

위치센서없는 영구자석 매입형 전동기의 기동 방식

이준환*, 김태덕
삼성전자

Starting Method of BLDC Motor from Standstill to Medium Speed Without any Position Sensor

LEE Joon-Hwan*, KIM Tae-Duk
SamSung Electronics

ABSTRACT

From standstill to medium speed which enough to sensing back EMF, it is not easy to drive without additional equipments due to directly proportional to flux. Conventional method to drive is 'align and go' method, so called v/f control that is increased voltage duty in proportion to the increase of frequency. Because it isn't consider load of motor and doesn't know rotor position exactly, current is supplied too much current or not enough to rotate motor.

This paper is proposed starting method without any position sensor and can drive a BLDC motor from standstill to the medium speed smoothly without any rattling and time delay compared with the conventional starting algorithm. To verify algorithm of this paper, experimental results are presented.

1. 서 론

영구자석 매입형 BLDC Motor는 회전자에 부착되어 있는 영구자석으로부터 자속을 공급받기 때문에 최대의 토크를 발생시키기 위해서는 회전자의 절대 위치(Absolute Position)를 정확하게 알고 있어야 한다. 레졸버(Resolver), 엔코더(Encoder) 또는 홀센서(Hall Sensor)등을 이용하여 회전자의 위치를 판단하는 방식이 일반적으로 사용되고 있다. 이러한 장치를 사용할 경우 공간적인 제약 및 가격의 상승으로 인해 사용이 제한되어 왔다. 위치센서를 사용하지 않는 구동 방식으로 단자 전압(Back EMF)을 이용한 센서리스 운전방식이다. 이러한 단자전압 센서리스 운전을 하기 위해서는 수백 rpm까지 운전할 수 있는 초기 기동 방식이 필요하다.

최근 많은 논문에서 제안하는 기동방식은 고주파 주입 방식^[1,2,3], Test 전압 주입방식^[4,5], 전동기의 수학적 모델링^[6]을 이용한 방식 등이 있다. 고주파주입방식은 전동기의 운전주파수 보다 높은 고주파를 주입하면 상대적으로 운전 주파수에 비하여 인가 주파수가 높기 때문에 전동기는 정지 시와 유사하게 생각할 수 있으며 고정자 저항에 의한 전압 강하는 무시될 수 있으므로 인가전압은 인덕턴스에 의한 전

압강하 성분으로 나타난다. 이때 상전류의 값을 LPF(Low Pass Filter)로 차단하게 되면 고주파 주입성분이 남게 되고 이를 이용하여 회전자의 위치를 판단하게 된다. 이는 상전류를 Sensing할 수 있는 장치의 추가 및 위치 판단을 위한 빠른 연산 및 좌표계의 변환으로 고가의 Processor를 필요로 하게 된다. Test 전압 주입방식은 정 토크를 발생하는 스위칭 상태를 인가하며 추가적으로 회전자의 현재 위치를 판단하기 위한 Test전압 Pulse를 인가하는 방식이다. 이는 정 토크 성분 이외에 추가 pulse에 의해 스위칭 소음 및 저효율을 야기할 수 있게 된다. 또한 Test pulse를 판단하기 위한 고가의 AD가 필요로 하게 되어 가격 상승의 원인이 되기도 한다. 전동기의 수학적 모델을 이용한 방식은 가전분야에서 수학적 모델을 이용하여 processor 연산에 제약이 따른다.

위와 같은 많은 알고리즘에도 불과 하고 현재까지 가전에 사용되는 BLDC Motor의 초기 기동 알고리즘은 강제정렬 후 기동하는 방식(Align and Go)이 가장 폭 넓게 사용되고 있다. 120도 도통방식은 구현이 쉬우며 스위칭 손실이 적은 장점을 가지고 있어 가전분야에 많이 사용되는 방식이다. 이러한 기동 방식은 회전자의 관성에 따라 정렬되는 시간이 다르며 회전자와 고정자의 상대 위치에 따른 정류 대신, 임의로 결정된 시간 간격을 가진 정류 신호를 차례대로 모터에 인가하여 속도를 증가시키는 방식이 가장 일반적이다. 또한 이는 모터에 따라 관성 등이 각기 계산되어야 하므로 사양이 바뀌면 시간 간격이 새롭게 설정되어야 하는 문제점이 있다.

본 논문에서는 저가의 processor에서 실현 가능하고 저속에서 회전자의 위치정보를 정확하게 파악하여 그에 해당하는 적절한 전류를 인가함으로써 기동시의 전류 저감, 기동 시간 단축 및 압축기 기동시의 진동저감 등을 그 목적으로 하는 새로운 기동 방식을 제안한다. 또한 실험으로 제안한 방식의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 연구 배경

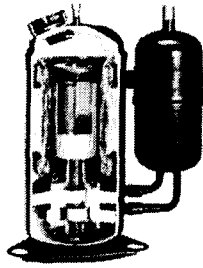


그림 1 에어컨용 압축기 및 Motor
Fig. 1 Compressor and Motor of Air Condition

에어컨 제품에 사용되는 압축기의 모터는 영구자석 매입형 BLDC Motor를 사용하며 고효율 및 저소음 등의 많은 장점을 이용한 가전용 BLDC Motor의 sensorless 제어 방식은 정지 중에 회전자의 위치에 대한 정보 파악이 되지 않기 때문에 강제적인 기동방법을 택하고 있으며 이때 회전자의 정확한 위치에 대한 정보가 없이 임의의 강제적인 Sequence에 따른 기동방법을 적용함으로써 과도한 상전류가 인가되게 되며 이로 인한 구동과워 소자인 IPM(Intelligent Power Module)의 정격 상승을 야기 하여 이로 인한 재료비 상승의 문제점이 발생된다. 압축기가 점점 대용량화되어 감에 따라 IPM의 정격을 결정하는 요인이 초기 기동시의 과도한 전류량에 따라 IPM의 용량이 결정되기도 하며, 이에 따라 초기 기동 방식의 새로운 알고리즘이 필요하게 되었다.

2.2 Inductance Characteristics

3상 BLDC 모터의 수학적 Model은 다음과 같다. 여기서 V_{am}, V_{bm}, V_{cm} 은 모터의 상 전압이고 R_a, R_b, R_c 은 코일의 저항, $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ 은 권선의 쇄교 자속 이며 이는 회전자의 위치와 전류의 함수로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} V_{am} \\ V_{bm} \\ V_{cm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

이때 쇄교 자속 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \lambda_{am} \\ \lambda_{bm} \\ \lambda_{cm} \end{pmatrix} \quad (2)$$

또한 각상이 전기각 120도를 이루고 있으므로 상호 인덕턴스(mutual inductance)는 다음과 같이 표현된다.

$$L_{ij} = L_{ss} \cdot \cos\theta \Big|_{\theta=2\pi/3} = -0.5L_{ss} \quad i, j = a, b, c (i \neq j) \quad (3)$$

여기서, L_{ss} 는 자기인덕턴스(self inductance)이다. 공극이 일정하다고 가정하고 누설자속을 무시하면, 인덕턴스는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{ss} & -0.5L_{ss} & -0.5L_{ss} \\ -0.5L_{ss} & L_{ss} & -0.5L_{ss} \\ -0.5L_{ss} & -0.5L_{ss} & L_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \lambda_{am} \\ \lambda_{bm} \\ \lambda_{cm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서, 고정자의 권선에서 바라본 영구자석의 쇄교자속 λ_m 은 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_m = [\lambda_{am} \ \lambda_{bm} \ \lambda_{cm}]^T \quad (5)$$

BLDC Motor의 역기전력은 영구자석의 쇄교자속의 단위 시간당 변화율로 표현 되므로,

$$\frac{d}{dt} \lambda_m = E_{abc} = [E_a \ E_b \ E_c]^T \quad (6)$$

BLDC Motor에 있어서는 영구자석, 권선 구조로 이루어진 철심, Slot 혹은 Yoke에서 자속의 포화 현상이 발생할 수 있으며 또한 전류는 자속의 포화에 영향을 주는 인자이므로 자속의 포화 곡선으로부터 단위 전류를 인가 시 포화 곡선에 의한 입력전류의 차이를 파악 할 수 있게 된다. 즉, 두상(예를 들면 U,V상)에 전류(i_{phase})를 인가하면 자기회로에서 모터에 흐르는 전체의 자속 λ_{phase} 는 회전자의 위치에 따른 영구자석에 의해 발생하는 λ_{PM} 과 인가 전류에 의해 발생하는 쇄교자속 $L_{phase} \cdot i_{phase}$ 의 합으로 표현 가능하다.

$$\lambda_{phase} = \lambda_{PM} + L_{phase} \cdot i_{phase} \quad (7)$$

여기서, L_{phase} 는 여자된 상의 전체 인덕턴스이며, 전류와 회전자의 위치에 따른 함수이다. 결과적으로 모터에 흐르는 전체 자속은 전류의 영향에 따라 증가되거나 감소되며, 자속의 포화 정도를 결정한다. BLDC와 같은 영구자석 회전자인 경우는 회전자에 의한 고정 Flux성분이 존재 하며 이를 고려한 것이 λ_{phase} 가 된다.

그림 2에서, A점은 인가 전류가 없을 경우 Magnet에 의해 발생하는 Flux에 의한 λ_{phase} 점이 된다. BLDC 전동기는 회전자의 형상에 돌극성이 없기 때문에 이론적으로는 회전자의 위치에 상관없이 일정한 고정자 인덕턴스를 갖는다. 그러나 실제로는 회전자의 자석이 통과하면서 만들어 내는 자속이 고정자 코어(Core)를 통과하면서 코어의 부분적인 포화(Saturation) 현상을 일으킨다. 이러한 부분적인 포화 현상으로 인하여 고정자권선에 일정한 전압을 인가 하였을 때 증가하는 전류의 시 변화율, 즉 인덕턴스가 회전자 자석의 위치에 따라 변하게 된다.

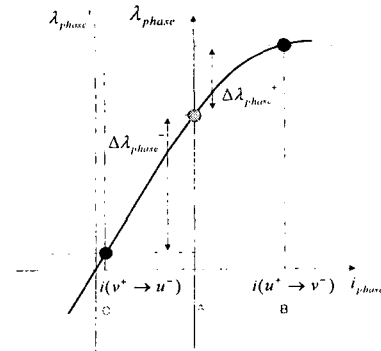


그림 2 영구자석 매입형 전동기의 인가전류에 따른 Flux 특성 곡선
Fig. 2 The Characteristic between current and flux

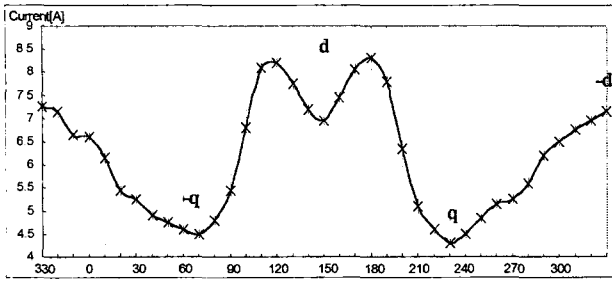


그림 3 회전자의 위치에 따른 공급 전류량
Fig. 3 The current waveform according to angle

그림 3과 같이 고정자 권선의 인덕턴스는 회전자 자속이 권선을 통과하는 위치, 즉 회전자 d축에서 최소가 되고, q축과 -q축에서 최대가 됨을 알 수 있다. 즉, 회전자의 q축 성분에 전압을 인가하여 전류를 공급해야만 단위 전류당 최대의 토크를 발생하면서 회전할 수 있다. 기존의 Align and Go 방식은 회전자 자석의 위치, 즉 q축의 위치를 알 수 없기 때문에 때로는 d축 성분에 전류를 인가하여 과도한 전류가 인가됨을 알 수 있으며 이때는 발생토크가 단위 전류당 최대의 토크가 아님을 알 수 있다.

2.3. 제안된 기동 방식의 구현

본 논문에서의 기동 방식은 강제 정렬후 기동 하는 방식을 사용하였다. 강제 정렬 방식의 인가 전류는 제한적으로 조정할 수 있으며 또한 회전자가 회전할 때 발생하는 과도한 인가 전류와는 무관하기 때문에 강제 정렬 방식을 사용하여도 무관하다. 제안하는 회전자 기동 시 전환 시점 판단은 그림 4과 같은 알고리즘으로 구성된다. 그림 4과 같이 전환 후 최초 입력되는 N개의 전류 기울기의 평균치를 $I_{Reference}$ 라 정의 한다.

$$I_{Reference} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_i \quad (8)$$

이후 입력되는 전류의 기울기의 순시치는 $I_{Compare}$ 로 정의 하도록 한다.

$$I_{Compare} = \frac{1}{N} \sum_{c=0}^N x_c \quad (9)$$

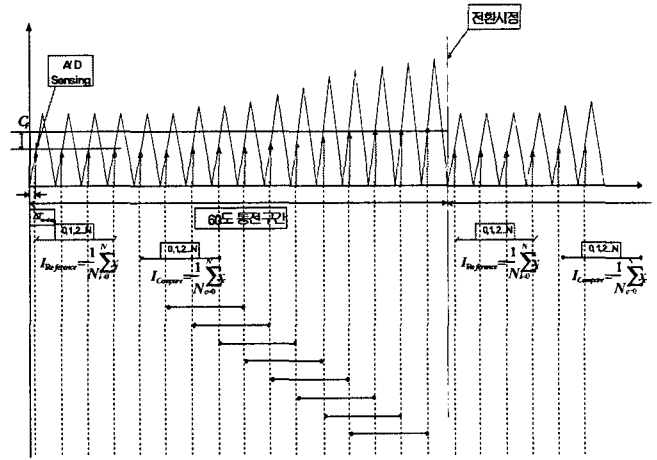


그림 5 전환 시점 판단 알고리즘
Fig. 5 Algorithm of commutation

회전자가 회전하면서 얻어지는 전류의 정보에 의해 회전자의 전환시점을 판단하는 과정은 다음 식을 이용하여 비교하도록 한다.

$$I_{Reference} \cdot C_p \leq I_{Compare} \quad (10)$$

여기서 C_p 는 Compare Factor라 정의한다.

이때 C_p 의 값은 그림 5에서와 같이 최초 기준 값보다는 최종 전환 시점에서의 값이 큼을 알 수 있다. 이는 동일한 시점에서 전환 할 수 있지만 이때 전환 시에는 다른 스위칭 상태와의 인덕턴스가 크게 차이나지 않기 때문에 회전자의 위치를 정확히 판단하지 못할 수 있다. 이를 방지 하기 위해 임의의 Factor로 회전자 위치 판단을 쉽게 하기 위함이다. 식 8과 9는 저가의 Processor를 사용하더라도 충분히 구현 가능한 식임을 알 수 있다.

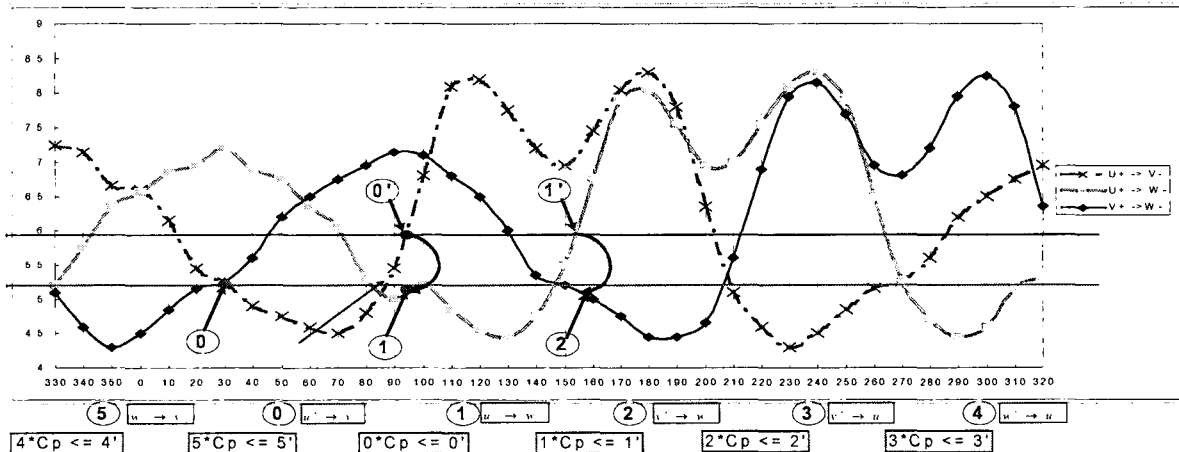


그림 4 전기각에 따른 공급 전류의 변화 및 전환 시점
Fig. 4 The variation of current waveform according to angle and point of commutation

3. 실험 결과

3.1. 실험 장치의 구성

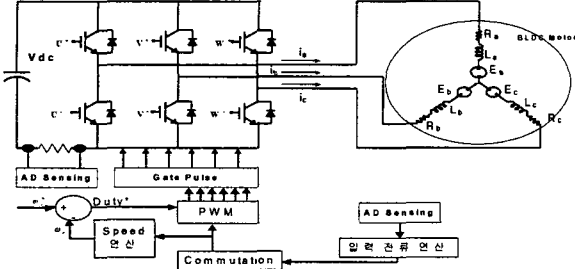
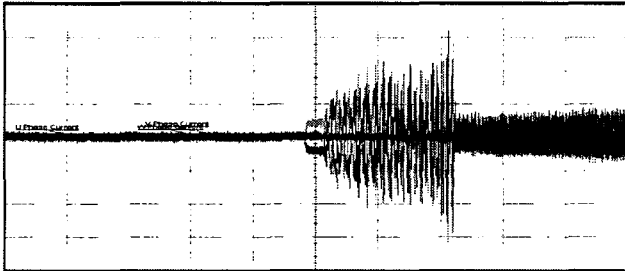


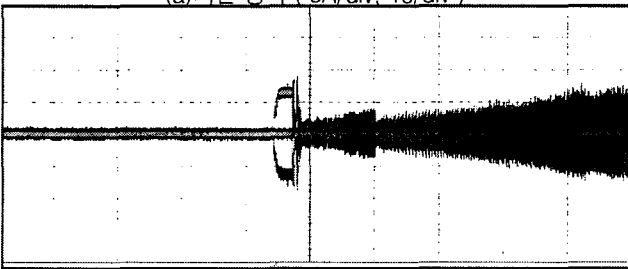
그림 6 실험 장치 구성
Fig. 6 The Overall System

본 논문에서 제안하는 기동방식에 대한 타당성을 검증하기 위한 실험구성은 그림 6과 같이 구성되었다. 기존의 방식에서 DC Link에 저항을 추가하여 상전류를 스위칭 마다 입력 받는다.

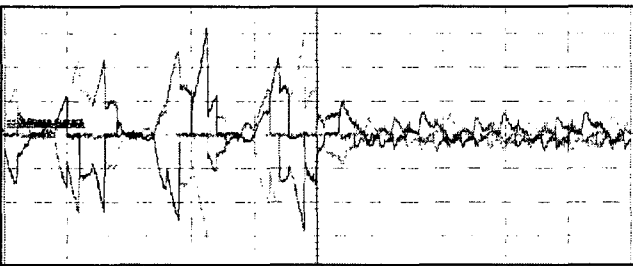
3.2. 기동 실험 결과



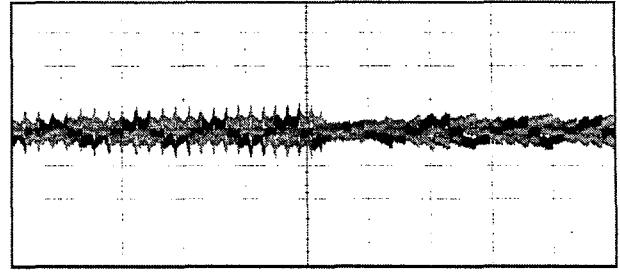
(a) 기존 방식 (5A/div, 1s/div)



(b) 제안된 방식 (5A/div, 1s/div)
그림 7 정지시부터 초기 기동까지의 각 상전류.
Fig. 7 The Starting Current from zero speed.



(a) 기존 방식 (5A/div, 100ms/div)



(b) 제안된 방식 (5A/div, 100ms/div)

그림 8 센서리스로의 전환시 전류 파형

Fig. 8 The current waveform at transition to sensorless

4. 결론

본 논문에서는 압축기용 BLDC 전동기의 정지 시부터 임의 속도까지 기동 할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 기존의 기동 방식은 고가의 Processor 사용 및 주변 추가 장치의 구성 등 공간 및 가격적인 문제점이 발생하나 본 논문에서 제시하는 방식은 구성이 간단하고 가격적인 상승이 크지 않은 장점을 가지고 있다. 실험 결과와 같이 기동 전류는 약 16APP에서 8.5APP로 약 47%의 전류량이 감소하며 기동 시간 또한 약 32%의 개선효과를 나타낸다. 또한 제안된 방법은 모터 부하에 관계없이 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 변화량을 이용하기 때문에 관성이나 부하에 민감하지 않은 구동 성능을 확보 할 수 있다. 모터의 회전 시 연속적인 위치 검출 가능으로 역기전력 검출이 불가능한 초기 구동시에 회전자의 관성에 상관없이 페 루프 구동 제어 가능하고 가격적인 측면에서도 여타의 방법에 비해 유리하다.

참고 문헌

- [1] Jang-Mok Kim, Improvement of Control Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, Seoul nat'l univ.1996.
- [2] Ji-Hoon Jang, Seoung-Ki Sul, Jung-Ik Ha, KIde 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.
- [3] Hyunbae Kim, Kum-Kang Huh, Robert D. Lorenz, Thomas M. Jahns, " A Nobel Method for Initial Rotor Position Estimation for IPM Synchronous Machine Drives", IAS. Conf., Vol2, pp1173-1180, 2003.
- [4] M.Schroedl, "An Improved Position Estimation for Sensorless Controller Permanent Magnet Synchronous Motor", EPE Conf., pp. 3-418-423, 1991.
- [5] G.H. Jang, J.H. Park, J.H. Chang, "Positiondetection 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.
- [6] N.Matsui, "Sensorless PM Brushless DC motor drives", IEEE Trans. Incustrial Electronics, vol.43, No.2, pp300-308, 1996.