어서 전동기구의 다기능 및 고효율화의 수요에 편승하여 가까운 장래에 전반적으로 그 실용이 확대될 것이 예상된다.

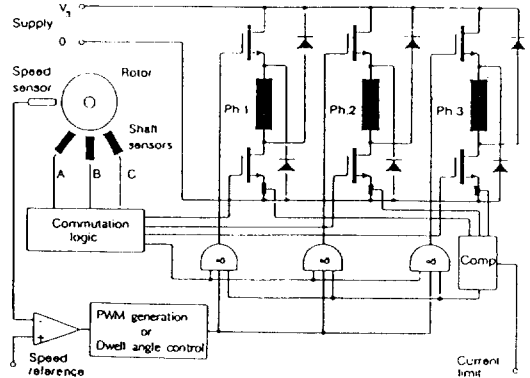


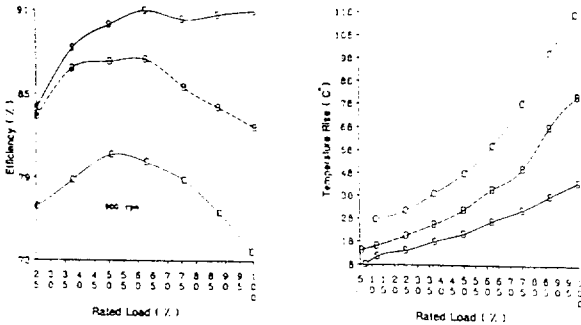
그림 7. SRM drive의 운전시스템

(가) 동력변환기구가 단순하고 견고하며 내환경성이 높다 : 고정자와 회전자 극의 형상이 슬롯이 없어 단순하고 권선 또한 고정자에만 집중권으로 되어 있어 전자계구조가 전동기구 중 가장 단순하다. 이는 이러한 단순구조와 고밀도의 작용자속밀도(1.7 tesla)는 높은 에너지밀도를 가져 15% 정도 높은 output per frame size를 갖게 한다. 그리하여 가장 값싼 유도전동기 보다 제작비가 30-40% 정도 절감된다. 이러한 절감된 제작비는 추가되는 드라이브 인버터의 제작비용으로 대체할 수 있게 하면 현재 가장 범용으로 이용되는 유도전동기를 경제적으로 대체할 수 있게 될 것이다.

한편 Brushless화와 전자계구조의 단순함은 내환경성에 강하여 전기자동차 및 세탁기용 전동기에 알맞은 전동시스템으로 각광을 받고 있다.

(나) 고효율운전시스템이다 : 전자계구조의 단순함과 펄스파전원으로의 운전은 에너지변환율을 높이고 운전손실을 줄일 수 있게 되어 고효율운전특성을 갖는다. 그림 8은 10 hp SRM의 효율 및 온도상승특성곡성으로 기준속도범위에 따라 다르나, 효율은 표준유도전동기보다 10% 정도 높고 고효율유도전동기보다 5% 정도 높으며, 온도상승특성은 전반적으로 우수하다.

(다) 운전 기능성이 우수하고 다양하다 : 스위칭 펄스형전원을 이용하기 때문에 가변주파수기능을 내포하고 있어 가변성 토오크-속도특성이 우수하며, Electronically



(a) 효율 특성 (b) 온도상승 특성

S : SRM B : High efficiency IM C : Standard IM

그림 8. 운전효율 및 온도상승의 비교

commutation action이 가능하여 Brushless화되어 있고 여기에 stepping motor에서의 고유특성인 높은 peak torque to inertia ratio를 갖고 있으므로 속응성있는 구동능력을 갖고 있다. 또한 운전 mode전환이 쉽게 이루어 짐으로 속응성있는 4 象限運轉이 가능하다. 그리하여 현재 활용되고 있는 전동기에서의 PWM 제어방식보다 운전기능과 운전효율면에서 우수하다.

### 3. VR/SR motor 의 개발동향

전동력구동시스템은 80년대 부터 다음과 같은 기종에 대한 실용화 개발이 활발해지고 있다.

- Permanent Split Capacitor motor
- Controlled Induction motor
- Brushless PM motor
- Brushless PM/high efficiency motor
- Switched reluctance motor

이들은 주로 전력용 스위칭 반도체의 실용화, Digital signal processor, DSP 와 같은 제어용 마이크로프로세서와 Customer IC 등의 개발 및 Rare earth magnet와 같은 영구자석재료가 실용화됨에 따라 주요 전동력응용기종으로 각광을 받게 되었다.

이들은 주로 가정용 동력의 전력화로 가정용 전동기의 수요가 폭발적으로 신장함에 바탕을 두고 이루어진 것으로, 종래 산업용 가변속 전동기로는 직류전동기를, 가정용 전동기로서는 universal motor와 같은 정류자 전동기를 이용하던 것을 속응성을 위한 Brushless화 및 제어기능을 내포한 Electronically Commutation화들을 이룩하는 전동력의 기능형태가 고기능화된 산물로 이를 대체 사용하기에 이르렀다.

한편, 가정용 및 사무용 전동시스템도 Air conditioner의

전동력과 같이 점차 대용량의 것으로 확대됨에 따라 종래 산업용 가변속 시스템으로만 활용되던 Vector controlled induction motor system이 대용량 업무용 전동력으로 적용하려던 경향은 고효율이고 저가격이면서 가변속특성을 갖는 SRM drive의 응용으로 바뀌는 추세에 있다.

표 1은 전동력산업을 주도하는 기업에서의 SRM드라이브의 실용화 개발의 현황과 기존 전동시스템의 SRM드라이브의 대체활용의 가능성을 나타내고 있다. VR/SRM의 실용화 개발은 주로 Electronically commutation화로 직류전동기 및 정류자전동기의 응용분야에의 대체개발과 제어기능을 가지고 있는 현재 가장 활용범위가 넓은 유도전동기에 제어기능을 갖춘 고효율, 고기능의 유도기형 전동시스템의 응용분야에의 대체 개발이 활발히 이루어지고 있다.

개발업체의 동향으로는 70년대 후반과 80년대에 걸쳐 기술개발 및 특허권의 확보를 위주로 하던 영국의 Leeds 대학내의 SRD Ltd 의 특허활용과 미국의 GE 및 Emersion 과 함께 산업체 및 연구기관이 콘소시움을 이루어 실용화 개발이 활발하게 이루어 지고 있으며, 그 중의 대표적인 연구개발주체는 SPEED Consortium이다. 동시에 독일의 MASCOM사가 주도하는 SRM드라이브의 개발회의가 전세계의 관련기업체 및 개발연구기관을 초청하여 매년 1월에 개최되고 있으며, 한국에서도 참석하고 있다.

### 4. SRM drive 의 연구동향

SRM드라이브는 전동력응용에서 현용 전동력시스템을 보다 실용성있는 구동형태로 활용전환하는데 그 개발목표를 두고 있다. 즉, 가변속 전동기의 commutatorless, 초고속운전범위에서의 응용, 가변속운전시스템의 저가격화 등을 추구하고 활용 전환을 이루고자 하는데 연구개발의 목표로 하고 있다. 이를 위하여는 전동시스템은 단순하고 견고하게 하면서도 운전특성은 보다 고품질화되도록 하는 연구가 가장 중요하다.

#### 4.1 운전특성의 고품질화 연구

SRM드라이브의 가장 취약적인 특성은 동작특성상 맥동 토오크가 비교적 발생하기 쉬워서 소음, 진동이 비교적 크다는 점이다. 식(4)에서 스위칭기자력의 인가 및 회수시 리액턴스전압성분의 변화가 일어나기 쉽고 이로 인하여 속도 변동시 스위칭전류파형이 쉽게 변화하기 때문에 토오크 및 속도변동이 각상 스위칭사이클마다 일어난다.

이러한 현상은 기본적으로 릴럭턴스 토오크를 극대화하기 위하여 뮤어쉴 토포크성분을 극도로 억제한 기본구성 원리에 있다고 볼 수 있다. 그러므로 회전자계 전동시스템에서 릴럭턴스 토오크가 동기화 효과를 갖는 것과 같이 가변릴럭턴스 전동시스템에서는 회전자계형의 뮤어쉴 토포크성분으로 동기화력을 갖게끔 하는 것이 바람직하다.

이러한 운전특성을 개선하기 위한 개발연구로는 다음과 같은 것이 있다.

표 1. 각 제작회사에서 SRM drive의 개발 현황

제 작 회 사	응 용 예	특 성 범 위	대 처 기 종
Radio Energy ※ (France)	Pallet Truck	2 kw	Wound field Brush dc motor
Sicme Motori ※ (Italy)	Industrial VSDs	1.2 kw - 84 kw	Brush dc motor
Picanol ※ (Belgium)	Textile Looms	< 500w	AC induction motor
Besam ※ (Sweden)	Automatic Door Opener	< 200w	AC induction gear motor
Warner/Superior Electric. (U.K)	Pump for electric steering assist for Alpha Romeo cars	350w 150w	Hydraulic System
Jeffrey Diamond ※ (U.K)	Heavy duty conveyor sys. for mines	35 kw - 200 kw	Brush dc motor
Broomway ※ (U.K)	Electric driven air compressor		Pneumatic driven compressor
General Motors (U.S.A)	Primary Vehicle Drive	55 kw	AC induction motor
Emerson Electric (U.S.A)	Refrigerator Compressor	150 w - 250 w	AC induction motor
Emerson Electric (U.S.A)	Washing Mach. Agitator	250 w - 550 w	AC induction motor
Emerson Electric (U.S.A)	Shop Vacuum Cleaner	1.4 kw - 4 kw	AC induction motor
NSK Megatorque (U.S.A)	Direct Drive Robots, Rotary Tables, etc.	2 kw peak 1.1 kw cont.	Brush DC Servo, Motor & Resolvers
Adept. Tech (U.S.A)	Direct Drive Robots, Rotary Tables, etc.	1 kw to 2 kw 500 to 1.2 kw	Brush DC & BLDC Servos & Resolvers
Warner/ Superior Electric. (U.S.A)	Direct Drive Steering	1 kw peak 150 w cont.	Hydraulics
Warner/ Superior Electric. (U.S.A)	Cruise Control Drive	50 watts	Brush DC motor
NMB Hansen (U.S.A)	Textile	10 w - 50 w	Brush DC or BLDC motor
Emerson (U.S.A)	Centrifuge	1 kw - 2 kw smooth accel.	AC motor or BLDC motor
Servo Products (U.S.A)	End Mill Table Drives	1.2 kw peak 500 w cont.	Brush DC motor
Magna Physics and Westinghouse (U.S.A)	Electric Motor Scooter	950 watts cont.	Gasoline engine
Magna Physics & Sunstrand (U.S.A)	High speed motor/ generator engine starter	35 kw - 60 kw cont., 40 krpm	Hydraulics
Magna Physics & Sunstrand (U.S.A)	High speed aircraft engine pump	80 kw - 120 kw cont., 25 krpm	Hydraulics
GE Drives (U.S.A)	High speed aircraft engine pump	80 kw - 120 kw cont., 25 krpm	Hydraulics
GE Drives (U.S.A)	Generator engine starter	35 kw - 70 kw cont., 40 krpm	Hydraulics

\*SRD Ltd License

(a) 증가적인 Current source 의 형성 개선 : 스위칭 온/오프각을 부하에 대하여 적응제어하여 flat-top 전류를 형성시키는 스위칭 제어방식에 관한 연구와 스위칭-오프시에 잔여 기자력에너지를 신속하게 회수하기 위하여 높은 역전압의 에너지회수전압을 switching inverter에 형성시켜 인가하는 방법, 즉 C-dump inverter와 같은 Inverter topology 의 개선연구가 있다.

(b) 잔여기자력에너지의 회전자계 내지 이동자계화 : VR 자계구조에 상간을 연계하는 보조권선을 설치하여 스위칭 오프시 잔여기자력에너지를 직접 그리고 신속하게 전달하는 방안에 대한 연구와 고정자권선을 근본적으로 증가적인 회전자계권선으로 하는 준 전철권결선으로 하는 방식의 연구가 추진되고 있다.

(c) 맥동토크 및 소음 억제 방안의 연구 : 증가적인 전류원을 구성하기 위하여 스위칭 오프를 급격하게 할 때 스위칭 고조파전류로 인한 철심에의 맥동스트레스로 인한 고조파토크 및 소음을 발생한다. 이를 소거하기 위하여 다단계스위칭 오프방식 및 랜덤스위칭방식을 적용하여 효과를 갖게 되었다.

(d) 운전특성 개선을 위한 제어방식에 관한 연구 : 릴럭턴스 토크 드라이브는 자기회로의 포화영역의 활용, 증가전류원의 적용 등 비선형적 특성이 많이 내포하고 있어 제어용전동기로서의 활용에는 아직도 부적당하다. 이러한 운전특성을 개선하기 위한 연구가 현재 진행되고 있으며 그 개선의 여지는 많다.

형상설계는 회전자계형과는 다르다. 그리하여 토크-속도 특성 및 효율 특성은 부하에 비례하지 않고 인가기자력에 비례하는 특성을 갖는 것이 특징이다.

그리고 기준자속밀도가 철심의 포화영역까지 확대하여 활용함으로 기본설계기준이 달라 현존 유추추열 동력변환기의 설계기준을 적용할 수 없다. 설계상 특별히 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

- (가) 자성재료의 활용은 최대포화영역(일반철심재료에서는 1.7 tesla)까지 이용한다. 부하기자력의 증가에 따라 포화영역의 확대로 실효기자력의 작용효용율은 줄어드나 도통시에 인버터에로의 반환에너지도 줄어든다.
- (나) 토크, 속도 및 효율특성은 스위칭 기자력함수로 나타난다. 철심공극에 따른 적정권선설계기준은 그림 9와 같은 값을 갖게 될 때 고효율특성을 갖는다.
- (다) 자기회로에서의 손실분포는 표 2와 같으며 철심요오크에서의 손실비율이 가장 크므로 철심요오크의 자계설계에 특히 주의를 하여야 한다. 그리하여 고정자의 철심구조는 각형철심(Rectangular core)구조가 바람직하다.

표 2. VRM의 전자계에서의 손실분포

Type	6/4 VR	8/6 VR	12/8 VR
Copper loss	23.3%	20.0%	22.0%
Stator yoke	47.5%	33.3%	36.2%
Stator pole body	11.1%	22.1%	20.2%
Rotor pole body	9.3%	15.0%	12.3%
Rotor yoke	6.9%	8.3%	7.7%
Stray loss	1.9%	1.3%	1.6%

4.2 적정설계 방법의 도출

릴럭턴스 토크 동력변환기는 기자력형성과 동력변환이 상펄스전원이 인가시마다 동시에 그리고 주기적으로 일어나기 때문에 상시 기본여자에너지는 없다. 그리하여 전자계

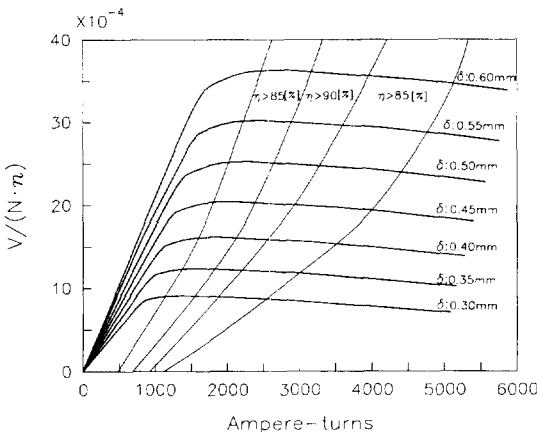


그림 9. 공극길이에 따른 적정 기자력과 기준전압/ (권선턴수기준속도) 의 설계기준

4.3 회전자 위치검출방식의 개선

회전자위치검출은 SRM드라이브에서 중요한 구성요소이다. 이들은 회전자철심형상의 disc와 photointerrupter 로 된 간단한 장치로 구성할 수 있다.

한편, 이러한 장치도 생략하는 sensorless 화에 관한 연구 개발도 이루어지고 있다. 즉 스위칭 해야 할 상권선에 검출용 펄스를 인가하여 인덕턴스의 변화를 검출하는 Pulsed impedance sensing 방법, 회전자 위치정보를 미리 모델하여 행하는 Model base estimator 방법 및 주파수변조 엔코더에 의하여 Lmax.과 Lmin.의 위치를 예측하여 sensing 하는 방식이 연구되고 있으나 실효성은 의문이다.

4.4 현용 전동시스템의 Base speed 에 해당하는 중속도범위에서의 운전특성 개선

SRM 드라이브의 가변속범위는 초고속범위까지 상당히 넓다. 그러나 고성능의 속도범위는 단계적인 Base speed 범위를 갖는다. 이러한 Base speed의 설정은 Vn / turns 의

조정으로 정하여 진다. 그러나 그림 9에서 보는 바와 같이 고효율의 운전설계는 공극의 치수에도 관련되는 등 설계정수의 조정은 간단하지 않다.

현재까지 개발된 것으로는 1,000 rpm 내지 7,000 rpm 의 Base speed 에서만 고효율 특성을 갖는다. 그리하여 가장 이용도가 높은 1,000 rpm 이하의 속도에서 고효율이며 고성능의 운전특성의 개발이 요청되고 있다.

#### 4.5 Synchronous reluctance alternator의 실용화 개발 연구

릴럭턴스 토오크 동력변환기로서의 발전기는 Induction generator의 변형된 발전원리를 가지고 있다. 그리하여 고정자권선은 일반 교류발전기와 같고 초기여자는 고정자에 병렬로 연결된 커패시터에 의하여 행한다. 그리고 회전자는 그림 10과 같이 철심적층을 하되 회전자에는 권선을 가지고 없으며 그리하여 발전전압주파수에 해당하는 일정속도로 운전하게 한다.

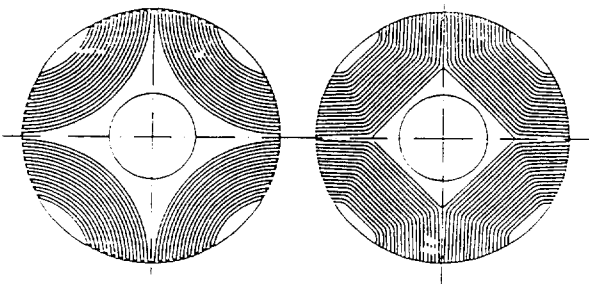


그림 10. Synchronous reluctance alternator의 회전자 구조

일정전압특성과 역률특성을 개선하기 위하여 직축 및 횡축인덕턴스의 비,  $L_d / L_q$  의 값을 크게하는 회전자계 구조에 대한 연구가 진행되고 있다.

### 5. 맺 음 말

릴럭턴스 토오크를 활용한 동력변환 시스템은 저속도 고투오크 특성의 동력용 stepping motor 형태와 초고속 고효율의 SRM드라이브형태의 개발이 주로 이루어져 있으며 산업용, 업무용 및 가정용의 전동력화의 급격한 신장의 추세에 바탕을 두고 현용되는 전동시스템의 대체적용 전동시스템으로서 가까운 장래에 그 활용범위가 크게 확대될 것으로 전망된다. 그리하여 국내에서도 그 실용화를 위한 개발연구가 활성화되어야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P.J. Lawrenson, J.M. Stephenson, P.T. Blenkinsop, J. Corda, and N.N. Fulton, "Variable-speed reluctance motors", Proc. IEE, Vol. 127, Pt. B, No.4, pp.253-265, July 1980
- [2] S. Vukosavic, V.R. Stefanovic, "SRM Inverter Topologies: A Comparative Evaluation", IEEE Trans. on IA, Vol.27, No.6, pp.1034-1047, Nov./Dec. 1991
- [3] A.M. Hava, V. Blasko, and T.A. Lipo, "A Modified C-Dump Converter for Variable-Reluctance Machines" IEEE Trans. on IA, Vol.28, No.5, pp.1017-1022, Sep./Oct. 1992
- [4] Hassan Moghbelli, G.E. Adams, and R.G. Hoft, "Performance of a 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors", IEEE Trans. on IA, Vol.27, No.3, pp.531-538, May/June 1991
- [5] Dan Jones, "New SR Motors, Drives and Applications in the U.S.A. and Europe" Proc. of the SMIC'96, pp25-43, Sep. 1996
- [6] Chi-Yao Wu and Charles Pollock, "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive" IEEE Trans. on IA Vol.31, No.1, Jan./Feb. 1995
- [7] S.G. Oh, C.Y. Choo, and Y.M. Hwang, "A Study Electromagnetic Energy Recovery in SRM System" Proc. of IECON'96, Vol.1/3, pp90-95, Aug. 1996
- [8] 황영문, 공관식, "SRM의 고효율 구동을 위한 가변스위칭각도 조정방식에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 제44권 1호, pp. 25-33, 1995. 1.
- [9] M. Ehsani, I. Husain, and K.R. Ramani, "New Modulation Encoding Techniques for Indirect Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. on IA Vol.30, No.1, Jan./Feb. 1994

### 저 자 소 개



#### 황영문(黃煥文)

1934년 4월 13일생. 1957년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1959년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1972년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991년~1992년 당 학회 회장 역임. 현재 부산대 공대 전기공

학과 교수.