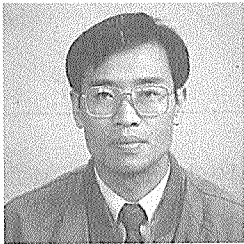


# Switched Reluctance Motor의 개발 및 응용

(한국전기연구원 전력전자연구소)



韓國電氣研究所  
電力電子研究室  
선임 연구원 임근희

## 1. 서론

초기에 개발된 스위치드 리럭턴스 모터(Switched Reluctance Motor; 이하 SRM이라 함)는 토오크 리플과 소음등에 의한 문제점들이 지적되어 생산가가 싸고 회전자가 간단한 적층 규소강판으로 되어 있기 때문에 기계적으로 견고하고, 고속회전과 고온등의 열악한 운전조건에서도 신뢰성이 높다는 장점이 있음에도 불구하고 실용화가 연구개발에 뒤따르지 못했다. 그러나 80년대 후반 이후 이러한 단점들이 보강되어 그 이용이 날로 증가되고 있다. 특히 가변속 운전하에서 완벽한 동기를 요구하는 섬유기계의 구동장치, 신문용지등의 Feed 및 광범위 변속을 요구하는 화학공정의 blender, 공업용 원심분리기 등 폭넓은 분야에 적용되어 그 우수성이 증명되고 있다.

SRM은 DC전원의 스위칭을 통한 가변주파수 전원을 이용하여 속도 또는 토오크제어를 목적으로 연구

개발되고 있다. 1960년대나 1970년대 초기까지도 그 실용화가 의문시되어 왔으나 대용량 전력용 반도체 개발에 힘입어 1970년대말 부터 영국을 중심으로 Traction Motor용으로 개발 사용되기 시작했다.

산업발전에 따른 모터의 제어응용분야가 급증함에 따라 SRM의 저렴한 생산가와 높은 신뢰성, 고속도운전 등 다른 모터가 따를 수 없는 장점을 가지고 있어서 향후 국내산업분야의 발달과 다양화에 따라 그 응용이 급증할 것으로 사료되며 이에 대한 연구개발과 기술능력을 제고하여 선진기술국과의 경쟁에서 앞서갈 수 있는 분야로의 육성이 기대된다.

본 고에서는 SRM의 발달과정, 동작원리, 구동기술, 국내의 기술현황 및 그 응용분야 등 전반적인 면에서 SRM 기술을 살펴보기로 한다.

## 2. SRM의 발전

이 Motor의 기원은 1842년의 Electromagnetic Engine으로 거슬러 올라가지만 근래의 값싼 Power Switching Device의 출현으로 '재발명'되었다고 볼 수 있다.

개괄적 발전과정을 살펴보면 다음과 같다.

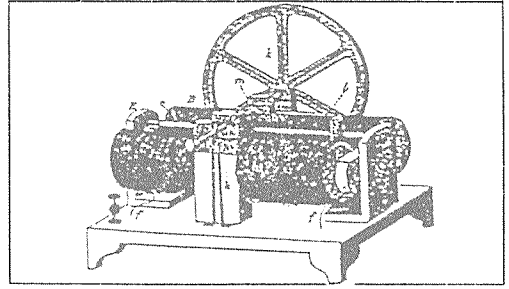
- 1840년대 Electromagnetic Engine으로 소개됨
- 1880년대 DC 및 AC Electric Machines
- 1960년대 Synchronous Reluctance Motor
- 1973년 GM사에 의한 Axial-Airgap Multistack형의 현재의 SRM 개발
- 1970년대 후반~1980년대 영국의 P. J. Lawrenson등 여러 Research Scientist에 의해 이론정립
- 1983년 영국 Oulton SRM Drive사에 의한 기업화
- 1980년 중반

Micro Processor-based SRM Drives 개발 Novel Converter Topology 개발 CAD, FEM Applications 도입 High Performance Control 개념 도입

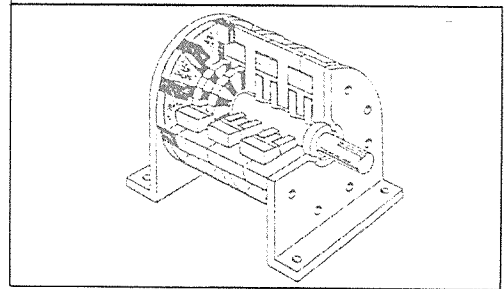
- 1988년 2세대 SRM 효율 향상
- 1990년~현재 3세대 SRM 효율 향상, 토오크 리플 및 소음 저감

SRM의 발전과정을 그림으로 살펴보면 외형적인 면(그림 1)에서도 많은 변화를 읽을 수 있다.

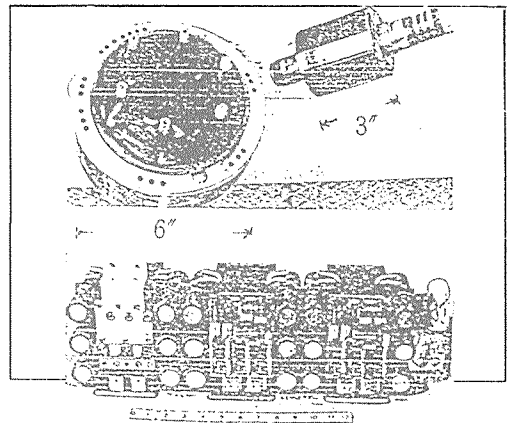
인버터에 의해 구동되는 유도전동기와 각 세대의 SRM간의 효율, 토오크등의 관점에서 몇개의 경우에 대해 비교해 보면 다음표와 같다.



(a) Electromagnetic Engine(1840년)



(b) GM사의 Multistack SRM(1973년)



(c) (위) GE사 SRM(32kW5000RPM)

(아래) GE사 Converter(1989년)

그림 1. SRM의 발전

표 1. SRM 1세대와 4극 유도기(IM)

Frame Size Range	112	180			
Power Range	4kW	22kW			
SRM Power/Frame	1.0				
IM Power/Frame					
SRM Low Speed Torque	1.6				
IM Low Speed Torque					
Frame Size	112	132	160	180	
Total System Efficiency	SRM	82	85	87	91
	IM	78	81	95	85

표 2 2세대 SRM과 4극 유도전동기

Frame Size Range	112 ~ 250				
Power Range	4kW	110kW			
SRM Power/Frame	1.15(평균)				
IM Power/Frame					
SRM Low Speed Torque	1.8(평균)				
IM Low Speed Torque(연속)					
Frame Size	112	132	160	250	
Total System Efficiency(%)	SRM	85	87	89	92
	IM	78	81	85	92

즉, 같은 Frame Size의 1세대 SRM에 대해 유도전동기와 비교한 결과 저속에서 60% 이상의 토크를 더 얻을 수 있으며, 효율적인 측면에서도 평균 4% 이상 우수한 것으로 비교되었다.

표 2에서는 1988년도의 2세대 SRM과 4극의 유도기에 대해 비교해 보았다.

2세대 SRM은 4극의 유도전동기에 비해 출력면에서는 15% 저속 토크는 80%정도가 높은 것으로 나타났으며 효율도 4%~7% 정도 우수한 것으로 비교되었는데, 이러한 수치는 중용량 전동기의 경우 소비전력면이나 열발산 측면에서 중요한 의미를 갖게 된다.

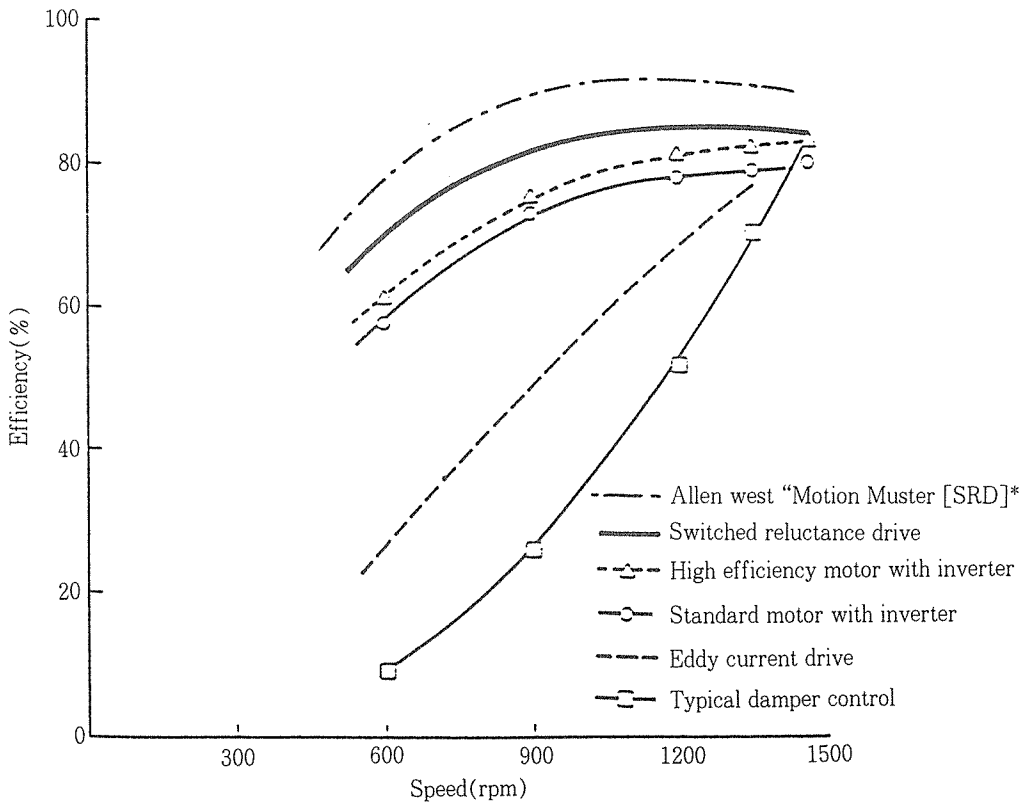


그림 2 22kW의 Fan Load 효율

표 3은 2세대 SRM과 2극 유도전동기에 대해 표 2와 같은 특성을 비교한 결과이다.

2극 유도전동기에 비해서 SRM의 저속 토크는 3배 이상이며 효율측면에서도 훨씬 앞서는 것으로 나타났다.

그림 2는 22kW Drive의 Fan 부하에 대해 일반 유도전동기, 고효율 유도전동기 그리고 각 세대간의 SRM등 각 전동기의 효율과 속도 대비를 나타낸 것으로 각 세대의 SRM은 효율적인 면에서 어느 모터보다 높은 효율을 가짐을 알 수 있다.

표 3. 2세대 SRM과 4극 유도전동기

Frame Size Range	112~200			
Power Range	1.75(평균)			
SRM Power/Frame	3.15			
IM Power/Frame				
Frame Size	132	180	200	
Total System Efficiency (%)	SRM	86	90	90
	IM	81	86	83

SRM과 인버터로 동작되는 유도기의 각 출력에 있어서 효율을 비교해 보면 그림 3과 같으며 1kW의 소요량부터 32kW까지 전용량에 이르기까지 SRM쪽의 효율이 우수함을 보여준다.

132Frame을 사용한 1990년형 1500 RPM SRM(10.5kW)과 동일 Frame을 사용한 유도전동기의 속도 대 출력 토크와 효율은 그림 4에서 보는 바와 같이 SRM쪽이 전운전속도 범위에서 유도전동기보다 우수함을 보여준다.

초기 SRM 특성에서 문제점으로 지적되어 온 소음 문제를 1990년 현재 개발된 10.5kW의 SRM과 같은 Frame으로 제작된 유도전동기 17.5kW의 소음치를 정격속도인 1500rpm에서 비교한 결과 유도전동기의 소음이 4dB 정도 높았으며, SRM의 소음레벨은 전운전속도범위에서 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서 소음측면에서도 현재의 기술로 제작된 SRM은 유도전동기에 비해 뒤떨어지지 않음을 알 수 있다.

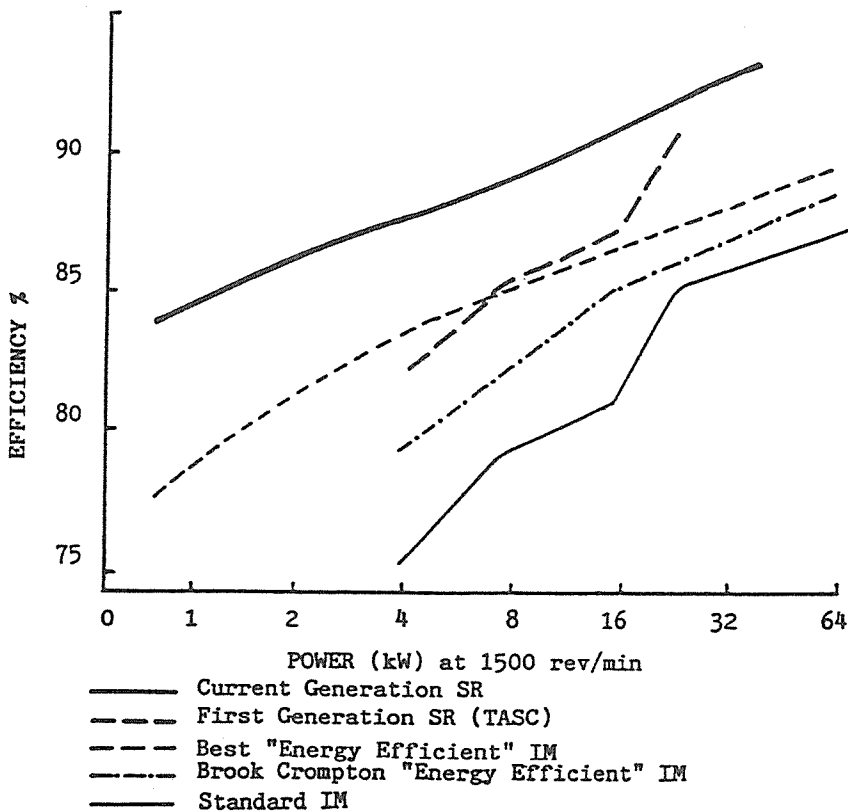
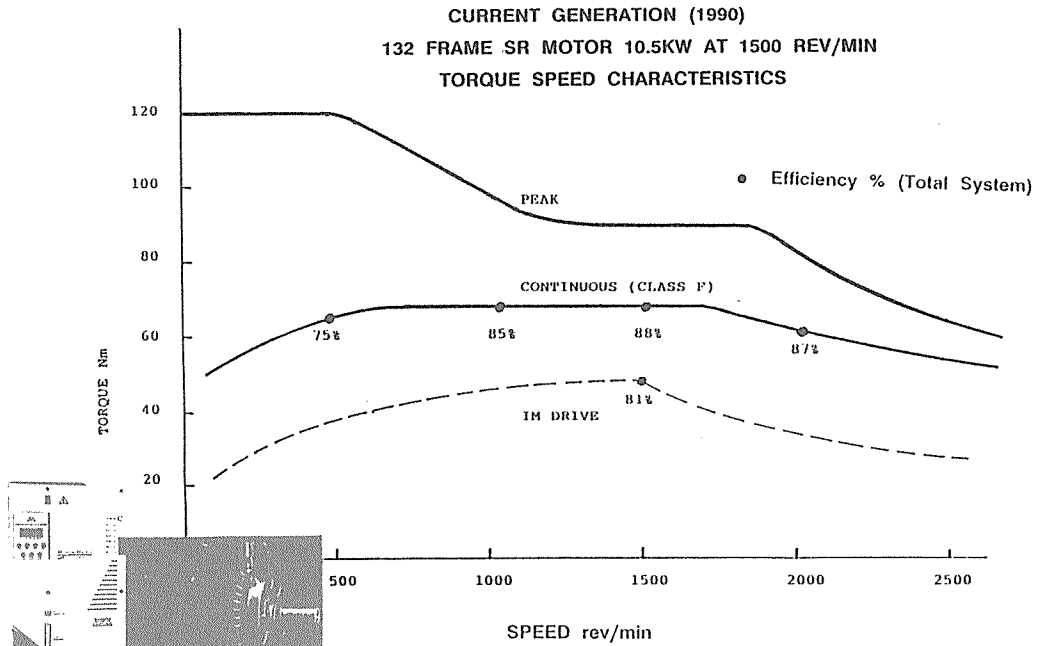
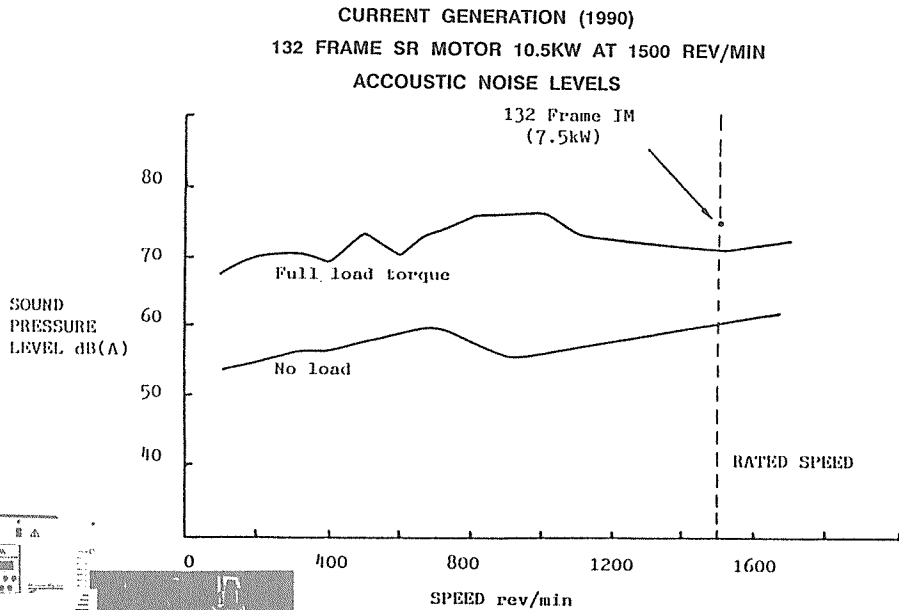


그림 3. SRM과 Inverter-Fed IM의 효율비교



(a) 132 Frame SRM의 토크-속도 특성



(b) 132 Frame의 소음비교

그림 4. 132 Frame Motor의 비교

### 3. SRM의 특허현황 분석

최근 20년간의 SRM의 기술현황을 특허출원 건수를 통해 년도별, 국가별 및 보유자별로 분석하면, 각국의 기술현황과 어느 분야에서 응용이 기대되는지에 대해 유추해 볼 수 있다.

년도별 출원현황은 그림 5와 같으며,

출원건수에서 알 수 있는 것은 70년대 부터 SRM에 대한 관심과 기술적 고려가 본격적으로 시작되어 1980년대 후반에 그 절정에 달했음을 보여준다. 바로 이때에 소위 제2세대의 SRM이 개발되었으며 그 이후 특허 건수의 감소는 SRM의 관심 퇴조 또는 기술적 안정기에 들어감을 뜻하는데 현재까지의 기술적 진보와 응용분야의 증가로 미루어 볼 때 후자쪽임을

알 수 있다.

이 기간동안 각 국가별 및 보유자의 특허현황을 보면 각각 그림 6, 7과 같은데 미국의 건설장비, 항공기, 자동차 및 모터 전문제작업체와 일본 및 영국등에 의해 대부분 점유되어 있음을 알 수 있다. 또한 일본의 경우 BLDC 및 값싼 영구자석재료 때문에 SRM분야에 관심이 별로 없는 것으로 알려져 있으나, 특허 보유현황을 통해서 보면 이는 사실과 다르다는 것을 알 수 있다.

특허를 대략적으로 분석해 보면 기술적으로는 크게 모터부분과 구동기술쪽으로 분류가 되며 구동기술부분에서도 스위칭 소자의 이용향상을 위주로 한 Converter Topology개발과 SRM의 성능향상을 목표로 한 제어기술로 나뉜다. 또 기본기술에 대한 특허는 영국쪽이 응용제어기술쪽은 미국쪽이 소유하고 있음을 알 수 있다.

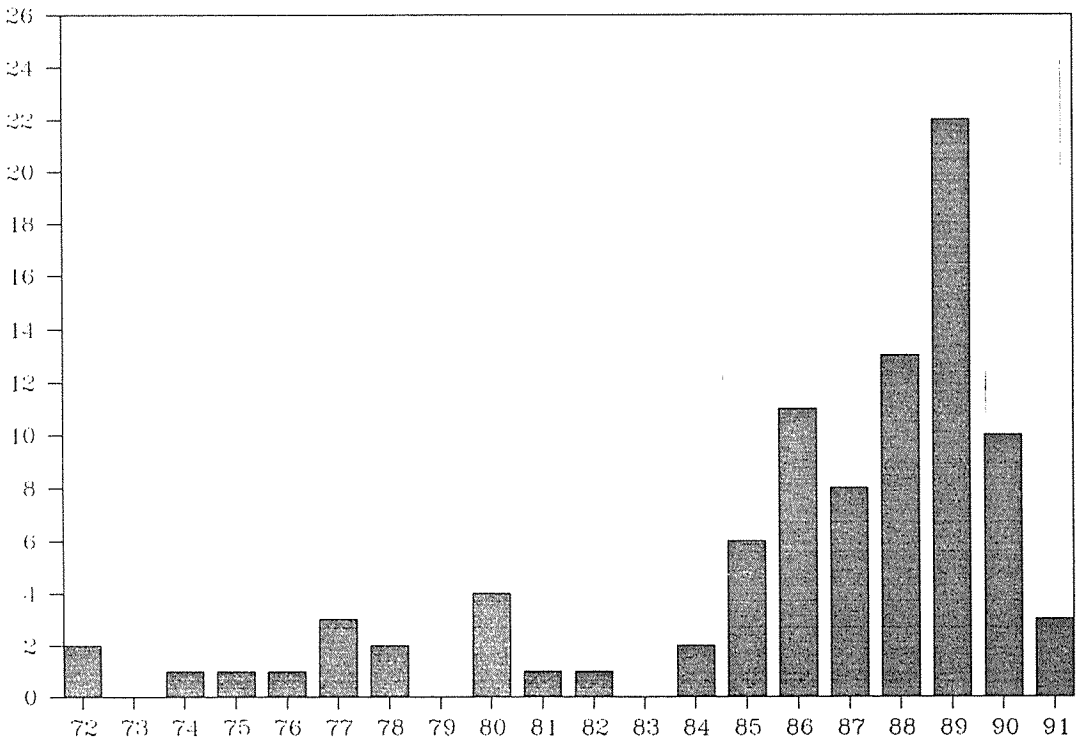


그림 5. 연도별 특허 현황

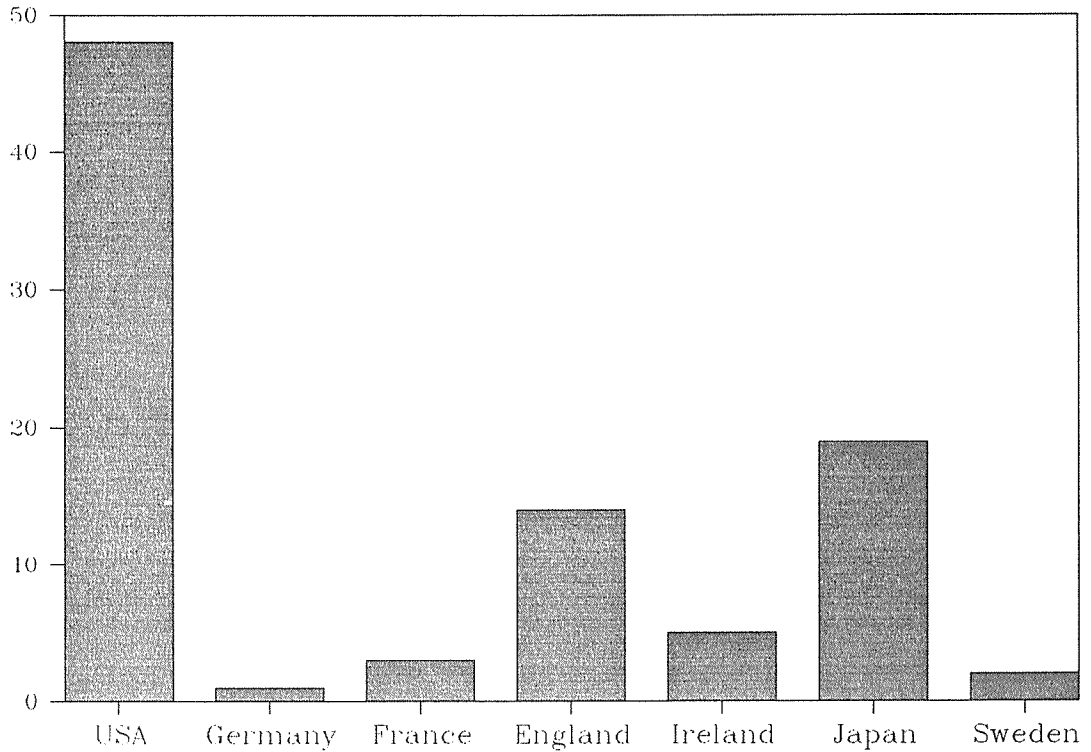


그림 6. 각국별 특허현황(1972-1991)

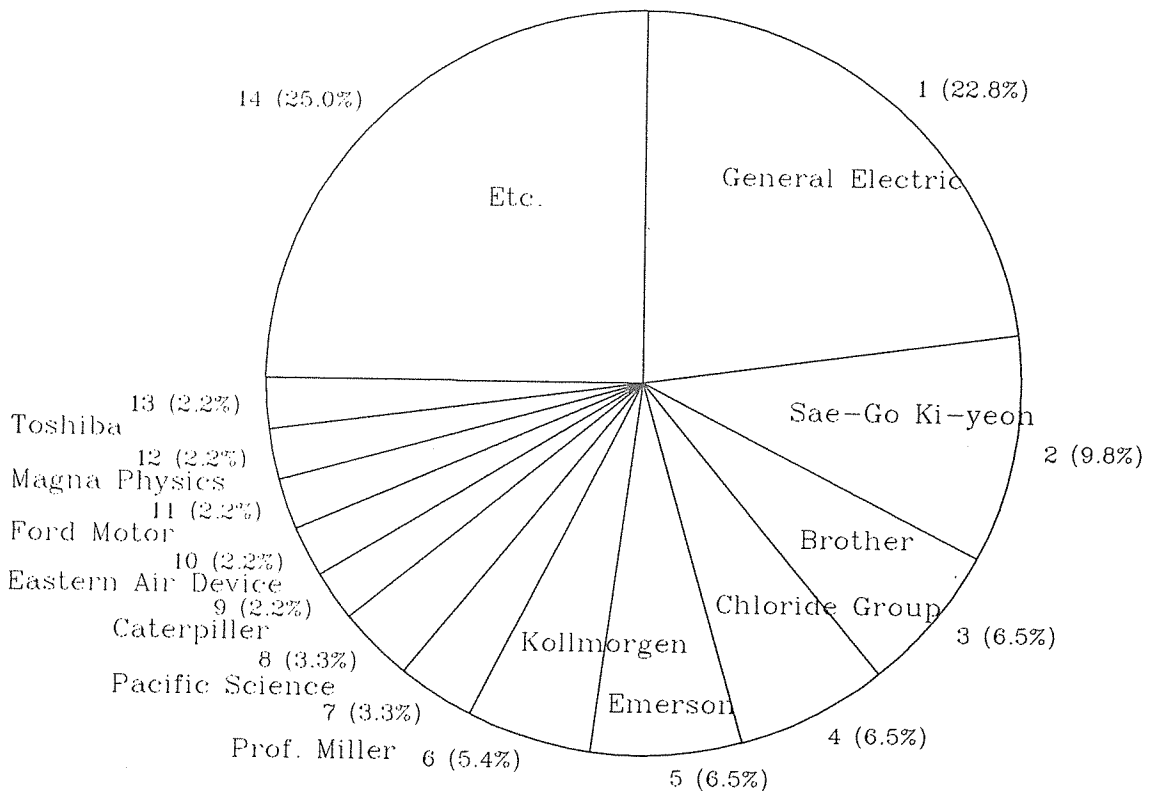


그림 7. 특허 보유현황(1972-1991)

### 4. SRM의 동작원리

이 모터는 일종의 동기전동기이며 그 나름대로의 특성을 가진다. 즉 유도전동기나 영구자석모터와는 달리 SRM은 그림 8과 같이 고정자와 회전자가 모두 돌극을 갖는 이중돌극형 모터로 고정자 권선은 매우 간단하며, 회전자에는 권선이 없이 단순히 규소강판을 적절한 것이다. 직류모터의 경우와 같이 브러쉬등이 없으므로 고속운전, 고효율 및 Maintenance Free 등이 장점을 가지고 있다. 따라서 고온등의 열악한 환경에서나 유럽을 중심으로 향후 강화가 예상되는 EMI 등의 환경규제에 대한 가변속 응용분야에 그 응용이 크게 기대되는 모터이다. 이 모터의 동작은 고정자 회로의 전류를 회전자위치에 맞추어 단순한 형태의 온, 오프 제어를 행하면 회로에 의해 필요한 고속스위칭용 반도체 소자의 개발과 제어기술이 요구되고 있다.

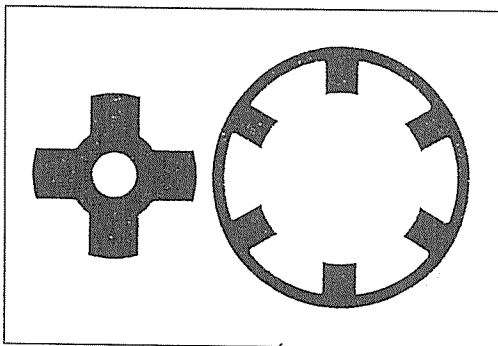
고정자의 권선은 대각선 방향으로 위치한 고정자의 두 극에 한 상의 코일이 직렬로 연결되어 있으며 이 두 고정자극이 여자되면 전자석원리에 따라 가장 가까운 회전자극이 그 두 고정자극들과 일직선이 되

기 위해 회전한다. 이 때 다른 회전자극들은 다른 고정자극들과 일직선 상태에서 벗어나게 된다. 이러한 방법으로 고정자권선을 차례대로 여자시키면 회전자가 그에 따라 회전하게 된다. 고정자의 돌극 대 회전자의 돌극 위치가 변하면 자기회로의 리럭턴스(또는 인덕턴스)가 변하게 되며 이 돌극들에 일직선상에 있을때 리럭턴스는 최저값을 가진다. 이러한 특성때문에 Variable Reluctance Machine이라 불려지기도 한다. 고정자 한 상태에 대한 극의 위치, 인덕턴스 변화 및 토크 특성은 그림 9와 같다.

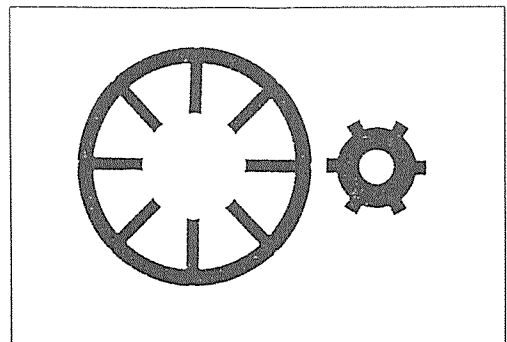
회전자의 회전에 의해 생기는 토크 T는

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dK(\theta, i)}{d\theta}$$

로 구해지는데, 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 토크 극성은 인덕턴스의 기울기에 따라 정해지며 그 크기는 전류의 제곱에 비례한다. 따라서 기동 토크 특성이 직류직권 전동기와 같이 크게 됨을 알 수 있고 토크가 전류의 제곱에 비례하므로 전류의 극성에 의해 좌우되지 않는다. 이는 구동회로 설계로 중요한 의미를 갖는다. 즉 유도전동기의 인버터와는 달리 단일방향의 전류로 구동시킬 수 있음을 의미하며 콘버터의 스위치 수가 상당 1개로 구현될 수 있음을 뜻한다.



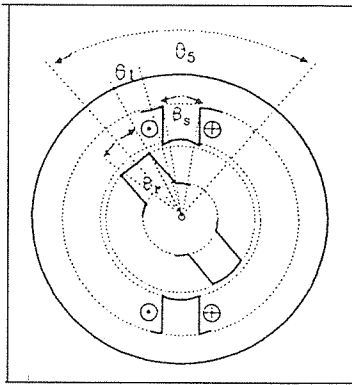
(a) 3Phase SRM Lamination



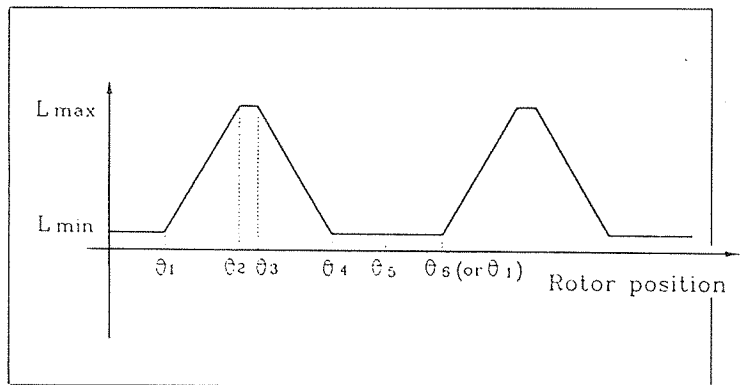
(b) 4Phase SRM Lamination

그림 8. Laminations Doubly Salient Motors

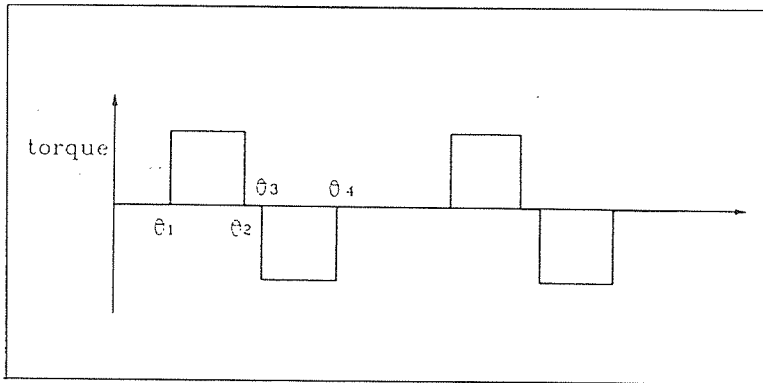




(a) 회전자의 Pole Position



(b) Inductance Profile



(c) Torque Profile

그림 9. SRM의 Inductance 및 Torque Profile

## 5. 제어 및 구동기술

SRM의 고정자 권선의 단방향과 전류를 제어하기 위해 많은 컨버터 회로가 제안되어 사용되는데 컨버터의 비용절감과 성능향상을 두 전제로 한다. 그런데 이 두 전제는 상당부분 컨버터 선택에 있어서 서로 상충되는 양면이다.

즉 한상에 한개의 스위칭 소자를 가지는 컨버터들은 주로 소자나 부품수의 최소화를 목적으로 하여 주로 저성능을 요하는 곳에 사용되며, 상당 두개의 소자를 가지는 컨버터는 다른 컨버터에 비해 제어성능이 뛰어나므로 비용증가에도 불구하고 많이 사용되는 Topology이다.

SRM 컨버터는 토오크가 전류방향에 무관하므로, 한상에 한개의 스위칭 소자만으로 족하다고 알려져 있다. 그러나 실제로 상당 스위치 한개로 회로를 구성하는데는 SRM의 유도성 회로(Inductive Circuit) 특성때문에 다소의 문제점들이 있다. 권선전류를 제어하기 위해 스위치를 턴-오프 할 때는 전류가 완전히 소멸될 때까지 연속성을 유지하기 위한 회로가 구성되어야 한다. 그렇지 못하면 스위칭소자에 큰 전압 스트레스(Voltage Spikes)를 주어 결국은 소자가 소손된다.

한편, SRM의 유도성 회로는 각 상의 권선과 스위치가 직렬로 연결되어 있으므로 급격한 전류상승을 억제하여 Shoot Through Fault시 대전류로부터 스위칭 소자를 보호해주는 역할도 한다.

그림 10은 상당 두개의 스위치와 다이오드를 가지

는 Asymmetric Bridge Converter로서 크게 3단계의 동작 모우드를 가진다.

모우드 I은 두 스위치를 모두 턴-온시켜 DC전원 전압(Vdc)을 권선에 인가하여 전류를 흐르게 한다.

모우드 II는 권선에 전류가 흐르고 있을 때 제어 방식에 따라 한 개 또는 스위치를 턴-오프하여 전류가 한 개의 다이오드와 스위치 및 권선을 순환하게 하거나, 두 스위치를 모두 턴-오프하여 권선전류가 두 다이오드를 통해서 전원측으로 에너지를 환원시

키는 방법으로 전류가 감소되도록 한다.

마지막 모우드에서 두 스위치를 동시에 턴-오프하여 Commutate 시키게 되는데, 그 상의 인덕턴스가 Negative Slope를 가지기 전에 전류를 완전히 소멸시키거나 아주 적은양이 되도록 해야 한다. 그렇지 않으면 Negative 토오크를 발생시키게 되어 모우터의 평균 토오크가 줄어들게 되며 에너지 변환효율도 감소하게 된다.

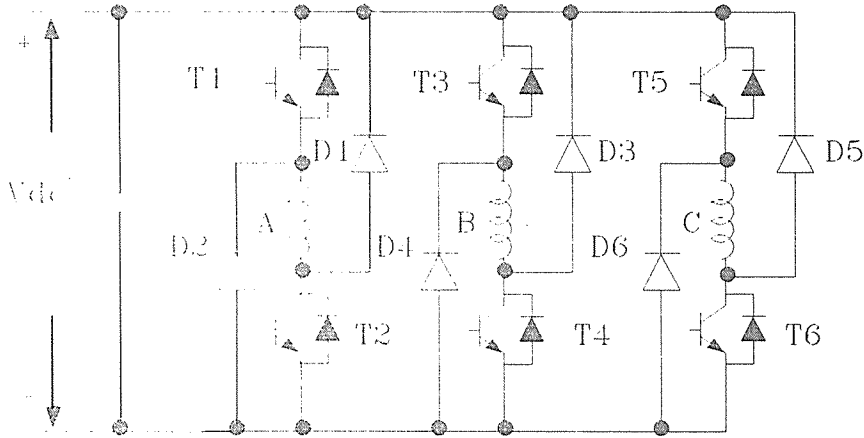


그림 10. Asymmetric bridge converter

이 Topology는 SRM 컨버터 중에서 제어의 다양성이 가장 뛰어나며 각 상의 전류제어가 독립적이어서 두 상의 전류중첩이 가능하다. 고전압, 대용량에 적합하며 스위치의 정격전압이 상대적으로 낮다.

단점으로는 상당 스위치 수가 두개라는 점과 그에 따르는 제어 및 드라이브 회로의 증가, 상당부 스위치에 대한 드라이브가 각각 절연되어야 하는 번거로움 등이 있다.

### 5. 1 SRM의 제어

SRM의 제어성능은 주로 컨버터의 Topology와 모우터의 설계특성에 따른다. SRM Drive는 제어가 쉽다는 점에서 DC Drive와 비슷하나, 여하한 조건에서도 피이크 전류가 턴-온(Turn-on)시간에 의해 제어되므로, 부하 토오크에 필요한 이상의 전류가 흐르지 않는다는 점에서는 Brushless DC Motor Drive와 가장 유사하다.

이 Drive의 특성은 정 토오크(Constant Torque) 또는 Traction Drive에서 요구되는 정속도, 정출력의 혼

합운전이 쉽다. 제어 시스템은 해당 스위치의 도전시간과 회전자 위치와 관련한 점호시점을 정해주는 기구를 필요로 하기 때문에 회전자의 위치와 도전시간을 정해주는 센서와 메모리(Memory) 요소가 요구된다.

SRM Drive에서 에너지 변환과 토오크 발생은 여자된 고정자의 상(Phase)에 대해 대각선의 위치에 있는 한 쌍의 회전자가 움직일 때 생기는 인덕턴스의 변화에 따르는데, 어느 한상에서의 그 변환주기는

$$O = \frac{360}{N_r}$$

에 의해 정해진다.

이 때 인덕턴스의 변환주기에 따라 펄스전류가 인가되며, 전류의 인가시점과 모양은 SRM의 속도와 부하에 따라 변화한다. 저속에서는 역기전력이 작아 전류상승율이 피이크 전류는 초핑(Chopping)에 의해 제한되어야 한다. 그러나 고속운전에서는 역기전력이 크게 되므로 전류의 점호(Turn-on)시점을 앞서게 하여 요구되는 전류에 이르도록 할 필요가 있다.

일반적으로 기본속도(Base Speed)라 함은 역기전력

과 전원전압이 같을 때의 속도를 말한다. 서로 다른 속도에서 전형적인 전류형태를 보면 그림 11과 같다.

SRM을 가변속으로 운전할 때는 다음과 같이 크게 두가지의 제어방식을 고려할 수 있다.

하나는 저속운전에서 속도를 제어하기 위해 전류를 초핑으로 제한하는 방법이며, 다른 하나는 고속운전에서 점호시점과 시간을 토오크와 속도에 알맞게 제어하는 방법이다.

가. Angle Control

고속 운행시, 즉 기본속도(Base speed) 부근이나 그 이상의 속도에서는 SRM의 제어가 점호각( $\theta_n$ )과 도전각( $\theta_c$ )에 의해 이루어진다. 기준 속도보다 낮은 속도에서 점호각을 늦추면(Delay) 전류의 피크치가 제한되어 Commutation이 이루어지는 시점에서 피이크 전류에 도달하게 된다. 필요한 평균 토오크가 낮으면, 점호각을 늦추어 펄스전류가 인덕턴스의 변화가 정극성인 Active 토오크 Region내에 있도록 한다.

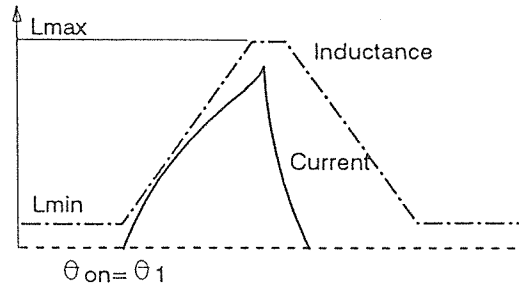
정격속도, 정격부하에서는 피이크 전류가 역기전력에 의해 제한된다. 이때에는 역기전력이 인가전압보다도 높으므로 전류의 상승률이 낮고 전류가 Commutation 이전부터 감소될 수 있다. 따라서 고속에서 더 많은 전력(Power)을 얻기 위해서는 점호각을 Unaligned Position 앞쪽으로라도 당겨서 Active 토오크 Region 내에서는 충분한 크기의 전류가 확보되도록 해야 한다.

도전각은 부하 토오크의 변화에 맞추어 변화시키도록 한다. Motoring Mode로 운전시, 인가전압 턴-오프(turn-off) 시간을 알맞게 조정하여 펄스전류가 Negative Torque Region에서는 충분히 작도록 하여 잔류전류에 의한 Negative 토오크를 최소화해야 한다.

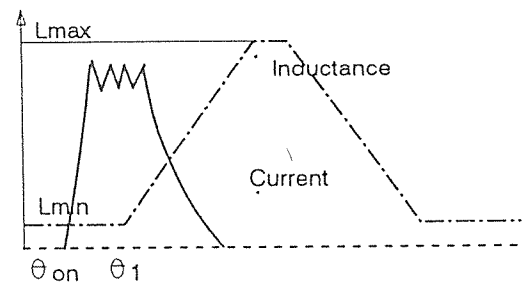
회전자와 고정자가 Align되는 부근에서는 인덕턴스의 증가가 작으므로 Commutation시 전류감소는 인덕턴스 값이 최대가 되는 영역에서 그 감소비가 크다. 이와 같이 SRM drive에서는 두 가지의 각(Angle)을 제어할 수 있다.

즉 점호각( $\theta_n$ )과 도전각( $\theta_c$ )인데, 앞서 설명한 바와 같이 고속운전이나 중요시 요구되는 충분한 전류를 확보하기 위하여 점호각을 앞당겨야 하며 도전각의 경우는 가능하면 일정율(Duty ratio가 unit가 되도록 하는 것이 바람직하다)로 하는 것이 제어가 쉽고, 토오크 Ripple 발생율을 줄이고 저소음화에도 도움이 된다.

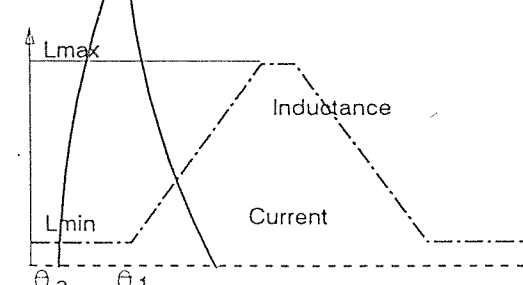
저속이나 경부하시 도전각을 줄이거나 전류 초핑



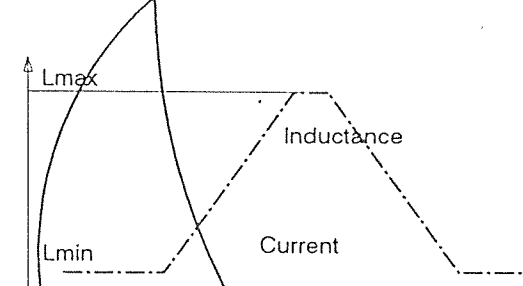
(a)  $n=0.4pu$



(b)  $n=0.4pu$



(c)  $n=1.0pu$



(d)  $n=2.33pu$

그림 11. 전류파형과 속도

을 통해 제어하는데, 전자의 경우는 토오크 Ripple이 커지거나 소음의 원인이 되며, 후자는 전류 스위칭에

## 논단 II

의한 손실을 유발한다. 고성능 응용기기에서는 허용 토오크 Ripple이 적으므로 때에 따라서는 두상 이상에 전류가 동시에 흐르도록 하여(Current Overlap) 요구조건을 만족시킬 필요가 있다.

### 나. Current Control

저속도 운전시는 역기전력과 모우타의 인덕턴스 증가가 낮으므로 인가 전압이 같더라도 전류 상승율이 크기 때문에 고속 운전시보다 피크 전류가 크다. 이 전류를 스위칭 소자의 정격 전류보다 적게 제한하기 위해 스위칭 소자를 ON, OFF시켜 제어한다.

기준 전류(Reference Current)는 부하 조건을 만족시키는 속도 또는 토오크 피드백 루우프에 의해(Speed or Torque Feedback Loop) 조정된다.

이 제어방법은 스위치와 회로요소에 관련된 보조 스위치 기구 또는 Power Recovery 등 다양한 제한때문에 보다 복잡하다. 더우기 자기회로의 포화상태에서 어떤 부하조건을 만족시키는 기준 전류(Reference Current)의 예측이 토오크-전류 관계가 복잡하므로 어렵다. 또한 초핑간의 짧은 시간내에 발생할 수 있는 불규칙적이고, 제어가 불능한 과도기적 회로조건에 의해 불규칙적인 토오크나 저속에서 소음의 원인이 될 수 있다.

## 5. 2 SRM의 구동

### 가. Angle Control

고속운전이나 중부하 운전시는 충분한 전류상승 시간을 확보하기 위해서 그림의 점호각( $\theta_m$ )을 제어해야 하며, 부하에 따라서는 도전각( $\theta_c$ )을 제어할 필요도 있다. 이 경우 전류 초핑은 없이 단일 펄스의 전류형태를 가지며 두 스위치  $T_1, T_2$ 를 통해 De-energize된다. 이때 모우터의 전선에 흐르는 전류는 같은 방향을 유지하나 전압은 다이오드를 통해 역으로 인가되어 에너지 Depletion이 빠르게 진행된다. 특히 주의해야 할 점은 전류 소멸시간이 길어져서 Negative Torque Region에서도 상당량의 전류가 잔존해 있어 Negative Torque가 발생되어 Drive System의 효율등에 영향을 주지 않도록 해야 한다. 모우터의 권선에 저장된 에너지는 다이오드  $D_1, D_2$ 를 통해서 전원측에 충전되거나 또 일부는 다음 상(phase)으로 흐르게 된다.

### 나. Current Control

저속 또는 경부하 운전시는 전류상승이 필요 이상으로 크므로 부하조건에 따른 입력전류의 크기를 제한해 줄 필요가 있는데 다음의 두가지 방법을 고려할 수 있다.

#### 가. Strategy I (그림 12)

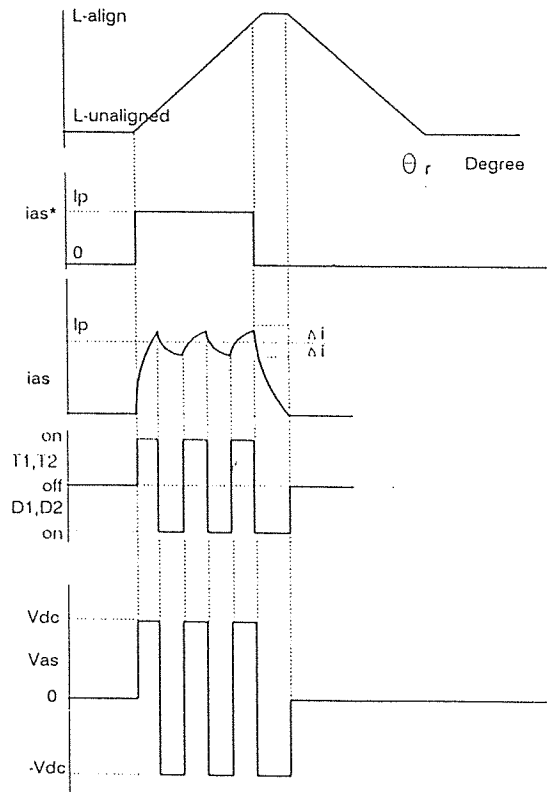


그림 12. Current Control (Strategy I)

그림 10에서 스위치  $T_1, T_2$ 를 턴-온하면 전원으로부터 상권선(Phase Winding)에 전류가 흐르게 된다. 이 때 흐르는 전류가 명령된 전류(Commanded Current)보다 높으면  $T_1$ 과  $T_2$ 를 턴-오프한다.

모우터 권선에 저장된 에너지는 전류가 완전히 소멸될 때까지 흘러 없어지게 된다.

이 두 스위치가 턴-오프되었으므로 자연히 전류방향을 따라 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 가 순방향으로 바이어스(Bias)되어 전원측에 충전된다. 따라서 권선전류는

급격히 감소되어 명령된 전류값 이하로 된다. 이런 제어방식을 그림과 같이 히스테리시스 제어를 이용하여 파형과 연관시켜 설명할 수 있다.

인덕턴스 변화가 모우터 모드에서 Positive 때 필요한 전류를  $I_p$ 라 하면, (점호시점과 Commutation을 무시할 때) 전류피드백 루우프(Current Feedback Loop)를 이용하여 명령되어 전류( $i_{a*}$ )를 따르도록 권선전류( $i_a$ )를 제어할 수 있다. 여기서  $\Delta$ 는 히스테리시스 제어기의 전류윈도우 (Current Window)값이다.

권선 전류값이  $\Delta$ 의 범위를 초과하면 스위치  $T_1, T_2$ 를 동시에 턴-오프한다. 이때 다이오드  $D_1, D_2$ 를 그 전류를 인계받아 전원을 통해 회로를 구성하게 된다. 권선에 인가되는 전압은  $-V_{dc}$ 가 되어 이 기간은 모우터의 인덕턴스에 저장되어 있는 에너지는 전원으로 되돌려지게 된다. 이런 반복된 동작을 통해 에너지는 전원과 모우터 양쪽에서 서로 주고 받게 된다.

나. Strategy II (그림 13)

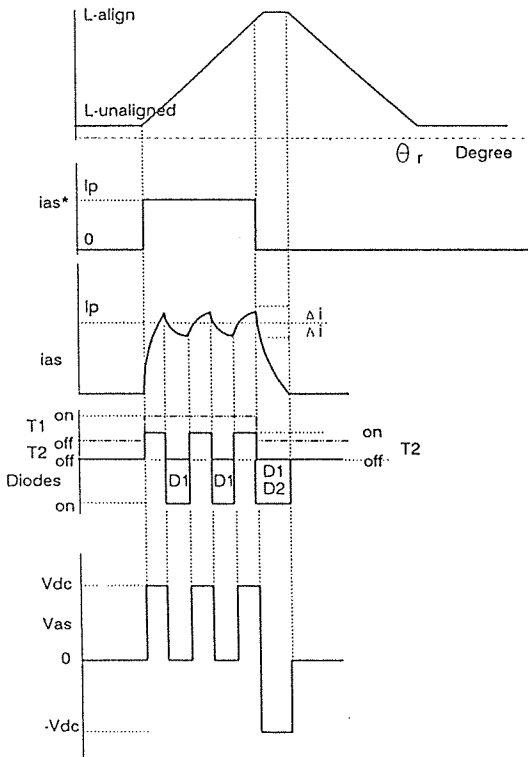


그림 13. Current Control (Strategy II)

이 방법은 DC 전원측의 캐패시터에 많은 리플 전류를 흘리게 되어 그 수명을 줄이게 되고 스위칭 소자의 빈번한 ON, OFF 동작에 의한 스위칭 손실을 낳게 된다.

Strategy I의 문제점들을 보완하기 위한 방법으로 모우터 권선에 저장되어 있는 에너지를 스위치 ( $T_1$  또는  $T_2$ ) 한쪽만을 턴-오프하여 전류가 전원을 거치지 않고 권선과 스위치 및 다이오드 ( $D_1$  또는  $D_2$ )를 통해 순환하도록 한다. 그림에서  $T_1$ 을 턴-오프하면  $D_2$ 가 순방향으로 바이어스되어 권선전류는 권선과  $D_2$  및  $T_2$ 를 통해 연속적으로 흐르게 된다. 이때 권선에 인가되는 전압은 두 반도체  $D_2$ 와  $T_2$ 의 전압 강하만 있으므로 거의 영(Zero)전압에 가깝다. 따라서 권선전류( $i_a$ )는  $I_p - \Delta$ 로 줄어드는데 앞의 방식보다는 전류감소가 훨씬 느리다. 이런 방식을 통해서 스위칭 주파수를 줄여 스위칭 손실과 캐패시터의 리플 전류를 줄일 수 있다. 또 명령된 전류(Commanded Current)가 영(Zero)로 가면, 스위칭  $T_1$ 과  $T_2$ 를 동시에 턴-오프한다.

이 기간은 권선에 걸리는 전압이 다이오드  $D_1, D_2$ 가 도통하는 한  $-V_{dc}$ 가 되며  $i_a$ 가 완전히 소멸되면 그 권선은 전원으로부터 회로적으로 분리된다.

이러한 순환전류식은 전원충전방식보다 장시간 전류가 흐르게 되는데, 이는 권선에 저장된 에너지가 유용한 기계적 에너지로 변환되는 잇점도 있다.

한편 Strategy I의 전원충전방식은 전류를 급격히 줄여야 할 필요가 있을 때 사용한다. 그런 상황은 인덕턴스가 최대가 되는 때나 Negative Slope를 가질때 일어나게 되는데, 전류가 더이상 계속 흐르면 손실이 증가하고 Negative 토크를 발생시키므로 모우터의 평균 토크가 줄어든다.

이 방식을 적용시 중요한 것은 반도체 소자들이 열적 평형과 분담을 위해서 상, 하의 스위칭 소자가 고르게 통전하도록 해야 한다.

## 6. 국·내외 연구동향과 개발

국내에서의 SRM에 대한 연구는 일부대학에서 기초단계의 연구가 진행중이며 한국전기 연구소에서 150W/300Watt, 1800rpm/3600rpm급의 SRM의 개발을 완료하고 그 구동장치와 함께 특성시험중에 있으며,

일부 가전사를 중심으로 실용화를 검토중에 있다.  
현재까지 연구논문등을 통해서 알려진 SRM의 응

표 4. SRM의 응용예와 요구특성

응 용 예	특 성
항공기용 전동기-발전기 및 연료펌프	소형, 경량, 고속회전
공작기계	견고, 박형, 고속회전
전기자동차 및 Traction 모터	견고, 고효율, 높은 토크/관성
광산등의 내환경용	방폭구조, 내후성, 견고성
가전제품	고효율, 구조의 다양화

표 5. 시제품 및 상용품의 예

출 력	특 성
250KW	5,200Nm, 272Wpeak, 500rpm
90KW	25,000rpm
43-75KW	274Nm~477Nm, 2000rpm
7.5-22KW	72Nm~210Nm, 2000rpm
1500Hp	DC 96V, 9000~26000rpm

SRM Drive의 중요특성으로서는 모터와 콘버터가 일체형으로 구성되어 있는점을 들수 있는데 콘버터에 대한 연구개발 방향을 살펴 보면

- Fault-Tolerance
- Minimum KVA rating
- Minimum Switches
- Filter-Free Topologies
- Unity Power Factor (input)
- Snubberless
- High Switching Frequency (=20kHz)
- High Efficiency  
95% > for fractional hp  
98% > for Large Drives
- Packaging and Cost Optimization 등이다.

콘버터의 제어측면에서는 다음과 같은 특성이 요구된다.

- Ripple Torque-Free Operation
- Linearization of Torque to its Command
- Field-Weakening Control
- Dynamic Efficiency Maximization for the Entire Range of Speed and Torque Operation

용특성과 시제품 및 사용품의 예는 다음표와 같다.

- Load Adaptation such as Compressor, Pumps for Noise-minimization and Reduction of shaft fatigue.

## 7. SRM Drive 실용화의 장해요소

위와 같은 장점들을 가진 SRM Drive는 100여년 이상의 역사를 가지면서도 실용화가 정착되지 못한 이유를 살펴보면,

- SRM에 대한 기술인력이 세계적으로도 극소수에 불과하다.
- 모터특성이 지금까지 잘 알려져 있는 직류기 또는 유도기등과는 달리 매우 비선형 적이다.
- 제한적인 시간과 연구자료때문에 Engineer들이 이 새로운 분야에 접근하기가 쉽지 않다.
- SRM Drive System은 Motor, Converter 및 Controller의 종합적인 기술로 이 각각의 Subsystem에 대한 충분한 이해를 가지는 기술력이 요구된다.
- 실질적인 SRM의 역사는 20년 미만으로서 연구가 성숙되어 산업화로의 실용화에 정착되는 시간이 필요하다. 이러한 예로서 Induction Motor Drive의 경우 개발이 60년대에서 70년대말까지 이루어졌지만 80년대에 와서야 충분한 신뢰성을 가지는 실용화단계를 거쳤으며, BLDC나 PMSM Drive의 경우에는 1956년부터 80년대의 연구개발기간을 지나 80년대에 상품화되었으며 지금도 기술개발이 진행중에 있다.

등을 들 수 있다. 이러한 예에 비추어 보면 향후 5년 정도가 지나면 SRM에 대한 기술도 정착단계에 들어설 것으로 예측된다.

## 8. 응용분야

현재 및 가까운 장래에 SRM의 적용이 예상되는 분야로서는 다음과 같다.

- INDUSTRIAL DRIVES
- MINING EQUIPMENT (DRESSER/BJD)
- FANS-COMMERCIAL & INDUSTRIAL

- INDUSTRIAL DC MOTOR REPLACEMENT
- COMPRESSORS (INDUSTRIAL)
- ELECTRIC TRUCKS
- CENTRIFUGES
- ACTUATORS
- AUTOMOTIVE AUXILIARIES
- DOMESTIC WASHING MACHINES
- HIGH-PERFORMANCE AUTOMOTIVE ACTUATORS
- AUTOMOTIVE FANS
- FOOD PROCESSORS
- TEXTILE SPINNING
- VEHICLE PROPULSION
- SPINDLE DRIVES
- HIGH PERFORMANCE METAL PROCESSING
- US STYLE WASHING MACHINES
- INDUSTRIAL DRIVES-VARIED MARKETS, SIZES & SPEEDS (MAJOR SUPPLIERS)
- POWER HAND-TOOLS
- VACUUM CLEANERS
- PUMPS : V HIGH POWER, GEN'L PURPOSE & SPECIAL PURPOSE
- COMPRESSORS : MEDIUM & LARGE

## 9. 결 론

SRM 분야의 세계적 연구 개발동향을 중심으로 국내 기술개발 방향을 정리해 보면,

- 강화되고 있는 지적 재산권 보호의 측면에서 체계적으로 특허권등에 대한 이 분야의 조사가 필요하다.
- 외국에서 내부적으로 진행되고 있는 응용분야에 대한 정보를 입수하여 국내에서도 기술개발에 투자를 강화해야 한다.
- 기술확보 초기단계로서 SRM 모터 설계기술과 그 성능 향상 고효율화를 위한 Converter Topology를 개발하고 동일 성능을 유지한 저가의 Converter를 개발해야 한다. 이를 위해서는 Sensorless Control 기술과 New Topology 개발이 요구된다.

현재 세계적인 추세이며 국내에서도 강력하게 요구되는 에너지 절약방안의 하나인 고효율기기 개발과 고신뢰성 고안정성 및 무유지보수의 전동기 개발을 목표로 과감하게 연구 및 개발을 활성화시켜 기업화 품목으로 도입해야 한다.

**세계속의 한국은 세계속의 기술로 부터**