

위치 센서가 없는 소형 BLDC 전동기의 기동 방법에 관한 연구

이육진, 설승기
서울대학교

A New Starting Method of Brushless DC Motor without Position Sensor

Wook-Jin Lee and Seung-Ki Sul
Seoul National University

ABSTRACT

This paper presents a novel method to detect the rotor position of the BrushLess DC(BLDC) motor at standstill and a start-up method to accelerate the rotor up to a certain speed where the conventional position sensorless control methods based on the back EMF could work reasonably. The proposed initial rotor position estimation method is suitable to avoid the temporary reverse rotation or the starting failure. This method can be implemented using only one current sensor at DC link of the inverter. It does not depend on the model of the motor, and it is robust to motor parameter variations. By the proposed method, it is demonstrated experimentally that a stable starting can be achieved even with severe mechanical disturbance.

어 왔으며 이러한 구동 방법을 흔히 센서리스 구동 방법이라 부르고 있다. 이 센서리스 구동 방법에는 고주파 전압을 주입하는 방법^[1], 테스트 전압 펄스를 이용하는 방법^[2,3], 전동기 모델을 이용하는 방법^[4] 등 여러 가지가 있으나 구현의 용이성 등의 이유로 역기전력의 부호가 바뀌는 시점으로부터 회전자의 위치를 파악하는 방법과 같은 간단한 센서리스 구동 방법이 BLDC 전동기 구동 시스템에 주로 쓰이고 있다. 그러나 이 방법의 경우 전동기가 고속으로 회전하고 있는 경우에는 비교적 잘 적용되지만, 정지상태에 있거나 저속 영역에서 운전되고 있는 경우, 역기전력이 없거나 충분히 크지 않아 적용이 어려운 단점이 있다.

이 논문에서는 소형 BLDC 전동기를 대상으로, DC link측에 전류 센서 한개만 사용하여 정지상태에서 회전자의 위치를 파악하는 회전자 초기 위치 추정 방법과, 추정된 초기 위치로부터 충분한 역기전력을 얻을 수 있을 정도의 회전속도까지 회전자를 가속시킬 수 있는 방법을 제안한다.

1. 서 론

BLDC 전동기는 회전자에 부착되어 있는 영구자석으로부터 자속을 공급받기 때문에 최대의 토크를 발생시키기 위해서는 회전자의 절대 위치(Absolute Position)를 정확하게 알고 있어야 한다. 회전자의 절대 위치 정보를 얻기 위해서는 회전자에 레졸버(Resolver)나 절대 엔코더(Absolute Encoder), 또는 자속센서(Hall effect sensor)와 같은 위치 센서를 부착하는 방법이 일반적이데, 레졸버나 절대 엔코더는 가격이 높아 특별한 정밀도와 안정성을 요구하는 분야에만 쓰이고 있고, 저가(Low Cost)의 BLDC 전동기 시스템에서는 자속센서(Hall effect sensor)가 주로 사용된다.

그러나 근래에는 이러한 위치 센서를 전혀 사용하지 않는 구동 방법에 관한 연구가 활발히 진행되

2. 회전자 초기 위치 추정 방법

2.1 BLDC 전동기의 인덕턴스 특성

BLDC 전동기는 회전자의 형상에 돌극성이 없기 때문에 이론적으로 회전자의 위치에 상관없이 일정한 고정자 인덕턴스를 가진다. 그러나 실제로는 회전자의 자석이 만들어 내는 자속이 고정자 코어(Core)를 통과하면서 코어에 부분적인 포화(Saturation) 현상을 일으킨다. 이러한 포화 현상으로 인하여 고정자 권선에 일정한 전압을 인가하였을 때 증가하는 전류의 시간 변화율, 즉 인덕턴스가 회전자 자석의 위치에 따라 변하게 된다.

표 1의 계 상수를 가지는 실험 대상 전동기의 회전자 위치에 따른 인덕턴스를 알아보기 위해, 전동기에 3상 인버터의 공간 전압 벡터 중, V_1 전압

을 인가하고 30 μ s 후 DC 전원 측 전류(I_1)를 샘플링(Sampling)하였다. 회전자의 위치에 따른 샘플링 된 전류 값을 나타내면 그림 1과 같다.

표 1 테스트 전동기의 상수

극수	8
슬롯수	12
동작 전압	12 V
정격 회전 속도	7200 r/min.
고정자 저항(R_s)	0.19 Ω
고정자 인덕턴스 (a to b, c)	0.61 mH
역기전력 상수	2.2mV _{peak} /rad./sec

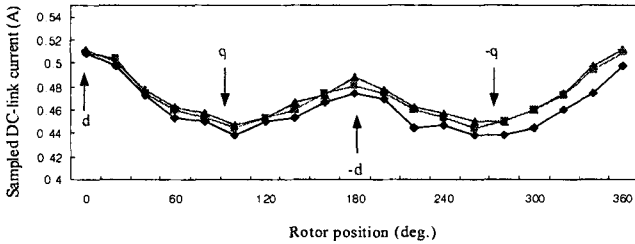


그림 1 회전자 위치에 따른 상승 전류의 크기 (3회 측정)

그림 1의 전류 값을 고정자 권선 저항 및 전원 전압 값을 이용하여 인덕턴스 값으로 변환하면, 식 (1)에 의해 그림 2를 얻을 수 있다.

$$L = - \frac{R_{eq} \cdot T_s}{\ln \left(1 - \frac{R_{eq}}{V_{DC}} \cdot I_1 \right)} \quad (1)$$

여기서 $R_{eq} = 3R_s/2$, V_{DC} 는 DC 전원 전압, T_s 는 전압 인가 후 전류를 샘플링 할 때까지의 시간이다.

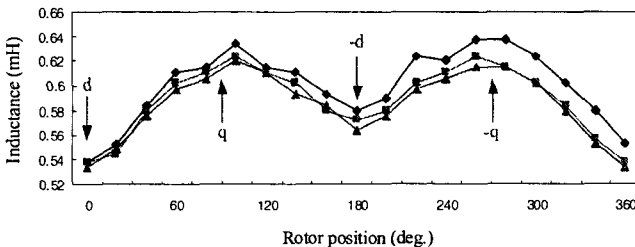


그림 2 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 크기 (3회 측정)

그림 2에서 알 수 있듯이, 고정자 권선의 인덕턴스는 회전자 자속이 권선을 통과하는 위치, 즉 회전자 d축의 위치에서 최소가 되고, q축과 -q축에

서 최대가 됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 성질을 이용하면 회전자와 고정자권선의 상대 위치를 알아낼 수 있다. 기존의 방법에서도 이러한 현상을 이용하여 여러 방향의 전압 벡터를 인가한 후 전류의 크기를 측정하고 그 중 가장 작은 인덕턴스를 보이는 방향을 회전자 d축 방향으로 추정하는 방법을 사용하였다.^[5] 그러나 1개의 전류 센서만을 사용하는 시스템의 경우, 인버터의 6가지 전압 벡터 방향만을 사용할 수 있으므로, 회전자 추정 해상도 (Resolution)는 전기각(Electric Angle) 60도 까지가 그 한계였다.

2.2 제안된 초기 위치 추정 방법

제안된 초기 위치 추정 방법은 회전자 d축의 위치를 60도 범위로 추정하는 과정과, 더 나아가 30도 범위로 다시 세분화하여 추정하는 과정으로 나뉘어 진다. 전체 추정 과정을 순서대로 나열하면 다음과 같다.

1) 먼저, V_1 과 V_4 를 인가하여 그 때 일정 시간 후 상승된 전류를 I_1 , I_4 라 하자. 식 (1)로부터 I_1 과 I_4 의 대소 관계는 V_1 과 V_4 방향의 인덕턴스의 대소 관계와 반대이므로, V_1 방향의 인덕턴스가 더 크다면 즉, I_1 이 I_4 보다 작다면 그림 3의 (a)에서와 같이 회전자 d축은 고정자 기준 좌표계의 우반(Right Half) 평면에 위치하게 된다.

2) 회전자 d축이 위치한 180도 범위 안의 나머지 두 전압 벡터를 인가하고 각 방향의 전류를 측정한다. 만약 그림 3의 (b)의 예에서는 V_2 와 V_6 를 인가하고 그 때의 상승 전류 I_2 와 I_6 를 측정한다. 그 후, 세 전압 벡터 방향의 인덕턴스의 대소 관계를 비교하여, 가장 인덕턴스가 큰 전압 벡터의 방향을 찾으면 60도 범위 안에서 d축의 위치를 추정할 수 있다. 만약 위의 예에서 V_1 방향의 인덕턴스가 가장 크다면 그림 3의 (b)의 영역에 회전자 d축이 위치한다고 추정할 수 있다.

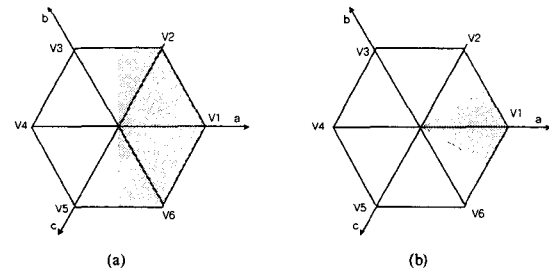


그림 3 180도, 60도 단위의 위치 회전자 위치 판별

3) 또한, 그림 4에서와 같이 나머지 두 벡터 방향의 인덕턴스를 비교하여, 어느 방향이 회전자의 q축에 가까운지 찾는다. 즉, 그림 4의 (a)에서처럼

V_2 의 방향의 인덕턴스가 V_6 방향의 인덕턴스보다 작다면, 회전자 d축의 위치는 15도에 있다고 추정할 수 있다. 반대로 V_2 방향의 인덕턴스가 더 크다면, 회전자의 위치는 그림 4의 (b)에서와 같이 345도에 있다고 추정할 수 있다.

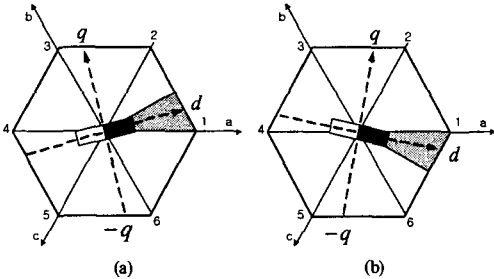


그림 4 30도 단위의 회전자 위치 판별

3. 추정된 초기 위치로부터의 기동 방법

3.1 기동 과정중의 회전자 위치 추정

앞 장에서 제안된 초기각 추정 방법으로 회전자의 초기 위치를 추정하면, 30도 범위 안에서 회전자의 초기 위치를 알 수 있다. BLDC 전동기의 토오크는 회전자 q축 전류에 의해서만 발생하고, 기동 과정 중의 회전 속도 및 역기전력은 무시한다고 가정할 때, 최대 토오크를 얻으려면 회전자 q축의 위치에 전압을 인가하여야 한다. 2장 1절에서 확인한 회전자 위치에 따른 고정자 인덕턴스 분포를 이용하면, 회전자의 위치를 30도 범위 안에서 계속 추정할 수 있으며 그 방법을 그림 5에 나타내었다.

그림 5의 (a)에서처럼 회전자의 위치가 330~0도 사이에 있을 경우를 예로 들면, 앞의 초기 위치 추정 과정에 의해 회전자의 위치는 345도로 추정되고, 이 때의 q축의 위치는 75도가 된다. 따라서 V_2 전압과 V_3 전압, 그리고 영전압(Zero Voltage, 원점)을 합성하여 평균 전압각을 75도로 하면, +/-15도의 오차 내로 q축에 근접한 전압을 주는 것이고, 그 결과 회전자는 반시계방향으로 회전하게 된다. 그 이후에 그림 5의 (b)에서처럼 회전자의 d축이 0도에 도달하게 되면, 회전자의 q축에서의 인덕턴스가 최대이므로, V_3 에서의 인덕턴스가 V_2 에서의 인덕턴스에 비해 커지게 된다. 따라서 V_2 방향의 인덕턴스와 V_3 방향의 인덕턴스를 계속 비교하다가 그 대소 관계가 바뀌면 그 시점에서 회전자 d축이 0도를 지난다고 생각할 수 있다.

회전자의 d축이 0도를 지났다고 판단되면, 회전자가 다음 영역으로 이동한 것이므로, 그림 5의 (c)에서처럼 회전자의 q축도 다음 영역으로 이동한 105도의 위치에 있다고 추정할 수 있다. 마찬가지로 V_2 와 V_3 그리고 0전압을 합성하여 평균 전압각을 105도로 하면, 회전자가 이 영역 안에 있을 때

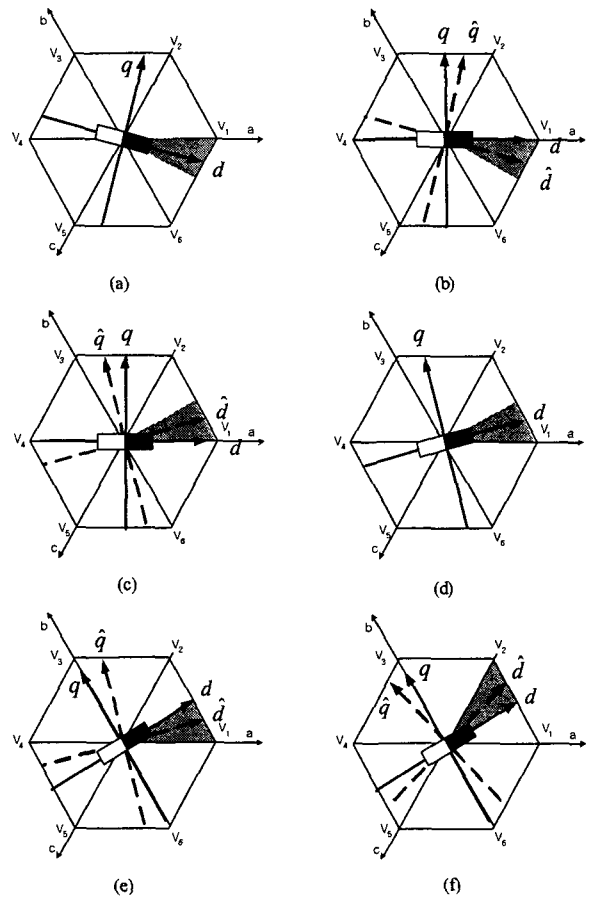


그림 5 실제 회전자 위치(실선축)와 추정 위치(점선축)

평균적으로 q축 위치에 전압을 주는 것이다. 이 때부터는 V_3 방향의 인덕턴스만을 측정하다가 회전자가 그림 5의 (d)의 위치를 지나 그림 5의 (e)와 같이 30도에 위치하게 되면 V_3 방향이 q축의 방향이 되므로 인덕턴스는 V_3 방향이 최대 값을 가지게 되고, 그 이상으로 회전하게 되면, V_3 방향의 인덕턴스는 감소하게 된다. 따라서 V_3 방향의 인덕턴스가 최대가 될 때를 회전자가 30도 위치에 다다른 시점으로 가정해 그림5의 (f)처럼 다음 영역으로 회전자의 추정 위치를 옮긴다. 그 경우, q축의 위치도 마찬가지로 30도 옮겨져서 135도가 되고, V_3 , V_4 , 영전압을 합성해 전압각 135도 방향의 전압을 합성해 인가해준다. 이 이후부터는 앞의 두 경우의 반복이므로, 같은 방식으로 회전자의 위치를 전기각 360도 구간 내내 추정하며 +/-15도의 오차 범위 내에서 q축의 위치에 전압을 인가할 수 있게 된다.

3.2 제안된 기동 방법의 구현

앞 절에서 제안된 방법을 구현하기 위해서는 한 스위칭 주기 안에 항상 두 전압 벡터와 영벡터의 세 가지 전압이 출력되며, 그 중 한 벡터, 혹은 두 벡터가 인가되는 시점에서 인덕턴스를 계속 측정하여야 한다. 이 때 인덕턴스를 측정하는 방법은 2.1 절에서 사용한 방법을 그대로 사용할 수 있으므로,

한번의 스위칭 주기 안에서 경우에 따라 한번 혹은 두 번의 전류 샘플링으로 구현이 가능하다. 그림 5의 (a)상황에서 스위칭 주기 내에서의 DC 전류 측정 전류 파형과 인가되는 전압 벡터의 종류와 시점을 그림 6에 나타내었다.

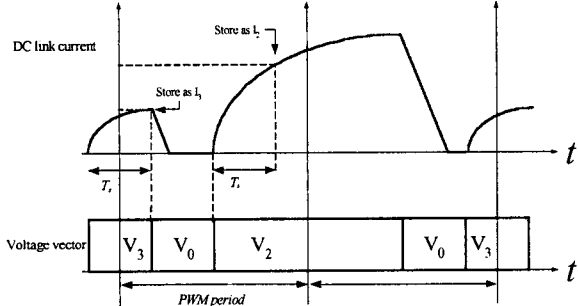


그림 6 기동 중의 DC link 전류 파형과 인가되는 전압벡터

4. 실험 결과

4.1 실험 장치의 구성

2장과 3장에서 제안된 초기각 추정 방법 및 기동 방법의 타당성을 검증하기 위해 그림 7과 같은 실험 장치를 구성하였다. 전동기는 12V 직류 전원을 입력으로 하는 MOSFET 3상 인버터로 구동되며, 인버터의 게이팅 및 알고리즘 구현을 위해 TMS320VC33 DSP 제어 보드를 사용하였다. DC 전류 측에는 한 개의 센싱(Sensing) 저항을 사용하여 DC 전류로 들어오는 전류를 측정한다. 전동기의 실제 회전각을 측정하여 추정된 회전각과 비교하기 위해 1000 Pulse Per Revolution(PPR)의 엔코더를 사용하였다.

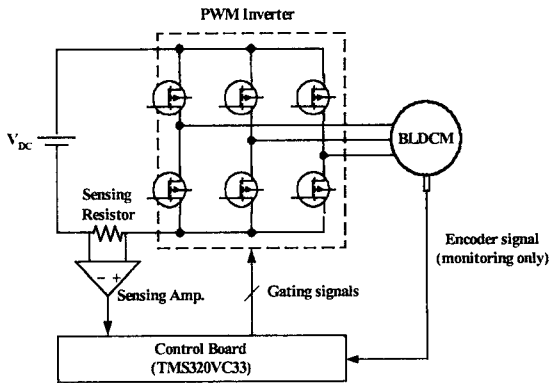


그림 7 실험 장치의 구성

4.2 초기 위치 추정 실험 결과

2.2절에서 제안된 초기 위치 추정 방법의 유효성을 확인하기 위하여, 회전자를 전기 각 12도 간격으로 돌리면서 제안된 추정 알고리즘으로 위치를 추정한 후 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 8에는 실제 위치와 추정된 위치와의 오차를 나타내었다. 예상한바와 같이 추정 오차는 ± 15 도 이내

임을 그림 8로부터 알 수 있다. 이는 추정 해상도가 30도 이내임을 의미한다.

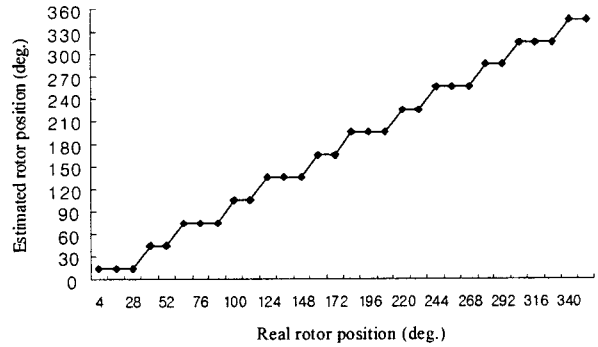


그림 7 실제 회전자 위치와 추정된 회전자 위치 (전기각)

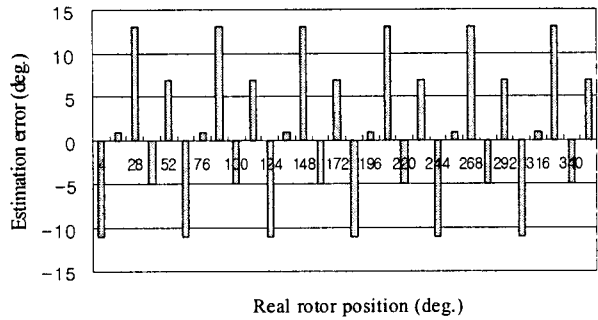


그림 8 실제 회전자 위치와 추정된 위치의 오차 (전기각)

4.3 기동 실험 결과

3장에서 제안된 기동 방법으로 실험 대상 전동기를 약 600r/min까지 기동한 파형을 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 추정 오차 $\pi/4$ 이내에서 실제 위치를 추정하고 있음을 알 수 있다.

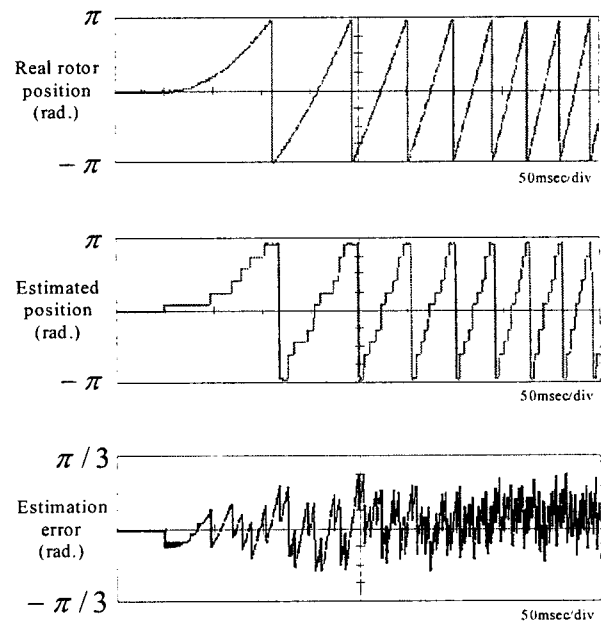


그림 9 정지시부터 600r/min까지 기동시의 실제 위치, 추정 위치 및 추정 오차 (전기각)

그림 10은 제안된 기동 방법으로 기동하면서, 외란(Disturbance)을 모의하기 위해 회전자를 손으로 잡은 뒤 다시 놓은 후의 실제 회전자 위치와 추정 회전자 위치의 파형이다. 그림 11은 통상적인 기동 방법인 open-loop로 전압 각을 돌려가며 기동시킬 때 같은 외란에 의한 실제위치와 인가되는 전압각의 파형이다. 제안된 기동 방법은 그림 10에서 알 수 있듯이 회전자의 위치를 계속 추정하고 있으므로, 외란이 제거 된 후에 다시 기동을 시작할 수 있는 반면에, 종래의 open-loop 기동 방법은 외란이 가해지면 동기 탈조(Out of Synchronization)하여 더 이상 가속(Acceleration)이 불가능함을 알 수 있다.

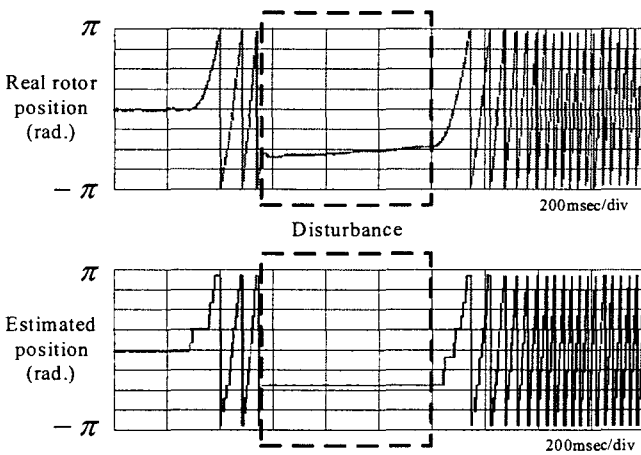


그림 10 제안된 기동 방법의 외란시 특성

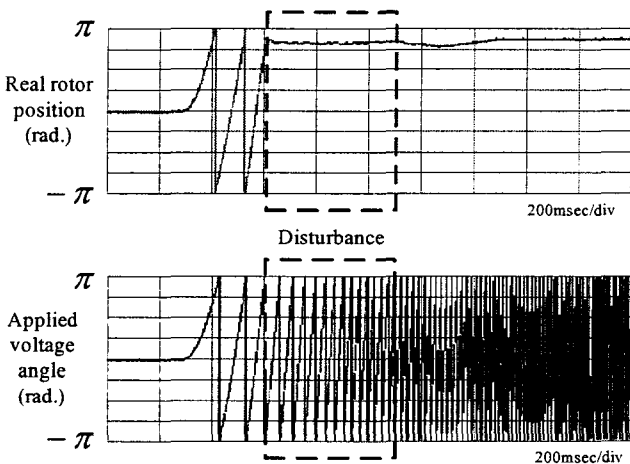


그림 11 Open-loop 기동 방법의 외란시 특성

5. 결론

본 논문에서는 소형 BLDC 전동기를 위치센서 없이 효과적으로 기동시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 첫 번째로 높은 기동 토크를 얻기 위해, 회전자의 초기 위치를 추정할 수 있는 방법을 제안

하고, 그 다음으로 동기 탈조의 위험 없이 기동시키기 위해, 앞의 방법으로 추정한 초기 위치에서부터 역기전력의 크기가 충분히 커지는 속도까지 회전자의 위치를 추정하면서 기동하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 유효성은 Hard Disk Drive의 spindle motor를 대상으로 한 실험을 통해 확인하였다.

제안된 방법은 고정자 인덕턴스의 대소 관계에 의해서만 위치를 판별하기 때문에 전동기의 전기적, 기계적 상수에 영향을 받지 않고, 추가적인 주입 신호가 필요 없으므로 다른 기존의 방법들이 비해 효율적이고, 구현이 간단하다. 또한, 부가의 하드웨어 없이 하나의 전류 센서만을 사용하므로 가격적인 측면에서도 여타의 방법에 비해 유리하다.

참고 문헌

- [1] Ji-Hoon Jang, Seung-Ki Sul, Jung-Ik Ha, K. Ide and M. Sawamura, "Sensorless drive of surface-mounted permanent-magnet motor by high-frequency signal injection based on magnetic saliency", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 39, no. 4, pp. 1031-1039, 2003.
- [2] M. Schroedl, "An Improved Position Estimation for Sensorless Controller Permanent Magnet Synchronous Motor," EPE Conf. Rec., pp. 3-418~423, 1991.
- [3] G. H. Jang, J. H. Park and J. H. Chang, "Position detection and start-up algorithm of a rotor in a sensorless BLDC motor utilizing inductance variation," IEE Proc. Electric Power Applications, vol.149, No.2, pp. 137-142, 2002
- [4] N. Matsui, " Sensorless PM brushless DC motor drives," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 43, no.2, pp. 300-308, 1996.
- [5] S. Nakashima, Y. Inagaki and I. Mili, "Sensorless initial position estimation of surface permanent-magnet synchronous motor," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 36, no. 6, pp. 1598-1603, 2000.