고정자와 회전자의 스큐에 따른 단상 SRM의 소음/진동 특성 분석

김현철*, 양형열**, 임영철*, 정대원**
전남대학교*, 호남대학교**

Noise/Vibration Analysis of a Single-Phase SRM with Skewed Stator and Rotor

Kim Hyun-Chul*, Yang Hyong-Yeol**, Lim Young-Cheol*, Chung Dae-Won**
Chonnam National University*, Honam University**

ABSTRACT

본 논문에서는 최소의 진동/소음을 가지는 SRM을 설계하기 위하여 고정자와 회전자의 Skew에 따른 단상 6/6 SRM의 소음/진동 특성을 비교, 분석하였다. SRM(Switched Reluctance Motor)에 발생하는 소음/진동의 주 원인은 모터 구동 시 Yoke에 발생하는 방사방향 힘의 변화라고 할 수 있다. Yoke에 작용하는 힘은 돌극이 위치한 곳에 집중되므로 더욱 큰 진동을 유발하지만 회전자와 고정자에 동일한 Skew를 적용시키면 힘을 받는 Yoke의 면적은 늘어나게 되고, 따라서 방사방향의 힘을 요크 전체로 분산 시킬 수 있다. 이에 따라 스위치 온, 오프 시 요크에 인가되는 방사방향의 힘의 최대치는 감소하게 되어 진동/소음이 현저히 줄어들게 된다. 본 논문에서는 최소의 진동/소음을 가지는 SRM을 설계하기 위하여 시뮬레이션을 통하여 회전자와 고정자의 스큐 각도에 따른 힘의 분포를 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 하여 대표적인 특성을 가진 0°, 18°의 SRM을 설계하여 소음/진동을 측정한 결과 제안한 방식이 소음/진동을 현저하게 감소시키는 효과를 가짐을 입증하였다.

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)는 많은 장점(낮은 제작비, 높은 동작속도, 보수의용이성 등)들 때문에 최근 활발하게 실용화 연구가 진행되고 있다. 하지만 소음/진동에 의하여 가전분야나 사무 분야에는 사용이 제한되어 지고 있다. 소음/진동은 방사방향의 전자기력 변화에 의해 발생되며, 고정자 Yoke의 진동과 청각적인 소음을 유발한다.

본 연구에서는 고정자와 회전자에 모두 Skew를 적용하여 방사방향 힘을 분산시키고 전자기적인 힘의 순간적인 변화를 줄임으로써 SRM의 소음/진동을 억제하는 방법을 제안하였다. Skew 적용 시에는 고정자 돌극이 위치한 Yoke에 집중되던 힘이 Skew 각도에 따라 Yoke 전체로 분산하게 된다. 분산된 힘에 의해 스위치 오프 시 발생하는 급격한 힘의 변화 또한 줄일 수 있어 소음/진동이 현저히 감소된다. 시뮬레이션을 통하여 Skew각도에 따른 방사방향의 힘의 분산 정도와 최대치를 분석하고 Skew 0°, 18°의 단상 6/6 SRM을 설계하여 소음/진동 특성을 비교/분석 하였다.

2. 본 론

2.1 Skew에 따른 힘 분포 특성 시뮬레이션

SRM은 회전 시 회전자와 고정자 사이에는 방사방향의 전자적인 힘이 작용하게 된다. 이러한 힘은 식 (1)과 같다.[2]

$$F_r(\theta, l_g, i) = -\frac{1}{2} i^2 \frac{L(\theta, i)}{l_g} \quad (1)$$

여기서, i는 여자전류, l_g는 공극 길이, L은 안덕턴스이다. 고정자와 회전자에 동일한 각도로 Skew를 적용하더라도 방사방향에 생기는 전자적인 힘인 Fr은 동일하다.

2.1.1 시뮬레이션

힘의 분포를 살펴보기 위해 그림 1과 같이 고정자와 회전자에 Skew angle $\ominus_r$, $\ominus_s$를 적용하였다.

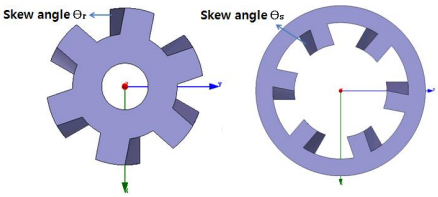


그림 1 Skew 적용한 고정자와 회전자 돌극 구조
Fig. 1 Structure of Skewed Stator and Rotor

원활한 분석을 위해 고정자의 돌극이 위치한 Yoke를 방사방향으로 분할하고 스위치 오프 직전의 방사방향 힘의 크기와 분산 정도를 분석하였다.

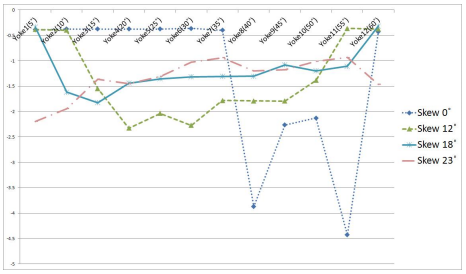


그림 2 Skew 각도에 따른 방사방향의 힘의 분포
Fig. 2 Distribution of Radial Force(RF) according to the skew angle

힘의 분포는 그림 2와 같이 Skew 0° 때 집중 되었던 힘이 Skew 각에 따라 고정자 Yoke 전체로 분포 되었으며 그림 3과 같이 힘의 최대치 또한 Skew 각에 따라 감소한 것을 볼 수 있다.

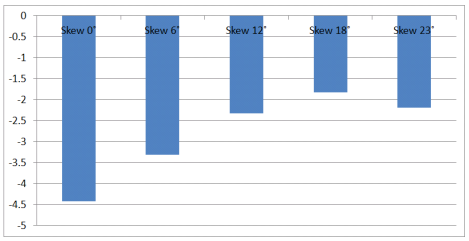


그림 3 Skew에 따른 방사방향의 힘의 최대치 비교
Fig. 3 Maximum Radial Force(RF) according to the skew angle

하지만, Skew 각을 계속 해서 증가 시키면 축 방향으로 고정자 돌극들이 중첩되어 최대치가 증가하는 현상이 발생한다.

2.1.2 전자기력 해석

SRM의 전자기적인 힘을 해석하기 위해 유한요소 전기장 해석을 이용하였다. 자기벡터포텐셜과 전류 밀도가 Z축 성분만 존재하고 모든 물리적인 양이 Z축에 대하여 일정하다고 가정하면 지배방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 자기벡터포텐셜 $\vec{A}$를 계변수로 하였다.

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu}(\nabla \times \vec{A})\right] = \vec{J_0} \tag{2}$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{3}$$

여기서 $\vec{J_0}$는 여자전류밀도이다. 자속밀도 $\vec{B}$는 자기벡터 포텐셜 $\vec{A}$를 대입하여 식 3으로 나타낼 수 있다. Maxwell Stress Tensor 를 이용하여 회전자와 고정자의 돌극에 가해지는 힘은 식 4과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta F_t = \frac{B_n - B_t}{\mu_0}\Delta L \tag{4}$$

$$\Delta F_n = \frac{B_n^2 - B_t^2}{2\mu_0}\Delta L$$

여기서, ΔF_t는 접선방향의 힘, ΔF_n는 법선방향의 힘, B_n, B_t는 접선방향과 법선방향의 자속 밀도, ΔL은 적분경로의 길이이다. 총 발생하는 힘은 공극의 적분경로를 지나는 모든 요소의 합으로 식 5와 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$F = h\sum_{K=1}^{N_g}\Delta F_k \tag{5}$$

여기서, h는 유효적층폭, N_g는 적분경로의 요소개수이다.

2.2 SRM 설계 및 소음/진동 분석

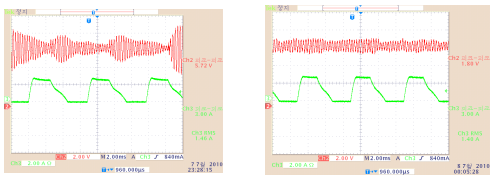
시뮬레이션 결과를 토대로 Skew 0° 와 18°의 단상 6/6 SRM 설계하여 소음/진동 특성을 분석 하였다.

2.2.1 설계된 SRM의 소음/진동 분석

설계한 단상 6/6 SRM은 그림 4와 같고, Skew 각이 클 경우 와인딩 및 설계상 어려움을 가지게 된다.

그림 4 Skew가 적용되어 설계된 SRM
Fig. 4 Designed of SRM applying the skewed

진동측정은 압전타입의 가속도센서(VS0300A1)를 사용하였고, 고정자 돌극이 위치한 Yoke에 고정하여 측정을 하였다.



(a) (b)

그림 5 (a) Skew 0°의 진동 파형(1550RPM), (b) Skew 18°의 진동 파형(1550RPM)
Fig. 5 (a) Vibration waveform of Skew 0°(1550RPM), (b) Vibration waveform of Skew 18°(1550RPM)

그림 5와 같이 Skew 0° 에서 스위치 오프 시 큰 진동을 보이지만 Skew 18°에는 현저히 줄어든 것을 볼 수 있다. Skew 각도에 따른 방사방향의 힘의 분산과 최대치 특성이 소음/진동 절감에 많은 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

SRM은 여러 많은 장점을 가지고 있지만, 소음/진동에 의해 사용 분야가 많이 한정되어 사용되고 있다. 소음/진동의 주원인은 오프 시 방사방향의 전자력의 변화이며, 이는 고정자 Yoke에 진동과 청각적인 소음 발생 시킨다.

본 논문에서는 방사방향의 힘을 분산시키기 위해 고정자와 회전자에 Skew를 적용하여 시뮬레이션하였고 결과를 토대로 Skew 0°, 18° 단상 SRM을 설계하여 방사방향의 힘에 따른 소음/진동의 특성을 비교/분석하였다.

본 논문은 교육과학기술부(지역거점연구단육성사업/바이오하우징연구사업 단) 및 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.2007-P-EP-HM-E-09-0000)

참 고 문 헌

[1] Haijun Zhang, "Radial force reduction for switched reluctance motor with skewed slot structure based on FEM", Journal of Scientific & Industrial Research, Vol. 69, August 2010, pp. 594-599.

[2] 김현욱, "전자기력에 의한 SRM 모터의 비선형 과도응답해석" 한국정밀공학회 학술대회 논문집, Vol. 1998 No. 11월