

영구 자석 매립형 BLDC Motor 의 Sensorless 제어기 설계

김 학원^o, 염 판호, 조 판열, 안 준호, 신 현정, 변 일수, 김 정철

LG 전자 리빙시스템 연구소 ,

Design of Sensorless Controller for Interior Permanent-Magnet BLDC Motor

Hag-Wone Kim^o, Kwan-Ho Yeum, Kwan-Youl Cho, , Jun-Ho Ahn, Hyoun-Jeong Shin, Il-Soo Byun,

Jung-Chul Kim

LG Electronics Co. Living System Lab.

Abstract.

Recently, as a result of the progress in power electronics and magnet technology, the applications of inverter fed BLDC Motor have increased for industry and home appliance. Also because of the high efficiency, good acoustic noise characteristic, BLDC Motor applications are growing. However, BLDC Motor requires position sensor, which has many problems such as high cost, more space and difficult to install. Therefore, sensorless control algorithm is being studied.

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

1. 서 론

근래 BLDC Motor 는 제어 기술의 향상과 Magnet 기술의 진보에 따라 점차 적용이 확대되고 있다. 특히 BLDC Motor 는 다른 Motor 에 비해 제어가 용이하고, 효율이 높고, 소음 특성이 양호 하며 또한 저속에서의 Torque 특성이 탁월하여 가전제품의 가변속용으로 연구개발이 활발히 진행되고있다. 그러나 BLDC Motor 는 항상 Rotor 의 Stator 에 대한 상대적 위치를 알아야만 하기 때문에 Position Sensor 가 요구되고 있으나, Position Sensor 로 인한 가격 상승, 취부 공간, 조립비용 상승등의 문제가 있으며, 경우에 따라 적용 제품의 특성 때문에 Position Sensor 의 취부가 불가능한 경우가 존재한다. 이러한 이유로 BLDC Motor 의 Sensorless 관련 연구가 진행되어 왔다. 또한 제어 기술의 진보에 따라 BLDC Motor 는 Magnetic Torque 뿐 아니라 Reluctance Torque 를 부가적으로 이용하는 영구 자석 매립형 BLDC Motor 로 발전되고 있으며, 이러한 영구 자석 매립형 BLDC Motor 에 적합한 Sensorless 제어 방식도 연구되고 있다.

본 논문에서는 이러한 Hybrid Type 의 BLDC

Motor 인 영구 자석 매립형 BLDC Motor 를 구동하기 위한 Sensorless 제어 장치를 가전제품에 적합하도록 설계하고, 또한 영구 자석 매립형 Motor 를 구동하기 위한 Advance Angle 을 선정하였고, 또한 각 운전 상태에 따른 동작 상태를 나타내었다

2. BLDC Motor 의 Sensorless 위치 감지

BLDC Motor 및 Inverter 의 등가 회로는 그림과 같다.

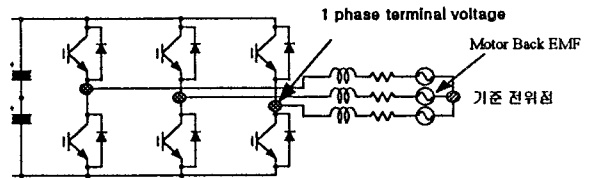


그림 1. BLDC Motor 의 등가 회로

BLDC Motor 는 식(1)과 같이 Modeling 이 된다.

$$V = iR + \frac{d\lambda(i, \theta, \lambda_f)}{dt}$$

$$V = iR + \frac{\partial \lambda}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt}$$

$$V = iR + L \frac{di}{dt} + EMF \tag{1}$$

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

$$EMF(\theta) = \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} = f(\theta)\omega \tag{2}$$

일반적으로 가전제품에 적용되는 BLDC Motor 는 저가적으로 System 을 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 제어하면 Motor 의 전류 i 는 0 이 되어 위치 정보를 갖고 있는 EMF 만을 얻을 수 있다. 이때, 위치 정보를 가지고 있는 Motor

의 상 전압을 도출하기 위해서는 중성점의 전위를 알아야한다. 중성점의 전위를 PWM 상태에 따라 기술하면 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} V_n &= V_{dc}/2 & : \text{PWM ON} \\ V_n &= 0 & : \text{PWM OFF (Upper PWM)} \\ V_n &= V_{dc} & : \text{PWM OFF (Lower PWM)} \end{aligned}$$

$$V_{open-gnd} = V_{open} + V_n \quad (3)$$

식으로 부터 각상의 Open-GND의 전압을 $V_{dc}/2$ 와 비교하여 Open-Phase에서의 EMF를 도출할 수 있다. 또한 Open Phase에서의 Rotor의 위치 감지를 실패하지 않기 위해서는 Commutation시 발생하는 Free-wheeling 전류의 지연 시간을 줄여 주어야한다. Free-wheeling 전류의 지연 시간이 길어지면 Position 정보의 위치 감지 시점인 EMF의 Zero-cross 시점에서 Rotor의 위치 감지를 실패하게되며, 이를 방지하기 위해서는 PWM 방식에 대한 고찰이 필요하며, PWM 방식은 이러한 전류 지연이 줄여지는 방향으로 이루어져야한다. 또한 전류 지연을 줄여줌으로 전류의 역률이 개선되어 효율이 증가되는 효과도 존재한다.

3. Starting Algorithm

BLDC Motor의 위치 정보를 가지고 있는 EMF는 식(2)에서 본 바와 같이 속도의 함수이다. 그러므로 EMF 정보를 이용할 수 없는 정지 및 저속에서는 별도의 Starting Algorithm이 필요하다.

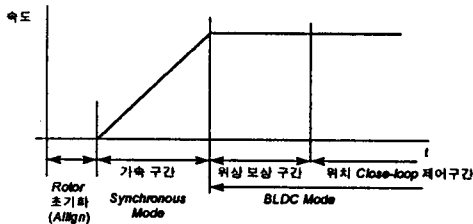


그림 2. Starting Algorithm

정지시 BLDC Motor의 Rotor는 임의의 위치에 있을 수 있으므로 초기에 특정한상의 전압을 인가하여 초기의 위치를 Align하여야한다. 이때 초기의 위치 설정은 다음의 Synchronous Mode의 최초 구동 상태를 고려하여 Rotor의 초기화에 Mode에서 Synchronous Mode로 진입시 최대의 토크가 발생하도록 위치를 잡는다. 즉 Synchronous Mode의 최초의 운전조건이 Inverter의 A+와 B-의 Power 소자를 On하게 된다면, Align Mode에서는 C+,B-,A-를 On하게하면 Align Mode와 Synchronous Mode의 초기 위치의 차이가 전기적으로 90도의 차이가 발생하게하여 최대 Torque로 가속한다.

또한 Synchronous Mode시의 Duty 설정은 정상 최대 Torque/Amp 운전 조건에서 필요로 하는 Duty보다 소정값 크게 설정하여야 한다. 또한, Synchronous Mode에서 BLDC Mode로의 전환시에는 Commutation 신호의 갑작스런 변화를 방지하기 위해 위상 보상 구간이 필요하다. 위상 보상 구간

은 Synchronous Mode에서의 Inverter 구동신호와 BLDC Mode의 위치 정보를 이용한 Inverter의 구동신호와 위상차를 적게하여 Synchronous Mode에서 BLDC Mode로의 변환시 동기탈조를 방지한다.

4. 제어기의 구성

그림 3은 Sensorless의 속도 제어 개념도이다.

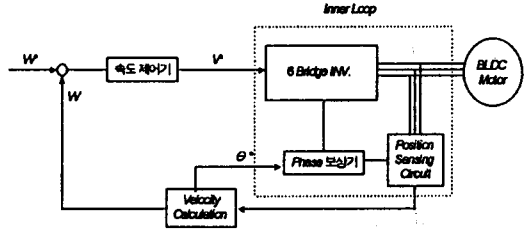


그림 3. Sensorless 속도 제어 개념도

Inner loop는 Motor의 위치를 판단하고, 계산된 속도 신호로부터 Advance Angle의 지령을 받아 Phase를 보상하여 Inverter에 신호를 보내고, Motor는 구동된다. 영구자석 매립형 BLDC Motor의 Advance Angle은 Torque/Amp 특성이 가장 큰 조건(Max Torque 운전)으로 운전한다. 영구자석 매립형 BLDC Motor의 Torque는 식 (4)와 같다.[1]

$$T_e = 1.5P[I_q \Psi_{mag} + (L_d - L_q)I_q I_d] \quad (4)$$

상기 (4)식을 Normalize 하면

$$T_{en} = i_{qn}(1 - i_{dn}) \quad (5)$$

$$T_{en} = \frac{T_e}{T_{ab}}, i_{qn} = \frac{i_q}{i_b}, i_{dn} = \frac{i_d}{i_b}$$

여기서

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

$$T_{ab} = 1.5P\Psi_{mag}i_b$$

Max Torque/Current 운전 조건에서 Advance Angle θ 은 Motor에 걸리는 Torque에 따라 결정되나, 가정용 제품에 있어서 부하 Torque를 측정하려면 관련 부품의 Cost가 상승된다. 그러나 적용하고자 하는 제품의 부하는 회전하는 속도의 함수이므로 속도를 측정하여 부하를 환산하고 이로서 속도에 따른 Advance Angle을 결정한다. 그러므로 Advance Angle 지령 θ^* 는 현재 속도를 계산하여 간접적으로 결정된다. 적용된 Motor의 특성은 아래의 표와 같다.

| Number of Pole Pair | P | 2 |
|---------------------|--------------|------------------|
| Rated Speed | N | 3600 rpm |
| Rated Torque | T | 2.0 N.m |
| Flux Linkage | Ψ_{mag} | 0.1125 V/rad/sec |
| Armature Resistance | r | 0.38 Ω |
| d-axis Inductance | Ld | 3.5 mH |
| q-axis Inductance | Lq | 10mH |

표 1. 영구 자석 매립형 Motor의 전기 특성

그림 4는 Motor의 Nominal 전류의 크기에 따른 Advance Angle 별 Motor Torque를 나타낸 것이다.

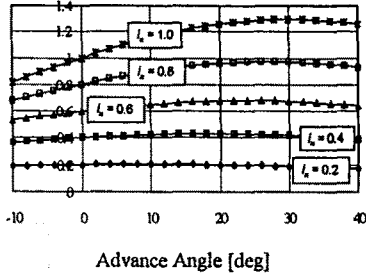


그림 4. Motor의 Advance Angle에 따른 Motor Torque

여기서,
$$i_n = \sqrt{i_{qn}^2 + i_{dn}^2} \quad (6)$$

Simulation에서 사용된 식인 dq축 관련식은 180도 통전 방식에 적용되는 식으로 Motor의 Maximum Torque/Current 운전을 위한 Advance Angle은 2상 통전 방식의 기본파에 대한 최대 Torque/Current 운전 조건으로 가정하였다.

5. 시험 결과

그림 5은 초기 Motor를 Starting할때의 전류 파형이다.

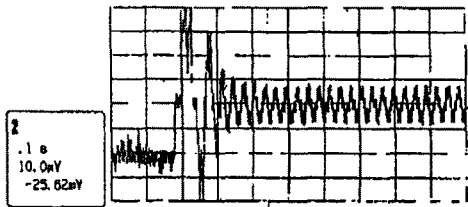


그림 5. Starting시 전류 파형

그림 6은 Sensorless로 상기한 매립형 영구 자석 Motor를 Advance Angle 없이 구동할때의 전류 파형이며 이때의 전류는 3600rpm이다.

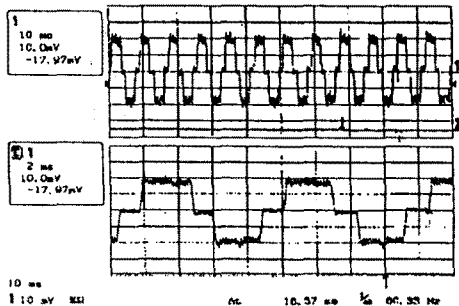


그림 6. 3600 rpm에서의 전류 파형

그림 7은 Advance Angle 15도를 주었을때 한상의 전류와 동상의 전압이다. 전압의 기준은 DC Link

전압의 GND 전위가 기준이며, 이때의 운전 주파수는 5400rpm이다.

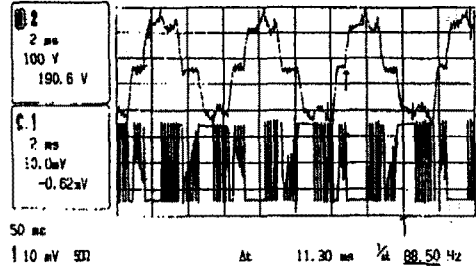


그림 7. 5400 rpm에서의 상전압 및 상전류

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

6. 결론

본 논문에서는 가전 제품에 적용하기 위한, 매립형 영구자석 BLDC Motor의 저가형 Sensorless 제어기를 제안하고, 각 조건에 따른 최적한 Advance Angle을 선정하여 Simulation을 실시하였다. 또한 영구 자석 매립형 BLDC Motor의 제어기로서 저가형의 Sensorless 제어장치를 위하여 8Bit Microcomputer를 사용하고 제어를 Full Digital화하여 설계하였다. 향후 과제로는 본 논문에서 제안한 Sensorless 제어 방식을 실험을 통하여 검증하고, 제품에 적용하여 신뢰성을 검증하는 것이다.

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] 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.
- [2] K. Iizuka, et al, "Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor" in IEEE Trans. Industry Applications. Vol. 21, No.4 May/June 1985.
- [3] S. Ogasawara and H. Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless dc Motor" in IEEE Trans. Industry Application. Vol. 27, No.5 Sep./Oct. 1991.