

자기동조 이론을 이용한 SRM의 진동소음 특성개선

정승주*, 여진기, 오인석, 성세진
 충남대학교 전기공학과

An Improvement of SRM Vibration by using of Self-Tuning Control

Seung-Ju Jeong, Jin-Ki Yeo, In-Seok Oh, Se-Jin Seong
 ChungNam National University

Abstract

A Switched Reluctance Motor(SRM) has a torque pulsating inherently due to characteristics of pulse driving. A torque pulsating causes noise and sound vibration. To reduce a noise, a torque pulsating shall be controlled. Many efforts to make flat-topped current has been proposed to minimize a torque pulsating up to now.

This paper proposed a control scheme to minimize the vibration of SRM by controlling the vibration directly by using of self-tuning technique. The experimental results show that the proposed control scheme is effective in reducing the torque ripple and noise.

1. 서론

스위치드 릴럭턴스 전동기는 최근 전력전자 기술의 발전으로 효과적인 스위칭 입력에 의하여 고속, 고정도의 가변속 제어가 가능하게 되어 이미 항공기의 가스터빈 엔진의 주변기기 및 차량구동용 전동기로서 실용화 되고 있고 그의 여러 산업분야에 응용하기 위해 주목받고 있다. 그러나 SRM은 구조가 간단하고 견고하며, 속도범위가 넓고 고속특성과 정,역 회전특성이 우수하며, 또한 각상의 분리로 단락사고(shoot through fault)에 대한 염려가 없는 등 지금까지 밝혀진 여러가지 장점에도 불구하고 펄스 전원에 의해 구동되는 SRM의 특성에 의해 본질적으로 토오크의 맥동에 의해 야기되는 소음과 진동으로 실제 응용영역에 제약을 많이 받고 있다.

지금까지는 소음과 진동저감에 대한 대책으로 속도

및 가변부하에 따라 우선 평활전류(flat-top current)을 만들어 토오크의 맥동을 최소화하는 방법으로 소음과 진동을 감소시키는 방법에 대해 간접적인 방법으로 대안이 제시되어 왔다. 본 논문에서는 간단한 진동소자 및 자기동조 제어기법을 이용하여 직접적으로 전동기의 진동을 최소화하고 그 결과로 토오크를 최대화하여 SRM의 고효율 구동을 위한 방식을 제안하였다.

본 방식은 6/4 SRM에서 광범위한 속도 및 출력범위에서 실험을 통하여 전동기의 고효율 운전이 가능함을 입증하였다.

2. 상전류와 토오크

SRM 현상의 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_{dc} = R_e i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (2)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{di}{d\theta} \omega \quad (3)$$

식(2), (3)을 식(1)에 대입하면,

$$V_{dc} = R_e i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} \omega + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (4)$$

여기서,

- V_{dc} : DC인가전압.
- R_e : 고정자 권선저항 및 스위치저항의 합
- $L(\theta, i)$: 인덕턴스
- i : 여자상의 순시전류
- i' : 앞상의 여자 순시전류
- θ : 고정자와 회전자의 상대위치
- ω : 회전자의 회전 각속도.

또한 회전자에 의해 발생하는 토크는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta}$$

$$T(\theta, i) = K_1 \frac{i^2}{2} \quad (5)$$

단, $L(\theta, i)$: 고정자와 회전자간의 인덕턴스
 K_1 : $\frac{dL(\theta, i)}{d\theta}$ (인덕턴스 변화분)

식(5)에서 보는 바와 같이 전동기의 발생토크는 자기회로의 비선형성을 무시하면 전류의 제곱과 인덕턴스의 변화분으로 표현되며, 토크의 발생이 없는 전동기 영역으로만 사용하기 위해서는 인덕턴스가 증가하는 영역에서 전류를 흘려야 한다. 정속도 구동시 인덕턴스의 변화분이 일정한 영역에서는 토크는 전류의 제곱에 비례하므로 전류의 변화분이 토크의 맥동에 직접적으로 영향을 준다. 그러므로 토크의 방향은 상전류의 방향에 관계없이 인덕턴스 프로필에 의해 정해지며 그 크기는 전류의 크기와 인덕턴스변화율에 의해 정해진다. 즉 제어 파라미터는 주어진 인덕턴스 프로필에서는 상전류 또는 전압의 크기와 위상에 의해 정해진다. 그러므로 요구 토크에 대한 전압 또는 전류크기와 위상을 구해야 할 것이다. 일반적으로 전류의 크기는 전류제한기를 사용하여 상전류를 제어하나 각 상마다 전류초평을 행하는 것보다 전원단에서 고속초평하여 전압을 조정하는 제어를 행하는 것이 맥동토크 저감이나 손실저감에 효과적이다.

그러므로 본 연구에서는 DC링 전압단에서 고속초평으로 전압의 크기를 조정하고 상스위치는 토크 맥동이 작아지는 자기동조방식에 의해 온, 오프만 행하도록 설계한다.

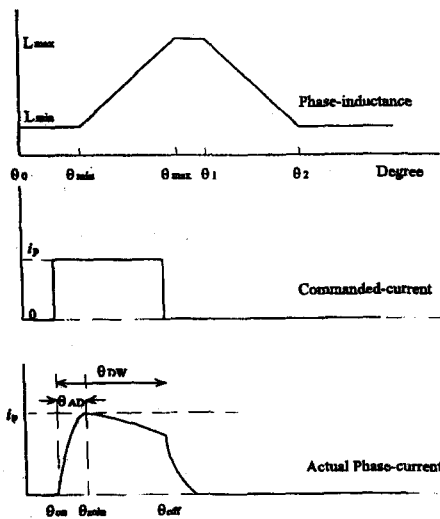


그림 1. (a) SRM 인덕턴스profile
 (b) 전류 on,off 지령치 및 전류파형(예)

실제의 스위칭 여자를 할 때의 스위칭에 의한 상전류는 그림1과 같이 나타난다. 그림1의 회전자 위치각의 각 구간에 대한 동작 특성을 살펴보면 다음과 같다.

($\theta_0 \sim \theta_{min}$): 최소 인덕턴스 구간으로서 충분한 전류의 확립을 위하여 이 구간에서 switch-on을 행한다.
 ($\theta_{on} \sim \theta_{min}$): 권선에 전원을 인가하여 magnetizing하는 구간이며 이 각도는 Advance각도, θ_{AD} 이다. 전류파형은 전동기의 회전속도, 인가전압, 권선저항, θ_{AD} 로서 결정된다. Switch-on은 항상 θ_{min} 에 앞서 θ_{on} 에서 행한다.

3. 시스템 구성

(가) 회전체 진동에 대한 고찰

SRM의 경우에서도 전동기가 회전하게 될 때 그림과 같이 축방향 Z축과 반지름방향 X와 Y축 방향으로 발생하는 진동의 성분을 검출하여 분석할 수있으며 진동의 크기와 방향을 그림과 같이 벡터적으로 도출시킬 수있다. 여기서 축방향 Z축은 X와 Y축 방향에 비해 상대적으로 진동이 작다는 것을 살펴볼 수있으며, Z축 방향을 무시할 때 X와 Y축 방향의 진동의 크기를 벡터적으로 합성한 크기와 방향이 직접적인 진동의 크기와 방향으로 인식될 수 있다.

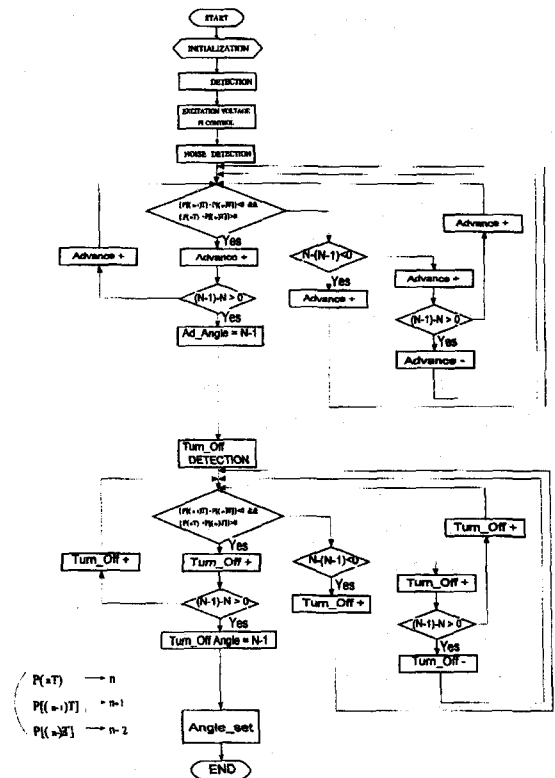


그림2. 자기동조제어(Self Tuning Control) 흐름도

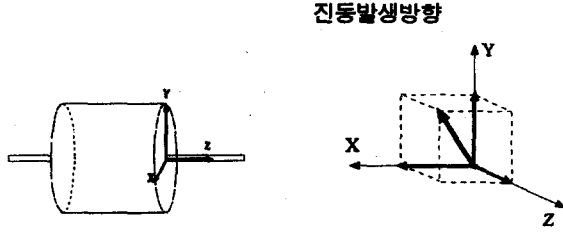


그림3(a).전동기진동발생방향 그림3(b). 진동벡터해석

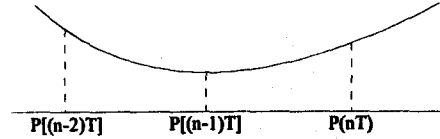


그림 5. 진동가속도 평균치 파형(예)

$$\{P[(n-1)T]-P[(n-2)T] < 0 \text{ -----(6)}$$

$$\{P[(n-1)T]-P[(n-2)T] > 0 \text{ -----(7)}$$

$$\{P[(n-1)T]-P[(n-2)T] < 0 \ \&\&$$

$$\{P[nT]-P[(n-1)T] > 0 \text{ -----(8)}$$

(나) 시스템 구성

본 논문에서 제안한 시스템의 블록도는 그림4와 같다. 우선 부하에서 요구하는 가변속도 및 출력부하는 인버터 전단에 위치하는 Buck Converter의 전압을 통하여 제어된다.

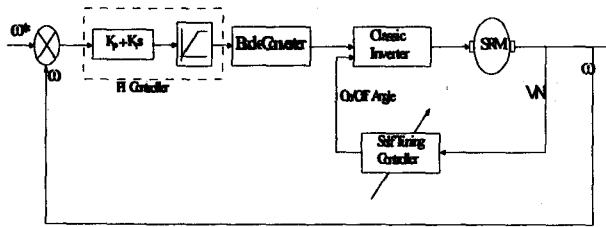


그림 4. 시스템 블록도

전동기 속도 및 부하의 요구에 따라 충분한 부하전류 및 부 토크 방지를 위해 개략적으로 선정된 Advanced 각과 턴 오프 각도에 종속적으로 흐르는 SRM 전류는 전동기의 진동이 가장 적은 방향으로 턴 온각과 턴 오프각이 자기동조 된다.

진동소음을 최소화하는 턴온각 및 턴 오프각의 조정은 전동기의 외형에 부착한 진동센스로 부터 받은 진동변위를 그림3과 같은 형태로 나타나는 가속도 함수의 실효치로 변환한다. 이 진동변위의 가속도 실효치를 통해 1차적으로 현재 턴은 시점의 크기와 과거시점의 크기에 대한 가변속 비교를 통해 자동적으로 진동이 가장 적어지는 부분으로 식(6)과 같이 Advanced 각도를 증가시키는 조건 및 (7)과 같이 Advanced 각도를 감소시키는 조건에 따라 턴 온각의 Advanced 각이 자동으로 제어된다. 그리고 식(8)과 같은 조건의 만족여부에 따라 Advanced 각도의 계속 조정 및 완료의 상태를 인지한다.

이 식(8)의 조건이 만족되면 턴 오프각의 조정모드로 전환되어 역시 식(6) 및 (7)와 같은 조건하에서 자동제어된다.

그리고 Advanced 각의 조정과 턴 오프 각의 조정으로 매 주기마다 전류가 도통되는 도통각(dwell angle)이 달라지므로 다시 Buck Converter의 전압제어가 이루어진다. 따라서 이러한 제어방식은 어떤 요구되는 부하나 속도에서도 Buck Converter의 전압, Advanced 각의 조정과 턴 오프 각의 제어가 이루어져 전동기의 진동을 최소화하고 토크의 효율을 극대화 할 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 제안한 전동기의 진동을 직접 검출하여 Advanced 각과 턴 오프각을 자동적으로 자기동조(self-tuning)하여 모터의 진동을 최소화하고 토크의 효율을 극대화 할 수 있는 것을 실험적으로 검증하였다. 그림6(a)는 자기동조 하지않고 전동기 속도 1820rpm에서 회전시켰을 때 X축의 전류파형과 순시진동파형이다. 그림6.(b)는 자기동조제어를 하지않은 축방향 Z축의 진동파형이다.

또한 그림 7(a)는 진동이 최소화 되도록 Advanced 각과 턴 오프각이 자기동조 된 전동기의 반지름 방향인 X축 전류파형과 그때의 순시진동파형이며 그림 7(b)는 전동기의 축방향인 Z축의 순시진동파형과 전류파형을 나타낸다.

그리고 그림 8은 3250rpm 회전시 전동기의 진동파형과 전류파형을 보여주며 회전속도가 증가함에 따라 전동기의 진동도 증가함을 보여주고 있다.

결과적으로 자기동조 되어 전동기의 진동이 최소화 되었을때의 전동기의 전류파형은 거의 평활전류가 됨을 확인할 수 있었고, 따라서 전동기 진동의 주 원인이 전류파형의 찌그러짐에서 기인하는 토크 맥동임을 실험적으로 파악할 수 있었다.

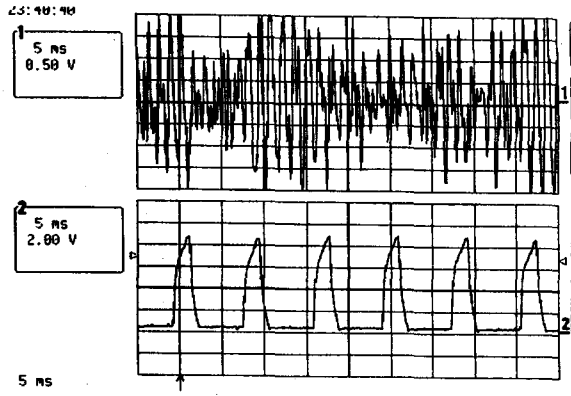


그림 6.(a) 자기동조하지않을 때 1820rpm운전시: X축
 1). 순시진동 파형
 2). 전류파형(A/V)

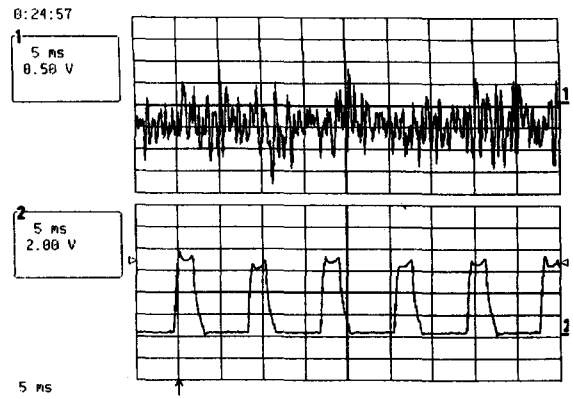


그림 7.(b). 자기동조제어 1820rpm 운전시: Z축
 1). 순시진동 파형
 2). 전류파형

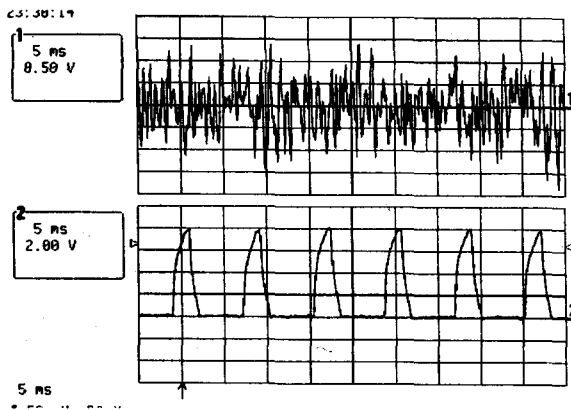


그림 6.(b). 자기동조하지않을 때 1820rpm운전시: Z축
 1). 순시진동 파형
 2). 전류파형

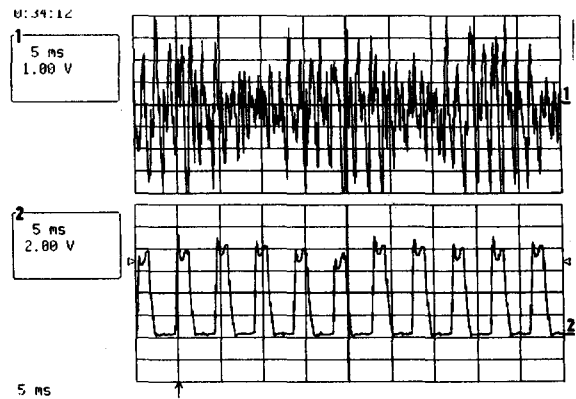


그림 8. 자기동조제어 3250rpm 운전시: X축
 1). 순시진동 파형
 2). 전류파형

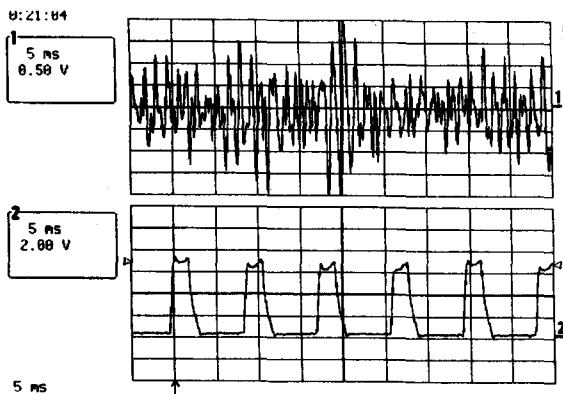


그림 7.(a). 자기동조제어 1820rpm 운전시: X축
 1). 순시진동 파형
 2). 전류파형

5. 결론

시작기의 구동실험에 의해 진동소음을 측정된 결과에 의하면 SRM은 스위칭시마다 반지름방향으로 자기적 흡착력이 발생하므로 반지름방향의 진동이 크게 발생하며 축방향의 진동은 이에 비해 상대적으로 작음을 확인하였다. 그리고, 이러한 진동소음은 속도와도 관련이 있으며 동일 부하토크에서 속도가 높아짐에 따라 진동소음이 증가함을 알 수 있었다.

이러한 진동소음을 저감시키기 위해 본 연구에서는 자기동조(Self-Tuning)제어에 의해 전동기에 부착된 진동센서로부터 검출한 진동파형의 평균치가 작아지도

록 Advance각도와 최적의 전류파형이 도출되었고 전 동기의 진동소음을 감소시킬 수 있었다.

또한 SRM의 가변속제어에 있어 최적의 전류파형으로 일컬어지는 평활전류(flat-top current)를 형성하는 스위칭각은 속도에 따라 일정하지 않기 때문에 평활전류를 위한 스위칭각도 제어가 별도로 필요하다. 본 연구에서의 자기동조제어는 진동소음의 최소화를 위한 Advance각도와 Turn_Off각의 자동조정에 의해 부가적으로 가변속도에 대해서 평활전류를 도출할 수 있었다.

본 연구에서의 자기동조제어방법에 의해 복잡한 연산제어루프나 보상기가 없이도 스위칭각의 자동조정에 의해 진동소음을 저감시킬 수 있을 뿐만아니라 동시에 고효율특성을 갖는 최적의 평활전류파형에 의해 운전되므로 효율향상을 가져올 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Katsuhisa Furuta "VSS Type Self-Tuning Control" IEEE Trans. Industrial.Electronics, vol 40, No.1, 2. 1993
- [2] Modal Analysis : Theory Measurements and Applications, 8.19-23, 1991. KAIST NOVIC
- [3] Mehdi Moallem, Chee-Mun Ong, Lewis E. Unnewehr, "Effect of Rotor Profiles on the Torque of a Switched-Reluctance Motor" IEEE Trans. on Ind.Appl., vol 40, No.2, 3. 1992
- [4] Mehrdad Ehasani, Iqbal Husain, Ashok B. Kulkarni, "Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched Reluctance Motor Drives" IEEE Trans. on Ind.Appl., vol 28, No1, 1. 1992
- [5] P.J.Lawrenson, D.Sc., J.M.Stephenson, P. T. Blenkinsop, J.Corda, N.N.Fulton , "Variable-speed switched reluctance motors" IEE PROC., Vol. 127, Pt. B, No.4, JULY 1980