

# 청소기용 단상 SRM의 PWM/PDM 운전 기법 비교 고찰에 관한 연구

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

## A Comparison of the PWM/PDM Control Scheme for Single Phase Switched Reluctance Motor for Vacuum Cleaner

Yohan Lee, Sangyoung Kim, Junyoung Lim, Jungnchul Kim  
 Core Technology Team  
 Digital Appliance Research Lab.

### ABSTRACT

This paper compares PDM and PWM for single phase switched reluctance motor for vacuum cleaner. Generally, PWM control scheme is preferred because of small torque ripple compared with PDM control scheme. However, as the motor speed of the vacuum cleaner is above 20,000[rpm], the torque ripple is not problem any more. PDM control scheme is better than PWM control scheme considering loss of power device and EMI.

### 1. 서 론

일반적으로 청소기용 모터는 유니버설 모터가 사용된다. 유니버설 모터는 드라이브가 없이 운전이 가능하여 가격이 저렴하다는 것과 간단하게 속도조절을 할 수 있다는 장점이 있다.

하지만 청소기 모터는 점점 더 높은 흡입력을 필요로 하여 흡입력이 증가되는 경향이며 그 결과 브러시 부분에서의 수명이 문제가 되고 있다. 현재로서는 브러시의 수명을 연장시키는 것도 한계에 이르렀으며 이를 해결하기 위해 브러리스 모터를 적용하려는 연구가 지속되고 있다[2].

기술적인 면에서는 브러리스 모터 적용이 어렵지 않지만 가전업체의 특성상 가격면에서 기존의 유니버설 모터대비 경쟁력이 있어야 한다.

단상 SRM은 기존의 3상/4상 인버터와는 달리 1개의 leg로 구성이 되므로 저 가격의 인버터를 구성할 수 있다. 또한 단상 SRM의 적용시 문제가 되는 기동과 소음 등도 청소기 팬 부하라는 특수상황으로 인해 더 이상 문제가 되고 있지 않다[3-4].

SRM의 제어 방식은 크게 PWM(pulse width modulation) 기법과 PDM(pulse dwell time modulation) 기법으로 구분할 수 있다. 통상 저속 영역에서는 PWM 기법이, 고속 영역에서는 PDM

기법이 사용되지만 두 가지 제어 기법이 다 사용 가능한 속도 범위도 존재한다.

본 연구에서는 PWM 기법과 PDM 기법에 대해 각각의 특성을 비교 고찰하고자 한다. 일반적으로 PWM 기법에 비해서 PDM 기법은 토크리플(torque ripple)에 의한 진동/소음이 더 심하지만 청소기의 사용 조건인 20,000rpm 이상의 초고속용에 적용한다면 소음은 거의 차이가 없으며 오히려 PDM이 시스템의 안정성을 높이는 장점요소가 많은 제어방법임을 보일 것이다.

### 2. 본 문

#### 2.1 1 단상 SRM의 구조

단상 SRM은 기존의 asymmetric topology를 사용하나 기존의 3상 또는 4상과 같이 복수개의 leg로 인버터가 구성되지 않고 그림 1처럼 단 1개만으로 구성되어 진다. 따라서 기존의 3상/4상 인버터에 비해 사용되는 스위칭 소자의 수가 적기 때문에 저가의 시스템이 구현가능하다.

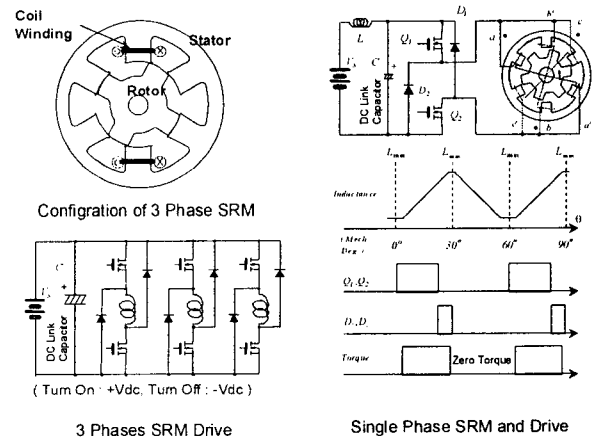


그림 1 3상 및 단상 SRM의 inverter  
 Fig. 1 Three phases and single phase SRM asymmetric bridge inverter

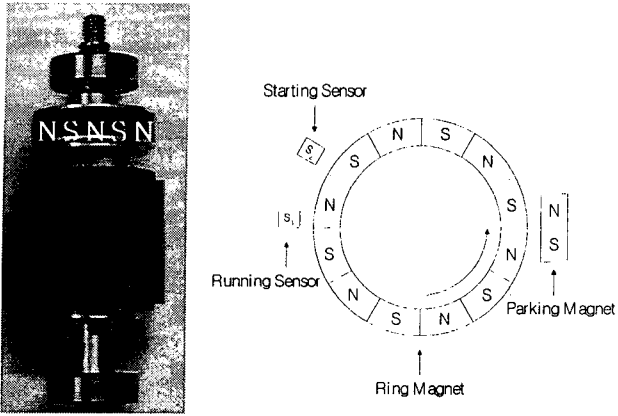


그림 2 단상 SRM 회전자와 마그넷 구조  
Fig. 2 Single phase SRM rotor and magnet part configuration

## 2.2 단상 SRM의 운전<sup>[6]</sup>

### 1) 기동

단상 SRM의 운전에서 가장 문제가 되는 부분이 기동이다. 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( $L_{max}$ )이나 가장 작은 위치( $L_{min}$ )에서 회전자가 정지하고 있을 경우에는 권선에 전류를 가해도 토크가 발생하지 않으며, 따라서 기동을 위해서 초기 위치를 고정시켜주어야 한다. 이를 구현하기 위해 그림 2와 같이 회전자 상단에 회전자와 같이 회전하는 영구자석을 장착했다. 그림 2에서 보듯이 영구자석은 N극, S극이 일정한 각도를 두고 변화하는 링 마그넷을 사용하였으며 고정자에는 양의 토크가 발생하도록 로터를 위치시키기 위해서 영구자석(parking magnet)을 부착시켜주는 방법을 사용하였다.

### 2) 2-sensors 운전

SRM의 고속운전을 위해서는 전류의 build-up 문제로 인해 선행각(advance angle) 제어가 매우 중요하다. 또한 속도에 따른 각 조절은 모터의 회전수가 매우 빠르기 때문에 고속의 프로세싱이 가능한 마이크로프로세서( $\mu$ -processor)를 필요하다.

하나의 센서 신호를 마이크로프로세서로 딜레이(delay)를 시켜 이것으로 실시간으로 선행각을 계산할 수 있지만 매우 빠른 처리속도가 요구되며 신뢰성 측면에서도 하드웨어에서 일정위치가 되면 turn-off시키는 것에 비교하면 매우 낮은 편이다 [1], [5].

저가의 마이컴으로 고속의 운전영역까지 사용하기 위해서 두 개의 센서, 즉 기동센서(starting sensor) 및 운전센서(operating sensor)로 운전하는 방법이 제안되었다.

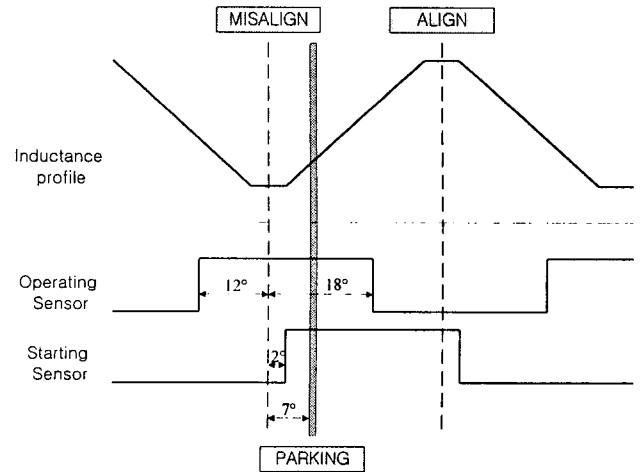


그림 3 센서위치  
Fig. 3 Position of 2-sensor

초기 기동시에는 기동센서 및 운전센서에서 발생한 신호가 모두 high인 구간에서 PWM 제어를 하게 된다. 일정 속도에 도달하면 운전 센서의 신호를 받아서 PDM 제어를 하게 된다.

## 2.3 PWM/PDM

PWM 기법은 주로 저속에서 사용이 된다. 실 구현방법을 보면 그림 3에서 보는 것처럼 양의 토크가 발생하도록 기동 센서 및 운전 센서가 모두 high신호를 내는 구역에서 PWM 신호를 발생한다. PWM 기법은 상단, 하단 스위치를 동시에 온-오프 제어해주는 하드스위칭 방식과 상단, 또는 하단 스위치중 어느 하나는 온을 유지하고 나머지 한 스위치만 온-오프를 하는 소프트스위칭 방법이 있다. 일반적으로 PWM 기법을 사용하게 되면 토크리플이 감소하여 진동이 감소하게 된다.

반면 일정 속도 이상이 되면 운전 센서를 이용하는 PDM 기법을 이용하여 회전 속도를 상승시킨다. PDM 기법은 부하에 따라 혹은 원하는 속도로 모터를 운전하기 위해 일정시간 동안 스위치를 온(on)하여 회전 속도를 제어하는 것이다. 실제 구현을 보면 운전 센서는 인덕턴스가 가장 낮은 부분으로부터 12도 선행된 부분에 위치한다. 이렇게 선행된 위치에 운전 센서를 위치시키는 이유는 초기에 전류를 충분히 올려서 토크를 많이 발생시키기 위함이다. 선행각이 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.

PDM 기법을 사용하면 토크 리플은 증가하지만 파워 디바이스의 스위칭 수가 적어서 EMI noise가 감소되며 인버터 스위칭 손실이 감소되기 때문에 효율이 증가한다. 따라서 초기에는 PWM을 사용하여 가속하고 일정 속도 이상에서는 PDM 기법을 적용하는 것이 일반적인 방법이다.

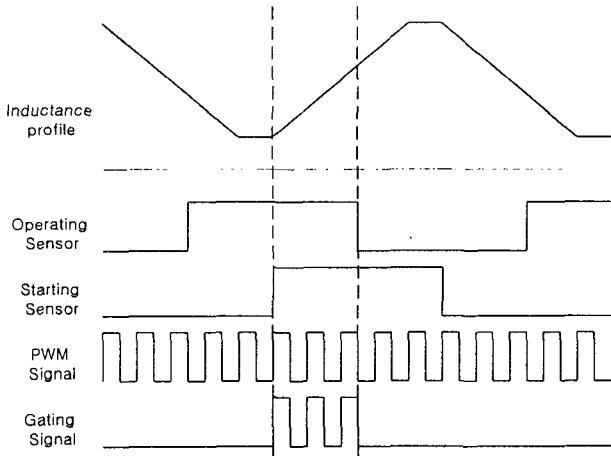


그림 4 PWM 기법  
Fig. 4 PWM control scheme

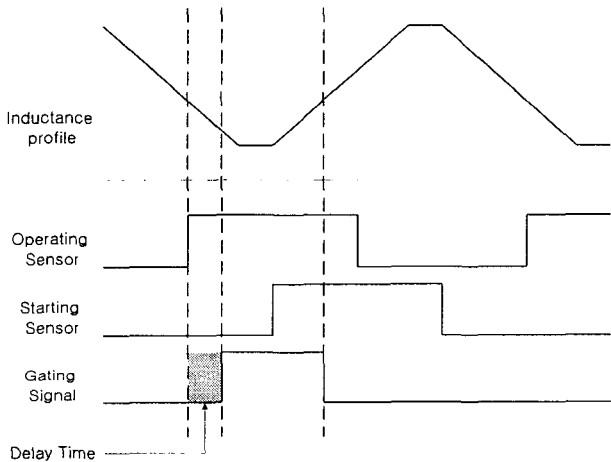


그림 5 PDM 기법  
Fig. 5 PDM control scheme

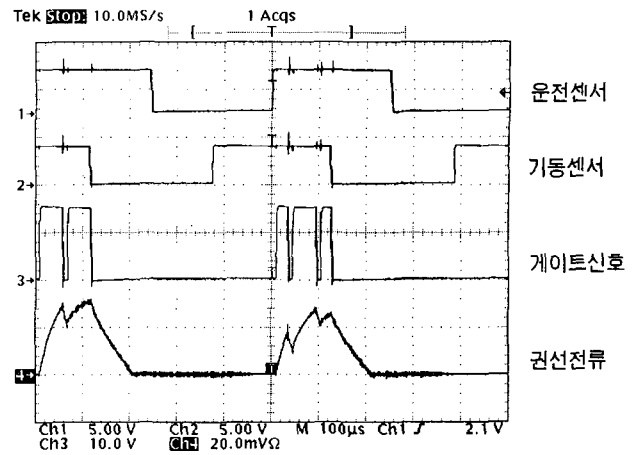
### 2.4 실험 및 고찰

청소기 응용에서 저속이라고 말할 수 있는 20,000~22,000[rpm]의 속도범위에 대해서는 PWM 제어기법 또는 PDM 제어기법을 선택적으로 사용 가능하다. 그 이상의 속도 범위에 대해서는 PWM을 적용해도 1-2 펄스밖에 나오지 않기 때문에 PDM과 PWM 제어기법 차이가 미미하며, 통상 불필요한 스위칭을 감소하기 위해서 PDM을 적용하게 된다.

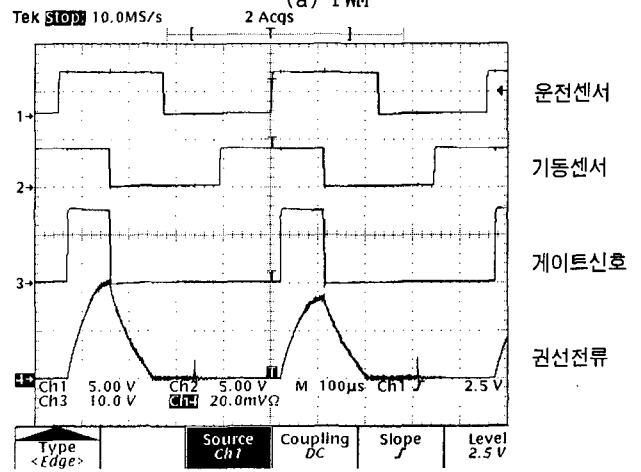
22,000[rpm] 속도에 대해서, 실제 응용에 있어서 가장 중요한 항목인 소자의 손실, 소음, 그리고 EMI 측면에서 두 가지 제어 기법을 비교해보자. 실험조건은 다음의 표 1과 같다. 실험은 입력 220V에 대해서 청소기 회전 속도를 22,000rpm으로 고정 되도록 PWM 듀티 및 PDM의 딜레이를 가변하였다. 실험파형이 그림 6에 나와 있다.

표 1 실험조건  
Table 1 Experimental condition

IGBT	SGH80N60UF	입력전압[V]	220
DIODE	FFPF20U60S	속도[rpm]	22,000
Carrier 주파수	16kHz	입력[W]	PWM 394
소음측정	전방 1m		PDM 392



(a) PWM



(b) PDM

그림 6 PWM/PDM 제어기법 적용시 실험파형  
Fig. 6 Experimental waveform with PWM/PDM control

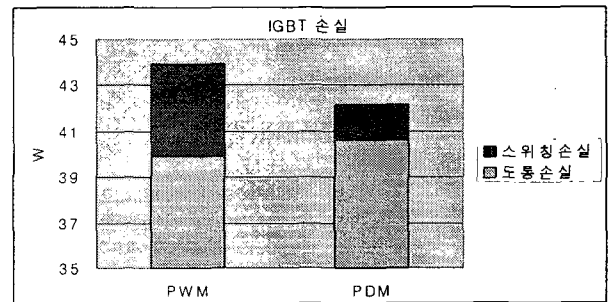


그림 7 PWM/PDM 제어기법 적용시 손실비교  
Fig. 7 Comparison of total loss for PWM/PDM

입력을 비교하면 PWM의 경우는 394W, 그리고 PDM의 경우는 392W이다. 동일 rpm에 대해 모터 효율이 거의 차이가 없다고 가정하면 입력의 차이는 IGBT 도통손실과 스위칭손실의 차이라고 볼 수 있다. 먼저 도통손실을 소자에 흐르는 전류로부터 측정하여 계산하면 PWM의 경우는 39.95W, 그리고 PDM의 경우는 40.63W이다. 이 차이는 그림 6의 실험 파형에서 볼 수 있는 것처럼 PDM의 경우가 rms 전류가 더 크기 때문이다. 스위칭손실은 근사적으로 계산하면 PWM의 경우는 약 4W, 그리고 PDM의 경우는 약 1.5W가 된다. 계산 결과를 그림 7에 정리하였다.

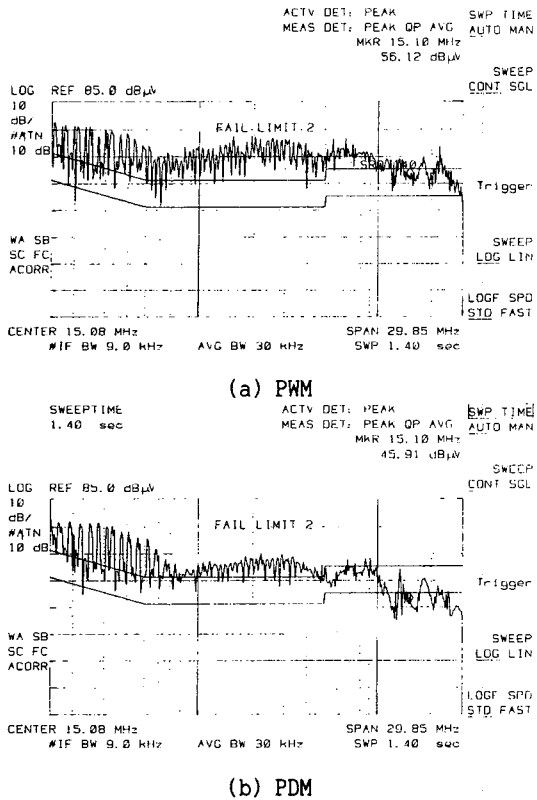


그림 8 PWM/PDM EMI 비교  
Fig. 8 Comparison of EMI for PWM/PDM

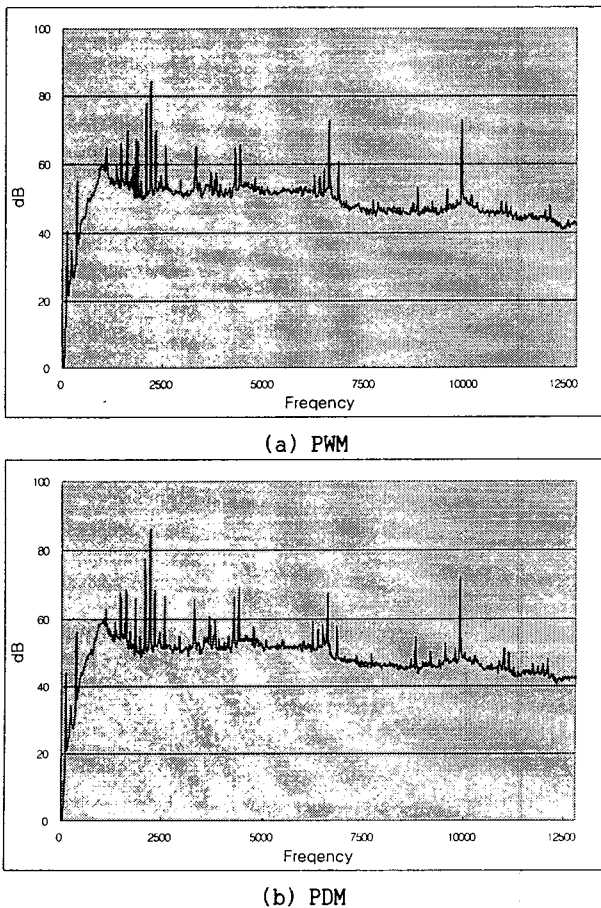


그림 9 PWM/PDM 소음비교  
Fig. 9 Comparison of noise for PWM/PDM

EMI를 비교한 것이 그림 8에 나와 있다. 스위칭이 많은 PWM 제어시의 EMI가 PDM 제어시의 EMI보다 더 문제가 됨을 알 수 있다. 특히 PWM 제어시 10~20MHz 주파수 대역에서 기준치를 훨씬 상회하는 노이즈가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 부분은 EMI 필터 설계시 가장 문제가 되는 부분으로 큰 값의 필터를 사용해야 노이즈를 억제할 수 있다. 따라서 PDM 제어시 EMI 측면에서 훨씬 유리한 것을 알 수 있다.

소음을 비교한 것이 그림 9에 나와 있다. 전체 소음은 PWM의 경우는 87.1[dB], PDM의 경우는 88.6[dB]로 스위칭 횟수가 적은 PDM의 경우 소음이 조금 더 크지만 그 차이는 거의 유의수준오차 정도의 값이며 피크 소음이 발생하는 주파수 대역 등의 차이가 거의 없으므로 소음은 차이가 없다고 할 수 있다. 이는 청소기의 경우 고속회전으로 인한 팬 BPF(blade pass frequency) 성분의 소음이 지배적이기 때문이다.

### 3. 결 론

단상 SRM 청소기에 사용되는 PWM 기법과 PDM 기법의 특성을 비교하였다. 고찰한 결과에서 알 수 있듯이 일반적으로 PDM 기법은 토크 리플이 크기 때문에 진동 및 소음 면에서 취약하나 청소기와 같은 고속의 응용에 있어서는 PWM 기법 적용시와 차이가 미미하며 오히려 소자의 손실 및 EMI를 고려할 때 더 적합한 제어방법임을 알 수 있다.

### 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-based 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] Philip C. Kjaer, Jeremy J. Gribble and T. J. E. Miller, "High-Grade Control of Switched Reluctance Machines," *IEEE Trans. on IA*, vol. 33, no. 6, pp. 1585-1593.
- [6] 임 준영, 정 윤철, 김 상영, 최 용원, 김 정철, "진공 청소기용 단상 스위치드 리럭턴스 모터" *하계전력전 자학술대회 논문집*, pp. 247-251, 2001.