

최대 에너지 변환기법에 의한 SRM 고효율 운전

강유정, 이동희, 오석규*, 박성준**, 안진우
 경성대, 진주산업대*, 동명대**

High Efficiency Control of SRM with Maximum Energy Conversion Method

Y. J. Kang, and D. H. Lee, S. G. Oh*, S. J. Park**, and J. W. Ahn
 Kyungsung Univ., Chinju Nat'I Univ.*, Tongmyung College**

ABSTRACT

This paper is suggested an optimal switching angle of a 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 improves the efficiency about 2[%]. And a torque ripple is also 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 and current control mode was adapted when it is operated under the starting speed.

이 크게 감소하여 고효율 운전이 가능하다. 일반적인 스위칭 각도 제어에 의한 SRM의 운전은 정격 부하의 경우에는 매우 높은 에너지 변환비로 인하여 무효전력이 감소하고, 효율이 증가하지만, 경부하 운전의 경우에는 낮은 에너지 변환비로 인하여 효율이 감소하게 된다.^[4] 따라서 본 논문에서는 경부하시 효율증대를 위하여 휘링모드를 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 효율개선 할 수 있다. 또한 제안된 스위칭 방식의 타당성을 실험 결과를 통하여 검증하였다.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 단일 여자기로 구조가 간단하고 저렴하며 각 상의 분리로 단락사고(shoot-through fault)에 대해 안정적이며, 자속밀도가 교류전동기보다 매우 높아 기존의 교류전동기에 비해 단위 중량당 출력이 크다. 이러한 장점으로 인하여 SRM에 대한 연구는 선진국을 중심으로 가전기기, 전기자동차, 항공기 및 산업전반에 걸쳐 그 응용영역을 확대해가고 있다.^{[1][2]} SRM은 릴럭턴스 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 인버터의 스위칭 손실 및 전동기의 철손

2. 본 론

2.1 자화곡선과 기계적 출력과의 상관 관계

SRM에서 고정자와 회전자극의 설계는 자기회로의 관점에서 결정되어 진다. SRM 드라이브에서 자기에너지의 흐름은 자기회로가 과포화영역까지 동작하기 때문에 일반적인 회전자계형 전동기구와는 다르다.

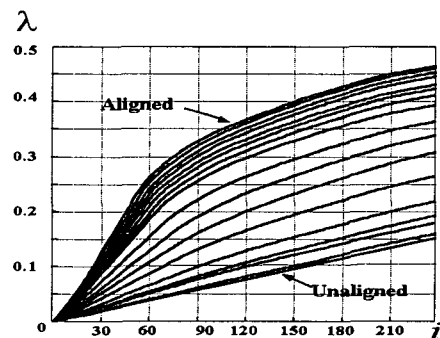


그림 1 SRM의 자화곡선 및 등자속선
 Fig. 1 Magnetizing curve and flux-linkage curve of SRM

그림 1은 정렬위치에서부터 비정렬 위치에 대한 자화곡선이다. 어떤 한 쌍의 회전자극이 1상의 고정자극과 정확히 일치할 때, 그 상은 정렬위치(aligned position)에 있다고 말한다. SRM은 회전자의 극간폭이 한 상의 극과 정렬될 때 다른 한 상은 비정렬위치(unaligned position)에 있게 기구학적으로 설계된다. 정렬위치에서는 고정자와 회전자 사이의 적은 공극으로 최대인덕턴스 가지며 자속포화가 쉽게 일어난다.

반면에 비정렬위치에서는 큰 공극으로 인하여 최소인덕턴스를 가지며 자기적포화가 쉽게 일어나지 않는다. 이러한 자기적포화 정도가 회전자의 위치에 따라 다르게 나타나므로 회전자의 위치에 따른 자화곡선은 전동기의 특성과 및 출력산정에 매우 중요한 요소가 된다.

먼저 전동기의 토크 산출은 에너지의 변동을 살펴보면 쉽게 구할 수 있다. 어떤 회전자 위치에 서 한 상에 의해서 발생하는 토크에 대한 가장 일반적인 표현은 아래 식과 같다.

$$T = \left[\frac{\partial W'}{\partial \theta} \right]_{i=const} \quad (1)$$

여기서 W' 는 coenergy이다. 이 coenergy는 식(2)과 같이 주어진다.

$$W' = \int_0^{i_1} \lambda di \quad (2)$$

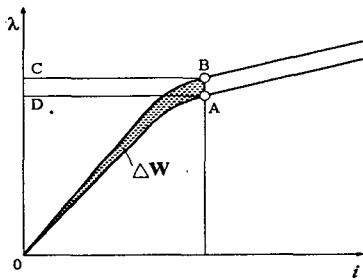


그림 2 일정전류에서 coenergy 변화를
Fig. 2 Variation of coenergy at constant current

그림 2와 같이 일정 상전류 하에서 회전자가 미소구간 $\Delta\theta$ 를 이동할 때 총 쇠교자속이 A에서 B로 변하게 되면 SRM은 전원과의 에너지 교환이 있게 되고, 또한 저장된 자계에너지의 변화가 있게 된다. 일정전류의 제약조건은 이런 이동구간 동안 행해진 기계적인 일은 정확히 coenergy의 변화와 같다는 것을 의미한다. 일정전류에서 그림 4의 A에서 B로의 변위가 $\Delta\theta$ 일 때, 전원에서 공급받은 에너지 변화는 식(3)과 같다.

$$\Delta W_e = ABCD \quad (3)$$

또한 저장된 에너지 변화는 식(4)와 같다.

$$\Delta W_f = OBC - OAD \quad (4)$$

그리고 행해진 기계적인 일은 식(5)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta W_m &= T \Delta \theta \\ &= \Delta W_e - \Delta W_f \\ &= OAB \end{aligned} \quad (5)$$

3. SRM의 최적 운전을 위한 여자기법

3.1 SRM의 새로운 스위칭 모드

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

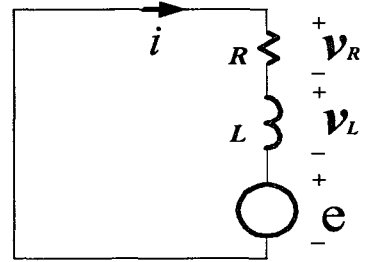
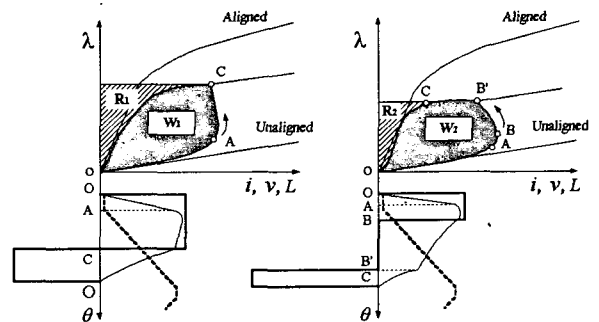


그림 3 기존 모드에 추가된 휠링모드의 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit of additional wheeling mode supplemented to conventional

이 모드의 추가로 SRM의 인덕턴스에 저장된 에너지를 전원측으로 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 자계 에너지 모두가 기계에너지로 변환 가능하며, 이때 에너지 변환 비를 1로 할 수가 있다.



(a) 기존의 스위칭 방식 (b) 제안된 스위칭 방식

그림 4 두 제어방식에 대한 에너지변환 특성
Fig. 4 Characteristic of energy conversion according to control methods

그림 4는 동일한 기계적 출력에 대한 기존의 상 스위칭 제어방식을 사용한 경우와 제안된 상 스위칭 제어방식을 사용한 경우의 에너지 변환 비를 비교하기 위하여 자기에너지 변환 과정을 도식적으로 표현한 것이다.

고정자와 회전자극이 비정렬시 전류정착과정에서 나타나는 에너지변환 경로는 기존과 제안된 방식에서 동일하게 OA로 형성되나, 기존의 상 스위칭 제어방식에서는 전류정착모드 및 여자모드시 나타나는 에너지변환 경로가 AC로 가지만 제안된 상 스위칭 제어방식에서는 추가한 모드 즉, 윙링모드로 인한 에너지변환 과정에서 나타나는 경로는 B'C의 경로의 형성으로 에너지변환 비의 증대에 큰 영향을 미치고 있다. 즉 B'C의 경로에서는 필드에 저장된 에너지를 기계적 출력으로 내는 과정이며, 전류의 감소를 보상할 수 있는 인덕턴스의 증가로 총 쇄교자속은 거의 일정한 형태를 취하게 된다. CO 구간은 감자모드를 나타낸다. 새로이 제안한 윙링모드는 축적된 자기에너지를 전원으로 회수하는 과정 없이 기계적인 출력으로 변환하는 모드이다. 윙링모드의 추가로 인하여 그림 4(b)의 에너지 변환 특성에서 기계적인 에너지로 변환되는 필드에너지 영역을 크게 확장할 수 있어 SRM의 무효전력의 감소를 기대할 수 있다. 특히, 제안된 윙링모드는 SRM의 경부하 운전시에 그 효과를 극대화 할 수 있다.

그림 5는 기존의 상스위칭 방식과 제안된 상 스위칭 방식을 사용한 경우 에너지변환 비와 기계적 출력을 고찰하기 위해 경부하, 중부하, 정격부하에 대한 에너지 변환과정을 도식화 한 것이다. 경부하의 경우 기존의 에너지 변환 루프는 O-A-C₁-O가 되며 제안된 방식에서 에너지 변환 루프는 O-A-B₁'-C₁-O로 그 면적은 동일하며 회수된 에너지는 O-C₁-D₁으로 제안된 방식이 상당히 적음을 알 수 있다.

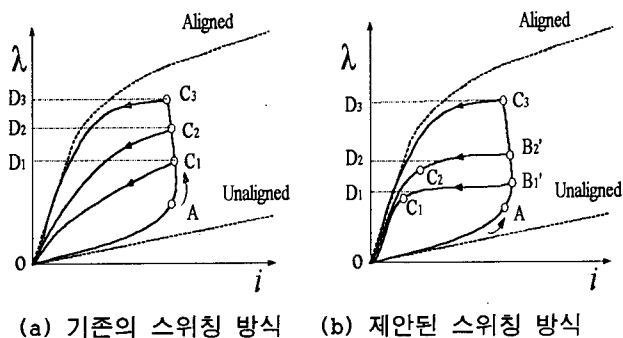
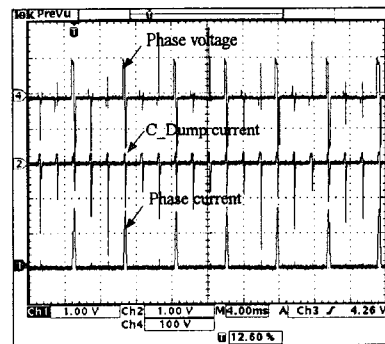


그림 5 두 제어방식에 대한 부하별 에너지변환특성
Fig. 5 Characteristic of energy conversion by the variation of load

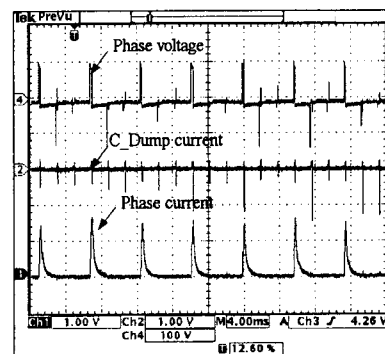
따라서 에너지 변환 비가 기존에 비하여 크게 개선됨을 알 수 있다. 중부하의 경우 기존의 에너지 변환 루프는 O-A-C₂-O가 되며 제안된 방식에서는 O-A-B₂'-C₂-O로 그 면적은 동일하며 회수된 에너지는 O-C₂-D₂으로 제안된 방식이 적음을 알 수 있다. 에너지 변환 비는 경부하에서보다는 적지만 기존에 비하여 개선됨을 알 수 있다. 정격부하의 경우 제안된 스위칭 방식에서 윙링모드가 존재할 수 없게되어 기존의 상 스위칭방식과 동일한 형태가 된다. 따라서 에너지변환 루프는 두 방식 모두 O-A-C₃-O가 되어 에너지 변환 비는 동일하게 된다.

4. 실험 결과 및 고찰

앞서 제안한 제어방법의 이론적 타당성을 입증하고, 적절한 여자각도를 실험적으로 구하기 위해서 SRM을 고효율, 고출력 시스템을 구성하고 그에 대한 실험을 행하였다. 기초적인 실험을 행하기 위해서 부하장치는 5[kW] 용량의 복권직류발전기를 사용하였다. 인버터는 C_Dump 인버터를 사용하였다.



(a) conventional exciting method



(b) proposed exciting method

그림 6 두 제어방식에 따른 인가전압과 상전류파형
Fig. 6 Voltage and current waveforms according to control methods

그림 6은 지령속도 2500[rpm], 출력이 500[W]일 때 정상상태의 실험 결과이다. 윗링모드 초기에는 큰 전류로 인한 역기전력이 존재한다. 따라서 전류는 급속히 이루어지나 전류의 크기가 작은 부분에서는 적은 역기전력으로 인하여 전류는 거의 일정한 형태를 유지하며 감자전압 인가시 신속한 전류 소호가 이루어진다. 에너지 회수용 콘덴서인 C-Dump용 콘덴서에 흐르는 전류에서 정의 부분은 여자전압 인가시 사용되는 전류이고, 부의 전류는 감자시 회수되는 전류의 양을 나타내고 있다.

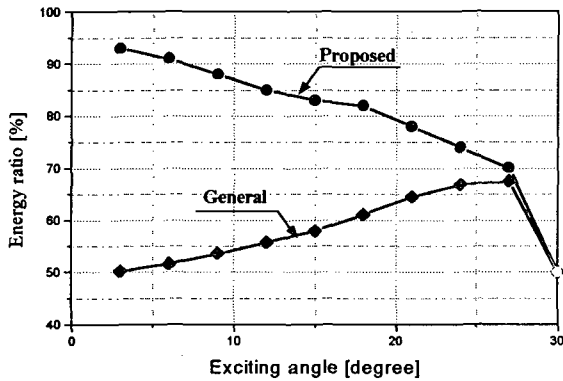


그림 7 두 제어방식에서 여자각도에 따른 에너지변환 비

Fig. 7 Characteristic of energy conversion rate according to control methods

그림 7은 여자각도에 두 제어방식에서 측정된 에너지 변환 비의 실험결과이다. 그림 7에서 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 경부하영역이 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.

5. 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 윗링모드 추가로 인하여 급격히 전류가 변하는 영역이 적으므로 기존의 일반적인 스위칭각 여자방식에 비하여 맥동토크 및 소음이 다소 감소할 것으로 사료된다.

본 연구는 과학재단 목적기초연구(R01-2001-00300) 지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szezesny 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] S.-H. Lee, S.-J. Park, S.-G. Oh, J.-W. Ahn; "Five-Level Inverter for Optimal Excitation of SRM Drive," Proceedings of IEEE/ISIE, vol. 3, pp. 1401~1406, 2001.