

여자방식에 따른 SRM의 특성 해석

金宗謙, 金一中, 孫洪寬, 李殷雄
원주대학, 주성대학, 전기연구소, 충남대학교

The Characteristic Analysis of Switched Reluctance Motor by Excitation Mode

Jong-Gyeum Kim, Il-Jung Kim, Hong-Kwan Sohn, Eun-Woong Lee
Wonju College, Juseong College, KERI, Chungnam Univ

Abstract - This paper has explained a various excitation mode to analyze the torque performance of SRM. The simulation results show that 3 phase square excitation mode models have revealed high torque performance.

크를 나타낸 것이지만, 전철권(fully pitched winding)에서는 권선 상호간의 결합을 이용하는 것으로서 자기 인덕턴스의 변화는 거의 일정하기 때문에 무시할 수 있으므로, 이때 발생 토크는 식(3)과 상호 인덕턴스의 항으로 표현할 수 있다.

1. 서 론

고정자와 회전자의 이중 돌극(double salient pole) 구조를 가지는 SRM은 구조가 간단하고 튼튼하며 고속회전이 적합한데다 환경적인 측면에서도 유리할 뿐 아니라, 다른 전동기에 비해 제작비가 저렴하여 최근에 응용되는 사례가 늘어나고 있다[1]. 그러나 고정자와 회전자가 가지는 이중 돌극 구조 때문에 공극에 분포하는 인덕턴스의 공간고조파의 영향으로 토크 리플이 발생하여 축 진동이나 소음의 원인이 되며, 또한 갭이 좁기 때문에 자기적인 비선형성이 높아 실용화하는데 많은 어려움이 있다[1,2]. 따라서 이와 같은 비효율적인 문제점을 개선하기 위한 제어회로 설계, 자기회로의 설계 등 다양한 연구가 진행되고 있다[1]. SRM이 다른 전동기와 달리 가혹한 조건에서 높은 토크를 필요로 하는 곳에 사용 가능하도록 하기 위해서는 고정자의 여자권선 방법의 선택이 중요하다.

그래서 본 연구에서는 권선 감는 방법에 따른 인덕턴스의 분포 및 여자방식에 의해 발생하는 토크 특성을 해석하여 가장 높은 토크를 발생하는 여자방법을 찾고자 한다.

2. 기본 동작원리

SRM 고정자 권선의 여자는 회전자의 위치에 따라 이루어지며, 고정자 돌극에 대해 회전자 돌극이 비정렬(unaligned)에서 정렬(aligned)하는 방향으로, 즉 회전자는 자기저항이 최소가 되는 방향으로 토크를 발생시키며, 정렬되기 바로 전에 다음 극을 여자시켜 회전을 지속시킨다. 이때 발생하는 토크는 식(1)과 같이 회전자 위치 변화에 의한 자기수반에너지(W_c)의 변화로 구할 수 있다.

$$T = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} \quad (1)$$

이때 자기회로의 비선형성을 무시하고, 자기 수반에너지를 인덕턴스로 표현할 경우 식(1)의 토크는 식(2)와 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (2)$$

즉, 토크는 인가되는 전류가 일정할 경우 전류의 방향에 관계없이 회전자의 위치에 따른 인덕턴스의 함수로서 인덕턴스의 공간분포와 밀접한 관계로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 이때 인덕턴스는 비정렬의 경우 최소이고, 정렬된 경우 최대가 된다. 식(2)는 자세 인덕턴스의 변화에 따른 토

$$T = i_u i_v \frac{\partial M_{uv}}{\partial \theta} \quad (3)$$

식(3)에서는 상호 인덕턴스가 감소하는 방향에서 부의 전류를 인가할 경우 정 토오크를 발생할 수 있으며, 식(3)을 식(2)와 비교할 경우 토크는 계수 $\frac{1}{2}$ 이 없으므로 손실을 고려하지 않을 경우 2배가됨을 알 수 있다.

전철권에서 3상(u,v,w)을 모두 여자할 경우 토크는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = i_u i_v \frac{\partial M_{uv}}{\partial \theta} + i_v i_w \frac{\partial M_{vw}}{\partial \theta} + i_u i_w \frac{\partial M_{uw}}{\partial \theta} \quad (4)$$

이때 임의의 구간을 여자할 경우 상호 인덕턴스의 변화를 분석하면 한상 구간은 상승하고, 또 한상 구간은 감소하며 나머지 한상 구간에서는 변화가 없는 일정한 상태를 유지한다[3]. 따라서 식(4)에서 두 항은 변화가 있지만 나머지 한 항은 변화가 없으므로 0이 된다. 따라서 토크는 손실을 고려하지 않을 경우 이상적으로는 단철권 유니폴라에 비해서 4배, 전철권 유니폴라 또는 바이폴라에 비해서 2배가됨을 알 수 있다.

3. 여자방법에 대한 검토

SRM에 적용되는 권선법에는 단철권(short pitched winding)과 전철권이 있다. 단철권은 고정자 각 극에 권선을 집중적으로 감기 때문에 집중권(concentrated winding)이라고도 하며, 코일엔드가 짧은데다 콤팩트한 설계가 가능하므로 코일단의 절연이 쉽다[2]. 전철권은 각 극 사이 권선을 집중적으로 감아 마주보는 상대방 고정자 극과 연결한 것이다. 따라서 전철권의 권선의 길이는 단철권 권선보다 길다.

해석에 사용된 3상 6/4극 모터의 기기정수는 표 1 과 같다.

표 1 기기정수

항 목	값
고정자 치폭(β_s)	30.0[deg]
회전자 치폭(β_r)	32.0[deg]
고정자 직경	69.95[mm]
회전자 직경	35.6[mm]
공극 길이	0.25[mm]
철심 적층 두께	60[mm]
1극당 권수(단철권)	100[turn]
1극당 권수(전철권)	200[turn]

단절권과 전절권에 전류를 흘리는 여자방식은 유니플라, 바이플라, 3상 정현파 또는 구형파 구동방식이 있다. 단절권에서는 회전자 위치에 따라 자기 인덕턴스만이 변화를 하므로 이 변화 성분만이 토크를 발생시키지만, 전절권에서는 자기 인덕턴스는 거의 변화가 없고, 상호 인덕턴스에 의해 토크가 발생한다.

이들 각각의 여자 패턴은 그림 1과 같다.

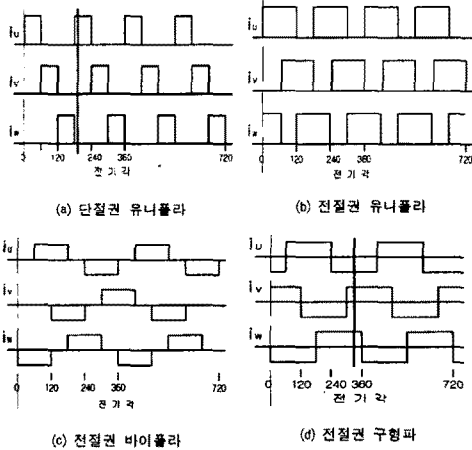


그림 1. 여자방식

3.1 단절권 유니플라 구동

단절권 유니플라 구동은 그림 1(a)와 같이 단절권에 회전방향으로 순차로 여자하는 구동으로서 정 토크가 발생하도록 인덕턴스의 증가구간을 이용한다. 그러나 감소하는 구간에서는 부의 토크가 발생하므로 부의 토크가 발생하기 전의 회전자 위치를 검출하여 다음 고정자 극을 여자하면 지속적으로 토크가 발생된다. 부의 토크가 발생하면 평균 토크가 줄어드는 단점이 있다.

3.2 전절권 유니플라 구동

그림 1(b)와 같이 집중권으로 감겨진 권선이 회전자 위치에 따라 여자되는 기간은 1주기의 2/3 이다. 2 상의 여자전류가 같은 정 방향이기 때문에 단절권 유니플라 구동과는 다르게 인덕턴스의 증가 및 감소구간 모두를 이용할 수 있다.

3.3 전절권 바이플라 구동

그림 1(c)에서와 같이 항상 2상이 서로 다른 방향의 여자 전류를 인가하는 것으로서 전절권 유니플라 구동에서와 같이 1주기의 2/3 구간이 통전한다. 바이플라 전류로 2상을 여자하는 경우 상호 인덕턴스의 변화가 감소할 때에 하나의 상에는 정, 다른 한 상에는 부의 전류를 흘려 항상 정 토크가 발생하도록 한다.

3.4 전절권 구형파 구동

그림 1(d)에서와 같이 이 방법은 항상 3상을 동시에 여자하는 방식으로 V, W 상은 정의 전류를 그리고 U 상에는 부의 전류를 인가한다.

4. 유한 요소법의 적용

SRM의 동작특성은 회전자의 위치에 따른 자기 수반에너지 변화의 영향을 받기 때문에 동작특성을 나타내는 쇄교자속을 여자전류와 회전자의 위치함수로 표현해야 한다[6]. 그러나 회전자가 자기저항이 적은 쪽으로 회전함에 따른 쇄교자속과 자기 수반에너지의 변화는 철심의 포화특성에 따라 비선형성이 될 수 있고, 겹쳐지기 시작하는 부분에서의 인덕턴스는 여자전류의 함수가 된다.

SRM과 같은 돌극 구조나 극부포화에 의한 자기회로의 비선형성을 가진 기기의 특성은 유한요소법으로 해석할 수 있다[4].

변위전류를 무시할 수 있는 준 안정상태에서 전류밀도 J 와 자계의 세기 H 와의 사이에는 식(5)와 같은 관계가 있다.

$$\nabla \times H = J \quad (5)$$

자계의 세기 H 와 자속밀도 B 와는 식(6)이, 그리고 자속밀도 B 와 자기벡터 포텐셜 A 는 식(7)이 성립한다.

$$H = \nu B = \frac{1}{\mu} B \quad (6)$$

$$B = \nabla \times A \quad (7)$$

여기서 μ 는 투자율이며, ν 는 자기저항율이다. 자속밀도는 연속적인 성질을 가지고 있으므로 식(8)이 성립한다.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (8)$$

식(6), (7)을 식(5)에 대입하면 식(9)가 된다.

$$\nabla \times \nabla \times A = \mu J \quad (9)$$

여기서 벡터 정의(vector identity)를 이용하면 식(9)는 식(10)과 같이 나타내 진다.

$$\nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A = \mu J \quad (10)$$

coulomb 조건 $\nabla \cdot A = 0$ 를 식(10)에 대입하면 식(11)과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (11)$$

2차원 해석인 경우 식(11)은 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \quad (12)$$

식(12)를 이용하여 자기 벡터 포텐셜 A를 구함으로써 전동기의 자속을 결정할 수 있다.

5. 여자에 따른 구동특성 해석

SRM의 운전특성을 나타내는 자기수반에너지는 회전자 위치의 영향을 받으므로 이를 해석하기 위해서는 여자전류와 회전자의 위치함수로 쇄교자속을 표현해야 한다[1].

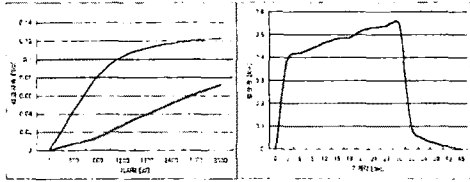
그림 2(a), 3(a), 4(a), 5(a)는 이상적인 전류를 인가할 경우 여자방법에 따른 쇄교자속/기자력의 변화를 나타낸 것이고, 각 여자방법에서 발생하는 토크는 그림 2(b), 3(b), 4(b), 5(b)에 나타내었다. 구동방식에 따른 발생 토크 크기를 비교하기 위해 기계각을 0~45[deg]까지 변화시켰다.

SRM에서 발생 토크는 각상의 쇄교자속/전류의 변화폭 선으로 둘러 싸여진 면적으로부터 계산할 수도 있다[3]. 그러나 본 연구에서는 유한요소법으로 계산하였다.

(1) 단절권 유니플라

단절권 유니플라 구동의 경우 그림 1(a)에서와 같이 u 상에만 여자한 것으로서 기자력의 증가에 따른 여자 패턴은 그림 2(a)와 같다. 고정자에 감겨진 코일에 전류를 증가할

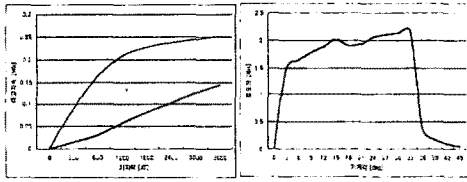
경우 발생되는 쇄교자속은 기자력이 900[A]정도 까지는 선형적인 변화를 하지만 그 이상에서는 포화됨을 알 수 있다. 실제 발생 토크는 고정자에 3[A] 전류를 흘렸을 때 그림 2(b)에서와 같이 0.45[Nm]정도가 발생했다.



(a) 자화곡선 (b) 토크
그림 2. 단절권 유니플라 여자

(2) 전절권 유니플라

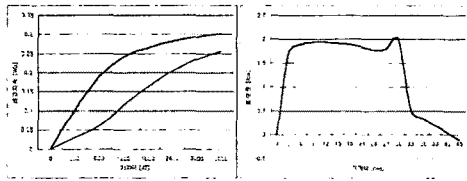
전절권 유니플라 구동의 경우 그림 1(b)에서와 같이 3상 중 두상에만 여자한 것으로 기자력의 증가에 따른 쇄교자속의 변화는 그림 3(b)와 같으며, 불포화 영역에서 쇄교자속이 차지하는 궤적은 단절권에 비해 거의 2배가됨을 알 수 있다. 전절권 유니플라의 경우를 알아보기 위해 고정자에 3[A]를 흘렸을 때의 발생 토크 크기가 그림 3(b)에서 알 수 있듯이 약 2[Nm]정도이다. 이 크기가 단절권 유니플라 구동의 4배가 되는 것은 권선의 턴수가 2배이기 때문이다.



(a) 자화곡선 (b) 토크
그림 3. 전절권 유니플라 여자

(3) 전절권 바이플라

그림 1(c)와 같은 전절권 바이플라 구동의 기자력에 대한 쇄교자속의 궤적은 그림 4(a)와 같고, 토크는 그림 4(b)와 같다.



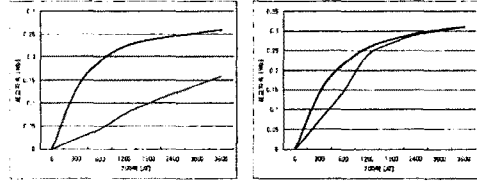
(a) 자화곡선 (b) 토크
그림 4. 전절권 바이플라 여자

전절권 바이플라 구동에서 두상 중 한 상은 정으로 여자되고 나머지 한상은 부로 여자될 경우 회전자가 불포화 구간에 위치했을 때의 피어미언스는 전절권 유니플라나 단절권 바이플라와 같은 형태지만 약간 증가하며, 비정렬 구간에서의 쇄교자속은 거의 2배가 된다. 발생 토크는 전절권 유니플라에 비해서 거의 변화가 없지만 맥동성분이 다소 완화됨을 알 수 있다.

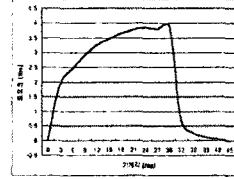
(4) 전절권 구형과

그림 1(d)에서와 같이 3상을 동시 여자하는 전절권 구형과 구동방식은 자화곡선의 면적이 그림 5(a)처럼 다른 구동 방식에 비해 커지만, 통전기간이 가장 길기 때문에 권선 저항에 의한 손실이 커질 수 있다.

이 방식의 여자는 앞서 다른 방식과는 달리 정렬된 위치에서의 쇄교자속은 상당히 높다. 또한 그림 5(b)에서와 같이 비정렬 구간에서의 쇄교자속으로부터 일부가 포화되는 현상을 나타내고 있다. 같은 체적일 경우 단절권 유니플라 구동에 비해 거의 8 배, 전절권 유니플라 및 바이플라에 비해서는 2배의 토크가 발생함을 알 수 있다.



(a) V. W상 자화곡선 (b) U상 자화곡선



(c) 토크

그림 5 3상 구형과 여자

6. 결 론

여자 방법에 따른 SRM의 동작특성을 정확하게 해석하기 위해서는 권선 단부에 대한 영향을 고려하여야 하나 여기서는 해석의 편의를 위해 2차원 해석만을 실시하였다. 고정자의 권선법 및 권선에 인가되는 전류에 의한 여자 패턴의 종류에 따라 쇄교자속 및 토크의 크기를 비교 해석한 결과 같은 입력전류 조건에서 단절권 유니플라를 기준으로 전절권의 경우 4배의 토크가 발생하며, 3상 구형과 방식에 의한 여자일 경우 토크는 단절권에 비해 4배에 가까운 토크가 발생함을 알 수 있었다.

앞으로는 이와 같은 여자패턴의 특성에 따른 보다 정확한 특성해석을 위해 단부 효과를 고려한 3차원 해석과 토크 맥동분을 줄이기 위한 연구가 함께 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이민명, "특수동기전동기", 대한전기학회지, 제42권, 12호, pp.52-64, 1993
- [2] 문재원, 오석규, 안진우, 황영문, "상호인덕턴스를 이용한 전절권 SRM의 운전특성", 대한전기학회논문지, 제 47 권 9호, pp.1364-1370, 1998
- [3] B.C.Mecrow, "Fully pitched-winding switched reluctance and stepping motor arrangements", IEE pt.B, Vol.140, No.1, pp.61-70, Jan.1993
- [4] R.Arumugan et al., "Magnetic Field Analysis of a Switched Reluctance Motor using a Two Dimensional Finite Element Model", IEEE Trans on Mag, Vol.21, No.5, pp.1883-1885, Sep.1985