

HDD 스피들 모터의 초기 구동 제어에 관한 연구

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

정 준†
Jun Jeong

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

ABSTRACT

Optimization method for the open loop commutation time intervals in HDD spindle start-up control is presented in this paper. A hard disk drive(HDD) uses a sensorless brushless DC motor(BLDC) for the platter rotation. Because there is no direct sensor for the rotor position, open loop commutations after sensing the rotor position at a standstill using inductive sensing method are performed to speed up the rotor up to a certain speed where the zero crossings of the back electromotive force(EMF) are measurable. Therefore successful open loop commutations are necessary for the stable start-up control of the spindle motors. Random neighborhood search(RNS) algorithm is introduced as a optimization technic in this paper. Rotor speed and its standard deviation are used as a cost function and commutation intervals obtained from the spindle motion equation are used as initial parameter values for the RNS. With the help of the proposed method optimized open loop commutation time intervals for the very low start-up current are acquired and tested. The experimental results shows that the proposed method can decrease the start-up failure rate of a HDD spindle motor.

1. 서 론

최근 하드디스크드라이브(HDD)의 용량이 기하급수적으로 증가됨에 따라 HDD 폼팩터도 다양해지고 사용 용도도 더불어 다양해지고 있다. 2.5인치 이하의 HDD는 노트북, MP3 플레이어, 외장 케이스를 이용한 백업 장치, 캠코더와 같이 휴대용 장치의 저장기기로 사용되고 있다. 이 중 USB를 이용하는 외장형 백업 장치는 2.5인치 HDD의 가격 하락과 용량 증가로 인해 CD나 DVD를 대신하는 고용량 백업 장치로 인기가 높아졌다. 그런데 이 장치 대부분은 자체 회로와 HDD에 사용되는 전력을 별도의 전원장치 없이 USB 포트의 전원을 그대로 사용하고 있다. USB 포트의 전원은 전압이 5V이며 스펙상 500mA이하의 전류를 사용하도록 권장하고 있으며 데스크탑 PC의 경우에는 1A까지의 전류를 허용하는 경우도 있다. 수년전까지만 해도 2.5인치 HDD의 최대 사용 전류는 1A 정도였기 때문에 이

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

HDD에서 전류를 가장 많이 소비하는 동작은 정지 상태에 있는 스피들 모터를 데이터의 기록/재생이 가능한 속도까지 끌어올리는 스타트-업 동작이다. 2.5인치 HDD에서 기록/재생 동작, 탐색 동작은 모두 약 400mA 이하의 전류만을 사용하는데 반해 스타트-업 동작에서는 스피들 모터에만 약 600mA의 전류를 사용한다. 그 이유는 낮은 전류로는 HDD에서 사용하는 센서리스(sensorless) 브러시리스 DC 모터(BLDC)의 초기 구동에 문제가 발생할 수 있고, 이에 따라 전원 투입 또는 전력저감 모드 직후 기록/재생이 가능한 상태까지의 시간인 준비시간(ready time)이 길어질 수 있기 때문이다.

HDD의 스피들 모터에 사용되는 센서리스 브러시리스 DC 모터 자체에 관련된 연구는 그동안 많이 진행되어 왔다^(1,2). 또한 이 모터의 초기 구동 문제에 대한 연구도 진

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

행되어 왔다^(3,4).

HDD 스피들 시스템에서는 센서의 장착 문제와 비용 문제로 회전자 검출을 위한 센서가 없는 브러시리스 모터를 사용한다. 별도의 센서는 없지만 HDD 스피들 모터는 U, V, W의 삼상 중 두 상에만 전력을 공급하므로 나머지 한 상의 역기전압의 0점 교차점을 이용해 회전자의 위치를 검출하여 정류(commutation)의 순서를 바꿔감으로써 회전자를 회전시킨다. 그러나 역기전압은 모터의 회전속도에 비례하기 때문에 회전속도가 낮은 상태에서는 역기전압의 0점 교차점에 의한 회전자 검출이 불가능하다. 이 때문에 모터가 정지한 상태에서 스피들 모터를 구동하는, 즉, 초기 구동에는 역기전압을 사용할 수 없다.

스피들 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 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 위치를 코일의 인덕턴스를 이용해 검출한 후에 정류에 펄스파를 가함으로써 계속해서 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 스피들-업 시간을 단축시키기 위해 스피들 모터 초기 구동에 일정 전압이 아닌 일정 전류를 사용한다. 또한 빠른 시간 내에 스피들-업을 완료하기 위해 앞서 소개한 방법 중에서도 세 번째 방법을 주로 사용한다. 그래서 이 연구에서도 스피들 모터 초기 구동에 코일의 인

덕턴스에 의해 회전자의 위치를 검출한 후에 일정 전류로 오픈루프 정류를 하는 방법을 채택하였다. 이 방법에 있어서 스피들의 초기 구동 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 오픈루프 정류의 시간 간격이다. 특히 구동 전류가 낮을수록 이 간격은 성능에 더욱 영향을 많이 미친다. 이 연구에서는 이 정류 시간 간격을 스피들 모터의 운동방정식에 의해 계산하는 방법을 소개하고 랜덤 네이버후드 검색(random neighborhood search, RNS) 알고리즘으로 최적화하는 방법을 제안하였다. 그리고 낮은 스피들 초기 구동 전류에 대한 최적화 결과를 실험에 적용하여 성능 향상을 비교하였다.

2. 대상 스피들 모터

이 연구에는 상용 HDD의 스피들 모터 시스템이 그대로 사용되었다. 이 시스템은 두 장의 플래터가 장착된 3상 센서리스 브러시리스 DC 모터로 구성되어 있으며 모터는 12개의 극과 9개의 슬롯을 가지고 있다. 이 모터는 12극으로 구성되어 있으므로 전기적 각도 1회전은 기계적 각도 60도에 해당한다. 또한 스피들 모터는 마이크로컨트롤러와 이에 연결된 스피들 구동 회로에 의해 제어가 된다. Table 1에 스피들 모터의 주요 파라미터 정리하였다.

3. 인덕턴스 검출에 의한 회전자 위치 검출

회전자 영구 자석의 플럭스는 고정자 코일의 플럭스에 영향을 주기 때문에 회전자의 위치에 따라 고정자 코일의 인덕턴스는 변하게 된다^(3,4). 회전자가 정지 상태에 있는 경우는 역기전압이 0이므로 코일 저항을 R , 인덕턴스를 $L(\theta_E)$, 공급 전압을 V_S 이라고 할 때 다음과 같은 관계식이 성립한다.

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

여기서 θ_E 는 회전자의 전기적 각도로 이 연구에 사용된 스피들 모터는 극이 12개이므로 기계적 각도는 전기적 각도의 1/6에 해당한다.

이 식으로부터 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 일정 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 위치를 예상할 수 있게 된다. 즉, 별도의 회전자 위치 센서 없이도

Table 1 Parameters of the tested spindle motor

Parameter	Value and unit
pole	12
slot	9
resistance	3.4 Ω
inductance	0.6 mH
torque constant (average)	5.2 Nmm/A
inertia	5.5e-6 kgm ²

코일의 인덕턴스를 측정함으로써 회전자의 위치를 알아낼 수 있다.

Fig. 1의 좌측 그림은 회전자 위치 검출을 위해 6개의 정류 방향 UV, UW, VW, VU, WU, WV에 각각에 대해 선트 저항의 전압이 특정 전압이 될 때까지의 시간을 측정 한 실험 결과이다. 즉, 코일에 흐르는 전류가 기준 전류 이상이 될 때까지의 시간을 측정한 결과이다. 측정시 회전자의 위치는 UV 위치에 있었으며, 이때는 WU 방향에 대한 시간 T_{WU} 가 가장 짧게 되며 UW 방향에 대한 시간 T_{UW} 이 가장 길게 된다. 이 두 경우에 대한 측정 시간을 시뮬레이

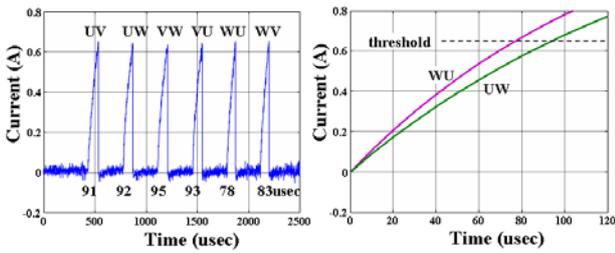


Fig. 1 Coil current during the rotor position estimation

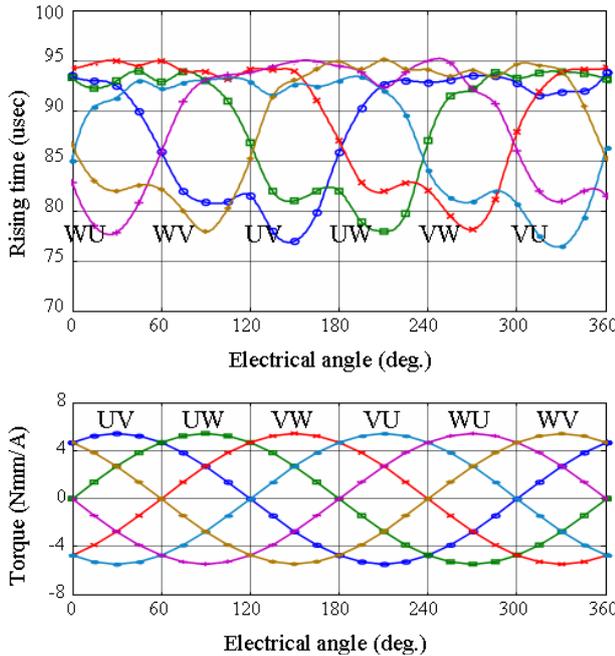


Fig. 2 Measured current rising time and simulated torque coefficient

Table 2 Criterion for estimating rotor state

Criterion	Rotor state
$T_{UV}+T_{UW}$ is minimum	VW
$T_{UW}+T_{VW}$ 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

션을 통해 비교한 결과가 Fig. 1의 우측 그림이다.

Fig. 2의 위쪽 결과는 15도의 전기적 각도마다 6개의 정류 방향에 대해 측정한 전류의 상승 시간이며, 아래쪽 결과는 이에 해당하는 전류당 토크를 계산에 의해 표시한 것이다. 이 특성 결과를 토대로 정지시의 회전자가 가장 큰 토크를 받을 수 있는 정류 방향을 다양한 알고리즘에 의해 정할 수 있다. 이 논문에서는 Table 2와 같이 이웃한 두 정류 방향에 대한 전류의 상승 시간의 합이 가장 작은 경우를 토대로 회전자의 위치를 알아내는 방법을 사용하였다.

4. 오픈 루프 정류 시간 간격의 결정

앞 장에서는 회전자의 정지 위치를 전기적 각도로 60도의 분해능으로 검출하는 방법을 살펴보았다. 다음은 이렇게 알아낸 회전자를 가장 큰 토크를 낼 수 있는 정류 방향부터 오픈루프 정류 시퀀스에 의해 역기전압의 0점 교차점 검출이 가능한 속도까지 가속시키는 것이다. 여기서 중요한 것은 오픈루프 정류 시퀀스의 시간 간격을 어떻게 정하는냐에 관한 것이다.

4.1 운동방정식에 의한 결정

첫 번째 방법은 스핀들 모터의 운동방정식으로부터 정류 시퀀스의 시간 간격을 얻어내는 방법이다. 모터 토크를 τ , 평균 토크상수를 K_t , 정전류 회로에 의한 코일 전류를 i , 관성모멘트를 J , 점성 마찰을 D , 회전각을 θ 라고 하면 이때의 운동방정식은 다음과 같게 된다.

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

이 미분방정식을 풀면 회전각 θ 는 다음과 같게 된다.

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

스핀들 모터 구동시 정류 방향의 변경 시점은 회전자가 전기적 각도로 매 60도, 즉, 12극 모터의 경우 기계적 각도로 매 10도가 된다. 그러므로 오픈루프 정류 직전 회전자의 초기 위치는 평균인 5도에서 놓여있다고 가정하면 식 (4)에서 회전각 5, 15, 25, ...의 θ 에 대해 시간 t 를 수치 해석적 방법으로 구함으로써 오픈루프 정류 시퀀스의 시간 간격을 얻어낼 수 있다. Table 3은 세 가지 초기 구동 전

Table 3 Commutation time interval computed by the motion equation

Start-up current (mA)	Commutation time intervals (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

류 400, 500, 600mA에 대해 이와 같은 방법에 의해 얻어낸 결과이다. 결과로부터 초기 구동 전류가 높을수록, 정류 시퀀스가 진행될수록 더 짧은 정류 시간 간격을 가짐을 알 수 있다.

4.2 RNS 알고리즘에 의한 결정

오픈루프 정류의 목적은 역기전압에 의한 회전자 위치 검출이 가능한 속도까지 모터를 가속하는 데 있다. 이 속도는 모터의 특성과 역기전압 검출 회로의 특성에 따라 다른데 이 연구에서 사용한 스핀들 시스템에서는 약 180 rpm 이상이 되어야만 역기전압에 의한 회전자 위치가 안정적으로 검출이 된다.

스핀들 모터의 오픈루프 초기 구동 성공 확률은 모델링

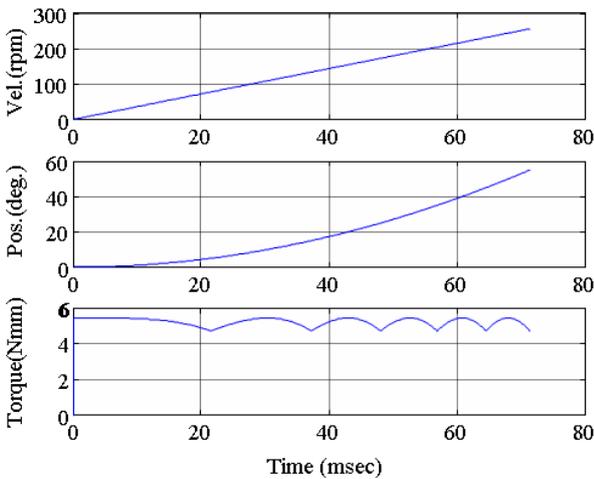


Fig. 3 Torque, position and velocity during 6 open loop commutations

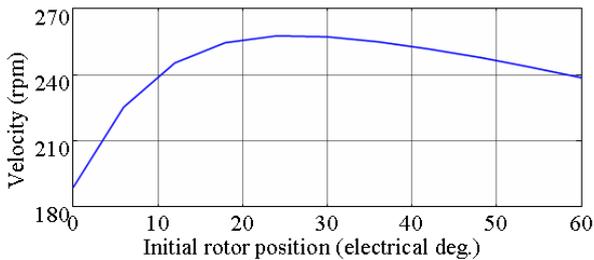


Fig. 4 Velocity after 6 open loop commutations w.r.t. initial rotor position

Table 4 Random neighborhood search algorithm

Step	Description
1.	$k \leftarrow 0, C^* \leftarrow \infty, P \leftarrow P^0$ (initial parameters).
2.	$k \leftarrow k+1$, calculate cost function $C(P)$.
3.	If $C(P) > C^*$, go to step 5.
4.	$P^* \leftarrow P, C^* \leftarrow C(P)$.
5.	If $k > k_{max}$ go to 8.
6.	Select new $P \leftarrow P^* [1 + \text{rand}(\cdot)] \rho$.
7.	Go to step 2.
8.	Output results and done.

오차 측면에서는 높은 구동 전류를 사용할수록, 오차 누적 측면에서는 정류 횟수가 적을수록 높아짐을 직관적으로 알 수 있다. 단, 정류 횟수는 최소한 역기전압에 의한 회전자 위치 검출이 가능한 속도를 보장해야만 한다.

이 연구에서는 낮은 스핀들 구동 전류에 의해서도 안정적으로 스핀들 모터를 초기 구동할 수 있는 최적의 정류 시간 간격을 얻어내는데 RNS⁽⁵⁾ (random neighborhood search) 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘은 가격함수를 직관에 의해 정할 수 있다는 장점이 있기 때문에 스핀들 모터의 오픈루프 정류 시퀀스에서와 같이 구동 전류가 비선형적으로 스위칭되는 경우에 대해서도 유용하게 사용될 수 있다. 자세한 알고리즘은 Table 4에 정리하였다.

RNS 알고리즘에 사용한 가격 함수는 다음과 같다.

$$C = \begin{cases} \sigma_m & \text{if } \omega_m \geq \omega_c \\ \infty & \text{if } \omega_m < \omega_c \end{cases} \quad (5)$$

여기서 ω_m 은 오픈 루프 정류 시퀀스 직후의 평균 속도, σ_ω 는 이들 속도의 표준편차, ω_c 는 역기전압에 의한 회전자 위치 검출이 안정적으로 가능한 최저 속도이다.

스핀들 모터에 일정 전류를 가하더라도 정류 방향과 회전자의 위치에 따라 Fig. 2와 같이 회전자에 전달되는 토크는 달라진다. 또한 정지시의 회전자 초기 위치는 어떠한 위치도 될 수 있으므로 주어진 오픈루프 정류 시간 간격이 고정되어 있더라도 초기 회전자 위치에 따라 최종 속도가 다를 수 있다. 따라서 RNS의 가격함수 C 는 식(5)와 같이 회전자가 위치할 수 있는 영역을 10개로 균등하게 나눈 경우에 대해 얻어낸 오픈루프 정류 시퀀스 후의 속도와 이때의 표준편차의 조합으로 정하였다. Fig. 3은 회전자가 5도에 있을 때 Table 2의 400mA 구동 전류에 해당하는 6번의 오픈루프 정류를 했을 때의 시뮬레이션 결과이며, Fig. 4는 회전자 초기 위치에 따른 최종 속도를 시뮬레이션으로 얻은 결과이다.

RNS의 초기 파라미터로는 Table 2의 결과를 이용하였다. 스핀들 모터의 초기 구동 전류를 400mA로 했을 때 운동방정식에 의해 얻어낸 오픈루프 정류 시간 간격으로는 오픈루프 정류 시퀀스 직후 회전자의 평균속도는 237rpm

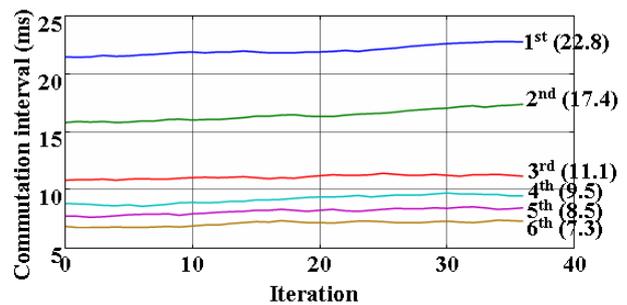


Fig. 5 Commutation interval optimization results by RNS algorithm

이고 표준편차는 29rpm이었으나 RNS에 의해 얻어낸 정류 시간 간격으로는 평균속도는 253rpm로 높아지고 표준편차는 11rpm으로 줄어들었다. Fig. 5는 RNS 과정 중의 파라미터 변화를 표시한 것이다. 총 36번의 업데이트를 통해 최적의 정류 시간 간격을 얻을 수 있었다. 여기서 최적 시간 간격은 정류의 스위칭 특성으로 인해 초기 조건에 따라 달라질 수는 있으나 운동방정식으로 얻은 초기 조건을 이용하는 것은 적절하며 이때의 수렴값은 RNS 알고리즘을 반복해도 거의 비슷한 결과를 나타내었다.

5. 실험결과

앞 장에서 HDD 스피들 초기 구동에 있어서의 오픈루프 정류 시간 간격을 정하는 방법으로 운동방정식에 의한 방법과 RNS에 의한 방법을 제시하였다. 이 두 방법에 의한 실험결과를 얻기 위해서는 오픈루프 정류 시퀀스 직후의 속도를 측정해야 한다. 하지만 이때의 속도를 측정하기 위해서 디스크 회전축에 엔코더나 타코제너레이터를 설치하는 것은 이들 센서의 마찰과 관성이 실험결과에 영향을 주기 때문에 불가능하다. 또한 회전자의 초기 위치를 임의로 위치시키는 것도 매우 힘든 일이다. 따라서 두 방법의 결과 차이를 보기 위한 실험 방법으로 많은 회수의 스핀-업 테스트를 실시하였다.

스핀-업 과정은 크게 네 단계로 구성된다. 첫 번째는 회전자의 위치 검출 단계, 두 번째는 오픈루프 정류 시퀀스 단계, 세 번째는 역기전압의 영점 교차점을 이용해 회전자의 위치를 검출하여 속도를 높이는 단계, 네 번째는 목표 속도를 유지하기 위한 피드백 제어 단계이다. 만약 두 번째 단계가 잘못되었다면 이후 과정에 영향을 끼치게 된다. 또한 세 번째, 네 번째 단계는 회전자의 위치를 검출하여 사용하기 때문에 이 단계에서 스핀-업이 실패할 확률은 특별한 상황이 아니면 발생하지 않는다. 따라서 스핀-업 실패율을 이용해서도 오픈루프 정류 시퀀스의 성능을 평가할 수 있다.

총 1000회의 스핀-업 회수를 통해 결과를 비교하였다. 초기 구동 전류로 600mA를 사용할 때에는 운동방정식에 의해 얻은 정류 시간 간격을 사용할 때의 실패율이 0.6% 정도였으나 400mA를 사용할 때에는 같은 방법을 사용할 때 실패율이 2.8% 정도로 증가하였다. 그러나 RNS 방법에 의해 얻은 정류 시간 간격으로는 초기 구동 전류로 400mA를 사용하더라도 실패율이 0.7% 정도로 크게 줄어들었다.

Table 5 Comparison of spin-up failure rate

Motion Eqn. (600mA)	Motion Eqn. (400mA)	RNS (400mA)
0.6%	2.8%	0.7%

6. 결 론

HDD 스피들 모터에 낮은 초기 구동 전류를 사용할수록 스피들 모터의 초기 구동 안정성은 떨어지게 되는데 이 때 가장 큰 영향을 주는 것은 오픈루프 정류 시간 간격이다. 이 논문에서는 이 시간 간격을 최적화함에 있어 RNS 알고리즘을 도입하였다. 이 알고리즘의 가격함수로는 오픈루프 정류 시퀀스 직후의 속도 평균과 편차를 사용하였으며 파라미터의 초기값으로는 운동방정식으로부터 얻어낸 결과를 이용하였다. 그리고 이 알고리즘에 의해 얻어낸 시간 간격을 HDD 스피들 모터의 초기 구동 실험에 사용하였다. 즉, 오픈루프 정류 시퀀스에 실제 적용하였다. 그 결과 HDD 스피들 모터의 초기 구동 실패율은 운동방정식의 결과만을 사용했을 때의 2.8%보다 낮은 0.7%로 줄어들었으며 이를 통해 제안한 방법에 의해 HDD 스피들 모터의 초기 구동 안정성은 크게 향상됨을 알 수 있었다.

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 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
- (5) Franklin, G. F., Powell J. D. and Workman, M., 1997, Digital Control of Dynamic Systems Third Edition, Addison Wesley Longman, Inc., pp. 635~642