

영구 자석 매립형 BLDC Motor 의 Sensorless 제어기 설계

김 학원^o, 안 준호, 양 순배, 조 관열, 김 정철
LG 전자 리빙시스템 연구소

Design of Sensorless Controller for Interior Permanent-Magnet BLDC Motor

Hag-Wone Kim^o, Jun-Ho Ahn, Soon-Bae Yang, Kwan-Youl Cho, Jung-Chul Kim
LG Electronics Co. Living System Lab.

Abstract

The inverter fed BLDC(Brushless DC) motor has been increasingly applied to industry and home appliances due to the advance of power electronics and permanent magnet technology, and its high efficiency and good acoustic noise characteristics. The BLDC motor and drives, however, require the rotor position sensors that may cause some problems such as the high cost and space.

In this paper, sensorless algorithm for an interior permanent magnet BLDC motor is proposed. The maximum torque per ampere operation with advance angle considering load torque and speed was simulated and verified through the experiment.

1. 서 론

근래 BLDC Motor 은 제어 기술의 향상과 영구 자석 기술의 진보에 따라 점차 적용이 확대되고 있다. 특히 BLDC Motor 은 다른 Motor 에 비해 제어 용이하고 고효율 및 소음 특성이 양호하며 또한 저속에서의 토크 특성이 탁월하여 가전제품의 가변속 용도로 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나 BLDC Motor 은 항상 회전자의 고정자에 대한 상대적 위치를 알아야만 하기 때문에 위치 센서가 요구되고 있으나, 위치 센서로 인한 가격 상승, 취부 공간, 조립 비용 상승등의 문제

가 있으며, 경우에 따라 적용 제품의 특성 때문에 위치 센서의 취부가 불가능한 경우가 존재한다. 이러한 이유로 BLDC Motor 의 Sensorless 관련 연구가 진행되어 왔다.^{[1],[2]} 또한 제어 기술의 진보에 따라 BLDC Motor 은 Magnetic 토크뿐 아니라 Reluctance 토크를 부가적으로 이용하는 영구 자석 매립형 BLDC Motor 으로 발전되고 있으며, 이러한 영구 자석 매립형 BLDC Motor 에 적합한 Sensorless 제어 방식도 연구되고 있다^[3].

본 논문에서는 영구 자석 매립형 BLDC Motor 의 상 Inductance 변화를 고려한 Sensorless 운전 제어 방법을 제안하고, 제안된 방법의 효용성을 검증한다. 또한 제안된 방법을 바탕으로 Sensorless 제어 장치를 가전제품에 적합하도록 설계하고, 각각의 운전 Mode 에 따른 최적의 Advance Angle 을 선정한다.

2. BLDC Motor 의 Sensorless 위치 감지

BLDC Motor 및 Inverter 의 등가 회로는 그림 1 과 같다.

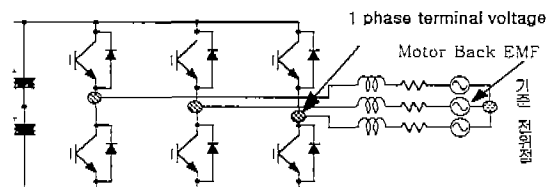


그림 1. BLDC Motor 의 등가 회로

BLDC Motor 은 식(1)과 같이 Modeling 이 된다.

$$\begin{aligned}
 V_{abcs} &= R_s I_{abcs} + p(L_{abc} I_{abcs} + \lambda_{abc}(\theta)) \\
 &= R_s I_{abcs} + I_{abcs} pL_{abc} + L_{abc} pI_{abcs} \\
 &\quad + p \lambda_{abc}(\theta) \\
 &= R_s I_{abcs} + I_{abcs} pL_{abc} + L_{abc} pI_{abcs} \\
 &\quad + EMF_{abc}(\theta)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 Motor 의 역기전력은 식(2)와 같고, 이 역기전력은 회전자의 위치에 대한 함수임으로 위치의 정보를 갖게 된다.

$$\begin{aligned}
 EMF_{abc}(\theta) &= d \lambda_{abc}(\theta) / dt \\
 &= (d \lambda_{abc}(\theta) / d \theta) (d \theta / dt) \\
 &= f(\theta) \omega
 \end{aligned} \tag{2}$$

일반적으로 가전제품에 적용되는 BLDC Motor 은 저가적으로 시스템을 구성하기 위하여 120 도 통전 방식을 사용함으로 항상 60 도의 Open Phase 가 존재하며 이 Open Phase 에서는 Commutation 에 의한 Free-wheeling Mode 를 제외하면 Motor 의 전류 i 는 0 이 되어 위치 정보를 갖고 있는 역기전력만을 얻을 수 있다.

Open Phase 의 역기전력을 얻어내는 방법은 중성점과 각 상 단자 전압을 계측하는 직접적 방법과 중성점 전위를 인가 전압을 통해 간접적으로 도출하는 간접적인 방법의 두가지 방식으로 나눌 수 있다. 간접적인 방법은 직접적인 방법에 비해서 중성점 단자가 필요 없으므로, 조립성이 용이하고, 조립시 단자의 오삽입에 의한 문제를 배제 할 수 있어 신뢰성 측면에서 유리하다. 간접적인 방식으로 위치 정보를 도출하기 위해 중성점의 전위를 고찰하면, 인버터의 ab 상이 통전된 경우, 통전된 두상의 전압식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= R_s I_a + L_a p I_a + I_a p L_a + EMF_a \\
 V_{bn} &= R_s I_b + L_b p I_b + I_b p L_b + EMF_b
 \end{aligned} \tag{3}$$

Open Phase 의 역기전력이 Zero-cross 시점에서,

PWM On 시 AB 양단 전압은

$$\begin{aligned}
 V_{ab} &= V_{an} - V_{bn} \\
 &= 2R_s I_a + (L_a + L_b) p I_a + I_a p (L_a + L_b) + 2EMF_a \\
 &= V_{dc}
 \end{aligned} \tag{4}$$

이며, PWM On 시 중성점 전위 V_n 은

$$V_n = -V_{bn} \tag{5}$$

이므로 식(4),(5)로부터 식(6)이 도출된다.

$$\therefore V_n = V_{dc}/2 + (L_b - L_a)/2 p I_a + I_a p (L_b - L_a)/2 \tag{6}$$

이된다.

영구 자석 표면 부착형 BLDC Motor(SPM)의 경우 $L_a = L_b = L_c$ 이므로 중성점 전위는 식(7)과 같고,

$$\begin{aligned}
 V_n &= V_{dc}/2 && : PWM\ On \\
 V_n &= 0 && : PWM\ Off\ (Upper\ PWM) \\
 V_n &= V_{dc} && : PWM\ Off\ (Lower\ PWM)
 \end{aligned} \tag{7}$$

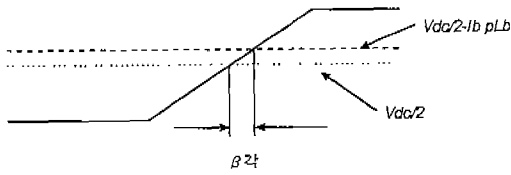
영구 자석 매립형 BLDC Motor 의 경우 중성점 전위는, Open 된 상에서의 역기전력이 Zero-Cross 될 때 $L_b = L_a$, $pL_a = -pL_b$ 이므로 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_n &= V_{dc}/2 - I_b p L_b \\
 &= V_{dc}/2 - I_b (dL_b/d\theta)(d\theta/dt) \\
 &= V_{dc}/2 - I_b (dL_b/d\theta) \omega : PWM\ On
 \end{aligned} \tag{8}$$

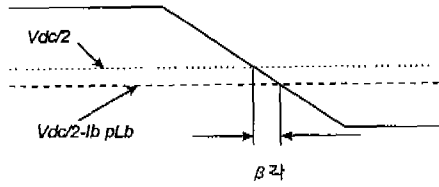
위치 정보를 도출하기 위한 Open 상 단자전압은

$$\begin{aligned}
 V_{open-gnd} &= V_{open} + V_n \\
 &= EMF_{open} + V_n
 \end{aligned} \tag{9}$$

영구 자석 표면 부착형 BLDC Motor 은 식(7)과 식 (9)에서 알 수 있듯이, PWM On 시점에서 단자 전압과 $V_{dc}/2$ 전압과 비교하여 회전자의 위치를 감지한다. 그러나 영구 자석 매립형 BLDC Motor 의 중성점 전위는 식(8)과 같이 부하 전류 및 속도의 함수가 된다. 이러한 관계를 고찰하여, 영구 자석 매립형 BLDC Motor 의 위치 검출 방법에 관하여 제안하면 그림 2 와 같다.



(a) Open Phase EMF rising 의 경우



(b) Open phase EMF falling 의 경우

그림 2 영구자석매립형 BLDC Motor 위치검출방법

영구 자석 매립형 BLDC Motor 의 위치 감지시 $V_{dc}/2$ 와 역기전력의 Zero-cross 시점을 비교하고, Micro-Computer 내부에서 부하 및 속도에 대하여 연산을 실시한 후 Delay angle β 로 반영한다. 영구 자석 매립형 BLDC Motor 의 Inductance Profile 을 그림 3 에 나타내었다.

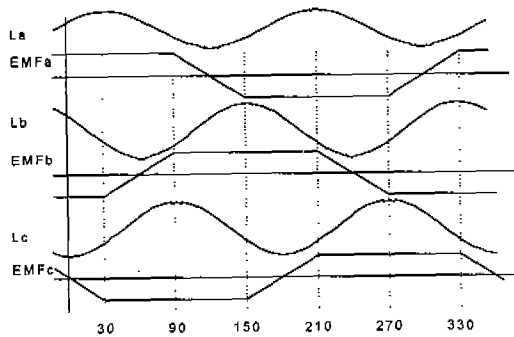


그림 3 각도에 따른 Inductance 변화

Motor 의 회전 속도 및 전류에 따른 Delay Angle 을 식(8)로 부터 도출하면 그림 4 와 같다.

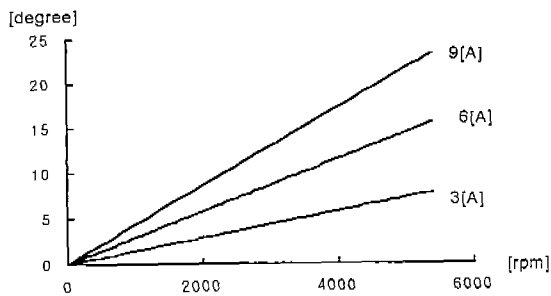


그림 4. Inductance 효과에 의한 Delay Angle

3. Starting Algorithm

BLDC Motor 의 위치 정보를 가지고 있는 역기전력은 식(2)에서 본 바와 같이 속도의 함수이다. 그러므로 역기전력정보를 이용할 수 없는 정지 및 저속에서는 별도의 Starting Algorithm 이 필요하다.

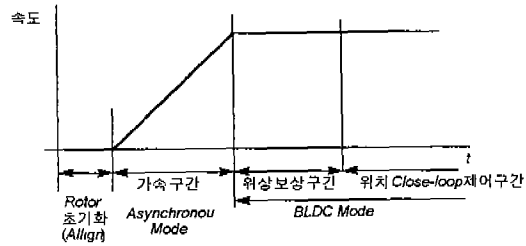


그림 5. Starting Algorithm

정지시 BLDC Motor 의 회전자는 임의의 위치에 있을 수 있으므로 초기에 특정한 상의 전압을 인가하여 초기의 위치를 Align 하여야 한다. 이때 초기의 위치 설정은 다음의 Asynchronous Mode 의 최초 구동 상태를 고려하여 회전자의 초기화 Mode 에서 Asynchronous Mode 로 진입시 최대의 토크가 발생되도록 위치를 잡는다. 즉 Asynchronous Mode 의 최초의 운전 조건이 Inverter 의 A+와 B-의 Power 소자를 On 하게 된다면, Align Mode 에서는 C+,B-,A-를 On 하게하면 Align Mode 와 Asynchronous Mode 의 초기 위치의 차이가 전기적으로 90 도의 차이가 발생하게 하여 최대 토크로 가속한다. 또한 Asynchronous Mode 시 Duty 설정은 정상 최대 토크/Amp 운전 조건에서 필요로 하는 Duty 보다 다소 크게 설정하여야 한다. 또한, Asynchronous Mode 에서 BLDC Mode 로의 전환시에는 Commutation Angle 의 큰 변화를 방지 하기 위해 위상 보상 구간을 삽입하였다. 위상 보상 구간은 Asynchronous Mode 에서의 Inverter 구동 신호와 BLDC Mode 의 위치 정보를 이용한 Inverter 의 구동 신호와의 위상차를 작게하여 Asynchronous Mode 에서 BLDC Mode 로의 전환시 동기 탈조를 방지한다.

4. 제어기의 구성

그림 6 은 Sensorless 의 속도 제어 Block 도이다.

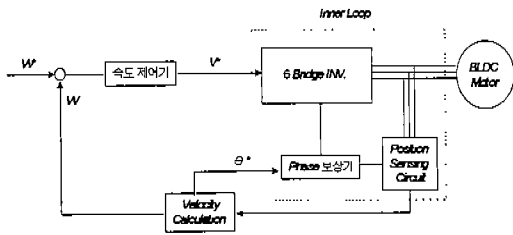


그림 6. Sensorless 속도 제어 Block 도

Inner loop 는 Motor 의 위치를 판단하고, 계산된 속도 신호로부터 Advance Angle 의 지령을 받아 Phase 를 보상하여 Inverter 에 신호를 보내고, Motor 은 구동 된다. 영구자석 매립형 BLDC Motor 의 Advance Angle 은 Torque/Amp 특성이 가장 큰 조건(최대 토크 운전)으로 운전한다. 영구자석 매립형 BLDC Motor 의 토크는 식 (10)과 같다.[3]

$$T_e = 1.5P[I_{qs} \Psi_{mag} + (L_d - L_q)I_{qs}I_{ds}] \quad (10)$$

상기 식 (10)을 Normalize 하면

$$T_n = i_{qn}(1 - i_{dn}) \quad (11)$$

이고 여기서

$$T_n = \frac{T_e}{T_{cb}}, i_{qn} = \frac{i_q}{i_n}, i_{dn} = \frac{i_d}{i_n}$$

$$i_n = \frac{\Psi_{mag}}{(L_q - L_d)}$$

$$T_{cb} = 1.5P\Psi_{mag}i_n$$

이다. Max Torque/Current 운전 조건에서 Advance Angle α 은 Motor 에 걸리는 토크에 따라 결정되나, 가정용 제품에 있어서 부하 토크를 측정하려면 관련 부품의 Cost 가 상승된다. 그러나 적용하고자 하는 제품의 부하는 회전하는 속도의 함수이므로 속도를 측정하여 부하를 환산하고 이로서 속도에 따른 Advance Angle 을 결정한다. 그러므로 Advance Angle 지령 α^* 는 현재 속도를 계산하여 간접적으로 결정된다.

적용된 Motor 의 특성은 아래의 표와 같다.

표 1. 영구 자석 매립형 Motor 의 전기 특성

Number of Pole Pair	P	2
Rated Speed	N	3600 rpm
Rated Torque	T	2.0 N.m
Flux Linkage	Ψ mag	0.05512 V/rad/sec
Armature Resistance	r	0.38 Ω
d-axis Inductance	Ld	2.67 mH
q-axis Inductance	Lq	6.5mH

그림 7는 Motor 의 Nominal 전류의 크기에 따른 Advance Angle 별 Motor 토크를 나타낸다.

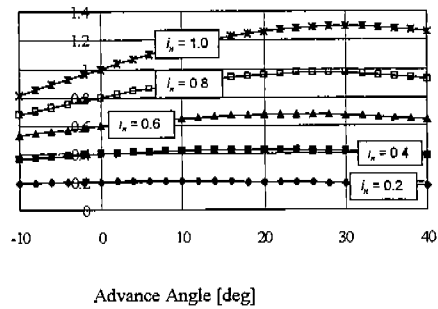


그림 7. Advance Angle 에 따른 Motor 토크

여기서, $i_n = \sqrt{i_{qn}^2 + i_{dn}^2}$ (11)

이다. Simulation 에서 사용된 식인 dq 축 관련식은 180도 통전 방식에 적용되는 식으로 Motor 의 Maximum Torque/Current 운전을 위한 Advance Angle 은 2상 통전 방식의 기본파에 대한 최대 Torque/Current 운전 조건으로 가정하였다.

5. 실험 결과

그림 8 은 초기 Motor 을 Starting 할때의 전류 파형이다.

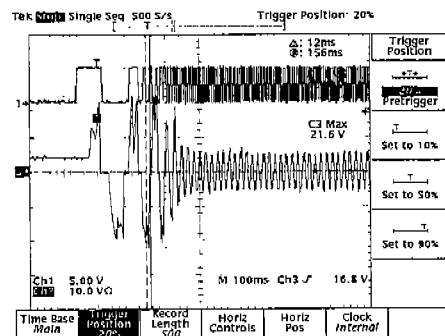


그림 8. Starting 시 전류 파형

그림 9은 Sensorless로 상기한 매립형 영구 자석 Motor을 Advance Angle 없이 구동 할 때 전류 파형이며 이때의 속도는 3600rpm이다.

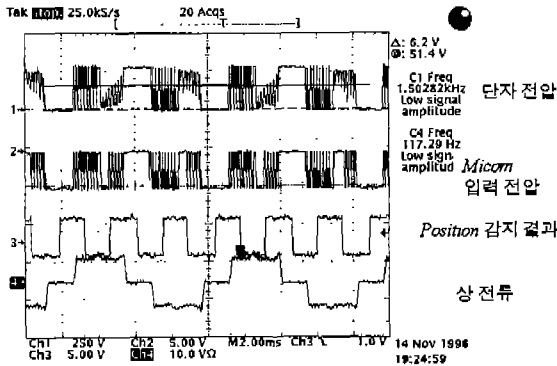
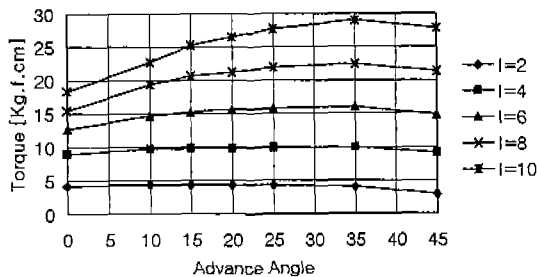


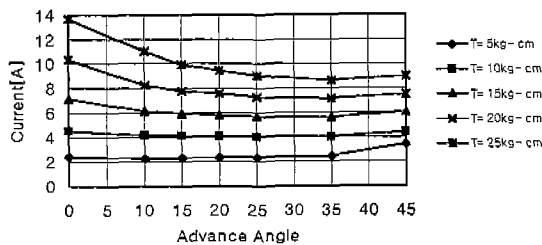
그림 9. 3600 rpm에서의 전류 파형

Advance Angle - Torque (@3600rpm)



(a) Advance Angle 별 Torque

Advance Angle - Current (@3600rpm)



(b) Advance Angle 별 전류

그림 10. Advance Angle 별 시험 결과

본 논문에서 제안된 Starting Algorithm은 부하 조건에 관계없이 신뢰성 있게 기동되었으며, 회전자의 위치 감지 Algorithm 또한 PWM 방식에 대한 고찰을 통해 위치 감지의 실패가 없음을 확인하였다. 또한 Advance Angle운전을 통해 Motor의 출력 토크가 증가되는 결과를 볼 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 가전 제품에 적용하기 위한, 매립형 영구자석 BLDC Motor의 저가형 Sensorless 제어기를 제안하고, 각 조건에 따른 최적의 Advance Angle을 선정하여 Simulation을 실시하였다. 또한 영구 자석 매립형 BLDC Motor의 제어기로서 저가형의 Sensorless 제어장치를 위하여 8Bit Microcomputer를 사용하고 제어기를 Full Digital화하여 설계하였다.

본 연구로 고기능의 가전 제품에 적용되는 Sensorless 인버터를 설계 및 구현함으로써, 향후 가전 제품의 고 기능화 및 관련 산업에 많은 기여를 하리라 생각된다.

참고문헌

- [1] K. Iizuka, et al, "Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor" in IEEE Trans. Industry Applications. Vol. 21, No.4 May/June 1985.
- [2] Ogasawara and H. Akagi, "An Approach to Position sensorless Drive fo Brushless dc Motor" in IEEE Trans. Industry Application. Vol. 27, No.5 Sep./Oct. 1991.
- [3] Thomas M. Jahns, et al, "Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives" in IEEE Trans. Industry Applications. Vol. 22, No.4 July/August 1986.