

## 진공청소기용 단상 스위치드 리럭턴스 모터

임준영, 정윤철, 김상영, 최용원, 김정철  
LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소 요소 기술 그룹

### Single Phase Switched Reluctance Motor for Vacuum Cleaner

Junyoung Lim, Yunchul Jung, Sangyoung Kim, Yongwon Choi, Jungnchul Kim  
Core Technology Team  
Digital Appliance Research Lab.

#### ABSTRACT

Universal motors are mainly used for vacuum cleaner application. There are a lot of researches on SRM that applies home appliance throughout the world. The manufacturing cost of SRM drive makes it hard to expand its application to home appliance. This paper presents Single Phase SRM for the vacuum cleaner that has advantage in cost and performance over conventional universal motor.

This paper proposes new power device driving scheme by using SRM switching characteristic. The driving scheme is very simple and inexpensive. Dwell Time Control method is used for the minimum switching loss of power device. The switching frequency of power device is less than 4.5kHz at 45,000rpm. By use of this scheme, power device based on very small switching losses can be used on SRM drive. Also, the biggest problem in single phase SRM is starting, this paper shows a new starting algorithm with two hall sensors, accelerating and running sensors, respectively.

Finally, the proposed Single Phase SRM achieves higher efficiency and long life time compared to universal motor. Its life time is more than 1500 hours. Its life time is extended 4 times than that of conventional motor and its suction power is increased 20% at the same volume of conventional universal motor.

#### 1. 서 론

지금까지 청소기용 모터로서 유니버설 모터가 일반적으로 사용되었다. BLDC가 청소기용으로 등장하였으나, 가격 문제로 적용되지 못하였다.

유니버설 모터가 제작상의 어려움에도 불구하고, 고속 회전용 모터로서 오래 동안 자리를 잡아온 것은 드라이브가 없이 운전이 가능하여 저가격의 장점이 있으며 속도조절 필요 시 매우 간단하게 해결 가능하다는 장점이 있었기 때문이다.

청소기 모터는 점점 더 높은 흡입력을 필요로 하여 흡입력이 증가되는 경향이다. 그 결과, 유니버설 모터에서는 이제 높은 흡입력을 얻기 위하여 브러시 부분에서의 수명이 문제가 되고 있는 실정이다. 즉 흡입력을 높임으로써 브러시의 수명이 단축되는 문제에 당면한 것이다. 현재로서는 브러시의 수명을 연장시키는 것도 한계에 이르렀다.

이를 해결하기 위한 방법으로 브러시리스 모터의 개발은 필연적이며 가격면에서 앞의 영구 자석 타입의 BLDC 모터의 실패 문제를 보아 가격 측면에서도 저가격으로 제작될 수 있어야 한다. 본 논문의 단상 SRM은 기존의 asymmetric topology를 그대로 사용하나 기존의 3상 또는 4상과 같이 복수개의 leg로 인버터가 구성되지 않고 그림 1 처럼 단 1개 만으로 구성이 되므로 저가격의 인버터를 구성할 수 있다.

본 논문에서는 흡입력을 높고, 수명이 긴 모터로서 그림 1과 같이 6개의 고정자극과 6개의 회전자극을 가진 단상 SRM을 제안하고, 이에 대한 설계 및 회로 구성과 알고리즘을 구현하였다. 이를 검증하기 위한 여러 가지 실험을 통해서, 진공 청소기에 있어서의 단상 SRM의 성능을 확인하였다.

## 2. 본 문

### 2.1 단상 SRM

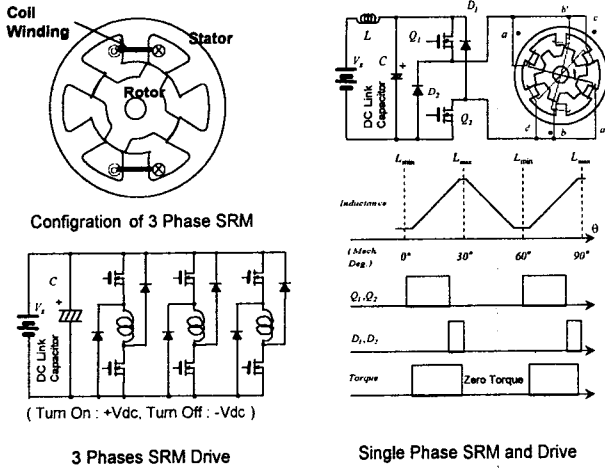


그림 1 3상 및 단상 SRM의 inverter  
Fig. 1 Three phases and single phase SRM asymmetric bridge inverter

본 논문에서는 청소기용 고속 팬이라는 부하의 특성을 고려하여 단상 SRM을 제작하여 실험하였다. 단상 SRM은 기존의 asymmetric topology를 사용하나 기존의 3상또는 4상과 같이 복수개의 leg로 인버터가 구성되지 않고 그림 1 처럼 단 1개 만으로 구성되어 진다. 단상 SRM의 경우 자료가 옆의 극으로 루프를 형성함에 따라 자료가 3상의 6/4구조보다 짧아지는 장점이 있어 철손을 줄일 수 있는 구성이 된다.

특히 기존의 SRM은 권선의 방향에 관계가 없는 구성이었으나 단상이 되면서 상의 극성이 효율에 영향을 미

치게 된다. 이것은 매우 중요한 factor가 되며 자속이 극부적으로 포화되는 현상과 긴 자로를 갖기 때문에 효율을 상당히 감소시키는 악영향을 미치게 된다.

### 2.2 기동

단상 SRM의 운전에 있어 문제가 되는 것은 기동 부분이다. SRM은 인덕턴스가 변화하는 구간에서 토크가 발생한다. 즉 회전방향에 대해 인덕턴스가 증가하는 부분에서 양의 토크가 발생하고, 회전방향에 대해 인덕턴스가 감소하는 부분에서는 음의 토크가 발생한다. 인덕턴스의 변화가 없는 부분에서는 토크가 발생하지 않는다. 단상 SRM은 구조상 토크가 0인 위치, 즉 인덕턴스가 가장 큰 부분(Lmax)이나 가장 작은 위치(Lmin)에서 회전자에 정지하고 있을 경우에는 권선에 큰 전류를 가해도 토크가 발생하지 않는다. 초기 위치를 고정시켜 주지 않을 경우, 기동이 되지 않는다. 본 논문에서는 단상 SRM의 기동을 위해서, 정지시에 운전방향에 대해 양의 토크를 가지는 위치에 회전자가 위치하도록 설계를 하였다. 이를 구현하기 위해 회전자의 윗부분에 회전자와 같이 회전하는 영구자석을 그림 2와 같이 장착했다. 그림 2에서 보듯이 영구자석은 N극, S극이 일정한 각도를 두고 변화하는 링 마그넷을 사용하였다. 조그만 영구자석을 양의 토크가 발생하는 부분에 부착시켜 주면 항상 회전자가 그림 3 (a)와 같은 정상 위치에서 정지한다. 파킹 마그넷에서의 문제는 unstable equilibrium 상태이다. 즉 파킹 마그넷만을 가지고 해결될 수 없는 그림 3 (b)와 같은 unstable equilibrium 위치에서 회전자가 위치할 가능성이 있다. 이와 같이 초기에 회전자가 unstable equilibrium 위치에 있는 것을 방지하기 위해서는 align 펄스를 주도록 설계했고, 이후 정상 위치인 그림 3 (a)와 같이 회전자가 위치하게 되어 기동준비를 마치게 된다.

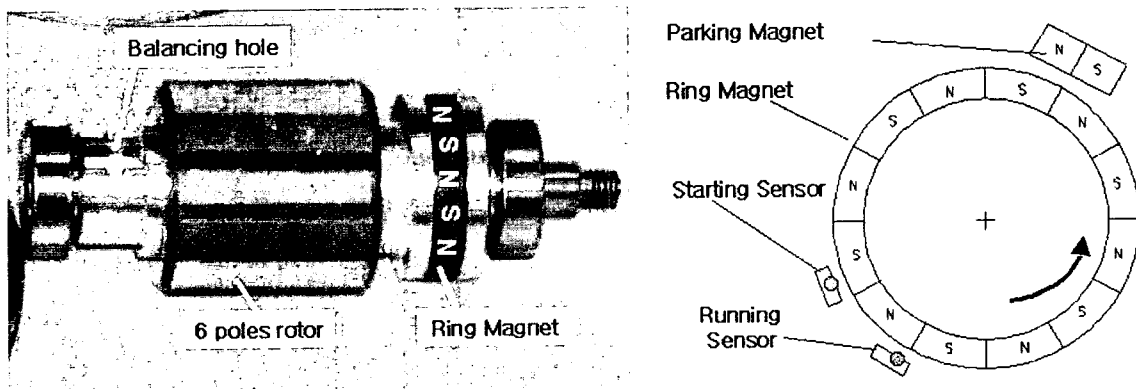


그림 2 단상 SRM 회전자와 마그넷 구조  
Fig. 2 Single phase SRM rotor and magnet part configuration

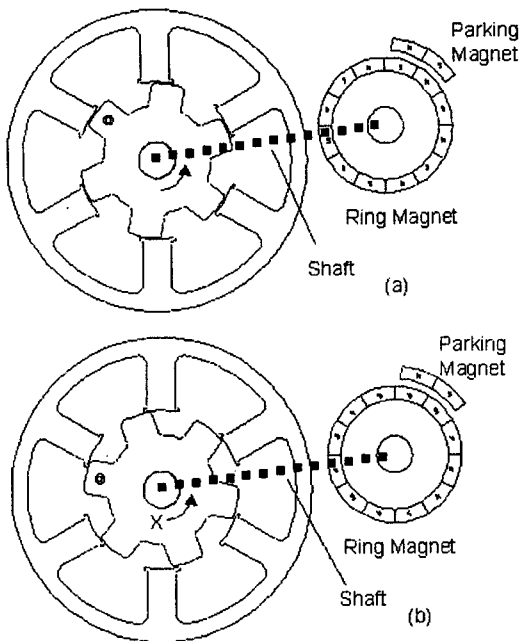


그림 3 파킹 마그넷 위치  
 (a) 정상위치 (b) unstable equilibrium 위치  
 Fig. 3 Parking magnet  
 (a) normal position  
 (b) unstable equilibrium position

### 2.3 Two sensor drive SRM

SRM에서 있어서 고속운전을 위한 전류의 build up 문제로 인해, Advance Angle 제어가 매우 중요하다.

또한 속도에 따른 각 조절은 모터의 회전수가 매우 빠르기 때문에 고속의 프로세싱이 가능한 MICRO PROCESSOR를 필요로 한다.

하나의 센서 신호를 MICRO PROCESSOR로 delay를 시켜 이것을 advance angle로 이용할 수도 있으나 매우 빠른 속도의 DSP정도의 계산 처리 수준이 요구되며 신뢰성 측면에서도 하드웨어에서 일정위치가 되면 turn-off시키는 것에 비교하면 매우 낮은 편이다.

본 논문에서의 고속의 운전을 위해 두 개의 센서 즉 기동 센서(starting sensor) 및 운전 센서(operating sensor)로 운전하는 방법을 개발하였다. 즉 기동 센서는 그림 4와 같이 인덕턴스 프로파일 상에서 운전방향으로 인덕턴스가 가장 낮은 부분으로부터 4도 뒤진 위치에서 신호가 발생하고, 운전 센서는 기동 센서보다 14.5도 앞선 위치에서 신호가 발생하게 했다. 영구 자석은 그림 2에서와 같이 링의 형태로 되어 있으며, 회전자의 윗부분에 고정되어 회전자와 같이 회전하게 되어 있다. 기동 센서 및 운전 센서는 링마그네트의 N극에 반응하여 각각 30도의 구간동안 HIGH신호를 발생한다. S극이 될 때에는 LOW의 신호를 발생한다.

두 개의 센서를 이용하는 전체 알고리즘은 다음과 같다. 초기의 기동시에는 기동 센서 및 운전 센서에서 발생한 신호가 모두 HIGH인 구간에서 PWM을 실행한다. 일정 속도에 도달하면, 운전 센서의 신호를 받아서

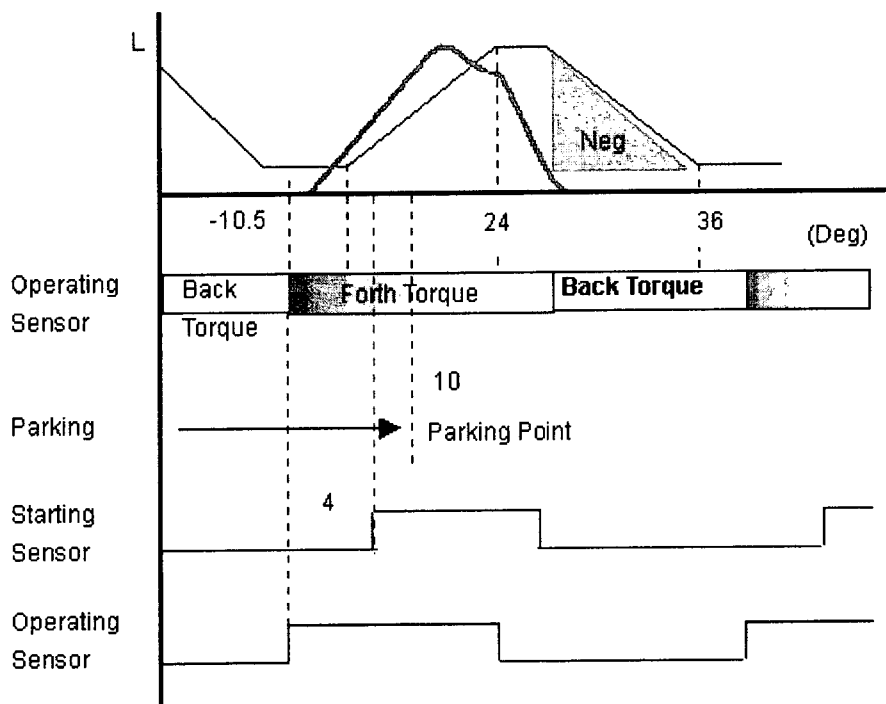


그림 4 인덕턴스 프로파일 및 센서 신호  
 Fig. 4 Inductance profile and sensor signal

DWELL TIME CONTROL을 실행하여 고속 운전을 실행한다.

기동 센서는 초기에 양의 토크가 발생하는 구역에서 PWM을 수행하여, 속도를 올리게 된다. 즉, 그림 4에서 기동 센서 및 운전 센서가 모두 HIGH신호를 내는 구역에서 PWM을 신호를 발생한다. 회전 속도가 일정 속도 이상이 되면 운전 센서를 이용하는 DWELL TIME CONTROL로써 회전 속도를 상승시킨다. 운전 센서는 인덕턴스가 가장 낮은 부분으로부터 10.5도 ADVANCE된 부분에 위치한다. 이렇게 ADVANCE된 위치에 운전 센서를 위치시키는 이유는, 초기에 전류를 충분히 올려서 토크를 많이 발생시키기 위함이다. ADVANCE된 각이 MISALIGN부분보다 앞이므로 부분적으로 회전방향에 반대되는 역토크가 발생하게 된다. 그러나 이 부분에서 발생하는 역토크는 회전자가 어느 정도 이상의 속도를 가지고 회전하고 있으므로, 회전자의 에너지로 zero 및 역토크 구간을 넘어 갈 수 있다.

## 2.4 Dwell time control

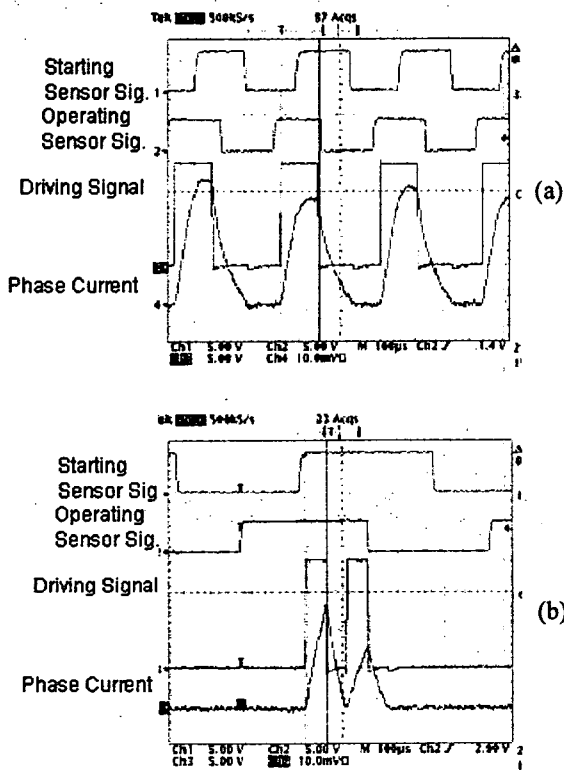


그림 5 (a) DWELL TIME CONTOR (b) PWM  
Fig. 5 (a) DWELL TIME CONTOR (b) PWM

본 논문에서는 정상 상태의 운전에서는 DWELL TIME CONTROL를 채택한다. DWELL TIME CONTROL은 부하에 따라 혹은 원하는 RPM으로 모터를 운전하기 위해 일정시간 동안 스위치를 ON하여 회전 속도를 제어할 수 있다. DWELL TIME CONTROL은 파워 디바이스의 SWITCHING수가 적어서 EMI NOISE를 줄일 수 있고, 인버터의 효율을 상승시킬 수 있을 뿐만 아니라 저가격의 소자를 사용할 수 있다. 초기 가속 구간에서는 PWM을 사용하여 속도를 올리고 그 이상의 속도에서는 DWELL TIME CONTROL을 적용하는 방법을 채택하였다. DWELL TIME CONTROL이 시작되면, 고속 제어를 위해서 MICRO PROCESSOR와 센서 신호를 이용해서 DWELL TIME을 조절한다. 본 논문의 DWELL TIME CONTROL은 고속 제어를 위해 기동 센서 외에 따로 장착한 운전 센서의 신호를 인터럽트로 받아서 DWELL TIME을 조절한다. 그림 5는 PWM과 DWELL TIME CONTROL 방식을 보여 준다.

## 2.5 실험

청소기에서 소음은 펜소음이 지배적이기 때문에 모터의 소음은 큰 영향을 주지 않는다. 그림 6은 제품 상태에서의 universal motor와 SRM의 소음의 FFT 결과이다.

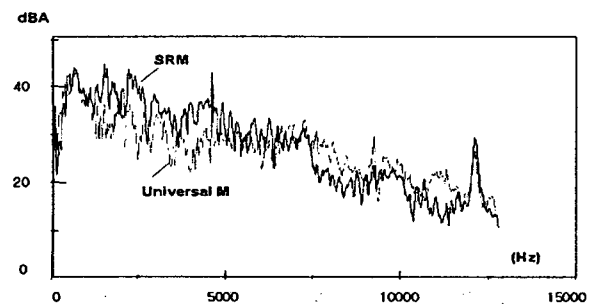


그림 6 SET상태에서의 FFT(Universal motor & SRM)  
Fig. 6 SET FFT(Universal motor & SRM)

진공 청소기는 고속 고온에서 운전이 되기 때문에, 온도 실험이 필수적이다. 온도가 높은 경우는 그림 7에서 보듯이, 청소기의 흡입구가 막혔을 때이다. 온도의 상승부는 유로에 대해서 모터의 뒷 부분이며, 바이패스 홀만으로도 드라이브 및 센서가 위치한 모터 전체의 신뢰성에는 문제가 없음을 확인하였다.

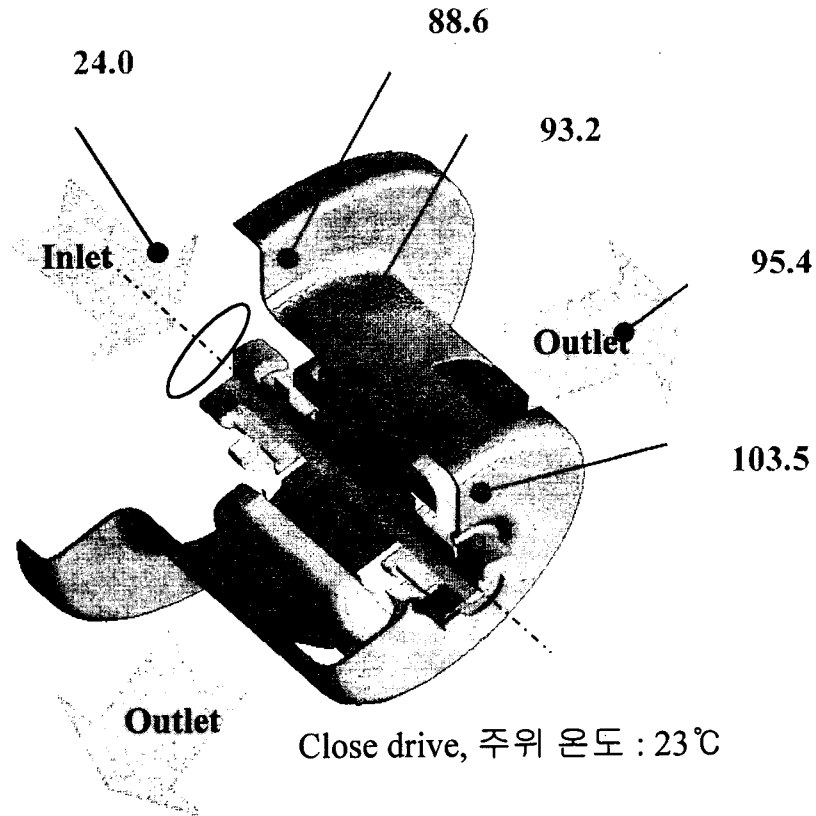


그림 7 SRM 내부의 온도 분포

Fig. 7 The temperature distribution of the inner part of SRM

### 3. 결 론

청소기구동을 위한 단상 SRM을 제작하고 실험한 결과를 요약하면 다음과 같다. 기존 유니버설 청소기에 비하면 3배 이상의 수명 증가를 보였으며 1,600시간 수명 시험 후 흡입력이 전혀 처음과 비교하여 저하되지 않은 특성을 보였다.

인버터 타입이면서도 스위칭소자를 2개만을 사용하였으며 일반적인 6개의 소자를 사용하는 3상 SRM 비교하여 성능 면이나 가격 면에서 우수하여 향후 어플라이언스용 청소기 모터로서 넓게 활용될 수 있는 가능성을 보였다.

단상 SRM에서 2개의 센서만을 사용하기 때문에 생기는 기동 문제는 회전자와 고정자 부분에 파킹 마그네트를 이용하여 해결하였다.

소음측면에서는 청소기는 팬소음이 지배적이기 때문에 기존의 유니버설 모터나 SRM이나 전체 세트의 소음 면에서는 큰 차이가 없음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] D.A. Torrey and J.H. Lang, "Optimal efficiency excitation of variable reluctance motor drives," *IEE Proc. -B*, pp. 1 Jan. 1991.
- [2] V. Torok and K. Loreth, "The world's simplest motor for variable speed control of cyrano motor, a PM-biased SR-motor of high torque density," *EPE*, pp. 44~48, 1993.
- [3] T.J.E Miller, *Switched Reluctance Motors and their Control*, Magna Physics Publishing.
- [4] A.E. Fitzgerald and Charles kingsley Jr., *Electric Machinery -Fifth Edition*, McGRAW-HILL.
- [5] A.Weller and P.Trawinski, Design and control of low power switched reluctance motors, *EPE.*, 1991.
- [6] Philip C. Kjaer, Jeremy J. Gribble and T.J.E.Miller, High-Grade Control of switched reluctance machines, *IEEE Trans. on industry application*, Vol. 33, No. 6, pp. 1585~1593.
- [7] Lawrenson P.J., Stephenson J.M., Blenkinsop P.T., Corda J. and Fulton N.N., Variable speed switched reluctance motors, *IEE proc. Pi.B.*, Vol. 127, No.4 , pp. 253~256, 1980.