

리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고속 특성 해석

장석영, 박지훈, 최장영, 성호경¹
 충남대학교 전기공학과, 한국기계연구원¹

Analysis of Linear Switched Reluctance Motor at High Speed

Seok-Myeong Jang, Ji-Hoon Park, Jang-Young Choi, Ho-Kyeong Sung¹
 Dept. of Electrical Engineering Chungnam National University, KIMM¹

Abstract - This paper deals with analysis of linear switched reluctance motor at high speed. First, we defined turn-on position at inductance profile. Second, in turn-on section, we analyzed characteristic of linear switched reluctance motor according to speed. Also, we used finite element method at analysis process.

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 스위칭 제어 장치가 결합된 특수 형태의 모터로 분류되어진다. SRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며 각기 다른 개수의 극을 가지고 있다. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 권선이나 영구 자석이 존재하지 않는 간단한 구조를 가진다. SRM의 구동원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자 시킬 때 고정자의 쇄교자속이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 권선을 여자시킴으로써 토크를 얻게 된다. 즉, 스위칭 소자를 ON, OFF시켜 해당 권선에 전압을 인가하여 전류의 크기를 조절하고, 그때의 전류 크기와 비례하는 쇄교자속 수에 의해 가변속 운전이 가능하게 된다. SRM은 이러한 간단한 구조이기 때문에 제작 생산적인 측면에서 상당한 이점을 지니고 있고, 직류모터와 같이 기동특성이 좋고 토크가 큰 반면에 정기적으로 브러쉬를 교환하는 등 유지, 보수의 필요성이 적으며, 유도전동기에 비하여 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적 당 토크, 효율 및 컨버터의 정격 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다. 그러나 SRM은 고정자와 회전자가 이중 돌극으로 구성된 구조와 펄스 형태의 여자방식으로 인해 토크 맥동이 크고 소음과 진동이 심하다는 단점이 있다. 따라서 스위치드 릴럭턴스 전동기를 산업분야에 널리 이용하기 위해서는 저 토크 리플, 고 토크 밀도가 요구되며 이를 위한 전동기 설계와 구동 방법에 대한 연구가 필요하고, 스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 프로파일은 중요한 요소로 작용한다. 인덕턴스 프로파일은 최소인 구간과 상승 구간 그리고 최대인 구간에서 전류의 턴-온 시점에 따라서 토크 리플의 발생을 최소화 할 수 있다. 일반적으로 최소인 구간에서부터 상승구간 전에서 턴-온하고 최대인 구간에서 턴-오프를 통한 소호를 통해 전류를 회생하는 방법이 사용된다.[1]

SRM은 인덕턴스 프로파일의 상승 구간 폭과 상승 구간의 기울기 등에 의해 고속 운전이 가능해진다. SRM은 다른 여러 전동기와 같이 전류의 크기에 의해 속도가 영향을 받는다. 그렇기 때문에 대용량의 전류가 필요하게 되는데 이것은 영구자석을 사용한 기기들보다 더 많은 전류를 의미한다. 그렇기 때문에 SRM의 인덕턴스 프로파일의 상승 폭, 상승 기울기 등으로부터 전류를 투입할 수 있는지의 여부가 결정되기 때문에 고속 운전에서는 인덕턴스 프로파일도 또한 중요한 변수로 작용한다. 설계 초기 단계에서 필요한 힘과 속도가 결정되면 사용되어질 환경에 의해 외형 치수가 결정되고 이로부터 SRM의 설계가 시작되게 된다. 이때 원하는 힘을 얻기 위한 코일 턴 수, 치 폭 등의 조합으로 인해 인덕턴스 프로파일도 해석된다.[2][3]

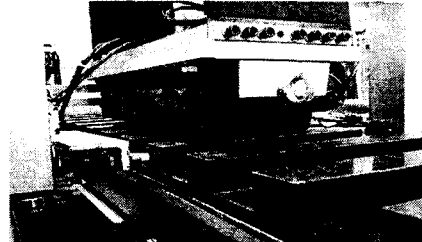
본 논문에서는 LSRM(Linear Switched Reluctance Motor)의 고속 특성에 대한 해석을 다루고자 한다. LSRM은 SRM을 축 방향으로 잘라 펼쳐 놓은 형태로서 다만 상권선 코일이 고정자와 가동자 어디에도 설치 될 수 있는 특징을 가지고 있으며, 고속 운전 시에는 전류의 원활한 공급을 위해 고정자에 설치하는 것이 보통이다. 고속 특성을 확인하기 위해 유한요소법을 이용하여 해석하였으며, 설계 변수와 제어 정수로부터 인덕턴스 프로파일을 해석하였으며, 인덕턴스 프로파일의 턴-온 시점과 턴-오프 시점 그리고 속도에 따라서 해석 결과를 비교하였다.

2. 해석 방법과 모델

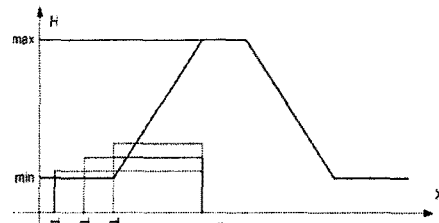
2.1 해석 방법

일반적으로 인덕턴스 프로파일에 의한 턴-온과 턴-오프의 위치는 인덕턴스 프로파일 상에서 최저인 곳과 최대인 곳에서 동작하게 한다. 또한 평활한 토크 특성을 얻기 위해서는 턴-온, 턴-오프 관계와 인덕턴스 값에 의한 전류의 상태를 확인하여 두 상의 중첩된 전류의 크기가 평활하게 되도록 턴-온과 턴-오프를 조정한다. 본 논문에서는 최소인 지점에서의 턴-온을 세 부분으로 나누었다. 즉 전류가 인가되는 시간을 달리하였다.

2.2 해석 모델



〈그림 1〉 해석 모델



〈그림 2〉 인덕턴스 프로파일과 턴-온 시점

〈그림 1〉은 해석을 위한 모델을 보여주고 있다. 〈그림 1〉의 LSRM은 6/4극으로 제작되었으며, 가동자에 권선이 시형된 형태를 취하고 있으며, 고정자의 전체 길이는 4[m]이다. 해석 모델에 대한 자세한 사항은 <표 1>에서 제시하였다.

〈표 1〉 해석 모델의 설계 사양

	항 목	사 양
가동자	치 폭	25 (mm)
	치 높이	50 (mm)
	극 간 격	50 (mm)
	요크 높이	20 (mm)
	가동자 깊이	100 (mm)
	전 체 길 이	275 (mm)
고정자	치 폭	32 (mm)
	치 높이	25 (mm)
	극 간 격	75 (mm)
	백아이언 높이	10 (mm)
	고정자 깊이	205 (mm)
	전 체 길 이	4000 (mm)

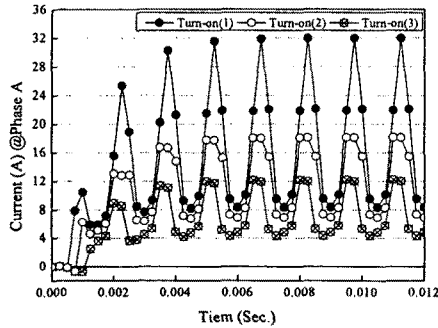
〈그림 2〉는 해석 모델에 대한 대략적인 인덕턴스 프로파일과 턴-온 시점을 보여주고 있다. 〈그림 2〉의 모든 턴-오프 시점은 연속되는 다음 상의 턴-온 시점을 고려하여 인덕턴스 프로파일의 최대인 지점에서 선택하였으며, 최소인 지점에서 턴-온 시점을 달리한 이유는 고속 구동을 위해서는 전류의 크기가 중요한 요소로 작용하기 때문에 전류의 양에 따른 특성을 확인하기 위해서이다.

3. 속도와 턴-온 시점에 따른 특성 해석

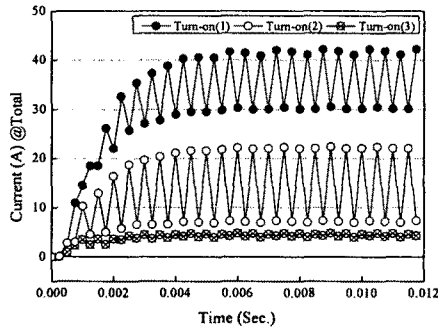
3.1 50 × 10³ rpm/sec 속도 일 때 턴-온 시점에 따른 특성 해석

해석 모델은 직선형기기로 해석 시 이동 거리에 영향을 받는다. 따라서 본 논문에서는 동일한 사양에 대해 회전형기기로 대체하여 해석하였으며, 회전형기에서는 10000 [rpm]에 대한 속도를 의미한다. 해석 결과는 한 상에 대한 전류와 중첩되는 전체 전류 그리고 토크에 대해 해석하였다.

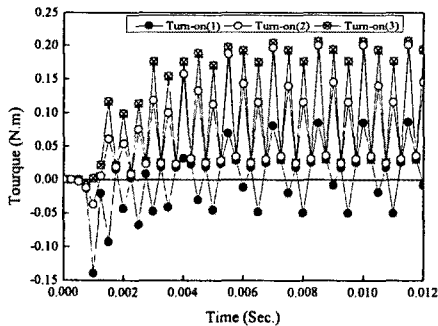
<그림 3>은 속도가 $50 \times 10^3 \text{mm/sec}$ 일 때 턴-온 위치에 따른 상전류 특성을 보여주고 있다. <그림 2>에서 설명한 것과 같이 턴-온(1)~(3)의 차이는 같은 속도에 대하여 전류의 유입량을 달리하는 것을 나타내며, 또한 턴-온 위치와 전류와의 관계를 나타내고 있다. <그림 3>에서는 턴-온(1)인 위치에서 최대 전류가 투입된다. 이것은 같은 인덕턴스 프로파일에서 턴-온 구간이 넓기 때문에 가능하다. 또한 <그림 4>는 턴-온 위치에 따른 중첩되는 전체 전류를 보여주고 있는데, <그림 4>로부터 턴-온 구간에 따른 전류의 양이 다름을 확인할 수 있다. 하지만 <그림 5>는 턴-온 위치에 따른 토크 특성을 보여주고 있는데, <그림 5>의 토크 특성으로부터 턴-온 구간이 넓은 턴-온(1)인 위치의 토크보다 턴-온(2)와 턴-온(3)인 위치의 토크가 크게 나온 것을 확인할 수 있다. 이것은 턴-온 구간이 넓은 것보다 SRM의 토크 공식에 의해 인덕턴스 시간에 따른 변화율과 전류의 제곱의 곱에 의해 확인할 수 있는 사항으로 인덕턴스의 변화율과 전류의 양 그리고 턴-온 위치의 매치가 중요함을 알 수 있다.



<그림 3> 턴-온 위치에 따른 상전류 특성



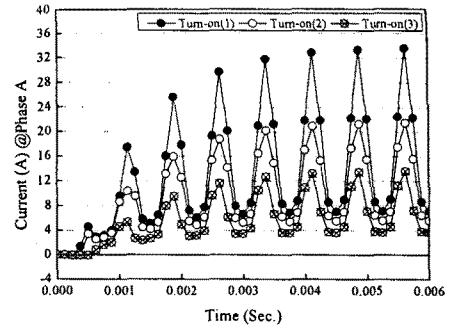
<그림 4> 턴-온 위치에 따른 합성 전류 특성



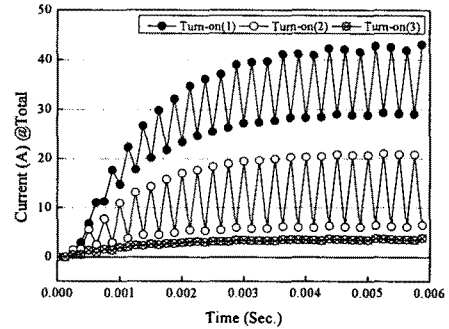
<그림 5> 턴-온 위치에 따른 토크 특성

3.2 $100 \times 10^3 \text{mm/sec}$ 속도 일 때 턴-온 시점에 따른 특성 해석

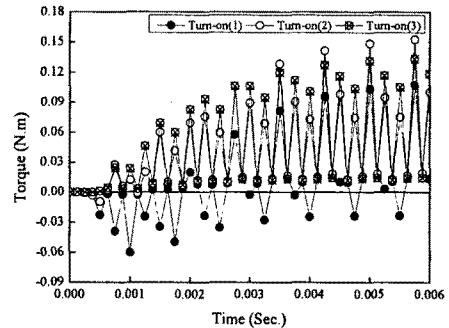
직선형기기의 $100 \times 10^3 \text{mm/sec}$ 인 속도는 회전형기에서 20000 [rpm]에 해당하는 속도이다. <그림 6>은 턴-온 위치에 따른 상전류 특성을 보여주고 있다. 턴-온(1)인 경우 36 [A]의 전류에서 최대값을 가지고 있으며, 턴-온(2)와 턴-온(3)의 경우에도 $50 \times 10^3 \text{mm/sec}$ 의 속도에서 보여주는 특성과 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. <그림 7>은 턴-온 위치에 따른 중첩되는 합성 전류 특성을 보여주고 있다. <그림 7>의 해석 결과 역시 <그림 4>의 해석 결과와 비슷한 특성을 보여주고 있다. <그림 8>은 턴-온 위치에 따른 토크 특성을 보여주고 있다. <그림 8>의 경우 <그림 5>의 결과와는 다르게 최대값에 대한 결과가 <그림 5>의 결과보다 작은 값을 나타내고 있다. 이는 해석 방법의 문제가 아닌 해석 모델의 설계 사양과 해석 틀의 문제로 예상된다. 해석 모델의 설계 사양을 넘어서는 속도에서라면 해석 결과와 같은 현상이 야기될 수 있으며, 또한 해석 틀은 전류를 인가하면 구동되는 실제 모델이 아닌 구동되는 부분과 전류를 인가하는 부분이 서로 절대적으로 동작하기 때문에 설계 사양을 벗어나는 현상이 발생하게 된다.



<그림 6> 턴-온 위치에 따른 상전류 특성



<그림 7> 턴-온 위치에 따른 합성 전류 특성



<그림 8> 턴-온 위치에 따른 토크 특성

4. 결 론

LSRM은 구조가 간단하고 제작단가가 저렴하다는 장점과 단위체적당 토크 효율이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 구동시의 토크 리플과 소음이 크다는 단점을 가지고 있어서 계속적인 연구가 진행되어야 할 것이다. 본 논문에서는 LSRM의 고속 특성을 해석하기 위하여 동일한 해석 모델에 대하여 <그림 2>와 같은 턴-온 시점을 정의하고 속도에 따라서 전류와 토크에 대하여 해석하였다. 언급한 바와 같이 LSRM은 토크 리플이 크다는 단점을 가지고 있기 때문에 인덕턴스 프로파일에 대한 해석을 수행하여 최적의 구간에서 전류를 인가하여 중첩시키는 방법을 사용하여 토크 리플을 최소화하는 방법을 사용한다. 따라서 본 논문에서도 최적의 토크 구간에 해당하는 턴-온 시점을 정의하고 속도에 따른 해석을 수행하였으며, 해석 결과로부터 턴-온 위치와 속도에 따른 특성을 확인할 수 있다. 또한 고속 구동을 하는 LSRM의 경우 원하는 속도와 힘을 얻기 위해서는 정확한 설계가 필요하다는 사실도 확인할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] 김윤현, 토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토크 제어, 박사학위 논문, 한양대학교, 2001.
- [2] 장석명, 박지훈, 최장영, 성호경, "해석적 방법에 의한 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 프로파일 선정," 2005년 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환 시스템학회 추계학술대회, pp.254~256, 2005.
- [3] Byeong-Seok Lee, Han-Kyung Bae, P. Vijayragha van and R. Krishnan, "Design of a linear switched reluctance machine," IEEE Trans. Ind. Appl., vol.36, no.6, Nov. pp.1571~1580, 2005.