

영구자석 매입형 BLDC 모터의 Sensorless 속도제어기 위치검출 오차 분석

이 동 명, 김 학 원, 양 순 배, 안 준 호, 조 관 열
LG전자 홈 어플라이언스 연구소 전력전자팀

An Analysis of Position Detection Error of the Sensorless Controller for BLDC Motors

Dong-Myung Lee, Hag-Wone Kim, Soon-Bae Yang, Jun-Ho Ahn, Kwan-Yuhl Cho
Home Appliance Research LAB, LG Electronics Inc.

Abstract - In this paper, we analyzed the characteristics of the detected EMF signals used to detect the rotor position in the IPM(Interior Permanent Magnet) BLDC motor and SPM(Surface Permanent Magnet) BLDC motor. The position sensing signal, in the IPM BLDC motors, advances the real rotor position due to the variation of the rotor inductances. This fact was verified by the simulation and experiment.

SPM BLDC 모터와는 달리 고정자 3상의 인덕턴스가 회전자의 위치에 따라 변하기 때문이다.

1. 서 론

최근 가전제품의 에너지저감 및 저소음의 요구가 증대됨에 따라 냉장고, 세탁기, 에어컨 등에 가변속 모터의 적용이 확대되고 있다[1][2]. 가변속 모터 중에서 BLDC 모터는 다른 모터에 비해 효율이 높고, 저속에서 높은 토크를 낼 수 있으므로 가변속 제어기에 활발히 적용되고 있다.

BLDC Motor는 회전자의 영구자석 취부구조에 따라 SPM BLDC 모터와 IPM BLDC 모터로 구분할 수 있다. IPM BLDC 모터는 회전자의 돌극성(saliency)에 의한 리럭턴스 토크를 이용할 수 있으므로 SPM BLDC 모터에 비해 고효율 운전이 가능하며 영구자석이 회전자 코어(core)내에 삽입되므로 자석 이탈 방지를 위한 별도의 가이드 캔(can)이 필요 없으므로 재료비를 저감할 수 있다. 본 연구에서는 IPM BLDC 모터의 센서리스 속도 제어기에 있어서, 회전자 위치 감지 신호와 실제 회전자 위치가 다르게 나타나는 회전자 위치감지오차 발생 현상에 대하여 그 원인 및 현상을 분석한다.

2. 본 론

2.1 위치 감지 오차 발생 및 원인

BLDC 모터의 속도를 제어하기 위해서는 회전자의 절대위치 정보가 필요하다. 120도 구형과 전류제어 방식의 경우 회전자 위치의 검출방법은 다양한 방식이 제안되었으나 재료비를 감안하면 모터의 상에 유기되는 유기전압(EMF)으로부터 회전자의 위치를 검출하는 방법이 가장 효과적이다. 즉 비통전 상(open phase)의 상전압과 DC Link 전압의 crossing 시점으로부터 회전자의 위치를 검출할 수 있다[3].

120도 통전 방식에서 SPM BLDC 모터의 경우 비통전 구간에서의 모터의 단자전압은 그림 1과 같이 EMF의 Zero Crossing 시점과 일치한다. 반면 IPM BLDC 모터의 경우 단자전압은 실제 유기전압(EMF)보다 앞서서 Zero Crossing이 일어나게 되어 실제의 모터의 회전자 위치보다 앞선 신호를 회전자 위치신호로 인지하게 된다. 이와 같이 IPM BLDC 모터에서 위치감지 오차가 발생하여 발생하는 원인은 IPM BLDC 모터는

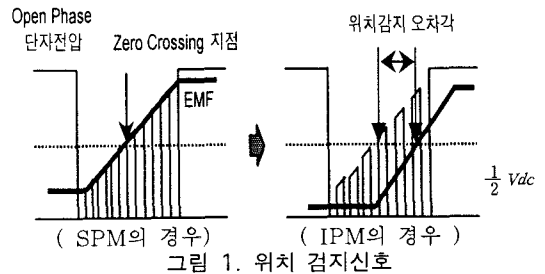


그림 1. 위치 검지신호

2.2 제어기 상태방정식

실제 회전자의 위치와 검출회로에 의해 검지된 회전자 위치의 차이를 위치감지오차라 정의하고 이를 수학적으로 설명하면 다음과 같다. 120도 통전 방식 중 전류의 흐름이 A, C상에서 B, C상으로 전환될 때를 예로 설명한다. 120도 통전 방식의 전류 흐름에 따른 여섯 모드 중 이를 mode 6이라 정의한다.

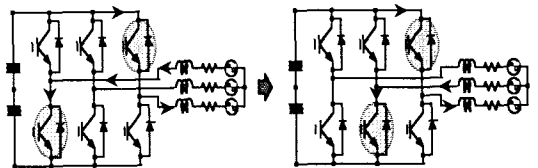


그림 2. 전류 흐름도

모드 6에서 A상에 흐르던 전류는 모드 전환시 A상의 위쪽의 Diode를 통해 Freewheeling하게 되고 Freewheeling이 종료하여 A상의 전류가 영이 된 후 그림 2의 오른쪽과 같이 B, C상에 전류가 흐르는 상태로 전환된다. 이 때 모터의 위치를 검출하기 위한 비통전상의 단자 전압은 A상의 단자전압이 되며 C상의 PWM ON 시의 전압방정식은 식(1)과 같다[4].

$$V_o = E_a - (E_b + E_c) / 2 + \alpha \tag{1}$$

여기서, V_a 는 단자전압, E_a, E_b, E_c 는 각각 A, B, C상의 EMF이다. 식(1)에서 α 항은 IPM BLDC 모터의 회전자 구조에 의해 결정되는 상수이다. IPM BLDC 모터가 SPM BLDC 모터와 다르게 나타나는 비통전상의 단자 전압은 식(2)의 두 가지 성분으로 표시할 수 있다.

$$V_o = E_a + V_i^{SPM} - (E_b + E_c + V_i^0) / 2 \tag{2}$$

식(2)의 두 성분을 각 상이 비통전상이 되었을 때에 대하여 정리하면 표 1과 같고 식(2)로부터 α 항을 구하면 아래와 같다.

$$\alpha = V_s^{open} - V_s^\theta / 2 \quad \text{식(3)}$$

식(3)이 적용되는 모드 6에서 그림 2를 보면 A상 전류는 영이고 B상과 C상의 전류는 크기는 같고 방향으로 반대임을 볼 수 있다.

표 1. Open상에서의 회전자 위치에 따른 전압발생분

Open상	A상	B상	C상
	$V_a = E_a - (E_b + E_c)/2$	$V_b = E_b - (E_c + E_a)/2$	$V_c = E_c - (E_a + E_b)/2$
V_s^θ	$p(L_b \cdot I_b + L_c \cdot I_c)$	$p(L_c \cdot I_c + L_a \cdot I_a)$	$p(L_a \cdot I_a + L_b \cdot I_b)$
V_s^{open}	$p(L_{ab} \cdot I_b + L_{ac} \cdot I_c)$	$p(L_{bc} \cdot I_c + L_{ba} \cdot I_a)$	$p(L_{ca} \cdot I_a + L_{cb} \cdot I_b)$

따라서, 아래의 조건이 성립한다.

$$i_{bs} = \text{negative}, i_{cs} = \text{positive}, |i_{bs}| = |i_{cs}| \quad \text{식(4)}$$

수식의 간략화를 위하여 미분항이 없다고 가정하면 식(5)가 성립된다.

$$p \cdot i_{bs} = p \cdot i_{cs} = \text{zero} \quad \text{식(5)}$$

따라서, α 항은 표 1로부터 A상이 Open인 경우의 V_s^θ, V_s^{open} 을 식(3)에 대입 정리하면 식(6)과 같이 나타난다.

$$\alpha = \sqrt{3} \cdot (L_q - L_d) \cdot \omega_e \cdot \cos 2\theta \cdot i_{cs} \quad \text{식(6)}$$

여기서, L_q : q축 inductance, L_d : d축 inductance
 ω_e : 속도, θ : 회전자 위치, i_{cs} : C상 전류

이고 표 1에서 L_{ab}, L_{ac} 는 아래와 같다[4].

$$L_{ab} = -0.5L_{g0} - L_{g2} \cdot \cos(2\theta - 2\pi/3)$$

$$L_{ac} = -0.5L_{g0} - L_{g2} \cdot \cos(2\theta + 2\pi/3)$$

식(6)에서 α 항은 모터의 인덕턴스차, 회전 속도, 회전자 위치, 전류량으로 구성되어 있다. 또한 i_{cs} 는 A상이 Open인 모드 6에 해당하는 것이므로 i_{cs} 는 전류량을 대표하는 항목이다.

위에서 살펴본 바와 같이 IPM BLDC 모터에서 회전자의 위치 θ 에 따라 변동하는 인덕턴스에 의한 위치감지 오차분은 모터의 인덕턴스차, 회전속도, 위치, 전류량에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 예를 들면, 동일한 전류량일 경우에 속도가 증가함에 따라 위치감지 오차가 커지며, 같은 속도인 경우에는 전류가 증가함에 따라 위치감지 오차가 전류가 작은 때보다 크게 된다.

2.3 확인 실험

위치감지오차 발생 및 앞서서 정도를 알기 위하여 센서 부착 실험 및 동일한 조건에서의 시뮬레이션을 행하였다. 그림 3은 Encoder를 부착하여 IPM BLDC 모터를 Encoder 신호에 의해 운전하였을 때의 단자전압과 전류를 표시한다. 그림 3에서 위쪽 파형이 단자전압이며, 아래쪽이 전류를 나타낸다. 점선으로 표시된 DC link 중간 전압 ($V_{dc}/2$)을 기준으로 단자전압의 Zero Crossing Point(이하 ZCP라 칭함)가 발생한 후 실제

전류가 흐르기 시작하는 시간 차이가 $520\mu s$ 로 나타난다. Encoder 부착 실험시 120Hz로 운전하고 있으며, 센서에 의한 위치 신호가 들어온 후 5° 이후에 통전이 되도록 제어하므로 단자전압의 ZCP점과 전류의 통전 시간 차이는 $115.74\mu s (1/120\text{Hz} \times 5^\circ / 360^\circ)$ 이어야 한다. 그러나, 실험에서의 $520\mu s$ 는 전기각으로 22.46° 에 해당되므로 실제 회전자 위치보다 $17.46^\circ (22.46 - 5)$ 앞서서 단자전압의 ZCP가 발생함을 알 수 있다.

그림 4는 그림 3과 동일한 조건을 시뮬레이션 했을 때의 파형이다. 유기전압의 ZCP가 발생한 후 5° 도 이후에 통전시켰을 때의 단자전압, 유기전압, 전류의 파형이다. 그림 4에서의 단자전압과 DC link단 전압 ($V_{dc}/2$, 그림 4에서는 0Volt에 해당)의 ZCP와 EMF의 ZCP를 비교해 보면 약 $500\mu s$ 의 차이가 있음을 볼 수 있다. 전기각으로 환산하면 18° 가 되어 실험치의 17.46° 와 일치함을 알 수 있다. Encoder부착 시험 및 시뮬레이션을 통하여 실제의 모터 회전자 신호와 센서리스를 위한 위치검지 신호가 IPM의 경우에는 위치신호가 실제 모터의 위치보다 앞서 있음을 알 수 있다.

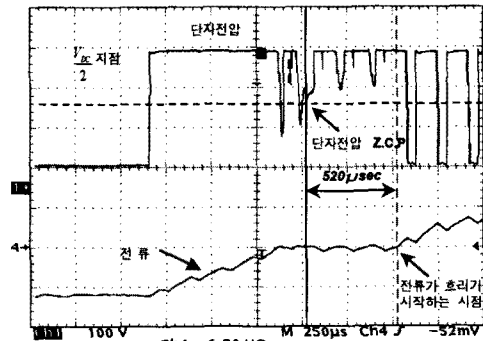


그림 3. ZCP 확대 파형 (Encoder부착)

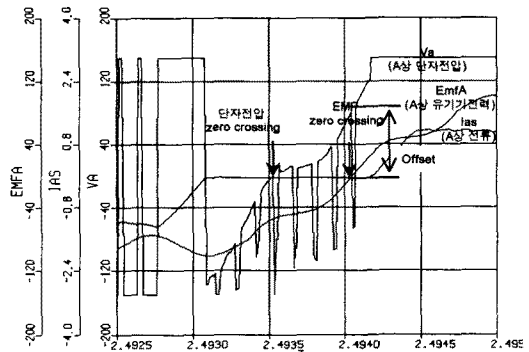


그림 4. ZCP 확대 파형 (시뮬레이션)

2.4 실험 및 시뮬레이션 파형

IPM BLDC 모터의 120도 통전 방식에서는 모터를 효율적으로 사용하기 위해서 일반적으로 진상각 (Advance Angle) 제어를 한다. 전류의 위상을 유기전압 EMF보다 앞서워 제어하게 되면 리터턴스 토오크성분을 얻을 수 있으므로 보다 효율적인 모터 운전이 가능하다. 이러한 진상각 제어방법은 모터의 회전자 위치를 검지한 후 통상 30° 시점에서 다음 모드로 전환하는 것이 아니라, 30° 이전에 모드 변환을 시키는 것이다.

그러나, 본 연구에서 분석한 것과 같이 위치 검지 시점이 앞당겨지는 현상으로 인해서 실제 진상각은 원하는 진상각 보다 많이 인가되는 형태가 된다. 또한 이러한 위치검지오차발생에 따라 부 방향으로 전류가 흐르는 현상이 발생된다. 이러한 반대방향 전류발생 현상은 진상각이 많이 인가되었을 때 발생하며, 그 원인은 위치검지에 사용되는 단자전압의 형태인 식(1)을 살펴보면 알 수 있다. 식(1)의 성분은 유기전압의 합성분과 α 항을 포함한다. 이 중 두 성분 중 유기전압의 합성분은 Open상의 유기전압의 형상과 유사한 형태를 가지게 되므로, 위치검지오차에 지배적인 항은 α 항이 된다. 진상각이 많아질수록 이 α 항이 작아지게 되어 Freewheeling이 끝난 후의 전압이 $-V_{dc}/2$ 보다 작아질 수 있으므로 모드 6에서는 A상의 아랫단 Diode에 의한 Freewheeling 전류가 생성되어 부 방향의 전류가 흐르게 된다. 그림 5는 진상각이 과도할 때의 전류 실험 파형이다. 그림 6과 그림 7은 시뮬레이션 파형으로 위로 부터 단자전압, 유기전압, 전류 파형을 나타낸다. 그림 6과 그림 7을 비교해보면 그림 7에서와 같이 진상각이 그림 6에 비하여 많이 들어간 경우 Freewheeling이 끝난 후 반대 방향으로 전류가 흘러가는 현상이 발생함을 볼 수 있다.

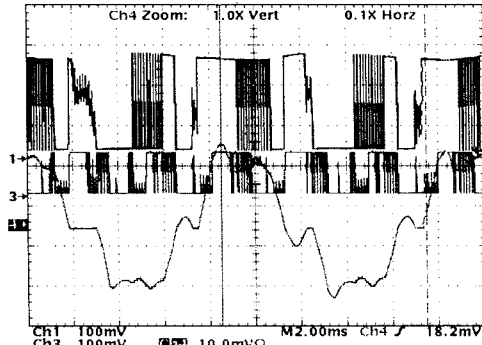


그림 5. 단자전압과 전류파형 (실험 파형)

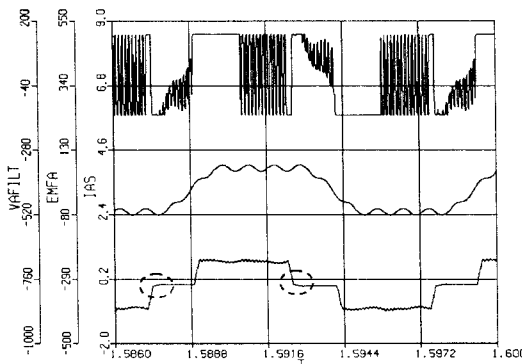


그림 6. 단자전압과 전류파형 (진상각 20°)

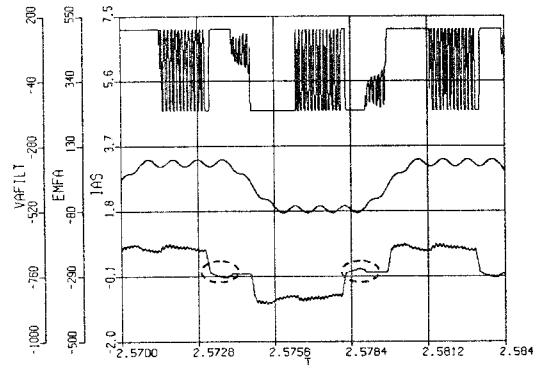


그림 7. 단자전압과 전류파형 (진상각 25°)

3. 결 론

본 연구에서는 IPM BLDC 모터의 120도 통전 방식의 센서리스 속도 제어기에 있어서, 실제 모터의 회전자 위치와 위치 검지 신호의 오차 관계를 분석하였다.

본 연구를 통해서 위치검지 신호가 실제 모터의 유기전압의 위상 보다 앞서 있음을 알 수 있었으며, 이러한 위치검지 오차의 원인은 회전자의 위치에 따라 인덕턴스가 변하는 IPM BLDC 모터의 고유특성에 의한 것임을 알 수 있었다. 또한 위치검지 오차 발생의 원인으로는 모터상수, 속도, 전류가 관계됨을 수식으로 표현하였으며, 확인 실험 및 시뮬레이션을 통하여 위치검지 오차발생에 따른 반대방향의 전류가 흐르는 현상에 대하여 분석하였다.

이러한 위치검지 오차 발생현상에 대한 원인 분석 작업을 통하여 실제 진상각은 원하는 진상각보다 많이 인가됨을 알 수 있었으며, IPM BLDC 모터의 센서리스 속도 제어기 설계시에 이러한 분석이 반영될 수 있을 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] K. Iizuka et al., " Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor," IEEE Trans. on Indus. Appl., vol IA-21., no. 4. PP. 595~601, May/June 1985.
- [2] N. Matsui et al., " Brushless dc Motor Control without Position and Speed Sensors," IEEE Trans. on Indus. Appl., vol IA-28., no. 1. PP. 120~127, Jan/Feb 1992.
- [3] 김 학원 외 4명, " 영구자석 매립형 BLDC Motor의 Sensorless 제어기 설계 ", 전력전자학술대회, PP. 79~83, 1997. 7
- [4] 이 동명 외 4명, " 영구자석 매립형 BLDC 모터 제어기의 모델링 및 시뮬레이션 ", 전력전자학술대회, PP. 332 ~ 336, 1998. 7