

최대 에너지비를 갖는 SRM 구동

황형진, 이동희*, 박성준**, 안진우
 경성대학교, OTIS-LG*, 전남대학교**

SRM Drive System with Maximum Energy Ratio

Hyung-Jin Hwang, Dong-Hee Lee*, Sung-Jun Park**, Jin-Woo Ahn
 Kyungseong Univ., *OTIS-LG, **Chonnam National Univ.

ABSTRACT

The goal of this paper is optimal switching angle of switched reluctance motor drive system for maximum energy ratio. A new magnetizing method with a low-frequency increasing the energy conversion ratio that is related to the efficiency of motor is proposed. As results, it improved the efficiency about 2[%]. And a torque ripple is also sufficiently reduced compared with that of the conventional switching angle magnetizing approach.

In order to start softly regardless of a large ripple torque, the profile of phase current is predicted by the ANFIS, and current control mode was adapted when it is operated under the starting speed. Variable implementations on the fields will guarantee the more practical drive system.

1. 서 론

SRM은 톨릭턴스 토크를 극대화하기 위해 회전자와 고정자가 모두 돌극형의 구조를 가지며, 권선은 고정자에만 집중권으로 감겨 있어 전자계 구조상 단속적인 여자 전원이 각 상 권선에 순차적으로 인가되어 구동되므로 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하여 고속 운전 및 효율적인 측면에서 강한 장점을 갖고있다^[3]. 특히 SRM은 다른 전동기에 비하여 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하며, 인버터의 낮은 스위칭 주파수로 인하여 스위칭 손실 및 전동기의 철손이 크게 감소하여 고효율 운전이 가능하다. 일반적인 스위칭 각도 제어에 의한 SRM의 운전은 정격부하의 경우에는 매우 높은 에너지 변환비로 인하여 무효전력이 감소하고, 효율이 증가하지만, 경부하 운전의 경우에는 낮은 에너지 변

환비로 인하여 효율이 감소하게 된다[4]. 따라서 본 논문에서는 경부하 시 효율증대를 위하여 월링모드를 추가하여 SRM에 저장된 자기에너지를 최대한 기계적 에너지로 변환하는 새로운 스위칭 방식을 제안한다. 이 스위칭 방식은 경부하에서 에너지 변환 비를 거의 1에 가깝게 제어할 수 있어 전동기에서 발생하는 무효전력을 제거함으로써 효율을 개선할 수 있다. 또한 제안된 스위칭 방식의 타당성을 실험 결과를 통하여 검증하였다.

2. 본 론

2. 1 SRM의 최적운전을 위한 여자기법

2. 1. 1 일반적인 SRM의 스위칭 모드 해석

일반적인 SRM의 스위칭각 제어 방식에서 회전자의 1회전당 스위칭 주파수는 회전자 및 고정자의 극수에 의해 결정되며 그 값은 아래와 같다.

$$f_r = \frac{1}{2} P_s P_r [Hz] \quad (1)$$

일반적인 스위칭각 제어방식에서의 SRM의 모드는 전류정착모드, 여자모드, 감자모드의 3가지 모드로 해석된다. 각 스위칭 모드에서의 모드별 등가회로는 그림 1과 같다.

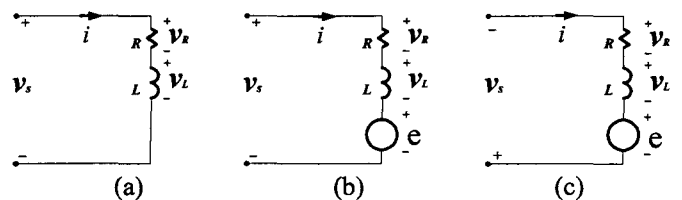


그림 1 일반적인 스위칭각 제어 시 각 모드의 등가회로
 (a) 전류정착모드 (b) 여자모드 (c) 감자모드
 Fig. 1 Equivalent circuits when general switching angle control
 (a) flat-topped current build-up mode (b) excitation mode (c) demagnetizing mode

그림 1(a)는 전류정착모드로 SRM의 인덕턴스가 증가하기 전에 상전류를 정착시키기 위한 모드이다. 이 모드는 SRM의 최소인덕턴스 영역에서 행해지며, 이 영역에서는 인덕턴스의 변화가 없어 역기전력성분이 존재하지 않는 단순 R-L회로에 해당된다. 그림 1(b)는 여자모드의 증가회로를 나타낸다. 여자모드에서는 전류정착모드에서 확립된 전류에 의한 토크를 발생시키는 구간이다. 이 영역에서 발생되는 토크가 기계적인 출력의 대부분을 담당한다. 그림 1(c)의 감자모드는 부의 전압을 인가하는 경우로 토크 발생을 위해 정착된 전류를 부토크가 발생하기 전에 소호시키는 모드이다.

2. 1. 2 SRM의 새로운 스위칭 모드

본 논문에서는 특히 경부하에서 에너지 변환 비를 1에 가깝게 제어하기 위해서 기존의 3개 모드에서 그림 2와 같은 전류 휠링모드를 추가하였다.

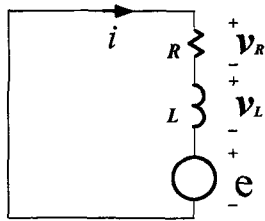


그림 2. 기존 모드에 추가된 휠링모드의 증가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of additional wheeling mode supplemented to conventional

이 모드의 추가로 SRM의 인덕턴스에 저장된 에너지를 전원으로 돌려주지 않고 상전류와 역기전력의 곱인 기계적 출력으로 변환하는 역할을 하게 되며, 상전류는 역기전력에 의해 감소하게 된다. 만일 인덕턴스의 증가영역이 이 모드용으로 충분히 존재한다면 인덕턴스에 저장된 자체 에너지 모두가 기계에너지로 변환 가능하며, 이때 에너지 변환 비를 1로 할 수가 있다.

2. 2 제어기의 구성

전동기를 구동에 있어 저속영역에서 일반적으로 전류제어 모드로 동작시킨다. 이를 위해서는 전류제어기가 필수적이며, 전류제어기는 그림 3과 같은 피드백전류 제어방식을 제안하였다. 그림 3의 전류제어기는 비교기와 프리플롭(flip-flop)으로 구성되어 있다.

스위칭 주기마다 프리플롭의 셀단자를 인에이블(enable)시켜 스위치를 턴-온하게 하여 실제전류는 증가하게되고, 비교기에서 전류 지령치와 실제전류

를 비교하여 실제전류가 지령치 전류보다 크게 되면 리셀 단자를 인에이블시켜 스위치를 오프하여 전류를 감소하게 한다. 이러한 전류제어방식은 델타변조기법과 유사한 우수한 특성을 갖게 되고, 스위칭주파수는 일정하게 할 수 있는 장점이 있다.

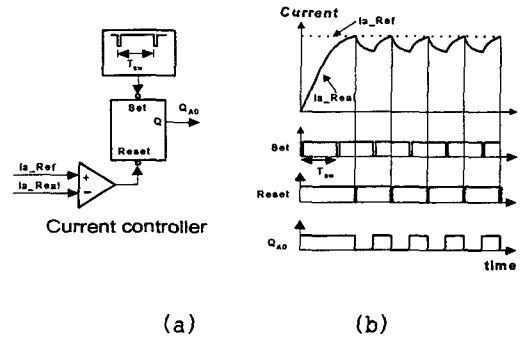


그림 3. 전류제어기와 동작 파형
(a) 전류제어기 (b) 동작 파형
Fig. 3 Current controller and operational waveform
(a) current controller (b) operational waveform

3. 실험 결과 및 고찰

SRM의 설계를 위한 치수 선정을 위해서는 몇 가지 설계방식 및 과정을 채택할 수 있으나 본 논문에서는 대략적 치수설계는 전통적인 전동기 설계 과정을 준용함으로써 기존의 직류, 교류전동기 등의 설계방식을 이해하는 설계자에게 쉽게 접근되도록 하였다. 다만 설계변수의 조정에 따른 전동기 특성산정이나 치수조정에 따른 영향 등을 검토하기 위해 SRM의 설계보조를 위한 소프트웨어인 PC-SRD를 이용하여 설계의 정확성을 높이고 오차를 줄이는 방식으로 진행한다. 본 논문에서 설계된 피시험 전동기의 설계정수는 표 1과 같다.

표 1. 피 시험 전동기의 설계 정수
Table. 1 Design parameters of the experimental SRM

고정자 극수	6	회전자 극수	4
고정자 극호	32°	회전자 극호	32°
고정자 외경	148 mm	회전자 외경	84 mm
고정자 계철폭	8 mm	회전자 계철폭	8 mm
공극	0.2 mm	철심 길이	100 mm
상당 권선수	8 turn	도체 직경	3.164 mm
상당 저항	0.02 Ω	최대 인덕턴스(1A)	2.22 mH
최소 인덕턴스	0.25 mH	최대 인덕턴스(250A)	1.25 mH

앞서 제안한 제어방법의 이론적 타당성을 입증하고, 적절한 여자각도를 실험적으로 구하기 위해서 SRM을 고효율, 고출력 시스템으로 구성하고 그에

대한 실험을 행하였다. 기초적인 실험을 행하기 위해서 부하장치는 5[kW] 용량의 직류복권발전기를 사용하였다. 인버터는 C_Dump 인버터를 사용하였다.

그림 4 및 그림 5는 본 논문에서 제안한 최대에너지 비를 갖는 여자방식의 타당성을 검증하기 위해 인버터의 여자전압과 감자전압의 비를 비슷한 상태에서 일반적인 스위칭 방식과 비교한 파형이다.

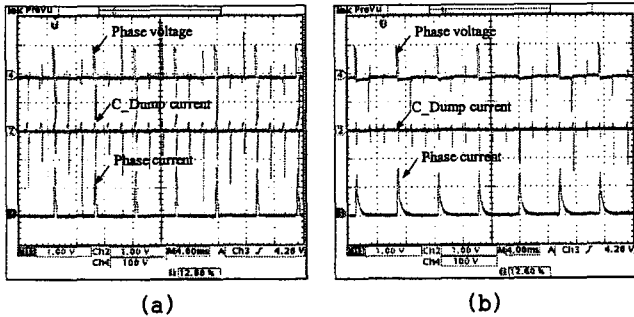


그림 4. 두 제어방식에 따른 인가전압과 상전류 파형 (500[W])

(a) 기존의 여자방식 (b) 제안된 여자방식
Fig. 4 Voltage and current waveforms according to control methods at 500[W] load.

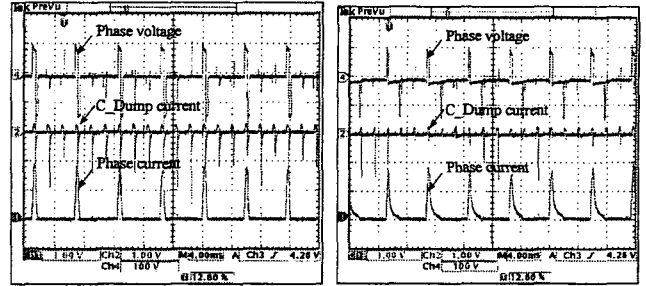
(a) conventional exciting method (b) proposed exciting method

그림 4는 지령속도 2500[rpm], 출력이 500[W]일 때 정상상태의 실험 결과이다. 윙링모드 초기에는 큰 전류로 인한 역기전력이 존재한다. 따라서 전류는 급속히 이루어지나 전류의 크기가 적은 부분에서는 적은 역기전력으로 인하여 전류는 거의 일정한 형태를 유지하며 감자전압 인가 시 신속한 전류 소화가 이루어진다. 에너지 회수용 콘덴서인 C-Dump용 콘덴서에 흐르는 전류에서 정의 부분은 여자전압 인가 시 사용되는 전류이고, 부의 전류는 감자 시 회수되는 전류의 양을 나타내고 있다.

그림 5는 그림 4와 동일 지령속도 하에서 부하를 3[kW]로 증가할 경우의 상전압, 상전류 및 회수용 콘덴서에 유입되는 전류의 파형을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 기존의 스위칭 방식인 그림 5(a)에 비하여 제안된 스위칭방식인 그림 5(b)의 경우가 에너지 회수량이 상당히 적어 에너지 회수비의 차가 있음을 알 수 있다.

그림 6은 여자각도에 두 제어방식에서 측정된 에너지 변환 비의 실험결과이다. 그림 6에서 보여주고 있는 각각의 여자방식에 대하여 측정된 에너지 변환특성을 살펴보면 여자각도가 적은 부분에서는 제안된 방식의 에너지 변환 비가 기존의 여자방식에 비하여 상대적으로 매우 큼을 알 수 있다. 이

영역은 여자각이 적음으로 인해서 경부하 영역이 된다. 따라서 본 논문에서 제안된 여자방식은 경부하에서 에너지 변환 비가 탁월함을 알 수 있다. 여자각도가 27°인 영역에서는 두 제어방식에서 에너지 변환비가 비슷하고 30°에서는 발전영역으로 인해 에너지 변환비가 급속히 저감함을 알 수 있다.



(a) (b)
그림 5. 두 제어방식에 따른 인가전압과 상전류파형 (3[kW])
(a) 기존의 여자방식 (b) 제안된 여자방식

Fig. 5 Voltage and current waveforms according to control methods at 3[kW] load

(a) conventional exciting method (b) proposed exciting method

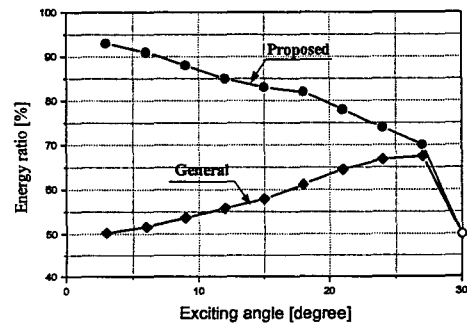


그림 6. 두 제어방식에서 여자각도에 따른 에너지변환 비
Fig. 6 Characteristic of energy conversion rate according to control methods

그림 7은 전류제어에 의한 기동모드에서 각도제어 모드로의 변환 과정을 고찰하기 위한 지령전류 및 실제 상전류 파형이다. 기동 시 평활토크 발생을 위한 전류지령치는 기동모드가 끝나는 순간 정격전류 치로 변환된다. 이는 각도제어 시 외부의 외란으로 인해 정격전류 이상의 전류가 발생할 시 정격전류로 제한하기 위함이다. 본 연구에서 전류 및 각도제어기는 비례적분 제어기를 사용하였으며, 두 제어기의 이득을 적절히 설정하는 것은 매우 어렵다. 이와 같이 제어모드가 변할 시 부드러운 제어를 행하려면 이전의 전류제어모드에서 발생한 토크와 동일한 토크를 내는 여자각 제어를 행하여야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제어모드

가 변하는 시점에서 연속적인 토크를 발생시킬 수 있는 각도를 적분제어기의 적분 초기치로 줌으로써 양호한 속도특성을 얻을 수 있었다.

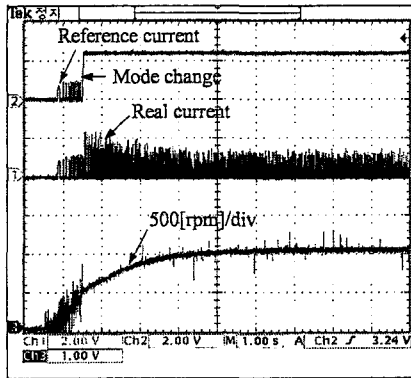


그림 7. 제어모드 변경시의 지령전류, 실제전류 및 속도파형
Fig. 7 Reference current, real current & speed at control mode change

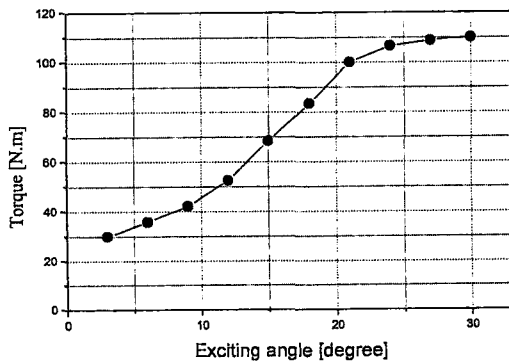


그림 8. 500[rpm] 일때 여자각에 따른 토크 특성
Fig. 8 Characteristic of torque according to exciting angle at 500[rpm]

그림 8은 소프트한 제어모드를 변경하기 위하여 전류제어모드가 끝나는 속도인 500[rpm]에서 상스위치 각도에 따른 토크 특성을 구한 것이다. 따라서 전류제어가 끝나는 시점에서 그 토크를 발생시킬 수 있는 각도를 그림 8에 나타난 각도로 각도제어를 행하면 양호한 기동특성을 얻을 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 SRM의 효율과 직결되는 에너지 변환 비를 증대시킬 수 있는 새로운 여자각 제어방식의 제안으로 기존의 스위칭각 제어방식에 비하여 효율을 약 2%정도 증대시킬 수 있었다. 제안된 여자방식의 윙링모드 추가로 인하여 급격히 전류가

변하는 영역이 적으므로 기존의 일반적인 스위칭각 여자방식에 비하여 맥동토크 및 소음이 다소 감소할 것으로 사료된다. 또한 SRM의 기동 시 큰 맥동 토크로 인하여 소프트 스타트 기능을 갖기 어렵다. 이 문제점을 해결하기 위해서 ANFIS에 의한 평활 토크 발생이 가능한 상 전류형상을 예측하였으며, 기동속도 이하에 대해서 전류제어모드를 적용하여 소프트 스타트를 가능하게 하였다.

이 연구는 BB 21 Project 지원에 의하여 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szeszsy and W. H. Bocknell : "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor." IEEE Trans. on Industrial Application, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.
- [2] I. Husain, M. Ehsani ; "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Drives by PWM Current Control," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 11, no. 1, pp. 91-98, 1996.
- [3] C. Wu, C. Pollock; "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive," IEEE Trans. on Industrial Applications, vol. 31, no. 1, pp. 91-98, 1995.
- [4] D. E. Cameron, J. H. Lang and S. D. Umans : "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors," IEEE Trans. on Industrial Applications, vol. 28, no. 6, pp. 1250-1255, 1992.
- [5] Graham E.Dawson, Anthony R.Eastham and Jerzy Mizia; "Switched Reluctance Motor Torque Characteristics : Finite Element Analysis and Test Results," IEEE Trans. on IA, Vol. 23, No. 3, pp. 532-537, 1987.
- [6] M. Moallerm; "Predicting Torque of Switched Reluctance Machine from Its Finite-Element Field Solution," IEEE Trans on Energy Conversion, vol. 5, no. 2, pp. 733-739, 1990.