SRM의 저소음 구동을 위한 여자방식에 따른 특성해석

김태형, 안진우
경성대학교

Characteristic Analysis of Excitation Method for Reduction of Acoustic Noise of SRM

Tae-Hyoung Kim, Jin-Woo Ahn
Kyungsung Univ

Abstract - Switched reluctance drive does exhibit higher levels of vibration and acoustic noise than that of most competing drives. The main source of vibration in the switched reluctance drive is generated by rapid change of radial magnetic force when phase current is extinguished during commutation action. In this paper, some excitation method is proposed to reduce vibration and acoustic noise of the switched reluctance drive. The excitation strategies considered in this research are 1-phase, 2-phase and hybrid excitation method. 1-phase method is a conventional and 2-phase method is excited 2 phases simultaneously. The hybrid excitation has 2-phase excitation by long dwell angle as well as conventional 1-phase excitation. The vibration and acoustic noise are compared and tested. Suggested 2-phase and hybrid strategies reduce acoustic noise because the scheme reduces abrupt change of excitation level by distributed and balanced excitation.

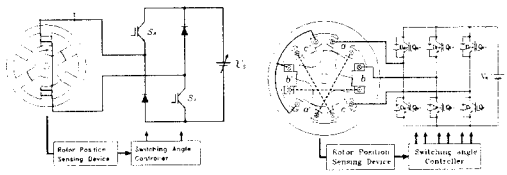
1. 서 론

스위치릴럭턴스전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)에서 발생하는 진동 · 소음 발생 원인으로는 크게 기계적인 원인과 전자기적인 원인이 있다. 기계적인 원인으로는 공심의 동심도, 직전도, 접촉 마찰등과 같이 제작상의 문제와 적용부품의 기계적인 진동과 공기와의 마찰 등이다. 전기적인 원인으로는 상 스위치의 온, 오프 순간에 발생하는 갑작스런 기자력의 변화에 의한 수축 팽창 작용 등이 있다. 이중 기존 연구에 의하면 주로 방사방향의 힘의 변동에 의해 발생되는 것이 SRM의 주요 소음원으로 보고되고 있다[1][2]. 이러한 진동, 소음을 줄이기 위한 연구가 다양한 방면으로 진행되고 있다. 현재까지의 진동, 소음 저감에 관한 연구는 기계적인 구조의 조정 및 권선방식의 조정, 여자방식의 조정 등으로 진행 되어 왔다[3][4][5][6]

본 논문에서는 급격한 기자력의 변화를 완화시키기 위하여 현재까지 제시되었던 1상 여자방식과 2상 여자방식의 특성을 비교하고, 이를 혼합한 하이브리드 여자방식과 진동, 소음 및 토크리플을 비교하고자 한다.

2. 소음저감을 위한 여자기법

SRM의 기계적인 구조는 가변 릴럭턴스 토오크를 최대화하기 위하여 고정자와 회전자 구조가 2중 돌극형으로 되어 있고, 단일여자 방식으로 구동을 하게 되어 토오크 발생 메카니즘 상 기존의 가변속 전동기에 비하여 비교적 높은 진동과 소음이 발생한다. 이러한 진동, 소음은 릴럭턴스 토오크 발생 과정에서 주된 회전력으로 작용하는 접선방향의 힘뿐만아니라 방사방향의 힘이 작용하여 각 상의 온, 오프시 고정자 프레임을 방사방향으로 진동시킴으로서 발생하게 된다.



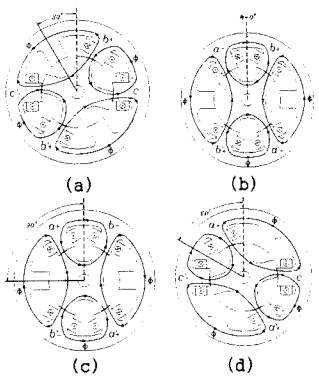
(a) (b)

그림 1. SRM의 여자방식
(a) 1상 여자 (b) 2상 여자

2.1.2상 여자방식

인덕턴스의 하강영역에서 상전류의 빠른 감소는 진동을 증가시킨다. 진동의 크기는 여자전류의 크기와 직교하는 방향으로 직접적으로 비례한다. 게다가 진동은 회전자극이 고정자극에 접근하여 정렬될때 주어진 전류의 크기에 대하여 증가한다.

2상여자 방식의 6/4 SRM의 상권선의 결선형태는 그림 1 (b)와 같다. 상권선은 마주보고 있는 극의 역방향으로 삽입되어있으며 Y결선으로 연결되었다. 역방향에서 2상은 전동기의 상호인덕턴스와 자기인덕턴스를 이용하여 여자 되어진다. 토오크 발새의 원리는 그림 2와 그림 3으로 설명되어질 수 있다.



(a) (b) (c) (d)

그림 2. 2상 여자에 의한 자속분포
(a) a상(+), b상(-) (b) c상(+), b상(-)
(c) c상(+), a상(-) (d) b상(+), a상(-)

그림 2(a)에서 a상을 정(+)방향, b상을 역(-)방향으로 여자되면 회전자는 릭럭턴스가 최소가 되려는 방향 즉 0°으로 회전하게된다. 그림 2(b)의 구간에서는 a상을 정(+)방향, b상을 역(-)방향으로 계속 여자할 때 릴럭턴스가 최소화되는 위치를 향하여 회전하려는 토크가 발생하게 되고 그 구간은 회전자 b극과 회전자극이 중첩되기 시작하는 구간으로 회전자의 위치각변화에 따른 a-b간의 쇄교

자속량이 증가하여 토크 발생이 증가한다.

그림 3은 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 나타낸다. 정토크를 발생시키는 상전류 i_a, i_b, i_c 는 식 (3)과 같다.

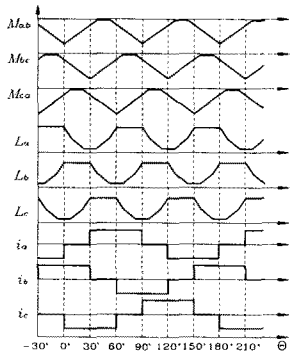


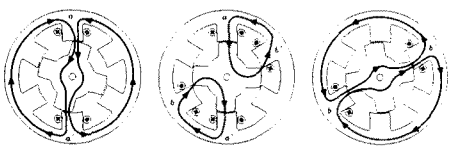
그림 3. 2상여자시 인덕턴스와 상전류

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_{aa}}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_{bb}}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_{cc}}{d\theta} + i_a \cdot i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_b \cdot i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_c \cdot i_a \frac{dM_{ca}}{d\theta} \quad (3)$$

여기서, $i_a \cdot i_b < 0$, $i_b \cdot i_c < 0$, $i_c \cdot i_a < 0$

2.2 하이브리드여자방식

늘어난 도통구간에 의해 상 스위치의 오프시점이 인덕턴스가 상당히 큰 구간에서 선택되므로 상전류(commutation)시 상전류의 소호시간이 길어진다. 이로 인해 SRM 운전효율이 현저하게 감소되는데, 이를 개선하고자 본 논문에서는 Boost회로를 응용한 C-dump회로를 구동 인버터로 구성하고 [7], 진동, 소음 및 효율 특성을 검토하려고 한다.



(a) (b) (c)

그림 4. 하이브리드 여자에 의한 자속분포
(a) a상 여자 (b) a상, b상 여자 (c)b상 여자

그림 4는 하이브리드 여자방식에서의 각 여자구간에 대한 자속경로를 나타내고 있다. a상의 상여자에 대한 그림2(a)의 자속경로에서 b상을 여자하게 되면 2상 여자구간인 그림 2(b)의 자속 경로가 이루어진다. 2상 여자구간에서 a상을 오프시키면 자속은 그림4(b)구간을 유지하다가 마지막으로 1상여자의 자속경로인 그림 4(c)를 이루게 된다.

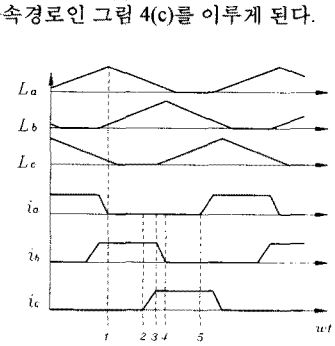
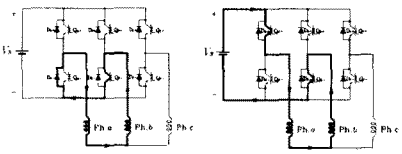


그림 5. 2상여자시 인덕턴스와 상전류

그림 5는 하이브리드 여자방식에 따른 인덕턴스와 각 상 전류 파형을 보여주고 있다. b상이 오프하기 이전에 c상을 온함으로써 그림 1에서 2-3사이에 두 상이 동작하게 되어 b상이 오프시에 발생되는 과도한 진동, 소음을 저감할 수 있으며 중첩되게 함으로서 상간의 전류과정에서 발생하는 토오크 맥동을 저감 시킬 수 있다.

2.3여자방식의 해석

1상 여자 방식은 SRM의 적용에 일반적인 기법으로 알려져 있다. 2상 여자 방식은 그림 6과 같이 2상을 동시에 여자시킨다.[7]



(a) mode 1 (b) mode 2

그림 6. 2상여자시 인덕턴스와 상전류
(a) mode 1 - a상(+), b상(-):ON
(b) mode 2 - a상(+):OFF, b상(-):ON

그림 6은 2상 여자방식의 동작모드를 나타내고 있다. 모드 1에서는 토크 발생 주기에서 A상은 정(+)방향으로 B상은 역(-)방향으로 여자 된다. 일반적인 SRM의 저장된 자기에너지는 전원측으로 회생되거나 다음상의 부가회로나 제어에 사용 되어질 수 있다. a상의 공급전압은 영점을 지나 정방향에서 역방향으로 반복하여 진동 및 소음을 감소 시킬 수 있도록 변화되어진다.

하이브리드 여자방식에서 2상 여자 구간을 취하기 위하여 상의 도통각을 늘려주게 되고, 늘어난 도통각에 의해 상 스위치의 오프시점이 인덕턴스가 상당히 큰 구간에서 선택되어 지므로 인하여 상전류(commutation)시 소호시간이 길어진다.

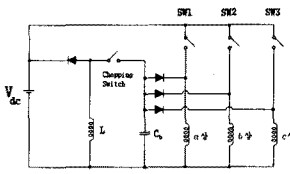


그림 7. 하이브리드 여자방식을 위한 C-dump 인버터

이로 인한 상전류시 부토크의 영향을 줄이기 위하여 본 연구에서는 그림7와 같이 전력 회생부를 Boost회로로 구성한 C-dump 인버터를 응용함으로서 상스위치의 제어와 전력 회생용 쵸핑 스위치의 제어를 분리하여 상당 하나의 스위치가 필요하고 상전류의 중첩이 가능하도록 상간의 완전한 독립성을 지닌다. 또한 에너지 회수용 커패시터 전압의 크기가 곧 역전압의 크기가 되게 함으로서 커패시터의 동작전압에 부담은 크게 경감된다[7].

그림 8은 A상에서 B상으로 전류(commutation)될 때 인버터의 동작상태를 보여주고 있다. 에너지 회수용 커패시터의 전압이 일정하다고 가정하면 상권선 양단에는 스위치-온에 의한 전원전압이 가해지고 스위치 오프에 의하여 역전압이 인가된다.

그림 8(b)는 a, b상이 동시에 도통되는 구간을 나타내고 있고 그림 8(c),(d),(e)는 B상이 동작하고 a상을 회수용 회로를 이용하여 기계적인 출력으로 변환되지 않은 자기회로내에 자기에너지를 쵸퍼 스위치의 시비율에 따라 전원전압으로 회수하는 과정을 나타내고 있다. 그림 9는 1상여자방식과 2상여자 방식, 하이브리드여자방식의 전류 파형을 나타내고 있으며 그림 10은 실험을 위한 측정장비의 구성을 나타내었다.

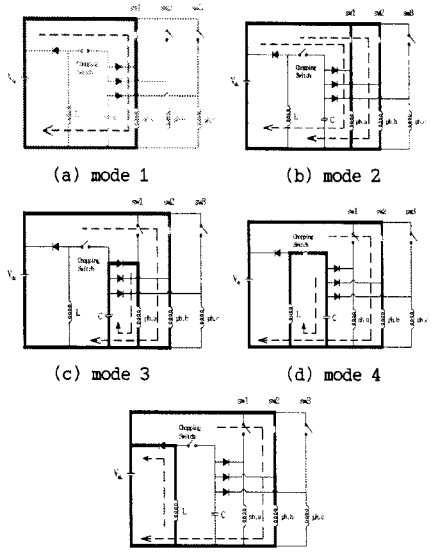


그림 8. 하이브리드 여자방식을 위한 C-dump 인버터의 구동모드

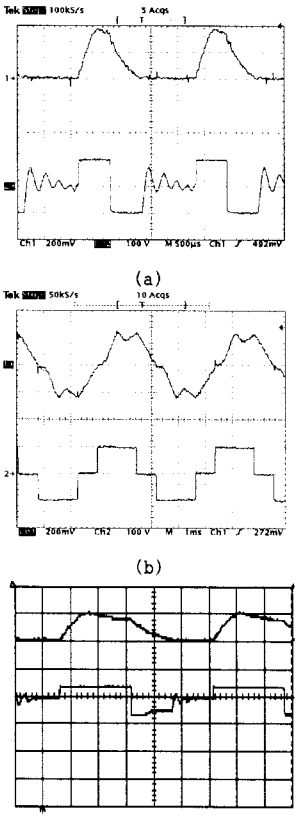


그림 9. 상전류 및 전압
(a) 일반적인 1상 여자, (b) 2상 여자,
(c) 하이브리드 여자 (상 : 전류, 하: 전압)

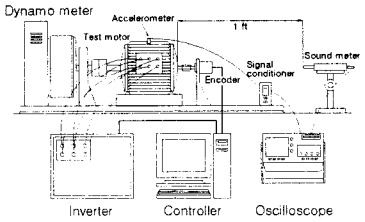


그림 10. 진동 및 소음측정을 위한 실험 시스템

3.실험및결과

고정자 극호각이 16°이며 회전자 극호각이 17°인 12/8, 600[W] SRM을 통해 실험하였다. 그림 10은 측정된 진동과 소음을 나타낸다. 진동 및 소음은 기존의 구동방식을 비교 실험되었다. 진동은 진동계를 이용하여 측정되었으며, 소음은 소음계를 이용하여 그림과 같이 측정되었다. 진동계는 전동기의 고정자에 부착하여 측정하였다.

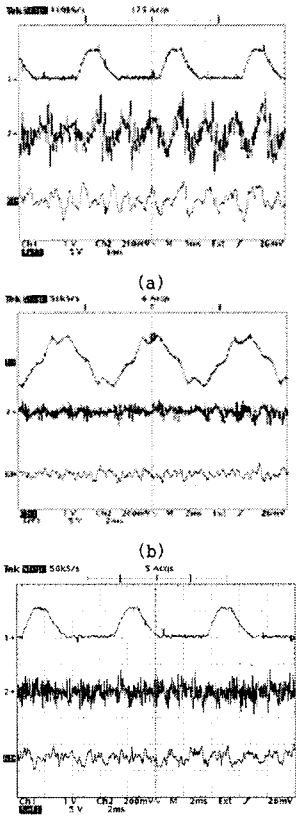


그림 11. 진동 및 소음비교
(a) 1상 여자, (b) 2상 여자, (c) 하이브리드여자
[상 : 전류, 중: 소음, 하: 진동]

5kHz ~ 10kHz.에서 진동계의 출력은 99.5[mV/g] 이다. 소음계는 전동기로부터 1[ft]떨어진 곳에서 측정되었다. 그림 11인 전류파형과 진동을 나타낸다. 그림 11(a)와 같이의 1상여자방식의 진동이 2상 여자 방식, 하이브리드 여자방식에 비해 증가 것을 실험결과를 통하여 알 수 있다.

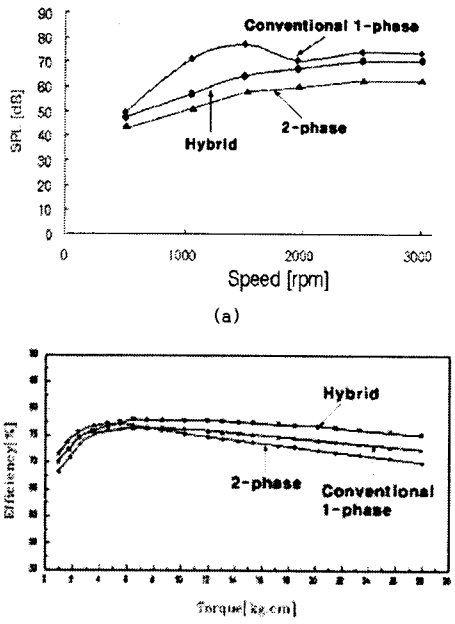


그림 12. 소음과 효율비교 (a) 소음 (b) 출력

그림 12는 1상 여자방식과 2상 여자방식, 하이브리드 여자방식의 속도에 따른 특성을 비교한 것이다. 2상 여자방식과 하이브리드 여자방식에서의 소음은 1상 여자 방식보다 작으며, 1상 여자에서의 높은 소음과 진동점은 발생하지 않는다.

효율은 저토크영역에서는 거의 비슷하나 정격토크 부근에서는 하이브리드 방식이 기존 1상 또는 2상방식보다 우수하였다. 이는 c-dump에 의한 상여자의 효율성에 기인한 것으로 평가된다

4. 결 론

SRM은 여러 장점으로 그 활용 범위가 점차 확대되고 있으나 가정용등에 적용하는데 토오크 맥동, 진동 및 소음 등에 난점을 가져왔다. 이러한 진동 및 소음의 주된 원인은 방사방향의 급격한 전자력의 변화이다.

본 논문에서는 이러한 전자력의 변화를 저감시키기 위하여 2상여자방식과 하이브리드 여자방식을 제안하고 제안된 여자방식에 대한 특성을 기술하였다. 하이브리드 여자방식에서 발생하는 효율의 감소를 억제하고 상전류시 원활한 전류를 위하여 C-dump회로를 제안하였다. 실험을 통하여 각 여자 방식에 따른 진동 및 소음을 비교하였으며, 결과를 통하여 제안된 여자방식에 의한 소음 및 진동의 저감을 검증하였다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원 (과제번호 : R2004-B-2B-01)주관으로 수행된 과제임

[참고문헌]

[1] D.E. Cameron, J.H. Lang, S.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

[2] C. Pollock, C.Y. Wu, "Analysis and Reduction of Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive", IEEE Trans, on IA, Vol.31, No.1, pp. 91-98, 1995

[3] P.C. Kjaer, J.J. Gribble and T.J.E. Miller, "High-Grade Control of Switched Reluctance Machine, "Proc. of IAS Annual Meeting '96. vol.1, pp. 92-100, Oct. 6-10 1996.

[4] Husain and M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control," IEEE Trans. on PE, Vol.11, No.1, pp. 83-88, Jan. 1996.

[5] T. Li, J.D. Lioyd, G.E. Horst, "Switched Reluctance Motor with DC Assisted Excitation", IEEE, conf. pp. 801-807, 1996

[6] H.Chen L. Diji, "Symmetry of Switched Reluctance Motor Drive", Proc. of IPEMC, pp606-610, 1996

[7] J. W. Ahn et al, " A 3-phase Switched Reluctance Motor with 2 phase excitation", IEEE Tr. IA, pp1067-1074, Sep./Oct. 1999

[8] S.G. Oh, Y.B. Choo, Y.M. Hwang, "A Study on Electromagnetic Energy Recovery in SRM System", proc. of '96 IEEE/IECON, vol.1, pp90-95, 1996

[9] J. W. Ahn et al, "Reduction of Vibration and Acoustic Noise of SRM with Hybrid Excitation", proc. of IEEE /ISIE, pp1407-1412, 2001