

# 인덕턴스의 변화를 이용한 브러시리스 DC 모터의 초기 구동 알고리즘 개발 및 구현

박재현\*, 장정환\*, 장건희\*

## Development of the Starting Algorithm of a Brushless DC Motor Using the Inductance Variation

Jaehyun Park\*, Junghwan Chang\*, Gunhee Jang\*

### ABSTRACT

This paper presents a method to detect a rotor position and to drive a BLDC motor from standstill to medium speed without any position sensor, comparing the current responses due to the inductance variation in the rotor position. A rotor position at a standstill is identified by the current responses of six pulses injected to each phase of a motor. Once the motor starts up, pulse train that is composed of long and short pulses, is injected to the phase corresponding to produce the maximum torque and the next phase continuously. It provides not only the torque, but also the information of the next commutation time effectively when the response of long and short pulses crosses each other after the same time delay. This method, which is verified experimentally using a DSP, can drive a BLDC motor to the medium speed smoothly without any rattling and time delay, compared with the conventional sensorless algorithm.

**Key Words** : Brushless DC motor(브러시리스 DC 모터), Sensorless control(센서리스 제어), Inductance(인덕턴스), Initial position detection(초기 위치 판별), Starting algorithm(초기 구동)

### 1. 서론

브러시리스 DC 모터(brushless DC motor)는 인버터(inverter) 회로를 통해 정류(commutation)를 하므로 정류시 회전자의 위치 정보가 필요하고, 많은 경우 위치 검출 센서(sensor)를 부착하여 위치 정보를 얻는다. 위치 검출 센서는 모터의 가격 및 크기를 증가시키고, 모터 구조를 복잡하게 할 뿐 아니라, 주변 온도나 습도 등 작동 환경에 제한을 받는다. 이런 이유로 위치 검출 센서 없이 브러시리스 DC 모터를 구동시키는 센서리스 구동 방법이 최근 많이 연구되고 있다.

센서리스 구동에 가장 많이 사용하는 방법이 역기전력(back EMF)을 이용하는 것이다. 모터에서 회전자가 회전하면 권선(winding)에 역기전력이 발생하는데, 권선의 각 상에서 발생하는 역기전력으로부터 회전자의 위치 정보를 얻을 수 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 역기전력은 모터의 회전 속도에 비례하기 때문에 정지시나 역기전력이 충분히 발생하지 않는 저속에서는 별도의 초기 위치 판별 및 초기 구동 알고리즘이 필요하다.

초기 구동 알고리즘 중에서 가장 많이 사용되는 방법이 align and go 방법이다<sup>[2]</sup>. 이 방법은 모터의 한 여자상에 전압을 인가하여 회전자를 정해진

\* 한양대학교 정밀기계공학과

위치로 이동시킨 후 외부에서 결정된 시간 간격에 따라 정류 신호를 순차적으로 모터에 인가하여 역기전력에 의한 위치 검출이 가능할 때까지 회전자를 가속시키는 방법이다. 그러나 이러한 방법은 회전자의 관성에 따라 align 되는 시간이 다르므로 모터에 따라 최적의 align 시간을 찾아야 할 뿐 아니라 회전자의 위치에 따라 구동 시키고자 하는 방향의 반대쪽으로 회전자를 이동시킬 수 있다. 또한 정류신호를 인가하는 시간 간격이 모터에 따라 달라지므로 모터의 사양이 바뀌면 시간 간격이 새로 계산되어야 하며 정확한 정류를 수행할 수 없다.

최근에는 초기 구동 방법 중에 인덕턴스를 이용한 방법이 연구되고 있다. 초기 위치 판별을 위해 Alain M. Cassat 은 각 상에 인가한 짧은 펄스에 의한 전류 상승 시간의 차이를 이용하였으며<sup>[3]</sup>, John C. Dunfield 와 Gunter K. Heine 는 각 상에 펄스를 인가하였을 때, 펄스가 인가되지 않은 상전압의 하강 시간의 차이를 이용하였다<sup>[4]</sup>. 하지만 이러한 방법들은 일반적으로 정지시에 회전자가 위치하게 되는 안정점(stable point) 즉 자기 저항이 최소화되는 지점부근에서는 회전자의 초기위치 판별이 어려우므로 실제 모터에 적용하기 힘들다. 그리고 Alain M. Cassat 은 초기 구동 시 초기 위치 판별에 이용한 6 개의 전류 펄스와, 모터를 회전시키기 위한 여자상을 번갈아 인가하여 저속에서의 초기 구동을 하였다<sup>[5]</sup>. 하지만 이 방법은 6 개의 전류 펄스 중에서 회전 방향과 반대 방향의 토크를 발생시키는 여자상이 있으므로 평균 토크가 낮아져 회전자의 가속 시간이 길어질 뿐 아니라 6 개의 펄스에 의한 위치 판별 주기가 길어져 속도가 증가하면 사용하기 어렵다.

본 논문에서는 인덕턴스의 변화를 이용, 앞에서 기술한 단점을 보완하여 초기 위치를 판별하고 초기 구동을 시행할 수 있는 알고리즘을 제시하였으며 시스템을 구축하여 그 타당성을 확인하였다.

## 2. 회전자의 위치 판별

### 2.1 인덕턴스의 변화

BLDC 모터의 자기 회로에서 전체 쇄교 자속  $\lambda_{phase}$  는 영구자석에 의한 쇄교 자속  $\lambda_{PM}$  과 전류에 의해 생기는 쇄교 자속  $Li$  의 합으로 표시할

수 있다.

$$\lambda_{phase} = \lambda_{PM} + Li \quad (2.1)$$

여기서,  $L$  은 여자된 상의 전체 인덕턴스이며, 전류와 회전자의 위치에 따른 함수이다. 그러므로 여자된 상과 쇄교하는 전체 자속은 코일에 흐르는 전류 및 영구 자석으로 구성된 회전자의 위치에 따라 증가하거나 감소하게 되며 동일한 위치에서 전류는 전체 쇄교 자속의 포화정도를 결정한다.

Fig. 1 은 모터에 인가한 전류에 의한 여자상의 전체 쇄교 자속을 나타낸 것으로 고정자 치(teeth)의 포화(saturation)에 의해 비선형적으로 변화한다. 영구자석에 의한 자속과 같은 방향의 자속을 발생시키는 전류  $i^+$  를 모터에 인가하였을 때, 전체 쇄교 자속은  $\Delta\lambda^+$  만큼의 변화를 갖게 되고, 영구 자석에 의한 자속과 반대 방향의 자속을 발생시키는 전류  $i^-$  를 모터에 인가하였을 때, 전체 쇄교 자속은  $\Delta\lambda^-$  만큼의 자속의 변화가 생긴다. Fig. 1 에서 알 수 있는 것처럼  $i^+$  를 인가했을 때의 전체 쇄교 자속의 변화가  $i^-$  를 인가했을 때의 전체 쇄교 자속의 변화보다 작다.

식(2.1)에서, 전류  $i^+$  에 의한 인덕턴스를  $L^+$  라 하고, 전류  $i^-$  에 의한 인덕턴스를  $L^-$  라 하면, 각각의 인덕턴스는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} L^+ &= \frac{\lambda_{phase} - \lambda_{PM}}{i^+} = \frac{\Delta\lambda^+}{i^+} \\ L^- &= \frac{\lambda_{phase} - \lambda_{PM}}{i^-} = \frac{\Delta\lambda^-}{|i^-|} \end{aligned} \quad (2.2)$$

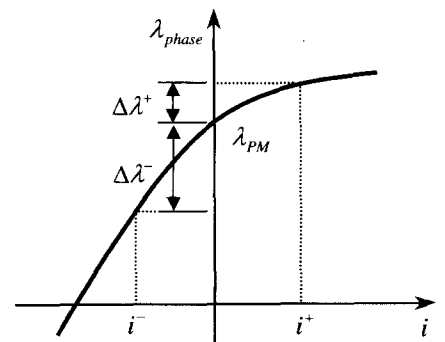


Fig. 1 Flux change due to the direction of current

$\Delta L^+ < \Delta L^-$  이므로, 인덕턴스의 상대적인 크기는 다음과 같다.

$$L^+ < L^- \quad (2.3)$$

인덕턴스의 크기 변화에 의한 전류 응답 특성은 식 (2.4)의 전압 방정식을 이용하여 알 수 있다.

$$v_s = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.4)$$

여기서  $v_s$ 는 단자 전압,  $R$ 은 여자된 두 상의 전체 저항 그리고  $e$ 는 역기전력이다. 모터가 정지 상태에 있을 때 역기전력은 발생하지 않으므로 식 (2.4)에서 전류를 구하면 다음과 같다.

$$i = \frac{v_s}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (2.5)$$

식 (2.2)의 두 경우의 인덕턴스에 대한 전류 파형은 Fig. 2와 같다. 이 그림에서, 인덕턴스가 작은 전류  $i^+$ 가  $i^-$ 보다 빨리 상승함을 알 수 있으며 정해진 시간  $T$ 에서 전류의 크기는  $\Delta i$ 만큼의 크기 차이를 가진다. 모터의 회전자의 위치는 펄스를 인가하였을 경우 정해진 시간에서 이와 같은 전류 응답의 크기 차이로부터 얻을 수 있다.

### 2.2 초기 위치 판별

Fig. 3 (a)는 HDD(Hard Disk Drive)에 쓰이는 8극 12슬롯 모터의 구조로 회전자와 고정자의 상대 위치를 그림과 같이 정의한다. 또한 3상 모터에서는 6개의 여자상이 있으므로 3쌍의  $i^+$ 와  $i^-$ , 즉

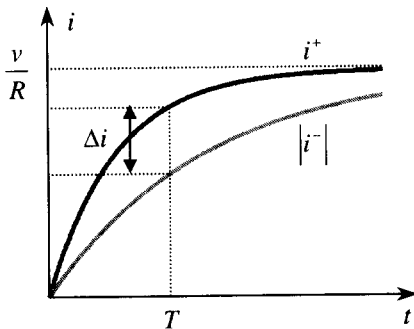


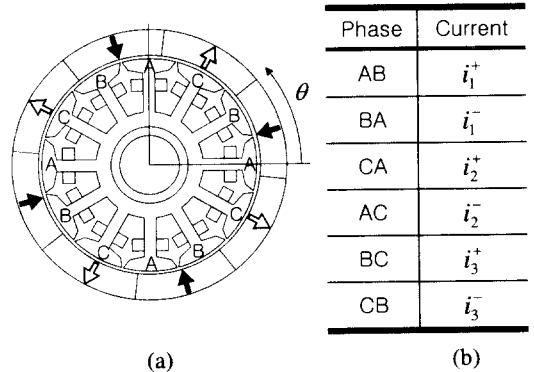
Fig. 2 Response of the current due to the inductance variation

회전자의 위치 판별을 위한 3쌍의 전류를 Fig. 3 (b)와 같이 정의 한다. Fig. 4는 Fig.3 (a)의 위치에서부터 6개의 여자상에 대해 전기각 360° 동안의 회전자와 고정자의 상대 위치에 따른 인덕턴스를 유한요소법(finite element method)으로 구하고, 펄스를 인가한 후 일정 시간후의 전류 응답을 구한 그림이다.

Fig. 5는 Fig. 4에서의 3쌍의 전류에 대해 전류의 차이  $\Delta i$ 를 구한 것이다.  $\Delta i$ 가 양의 부호를 가지면,  $i^+$ 은 영구자석에 의한 자속과 같은 방향의 자속을 만들고,  $\Delta i$ 가 음의 부호를 가지면  $i^+$ 은 영구자석에 의한 자속과 반대방향의 자속을 만들게 된다. 이 그림에서, 전기각 60° 마다 3개의  $\Delta i$ 의 부호가 다름을 알 수 있다<sup>[3]</sup>.

모터의 회전자는 일반적으로 모터 자기 회로의 자기 저항(reluctance)을 최소화하는 지점 근처에서 정지하는데 이점은 Fig. 5의 P<sub>1</sub>에서 P<sub>6</sub>의 여섯 지점이다. 이 위치에서는 하나의  $\Delta i$ 가 영에 가까우므로, 3쌍의 부호로서 회전자의 위치를 판별하기가 힘들다.

Fig. 6은 이러한  $\Delta i$ 들의 차이  $\Delta \Delta i$ 를 나타낸 그림으로 3쌍의  $\Delta \Delta i$ 의 부호가 P<sub>x</sub> 점의 근처에서도 바뀌지 않으므로 초기 위치 판별을 쉽게 할 수 있다. 따라서, 6개의 펄스로부터 구한 3개의  $\Delta \Delta i$ 의 부호로서 초기 위치를 판별할 수 있다. Table 1은 회전자의 위치에 따른  $\Delta \Delta i$ 의 부호이다.



(a) A BLDC motor with 8 poles and 12 slots  
(b) 6 phase current

Fig. 3 A BLDC motor and phase current

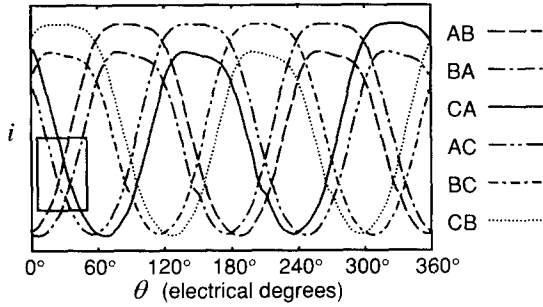


Fig. 4 Response of the phase currents due to the rotor position

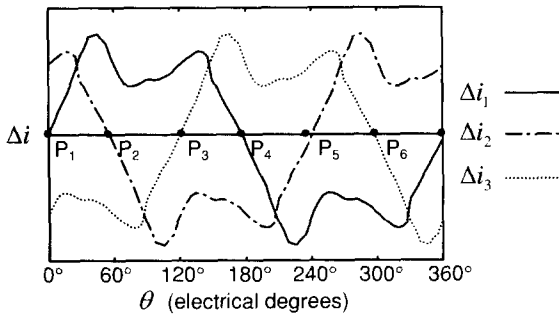


Fig. 5  $\Delta i$  due to the rotor position

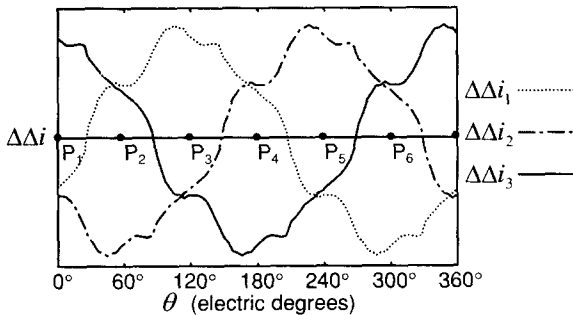


Fig. 6  $\Delta\Delta i$  due to the rotor position

Table 1 Polarity of  $\Delta\Delta i$  due to the rotor position

position	$\Delta i_1 - \Delta i_2$	$\Delta i_2 - \Delta i_3$	$\Delta i_3 - \Delta i_1$
	$\Delta\Delta i_1$	$\Delta\Delta i_2$	$\Delta\Delta i_3$
30°~90°	+	-	+
90°~150°	+	-	-
150°~210°	+	+	-
210°~270°	-	+	-
270°~330°	-	+	+
330°~30°	-	-	+

### 2.3 초기 구동

모터의 초기 위치 판별 후에 모터를 구동시키기 위해서는 전기각 60° 마다 한 방향으로 최대 토크를 발생시키는 여자상을 정류해야 한다. Fig. 7 은 6 개의 여자상에 각각 전류를 인가하였을 때 회전자의 상대 위치에 따른 각 여자상의 토크 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 회전자는 회살표 방향으로 토크를 생성하고 xy 상의 안정점인  $S_{xy}$ 로 움직인다.

또한 구동과 함께 위치 판별을 하기 위해서는 모터를 회전시키기 위한 최대 토크 여자상과, 회전자의 위치 판별을 위한 펄스를 동시에 인가해야 한다. Fig. 7 에서와 같이 회전자가  $S_{CB}$  지점을 통과할 때 AB 에서 AC 로의 정류가 일어나야 회전자가 한 방향으로 최대 토크를 유지한다. Fig. 8 은 위치 판별을 위한 Fig. 4 의 왼쪽 아래 작은 사각형 부분을 확대한 그림이다. Fig. 8 의  $S_{CB}$  지점 부근에서 4 개의 여자상의 전류 응답의 크기가 서로 교차하는데 Fig. 7 로부터 AB 상과 AC 상은 이 구간에서 회전자의 회전 방향과 같은 방향의 토크를 내는 상이고, BA 상과 CA 상은 반대 방향의 토크를 내는 상이다. 모터를 회전하면서 위치

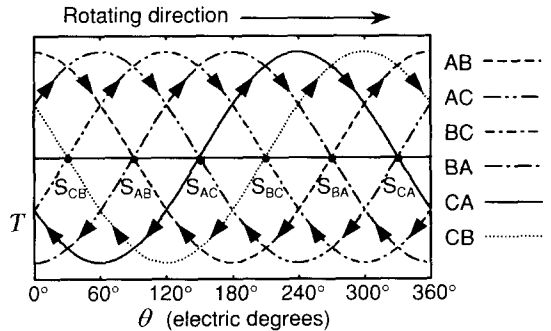


Fig. 7 Torque curve of each phase

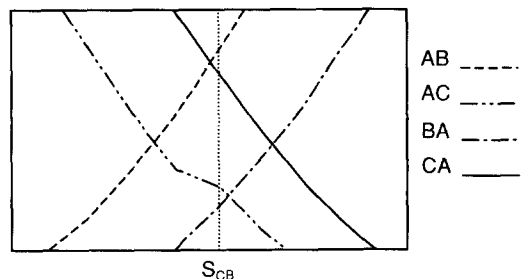


Fig. 8 Phase current at the commutation position

판별을 수행하기 위해서는 이 구간에서 회전 방향의 토크를 내는 AB 상과 AC 상의 교차 지점을 이용해야 한다. AB 상은  $-30^\circ \sim 30^\circ$  구간에서 최대 토크를 내는 여자상이고 AC 상은 다음 구간인  $30^\circ \sim 90^\circ$  에서 최대 토크를 내는 여자상이다. Fig. 8 에서 알 수 있듯이 회전 방향을 따라 AC 상의 전류 응답의 크기는 감소하고 AB 상의 전류 응답의 크기는 증가하여  $S_{CB}$  지점 부근에서 교차한다. 그러므로 각 위치에서 모터를 회전시키기 위한 최대 토크 여자상과 회전자의 위치 판별을 위한 다음 여자상에 펄스를 연속적으로 인가하는 방법을 사용하면 모터의 구동과 함께 회전자의 위치 판별을 동시에 수행할 수 있다.

Fig. 9 (a)는 초기 구동을 위한 펄스열(pulse train)의 구성이고 (b)는 펄스열의 전류 응답이다.

Fig. 9 (a)에서  $P_{phase}$  는 정류 구간에서 회전 방향으로 최대 토크를 내는 여자상이고 위치 판별을 위한  $P_{pulse}$  는 다음 구간의 여자상이다. 즉 정류 후  $P_{pulse}$  여자상은  $P_{phase}$  가 되는 것이다. Table 2 는 이와 같이 각 정류 구간을 구성하는 펄스열을 나타

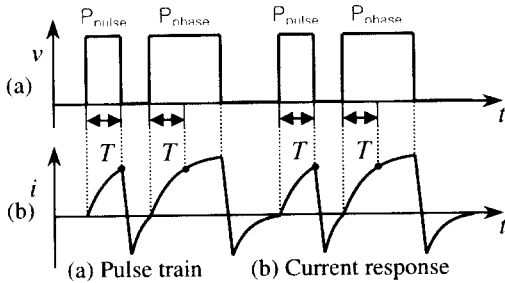


Fig. 9 Pulse train and its response

Table 2 Composition of pulse train according to Rotor position

electrical position	$P_{phase}$	$P_{pulse}$
$30^\circ \sim 90^\circ$	AC	BC
$90^\circ \sim 150^\circ$	BC	BA
$150^\circ \sim 210^\circ$	BA	CA
$210^\circ \sim 270^\circ$	CA	CB
$270^\circ \sim 330^\circ$	CB	AB
$330^\circ \sim 30^\circ$	AB	AC

낸 것이다. Fig. 9 (b)에서처럼  $P_{pulse}$  의 여자 시간 T에서의 전류의 크기와, 동일한 시간 후의  $P_{phase}$  의 전류의 크기를 비교하여  $P_{phase}$  의 크기가  $P_{pulse}$  의 크기보다 커지는 점이 정류 지점이다. 이러한 방법으로 초기 구동을 하여 회전자를 가속할 수 있다.

### 3. 시스템 구성 및 실험

#### 3.1 시스템 구성

이상에서 제안한 알고리즘을 기반으로 DSP 를 사용하여 모터의 구동과 속도를 제어하고 실시간으로 모터의 속도를 비롯한 각종 파라미터를 모니터링 하기 위해 Fig. 10 과 같은 시스템을 구축하였다.

우선 사용자가 PC 프로그램에서 모터 구동에 필요한 기본값들을 입력하면 DSP 가 그 값을 받아 모터 구동 및 속도 제어를 위한 모든 작업을 수행하여 현재 속도, 상전압, 전류, 역기전력, 토크 등의 정보를 PC 로 전달한다.

Fig. 11 은 PC 프로그램의 출력창이다. PC 프로그램은 초기 화면에서 제어할 속도를 입력받고 기계적 회전 속도를 계산하기 위한 모터의 극 수와 역기전력 계산을 위한 상저항을 입력 받는다. 출력 창에는 4 개의 채널을 통한 회로를 통해 실시간으로 모니터링 할 수 있는데, 각 채널당 선택할 수 있는 파형은 상전압, 전류, 역기전력, 토크이다. 전류는 인버터의 DC 링크 단에 있는 션트(shunt) 저항을 이용하여 측정되며 측정된 전류값은 초기

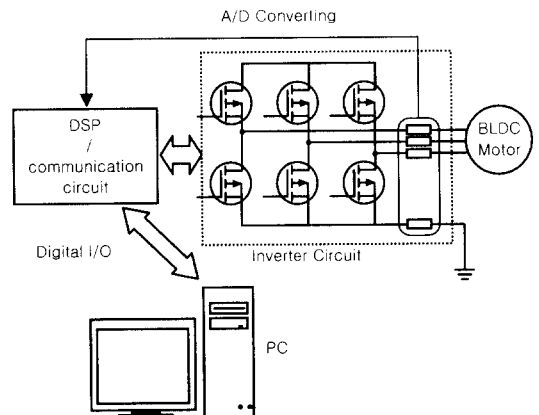


Fig. 10 The System configuration of the sensorless BLDC motor driver

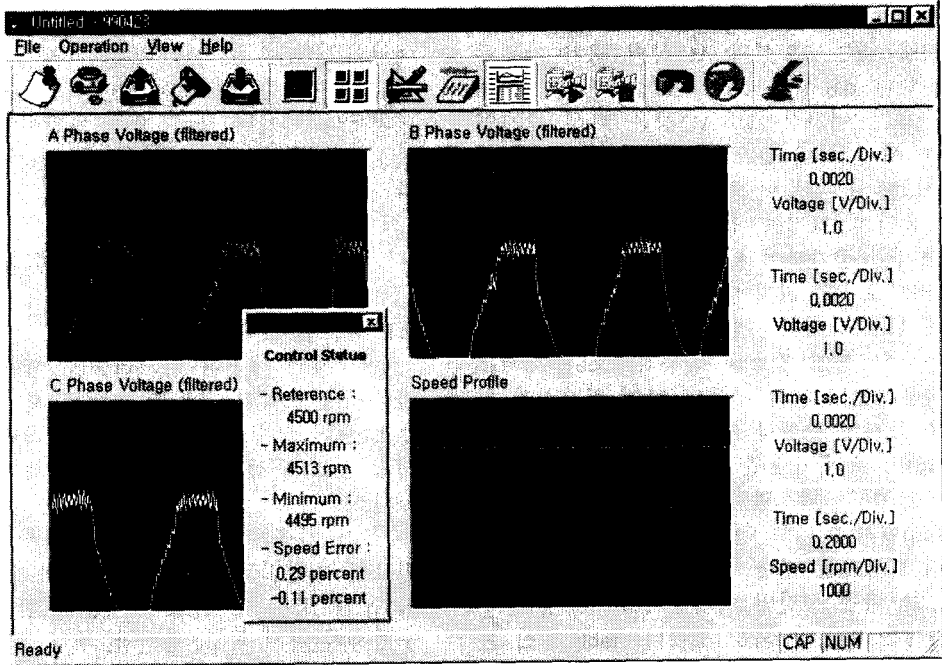


Fig. 11 Output windows of PC program

위치 판별과 초기 구동에 사용된다.

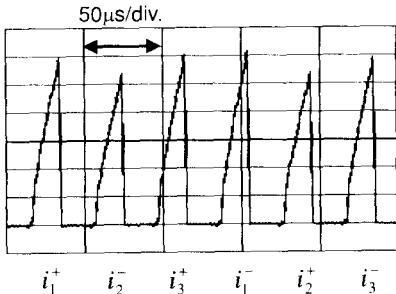


Fig. 12 Phase current to detect the initial detection

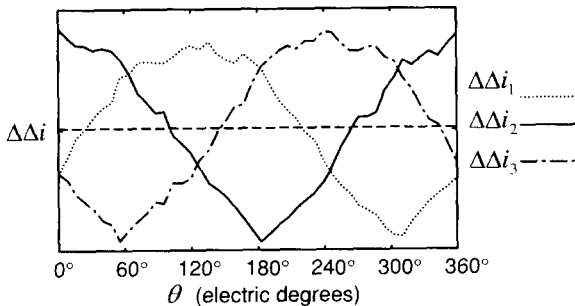


Fig. 13 Experimental data of  $\Delta\Delta i$

그리고 초기 구동시 각 펄스 사이에서는 모터의 인덕턴스에 의해 남아 있는 전류를 빨리 감쇄시키기 위해 인버터를 구성하는 상위 트랜지스터와 하위 트랜지스터를 동시에 OFF시키는 하드 초핑(hard chopping)이 사용되었다.

### 3.2 초기 위치 판별

Fig. 12는 초기 위치 판별을 위한 6개의 펄스에 대한 전류 응답이다. 본 논문에서 제시한 알고리즘으로 초기 위치를 계산하면 회전자가  $150^\circ \sim 210^\circ$  사이에 위치해 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 13은 전기각  $8^\circ$ 마다 펄스에 대한 전류 응답을 실험으로 측정된 것으로 전기각  $360^\circ$  동안의  $\Delta\Delta i$ 를 그린 그림이다.

### 3.3 초기 구동

Fig. 14는 구동시 회전자의 위치 파악을 위해 측정된 펄스열의 윗 부분을 확대한 그림이다. 이 그림에서  $P_{pulse}$ 의 크기는 줄어들고 있음을 알 수 있다. Fig. 15(a)는 정류 직전의 펄스열이고, Fig. 15(b)는 정류 직후의 펄스열이다. Fig. 15(a)에서,  $P_{pulse}$ 의 크기와  $20\mu\text{sec}$ 에서의  $P_{phase}$ 의 크기가 같아지고,

Fig. 15(b)에서는  $P_{pulse}$ 의 크기가  $20\mu sec$ 에서의  $P_{phase}$ 의 크기보다 커진 것을 볼 수 있다. 이와 같이 펄스열을 이용하여, 실험에 사용된 모터는 2300rpm 까지 회전자를 가속시킬 수 있었다.

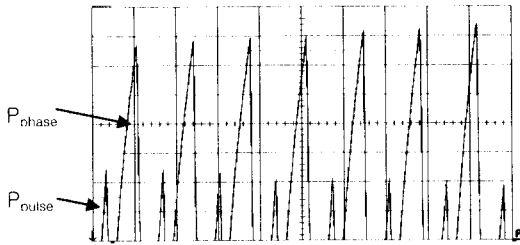


Fig. 14 Pulse train during the start-up

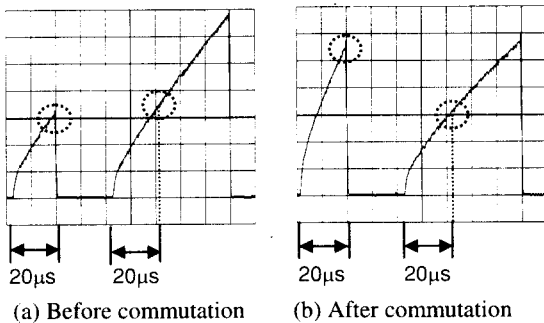


Fig. 15 Transition of pulse train at the commutation position

### 3.4 속도 제어

펄스열을 이용한 초기 구동으로 역기전력이 충분히 나올 수 있는 속도에 이르면, 역기전력을 이용한 구동방법으로 전환하고 속도 제어를 수행하였다. 속도 제어에는 PWM(Pulse Width Modulation)과 PI 제어를 사용하였고, Fig. 11에서와 같이 4500rpm에서 속도 오차가 0.3% 이내에 들어감을 볼 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 인덕턴스의 변화를 이용한 모터의 초기 위치 판별과 초기 구동 알고리즘을 개발하였다.

초기 정지 위치는 6개의 여자상에 짧은 펄스를 인가하여 전류 및 회전자의 위치에 따른 인덕

턴스의 변화를 이용하여 구하고 초기 위치에 따른 첫 정류 신호를 결정하였다. 초기 구동은 모터에 최대 토크를 내는 여자상과 위치 판단을 위한 여자상에 번갈아 펄스를 입력함으로써 다음 여자상을 결정하여 정류를 수행한다. 초기 구동 후 역기전력이 검출될 수 있는 속도가 되면 권선에 유기된 역기전력을 이용하여 모터를 구동하고 속도제어를 수행하였다. 또한 제안된 구동 알고리즘을 이용하여 3상 Y 결선 형태의 브러시리스 DC모터를 구동할 수 있는 시스템을 개발하여 PC에서 모터의 각종 정보를 실시간으로 모니터링 할 수 있게 하였다.

본 논문에서 제안된 구동 알고리즘은 회전자의 관성에 무관하게 적용할 수 있을 뿐 아니라 초기 위치 판별 시 회전자의 흔들림이 없고 짧은 시간 안에 가속할 수 있다.

## 참고문헌

1. K. Iizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo, and K. Mohri, "Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor," IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. IA-21, No. 4, pp. 595-601, May/June 1985.
2. S. Ogasawara and H. Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless dc Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 5, pp. 928-933, Sep 1991.
3. Alain M. Cassat, Pully, Switzerland, "Position Detection for a Brushless DC Motor", US patent 5001405, March 1991.
4. John C. Dunfield, Gunter K. Heine, "Position Detection for a Brushless DC Motor without Hall Effect Devices Using a Mutual Inductance Detection Method", US patent 5254914, Oct. 1993.
5. Alain M. Cassat, Laurent Cardoletti, "Closed-loop control of a brushless DC motor from standstill to medium speed," US patent 5117165, May 1992
6. P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, Simulation and Analysis of a Permanent Magnet Brushless DC Motor Drive," IEEE CH2499-2/87/000-0007, pp. 7-14, 1987.
7. T. J. E. Miller, Brushless Permanent-Magnet and

- Reluctance Motor Drives, Oxford University Press, 1989.
8. P. C. Krause and O. Wasynczuk, Electromechanical Motion Devices, McGraw-Hill, Inc., 1989
  9. P. I. Lin and M. Rashid, "A PC-Based Measurement and Control System for DC Motors," IEEE CH2935-5/90/0000-1829, pp. 1829-1834, 1990.
  10. L. Cardoletti, A. Cassat, and M. Jufer, "Sensorless Position and Speed Control of a Brushless DC Motor from Start-up to Nominal Speed", EPE Journal Vol.2, No.1, pp25-34, March 1992.
  11. J. R. Hendershot Jr. and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Magna Physics Publishing, 1994.
  12. N. Ertugrul and P. Acarnley, "A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 1, pp. 126-133, Jan/Feb 1994.
  13. Giuseppe Maiocchi, Villa Guardia, "Start-Up Procedure for a Brush-less, Sensorless Motor," US patent 5343127, Aug. 1994.
  14. J. Dunfield and G. Heine, "Starting Algorithm for Brushless DC Spindle Motors," Proc. 24<sup>th</sup> Annu. Symp. Incremental Motion Control Systems and Devices, pp. 81-86, Jun. 1995.