

Vibration and Acoustic Noise Reduction Method of SRM Using Auxiliary Winding

鄭泰旭*
(Tae-Uk Jung)

Abstract - Switched reluctance motor(SRM) has simple magnetic structure, and needs simple power electronic driving circuit. It is very useful for wide range adjustable speed drive system. But, SRM drive generates large vibration and acoustic noise because it is commutated individually by step pulse m.m.f of each phase. In the vibration and acoustic noise characteristics, the considerable vibration and noise is induced by radial deforming of stator, so the frequency of dominant vibration and noise is coincident with the frequency of natural frequency of mechanical structure. This radial vibration force is generated by abrupt change of radial magnetic force in the phase commutation region.

This paper studied about simple electromagnetic structure of SRM using auxiliary compensating winding for the reduction of noise and vibration. This auxiliary winding is coupled with all phase windings electromagnetically and absorb and transfer magnetic energy variation from phase to other phase. By this interaction of phase windings and compensating winding can reduce abrupt radial force change and vibration and acoustic noise. In this paper the improvement effect is examined by the test of prototype machine.

Key Words : SRM, Vibration and Acoustic Noise Reduction, Compensating Winding

1. 서 론

가전용 산업용 전동시스템의 고효율, 고성능화 요구에 의해 가변속 전동시스템의 수요가 나날이 증가하고 있다. 현재 인버터 구동 삼상유도기와 BLDC 전동기가 주로 적용되고 있으며 그 이유는 고효율과 정음성을 들 수 있다. 반면 SRM(Switched Reluctance Motor)도 고효율과 가변속 제어 용이성, 경제성과 신뢰성은 인정되고 있지만 실부하 운전시의 큰 소음이 문제점으로 지적되고 있다.

SRM의 자기회로는 릴럭턴스 토오크의 극대화를 위해 보통 이중 돌극형으로 설계되며, 직류펄스 기자력을 각 상에 시이컨스적으로 인가하여 토오크가 발생한다. 이러한 2중 돌극구조는 기계적 강도를 약화시켜 고유모드 진동이 발생하기 쉽고 펄스 기자력의 간헐적인 인가 및 제거는 고정자 프레임에 불균일한 방사방향 전자력의 순시 충격성 기전력을 주게되어 진동 및 소음이 발생된다[1~3]. 이러한 진동, 소음의 억제를 토오크리플 저감제어 측면에서 많은 시도가 있었으나 실질적인 효과는 크지 않은 것으로 보고되고 있다.

또한, Pollock 교수가 제안한 상절환시 2단계의 감자전압을 순차적으로 인가하는 2-stage commutation control이 상당한 진동, 소음 저감효과를 가진다고 보고된 바 있다[4]. 그러나, 이 방법은 전동기의 고유주파수(natural frequency)를

정확히 예측해야 하는 어려움이 있으며, 또한, 감자전압의 감소로 전류소호시간이 상대적으로 길어지므로 상전류의 빠른 확립과 소호가 필요한 고속 운전시에는 적용의 어려움이 있다. 이러한 제어적 접근에 앞서 전자기 구조의 근원적인 시각에서 진동과 소음을 억제할 수 있는 방안이 필요하다. SRM의 전자기 회로의 수정된 구조는 Mecrow 및 Lipo 교수의 전절권의 Bipolar SRM과 Lipo 교수와 Li가 제안한 집중권의 상권선에 전절권의 보조권선을 추가한 SRM을 들 수 있다[5~6]. 이러한 전자기 구조들은 주로 전류(轉流)특성의 개선을 통한 출력 및 효율 개선에 목적을 두고 있다.

본 논문에서는 Acarnly 교수가 스텝모터의 출력특성 개선을 위해 적용한 분할 보조권선(split auxiliary winding)[7]을 진동, 소음 측면에서의 보상권선(compensating winding)의 개념으로 도입하고자 한다. 보상권선을 갖는 SRM의 전자기구조에서 보상권선의 상권선과의 상호작용을 해석하고, 이에 의해 진동, 소음에 대한 기전력을 흡수하여 진동, 소음을 억제할 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

2. SRM의 진동, 소음 특성

2.1 가전원 및 진동 특성

구동원리상 SRM과 같이 공극 일부분에만 방사방향 성분의 자속이 집중적으로 형성되는 경우에는 고조파 자속보다는 극부에 집중적인 기본주파수의 자속파에 의한 진동, 소음의 발생이 더욱 심각하다[2,4]. SRM의 진동은 주로 방사방향 기자력의 변화에 의한 고정자의 변형에 의해 발생한다.

기계공학 관점에서 진동특성은 기계적 구조와 재질의 강

* 正 會 員 : LG電子 責任研究員 · 工博
接受日字 : 2003年 5月 15日
最終完了 : 2003年 10月 15日

성 등의 물성치 등에 따라 변화한다. 보통 고유적으로 일어나기 쉬운 진동모드를 고유모드(natural mode)라고 하며 이러한 고유모드가 발생하는 주파수를 고유주파수(natural frequency)라고 한다. 이런 고유주파수에 미치는 가진력과 가진주파수와의 상관관계에 의해 진동이 발생되고 진동에너지는 음향에너지로 변환되면서 소음이 발생하게 된다. 그러므로, 고정자의 진동에 있어 고유모드는 매우 중요한 의미를 가지며, 각 고유모드의 고유진동수 ω_n 및 주파수 f_n 는 재질의 강성(stiffness) k 이고 중량이 m 일 때 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1}$$

식(1)에 기반을 두고 본 논문에 적용된 시작기의 고유모드를 Ansys 프로그램으로 해석한 결과는 그림 1과 같다.

그림 1의 1차 모드는 시스템 전체의 변위가 발생하는 진동을 보여주고 있으며 전동기가 구조적으로 고정된 구조라면 잘 일어나지 않는 고유모드이다. 그 외의 각 모드는 진동기내의 가진력에 의해 발생하게 되며 이러한 가진력의 기수 혹은 우수 차수의 고조파에 의해 진동이 여기된다.

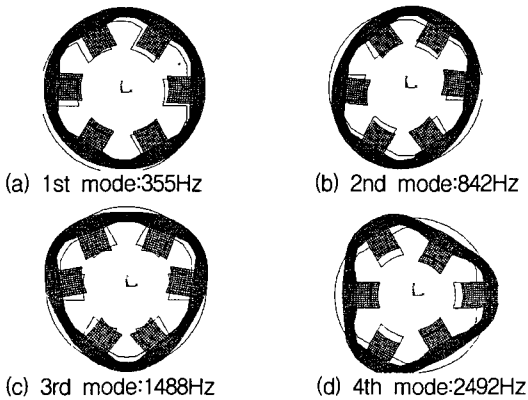


그림 1 시작기의 고유모드 해석 결과
Fig. 1 Natural mode analysis of prototype

이 중에서 2차 모드는 타원형으로 수축 및 팽창하는 모드를 보여주고 있다. 특히, SRM은 돌극형 구조로 인해 계절 부분의 기구적 강도가 취약함과 동시에 토크 발생원리상 1개의 고정자 자극쌍(pole-pair)과 회전자 자극쌍에 의해 토크가 발생된다. 그러므로 기자력이 인가된 자극방향으로 고정자가 수축, 팽창하는 2차 모드가 주된 진동모드로 추정된다. 실제로 시작전동기에 임팩트 해머로 임펄스 충격을 가하여 발생하는 진동을 측정하여 주파수 특성을 분석하였으며, 그 결과는 그림 2와 같다.

본 논문에 사용된 진동 측정용 가속도센서는 압전형의 Piezotronics社의 high sensitive accelerometer로서 측정주파수 범위는 5~10[kHz]이고 중력가속도 $g(=9.8m/s^2)$ 에 대한 출력전압이 99.5[mV/g]로서 각 고정자 자극의 계절 후면에 부착하였다.

진동 파형 중 진동치가 높아져 산을 이루는 주파수가 있으며 이것이 고유주파수를 나타낸다. 360(1차), 900(2차), 1488(3차)Hz 등에서 각 차수의 고유모드가 형성됨을 알 수 있다.

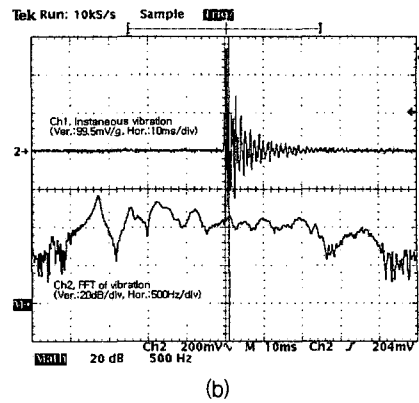
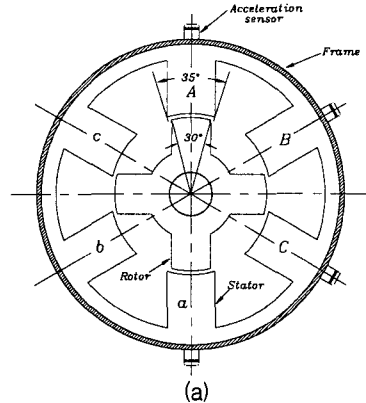


그림 2 진동 측정시스템(a)과 임펄스 충격시 고정자의 고유 주파수(b)

Fig. 2 ibration measurement system(a) and natural frequency of stator by impulse impact(b)

이 주파수들은 그림 1의 모델링 결과의 (a),(b),(c)와 비슷한 주파수 대역이다. 특히, 이 중에서 (b)와 같이 타원형으로 변형, 진동하는 2번째 고유모드가 900Hz 대역에서 선명함을 확인할 수 있다.

2.2 실험시스템의 구성

본 논문에서 진동 및 소음특성과 구동특성을 측정하고 해석하기 위한 측정시스템의 구성을 그림 3에서 보여주고 있다.

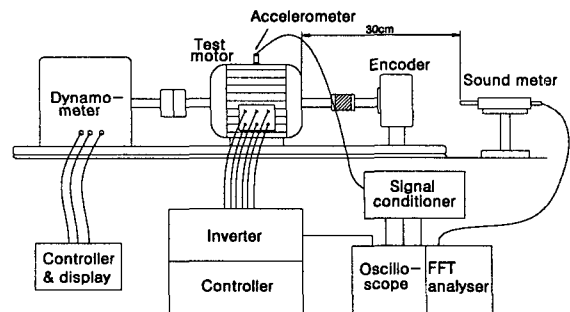


그림 3 측정시스템의 구성
Fig. 3 Configuration of measurement system

SRM 드라이브 시스템은 상스위치를 제어하기 위한 스위칭 제어기와 직류전원을 전동기에 인가하기 위한 인버터, 그

리고, 회전자의 위치를 검출하기 엔코더(encoder)와 부하장치인 다이내모미터(dynamometer)로 구성된다.

토크 및 효율 측정을 위해 최대 부하 토크가 100[kg·cm]이며 최대속도가 10,000[rpm]이며 부하 토크와 속도의 제어가 가능하며 회전속도, 토크, 출력을 표시하는 기능을 갖는 Magtrol社의 다이내모미터(Model No.:HD810-7)를 이용하였다.

시작전동기의 진동을 정확히 측정하기 위해 다이내모미터 축과 시작전동기의 축을 결합하는 커플링은 접촉부위에 고무링이 있는 커플링을 사용하였다. 그리고, 다이내모미터는 실험베드 바닥에 방진고무를 깔고 취부하고, 시작전동기는 다시 다이내모미터와의 취부면에 다시 방진고무를 삽입한 뒤 취부하였다.

소음측정기는 CEL社의 디지털 사운드메터를 사용하여 음압(Sound Pressure Level ; SPL)을 측정하였다. 소음측정에 있어 시작전동기의 회전자 축 끝단에서 수평거리로 30[cm] 떨어진 곳에 위치한 소음측정기에 표시되는 평균 소음치를 측정하고, 소음측정기에서 출력되는 아날로그 출력신호를 측정하여 주파수 분석을 행하였다.

보통 소음 측정시 측정하려는 대상의 소음이 암소음에 비해 10[dB] 이상 높아야만 정확한 측정이 이루어진다. 실험실 내의 암소음은 보통 40[dB] 정도이지만 시작기의 운전시 발생하는 소음치가 보통 65[dB] 이상으로서 암소음에 비해 25[dB] 이상 크므로 무향실 없이 소음측정이 가능하다고 판단하였다. 그러나 주위 소음의 영향을 최소화하기 위해 야간에만 소음측정을 행하였다.

2.3 구동시의 진동특성

일반적으로 실용화되고 있는 3상 6/4 SRM 및 4상 8/6 SRM에서의 실제 운전시 발생하는 진동특성을 살펴보면 다음과 같다. 그림 4는 6/4 SRM 시작기에서 A상 고정자 프레임의 후면에서 측정된 진동특성을 보여주고 있다.

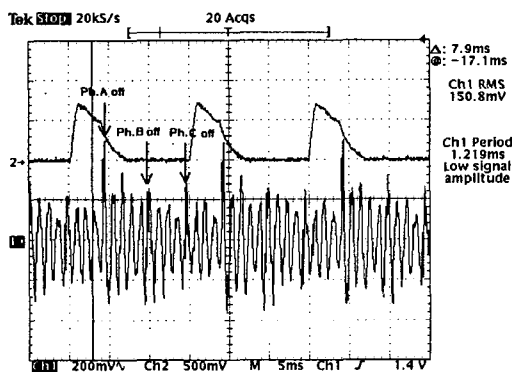


그림 4 운전시 고정자 프레임의 진동 특성 (위: 상전류(6.25A/V), 아래: 진동(99.5mV/g))
 Fig. 4 Vibration characteristics of stator frame on driving (top: phase current(6.25A/V), low: vibration (99.5mV/g))

그림 4에서와 같이 상전류의 소호시 가장 큰 진동이 발생하며, 또한 B상 및 C상의 상전류 소호시 발생한 진동도 중첩됨을 알 수 있다. 즉, 상전류 소호시의 급격한 자속 감소

로 인한 방사방향 전자력의 급격한 감소에 의해 고정자가 2차 고유모드인 타원형의 탄성 변형 진동하는 것이 주된 진동모드임을 보여주고 있다.

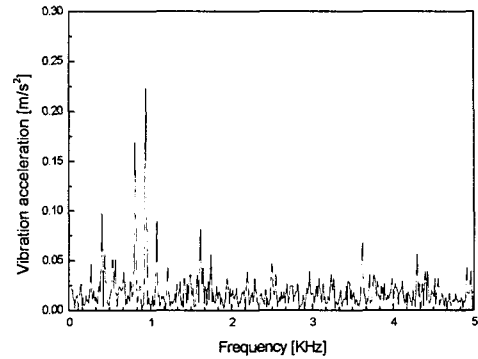


그림 5 진동의 주파수 분석
 Fig. 5 Frequency analysis of vibration

그림 5는 그림 4의 진동을 주파수 분석한 결과로서 2차 고유모드에 해당하는 850~950Hz에서 가장 큰 진동이 발생함을 알 수 있다. 실험 결과 회전주파수를 변경한 경우에도 주된 진동은 동일한 주파수 대역에서 발생하며, 이는 스위칭 주파수나 회전주파수보다는 2차 고유모드 특성에 지배적인 영향을 받음을 의미한다.

3. 보상권선형 SRM과 소음 저감 방안

3.1 보상권선형 SRM의 구조

보상권선을 갖는 SRM의 전자구조는 그림 6과 같이 고정자 자극에 집중권의 상권선과 이에 부가적으로 동일한 방향으로 보조권선을 감고 이를 직렬로 연결한 구조이다.

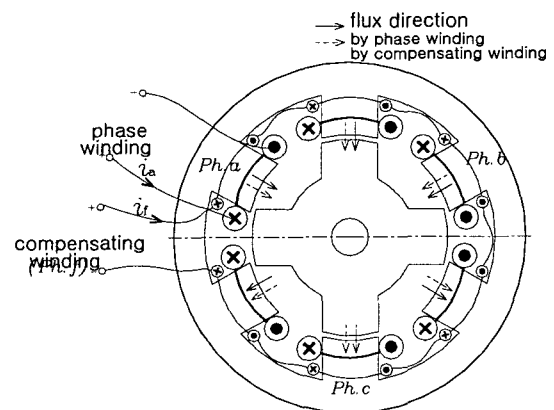


그림 6 보상권선형 SRM의 구조
 Fig. 6 Structure of CWSRM

이러한 구조에 의해 보조권선은 고정자 자극을 2개의 극으로 대칭 분할하고 상권선과 자기적으로 커플링되므로 상권선 자속의 변화를 흡수할 수 있다. 그러므로 상권선의 스위칭시 발생하는 급격한 전자력의 순시 변화를 전체 상권선에 분산 완화시킴으로써 진동, 소음을 저감시키는 효과를 줄

수 있다.

이러한 개념에서 이 보조권선을 보상권선(compensating winding)이라 정의하고, 보상권선을 갖는 SRM을 보상권선형 SRM(Compensating Winding SRM, 이하 CWSRM이라고 함)라고 정의하기로 한다.

3.2 보상권선형 SRM의 인덕턴스 프로파일

보상권선형 SRM에서 고정자 상권선의 자기인덕턴스 L 은 기존의 SRM의 자기회로와 동일하며 다음과 같다.

$$L(\theta) = N^2 \frac{\mu_0 \gamma(\theta) D_r l_s}{2g} \quad (2)$$

또한, 보상권선과 상권선의 상호인덕턴스는 식(3)과 같다.

$$M(\theta) = N \cdot N_f \frac{\mu_0 \gamma(\theta) D_r l_s}{2g} \quad (3)$$

여기서, N 는 상권선 턴수, N_f 는 고정자극당 보상권선 턴수, γ 는 각 상에 대한 회전자에의 중첩각도를 의미한다.

이 때, 보상권선의 자기인덕턴스 L_f 는 식(4)와 같다.

$$L_f(\theta) = \frac{N_f^2 \mu_0 \gamma_f(\theta) D_r l_s}{2g} \quad (4)$$

여기서, γ_f 는 전체 고정자와 회전자의 중첩각도이며 보통 6/4 SRM에서는 전체 고정자 상에 2개의 회전자 자극이 중첩된다.

이 때 고정자 a상의 자속쇄교수 λ_a 와 보상권선 f상의 자속쇄교수 λ_f 는 다음과 같다.

$$\lambda_a = L_a i_a + M i_f \quad (5)$$

$$\lambda_f = L_f i_f + M(i_a + i_b + i_c) \quad (6)$$

여기서, i_a 는 a상 권선전류, i_f 는 보상권선(f상) 전류를 나타낸다. CWSRM의 이상적인 인덕턴스 프로파일과 스위칭 전류를 그림 7에서 보여주고 있다.

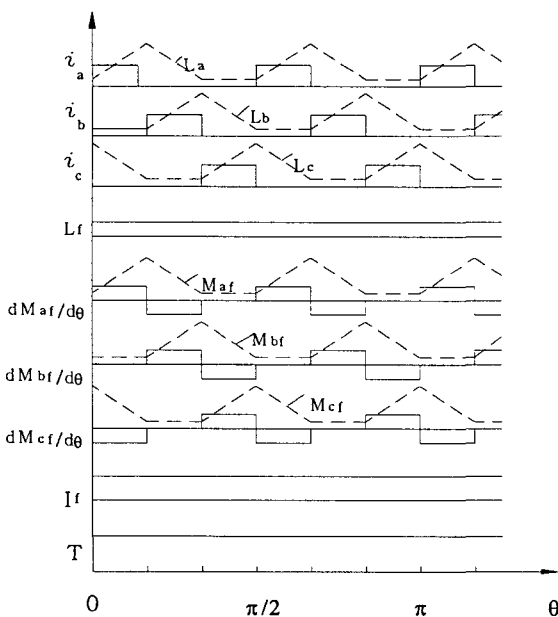


그림 7 CWSRM의 이상적인 인덕턴스 프로파일
Fig. 7 Ideal inductance profiles of CWSRM

CWSRM의 보상권선의 자기인덕턴스는 그림 7과 같이 회전자 위치각에 상관없이 항상 일정해야 한다. 그렇지 않은 경우 자기인덕턴스 L_f 와 보상권선 전류 i_f 의 변화에 의해 BLDC 전동기의 코깅토크(cogging torque)와 같은 토크가 발생하여 토크리플과 진동, 소음 측면의 동특성 저하를 초래한다. 이러한 보상권선의 자기인덕턴스를 일정하게 설계하기 위해서 고정자와 회전자의 전체 중첩된 극호각이 항상 동일해야 한다. 즉, 6/4 SRM의 경우 고정자와 회전자 중 하나가 360°/(고정자 상수×회전자 극수)의 극호각을 가지도록 설계하면 된다.

CWSRM의 a상과 f상을 예로 들면 각 권선 양단의 전압 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_a}{dt} + M_{af} \frac{di_f}{dt} + i_f \frac{dM_{af}}{dt} \quad (7)$$

$$V_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M \frac{d(i_a + i_b + i_c)}{dt} + \frac{dM}{dt} (i_a + i_b + i_c) \quad (8)$$

본 논문에서 적용된 CWSRM 시작기는 6/4 SRM으로서 보상권선의 자기인덕턴스가 일정하도록 고정자 극호각은 35°, 회전자 극호각은 30°가 되도록 표 1과 같이 설계하였다.

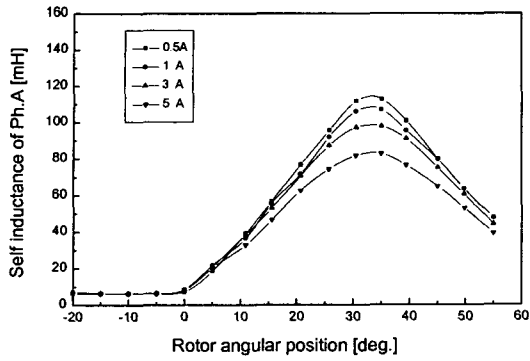
표 1 CWSRM 시작전동기의 제원
Table 1 Specification of CWSRM prototype

고정자 극수	: 6	회전자 극수	: 4
고정자 극호각	: 35°	회전자 극호각	: 30°
고정자 외경	: 220 mm	회전자 외경	: 119.3 mm
고정자 내경	: 120 mm	철심적층길이	: 90.0 mm
상당 권선수	: 144턴(선경φ1.2mm)	상당 권선저항	: 1.2 Ω
최소 상인덕턴스	: 6.5 mH	최대 상인덕턴스	: 112.7 mH
보상권선수(자극당)	: 24턴(선경φ1.2mm)	보상권선저항	: 1.0 Ω
최소 상호인덕턴스	: 10.1 mH	최대 상호인덕턴스	: 144.4 mH
보상권선 자기인덕턴스	: 13.1 mH		

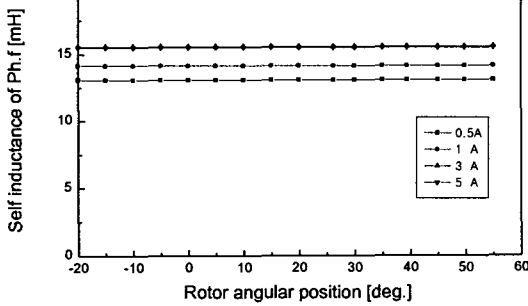
구동용 인버터는 각 상권선을 독립적으로 제어할 수 있는 클래식 인버터(classic inverter)를 적용하였다[1]. 그리고, 상권선 여자를 위한 상스위치의 턴-온 과 턴-오프 각도는 기존의 SRM에서 상전류의 확립과 소호특성을 고려하여 적정치를 설정하였다. 턴-온 각도는 상인덕턴스 증가 시작점에 대한 advance angle θ_{ad} 를 5°, 턴-온 구간인 dwell angle θ_{dw} 는 23°를 기본 스위칭 각도로 설정하였다.

CWSRM에 있어 상권선과 보상권선과의 인덕턴스 특성은 자기적인 커플링 특성을 보여주므로 각 권선의 인덕턴스를 측정하였다. 상권선의 자기인덕턴스는 교류전원을 상권선에 인가하여 각각의 전류치를 흘리면서 임피던스법으로 측정하였으며, 보조권선의 상호인덕턴스는 상권선에 교류전압을 인가할 때 보조권선 양단에 유기되는 전압을 측정하여 구하였다. 그림 8은 시작기의 인덕턴스 측정 결과를 보여주고 있다.

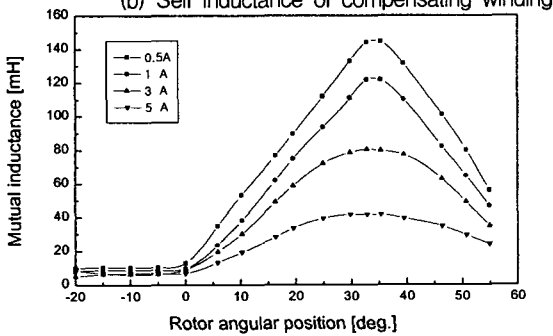
그림 8에서 상인덕턴스는 기존 SRM과 동일하며, 보상권선의 자기인덕턴스는 고정자극과 회전자극의 전체 중첩각도가 70°로 일정하므로 상수가 된다. 이 때, 보상권선과 상권



(a) Self inductance of phase winding



(b) Self inductance of compensating winding



(c) mutual inductance

그림 8 CWSRM의 인덕턴스 프로파일

Fig. 8 Inductance profiles of CWSRM

선간의 상호인덕턴스는 상권선의 자기인덕턴스와 동일한 형상으로 변화하게 된다.

CWSRM의 토오크는 그림 7, 8과 같은 구동원리에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다. 식(9)에서 우변의 1항은 기존 SRM의 톨러턴스 토오크이며, 2항은 보상권선전류 i_f 와 상호인덕턴스의 변화에 의한 토오크를 나타낸다.

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + i_a i_f \frac{dM_{af}}{d\theta} \quad (9)$$

CWSRM에서는 하나의 고정자 상권선에 전류가 인가되어 자속이 발생할 때 그 상에 감긴 보상권선의 상호인덕턴스는 상인덕턴스의 변화와 동일한 극성으로 변화한다. 이 때, 상인덕턴스와 상호인덕턴스에 의한 토오크 방향이 일치하기 위해서는 상전류와 보상권선의 전류가 그림 6에 표기된 방향과 일치해야 한다.

3.3 보상권선의 전압 및 전류특성

상권선과 보상권선은 자기적으로 결합되어 있으므로 상권선에서의 전자기적 변화가 보상권선에 영향을 주게 되어 유기전압을 형성하게 된다. 이 때의 유기전압 파형은 그림 9와 같다.

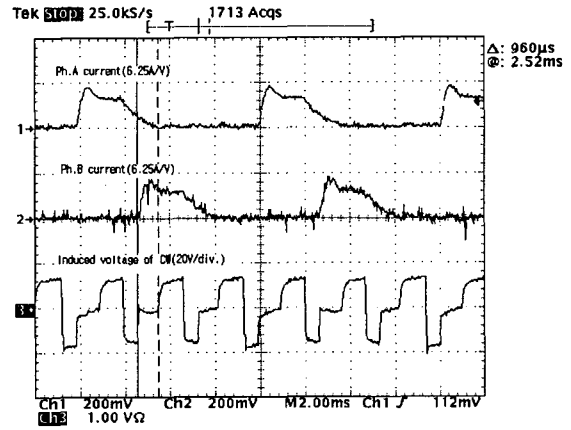


그림 9 보상권선의 유기전압

Fig. 9 Induced voltage of compensating winding

즉, 그림 9와 같이 상전류가 흘러 자속 쇄교량이 증가하면 보상권선 양단은 정(positive)전압이 유기된다. 또한, 상스위치가 턴-오프되면 프리휠링 다이오드에 의해 상전류가 소호되면서 자속이 감소하여 보상권선 양단에 역(negative)전압이 유기된다.

3.4 CWSRM의 구동회로 및 동작모드

본 논문에서는 보상권선을 활용 방안의 하나로써 경제적 이면서도 효과적인 다이오드만을 활용한 그림 10과 같은 단방향 단락(unidirectional short) 방식을 제안하고자 한다.

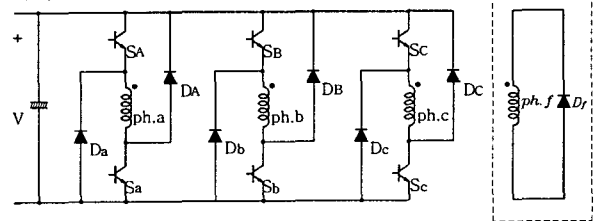


그림 10 보상권선의 단방향 단락회로

Fig. 10 Unidirectional short circuit of compensating winding

이 방법은 보상권선에 별도의 제어전원을 추가하지 않고, 보상권선을 단지 다이오드만으로 된 회로로 이를 단락시킴으로써 저진동, 저소음의 효과를 가져올 수 있다. 즉, 상전류 인가시 보상권선에 유도되는 부토오크방향 전류를 보상권선에 연결된 다이오드에 차단할 수 있도록 단방향 단락(unidirectional short)회로를 구성한다.

그림 10의 회로에서 상권선의 턴 온, 오프에 따른 자속변화는 곧바로 보상권선에 전압을 유기시킨다. 이때의 동작모드는 그림 11과 같이 나타낼 수 있다.

그림 11에서 (a)는 상권선이 턴-온되어 상전류가 통전되

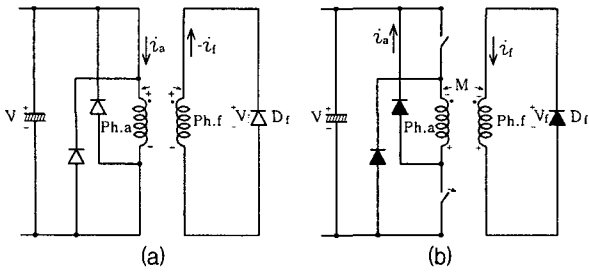


그림 11 상권선과 보상권선의 상호 작용
Fig. 11 Mutual action of phase and compensating winding

는 구간의 동작모드이며, (b)는 상권선이 턴-오프되어 상전류가 소호되는 구간의 동작모드를 보여주고 있다.

그림 12는 그림 11의 동작모드에 대한 상권선과 보상권선의 전류파형을 나타낸 그림으로서 각 구간에 대해 살펴보면 다음과 같다.

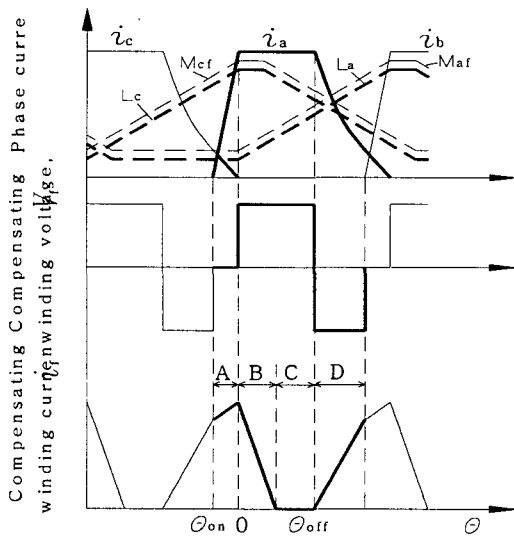


그림 12 단방향 단락시의 전류파형
Fig. 12 Current waveform of unidirectional short

1) A구간 : 상전류 확립구간($\theta_{on} \sim 0$)

상인덕턴스와 상호인덕턴스가 일정한 구간으로서 상전류 확립을 위해 미리 턴-온을 행하며, a상 이전에 여자되었던 c상이 턴-오프되면서 잔류에너지가 보상권선 f상으로 흡수되는 구간이다. 이 때 상권선의 전압 방정식은 식(7)에 의해

$$V = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_f}{dt} \quad (10)$$

이 된다. 여기서 상자속의 증가로 인해 보상권선에 전류가 유도되지만 그 방향이 c상 소호시 유도된 보상권선 전류와 반대 방향이므로 그림 12와 같이 보상권선 전류 i_f 가 감소하므로 $M \frac{di_f}{dt}$ 는 음의 성분이 된다.

또한, 보상권선 양단의 전압방정식은 식(8)에서 그림 12와 같이 아직 i_f 가 다이오드 Df를 통해 통전하고 있으며 상호인덕턴스 M이 일정하므로 $\frac{dM}{dt}$ 이 0이 되므로 아래와 같이 정리된다.

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M \left(\frac{di_a}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right) \approx 0 \quad (11)$$

그림 9와 같이 2상의 전류가 소호 및 확립되면서 중첩되는 구간에는 보상권선의 유기전압이 거의 0이 된다. 즉, 식

(11)에서 확립되는 a상의 전류증가분 $\frac{di_a}{dt}$ 는 양의 값이며 상인덕턴스가 작은 영역이기 때문에 상대적으로 상인덕턴스가 큰 c상의 전류감소분인 $\frac{di_c}{dt}$ 보다 그 값이 크다.

즉, 식(11)의 전압등식을 성립시키기 위해서 기존방식에 비해 c상의 소호전압이 $\frac{di_a}{dt}$ 만큼 증가하므로 c상 전류의 소호시간이 단축된다. 다시 말하면, 보상권선에 의한 상호인덕턴스 성분이 이전에 턴-오프된 c상 권선의 잔류에너지를 흡수하여 다음 턴-온되는 a상 권선으로 전달하는 메커니즘을 형성하게 된다.

2) B~C 구간 : 토크 발생구간($0 \sim \theta_{off}$)

이 구간에서는 상인덕턴스와 상호인덕턴스가 증가하게 된다. 그러므로, 보상권선의 전압식은 식(11)에 상호인덕턴스 변화분이 추가되어

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dM}{dt} > 0 \quad (12)$$

이 된다. 이 때 a상의 전류 및 자속증가에 의해 보상권선에 그림 11(a)와 그림 12와 같이 유기전압이 형성되어 A구간의 보상전류는 점점 감소하여 C구간에서는 다이오드 Df에 의해 보상권선전류 i_f 는 차단된다. 보상권선의 다이오드 Df는 부토크를 만들 수 있는 역방향 보상권선 전류를 차단함으로써 동특성의 저하를 방지한다.

3) D구간 : 상전류 소호구간(θ_{off} 이후)

이 구간에서는 a상의 스위치를 턴-오프하면 a상 양단 전압의 극성이 반대로 되면서 축적된 자기에너지를 프리휠링 루프를 통해 직류링크단으로 회수하게 된다. 이 때 a상의 급격한 자속감소를 억제하기 위해 그림 11의 (b)와 그림 12와 같이 보상권선에 역전압이 유기되고 보상권선전류는 상호토크의 정토크 방향으로 증가하게 된다. 이 때의 보상권선 양단의 전압 방정식은 식(13)과 같다.

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dM}{dt} = 0 \quad (13)$$

위 식에서 $M \frac{di_a}{dt}$ 는 음의 값을 가지며 급속한 상전류 i_a 의 감소에 의해 $i_a \frac{dM}{dt}$ 보다 그 값이 크기 때문에 보상권선 전류 i_f 가 정토크 방향으로 증가하며 다이오드 Df가 도통되므로 V_f 는 0이 된다.

이 때 상권선에 인가되는 감자전압은 식(7)에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-(V + M \frac{di_f}{dt} + i_f \frac{dM}{dt} + i_a \frac{dL_a}{dt}) = L_a \frac{di_a}{dt} \quad (14)$$

위 식에서 기존방식에 비해 $M \frac{di_f}{dt} + i_f \frac{dM}{dt}$ 만큼의 감자전압이 증가하게 되므로 상전류의 소호가 빨리 이루어진다.

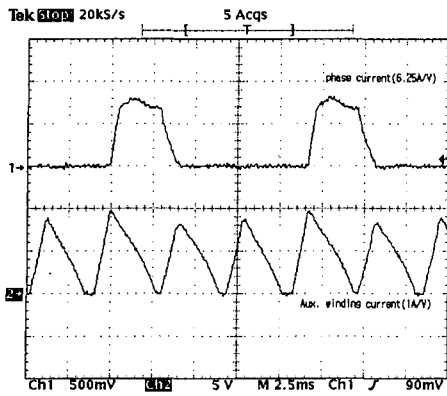


그림 13 보상권선의 단방향 단락시의 전류파형
Fig. 13 Current waveforms of unidirectional short circuit

보상권선의 단방향 단락시의 상전류와 보상권선전류의 파형을 그림 13에서 보여주고 있다.

그림 13에서 토오크 발생구간에서 보상권선전류가 정방향으로 통전되다가 상권선에 의한 반대방향의 유기전압에 의해 점차 감소하여 0이 되며, 부토포크를 발생시키는 역방향 전류는 흐르지 않는다. 그리고 상전류의 소호시 보상권선전류가 다시 증가함을 알 수 있다.

또한, 보상권선 활용에 의한 상전류 소호의 촉진효과를 측정한 결과를 그림 14에서 보여주고 있으며, 소호시간이 1/3 정도 단축됨을 알 수 있다.

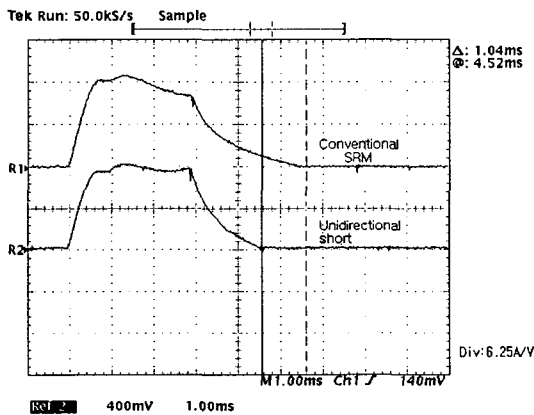


그림 14 상전류 파형의 비교
Fig. 14 Comparison of phase current

이러한 메커니즘에 의해 상전류 소호시의 상자속 및 반경방향 전자력의 급격한 변화를 보상권선이 흡수하여 상호인덕턴스에 토오크 발생 및 반경방향 전자력의 보상으로 토오크리플과 고정자의 진동을 억제할 수 있다.

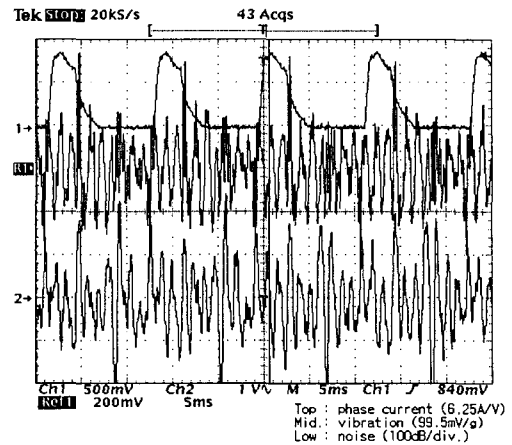
또한 상전류 소호시간이 단축된 만큼 상전류를 넓은 구간 동안 도통시킬 수 있고 이에 비례해 출력이 증가하므로 출력이 증대될 수 있다.

4. 보상권선형 SRM의 진동, 소음 저감 특성

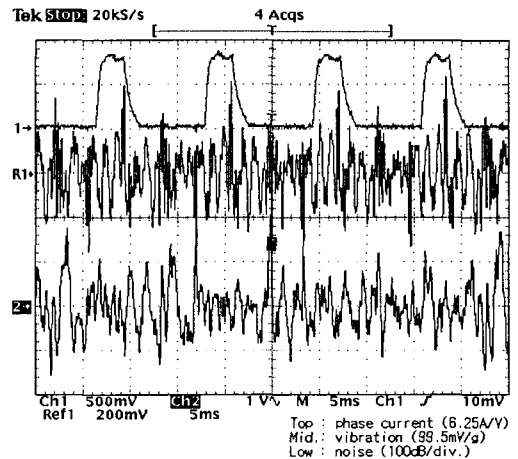
4.1 단방향 단락시의 순시 진동, 소음 특성

CWSRM의 보상권선을 단방향 단락한 경우의 진동, 소음

의 특성을 측정하여 기존의 SRM과 비교, 해석한 결과는 그림 15부터 그림 17과 같다.

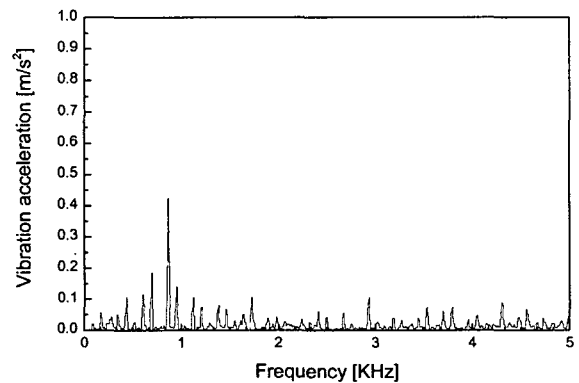


(a) Conventional SRM



(b) CWSRM

그림 15 상전류와 진동 및 소음 특성(1300rpm)
Fig. 15 The characteristics of phase current, vibration and acoustic noises(1300rpm)



(a) Conventional SRM

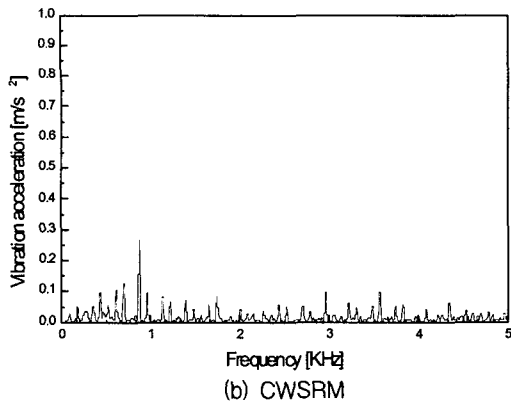
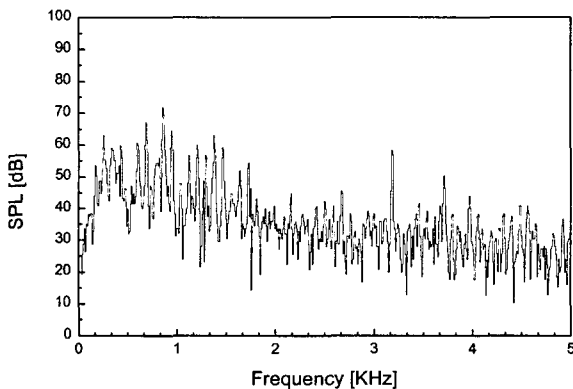
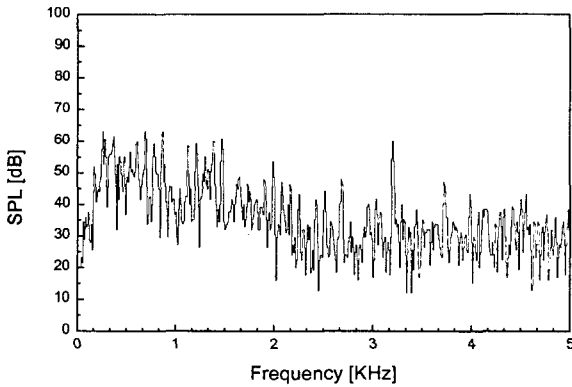


그림 16 진동특성 비교(1300rpm)
Fig. 16 The comparison of vibration characteristics (1300rpm)



(a) conventional SRM



(b) CWSRM

그림 17 소음동특성 비교(1300rpm)
Fig. 17 The comparison of noise characteristics (1300rpm)

먼저, 그림 15에서는 상전류 파형에 대한 진동 및 소음의 순시 특성을 보여주고 있다. 제안된 CWSRM에서는 기존 SRM에 비해 상전류 소호시의 진동과 소음이 현격히 저감됨을 알 수 있다. 또한 상전류 소호시간도 보상권선의 잔류 자기에너지 흡수에 의해 짧아짐을 알 수 있다.

그림 16에서 진동특성을 주파수별로 분석해보면 그림 6에서 언급된 900Hz 부근의 방사방향인 진동모드인 2차 고유 모드의 진동이 눈에 띄게 저감되었음을 알 수 있다. 즉, 상

전류의 소호시 발생되는 주된 진동원이 억제되었기 때문이다. 이러한 진동 저감에 의해 그림 17에서와 같이 소음도 저감됨을 알 수 있으며 2차 모드인 900Hz 근방에서는 약 7dB 정도 감소되었다.

4.2 진동, 소음 및 운전 특성 비교

부하 출력과 속도에 따라 전자기적 힘이 변하므로 진동 및 소음의 특성도 여러 측면에서 많은 영향을 받게 된다. 그래서 일정 토오크 및 일정 속도의 조건에서 출력 조건을 가변시키면서 진동, 소음 특성을 비교 분석하였다.

먼저, 그림 18에서는 1,300rpm의 일정 속도 조건에서 부하 토오크를 가변시키면서 제안된 방식과 기존 방식의 진동 및 소음의 특성을 비교하였다.

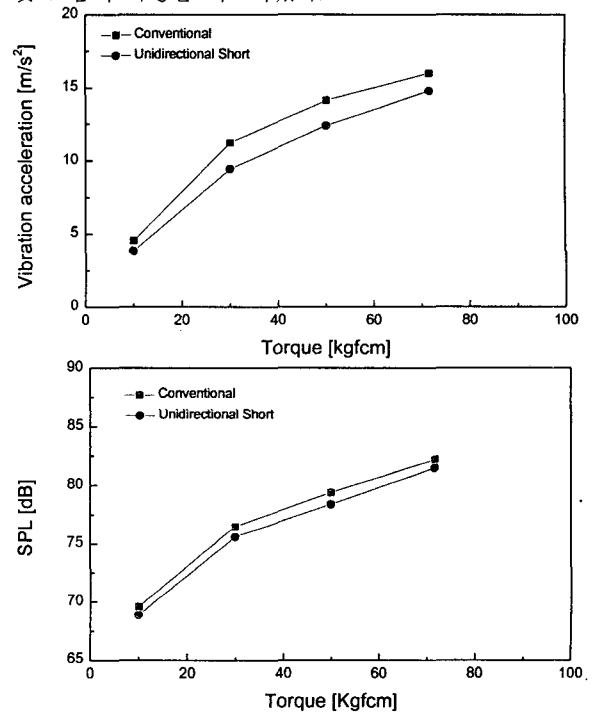


그림 18 부하 토오크에 따른 진동 및 소음 (1,300rpm)
Fig. 18 Vibration and acoustic noise according to load torque (1,300rpm)

그림 18의 실험 결과에서 볼 수 있듯이 부하 토오크의 증감하여도 제안된 CWSRM에서는 진동 및 소음이 기존 방식에 비해 저감됨을 알 수 있다.

또한, 그림 19는 부하 토오크를 50[kgfcm]로 고정된 상태에서 운전속도를 가변시키면서 이 때의 진동 및 소음특성을 비교하였다.

기존의 SRM 구동방식에 비하여 진동은 고속도 영역에서 현저한 저감효과가 있으며, 소음특성은 전 속도영역에서 현저하게 감소함을 알 수 있었다.

여기에서 이를 고찰해 보면 다음과 같다.

(1) 동일 부하 토오크에서 저속도 영역은, 가진주파수가 낮으므로 고정자 프레임의 방사방향의 2차 고유주파수와 차이가 크므로 이를 가진시키는 힘이 작아 진동과 소음이 낮다. 이 때는 보상권선에 의한 진동, 소음의 저감효과는 상대적으로 작다.

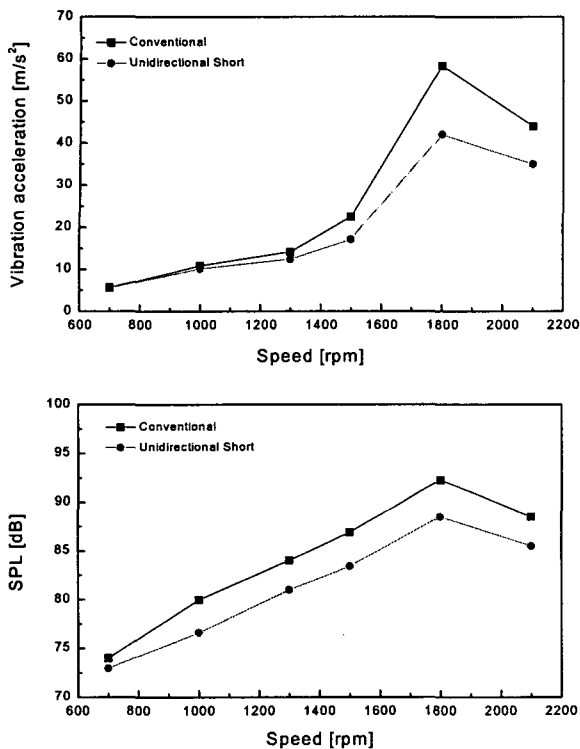


그림 19 속도에 따른 진동, 소음특성 (50kgfcm)
 Fig. 19 Vibration and acoustic noise according to speed (50kgfcm)

(2) 속도가 증가할수록 가진 주파수와 2차 고유진동 주파수와의 배수차가 작게 나타나서 가진력의 영향도가 높아지므로 진동, 소음이 커진다. 이 때 보상권선에 의한 진동, 소음의 저감효과는 더욱 커진다.

(3) 공진구간인 1800rpm에서는 보상권선에 의한 시스템의 안정화 효과가 크게 작용하여 시스템 공진이 억제되며 이로 인해 5[dB] 정도 소음이 감소하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 SRM의 진동, 소음을 저감시키기 위해 보상권선을 부가 적용한 보상권선형 SRM을 제시하였다.

보상권선형 SRM에서는 상전류 소호시 상권선과 보상권선과의 자기적 상호작용에 의해 상권선에 인가되는 감자전압이 증가하게 되어 상전류의 소호시간이 1/3정도 단축된다. 그러므로 상전류 통전구간을 확장함으로써 실제 출력구간이 넓혀져 전동기의 출력을 증대시킬 수 있다.

보상권선에서의 제어방법 중에서 단방향 단락방법을 경제적이며 효과적인 방법으로 제안하였다. 이 방법에 의해 상전류 소호시 상권선의 잔류 자기에너지가 보상권선에 흡수되면서 상호인덕턴스에 의한 토오크가 발생하는 동시에 방사방향 전자력의 변화를 흡수, 완화함으로써 SRM의 진동, 소음이 저감됨을 확인하였다.

실제 측정된 진동 및 소음특성의 주파수 스펙트럼에서 주된 진동, 소음원인 900[Hz]의 대역의 방사방향 진동성분이 확연히 저감됨을 확인하였다.

본 논문에서 제안된 CWSRM은 SRM의 진동, 소음을 위한 기술안이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] P.J.Lawrenson et al. ; "Discussion on Variable speed switched reluctance motor systems," Proc. IEE, Vol. 128, Pt.B, No.5, pp.260-268, 1981.
- [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] R.S.Colly, F.Mottier and T.J.E.Miller ; "Vibration Modes and Acoustic Noise in 4-Phase Switched Reluctance Motor," IEEE IAS Annual Meeting, Orlando, Florida, Vol.1, pp.441-447, 1995.
- [4] 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.
- [5] T.A.Lipo, F.Liang and T.Liao ; "A New Variable Reluctance Motor Utilizing an Auxiliary Commutation Winding," IEEE Trans. on IA, Vol.30, No.2, pp.423-432, 1994.
- [6] Yue.Li, Jerry D.Lloyd and Gary E.Horst ; "Switched Reluctance Motor with DC Assisted Excitation", Proc. of IEEE, pp.801-807, 1996.
- [7] P.P.Acarnley ; "Analysis and Improvement of the Steady-state Performance of Variable reluctance Stepping Motors", Ph.D. Thesis, University of Leeds, 1977.

저 자 소 개



정 태 옥(鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 졸업(공학석사). 1999년 동대학원 졸업(공학박사). 현재 LG전자 DA연구소 책임연구원. Tel : 055-260-3834,

Fax : 055-260-3507

E-mail : tujung@lge.com