

SRM 회전자 불평형에 의한 응답특성에 관한 연구

하경호*, 강경호*, 홍정표*, 김규탁*, 장기찬**
 *창원대학교 전기공학과, **한국전기연구소 전기자동차 및 전동기 응용팀

A Study on the Response Characteristic Due to Unbalance Mass of Switched Reluctance Motor

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

Abstract - This study deals with the unbalance response of a rotor of Switched Reluctance Motor(SRM) due to unbalanced mass. The method to analyze SRM with rotor-bearing system is based on an extension of the well-known Transfer Matrix Method(TMM). Most of the calculation results present the natural frequencies as a function of the speed of rotation which yields critical speeds and response to unbalanced mass.

1. 서 론

일반적으로 공극을 매개로 에너지 변환하는 자기회로 시스템에서 공극의 변화는 전자기 특성에 많은 영향을 미친다. 그 중 고정자와 회전체의 구조를 가지는 전동기의 공극을 변화시키는 요인은 회전체의 회전속도와 구조물이 가지는 고유진동수와 일치에 의한 공진, 가진력에 의한 고정자 구조물의 변위, 회전자의 기계적 불평형이나 질량 불평형등에 기인한다[1].

회전체는 회전축의 중심선에 대하여 질량분포가 비대칭적일 경우 항상 불평형을 가지게 된다. 이러한 비대칭은 설계 또는 제조시의 오차, 재질과 비동질성, 가공 또는 조립공차로 인하여 발생하며 회전체에 따라 정도의 차를 보인다. 대부분의 회전체가 가지는 이러한 불평형은 베어링과 지지구조에 힘을 가할 뿐만 아니라 기계 진동을 일으키기도 하며 전자기적 불평형을 야기하여 지지부에 하중을 더욱 증가시켜 소음과 진동을 더욱 악화시킨다. 이러한 진동의 크기가 충분히 크다면 전동기의 공극 변화에 큰 영향을 가져올 수 있으며 이는 결국 전동기 성능과 특성에 악영향을 가져온다.

스위치드 릴럭턴스 모터는 고속운전이 가능할 뿐만 아니라 구조적 특성으로 인한 경제성에 큰 장점이 있으나 진동과 소음의 문제로 상용화에 제약으로 작용한다. 특히 공극이 타 전동기 보다 작기 때문에 전동기의 특성을 정확히 분석하기 위해서는 운전 중 불평형에 의한 공극의 변화에 대하여 정확한 예측이 필요하다.

본 논문에서는 SRM전동기를 대상으로 하여 회전자의 질량 불평형에 의한 회전자의 거동을 정량적으로 분석하였다. 베어링 구조를 가지는 회전자를 등가집중 질량으로 이상화하여 해석할 수 있는 3차원 전달행렬법을 적용하였고[2], 이로부터 회전자의 공진 주파수와 모드형상, 질량 불평형에 의한 휘돌림(whirling)현상과 동적 특성을 제시하고자 한다[3]. 즉 질량 불평형에 의한 회전체의 변위와 회전속도에 따른 불평형 응답(frequency response function)특성 선도를 제시하고 이로부터 공극의 변화량을 계산하게 된다.

2. 본 론

일반적으로 회전체와 탄성축, 베어링으로 이루어진 계는 위험속도(고유진동수)를 가지고 있다. 만약 회전자의

중심이 어떤 원인에 의하여 조금이라도 편심져 있다면 위험속도에서는 매우 큰 축휨이 발생한다. 회전하고 있는 불평형이 계의 고유진동수와 동조하여 회전자에 여진하기 때문이다. SRM 회전자의 경우 다른 전동기에 비하여 적은 공극을 가지고 있으므로 이러한 회전자의 불평형을 고려한 응답특성해석이 반드시 필요하다.

2.1 해석 대상

그림 1은 해석대상인 6/4 SRM 회전자의 3차원 모델과 주요 치수, 그리고 집중질량과 관성이 없는 관성으로 연결된 등가 집중질량 해석모델을 나타내고 있다. 표 1은 해석대상 SRM 회전자의 물성치와 베어링 강성계수 등 기계적 물성치를 나타내었다.

2.2 불평형의 정의

공간에 고정된 직교좌표계 (x,y,z)를 고려하자. x축은 회전자의 축중심선 방향에 일치하고 다른 두 개의 좌표계는 아래 그림 1 AB의 횡단면으로 그림 2와 같다. 좌표계의 원점 O는 축 휨이 없을 때의 원판의 도심(축중심점)으로 S에 일치한다. 원판의 자중에 의한 정적인 휨이 없다면 축 중심점 S는 좌우 양 베어링의 중심을 연결한 직선 상에 있다. 원판과 축과의 교점 S의 좌표를 z 및 y로 할 때 z_G와 y_G로 표시되는 원판의 무게중심 G는 축중심점 S로부터 어느 일정거리 ε 만큼 떨어져 있다. 이 ε을 편중심(eccentricity)라고 한다. 편중심 ε과 불평형 질량 m의 곱은 식 (1)과 같이 나타난다.

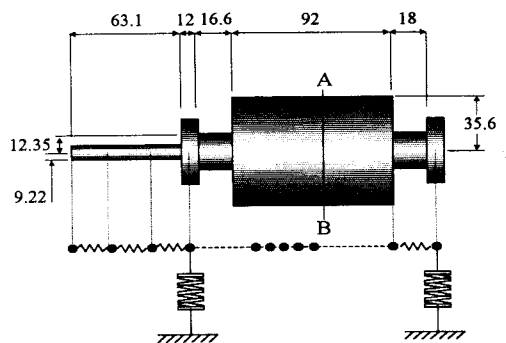


그림 1 SRM의 주요 치수 및 집중질량 등가도

표 1 SRM 회전자의 기계적 물성치

회전자 극길이	25.15(mm)	회전자 외경	35.6 (mm)
Shaft	밀도 (kg/m ³)	7850	
	영계수 (N/m ²)	2.03×10 ¹¹	
Stator/Rotor	밀도 (kg/m ³)	7310.8	
	영계수 (N/m ²)	2.03×10 ¹¹	
Bearing	강성계수 (N/m)	5.36×10 ⁹	

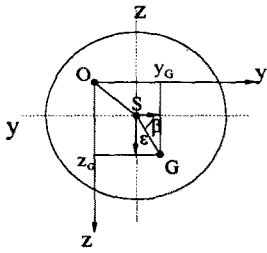


그림 2 불평형에 의한 편심

$$\vec{U} = m\epsilon e^{-i\beta} \quad (1)$$

이 때 \vec{U} 를 질량 불평형으로 정의한다. 이러한 불평형은 회전자가 각속도 ω 로 회전할 경우 y-z평면에서 원심력에 의한 가진력 성분은 식 (2)와 같으며 x-y 평면에서도 동일한 불평형 가진력을 가진다.

$$\vec{F} = \omega^2 m\epsilon e^{-i(\beta + \omega t)} \quad (2)$$

2.3 불평형을 고려한 3차원 전달행렬

진동은 외부 가진력의 작용 유무에 따라 자유진동과 강제진동의 두가지로 크게 나누어 질 수 있다. 회전자의 모드 해석은 외부 가진력이 존재하지 않는 경우 회전자가 가지는 고유 진동수와 고유 모드를 구하는 방법이다. 그러나 본 논문에서 고려한 질량 불평형에 의한 회전자의 응답특성은 불평형에 의한 원심력이 가진력으로 작용하므로 강제진동이다. 전달행렬법을 적용하기 위한 해석상의 가정으로 재질은 등방성이며 흑크의 법칙을 따른다. 그리고 베어링의 강성은 속도에 상관없이 일정하며 감쇠는 고려하지 않았다.

3차원 전달행렬법을 적용하기 위해서 회전축 방향을 x축이라고 할 때 각 x-y평면, x-z평면에서 강성요소에 대한 필드 행렬과 질량요소에 대한 포인트 행렬을 구한다. 각 기본요소 양단의 물리상태를 규정하는 양은 내력(internal force)과 변위(displacement)로 계의 상태량을 표현할 수 있으며 이로부터 행렬을 구성할 수 있다.

x-y평면에서의 상태변수는 y 처짐, θ_y 각변위, V_y 전단력, M_x 모멘트이며 y-z 평면에서의 상태변수는 z, θ_z , V_z , M_y 로써 전체 8개의 상태변수를 가진다.

필드행렬과 포인트행렬의 곱으로 나타내지는 전체 시스템에 대한 전달행렬을 구성하면 최종 전체(overall) 행렬과 좌우단의 상태변수로 나타내면 다음과 같다(3).

$$Tz = -f \quad (3)$$

여기서, T 는 전체전달행렬, z 는 상태변수, f 는 외부 가진력을 나타낸다. 회전자 좌단의 미지량은 다음과 같이 결정할 수 있으며 이를 바탕으로 응답특성을 구할 수 있다.

$$z_0 = -T^{-1}f \quad (4)$$

불평형에 의한 가진력을 포함한 3차원 전달행렬법을 적용하기 위하여 식 (4)를 전체 전달행렬로 나타내면 식 (5)와 같으며 f 는 식 (2)의 불평형력이 구동항으로 작용한다.

따라서 전체 행렬은 요소 수에 상관없이 자유도와 내력에 의해 결정된 8×8 로써 전체해석영역을 표현할 수 있으므로 유한요소해석에 비하여 해석시간을 단축할 수 있으며 선·후 처리가 용이한 장점이 있다.

$$\begin{bmatrix} y \\ z \\ \theta_y \\ \theta_z \\ V_y \\ V_z \\ M_x \\ M_y \\ 1 \end{bmatrix}_{i+1}^R = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & \dots & T_{19} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & \dots & T_{29} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & \dots & T_{39} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & \dots & T_{49} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{91} & T_{92} & T_{93} & \dots & T_{99} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \\ \theta_y \\ \theta_z \\ V_y \\ V_z \\ M_x \\ M_y \\ 1 \end{bmatrix}_i^L \quad (5)$$

2.4 해석결과

해석 대상인 SRM의 회전자에 아래 그림 3과 같이 회전자의 점단부분, 중간, 후단부분으로 3가지 경우의 질량 불평형이 있다고 가정하였다. 표 2에 각 질량 불평형의 크기와 중심 축에서의 각도를 정의하였다.

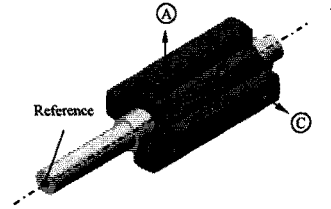


그림 3 SRM 회전자의 질량불평형 위치

표 2 SRM 회전자 질량 불평형의 크기 및 각도

질량 불평형 구분	불평형 [kg·m]	각도 [°]
A	1×10^{-5}	90
B	1×10^{-5}	45
C	1×10^{-5}	0

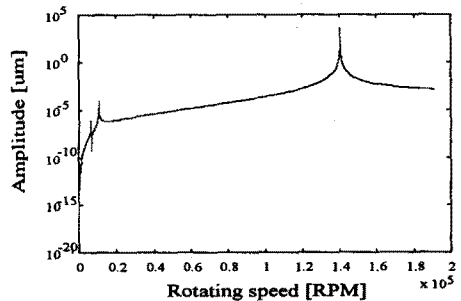


그림 4 기준위치에서 응답특성(A점 질량 불평형)

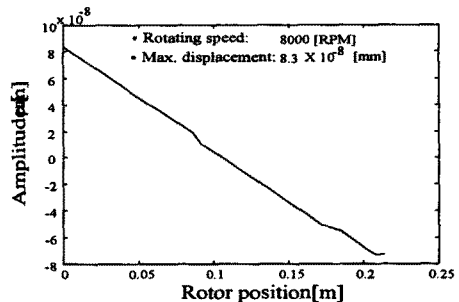


그림 5 회전자 위치에 따른 응답특성(A점)

그림 10은 SRM의 자유진동을 모달해석으로부터 산출된 고유진동주파수와 각 주파수에 대응하는 고유모드 형상을 나타낸 그림이다. 그림에서 1, 2 차는 강성모드(Rigid mode)이며 회전체 자체의 변형은 발생하지는

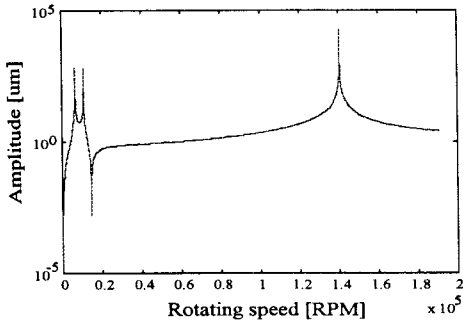


그림 6 기준위치에서 응답특성(B점 질량 불평형)

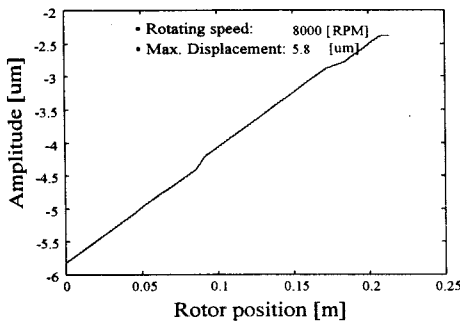


그림 7 회전자 위치에 따른 응답특성(B점)

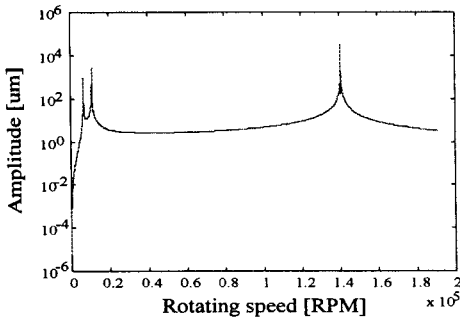


그림 8 기준위치에서 응답특성(C점 질량 불평형)

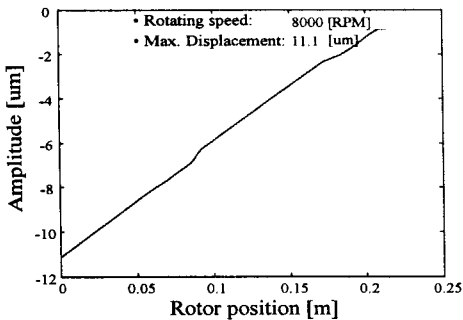


그림 9 회전자 위치에 따른 응답특성(C점)

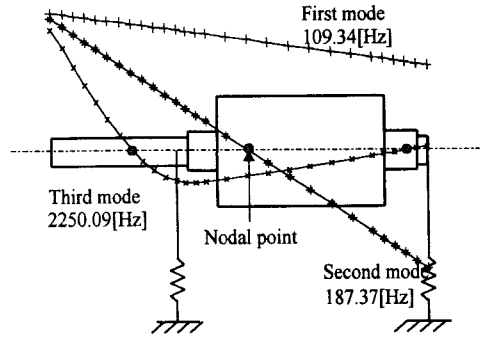


그림 10 모드형상과 고유진동수

않으며 일차모드에서 수평형대로 진동을 하며, 이차 모드에서 양단은 반대방향으로 진동한다. 계의 3차모드로 될 때만 회전체 자체는 변형하는 특성을 가진다.

그림 4, 6, 8은 질량 불평형에 기인한 회전자 속도에 따른 기준점(reference)에서 변위를 계산한 주파수 응답 특성이다. 이 결과에서 첨두치로 급상승하는 부분은 질량 불평형에 의한 가진력의 휘둘림 주파수가 고유진동 주파수 대역을 통과할 때 고유진동수와 일치하여 공진하는 주파수 대역임을 알 수 있다. 또한 질량 불평형의 위치가 회전자 코아의 뒤로 이동할수록 변위량이 크게 나타남을 알 수 있으며 이는 질량 불평형이 회전자의 뒤로 이동할수록 기준점의 휘둘림 반경이 증가하기 때문이다. A점에 질량 불평형인 경우 회전자가 5000[RPM]으로 회전할 때 기준점에서 변위량은 10(μm)이다.

그림 5, 7, 9는 회전자가 8000(rpm)으로 회전하는 경우 질량 불평형에 의한 회전자의 위치에 따른 응답특성을 나타낸 그래프이다. 질량불평형 위치에 따라 회전자 위치에서의 최대변위량을 그래프위에 표시하였으며 회전자의 제일 앞부분에서 최대변위를 가진다. 이때 불평형이 C점에 위치한 경우 최대변위는 11.1(μm)이다. 그림 5에서, 회전자를 8000(rpm)으로 운전하면 1차 고유진동수를 벗어나 2차 고유진동수 사이에서 운전되므로 회전자는 2차모드의 양상으로 변위를 일으킨다. 이는 질량 불평형의 위치가 2차모드의 노달포인트(nodal point)와 비슷한 지점에 놓이기 때문에 이점에서 휘둘림에 의한 변위의 상승을 억제하게 된다. 또한, 회전자의 앞부분의 변위량은 질량 불평형이 B에서 C로 갈수록 증가하는 반면 회전자의 뒷부분에서 변위량은 감소하는 양상을 보이고 있다. 이는 1차 또는 2차 모드형상의 양상처럼 B, C의 불평형 위치에서는 불평형에 의한 가진력의 영향을 더욱 증가시켜 변위를 일으키기 때문에 상대적으로 앞부분의 변위는 더욱 커진다.

3. 결 론

본 논문에서는 SRM 전동기의 회전자-베어링 시스템을 대상으로 질량불평형에 의한 회전자 속도에 따른 응답특성과 회전자 위치에 따른 응답특성을 보였다. 이들의 결과로부터 불평형에 의한 공극의 변화 예측과 회전자의 평형잡이(balancing)에 이용할 수 있을 것이라 사려된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Hatto Schneider, *Balancing technology*, Schenck, 1994
- [2] J. S. Rao, *Rotor Dynamics*, John Wiley & Sons, 1991.
- [3] M. Lalanne and G. Ferraris, *Rotordynamics prediction in engineering*, John Wiley & Sons, 1990.