

## 적정 전압 여자를 적용한 이중 정격 SRM의 가변속 운전

안영주<sup>†</sup>

(Received January 13, 2016 ; Revised April 1, 2016 ; Accepted April 1, 2016)

### Variable speed operation of SRM with dual rating using proper voltage excitation

Young-Joo An<sup>†</sup>

**요약:** 본 논문은 적정 전압 여자를 적용한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 효율 개선에 대하여 기술한다. 세탁기와 같이 적용 속도에 큰 차이가 있는 부하의 경우 일정한 직류링크전압으로는 효율 개선에 어려움이 있다. 저속운전영역에서 과도한 직류전압의 영향을 줄이기 위해 보통 사용되고 있는 구동회로내의 다이오드 정류기 대신 SCR을 사용한 AC-DC 컨버터가 SRM 드라이버에 포함된다. AC-DC 컨버터는 저속에 알맞은 적정한 여자전압을 공급한다. 실험결과를 통하여 저속 영역에서 효율이 개선됨을 확인하였다.

**주제어:** 스위치드 릴럭턴스 전동기, 적정 전압 여자, AC-DC 컨버터, 효율개선

**Abstract:** This paper addresses the efficient improvement of the Switched Reluctance Motor(SRM) by the proper voltage excitation. In the case of loads with large operational motor-speed differences such as washing machine, an SRM system driven by a constant DC-link voltage is not useful for improving the efficiency. To reduce the effect of the excess DC-link voltage, AC-DC control converter that uses a silicon controlled rectifier instead of diode rectifier is employed in the SRM driver system. AC-DC control converter supplies a proper link voltage for low-speed operation. The experimental results demonstrated that the efficiency of the system was improved at low speeds.

**Keywords:** Switched reluctance motor, Proper voltage excitation, AC-DC converter, Efficient improvement

## 1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)는 2중 돌극형 단일 여자 방식의 전동기이며, 고속 능력, 강인성, 고 토크/관성비, 넓은 속도 범위 및 브러시리스 구조 등 많은 이점을 가지고 있다. SRM의 단점은 교류 전원이나 직류 전원에서부터 직접적으로 운전될 수 없고, 항상 구동장치가 필요하며, 단위 체적당 출력을 높이기 위해 자기회로의 자속밀도가 다른 기기에 비하여 높게 운전되므로 이로 인한 비선형 자기적 특성으로 말미암아 정밀한 토크제어를 어렵게 하고 결과적으로 토크 리플과 진동을 수반한다[1]-[5].

가정용 기기에 적용하기 위해서는 효율 증대가 중요한 점이다. 직접 구동형 세탁기와 같이 적용 속도에 큰 차이가 있을 경우 일정한 직류링크전압으로는 효율 개선에 어려움이 있다. 특히 고속/저토크 운전과 저속/고토크 운전의 속도 차이가 현저하게 큰 값으로 운전되는 세탁기에서는 각각의 운전점에서 높은 효율을 얻도록 하는 것이 중요하다.

고속 운전일 경우 전동기의 역기전력이 높으므로 필요한 토크발생을 위해서는 전동기의 인가전압도 가능한 큰 값이 요구된다. 여기에 맞추어 상용전원의 크기를 이용하지만, 저속 운전의 경우에는 전동기 역기전력이 낮기 때문에 전류 상승률이 크게 되어 전류제어가 용이하지 않으며, 권선에 과도한 전류가 흐를 수 있어 드라이버나 전동기를 보호하기 위해 전류를 제한하는 것이 필수적이다. 또한 저속 운전에서는 구동드라이버의 높은 스위칭 주파수 때문에 드라이버의 스위칭 손실이 증가하고, 이로 인해 효율이 감소한다.

이러한 점을 개선하기 위하여 본 논문은 적정 전압운전 [6]을 적용한 직접 구동형 세탁기용 SRM의 효율 개선에 대하여 기술한다. 적정전압을 인가하기 위하여 구동인버터에는 다이오드 정류기 대신 사이리스터 제어정류기를 사용한 AC-DC 컨버터를 SRM 드라이버에 포함한다. 제어정류기는 전원주파수에서 동작하므로 구동인버터부의 스위칭 주파수 보다 훨씬 낮은 값이 되어 손실을 줄이고 효율을 증가시킬 수 있다.

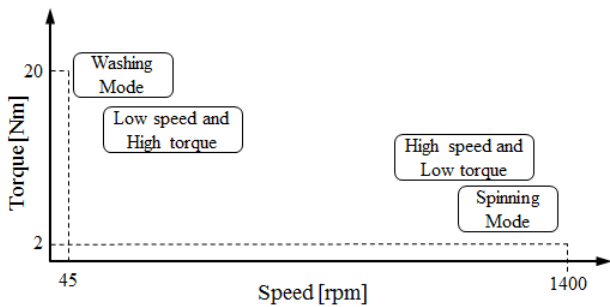
<sup>†</sup>Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2622-8180>): Department of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-ku, Busan, 608-737, Korea, E-mail: anyj@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6331

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 2. 세탁기의 운전 특성과 SRM

### 2.1 세탁기의 운전 특성

현재 사용되고 있는 세탁기는 2가지 운전점을 가지고 있다. 첫째는 세탁을 할 경우이며 전동기는 45[rpm], 20[Nm]의 부하조건이다. 둘째 행굼과 탈수를 할 경우에는 1400[rpm], 2[Nm]를 필요로 한다. 실제 세탁기에 적용되는 전동기 토크는 다음과 같다. **Figure 1**은 적용될 세탁기의 운전 조건을 나타낸 것이다. 세탁 운전과 탈수 운전사이의 속도 및 토크에 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

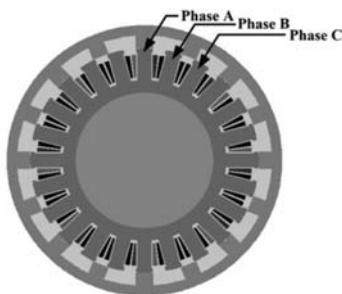


**Figure 1:** Operating conditions of a washing machine

저속 운전 속도는 고속 운전의 약 3.2[%], 토크는 1000[%]에 해당한다. 세탁기는 현저히 넓은 속도범위에서 운전점이 있으며, 또한 토크차이도 대단히 크다. 이들 두 가지 운전점에 대한 효율을 개선하기 위해서는 전동기 특성에만 의존할 것이 아니라 구동장치에서의 개선도 필요하다.

### 2.2 SRM의 운전 특성

2중 돌극형 SRM은 고정자에만 권선이 있고, 회전자에는 권선이나 영구자석이 없으며 성층철심으로 되어 있다. **Figure 2**는 외전형 3상 SRM의 단면도이다. 여러 개의 고정자 자극 권선은 직렬 또는 병렬로 결선되어 전동기 상을 이룬다. SRM 발생 토크는 고정자 상이 여자될 때 여자된 상의 자기저항이 감소하는 방향으로 회전자에 작용하고, 여자된 상의 인덕턴스가 증가하는 방향이기도 하다.



**Figure 2:** A section view of 3-phase outer-rotor type SRM for a washing machine

SRM의 발생토크는 권선에 흐르는 전류 크기의 함수이며, 자기회로의 포화영향 때문에 비선형관계이다.

각 상에 대한 전압 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$V = R i + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (1)$$

여기서  $R$ 은 상권선의 저항,  $i$ 는 상전류이며,  $\lambda$ 는 상의 자속쇄교수이다. 자속쇄교수는 상전류  $i$ 와 회전자 위치  $\theta$ 의 함수이며, 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$\lambda(i, \theta) = L(\theta, i) i \quad (2)$$

전압방정식은 다시 다음과 같이 적을 수 있다.

$$V = R i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega i \quad (3)$$

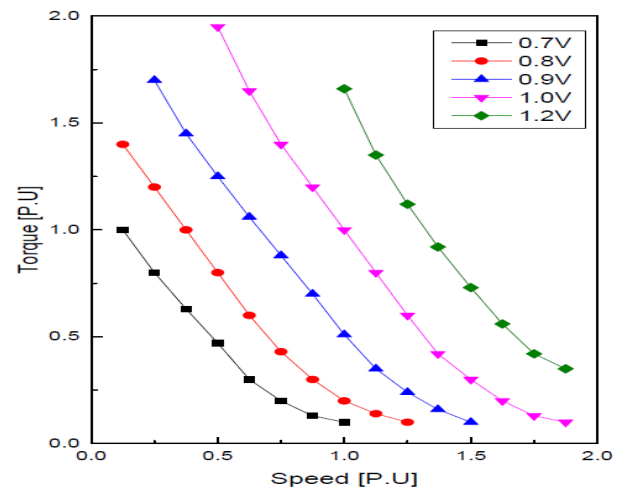
여기서  $\omega$ 는 전동기 회전속도이다. 이들 각 항은 권선저항에 의한 전압강하, 인덕턴스에 의한 전압강하 및 속도기 전력을 나타낸다. 전동기 상당 발생 토크  $T(\theta, i)$ 는 자기 코에너지  $W_c$ 의 편미분으로 계산될 수 있다.

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W_c(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3)$$

$$W_c = \int_0^i \lambda(\theta, i) di \quad (4)$$

이들 식으로부터 구동인버터의 직류 링크전압 크기를 변화시키면 전동기 권선에 인가되는 전압 및 전동기 발생 토크가 변화되는 것을 알 수 있다.

**Figure 3**은 직류 링크 전압 크기 변화에 따른 SRM의 토크-속도 특성을 측정된 것이다. 스위칭 각은 각각의 속도에서 인덕턴스가 상승하는 구간동안 평탄한 전류가 되도록 설정하여 적정 링크전압을 인가하였다.



**Figure 3:** T-S characteristic of SRM according to a variation of DC link voltage

그림으로부터 직류 링크 전압의 조정에 의해 전동기 토크-속도 특성이 변화되는 것을 알 수 있으며, 특히 특정한 2가지 토크-속도 상태로 운전할 경우 적정 링크전압 조정

에 의해 새로운 운전점에서 운전시킬 수 있어 일정전압으로 구동하는 구동시스템에 비해 효율 개선의 효과를 기대할 수 있다.

### 3. 시스템 구성

구동인버터의 직류 링크전압을 가변시킬 수 있는 SRM 구동시스템의 전체 구성을 Figure 4에 나타낸다.

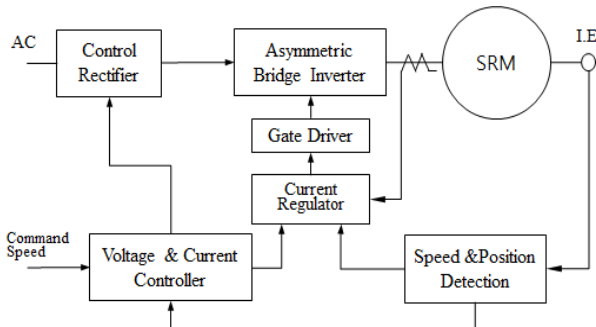


Figure 4: A diagram for a driver system

주전원 회로에는 실리콘제어정류기를 사용한 제어정류기가 포함되어있다. 제어정류기는 운전모드에서 정해지는 속도에 따라 특정 점호각으로 동작되며 비대칭 브리지인버터에 적정 전압이 인가되도록 한다. 적정 전압은 전동기 권선의 인덕턴스가 상승하는 기간 동안 평탄한 전류를 형성하는데 적합한 스위칭 각도 및 전압을 말하며, 이 값은 전동기 T-S 측정 곡선에 사용된 속도와 스위칭 각을 기준으로 미리 설정된다. 스위칭 각은 비대칭 브리지인버터의 게이트 구동 회로 신호를 결정하고, 전압크기는 SCR정류기의 위상각의 설정에 의해 정해진다. 전압 및 전류제어기는 지령속도와 실제 피드백되는 속도에 의해 동작하며, 제어정류기의 점호각 출력 및 토크 발생을 위한 전류지령을 전류조정기에 출력한다. 전류조정기는 히스테리시스 전류제어기를 사용한 다. Figure 5는 SRM 구동시스템의 실험장치를 나타낸다.

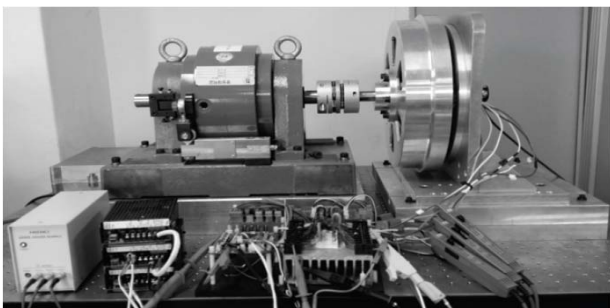


Figure 5: Experimental setup

### 4. 시뮬레이션 및 실험결과

Figure 6은 저속/고토크 운전 조건에 일정한 링크전압으로 상스위치만으로 전류를 조정하여 운전할 경우의 전압 전류 파형이다.

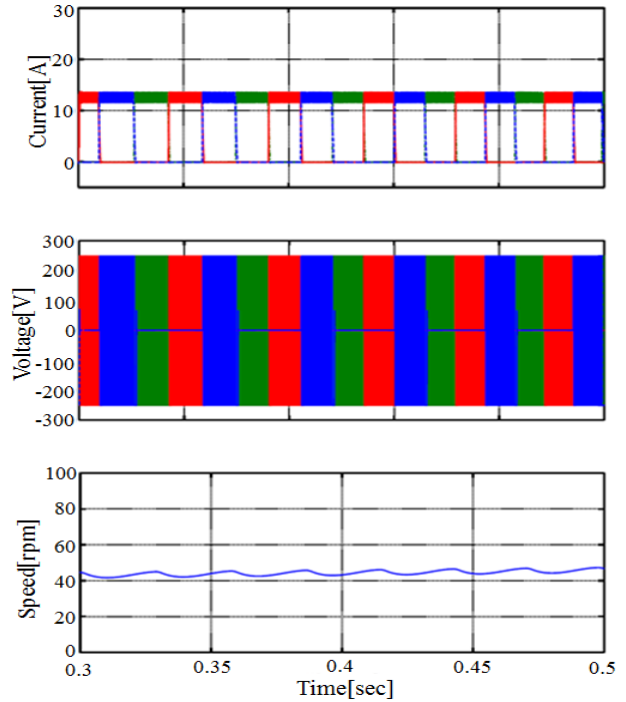


Figure 6: Current and voltage waveform with constant link voltage at 45[rpm]

Figure 7은 저속/고토크 운전에서 적정전압을 인가하여 운전할 경우의 전압/전류 파형이다. 구동인버터의 스위칭 각도는 평탄전류가 흐르는 위치로 조정된다.

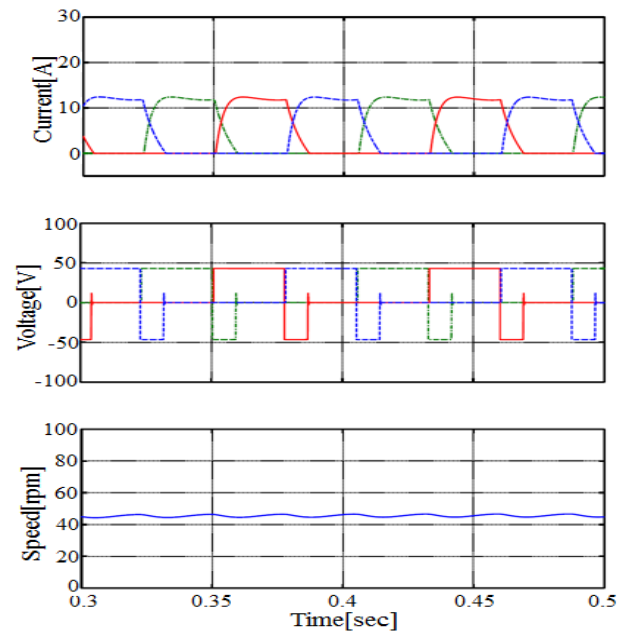


Figure 7: Current and voltage waveform at 45[rpm] when proper voltage is applied

Figure 6과 Figure 7로부터 알 수 있듯이 동일한 토크를 얻기 위해 필요한 상전류의 크기는 비슷하게 유지한다. 그러나 권선에 인가되는 전압 파형에서는 적정 여자전압을 인가하는 방식이 스위칭 횟수가 현저히 감소되어 단일 펄

스모드로 운전되는 것을 볼 수 있다.

Figure 8은 고속/저토크 운전시의 적정전압으로 운전할 경우 상전류와 전압파형을 시뮬레이션한 결과이다.

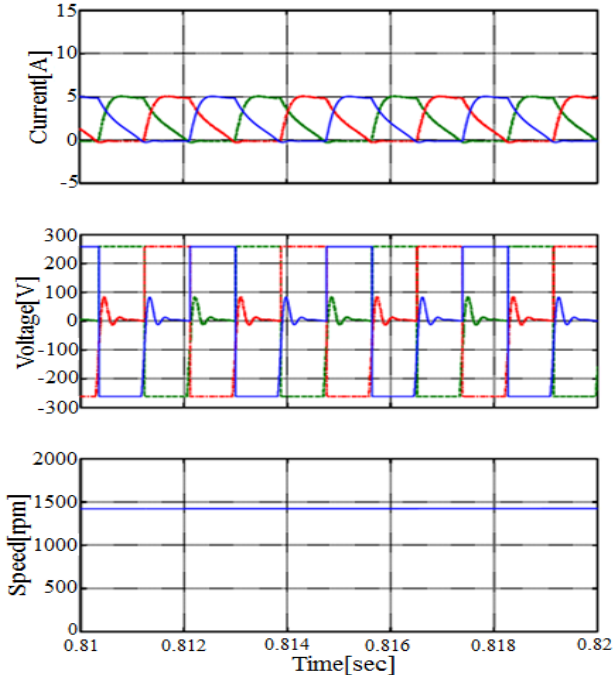


Figure 8: Current and voltage waveform at 1400 [rpm]

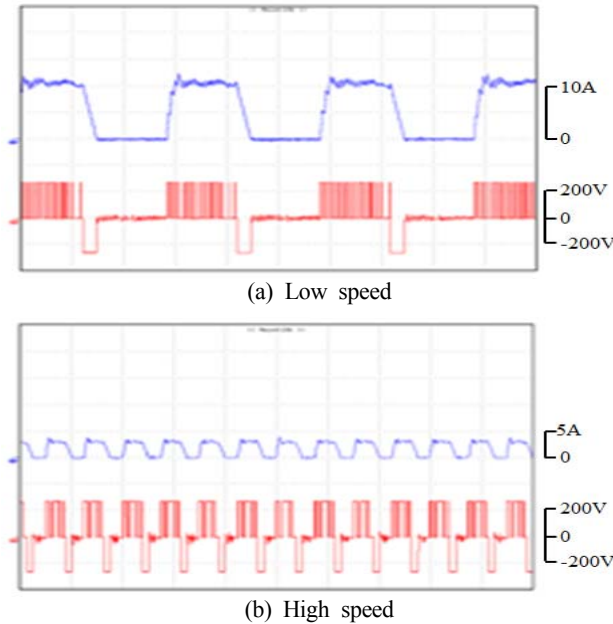


Figure 9: Current and voltage waveforms of low speed and high speed

Figure 9는 저속 및 고속운전시의 전압과 전류파형을 측정한 것이다. 적정전압보다 높은 링크전압이 적용되었기 때문에 저령속도와 토크를 만족하기 위해 스위칭 동작이 있는 것을 알 수 있다.

다음은 저속 및 고속의 운전점에서 측정한 효율을 나타낸다. 일정한 링크 전압으로 운전한 경우 구동시스템 전체에 대한 효율을 Figure 10에 나타낸다. 그림에서 보듯이 다른 속도에 비해 주요 운전점인 45[rpm]에서 효율이 약 40[%] 정도로 가장 낮게 됨을 알 수 있다.

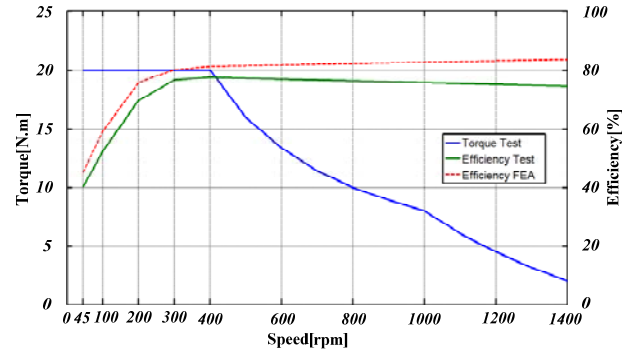


Figure 10: Efficiency of the SRM

직접 구동형 세탁기용 SRM 시스템은 주요 운전이 저속 운전(세탁모드)이 대부분이며, 이 지점의 효율개선이 전체적으로 중요한 점이다. 적정전압을 인가하여 스위칭 손실을 저감시킨 경우에 측정한 SRM 시스템의 효율은 약 50[%] 정도이며, 기존 방식과 비교할 때 10[%] 정도의 효율개선이 달성된다. Table 1에 두가지 운전점에 대해 효율을 제시한다.

Table 1: Comparison of efficiency

mode	Low speed	High speed
method	45rpm/20Nm	1400rpm/2Nm
Constant Voltage	40.12 %	74.5 %
Proper Voltage	50.25 %	75.2 %

## 5. 결 론

세탁기 부하처럼 운전조건의 차이가 큰 2가지 운전모드를 가진 부하에 적합한 SRM 구동시스템을 구성하고, 이에 대한 결과를 검토하였다. 구동시스템은 일정 직류 링크 전압으로 운전하는 경우와 달리 실리콘 제어정류기를 사용하여 링크전압을 가변시킬 수 있도록 구성하였다. 시스템은 특정한 2가지 속도에서만 주로 운전되며, 저속/고토크인 경우 제어정류기의 점호각을 조정하여 링크전압을 낮추었다. 제안된 시스템은 저속/고토크 모드에서 구동인버터에 불필요한 스위칭 동작을 줄임으로서 약 10[%] 정도의 효율을 증가시켰으며, 고속/저토크에서는 필요한 토크 전류를 확보하기 위해서는 높은 링크전압이 요구되므로 최소의 점호각을 설정하여 운전하였다. 교류-직류 변환부에 제어정류기를 채용하기 때문에 전체 구동시스템의 비용은 증가하는 단점이 있다. 그러나 세탁기가 주로 운전되는 저속세탁모드에서 상당한 운전 효율 상승으로 인해 보상이 될 것으로 예상된다.

## 후 기

‘이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.’

## References

- [1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. Corda, and N. N. Fulton, “Variable speed reluctance motors,” IEE Proceedings, vol. 127, pt. B, no. 4, pp. 253-265, 1980.
- [2] R. M. Davis, “A comparison of switched reluctance rotor structures,” IEEE Transaction Industrial Electronics, vol. 35, no. 4, pp. 524-529, 1988.
- [3] J. M. Stephenson and M. A. El-Khazendar, “Saturation in doubly salient reluctance motors,” IEE Proceedings, vol. 136, pt. B, no. 1, pp. 50-58, 1989.
- [4] D. H. Lee and J. W. Ahn, “Design and analysis of hybrid stator bearingless SRM,” Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 6, no. 1, pp. 94-103, 2011.
- [5] D. H. Lee, T. H. Pham, and J. W. Ahn, “Design and operation characteristics of four-two pole high-speed SRM for torque ripple reduction,” IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 60, no. 3, pp. 3637-1643, 2013.
- [6] Y. J. An, J. W. Ahn, C. J. Joe, and Y. M. Hwang, “Proper excitation voltage and fixed switching angle control scheme for SRM drive,” Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 45, no. 1, pp. 54~59. 1996 (in Korean).