1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999. 7.19-21

스위칭에 따른 전자기적 가진력에 의한 SRM 고정자의 변위해석

하 경호*, 남 혁*, 홍 정표*, 김 규탁*, 장 기찬**
* 창원대학교 전기공학과, ** 한국전기연구소 전동기 응용 및 전기자동차팀

Coupled Electromagnetic Force and Vibration Analysis of Switched Reluctance Motor According to Switching Scheme

K. H. Ha*, H. Nam*, J. P. Hong*, G. T. Kim*, K. C. Chang**
* Dept. of Electrical Eng., Changwon Nat'l Univ., ** KERI

Abstract - This paper deals with modal analysis and displacement of stator in SRM due to electromagnetic forces according to the rotor position. The analysis is performed by using 3 dimensional Finite Element Method(FEM). And, the prediction of resonance speed is achieved from the comparison with current harmonic according to duty ratio of voltage source and the natural frequencies.

1. 서 론

일반적으로 스위치드 릴럭턴스 모터(SRM)는 구조가 간단하고 고속운전이 가능하다는 점 등의 많은 장점을 가지고 있지만 진동과 토오크 리플이 심하다는 문제점이 단점으로 지적되고 있다. 특히 고정자의 한 상에서 다음 상으로 여자가 전이되는 전류(轉流)시에 발생하는 토오크 딥(dip)은 상당히 크다[1]. 전자기 에너지 변환 시스템에서 진동의 주요 원인은 전동기 구조물의 고유주파수가 전자기적 가진력의 주파수와 일치하거나 근접할 경우에 발생한다. 또한, 여러 가지 요인에 의한 회전자 또는 고정자의 편심 때문이다. 편심은 공극에서 기자력의 고조파를 증가시켜 전동기의 전자기 특성을 저하시키고 구조물의 고유진동수와 일치하여 소음 및 진동특성을 악화시킨다[2]. 따라서, 진동이나 노이즈를 줄이기 위해서는 설계 단계에서 고정자의 고유주파수와 동적 편심에 의한 공극의 변화를 예측하여 이의 영향을 분석하는 것이 필요하다. 또한 스위칭에 의한 전류의 n차 고조파 성분은 토오크 리플과 공급주파수의 n차 성분을 가지는 기자력 주파수를 발생시키므로 제어 관점에서 스위칭 제어 기술로써 여자전류의 특정 고조파 성분을 제거하는 기술이 필요하다[3].

본 논문에서는 SRM을 대상으로 전압의 듀티비(duty ratio)에 따라 전자기 가진력에 의한 고정자의 동적 편심과 모달해석을 하였다. 즉, 회전자의 위치에 따라 전자기 가진력의 반경방향의 힘에 의한 고정자의 변위량을 해석하여 공극의 변화를 예측하였으며 고정자 입력전류의 고조파 분석결과를 모달해석으로부터 구한 고유진동수와 비교하여 공진가능 주파수를 제시하였다.

공진 주파수(고유치)와 각 고유치에 대한 모드 형상은 3차원 FEM을 이용하여 구하였다. 전자기적 가진력을 계산하기 위하여 전자기해석 수행에 필요한 회전자 위치에 대한 전원전압의 듀티비에 따른 전류는 전압방정식과 고정자와 회전자의 위치에 따른 공극에서의 인덕턴스 관계로부터 산출하였으며, 이때 인덕턴스의 자기포화와 프린징현상은 무시하였다. 그리고 고정자 표면에서 이 전류에 의해 발생한 전자기적 가진력의 국부적인 힘은 멕스웰 응력으로 구하였다.

스위칭에 따른 전자기적 가진력에 의한 SRM 고정자 변위해석과 모달해석을 위한 해석과정은 그림 1과 같다.

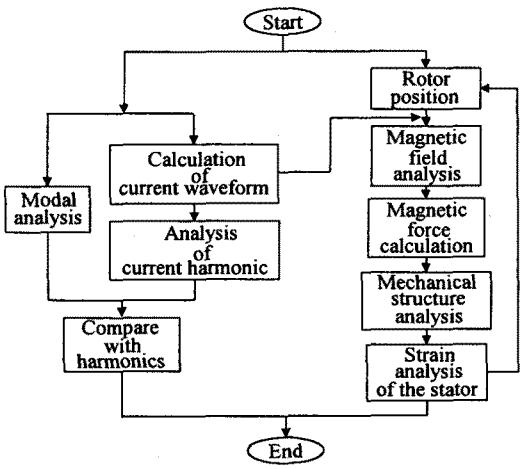


그림 1 해석 과정

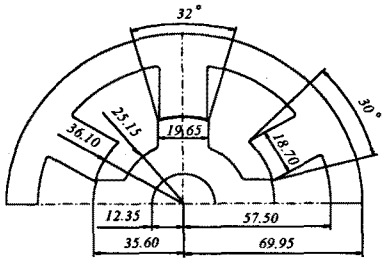


그림 2 SRM 도면/치수

2. 본 론

2.1 해석 방법

2.1.1 해석 모델

본 논문의 해석 모델은 고정자와 회전자의 극수가 각각 6극과 4극을 가지는 SRM이고 고정자에는 3상권선이 감겨져 있으며 공극의 길이는 0.6 [mm]이다. 그림 2는 SRM의 단면도에 치수를 나타내었으며 표 1은 구조해석을 위한 주요 기계적 물성치를 나타내고 있다.

2.1.2 듀티비에 따른 전류계산

회전자의 위치에 따른 인덕턴스 프로파일과 전압방정식을 이용하여 위치에 따른 전류를 계산하였다. 온-오프 시간에 따른 전류 파형을 얻기 위하여 SRM 한 상에 대한 전압방정식 V_s는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

표 1 해석모델의 사양 및 기계적 물성치

정격 출력	1 [kW]	정격 속도	2000 [rpm]
규소강판 밀도	7800 [kg/m^3]	축방향 길이	92.45 [mm]
포아송비 Possion's ratio	0.25	영 계수 Young's modulus	205 [Gpa]

$$V_s = Ri + L(\theta, i)\frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta,i)}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

한 상에 스위치가 온-오프 될 때 전류 파형은 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$i(\theta) = \frac{V_s}{R+\omega M}\left\{1 - e^{-(\frac{R+\omega M}{\omega L})(\theta-\theta_{on})}\right\} + i_{on/off}(\theta)\, e^{-(\frac{R+\omega M}{\omega L})(\theta-\theta_{on/off})} \quad (2)$$

여기에서 R은 권선저항, L은 한 상에 대한 인덕턴스, $i_{on/off}$는 스위칭 온 또는 오프시 초기치 전류, M은 $M = dL/d\theta$을 나타낸다.

2.1.3 전자기 가진력 계산

벡터포텐셜을 계변수로 가지는 SRM의 기본적인 지배방정식은 식 (3)과 같다.

$$\nabla^2 \times \vec{A} = \vec{J}_0 \quad (3)$$

자계 해석으로부터 멕스웰 응력을 이용하여 고정자에 작용하는 가진력을 산출한다. 자성체 절점 j에 대한 고정자의 반경 방향으로 작용하는 전자기적 가진력의 힘밀도 p는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \frac{1}{\mu_0}[(\vec{n}\cdot\vec{B})\vec{B} - \frac{1}{2}B^2\vec{n}] \quad (4)$$

여기에서 $\vec{n}$은 고정자 극의 표면에 대한 법선 방향 단위벡터, $\vec{B}$는 자속밀도를 나타낸다.

2.1.4 변위 계산

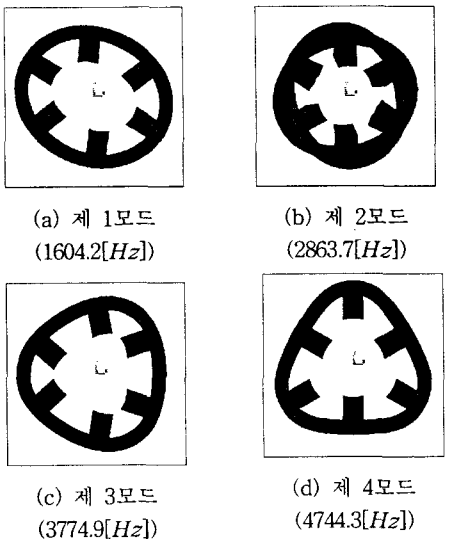
헤밀턴 원리(principle of Hamilton)를 기본으로 한 운동방정식은 다음과 같으며 기계적 댐핑은 무시하였다.

$$\boldsymbol{M}\cdot\ddot{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{X} = \boldsymbol{F} \quad (5)$$

여기에서 $\boldsymbol{X}$는 각 절점에서 변위벡터, $\boldsymbol{M}$과 $\boldsymbol{K}$는 각각 전체질량행렬과 강성행렬, 그리고 $\boldsymbol{F}$는 전자기력에 의한 가진력을 나타낸다. 또한 모달해석은 구동항 $\boldsymbol{F}$를 영으로 두고 자유진동 해석을 수행하게 된다.

2.2 해석 결과

그림 3은 3차원 FEM에 의해 계산이 이루어진 것으로 처음 4개의 모드형상과 그에 대한 주파수를 보여주고 있다. 모달해석을 위해 사용된 요소는 8개의 절점들로 구성되는 육면체 요소이며 각 절점은 3개의 자유도를 가진다. 해석모델의 요소수는 6120개이다. 그림 3의 (a)는 SRM의 전자기적 가진력의 분포와 비슷한 타원형태(oval mode)로 진동을 하고 있으며, 이 타원 모드 형태의 운동에 의해 발생하는 소음이 상당히 클 것으로 예측된다. 또한 그림 3의 (b)는 전면과 후면이 다른 방



(a) 제 1모드 (1604.2[Hz])　(b) 제 2모드 (2863.7[Hz])

(c) 제 3모드 (3774.9[Hz])　(d) 제 4모드 (4744.3[Hz])

그림 3. 각 고유진동수에 대한 모드형상

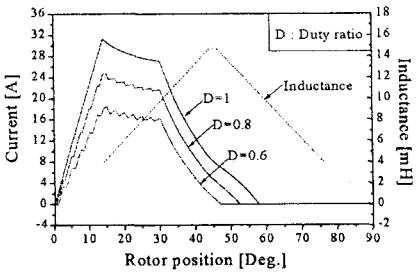


그림 4. 듀티비에 따른 전류파형

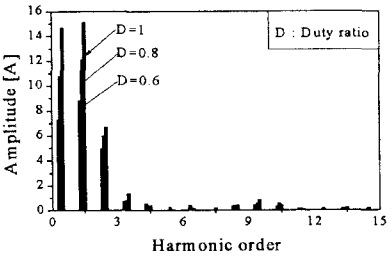


그림 5. 전류 고조파성분

향으로 타원운동을 하고 있는 축모드(longitudinal mode)를 가지므로 비틀림 현상이 나타난다. 그러므로 축모드 운동을 보기 위해서는 3차원 해석이 행해져야 한다.

그림 4는 전압의 듀티비를 변화시킨 경우 회전자 위치에 따른 한 상의 전류 파형과 인덕턴스 프로파일을 보여주고 있다. 이 전류에 대한 고조파 해석을 하면 그림 5와 같으며 코일 여자 주파수의 1, 2, 3차 성분이 지배적으로 나타난다. 3상 p극의 고정자를 가지는 SRM의 여자전원주파수가 f인 경우, 고정자에 작용하는 반경방향의 전자기적 가진력 주파수는 $p \times f$가 된다. 또한, 전류의 n차 고조파 성분은 n차 성분의 공간 고조파 기자력을 생성시키므로 이에 의한 전자기적 가진력의 주파수

는 $p \times n \times f$이다. 따라서, 고정자의 고유진동수와 전류의 고조파 성분에 의한 공진가능속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{공진가능속도} = \text{고유진동수} / (p \times n)\ [Hz]$$

본 논문의 해석모델에서 그림 5로부터 입력전류의 1, 2, 3차의 고조파 성분과 그림 6의 제 1차 모드의 고유진동수에 의한 공진가능속도는 각각 267.36, 133.68, 89.12 [*Hz*]이다.

그림 6과 그림 7은 각각 회전자의 위치에 따른 발생토오크와 전체 흡인력의 해석결과를 나타낸 것이다. 듀티비가 작을수록 전류의 감소로 발생토오크와 반경방향의 힘 또한 감소하였음을 알 수 있다.

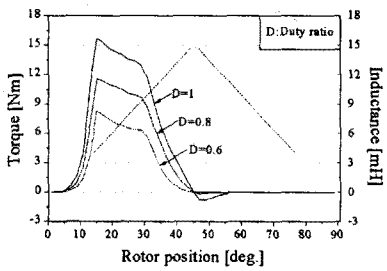


그림 6. 발생 토오크

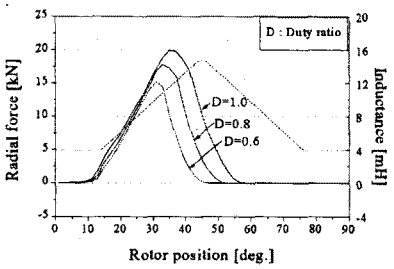


그림 7. 전체 흡인력

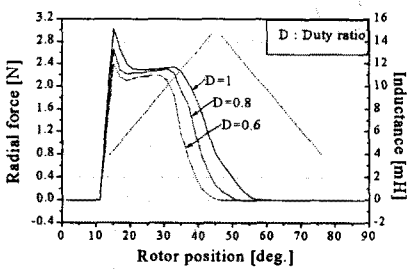


그림 8. 반경방향의 전자기적 가진력

그림 8은 정격 운전시 회전자의 위치에 따라 고정자 극표면에 작용하는 반경방향의 평균작용력을 회전자의 위치에 따라 나타내었으며, 회전자와 고정자가 일치하기 시작하는 위치에서 최대 가진력의 크기를 가진다. 여기에서 축방향 힘의 변화는 없으므로 반경방향의 힘은 규

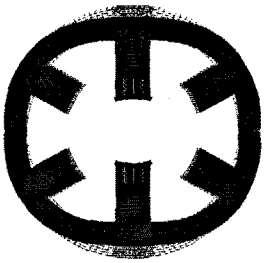


그림 9. 전자기 가진력에 의한 고정자 변형

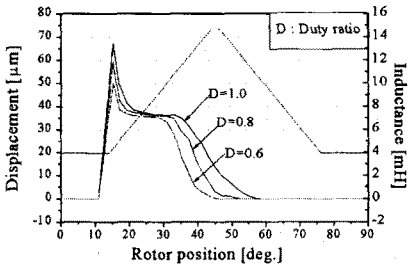


그림 10. 가진력에 의한 고정자 변위

소강판 한 장(0.5 [*mm*])에 작용하는 수치를 계산한 결과이다. 그림 9는 고정자와 회전자가 완전히 일치한 경우 전자기적 가진력에 의해 변형 전·후의 고정자 구조물을 나타낸 것으로 화살표는 극표면에 작용하는 반경방향의 전자기적 가진력을 보여주고 있다. 여기서, 해석시간을 단축하기 위해서 전자기 가진력에 의한 변위의 해석은 규소강판 한 장을 모델링하여 해석하였다. 그림 10은 전자기 가진력에 의한 고정자의 변위를 해석한 결과이다. 고정자 각이 15° 일 때, 즉 고정자극과 회전자극이 중첩되기 시작할 때 최대 전자기적 가진력을 가지며, 이 힘은 고정자의 최대 변형을 만들어 낸다. 이 때의 최대 변위는 공극 길이의 약 10 [%]에 해당하는 67 [μm]이고 공극은 0.533 [*mm*]가 된다. 정렬위치로 이동하는 영역에서의 변위는 듀티비와는 상관없이 거의 일정한 값인 37 [μm]를 가지므로 공극은 0.563 [*mm*]이다.

3. 결 론

본 논문에서는 공극의 변화를 예측하기 위하여 회전자의 위치에 따라 변하는 전자기적 가진력에 의한 고정자 변위를 해석하였다. 또한 3차원 모달해석을 통하여 구한 고유 진동수와 전류의 고조파 성분 주파수를 비교하여 공진가능속도를 제시하였다.

[참 고 문 헌]

[1]T.J.E. Miller, *Switched Reluctance Motors and Their Control*,1st,1993

[2]G. Henneberger *et al.*, "Procedure for the numerical computation of mechanical vibration in electrical machine", *IEEE Trans. Magn*, Vol. 32, pp. 1357-1363, 1996

[3]C. Pollock and C. Y. Wu, "Ancoustic noise cancellation techniques for switched reluctance drives," *IEEE Trans. Industry App.*, vol. 32, pp. 477-484, 1997