

SRM의 진동·소음의 저감을 위한 직류여자 전류방식에 관한 연구

¹오석규*, 추영배**, 이일천***, 황영문****

*진주산업대학교, **거제대학, ***동명대학, ****부산대학교

Study on the D.C Excitation Commutation Method of SRM for Reduction of Vibration/Acoustic Noise

¹Seok-Gyu Oh*, Young-Bae Choo**, Il-Chen Lee***, Young-Moon Hwang****

*Chinju National Univ., **Koje College, ***Dongmyung College, ****Pusan National Univ.

Abstract

SRM drives generate large vibration and acoustic noise because it is commutated individually by step pulse m.m.f on each phase pole. The frequency or motor speed of peak vibrations and acoustic noises is coincided with the natural resonant frequency of the magnetic structure and frame material. And this radial vibration force is induced on the phase commutation region. This paper suggest the new electromagnetic structure of SRM with auxiliary commutaing winding excited d.c e.m.f.. This phase- commutating winding is coupled magnetically between one phase winding and the other. In this commutation mechanism, the vibrating force is falled down. As a result, SRM with d.c exciting commutation winding is very useful to reduce vibration and acoustic noise of SRM drive.

1. 서론

스위치어드 릴럭턴스 모우터 (Switched reluctance motor, 이하 SRM라고 함)드라이브는 회전자 구조가 단순하여 관성이 작고 순시토포크 특성이 우수하며 브러시리스형이어서 제어용 전동기로서 적합하며, 고효율 및 저온도상승 특성을 가지고 있다.[1] 또한 전자구조 및 스위칭 드라이브가 단순하여 제작 면에서도 유리하다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 기존의 전동기에 비해 SRM드라이브의 토크 발

생원리상 맥동 토포크 및 진동·소음은 전동기의 실용화에 제약을 주고 있어 상품화에 있어 걸림돌로 되고 있다.

SRM드라이브의 주된 진동·소음은 상권선전류의 스위치-오프 시에 급격한 방사방향의 가진력 변화에 의한 고정자 자극 및 프레임의 가진원에 기인한다는 것은 몇몇 연구를 통해서 확인된바 있다.[2][3]

본 논문에서는 각 상권선에 바이필라권선(bifiler winding)을 부가하고 이들을 직렬로 결선하여 상간 콤퓨테이션기능을 갖게하고 여기에 직류여자를 인가 제어함으로써 상권선에서의 급격한 소호 역전압을 억제하면서 상권선 전류를 흡수하여 소호되게끔 하는 방식, 즉 상간 콤퓨테이션 기능을 강화하여 진동·소음을 억제하는 방식을 제안하고 이를 실험적 해석으로 입증하였다.

2. SRM의 진동·소음 해석

SRM드라이브는 자기회로의 가변 릴럭턴스가 최소, 즉 가변 인덕턴스가 최대 되도록하는 방향으로 기계적 힘이 발생하는 전동기이다. 그리하여 고정자와 회전자는 돌극형 구조로 하여 최대 리럭턴스 및 최소 릴럭턴스 값의 차이를 크도록 한다.

일반적으로 실용화되고 있는 3상 6/4 SRM 및 4상 8/6 SRM 과 같은 다상 SRM 의 가진력을 살펴보면 다음과 같다. 그림 1은 3상의 6/4 SRM 에서의 전동기 프레임에서의 진동현상이다. 진동 측정센서는 A상의 고정자 자극과 프레임사이에 장착하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이 A상의 여자기전력의 소호시에서의 진동이 크게 나타나며, 동시에 B상 및 C상의 소호시의 가진력에 의한 진동이 A상의 자극 위치에 전달되어 나타남을 볼 수 있다. 이는 한상의

가진원에 의한 진동현상이 전동기 프레임 전체의 고

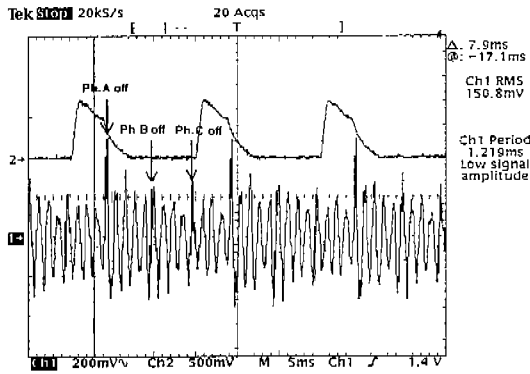
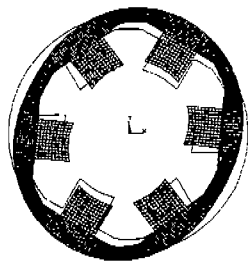


그림 1 3상 SRM의 3상 구동시의 A상 자극의 프레임상의 진동 가속도

유공진현상을 유발함에 기인한다. 즉, SRM 는 대칭의 고정자 자극을 상순에 따라 각각 펄스형 여자 기자력을 독립적으로 인가함으로 그림 2와 같은 2차 모드의 팽창 수축의 진동을 하게 될 것이다. 이때 다른 상의 고정자 자극 위치의 프레임은 반대로 수축 팽창을 하게 될 것이며, 여자 자극의 직각위치의 프레임의 진동은 반대 극성의 동일한 값의 진동을 할것이나 6/4 SRM 에서와 같이 60°도 위치에 있는 두 자극에는 그림 3에서 보는바와 같이 반대 극성의 sin 60°정도의 진동을 하게 될 것이다.



2nd mode at 842 Hz

그림 2 6/4 SRM의 진동모드 (2차 모드 842[Hz])

이때의 진동 가속도(vibration accereleration)는 전동기의 철심 및 프레임의 재질의 탄성 및 전동기의 형상의 진동 모드에 주파수에 따라 달라지게 될 것이다. 특히 전기철판 및 주강의 탄성의 고유공진 주파수가 $f_r = 850 \sim 980$ [Hz] (본 연구의 대상 전동기의 경우 945 Hz) 로 측정됨) 이고, 6/4 SRM의 2차 모드의 공진 주파수가 $f_m = 842$ [Hz]여서 방사방향 전자력의 가진력을 유발하는 여자 기자력의 소호 동작의 주파수가 $N \cdot f_r$ 및 $N \cdot f_m$ ($N = 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, \dots$)에 가까울 수록 진동 가속도가 커지게 된다. 즉, 6/4 SRM 에서는 1 회전에 대하여 각

상 4 펄스의 소호 동작을 함으로 $n_s = N \cdot f_r/4$ [rps]의 전동기의 특정속도에서 큰 진동작용을 하게 된다. 본 연구의 대상 전동기에서는 프레임의 진동은 3540, 1770, 886 [rpm]의 특정회전속도에서 공진 진동을, 형상 모드에 의하여 3150, 1575, 788 [rpm]의 특정회전속도에서 공진진동을 유발하고 있다.

3. 직류여자방식의 콤퓨테이션 기능의 강화

기본적인 SRM의 전자구조인 각상 집중권과 함께 각 상 자극에 동일방향의 보조권선을 감고 이들 각상의 보조권선을 직렬로 연결하는 그림 3과 같은 전자구조로 조정 설계하였다. 부가된 보조권선은 각 상권선과 자기적으로 결합되어 있으므로 각상의 자극에 자속변화가 있을 때 즉, 상간의 콤퓨테이션 구간에서 효과적으로 작용하며 한상의 소호에너지는 다음 상의 여자 에너지로 콤퓨테이션하게 되어 다음 상 전류확립을 돕게 한다. 여기서 이러한 권선은 콤퓨테이션 작용을 하는 콤퓨테이션 권선(commutation winding)이다.

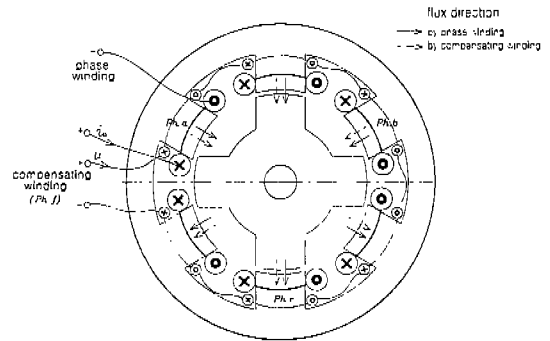


그림 3 콤퓨테이션 권선을 갖는 SRM의 전자구조

콤퓨테이션 권선 방식이 갖어야 하는 요건은 각 상권선의 종합적인 직렬 자기인덕턴스, L_c 의 값이 전동기의 회전상태와 상관없이 일정한 값을 갖어야 한다. 이는 부가적인 콤퓨테이션 권선에서의 가자력으로 인한 전자력으로 인하여 유발할 수 있는 맥동회전력을 억제하기 위해서다. 또한 콤퓨테이션 권선에 인가하는 직류여자 제어를 원활하게 될 것이다. 이러한 콤퓨테이션 권선의 일정 자기인덕턴스를 갖게 하기 위하여는 전체 고정자자극에 중첩이 되는 회전자의 극호각의 합이 일정하도록 자극설계를 하면 된다.

콤퓨테이션 권선에서의 직류여자제어방식의 동작회로도도 그림 4와 같다. 그림 4에서의 콤퓨테이션권선, w_{cw} 에 직류여자 가자력을 각 상간 콤퓨테이션구간에서 스위치, S_{cw} 로 제어 인가하여 콤퓨테이션 기능을

강화시킴으로서 진동·소음을 억제하는 효과를 얻을 수 있었다.

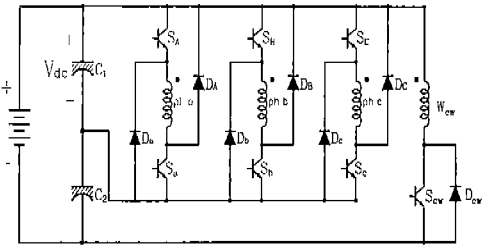


그림 4 콤퓨테이션 권선에서의 직류여자방식의 회로도

4. 진동·소음 억제의 실험적 해석

진동특성은 압전소자형의 High Sensitive Accelerometer (Piezotronic Co. M353B65)의 센서를 A상 자극 위치의 프레임에 장착하여 진동 가속도(단위: m/s^2)를 측정하고, 소음 특성은 Sound Pressure Level Meter (CEL Co. CEL-231)를 회전자축에서 30 [cm]의 수평거리에서 음압(단위: [dB])을 측정하여 해석하였다.

진동특성은 전동기의 철심과 프레임의 재질과 모양에 따라 달라진다. 주로 재질의 고유공진주파수에 의존하며 따라서 진동형상이 특정 회전수에서 크게 또는 작게 나타난다. 대상전동기에서는 1800 [rpm] 및 1350 [rpm]에서 나타난다. 진동 특성은 기존방식과 직류여자 콤퓨테이션방식을 비교해석한 결과 그림 5과 같다.

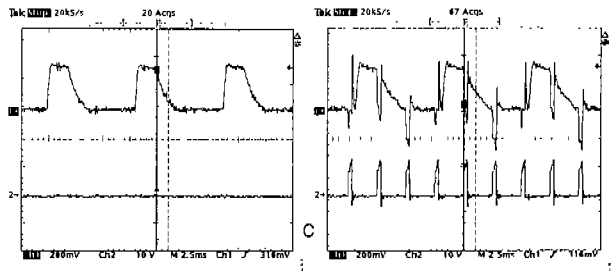
프레임의 재질에 대한 공진 주파수 945 [Hz]에 해당하는 회전속도 1,800 [rpm]에서 동작시킨 결과, 상권선 전류는 콤퓨테이션 구간에서 인가된 직류전압에 의하여 흡수되었다. 이때 해당 자극에서의 기자력의 변화는 그대로 유지되어 급격한 자속변화는 완화되어 가진력은 억제된다고 볼 수 있다.

다른 상권선 B상, C상 가 동작할 때도 상권선 A에도 환류다이오드 전류가 유도됨을 볼 수 있는데, 이는 한상의 소호전류가 콤퓨테이션 권선을 거쳐 다른 상의 권선 다이오드를 통하여 전원으로 회수되는 등 소호전류의 콤퓨테이션이 효과적으로 이루어지고 있음을 반증한다. 이때 출력 토크에는 영향을 주지 않는다.

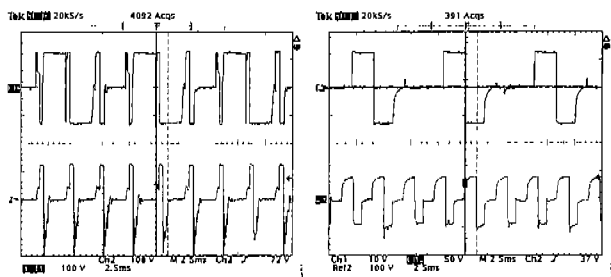
그림 5의 진동가속도는 진동주파수가 945 [Hz]에서 2,260 [Hz] 및 4,520 [Hz]로 변조되면서 현저하게 억제되었다. 그리고 소음레벨은 진동 가속도의 억제보다 현저하게 저감되어 전동기의 조립 및 장착으로

인한 기준 소음레벨로 저감되었다.

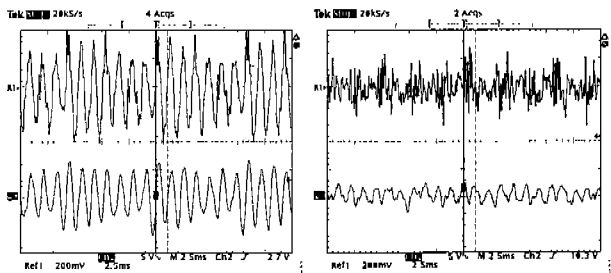
회전속도에 따른 진동 가속도를 그 실효치 [m/s^2]를 측정된 결과 그림 6과 같다.



(a) upper : phase current (0.3 [A/div.]),
lower : commutation current (0.3 [A/div.])



(b) upper : phase e.m.f (20 [v/div.]),
lower : commutation wdg. e.m.f (20 [v/div.])



(c) upper : vibration acceleration (7 [m/s^2]/div.),
lower : acoustic noise (50 [mW/cm^2]/div.)
conventional **d.c excitation**

그림 5 공진회전수에서의 기존 및 직류여자방식의 상간 콤퓨테이션 작용에 의한 진동·소음의 억제 효과의 해석(1,800 [rpm], 12.0 [kg·cm])

측정해석결과, (1) 진동·소음 특성은 철심 및 프레임의 고유공진 특성에 따른 회전속도에 의존하는 특성을 갖는다. 여기서 1,800 [rpm]과 1,325 [rpm]시의 부하 토크의 값이 각각 12 [kg·cm]와 25 [kg·cm]인 것은 SRM의 정상 토크-회전수 특성의 수하특성에 따른 것이다.

여기서 부하 토크가 커지면 부하전류가 증가하여 인가기자력이 커져서 소호시 가진력이 크게 나타

날 것이다. 그러나 부하 토크가 큰 1,350 [rpm]에서 오히려 낮은 진동을 일으키는 것은 진동현상이 철심 및 프레임의 고유공진현상에 기인함을 보여 주고 있다.

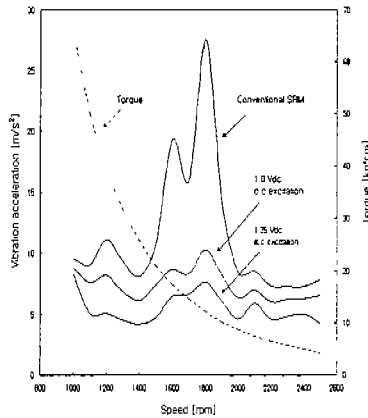


그림 6 직류여자전압에 따른 회전속도-진동가속도 (실효치)특성

(2) 진동·소음이 1,800 [rpm]과 1,600 [rpm]에서 공진현상을 이룬다. 전자는 프레임의 재질에 의한 공진주파수 945[Hz]에, 후자는 전동기의 기구적 공진주파수 842[Hz]에서의 공진 진동·소음치이다.

(3) 직류여자 콤퓨테이션 방식을 적용한 결과, 위와 같은 공진현상은 억제되었으며 전동기의 조립 상태 및 장착으로 인한 기준 진동·소음치에 가깝게 저감되었음을 알 수 있었다. 이는 콤퓨테이션 권선에 의한 각 상권선이 원활한 에너지 흐름으로 인하여 결합되는 등 상간 콤퓨테이션 기능이 강화되었음을 의미한다.

(4) 직류여자 전압을 1.0 Vdc 및 1.25 Vdc 로 조정하면 진동·소음의 저감효과가 조정된다. 이는 직류여자 콤퓨테이션 방식이 진동·소음의 저감이 유효함을 입증하고 있다.

5. 결 론

SRM드라이브에서 가장 취약점인 진동·소음의 발생원인은 상간 콤퓨테이션 과정에서의 인가기자력의 급격한 소호작용과 각상 권선이 개별적으로 스위칭-온/오프동작을 함에 기인함을 알 수 있다. 그러므로 현재의 기본동작과정의 상간 콤퓨테이션 과정을 근본적으로 개선할 필요가 있다.

한가지 방법으로, 각 콤퓨테이션 과정에서 각 상권선을 자기적으로 연계한 콤퓨테이션 권선에 추가적인 직류여자를 함으로서 상간 콤퓨테이션 기능을 강화한 방식이 바람직하며, 이러한 방식을 적용한 결과,

SRM의 자극 및 프레임의 재질 및 형상에 따른 고유공진현상을 현격하게 억제함으로써 진동·소음을 저감할 수 있음을 실험적 해석으로 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Moghbelli, G.E. Adams and R.G. Hoft; "Performance of 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors", IEEE Trans. on IA, Vol.27, No.3, pp. 531-538, 1991.
- [2] D.E.Cameron, J.H.Lang and Stephen D.Umans; "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable Reluctance Motors", IEEE Trans. on IA, Vol.28, No.6, pp. 1250-1255, 1992.
- [3] C.Y. Wu and C. Pollock; "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive", IEEE Trans. on IA, Vol.31, No.1, pp. 91-98, 1995.