

하이브리드 여자방식 SRM의 저소음 구동특성

김창섭, 오석규*, 안진우, 김철우**
 경성대학교, 전주산업대학교*, 부산대학교**

Low Noise Characteristics of SRM Drive with Hybrid Excitation

C.S. Kim, S.G. Oh*, J.W. Ahn, C.W. Kim**
 Kyungseong Univ., Chonju Nat'l Univ.*, Pusan Nat'l. Univ.**

Abstract - The simple construction and low cost, fault tolerant power electronic drive has made the switched reluctance drive a strong contender for many applications. But the switched reluctance drive does exhibit higher levels of vibration and acoustic noise than most competing drives. The main source of vibration in the switched reluctance drive is generated by rapid change of radial force when phase current is extinguished by commutation action.

In this paper, a hybrid excitation method is proposed to reduce vibration and acoustic noise of the switched reluctance drive. The hybrid excitation has 2-phase excitation by long dwell angle as well as conventional 1-phase excitation. The vibration and acoustic noise are reduced because the scheme reduces abrupt change of excitation level by distributed and balanced excitation.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM이라 함) 구동 시스템은 제작이 간단하고 비용이 싸며 운전사이에 잘 견디어 상대적으로 신뢰성이 높은 전력전자 구동장치로써 산업기기, 항공기기, 자동차, 가전기기 등의 응용분야에서 높은 토오크 및 출력, 고효율 가변속 운전, 경제성 있는 인버터의 관점에서 기존의 유도전동기와 영구자석 전동기에 비교될 만한 특성을 가지고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 SRM은 기존의 구동장치보다 높은 레벨의 소음과 진동을 나타내고 있다.

최근까지의 개발연구의 방향은 토오크, 효율, 신뢰도, 비용 등에 대한 향상을 목표로 한 적정 자기회로설계[1]와 제어방식[2]에 집중되어 있었다. 그러나 최근에 들어 정밀제어 및 가정용 전자제품으로의 영역을 넓히는 데에 있어 가장 장애가 되고 있는 것은 운전특성의 안정화를 위한 토오크 맥동의 억제와 엄격한 소음과 진동의 저감에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

회전방향의 힘은 회전자에 회전토오크로 작용하며 이들이 회전자 위치각에 따라 크기의 증감, 즉, 토오크 맥동이 생겨 전동기의 토오크-속도특성의 안정도를 낮게 한다. 토오크 맥동은 토오크 발생구간에서의 맥동과 상간 전류작용이 원활하지 못함때 기인한다. 이중 상대적으로 상간 전류작용이 원활하지 못하여 발생하는 토오크 맥동이 더 크게 나타나 이를 저감하기 위해 적절히 중점을 하는 방법이 제시되고 있다[3,4].

진동·소음 발생 원인으로는 크게 기계적인 원인과 전자기적인 원인이 있다. 기계적인 원인으로는 공심의 동심도, 직전도, 집축 마찰, 중량 불균형 제작 등과 같은 제작상의 문제와 베어링과 같은 적용부품에서의 기계적인 진동과 공기와의 마찰 등에 의해 소음이 발생한다. 전자기적인 원인으로는 상 스위치의 온, 오프 순간에 발생하는 갑작스런 기자력의 변화에 의한 수축 팽창작용 등이 있다.

이 중 여러 연구보고에 의하면 SRM의 진동, 소음은 주로 고정자의 방사방향의 힘의 변동에 의해 발생하는 것으로 보고되고 있다[5,6].

본 논문에서는 진동, 소음의 주원인인 급격한 기자력의 변화를 완화시키는 방법으로 한 상의 스위치 오프 전 다 른 상이 동작하도록 중복을 시키는 하이브리드 여자방식을 채택하였다. 또한 상간 적절한 중복으로 인하여 토오크 맥동도 현저하게 줄일 수 있었다. 그러나 이러한 방법은 효율의 저하를 가져오는 단점이 있는 데 이는 C-dump 인버터를 사용하여 보완하였다. 본 방식은 시뮬레이션과 제어시스템으로 구현한 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 진동, 소음 저감을 위한 SRM의 여자방식

SRM의 기계적인 구조는 가변 릴럭턴스 토오크를 최대화하기 위하여 고정자와 회전자 구조가 2중 돌극형으로 되어있고, 단일 여자방식으로 구동을 하게 되어 토오크 발생 메카니즘상 기존의 가변속 전동기에 비하여 비교적 높은 진동과 소음이 발생한다. 이러한 진동, 소음은 릴럭턴스 토오크의 발생과정에서 주된 회전력으로 작용하는 각 선 방향의 힘뿐만 아니라 방사 방향의 힘이 작용하여 곱 상을 온, 오프할 때 고정자 프레임을 방사 방향으로 진동 시킴으로서 발생하게 된다[5,6].

최근의 연구에 따르면 SRM의 스위칭에 따른 진동, 소음은 스위치 온, 스위치 오프 때에 각각 나타나고 특히 스위치 오프에서 가장 심하고 따라서 거의 모든 제어기 스위치 오프시의 진동, 소음을 저감하는 데 집중하고 있다. 또한 스위치 오프이후에 감자기간이 길어지면 진동, 소음이 완화되나 효율이 나빠지는 단점이 있다.

2.1 하이브리드 여자 방식의 SRM 구동

기자력의 급격한 변화를 개선하기 위하여 1상 여자 방식과 2상 여자방식이 결합된 하이브리드 여자방식을 제안 하며 진동, 소음을 저감하고자 한다.

하이브리드 여자 방식에서는 2상 동시 여자구간을 이용하여 위하여 도통각을 늘려주게 된다. 늘어난 도통구간에 의해 상 스위치의 오프 시점이 인덕턴스가 상당히 큰 구간에서 선택되어 짐으로 인하여 상 커퓨레이션시 상전류의 소호시간이 길어진다. 이에 의한 SRM 운전 효율의 현저한 감소가 나타나는데, 이를 개선하고자 본 연구에서는 Boost회로를 응용한 C-dump 회로를 구동 인버터로 구성하고[3], 진동, 소음 및 효율 특성을 검토하려고 한다.

6/4극 SRM 구동 시스템의 하이브리드 여자를 위한 SRM의 권선 구성은 기존의 단절권 1상 여자방식과 같게 한다. 2상 여자 방식의 가변 상호인덕턴스 성분의 조합을 효과적으로 이용하기 위하여 권선의 여자방향 중 b상의 상 여자방향을 바꾸어 반대극성으로 여자함으로써 자속 경로의 방향이 한 방향으로 일어나도록 구성하였다.

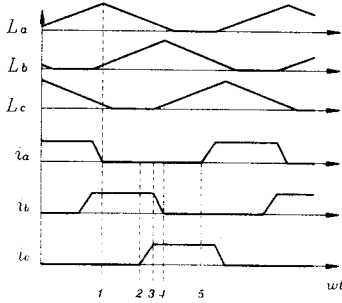


그림 1 하이브리드 여자방식의 인덕턴스 프로파일에 따른 상전류.

그림 1은 하이브리드 여자방식에 따른 인덕턴스와 각 상전류 파형을 보여주고 있다. b상이 오프 하기 이전에 c 상을 온함으로써 그림 1에서 2-3사이에서 두상이 동작을 하게 되어 b상이 오프시에 발생하는 과도한 진동, 소음을 저감할 수 있으며 중첩을 함으로써 상간의 전류과정에서 발생하는 토크 맥동을 저감시킬 수 있다.

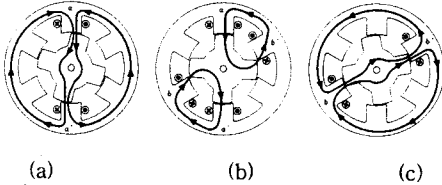


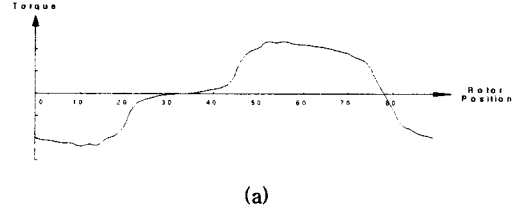
그림 2. 하이브리드 여자에 의한 자속분포.
(a) a상 여자 (b) a,b상 여자 (c) b상 여자

그림 2는 하이브리드 여자방식에서의 각 여자구간에 대한 자속경로를 나타내고 있다. a상의 상 여자에 대한 그림 2(a)의 자속 경로에서 b상을 여자하게 되면 2상 여자구간인 그림 2(b)의 자속 경로가 이루어진다. 2상 여자구간에서 a상을 오프 시키면 자속은 그림 2(b)의 자속경로를 어느 정도 일정하게 유지하다가 마지막으로 1상 여자의 자속경로인 그림 2(c)의 자속 경로를 이루게 된다. 따라서, 상 스위치 오프 시점에서의 급격한 기자력의 변화를 2상 여자기법으로 저감시킬 수 있게 된다.

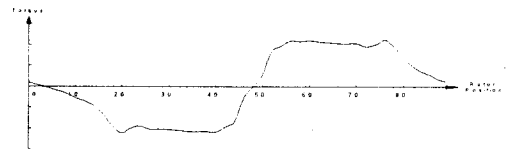
2.2 하이브리드 여자 방식에 의한 토크 발생

그림 3은 상 여자 방식에 따른 시뮬레이션(Vector Fields)의 오페라)된 토크를 나타내고 있다. 하이브리드 여자방식은 1상 여자방식과 2상 여자방식의 적절한 조합에 의하여 구동되어진다. 그림 3(a)의 한 상 여자방식에 의한 발생하는 토크를 보여주고 있고 그림 3(b)의 동시에 두 상이 여자되었을 때 발생하는 토크를 각각 나타내고 있다. 여기서 한 상을 여자했을 때와 두 상을 여자했을 때의 발생토크의 위상차를 볼 수 있다. 이를 적절히 조합을 하면 토크 맥동을 저감하고 한 상이 스위치 오프 하기 전에 적절한 제어를 병행하면 진동, 소음도 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

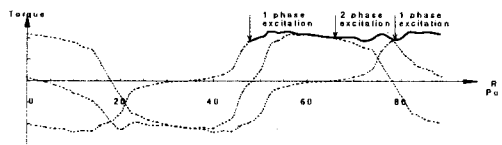
그림 3(c)은 한 상과 두 상을 적절한 여자 구간을 선정하여 여자하면 평탄 토크를 얻게 된다. 그림 3(c)의 토크 그래프에서 초기 한 상여자의 토크가 최대인 구간을 취하고 한 상 여자의 토크 구간이 줄어드는 시점에서 두 상여자 구간의 토크를 취함으로써 일정한 토크를 얻을 수 있도록 하였다. 토크 맥동의 발생원인 중 상간의 전류작용이 원활히 이루어지지 못해서 생기는 토크 맥동을 현저히 줄일 수 있다. 또한 순간적으로 두 상을 여자함으로써 급격한 기자력 변화를 피할 수 있게 되어 진동, 소음의 저감이 예상된다.



(a)



(b)



(c)

그림 3 회전자 위치에 따른 토크.

(a) 1상 여자 (b) 2상 여자 (c) 하이브리드 여자

3. 하이브리드 여자방식의 해석

3.1 C-dump 인버터의 적용

하이브리드 여자방식에서 그림 3(c)와 같은 평활 토크를 얻을 수 있다. 그러나, 하이브리드 여자 방식에서 2상 여자구간을 취하기 위하여 상의 도통각을 늘려주게 되고, 늘어난 도통각에 의해 상 스위치의 오프 시점이 인덕턴스가 상당히 큰 구간에서 선택되어 짐으로 인하여 상 전류(commutation)시 상전류의 소호 시간이 길어진다. 이로 인한 상 전류시 부토크의 영향을 줄이기 위하여 본 연구에서는 그림 4와 같이 전력 회생부를 Boost회로로 구성한 C-dump 인버터를 응용함[7]으로서 상 스위치의 제어와 전력 회생용 쇼핑 스위치의 제어를 분리하여 상당 하나의 스위치가 필요하고 상전류의 중첩이 가능하도록 상간의 완전한 독립성을 지닌다. 그러면서도 에너지 회수용 커패시터 전압의 크기가 곧 역전압의 크기가 되게 함으로서 커패시터의 동작전압에 부담은 크게 경감된다.

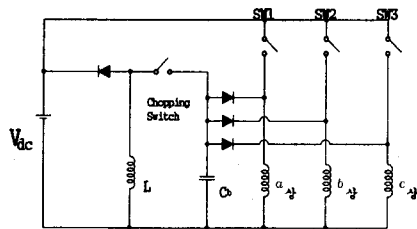


그림 4 하이브리드 여자방식을 위한 C-dump 인버터.

3.2 상전류 파형의 비교

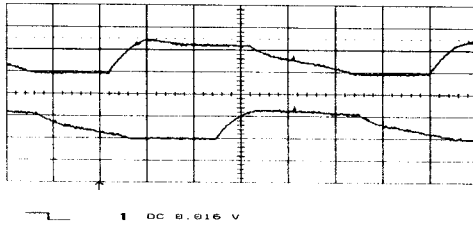
그림 5는 하이브리드 여자방식에 의한 운전시 비대칭 인버터와 활용된 C-dump 인버터에서의 상전류 파형을 보이고 있다. 비대칭 인버터의 하이브리드 여자방식 경우에는 2상 중첩을 위하여 토크 각을 늘려줌으로서 커뮤테이션시 전류 소호시간이 상당히 길어짐을 그림 5(a)에서 보이고 있다.

4. 진동·소음 저감의 실험적 해석

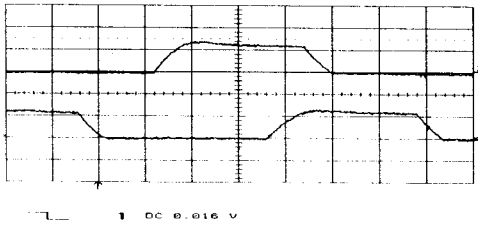
본 실험에 이용된 전동기는 표 1에서 보는 바와 같이 회전자의 고정자의 극호각이 각각 16°와 17°인 600[W]급 12/8극 SRM이며, 부하실험 및 진동·소음 실험을 위하여 동력계와 진동 가속도 센서 및 소음측정기를 사용하여 그림 7과 같이 구성하였다. 여기서 진동 가속도 센서는 고정자 극의 프레임 표면에 부착되어 졌고, 소음 측정기는 프레임에서 1피트 지점에 방사방향으로 설치하였다.

표 1 전동기의 제원

고정자극호각	17 [deg.]	회전자극호각	16 [deg.]
고정자극절	30 [deg.]	회전자극절	45 [deg.]
고정자외경	135.0 [mm]	회전자외경	74.0 [mm]
고정자내경	74.3 [mm]	축직경	24.0 [mm]
고정자요오크폭	10.5 [mm]	회전자요오크폭	11.0 [mm]
고정자극높이	19.7 [mm]	회전자극높이	13.9 [mm]
적층길이	60.0 [mm]	철심두께	0.5 [mm]



(a)



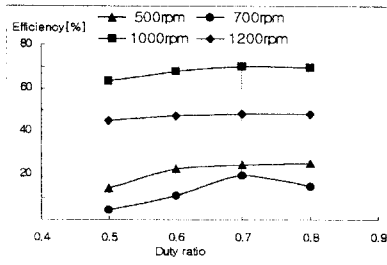
(b)

그림 5 하이브리드 여자방식에서 상전류(0.5ms/div, 20mV/div)

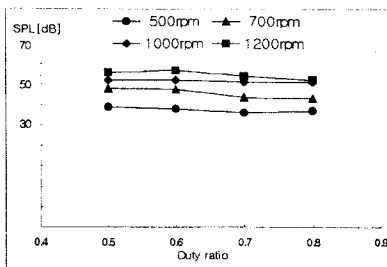
(a) 비대칭 인버터 (b) C-dump 인버터

이에 비하여 C-dump 인버터를 이용한 하이브리드 여자 방식에서는 매우 짧은 시간 동안 상 권선의 축적 에너지가 캐패시터로 회수됨으로, 비대칭 인버터에 비해 상전류의 커뮤테이션시 전류의 소호를 빠르게 할 수 있다.

3.3 시비율에 따른 특성 해석



(a) 효율



(b) 소음

그림 6 속도에 따른 도동비 특성

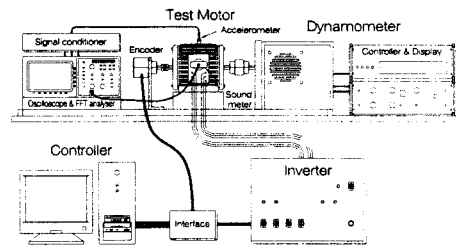
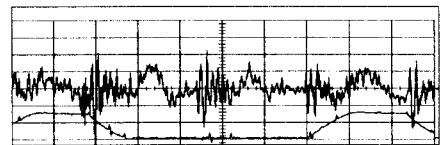
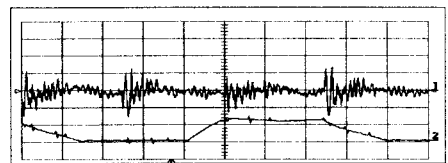


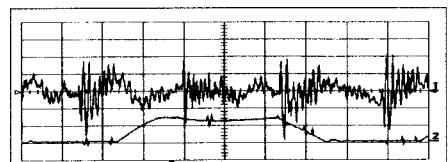
그림 7 진동 소음 측정 시스템의 구성도.



(a) dwell angle 16°



(b) dwell angle 20°



(c) dwell angle 22°

그림 8 C-dump 인버터의 도동각 조정에 의한 진동. 1000[rpm], 10[kg·cm](1ms/div, 50mV/div.)

[참 고 문 헌]

- [1] Jawad Faiz and John W.Finch ; "Aspects of Design Optimization for Switched Reluctance Motors," IEEE Trans. on EC, Vol.8, No.4, pp.704-713, 1993
- [2] T.J.E Miller ; "Switched Reluctance Motors and Their Control," Clarendon Press-Oxford, 1993, pp.22, 70, 161-180.
- [3] P.C. Kjaer, J.J. Gribble, T.J.E. Miller ; "High-Grade Control of Switched Reluctance Machines," Proc. of IAS/IEEE, Sandiego, California, pp.92-100, 1996
- [4] Iqbal Husain, M. Ehsani ; "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control," IEEE Trans. on PE, Vol.11, No.1, pp.91-98, 1996.
- [5] Chi-Yao Wu, Charles 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.
- [6] Derrick E. Cameron, Jeffrey 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.
- [7] 추영배, 황영문 : "최적 전자에너지 회수작용을 갖는 VRM 시스템의 적정정수해석", 대한전기학회논문지. Vol.44, No.11, pp1457-1463, 1995.

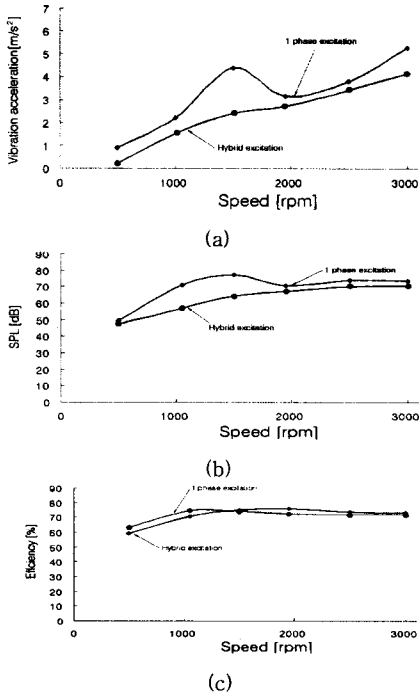


그림 9. 1상 여자방식과 하이브리드 여자방식의 비교.
(a) 소음 (b) 진동가속도 (c) 효율

5. 결 론

SRM의 여러 장점으로 그 활용 범위가 점차 확대되고 있으나 가정용 등에 적용하는데 있어서 타 전동기에 비하여 큰 토크 맥동과 진동·소음에 문제가 있다.

방사 방향의 급격한 기자력의 변화가 진동·소음의 발생에 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 논문에서는 방사 방향의 급격한 전자력의 변화를 저감시키는 방법으로서 하이브리드 여자방식을 적용하였고, 이를 이용하여 진동·소음을 저감할 수 있었다. 또한 상간 전류작용이 원활하지 못해 발생하는 토크 맥동도 현저히 저감 할 수 있음 시뮬레이션을 통하여 알 수 있었다. 그러나 하이브리드 여자방식에서는 도통 구간이 길어짐으로 인한 부토크의 발생으로 효율이 저감된다. 이러한 효율의 저감을 C-dump 인버터의 활용으로 개선하였고, 효율적인 하이브리드 여자를 통하여 진동·소음을 개선할 수 있었다.