

하이브리드 여자방식 SRM의 진동·소음 저감 특성

김창섭, 문재원*, 오석규**, 안진우, 황영문***
 경성대학교, 대양전기*, 진주산업대학교**, 부산대학교***

Vibration and Noise Characteristics of SRM with Hybrid Excitation

C.S. Kim, J.W. Moon*, S.G. Oh**, J.W. Ahn, Y.M. Hwang***
 Kyungseung Univ., Dae-Yang Electric Co.*, Chinju Nat'l Univ.**, Pusan Nat'l. Univ.***

Abstract - The main source of vibration in SRM 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 SRM. 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.

방식과 2상 여자방식이 결합된 하이브리드 여자방식을 제안하며 그에 따른 시스템의 구성과 제어기법을 소개한다.

하이브리드 여자 방식에서는 2상 동시여자 구간을 이용하기 위하여 도통각을 늘려주게 된다. 늘어난 도통구간에 의해 상 스위치의 오프 시점이 인덕턴스가 상당히 큰 구간에서 선택되어 짐으로 인하여 상 커퓨레이션상 전류의 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 검토 하려고 한다.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM이라 함) 구동 시스템은 기존의 영구 자석 전동기에 비하여 경제적이고, 벡터 제어형 유도전동기에 비하여 구동 성능이 우수한 장점을 가지고 있으며 고효율, 고속운전, 견고성 및 넓은 범위의 속도제어가 가능하여 가변속 전동기로서 활발히 연구되고 있다.

그러나 운전시 토오크 맥동과 소음이 다른 전동기보다 크기 때문에 가진 기기나 정밀 제어용 전동기구 등의 적용에 제한 요소로 작용하고 있다.

진동·소음 발생 원인으로는 크게 기계적인 원인과 전자기적인 원인이 있다. 기계적인 원인으로서는 접촉 마찰·불균형적인 제작 등이 있다. 전자기적인 원인으로서는 상 스위치의 온, 오프 순간에 발생하는 갑작스런 기자력의 변화에 의한 수축 팽창작용 등이 있다. 이 중 기자력의 갑작스런 변화에 의한 영향이 SRM의 진동·소음 특성에 가장 큰 영향을 주게 된다[1].

이러한 진동, 소음을 줄이기 위한 연구가 다양한 방법으로 진행되고 있다. 현재까지의 진동, 소음 저감에 관한 연구는 기계적 구조의 조정 및 권선 방식의 조정, 여자방식의 조정 등으로 진행되어왔다.[2]

이러한 각각의 접근 방식 중에서 본 논문에서는 하이브리드 여자방식을 채택하여 방사방향 힘의 급격한 변화를 완화시키는 방법으로 진동·소음을 저감하려고 한다.

2. SRM의 하이브리드 여자방식

SRM의 기계적인 구조는 가변 릴럭턴스 토오크를 최대화하기 위하여 고정자와 회전자 구조가 돌극형으로 되어있고, 토오크 발생 메카니즘상 타 전동기에 비하여 비교적 높은 진동과 소음이 발생한다. 이러한 진동, 소음은 릴럭턴스 토오크의 발생과정에서 주된 회전력으로 작용하는 접선 방향의 힘뿐만 아니라 방사 방향의 힘이 작용하여 각 상을 온, 오프할 때 고정자 프레임에 방사 방향으로 진동시킴으로써 발생하게 된다[1].

2.1 하이브리드 여자 방식의 SRM 구동

기자력의 급격한 변화를 개선하기 위하여 1상 여자

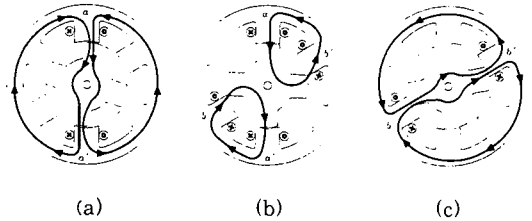


그림 1. 하이브리드 여자에 의한 자속분포도.

(a) a상 여자 (b) a,b상 여자 (c) b상 여자시

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

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

그림 2는 상 여자 방식에 따른 시뮬레이션된 토오크를 나타내고 있다. 하이브리드 여자방식은 1상 여자방식과 2상 여자방식의 적절한 조합에 의하여 운용되어진다. 그림 2(a)의 1상 여자방식에 의한 토오크와 그림 2(b)의 2상 여자방식에 의한 토오크를 그림 2(c)에서와 같이 조합, 적절한 여자 구간을 선정하여 평탄 토오크를 얻게 된다. 그림 2(c)의 토오크 그래프에서 초기 1상여자의 토오크가 최대인 구간을 취하고 1상여자의 토오크 구간이 줄어드는 시점에서 2상여자 구간의 토오크를 취함으로써 일정한 토오크를 얻을 수 있도록 하였다.

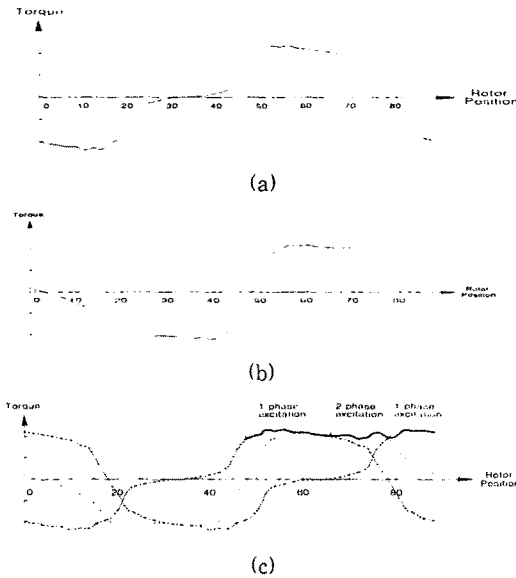


그림 2. 회전자 위치에 따른 토크.
(a) 1상여자 (b) 2상여자 (c) 하이브리드 여자

2.2 C-dump 인버터의 적용

하이브리드 여자방식에서 그림 2(c)와 같은 평활 토크 오차를 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 커뮤테이션시 상전류의 소호 시간이 길어진다. 이로 인한 상 커뮤테이션시 부토크의 영향을 줄이기 위하여 본 연구에서는 그림 3과 같이 전력 회생부를 Boost회로로 구성한 C-dump 인버터를 응용함으로써 상 스위치의 제어와 전력 회생용 초평 스위치의 제어를 분리하여 효율적인 하이브리드 여자방법이 가능하도록 하였다[3].

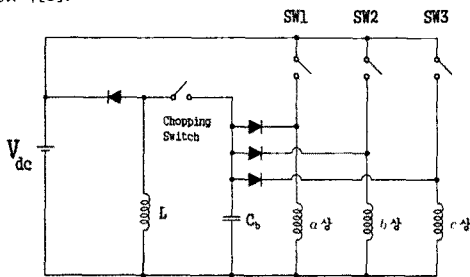


그림 3. 하이브리드 여자방식을 위한 C-dump 인버터.

C-dump 인버터에서 최대 회수전력(Q_{max})은 식 (1)과 같이 최대 여자전압의 크기와 Boost 회로내의 환류 다이오드 평균전류의 곱으로 나타낼 수 있고, 이에 따른 환류 다이오드 전류의 평균치(I_d)는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{max} = I_d \times V_{max} \quad (1)$$

$$I_d = \frac{(1-\epsilon)P_{max}}{\epsilon V_{max}} \quad (2)$$

ϵ : 에너지 변환효율, V_{max} : 최대 여자전압

P_{max} : 전동기의 최대 출력

각 상의 스위칭과는 별개로 회수 회로내의 다이오드에 는 평균전류 I_d 가 흐른다. 따라서, 상권선의 환류 다이오드의 전류가 회수회로 내의 다이오드의 평균전류보다 크게 되면 두 전류의 차에 해당하는 전하량이 회수용 캐패시터에 축적되어 캐패시터의 전압이 상승하게 된다. 캐패시터 용량에 대한 전압 상승분의 크기를 나타내면 식 (3)과 같이 나타내게 된다.

$$V_{dc} = \frac{(I-I_d)^2 Q_{max} T_r}{C_b V_r P} \quad (3)$$

T_r : 에너지 회수주기, V_r : 캐패시터 전압

I : 평활 상전류의 크기, C_b : 캐패시터 용량

따라서, 캐패시터 용량은 스위칭 소자의 정격과 전압 상승분의 허용치등을 고려, 식(3)에 의하여 구할 수 있다. 회수회로내의 인덕턴스의 최소 크기는 시비율 k_r , 인덕터의 평균전류 I_L 과 회수용 스위치의 스위칭 주기 T_b 및 여자 전압에 대한 역전압의 비 R_r 와의 상관관계에 의하여 식 (4)에 의하여 계산되어진다.

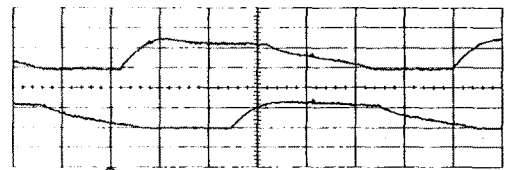
$$L_{min} = \frac{k_r R_r V_{max} T_b}{2 I_L} \quad (4)$$

3. 진동·소음 저감의 실험적 해석

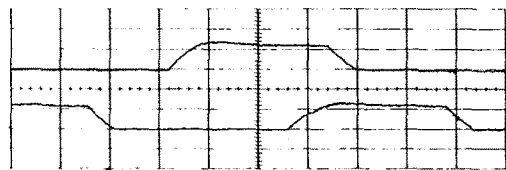
본 실험에 이용된 전동기는 회전자와 고정자의 극호각이 각각 16° 와 17° 인 600[W]급 12/8극 SRM이며, 부하실험 및 진동·소음 실험을 위하여 동력계와 진동 가속도 센서 및 소음측정기를 사용하였다. 진동 가속도 센서는 고정자 극의 프레임 표면에 부착되어 졌고, 소음 측정기는 프레임에서 1피트 지점에 방사방향으로 설치하였다.

3.1 상전류 파형

그림 4는 하이브리드 여자방식에 의한 운전시 비대칭 인버터와 활용된 C-dump 인버터에서의 상전류 파형을 보이고 있다. 비대칭 인버터의 하이브리드 여자방식 경우에서는 2상 중첩을 위하여 토크 각을 늘려줌으로서 커뮤테이션시 전류 소호시간이 상당히 길어짐을 그림 4(a)에서 보이고 있다.



(a)



(b)

그림 4. 하이브리드 여자방식에서 상전류. (5[ms/div], 2A/div.)

(a) 비대칭 인버터 (b) C-dump 인버터

이에 비하여 C-dump 인버터를 이용한 하이브리드 여자방식에서는 매우 짧은 시간 동안 상 권선의 축적 에

너지가 캐패시터로 회수됨으로, 비대칭 인버터에 비해 상전류의 커뮤테이션시 전류의 소호를 빠르게 할 수 있다.

3.2 진동 특성 해석

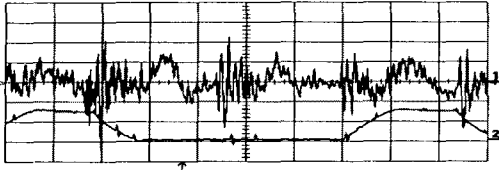
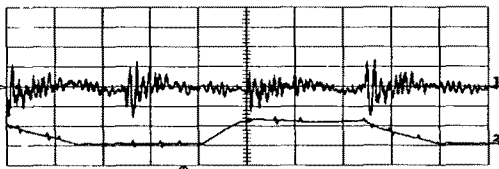
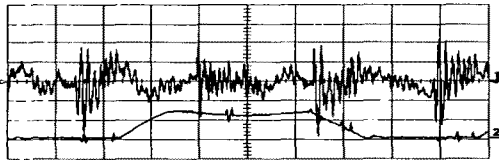


그림 5. 1상 여자방식에 의한 진동. 2000(rpm), 5(kg·cm) (1fms/div., CH1:50[mV/div.], CH2:3[A/div.])

그림 5와 그림 6은 도통각 조정에 의한 C-dump 회로에서의 12/8극 SRM의 한 상의 전류와 진동 파형을 보이고 있다. 그림 5는 C-dump 인버터에서의 기존의 1상 여자방식에 의한 진동 파형을 나타내고 있다. 상 스위치 오프시 그림 6(a)의 하이브리드 여자 방식과 비교하여 큰 진동을 나타내고 있음을 알 수 있다.



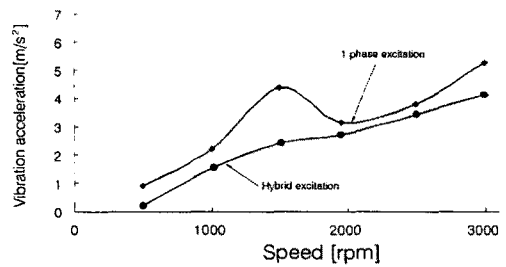
(a)



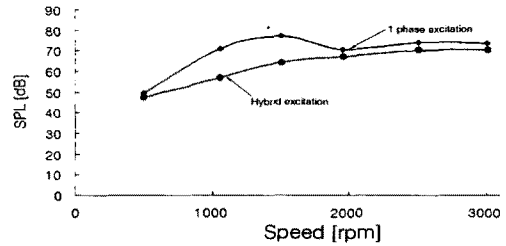
(b)

그림 6. 하이브리드 여자방식에 의한 진동. 2000(rpm), 5(kg·cm) (1fms/div., CH1:50[mV/div.], CH2:3[A/div.])
(a) 적정 2상 여자구간시(도통각: 20°)
(b) 과도한 2상 여자구간의 선택시(도통각 23°)

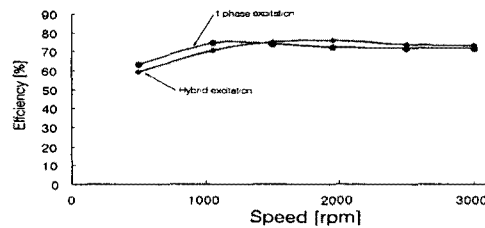
앞서의 설명과 같이 1상 여자방식에서 보다 2상 여자방식이 포함되는 하이브리드 여자방식에서 진동이 줄어들음을 확인할 수 있다. 그러나 2상 여자구간은 단지 여자된 상의 소호시 급격한 전자력의 변화만 완화시킬 수 있도록 극히 짧은 구간만을 증첩시켜야 된다. 그림 6(b)에서 보이는 것과 같이 과도한 2상 여자구간을 취하게 되면 기 여자된 상이 부투오크의 영역에서 동작하게 되고 진동이 심하게 일어나게 되므로 적절한 여자구간의 선정이 중요하다. 이상의 실험적 해석에서 그림 7과 같은 기존의 고효율로 운전되는 1상 여자방식과 하이브리드 여자 방식의 특성을 도출, 비교하였다. 그림 7의 (a)와 (b)에서 보이는 결과와 같이 하이브리드 여자 방식에서 진동 가속도와 소음이 1상 여자방식에서보다 상당히 개선되었다. C-dump 인버터를 사용한 하이브리드 여자방식에서의 효율이 1상 여자방식의 최대효율점에 근접함을 그림 7(c)에서와 같이 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 7. 1상 여자방식과 하이브리드 여자방식의 비교. (a) 소음 (b) 진동가속도 (c) 효율

4. 결 론

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

방사 방향의 급격한 기저력의 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. 그러나 하이브리드 여자방식에서는 도통 구간이 길어짐으로 인한 부투오크의 발생으로 효율이 저감 된다. 이러한 효율의 저감을 C-dump 인버터의 활용으로 개선하였고, 효율적인 하이브리드 여자를 통하여 진동·소음을 개선할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- (1) D.E.Cameron, J.H.Lang, S.D.Umans : "The Origin of Acoustic Noise in Variable Reluctance Motors", IEEE IAS Annual Meeting, pp. 108-115, 1989.
- (2) C.Hao, L.Diji : "Symmetry of Switched Reluctance Motor Drive", Proc. of International Power Electronics and Motion Control Conf., Vol.2, pp. 606-610, 1996.
- (3) 추영배, 황영문 : "최적 전자에너지 회수작용을 갖는 VRM 시스템의 적정정수해석", 대한전기학회논문지, Vol.44, No.11, pp1457-1463, 1995.