

Switching Angle 변화에 따른 SRM 출력특성 및 진동특성 분석

이지영, 하경호, 이근호, 조재옥, 홍정표
 창원대학교 전기공학과

Analysis of Vibration and Electric Performance According to Switching Angle in SRM

Ji-Young Lee, Kyung-Ho Ha, Geun Ho Lee, Jae-Ok Jo, Jung-Pyo Hong,
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - This paper studies the relationship between output and vibration characteristics of Switched Reluctance Motor(SRM) according to switch-on and off angles. Acceleration and motor performance are measured by changing switching angles and the magnetic forces are analyzed by Finite Element Analysis. A proper switching angle from theoretical and several experimental results are presented for satisfying power, efficiency and low vibration.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(이하 SRM)는 다른 전동기에 비해 소음, 진동이 비교적 큰 단점이 있다. 진동의 주요 원인은 크게 기계적인 원인과 공기역학적 원인, 그리고 전자기적 원인으로 분류할 수 있다. 이러한 원인 중에서 돌극 구조로 이루어진 SRM에서는 스위치의 개폐시 전동기의 고정자 또는 회전자에 작용하는 반경방향의 힘의 변화가 전동기의 구조물을 진동시키는 주요한 원인이 된다[1]. 따라서, 전동기의 소음, 진동을 저감시키고 전동기의 특성을 향상시키기 위한 노력이 필요하다. SRM에서 진동을 저감시키는 방법으로는 크게 전동기 구조물의 형상 설계 측면과 전동기의 구동 제어 방식 측면으로 분류할 수 있다. 이러한 방법 중, 제어 방식으로는 Duty ratio, current shape 변화 등 여러 가지가 연구되고 있으나, 본 논문에서는 일반적인 SRM의 구동방식에서 비교적 쉽게 접근할 수 있는 Switching angle의 조절로 진동 저감 방법을 연구하였다[2-4].

본 논문에서는 6/4 SRM을 대상으로 일정한 입력 전압과 속도에 대해, 스위치 On 또는 Off 각의 변화에 따른 전동기의 입력전류, 토크 및 효율 특성과 진동특성을 측정하였다. 이 실험 결과로부터 전동기의 구동 특성과 진동과의 관계를 비교 분석하여, 진동의 발생 원인을 규명하고 전동기의 출력특성을 크게 저하시키지 않으면서 진동을 저감할 수 있는 Switching angle을 제시하였다. 또한, SRM에서 회전자의 위치에 따른 비선형 인덕턴스를 고려한 유한요소법에 의해, 동특성 해석을 수행하여 전자기적인 가진력과의 상관 관계를 보였다.

2. 본 론

2.1 해석 대상

그림 1은 전동기의 출력특성과 진동에 대한 실험을 수행하기 위해서 구성된 측정 시스템이다. 6/4 SRM의 출력 특성을 측정하기 위하여 Dynamometer와 전동기가 커플링에 의해 연결되어 있으며 SRM의 회전자 위치 검출을 위해 엔코더가 부착되어 있다. 진동 레벨의 측정을 위해 진동 가속도 센서가 고정자 극의 방사방면 후면에 부착되어져 있다. 전동기는 110V 상용 전원에 대해 다이오드 정류를 거쳐, 3상 비대칭 브리지 회로로 구동되고, PWM 전압제어로서 속도가 가변 된다.

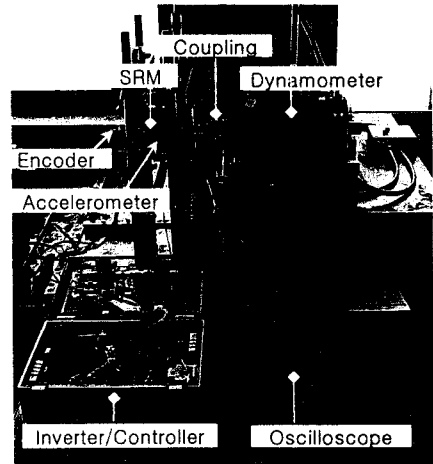


그림 1. 전동기의 출력특성 및 진동 측정 시스템

2.2 해석 이론

가. 전자기적 가진력

SRM에서 스위치의 On, Off 시간에 따른 고정자와 회전자의 상대 위치에 상응하는 전류의 변화 양상에 영향을 받는 전자기적 가진력을 유한요소 해석으로 정확히 추정하기 위하여 전압방정식과 연결하여 동특성 해석을 수행하였다.

SRM의 자기적 현상은 식 (1)과 같이 벡터 포텐셜 \vec{A} 를 계변수로 지배방정식을 표현할 수 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 \quad (1)$$

여기서, \vec{J}_0 는 전류밀도를 나타낸다. 한 상에 대한 전압방정식 V_s 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = R_m i_m + L_m \frac{di_m}{dt} + E_m \quad (2)$$

여기서, R_m 은 유한요소 해석 영역의 내부 저항과 외부 저항의 합성 저항이고, L_m 은 코일 끝단 부의 누설 인덕턴스, E_m 은 권선에 유기 되는 역기전력이다.

지배방정식과 전압방정식을 결합하여 시스템 행렬을 구성하고 시간 미분항을 처리하기 위해, 해석하고자 하는 현상의 미분 방정식을 시간에 대해 이산화시켜 계산하는 시간 차분법을 이용하였다.

회전자의 회전에 따른 매 시간 간격으로 자체 해석을 수행한 후 맥스웰 응력을 이용하여 고정자에 작용하는

가진력을 계산하였다. 자성체 절점에 대한 고정자의 반경방향으로 작용하는 전자기적 가진력의 힘밀도 p_r 은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_r = \frac{1}{\mu_0} [(\vec{n} \cdot \vec{B})\vec{B} - \frac{1}{2}(\vec{B} \cdot \vec{B}) \cdot \vec{n}] \quad (3)$$

여기서, \vec{n} 은 고정자 극의 표면에 대한 법선 방향 단위 벡터, \vec{B} 는 공극에서 자속밀도를 나타낸다.

나. 진동 레벨

실제 운전 중에는 진동 가속도를 측정하나, 일반적으로 소음은 구조물의 속도와 관련되어 있으므로, 구조물의 소음을 줄이기 위해서는 구조물의 진동 속도가 최소가 되어야 한다. 따라서 진동 저감을 위한 목적함수로 진동 속도를 의미하는 진동 레벨을 다음과 같이 정의하였다.

$$V_i = \sqrt{\sum_j \left(\frac{a_i^2(f)}{(2\pi f)^2} \right)} \quad (4)$$

여기서, V_i 는 측정점 i 에서의 진동 레벨, a_i 는 측정점 i 에서의 가속도를 나타낸다.

2.3 출력 특성 및 진동 실험 결과

그림 2와 그림 3은 PWM을 통해서 전동기에 평균전압 36[V]의 일정전압을 인가하여 각각 1400[rpm]과 1550 [rpm]의 일정 속도로 운전했을 때, Advanced angle과 Dwell angle 변화에 따른 토크와 진동가속도를 측정하고, 효율을 산정한 그래프이다. 이 때 각도는 모두 기계각을 표기한 것이며, 기준 각인 0°는 회전자 극과 고정자 극이 비정렬 상태일 때를 나타낸다.

가. 토크 및 효율

그림 2(a)와 3(a)에서 Advanced angle은 작을수록, Dwell angle은 클수록 동일한 전압에 대해 전동기에 인가되는 전류가 증가하여 토크의 크기가 증가하는 양상을 나타내고 있다. Dwell angle 32° 이상에서 Advanced angle이 증가함에 따라 토크가 감소하는 것은 정렬상태 부근에서 스위치 Off에 따른 역토크의 영향 때문이며, 효율 또한 감소하게 된다.

그림 2(b)와 3(b)는 스위치의 On/Off에 따른 효율을 나타낸 곡선으로 Advanced angle과 Dwell angle이 모두 작을수록 그 값이 증가하게 된다. 인덕턴스가 증가하는 구간에서 전류의 통전이 일어나므로, 토크와는 달리 전류의 크기가 작을수록 효율은 증가하는 양상을 가지게 된다.

나. 전체 진동 레벨 (Overall vibration level)

진동의 레벨은 가속도를 측정하여 실효치의 속도로 변환하였으며 진동 주파수의 범위는 가청주파수를 고려하여 5[kHz]까지 분석하였다. 그림 2(c)와 3(c)에서 전체 진동 레벨은 토크에 비례하여 증감하는 곡선을 가진다. 그러나, 스위치가 열리는 각도에 따라 최소 값이 존재한다. 이는 진동에 큰 영향을 미치는 전자기적인 가진력의 크기가 전류뿐만이 아니라, 스위치 Off 시점의 위치에 따른 토크 리플의 영향을 받기 때문이다. 또한, 동일한 입력 전압에 대해 속도가 낮은 1400[rpm]에서 전류가 전체적으로 증가하므로, 전체 진동 레벨 또한 1550[rpm]에 대해 상대적으로 증가하였다. Advanced angle 17° 이상에서는 스위치 Off 시점이 정렬상태 부근이므로, 역토크에 따른 토크 리플의 증가로 전체 진동 레벨이 증가하고 있다.

2.4 전자기적 가진력 해석

1400(rpm)과 1550(rpm) 각각의 경우에 있어서, 요구사양의 토크 값을 각각 1.1[Nm], 0.9[Nm]라 하고, 효율은 70[%] 이상으로 가정했을 때, 이들 모두를 만족시키는 값을 가지는 Dwell angle 값은 각각 30°와 32°로 결정된다.

그림 4와 그림 5는 각각의 속도에 대해서 이러한 출력 특성을 만족하는 Dwell angle에서의 Advanced angle 변화에 대한 진동기 특성과 진동레벨을 비교한 그래프이다. 두 속도의 경우에 있어서, 각각의 토크 1.1 [Nm], 0.9[Nm], 효율 70 [%] 이상을 만족시키면서 진동을 최소화 할 수 있는 Advanced angle은 동일하게 12.9°보다 작은 값을 가질 때이다.

그러나 다른 Advanced angle에 비해, 전체 진동 레벨이 큰 값을 가지므로, 진동과 소음 측면을 개선시키기 위해서는 보다 낮은 값을 선택할 수 있다. 효율을 65[%]이상으로 설정할 경우, 주어진 Dwell angle에서 1400[rpm]에서는 Advanced angle이 17°일 때, 1550[rpm]에서는 15°일 때 초기 결정했던 운전구간보다 진동이 2~3배정도 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 6을 통해서, 인덕턴스가 증가하는 영역에서 Advanced angle의 증가로 전류가 감소하고, 따라서 전자기적 가진력의 크기가 감소한 영향임을 알 수 있다. 그림 7은 각 속도에 대해 전체 진동 레벨을 저감시킨 Advanced angle 17°와 15°에서, 전자기적 가진력의 크기를 비교한 것이다. 동일한 스위치 Off 각과 동일한 전체 진동 레벨을 가지므로, 가진력의 크기 또한 거의 비슷한 값을 가짐을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 6/4 SRM을 대상으로 일정한 입력 전압에 대해 일정속도를 유지하면서, Switching angle의 변화에 따른 전류, 토크 변화 및 진동 가속도를 측정하고, 진동레벨과 효율을 산정하여 이를 분석하였다. 실험 결과를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 토크는 Advanced angle과 Dwell angle이 증가할수록 그 값이 증가하나, 정렬 위치를 넘어서 스위치가 Off 되는 경우, 역토크로 인해 감소하게 된다.
- 효율은 토크에 반비례하는 양상을 가진다.
- 진동 레벨은 Switching에 따른 전류가 증가할수록, 증가하고 Dwell angle이 일정할 경우, Advanced angle에 따라 최소 값이 존재한다.

감사의 글
이 논문은 2001년도 창원대학교
연구비에 의하여 연구되었음

[참고 문헌]

- [1] C. G. C. Neves, R. Carlson, N. sadowski, J. P. A. Bastos, N. S. Soeiro, S. N. Y. Gerges, "Vibrational Behavior of Switched Reluctance Motors by Simulation and Experimental Procedures", IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp 3158 -3161, September 1998
- [2] Philip C. Kjaer, Jeremy J. Gribble and Timothy J. E. Miller, "High-Grade Control of Switched Reluctance Machines", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 33, No. 6, pp1585 - 1593, November/December 1997
- [3] J. Faiz and J. W. Finch, "Aspects of Design Optimisation for Switched Reluctance Motors", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 8, No. 4, pp704-713, December 1993
- [4] 하경호, 홍정표, 김규탁, "스위칭에 따른 전자기 가진력에 의한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자 변위해석", 전기학회의 논문지, vol.49B, pp20- 26, No.1, JAN. 2000

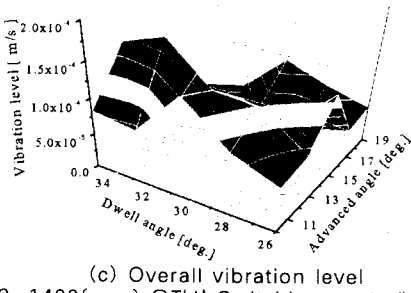
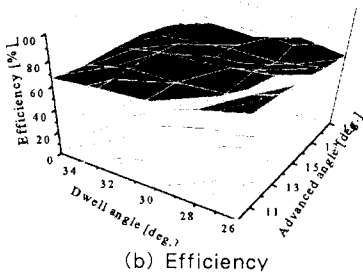
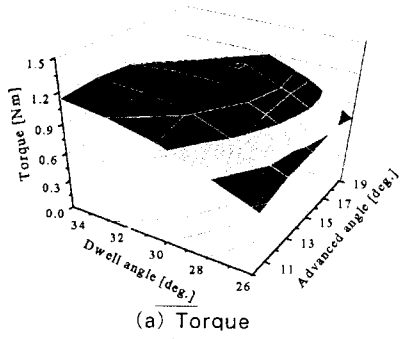


그림 2. 1400(rpm) 운전시 Switching angle에 따른 전체 진동 레벨 및 전동기 특성 실험 결과

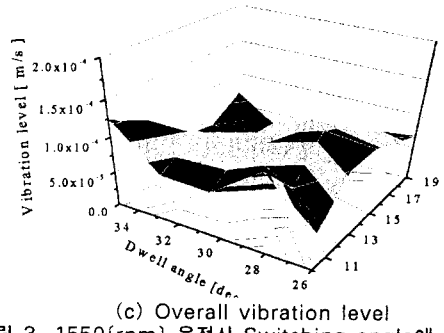
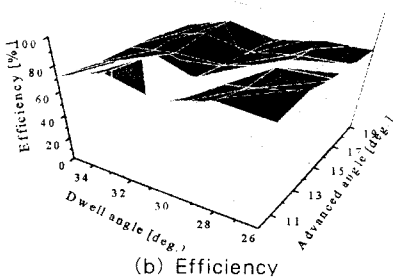
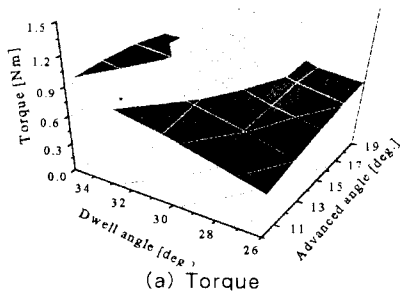


그림 3. 1550(rpm) 운전시 Switching angle에 따른 전체 진동 레벨 및 전동기 특성 실험 결과

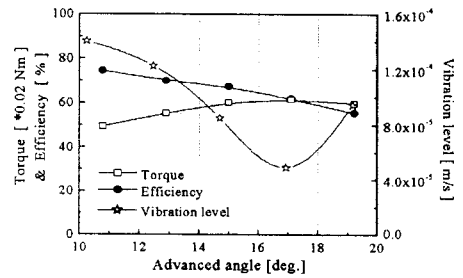


그림 4. 1400(rpm), Dwell angle 30° 일 때 Advanced angle에 따른 토크, 효율, 전체 진동 레벨 특성

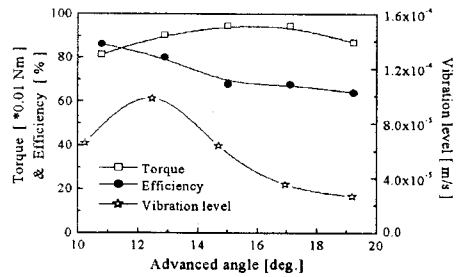


그림 5. 1550(rpm), Dwell angle 32° 일 때, Advanced angle에 따른 토크, 효율, 전체 진동 레벨 특성

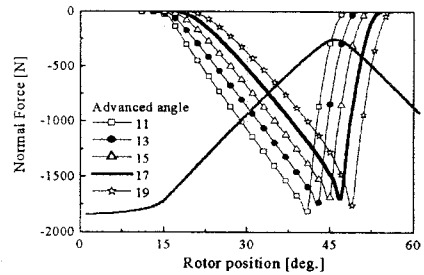


그림 6. 1400(rpm) Dwell angle 30° 일 때 Advanced angle에 따른 전자기적 가진력 비교

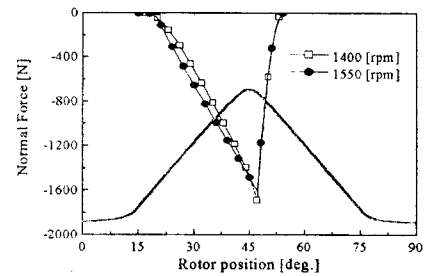


그림 7. 전동기 출력 특성을 만족시키는 지점에서의 속도에 따른 전자기적 가진력 비교