

HDD 스피들 모터의 초기 구동 제어에 관한 연구

A Study on the Start-up Control for HDD Spindle Motors

정 준†

Jun Jeong

(2008년 8월 22일 접수 ; 2008년 10월 10일 심사완료)

Key Words : Start-up(초기 구동, 시동), Spindle Motor(스핀들 모터), HDD(하드 디스크 드라이브), BLDC 모터 (브러시리스 DC 모터)

ABSTRACT

A HDD adopts a sensorless brushless DC(BLDC) motor as a spindle motor. Because there is no direct sensor measuring rotor position, open loop commutations with inductive sensing are used to increase the rotor speed up to a certain speed where the zero crossings of the back electromotive force(EMF) voltage are measurable. Therefore, successful open loop commutations are necessary for the stable start-up control of the spindle motors. In this paper, the time scale and the number of the open loop commutations are employed for design parameters to guarantee robustness to torque constant variation and initial rotor position. The design results are verified by experiments on a very low current start-up of the spindle motor with various environment. The experimental results show that the design results can decrease the start-up failure rate considerably.

1. 서 론

최근 하드 디스크 드라이브(HDD)의 용량이 기하급수적으로 증가됨에 따라 HDD 폼팩터와 사용 용도도 다양해지고 있다. 2.5인치 이하의 HDD는 노트북, MP3플레이어, 외장 케이스 이용 백업 장치와 같이 휴대용 저장기기에 주로 사용되고 있다. 이중 USB를 이용하는 외장형 백업 장치는 2.5인치 HDD의 가격 하락과 용량 증가로 인해 광디스크를 대신하는 고용량 백업 장치로 인기가 높아졌다. 그런데 이 장치 대부분은 자체 회로와 HDD에 사용되는 전력을 별도의 전원장치 없이 스펙상 전압이 5V이고, 허용 전류가 500 mA 또는 1A인 USB 포트 전원을 그대로 사용하고 있다. 수년전까지만 해도 2.5인치 HDD의 최대 사용 전류는 1A 정도였기 때문에 이러

한 외장 장치를 USB 포트에 연결하는 순간, USB 포트의 전력 부족으로 인해 동작이 제대로 안 되는 경우가 흔히 발생했다. 따라서 최근 HDD 업체는 이러한 장치에서도 안정적으로 HDD를 동작시키기 위해 최대 사용 전류를 800 mA 이하로 줄여왔다. 하지만 아직까지 노트북 PC와 같이 500 mA 이하의 전류를 사용하도록 되어 있는 USB 포트에 이러한 장치를 연결할 경우에는 여전히 문제가 발생할 여지가 있다.

HDD 동작 중에서 전류를 가장 많이 소비하는 동작은 정지 상태의 스피들 모터를 데이터의 기록/재생이 가능한 속도까지 끌어올리는 스타트-업 동작이다. 2.5인치 HDD에서 기록/재생 동작이나 탐색 동작은 약 400 mA 이하의 전류를 사용하는데 반해 스타트-업 동작은 스피들 모터에만 600 mA 정도나 되는 전류를 사용한다. 그 이유는 낮은 전류로는 스피들 모터로 사용되는 센서리스(sensorless) 브러시리스 DC 모터(BLDC)의 초기 구동이 한 번의 시도 로 성공하는 확률이 낮아져 재시도를 하는 경우가

† 교신저자 : 정희원, 동양공업전문대학
E-mail : junjeong@dongyang.ac.kr
Tel : (02)2610-5242, Fax : (02)2610-1852

많아지고, 이에 따라 전원 투입 직후 또는 전력저감 모드에서 기록/재생이 가능한 상태까지의 시간인 준비시간(ready time)이 길어져 문제가 될 수 있기 때문이다.

HDD 스핀들 시스템에서는 센서의 장착 문제와 비용 문제로 회전자 위치 검출 센서가 없는 브러시리스 DC 모터를 사용한다. 별도의 센서는 없지만 U, V, W의 삼상 중 두 상에만 전력을 공급해서 모터를 회전시키므로 나머지 한 상의 역기전압 0점 교차점을 이용해 회전자의 위치를 검출하여 정류(commutation)의 순서를 바꿔감으로써 회전자를 회전시킨다. 그러나 역기전압은 모터의 회전속도에 비례하기 때문에 회전속도가 낮은 상태에서는 회로의 오프셋과 노이즈의 영향으로 역기전압 0점 교차점에 의한 회전자 검출이 불가능하다. 이 때문에 모터의 정지 상태에서 스핀들 모터를 구동하는, 즉, 초기 구동에는 역기전압을 회전자 위치 검출에 사용할 수 없다. 이런 이유로 HDD의 스핀들 모터 자체의 동적 특성에 관련된 연구^(1,2)뿐만 아니라 초기 구동에 문제와 관련된 연구^(3,4)도 진행되어 왔다.

스핀들 모터의 초기 구동 문제를 해결하는 방법은 크게 네 가지 방법으로 요약할 수 있다. 첫 번째 방법은 정해진 시간 간격에 의한 오픈루프(open loop) 정류 시퀀스에 의해 모터를 회전시키는 방법이다. 이 방법은 회전자의 위치와 상관없이 정류를 하므로 초기 구동 실패 확률이 상당히 높은 방법이다. 두 번째 방법은 정류에 의해 회전자를 일정 위치로 강제적으로 이동시킨 후 오픈루프 정류 시퀀스를 이용하는 방법이다. 이 방법은 초기 구동 성공 확률이 매우 높으나 회전자를 일정 위치로 이동시키는데 많은 시간이 걸린다는 단점이 있다. 세 번째 방법은 코일의 인덕턴스에 의해 회전자의 정지 위치를 검출한 후에 오픈루프 시퀀스로 정류하는 방법이다. 이 방법의 초기 구동 성공 확률은 상당히 높은 편에 속한다. 네 번째 방법은 세 번째 방법과 마찬가지로 회전자의 정지 위치를 코일의 인덕턴스를 이용해 검출한 후에 정류에 펄스파를 가함으로써 계속적으로 인덕턴스를 측정해 회전자의 위치를 검출하여 정류 시퀀스를 해나가는 방법이다^(3,4). 이 방법은 모터의 기구적 파라미터에 영향을 받지 않으며 초기 구동 성공 확률이 매우 높지만 펄스전압의 사용에 의해 구동력이 떨어진다는 단점과 부가적인 회로와 빠른

실시간 연산을 필요로 한다는 단점이 있다.

대부분의 상용 HDD에서는 스타트-업 스펙으로 주어진 최대 사용 전류에서 스핀-업 시간을 단축시키기 위해 스핀들 모터 초기 구동에 일정 전압이 아닌 일정 전류를 사용한다. 또한 빠른 시간 내에 스핀-업을 완료하기 위해 앞서 소개한 방법 중에서도 세 번째 방법을 주로 사용한다. 그래서 이 연구에서도 스핀들 모터 초기 구동에 코일의 인덕턴스에 의해 회전자의 정지 위치를 검출한 후 일정 전류로 오픈루프 정류를 하는 방법을 채택하였다. 이 방법에 있어서 스핀들의 초기 구동 성능에 가장 큰 영향을 미치는 설계 변수는 오픈루프 정류 시퀀스의 시간 간격이다. 이 연구에서는 이 시간 간격을 정함에 있어서 단순히 운동방정식의 결과를 이용하면 외란에 강건하지 못할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보이고, 이러한 외란 중 성능에 영향을 크게 미치는 인자를 선정하고 이에 강건하도록 정류 시간 간격을 재조정한다. 그리고 이렇게 정해진 새로운 시간 간격의 유용성을 실험적으로도 증명한다.

2. 인덕턴스 검출에 의한 회전자 위치 검출

2.1 대상 스핀들 모터

이 연구에는 상용 2.5" HDD의 스핀들 모터 시스템이 그대로 사용되었다. 이 시스템은 두 장의 플래터가 장착된 3상 센서리스 브러시리스 DC 모터로 구성되어 있으며 모터는 12개의 극과 9개의 슬롯을 가지고 있다. 12극으로 구성되어 있으므로 전기적 각도 1회전은 기계적 각도 60도에 해당한다. 또한 스핀들 모터는 마이크로컨트롤러와 이에 연결된 스핀들 구동 회로에 의해 제어된다.

2.2 인덕턴스에 의한 회전자 위치 검출

Table 1 Parameters of the tested spindle motor

Parameters	Value and unit
Number of poles	12
Number of slots	9
Resistance	3.4 Ω
Inductance	0.6 mH
Torque constant (average)	5.2 Nmm/A
Inertia	5.5e-6 kgm ²

회전자 영구 자석의 플럭스는 고정자 코일의 플럭스에 영향을 주기 때문에 회전자의 위치에 따라 변하는 고정자 코일의 인덕턴스로 회전자의 위치를 검출할 수 있다^(3,4).

회전자가 정지 상태에 있는 경우는 역기전압이 0이므로 코일 저항을 R , 인덕턴스를 $L(\theta_E)$, 공급 전압을 V_S 라고 할 때 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$V_S = L(\theta_E) \frac{di}{dt} + Ri \quad (1)$$

여기서 θ_E 는 회전자의 전기적 각도이다.

이 미분방정식의 해로부터 전류의 변화는 다음과 같게 된다.

$$i = \frac{V_S}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L(\theta_E)}t\right) \right) \quad (2)$$

즉, 인덕턴스의 변화는 코일에 전압을 걸었을 때 전류의 동적 특성에 영향을 준다. 따라서 정류 회로에서 전류 측정 용도로 사용하는 션트(shunt) 저항의 전압을 이용해서 코일에 흐르는 전류를 측정할 수 있고, 이로부터 코일의 인덕턴스를 계산할 수 있으며, 이를 통해 회전자의 정지 위치를 예상할 수 있게 된다.

Fig. 1은 스피들 모터를 구동하기 위한 회로의 개략도이며, Fig. 2의 위쪽 그림은 회전자의 정지 위치 검출을 위해 6개의 정류 방향 UV, UW, VW, VU, WU, WV 각각에 대해 션트 저항의 전압이 특정 전압이 될 때까지의 시간을 측정된 실험 결과이다. 즉, 코일에 흐르는 전류가 기준 전류 이상이 될 때까지의 시간을 측정된 결과이다. 측정 시 회전자의 위치는 UV 위치에 있었으며, 이 경우, WU방향

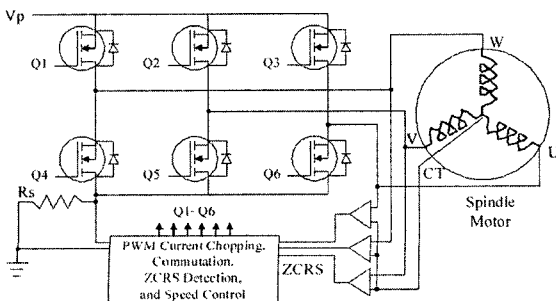


Fig. 1 Schematic of a spindle motor driving circuit

에 대한 시간 T_{WU} 가 가장 짧게 되며 UW방향에 대한 시간 T_{UW} 가 가장 길게 된다. 이 두 경우에 대한 측정 시간을 시뮬레이션을 통해 비교한 결과가 Fig. 2의 아래쪽 그림이다.

Fig. 3의 위쪽 결과는 디스크의 바깥쪽에 각도를 부착하여 15도의 전기적 각도마다 6개의 정류 방향에 대해 측정된 전류의 상승 시간이다. 이 논문에서는 이 특성을 통해 회전자의 위치 검출 알고리즘으로 Table 2와 같이 이웃한 두 정류 방향에 대한 전류의 상승 시간 합이 최소인 것을 찾는 방법을 제

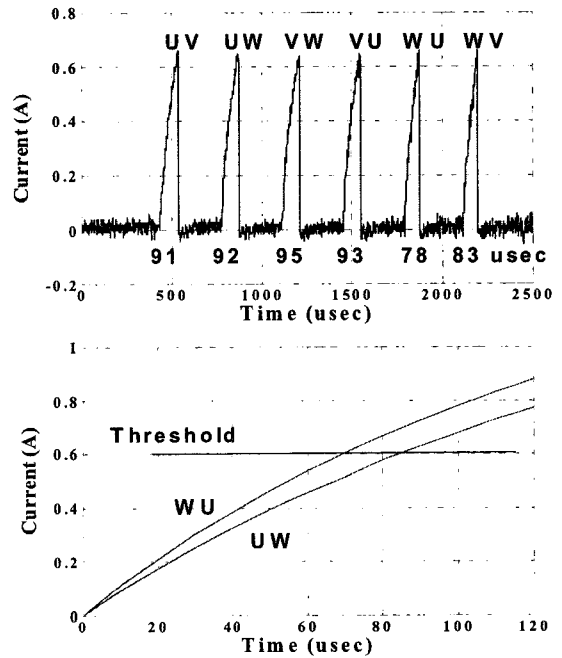


Fig. 2 Coil current during inductive sensing

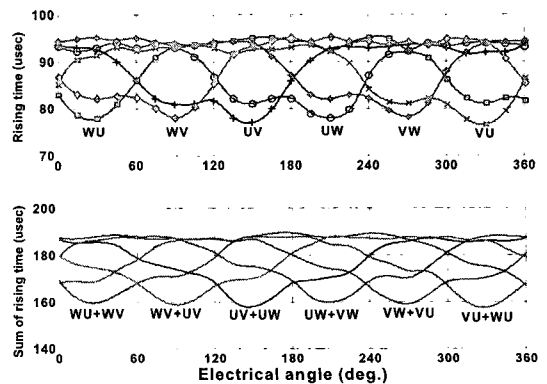


Fig. 3 Measured current rising times

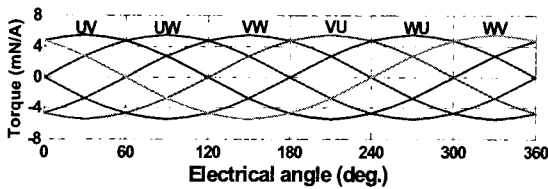


Fig. 4 Simulated torques

Table 2 Criterion for estimating rotor state

Criterion	Rotor state
$T_{UV} + T_{UW}$ is minimum	VW
$T_{LW} + T_{VW}$ is minimum	VU
$T_{VW} + T_{VU}$ is minimum	WU
$T_{VU} + T_{WU}$ is minimum	WV
$T_{WU} + T_{WV}$ is minimum	UV
$T_{WV} + T_{UV}$ is minimum	UW

Table 3 Commutation time intervals computed by the motion equation

Start-up current (mA)	Commutation time interval (msec)					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
600	17.6	12.8	7.2	6.2	5.6	5.1
500	19.2	14.1	9.7	7.9	6.8	5.5
400	21.5	15.8	10.8	8.8	7.7	6.8

안하였고, 이에 대한 타당성을 Fig. 3의 아래쪽 결과에 표시하였다. 이 알고리즘은 유사한 BLDC에 모두 적용할 수 있는 방법이기도 하다.

Table 2의 회전자 상태는 회전자에 가장 큰 토크를 전달할 수 있는 정류 방향을 의미하며, 회전자 위치에 따른 토크 특성은 Fig. 4에 표시하였다.

3. 오픈루프 정류 시간 간격의 결정

앞 장에서는 회전자의 위치를 전기적 각도 60도의 분해능으로 검출하는 방법을 살펴보았다. 다음은 이렇게 알아낸 회전자를 역기전압의 0점 교차점 검출이 가능한 속도까지 회전시키는 것이다. 서론에서 밝힌 바와 같이 여기에는 다양한 방법이 있으나 이 논문에서는 상용 HDD에서 흔히 사용하는 오픈루프 정류 시퀀스를 채택하였다. 즉, 회전자가 가급적 큰

토크를 받으며 회전할 수 있도록 초기 회전자의 위치에 해당하는 정류 방향부터 정해진 시간에 따라 정류 방향을 바뀌어가는 것이다.

스핀들 모터에 가해지는 토크는 정류의 방향이 바뀔 때마다 불연속적으로 변화하기 때문에 해석적인 방법으로만 최적의 정류 시퀀스를 찾는 것은 불가능하다. 따라서 실제 적용에는 기초적인 수식과 많은 시간을 요하는 실험계획법을 이용하여 최적의 결과를 얻는 경우가 많다. 하지만 이러한 방법은 시간적 문제와 파라미터 변화에 대한 강건성 보장의 문제가 있다.

이 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 스핀들 모터 시스템의 운동 방정식에 의해 오픈루프 정류 시간 간격을 정한 후, 이에 대한 미세 보정으로 타임 스케일을 설계 파라미터로 삼아, 스핀들 시스템의 파라미터 변화에도 강건하게 모터를 초기 구동할 수 있는 다음의 설계 방법을 제시하였다.

3.1 운동 방정식에 의한 결정

오픈루프 정류 시간 간격을 정하는 가장 손쉽고 일반적인 방법은 모터의 운동방정식을 이용하는 방법이다. 모터 토크를 τ , 평균 토크상수를 K_t , 코일 전류를 i , 관성모멘트를 J , 점성 마찰계수를 D , 기계적 회전각을 θ 라고 하면 모터-회전각의 관계식은 다음과 같다.

$$\tau = K_t i = J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} \quad (3)$$

이 미분방정식을 풀면 회전각 θ 는 다음과 같게 된다.

$$\theta = \frac{K_t i J}{D^2} \left(\frac{D}{J} t - 1 + \exp\left(-\frac{D}{J} t\right) \right) \quad (4)$$

스핀들 모터 구동 시 회전자 상태는 회전자의 전기적 각도로 매 60도, 즉, 12극 모터의 경우 기계적 각도로 매 10도마다 변하게 된다. 그러므로 오픈루프 정류 직전 회전자의 초기 위치가 각 상태의 평균에 해당하는 가운데 있다고 가정하면, 예를 들어 회전자가 UV 위치의 가운데인 5도에 있다고 하면, 식(4)에서 θ 가 5, 15, 25, ...인 경우에 대해 시간 t 를 수치해석적 방법으로 구함으로써 오픈루프 정류 시간 간격을 얻어낼 수 있다. Table 3은 세 가지 초기 구동 전류에

대해 이와 같은 방법에 의해 계산한 결과다.

3.2 성능에 영향을 주는 인자

오픈루프 정류의 목적은 역기전압 0점 교차점에 의한 회전자 위치 검출이 가능한 속도까지 모터를 가속하는 데 있다. 이 속도는 기본적으로 모터의 토크상수, 역기전압 검출 회로에 사용되는 비교기의 오프셋, 노이즈에 의해 결정된다. 이 연구에서 사용한 스피들 시스템에서는 적어도 200rpm 이상이 되어야만 역기전압에 의한 회전자 위치 검출이 안정적이다.

그런데, 앞서 설명한 방법에 의해 계산한 정류 시간 간격을 그대로 스피들 초기 구동에 적용하면 문제가 생길 수 있다. 첫 번째 이유는 회전자의 초기 위치가 검출 영역의 정 가운데에 있다고 가정하여 시간 간격을 정했기 때문이며, 두 번째 이유는 온도에 따른 스피들 모터의 토크상수 변화와 모터마다의 토크상수 편차를 고려하지 않았기 때문이다.

Fig. 5는 스피들 모터의 공칭 평균 토크상수를 1로 보았을 경우의 토크상수 변화(0.85~1.15)와 회전자의 초기 위치(전기적 각도로 -12~72도)에 따라 400mA의 초기 구동 전류에 대해 앞서 언급한 방법으로 얻은 10회의 정류 시퀀스 후의 스피들 속도 시뮬레이션 결과다. 이 결과에서 알 수 있듯이 운동방정식으로 얻은 오픈루프 정류 시간 간격을 그대로 이용하면 초기 회전자의 위치가 0도 근방에 있을 때와 토크상수가 공칭보다 작을 경우에 오픈루프 정류 후의 속도가 상당히 낮다. 따라서 이때는 코일의 역

기전압 검출이 불안정해 모터의 초기 구동 실패 확률이 높아진다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 오픈루프 정류의 성공적인 경우와 최악의 경우를 비교한 시뮬레이션 결과다. 최악의 경우는 초기 회전자 위치와 평균 토크상수가 가정과 많이 벗어난 경우로 오픈루프 정류 시간 간격이 회전자의 상태와 동기가 되지 않아 모터에 토크를 제대로 전달하지 못해 스피들 모터는 매우 낮은 속도에서 진동한다.

한편, HDD 스피들 모터의 점성 마찰계수도 온도에 따라 크게 변화하는 파라미터이다. 실험에 사용된 스피들 모터의 경우, 고온 60도 대비 저온 0도에서의 점성 마찰계수는 2.5배 정도로 크게 증가한다. 그러나 마찰이 상대적으로 큰 초기 구동 전류에 비해 작아 그 영향이 미미하고, 점성 마찰이 속도에 비례하기 때문에 수 백 RPM 이하의 초기 구동에는 영향을 거의 미치지 않음을 짐작할 수 있다. 이는 시뮬레이션을 통해서도 확인되었다. 따라서 점성 마찰은 성능에 영향을 주는 인자에서 배제시킬 수 있다.

3.3 새로운 시간 간격의 결정

앞서 스피들 모터의 초기 구동에 영향을 미치는 큰 인자로 평균 토크상수와 초기 회전자 위치가 있음을 보였다. Fig. 5의 결과로 직관적으로 알 수 있는 사실은 토크상수가 다소 큰 경우에는 악영향이 줄어든다는 것이다. 하지만 모터의 토크상수를 임의로 변경할 수는 없다. 대신 3.1절의 방법으로 구한 시간 간격에 적당한 상수를 곱해 토크가 공급되는 시간을 변화시킴으로써 성능의 변화를 줄 수 있다.

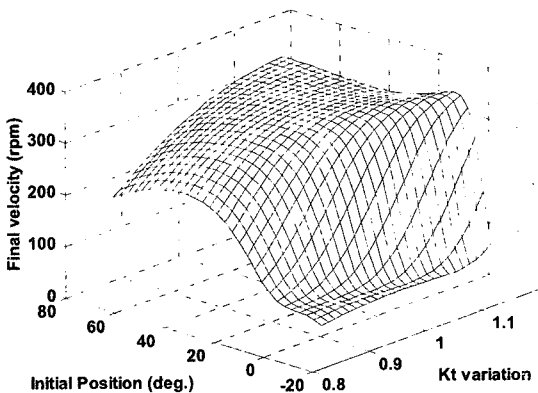


Fig. 5 Effect of rotor initial position and torque constant variation to the final velocity after commutations

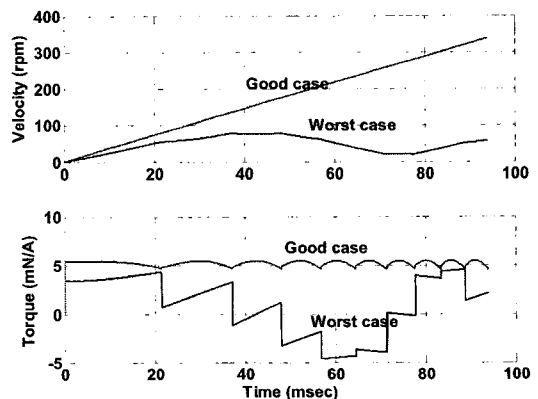


Fig. 6 Velocity and torque during commutations

즉, 3.1절에서 구한 시간 간격을 전체적으로 줄이거나 늘리는 타임 스케일을 설계 파라미터로 삼을 수 있다.

스핀들 모터마다의 평균 토크상수는 대략 5% 이내의 편차를 가지고 있으나 온도에 따른 토크상수 변화와 모터 드라이버의 이득 오차를 고려해서 토크상수의 변화는 최대 10%로 간주하였다.

스핀들 모터 초기 구동 시 회전자 초기 위치는 임의의 위치가 될 수 있지만 인덕턴스 검출에 의한 분해능은 전기적 각도로 60도이다. 그러나 인덕턴스 검출에 포함되는 노이즈의 영향으로 위치 검출에 오차가 발생한다. 특히 스타트-업 전류를 작게 사용할수록, 다시 말해, 인덕턴스 검출 시 사용하는 최대

전류를 작게 사용할수록 측정값이 작아 회전자 검출 오차는 더욱 커진다. 이러한 점을 고려해서 회전자 위치의 검출 범위를 전기적 각도로 0~60도가 아닌 -12~72도로 간주하였다.

정류 횟수를 1~20으로 한 각각의 경우에 대해 타임 스케일의 변화에 따른 정류 후의 최종 속도를 시뮬레이션으로 구하여 그 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 표시하였다. 이 결과에는 토크상수의 편차와 회전자 초기 위치의 변화가 모두 고려된 것이다. Fig. 7은 토크상수와 회전자 초기 위치를 고려한 결과 중 최악의 최종 속도이며, Fig. 8은 이들 변화를 고려한 모든 경우에 대한 최종 속도의 평균이다.

최악의 최종 속도 면에서는 거의 모든 정류 횟수에 대해 타임 스케일을 1.2 정도로 가져갔을 때 가장 우수한 결과를 나타내었고, 평균 최종 속도 면에서는 타임 스케일 1.1 근방에서 가장 우수한 결과를 나타내었다. 평균 속도가 가장 높은 타임 스케일은 최악의 경우가 매우 안 좋은 경우도 포함하고 있어 평균 속도를 기준으로 타임 스케일을 정해서는 안됨을 알 수 있다.

다음으로 결정할 사항은 정류 횟수이다. 최적의 타임 스케일에서는 정류 횟수가 많을수록 오픈루프 정류 직후의 최종 속도도 증가한다. 그리고 이 최종 속도는 역기전압의 0점 교차점이 안정적으로 검출되는 속도 이상이어야 한다. 그런데 예기치 못한 상황으로 오픈루프 정류에 의한 스타트-업이 실패할 경우에는 재시도를 해야 하는데, 정류 횟수가 많으면 많을수록 재시도에 걸리는 시간도 많이 소비되므로 이러한 면에서는 필요한 만큼의 정류 횟수를 선택하는 것이 중요하다. 이러한 실패를 가져오는 원인의 예는 여러 가지 경우가 있을 수 있으며, 대표적인 경우로 저온 장시간 미사용으로 인한, 스핀들 유체 베어링 정지 마찰의 일시적인 증가를 들 수 있다.

Table 4 Variable model parameters

Parameter	Min.	Max.
Torque constant	0.9KT	1.1KT
Initial position (deg.)	-12	72

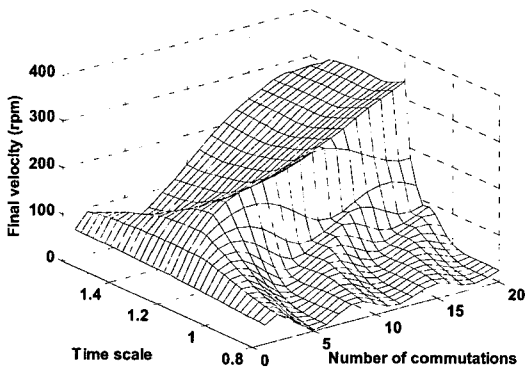


Fig. 7 Worst case final velocities

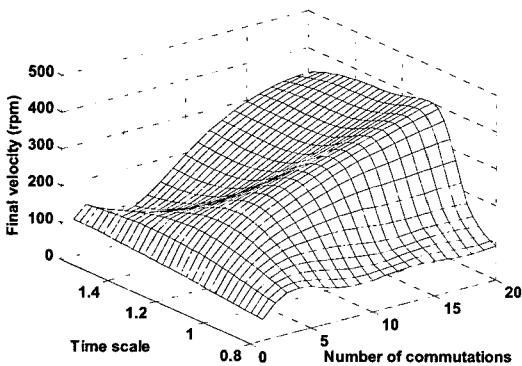


Fig. 8 Average final velocities

4. 실험결과

앞 장에서 HDD 스핀들 모터 초기 구동에 있어서의 오픈루프 정류 시간 간격을 운동방정식에 의해 구한 후, 이를 초기 구동에 영향을 크게 주는 파라미터를 고려해서 타임 스케일로 보정하는 방법을 제시하였다. 이렇게 설계한 결과의 타당성을 검토하기 위해서는 스핀들 모터의 토크상수와 회전자의 초기

위치를 변경하면서 스타트-업 실험을 해야 한다. 타당성 실험 시 회전자의 위치는 모터가 회전 후 정지할 때마다 임의의 위치가 되지만 토크상수는 임의로 변경할 수 있는 것이 아니므로 토크상수 변화는 초기 구동 전류를 변화시킴으로써 대신하였다.

초기 구동 전류로는 앞 장의 내용과 같이 USB 포트 전원으로 직접 구동할 수 있는 400 mA를 선정하였다. 오픈루프 정류 시간은 3.1절로부터 msec 단위로 21.5, 15.8, 10.8, 8.8, 7.7, 6.8, 6.3, 5.8, 5.4, 5.1, 4.8, 4.6, ...와 같이 구해졌으며, 3.3절로부터 타임 스케일은 1.2로 선정되었다. 총 정류 횟수는 정류 후의 시뮬레이션 속도가 최악의 경우라도 역기전압 0점 교차점 측정이 가능한 250 rpm 이상이 보장되는 12회로 정했다.

실험 결과를 Table 5에 정리하였다. 공칭 토크상수와 여기에 $\pm 10\%$ 의 변화를 주기 위한 구동 전류 각각에 대해 오픈루프 정류를 이용한 스타트-업 실패율을 측정하였다. 결과의 신뢰성을 위해 하나의 스피들 시스템을 사용했으며, 각각의 경우에 대해 유의차를 충분히 볼 수 있도록 총 5000회를 테스트하였다. 각 회의 테스트 후 스피들 모터는 전력이 끊긴 상태에서 서서히 멈추기 때문에 회전자의 위치는 다음 초기 구동 시 임의의 위치가 된다. 1회의 테스트에는 스피들 스타트-업과 정지가 포함되므로 적어도 5초 정도의 시간이 걸린다. 하나의 조건 변화에 대해 유의차를 보기 위한 실험 횟수는 적어도 수백회 이상이기 때문에 실험 대상 HDD의 수를 늘리더라도 설계 파라미터의 최적화를 다양한 작동 환경에 대해 강건성을 갖도록 단순 실험계획법으로 수행한다면 수 십일의 시간이 소요된다. 바로 이러한 점이 있어서 이 논문의 방법이 초기 구동 제어 설계에 특히 유용하다고 볼 수 있다.

Table 5의 실험 결과로부터 운동 방정식만 사용해서 얻은 정류 시간 간격으로는 토크상수가 낮은 스

피들 모터에서 스타트-업 실패율이 특히 높았으나 이 논문에서 제안한 타임 스케일을 적용한 경우에는 실패율이 매우 낮아졌다. 세 가지 토크상수에 대한 전체 결과로 보았을 때 스타트-업 실패율은 6.9%에서 0.7%로 크게 감소하였다.

5. 결 론

HDD 스피들 모터의 초기 구동에는 인덕턴스 검출에 의한 회전자 위치 검출 후 일정 전류를 사용하는 오픈루프 정류 시퀀스가 주로 사용된다. 이 때 정류의 시간 간격을 스피들 모터의 운동 방정식으로부터 얻어내어 그대로 사용하는 경우에는 스피들 모터 시스템의 여러 파라미터 편차에 민감하게 반응하여 초기 구동 실패율이 높아질 수 있다. 이 논문에서는 초기 구동에 큰 영향을 미치는 토크상수 변화와 회전자 초기 위치 변화에 강건한 오픈루프 정류 시간 간격을 얻기 위해 운동 방정식으로 얻어낸 시간 간격을 전체적으로 보정하는 타임 스케일을 도입하였다. 시뮬레이션으로 분석한 결과, 이들 파라미터 변화에 강건한 시간 간격은 운동 방정식의 결과보다 20% 긴 것을 알 수 있었다. 즉, 타임 스케일이 1.2일 때 토크상수 변화와 회전자 초기 위치에 강건한 초기 구동 결과를 얻을 수 있었으며, 이러한 결과는 실험을 통해서도 확인되었다. 이러한 방법은 단순 실험계획법에 의해 정류 시간을 최적화하는 것보다 실험 시간을 매우 단축시킬 수 있을 뿐 아니라 강건성도 확보해주어 저전류로 스피들 모터를 스타트-업할 때 증가하는 초기 구동 실패율을 더욱 줄여줄 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

후 기

이 연구는 동양공업전문대학 2007학년도 학술연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, S. H. and Jang, G. H., 2006, "Determination of the Dynamic Coefficients of the Coupled Journal and Thrust Bearings by the Perturbation Method", Transactions of the Korean Society for

Table 5 Comparison of start-up failure rate

Condition	Without time scale	With time scale
360 mA (=0.9Kt)	15.3 %	1.0 %
400 mA (=1.0Kt)	3.7 %	0.5 %
440 mA (=1.1Kt)	0.8 %	0.6 %
Total	6.9 %	0.7 %

Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 746~753.

(2) Park, S. J., Jang, G. H., Kim, C. S. and Han, J. H., 2006, "Characterization and Detection of a Free-falling State of a Mobile HDD Using the Electromechanical Analysis in a Rotating Spindle System", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 12~18.

(3) Jang, G. H., Park, J. H. and Chang J. H., 2002, "Position Detection and Start-up Algorithm of a Rotor in a Sensorless BLDC Motor Utilising Inductance Variation", IEE Proc. Electr. Power Appl, Vol. 149, No. 2, pp. 137~142.

(4) Lee, W. J. and Sul, S. K., 2006, "A New Starting Method of BLDC Motors Without Position Sensor", IEEE Transaction on Industrial Application, Vol. 42, No. 6, pp. 1532~1538.