

최대 에너지 비를 갖는 SRM용 인버터의 제어에 관한 연구

이상훈, 박성준*, 안진우, 김철우**
 경성대학교 전기과, *동명대학 전기전자계열, **부산대학교 전기과

Study on The SRM Inverter Control with a maximum Energy ratio

Sang-Hun Lee, Sung-Jun Park*, Jin-Woo Ahn, Chul-Woo Kim**
 KyungSung Univ, *DongMyoung College, **Pusan Nat.I Univ

Abstract - SRM has different characteristics according to their control methods. Therefore, 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 decreased the noise level up to 5[dB]. And a torque ripple is also sufficiently reduced compared with that of the conventional switching angle magnetizing approach.

1. 서 론

SRM은 다른 전동기에 비하여 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하며, 컨버터의 낮은 스위칭 주파수로 인하여 컨버터의 스위칭 손실 및 전동기의 철손이 크게 감소하는 고효율 운전이 가능하다. 이러한 일반적인 저주파 스위칭 각도 제어에 의한 SRM의 운전은 정격부하의 경우에는 매우 높은 에너지 변환비로 인하여 무효전력이 감소하고, 효율이 증가하지만 경부하 운전의 경우에는 토오크 발생영역이 감소하게 되므로, 실제 에너지 영역에서 기계적 에너지로 변환하는 영역이 감소하고, 무효전력이 증가하는 단점을 가진다 [1]. 따라서 본 논문에서는 펄스에너지를 기계적 에너지로 변환하는 새로운 스위칭 모드를 적용하여 SRM을 전 부하영역에서 무효전력을 감소시키도록 하였다.

2. 본 론

2.1 에너지 변환 루프에 의한 기계적 출력

SRM에서 고정자와 회전자극의 설계는 자기회로의 관점에서 결정되어 진다. SRM 드라이브에서 자기에너지의 흐름은 자기회로가 과포화영역까지 동작하기 때문에 회전자계형 전동기구조와는 다르다. 자화특성곡선에서 자기에너지의 흐름을 살펴보면 그림 1과 같다.

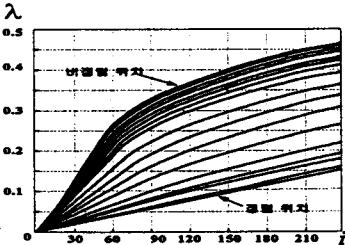


그림 1 SRM의 자화곡선 및 동자속선
 Fig 1. Magnetizing curve and flux-linkage curve of SRM

그림 1은 정렬위치에서부터 비정렬 위치에 대한 자화곡선이며, 전동기의 출력산정에 있어 매우 중요한 요소이다. 어떤 한 쌍의 회전자극이 1상의 고정자극과 정확히 일치할 때, 그 상은 정렬위치(aligned position)에 있다고 말한다. 정렬위치에서 상에 전류가 흐르고 있어도 이점에서는 토오크가 존재하지 않는다. 회전자가 정렬위치의 한 쪽면으로 옮겨졌을 때 회전자를 정렬위치쪽으로

되돌리려는 복귀 토오크가 생기게 된다.

비정렬위치에서 자속경로의 자기릴럭턴스가 고정자와 회전자 사이의 큰 공극 때문에 가장 크기 때문에 상인덕턴스는 최소로 된다. 공극의 릴럭턴스는 고정자 요오크를 통하는 긴 자속경로에도 불구하고 훨씬 크다. 비정렬 자화곡선은 정렬곡선만큼 잘 포화되지 않는다.

SRM의 이론에서 가장 의미 있는 인덕턴스는 비포화된 정렬인덕턴스 L_{max} 와 비포화된 비정렬 인덕턴스 L_{min} 이다.

먼저 전동기의 토오크의 산출은 에너지의 변동을 살펴 보면 쉽게 구할 수 있다. 어떤 회전자 위치에서 한 상에 의해서 발생하는 토오크에 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)와 같이 주어진다.

$$W' = \int_0^i \lambda di \quad (2)$$

이 식에서부터 순간토오크는 도식적으로 표시될 수 있다. 이것은 ΔW_m 을 $\Delta \theta$ 로 나눈 것이다. 여기서 ΔW_m 은 회전자가 미소구간 $\Delta \theta$ 를 이동할 때 일정전류에서 유도된 값이다.

이것은 그림 2에 설명한다. 이렇게 이동하는 동안에 전원과의 에너지 교환이 있게 되고, 또한 저장된 자기에너지의 변화가 있게 된다.

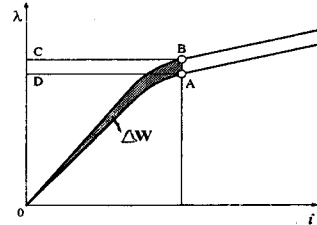


그림 2 일정전류에서 순간토오크의 산정
 Fig 2. Calculation of instant torque at constant current

일정전류의 제약조건은 이런 이동구간 동안 행해진 기계적인 일은 정확히 coenergy의 변화와 같다는 것을 의미한다. 일정전류에서 그림 2의 A에서 B로의 변위가 $\Delta \theta$ 일 때, 전원과 교환되는 에너지는 식 (3)과 같다.

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

저장된 에너지 변화는 식 (4)와 같다.

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

그리고 행해진 기계적인 일은 식(2-12)와 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta W_m &= T \Delta \theta \\ &= \Delta W_e - \Delta W_j \\ &= ABCD - (OBC - OAD) \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 SRM의 에너지비(OAD) - OBC

에너지변환과정에서 공급된 에너지와 회수된 에너지의 비는 에너지 변환 효율에 큰 영향을 미치게 된다. 이는 전력회로의 역률과 같은 개념으로 변환효율을 높이면 이 비를 높이는 방향으로 전동기를 제어하여야 한다.

Lawrenson 교수는 변환에서 이 원래 에너지의 사용가능성을 설명하는 에너지 비 E 라는 용어를 제안하였다.

$$E = \frac{W}{W+R} = \frac{W}{U} \quad (6)$$

에너지 비는 교류기계에서 역률과 유사하다. 하지만 실제로 그것은 더 일반적인 개념이고 교류기계에서 에너지의 흐름을 분석하는 데 또한 사용할 수 있다. 일반적으로 SRM에서 에너지 비는 약 0.6~0.7정도이다. 이러한 에너지 비가 크면 클수록 무효전력발생이 적으므로 전동기의 효율은 증대된다. 그러나 에너지 비를 크게 하는 되는 전동기의 부하조건에 따라 한계가 있다. 전기자동차와 같이 부하변동이 심한 경우 각 부하에 따라 에너지 비가 다르며 상 스위치 온, 오프에 방식에 따라 다르게 나타난다.

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

$$f_r = \frac{1}{2} P_s P_r [Hz] \quad (7)$$

저주파 스위칭각 제어방식에서의 SRM의 회로 방정식은 전류정착모드, 여자모드, 감자모드의 3가지 모드로 해석된다. 각 스위칭 모드에서의 회로 방정식은 그림 3과 같다.

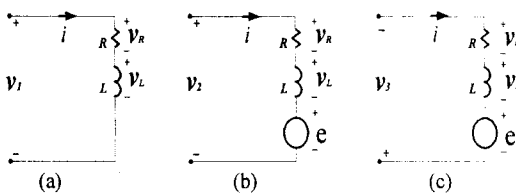


그림 3. 저주파 스위칭각 제어시 각 모드의 등가회로
(a) 전류정착모드 (b) 여자모드 (c) 감자모드

Fig. 3 Equivalent circuits when switching angle control at low-frequency

- (a) flat-topped current build-up mode
- (b) excitation mode (c) demagnetizing mode

그림 3(a)는 전류정착모드로 SRM의 인덕턴스가 증가하기 전에 상전류를 정착시키기 위한 모드이다. 이 모드는 SRM의 최소인덕턴스 영역에서 행해지며 인덕턴스의 변화가 없어 역기전력성분이 존재하지 않는 단순 R-L 회로에 해당된다. 큰 토오크의 발생을 위해서는 높은 정의 전압(v_1)을 인가하여 이 영역을 최소화 할 필요가 있다.

그림 3(b)는 여자모드의 회로 방정식을 나타낸다. 여자 모드에서는 전류정착모드에서 확립된 전류에 의한 연속적인 토오크를 발생시키기 위해 역기전력과 같은 정의 전압(v_2)을 인가하게 된다. 이 영역에서 발생되는 토오크

가 기계적인 출력의 대부분을 담당한다.

그림 3(c)의 감자모드는 부의 전압을 인가하는 경우로 토오크 발생을 위해 정착된 전류를 부토오크가 발생하기 전에 소호시키는 모드이며 전류정착모드와 같이 이 영역을 최소화하면 토오크 영역의 사용 범위가 크게되어 전동기의 출력을 증대시킬 수 있다.

2.3 최대 에너지 비를 갖는 새로운 스위칭 제어

본 논문에서는 특히 경부하에서 에너지 변환 비를 1에 가깝게 제어하기 위해서 기존의 3개 모드에서 그림 4와 같은 전류 릴링 모드를 추가하였다. 이 모드의 추가로 SRM의 인덕턴스에 저장된 에너지를 전원측으로 돌려주지 않고 상전류와 역기전력의 곱이 기계적 출력으로 변환하는 역할을 행하게 되며, 상전류는 역기전력에 의해 감소하게 된다.

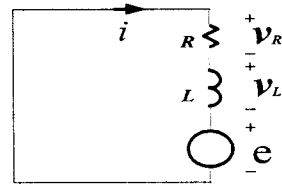


그림 4 추가된 릴링모드의 등가회로
Fig. 4. Equivalent circuit of additional mode

만일 인덕턴스의 증가영역이 이 모드용으로 충분히 존재한다면 인덕턴스에 저장된 자계 에너지의 모두가 기계 에너지로 변환 가능하며, 이때 에너지 변환 비를 1로 할 수가 있다.

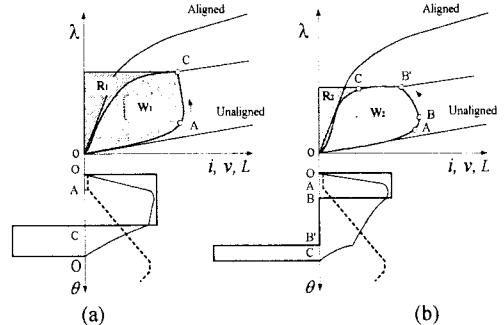


그림 5 두 제어방식에 대한 에너지변환 특성
(a) 기존의 스위칭 방식 (b) 제안된 스위칭 방식
Fig 5. Characteristic of energy conversion according to control methods
(a) conventional switching method
(b) proposed switching method

그림 5는 동일한 기계적 출력에 대한 기존의 클래식 인버터를 사용한 경우와 제안된 인버터를 사용한 경우의 에너지 변환 비를 비교하기 위하여 자기에너지 변환 과정을 도식적으로 표현 한 것이다. 고정자와 회전자극이 비정렬시 전류정착과정에서 나타나는 에너지변환 경로는 기존과 제안된 방식에서 동일하게 OA로 형성되나, OA 경로를 경유하는 시간은 제안된 인버터가 훨씬 적다. 따라서 전동기 설계시 최소인덕턴스 영역의 확보에 대한 제한조건이 적게 되어 다양한 극각을 설계할 수 있다. 기존의 인버터에서는 여자 모드시 나타나는 에너지변환 경로가 AC로 가지만 제안된 인버터에서 추가한 모드 즉, 릴링모드로 인한 에너지변환 과정에서 나타나는 경로는 B'C의 경로의 형성으로 에너지변환 비의 증대에 큰 영향을 미치고 있다. 즉 B'C의 경로에서는 펄스에 저장된 에너지를 기계적 출력으로 내는 과정이며, 전류의 감소를 보상할 수 있는 인덕턴스의 증가로 총 교류자속은 거의 일정한 형태를 취하게 된다. 일반적인 저주파 스위

칭각 제어방식에서 CO 구간은 감자모드를 나타낸다.

본 논문에서는 전류장착 모드 영역을 최소화하기 위하여 순간적으로 높은 전압을 인가하여, 전류장착영역을 최소화하도록 설계하였다. 또한 새로이 제안하는 릴링 모드로, 축적된 자기에너지를 전원으로 회수하는 과정 없이 기계적인 출력으로 변환하는 모드이다. 릴링 모드의 추가로 인하여 그림 5(b)의 에너지 변환 특성에서 기계적인 에너지로 변환되는 필드에너지 영역을 크게 확장할 수 있으며, 무효전력의 감소를 기대할 수 있다.

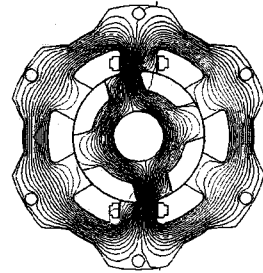


그림 7 피실험 SRM의 자화선도
Fig. 7. Flux-product curves of the experimental SRM

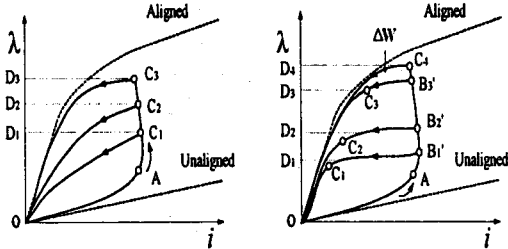


그림 6 두 제어방식에 대한 부하별 에너지변환 특성
(a) 기존의 클래식 인버터의 경우
(b) 제안된 인버터의 경우

Fig. 6. Characteristics of energy conversion by the variation of load (a) conventional classic inverter (b) proposed inverter

특히, 제안된 릴링모드는 SRM의 경부하 운전시에 그 효과를 극대화 할 수 있으며, LSEV의 구동의 전 운전영역에서 에너지 효율을 높일 수 있는 장점이 있다.

그림 6은 기존의 클래식 인버터와 제안된 인버터를 사용한 경우 에너지변환 비와 기계적 출력을 비교하기 위해 경부하, 중부하, 정격부하에 대한 에너지 변환과정을 도식화 한 것이다. 경부하의 경우 기존의 에너지 변환 루프는 O-A-C₁-O가 되며 제안된 인버터에서는 O-A-B₁'-C₁-O로 그 면적은 동일하며 무효전력은 O-C₁-D₁으로 제안된 인버터가 상당히 적음을 알 수 있다. 따라서 에너지 변환 비가 기존에 비하여 크게 개선됨을 알 수 있다. 중부하의 경우 기존의 에너지 변환 루프는 O-A-C₂-O가 되며 제안된 인버터에서는 O-A-B₂'-C₂-O로 그 면적은 동일하며 무효전력은 O-C₂-D₂으로 제안된 인버터가 적음을 알 수 있다. 에너지 변환 비는 경부하에서 보다는 적지만 기존에 비하여 개선됨을 알 수 있다.

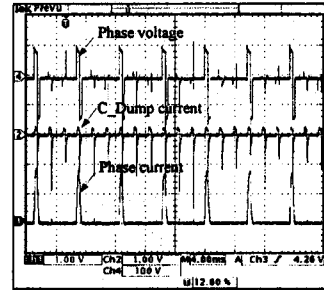
정격부하의 경우 기존의 에너지 변환 루프는 O-A-C₃-O가 되며 제안된 인버터에서는 O-A-B₃'-C₃-O으로 그 면적은 동일하며 무효전력은 O-C₃-D₃로 제안된 인버터가 적음을 알 수 있다. 에너지 변환 비는 그이 유사함을 알 수 있다.

제안된 인버터는 높은 감자전압으로 신속한 전류소호가 이루어짐으로 기존의 클래식 인버터에서 최대 에너지 변환 루프가 O-A-C₃-O인데 비하여 제안된 인버터에서는 O-A-C₁-O의 에너지 변환 루프를 가질 수 있다. 따라서 제안된 인버터를 사용함으로써 기계적 출력의 증가는 ΔW가 되어 전동기의 출력을 증대시킬 수 있다.

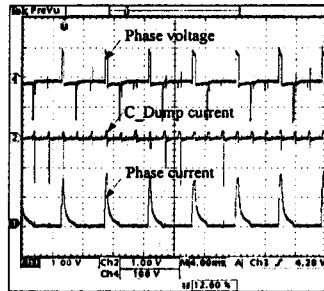
2.4 실험결과 및 고찰

그림 7은 피 실험 전동기의 단면도를 및 PC-SRD 상에서 나타난 자속 밀도를 나타내고 있다.

그림 8은 본 논문에서 제안한 최대에너지 비를 갖는 여자방식의 타당성을 검증하기 위해 인버터의 여자전압과 감자전압의 비를 비슷한 상태에서 일반적인 스위칭 방식의 비교한 파형이다. 그림에서 알 수 있듯이 기존의 스위칭 방식인 그림 8(a)에 비하여 제안된 스위칭 방식인 그림 8(b)의 경우가 에너지 회수량이 상당히 적어 에너지 회수 비의 차가 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 8. 두 제어방식에 따른 인가전압과 상전류파형
(a) 기존의 여자방식 (b) 제안된 여자방식

Fig. 8. Voltage and current waveforms according to control methods
(a) conventional exciting method (b) proposed exciting method

3. 결 론

본 연구는 SRM의 회전자 위치에 따른 적절한 스위칭 동작을 위해 SRM 구동에 적합한 새로운 여자방식을 제안하였다. 전동기의 효율과 직결되는 에너지변환 비를 증대시킬 수 있는 새로운 저주파 여자방식의 제안으로 기존의 스위칭각 제어방식에 비하여 효율을 약 2%정도 증대시킬 수 있었으며, 소음도 정격에서 약 5[dB]정도 감소함을 알 수 있었다. 또한 제안된 여자방식에서 맥동토크도 기존의 일반적인 스위칭각 여자방식에 다소 감소할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. Jones, "High Performance Switched Reluctance Drives," Motion Control Magazine, February 1992, pp.50-53.