

EKF를 이용한 BLDC 모터 구동기 인버터의 고장 검출 및 분리

Fault Detection and Isolation for the Inverter of BLDC Motor Drive using EKF

김 선 기, 성 상 만*, 강 기 호
(SunKi Kim¹, SangMan Seong^{1,*}, and Kiho Kang¹)

¹School of Mechatronics, Korea University of Technology and Education

Abstract: The inverters used to drive Brushless DC motors (BLDC) include switching devices such as FETs and the faults in FETs cause severe performance degradation in systems where a BLDC acts as actuator. This paper presents a fault detection and isolation method for the FETs of an inverter for BLDC motor control systems, which is based on the EKF (Extended Kalman filter). Firstly, an equivalent circuit model for a BLDC motor plus its inverter system was derived. Secondly, a state-space equation was established, where the on-resistance of the FETs is expressed as a state variable and the EKF equation estimates the on-resistance. If the estimated resistance differs greatly from the known value, it can be asserted that there is a fault on that FET. Thirdly, the local convergence of the established EKF was proved. Finally, through the experiments, the performance of the proposed method was verified. The results show that the on-resistance is estimated close to the value specified in the FET data sheet in normal operation, whereas the estimated resistance is a much larger value than the normal one in case an FET fault occurs. Therefore, it is confirmed that the proposed fault detection and isolation method works appropriately in real systems.

Keywords: BLDC motor, EKF, fault detection, fault isolation, on-resistance

I. 서론

BLDC (BrushlessDC) 모터는 고효율, 고출력밀도의 특성과 고속운전이 가능하고, 구동 방식이 간단한 장점을 가져 자동차 부품, 산업용 장비 등에서 널리 사용되고 있다[5]. BLDC 모터 적용의 한 예로 자동차의 전동식 조향장치(EPS system: Electric Power Steering System)를 들 수 있다[1]. BLDC 모터 제어시스템에서 고장이 발생하면 시스템의 효율 저하와 오작동을 유발하고, 심한 경우 사고가 발생하여 인명 피해가 발생할 수 있기 때문에 안정성과 신뢰성을 확보하기 위한 고장 검출과 분리는 매우 중요하다.

일반적으로 모터 제어시스템의 고장은 크게 인버터, 센서 및 DC 링크단 커패시터의 고장으로 나눌 수 있다. 모터 제어시스템의 고장 검출에 관한 연구는 BLDC 모터를 포함하여 유도모터, 동기모터에 대해서 다양하게 연구되고 있다. 참고 문헌 [3,9]에서는 고장이 시스템에 미치는 영향에 대해 해석적으로 혹은 시뮬레이션으로 분석하였다. 이들 연구는 고장 진단보다는 고장이 발생한 경우 전체 제어 시스템에 어떤 영향이 있는지를 분석하였다. 참고문헌 [4,11]에서는 고장의 유형에 따른 데이터베이스를 구축하고 입력 신호와 데이터베이스를 비교하여 고장을 유추해내는

방법을 제시하였다. 이 방법은 다양한 조건에서 데이터베이스를 구축하여야 한다는 단점이 있다. 참고문헌 [12]에서는 PMSM (Permanant Magnet Synchronous Motor) 구동기의 센서 고장을 검출하고 고장 허용 제어(fault tolerant control) 방법이 연구되었다. 이 연구는 본 연구와 다르게 PMSM에 한정하였으며 센서 고장만을 다루었다.

본 연구에서는 BLDC 모터의 인버터 고장을 검출하는 방법으로서 EKF를 이용하여 인버터 FET의 on 저항을 추정하는 방법을 제안한다. FET에 고장이 발생하면 on 저항이 FET 제조사의 규격과 크게 차이가 나게 되므로 이를 이용하여 고장을 판별한다. EKF를 위한 모델식은 인버터에 인가되는 DC 전압을 입력으로 사용하고 상태변수로서 상 전류(phase current)와 FET의 on 저항을 사용한다. 한편, EKF의 수렴성은 EKF를 사용할 때 항상 문제가 되는데 제안된 모델식은 추정오차가 국소적으로(locally) 한계(bounded) 됨을 증명하였다.

본 논문과 유사하게 관측기를 이용한 인버터의 고장을 진단하는 기존 연구는 참고문헌 [2]와 [13]이 있다. 참고문헌 [2]에서는 모터의 종류에 관계없이 인버터에 공급되는 DC 전압 및 전류를 추정하고 이를 참값과 비교하여 고장을 진단하는 방법으로 인버터에 공급되는 DC 전압과 전류의 참값을 모터의 다양한 구동조건에 모두 알고 있어야 한다는 단점이 있다. 참고문헌 [13]에서는 PMSM 모터를 대상으로 하며 EKF를 사용하여 고정자(stator)의 저항을 추정하는 방법으로 고장을 검출한다. 모델식은 모터 고정자 코일의 중성점(neutral point) 전압과 고정자 각 상(phase)에 공급되는 전압의 차이를 측정하여 입력으로 하고 상전류 및 고정자

* Corresponding Author

Manuscript received December 19, 2013 / revised February 3, 2014 / accepted April 20, 2014

김선기, 성상만, 강기호: 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부
(mechaed@koreatech.ac.kr/ssman@koreatech.ac.kr/khkang@koreatech.ac.kr)

※ 본 논문은 한국기술교육대학교 교육연구진흥비 지원으로 연구하였음.

저항을 상태변수로 하는 상태방정식을 이용한다. 본 논문은 참고문헌 [13]과 접근 방법이 유사해 보이나 다음과 같은 점에서 큰 차이점이 있다. 첫째, 본 논문은 BLDC를 대상으로 한다는 점이며, 둘째, 고장이 일어나지 않는 고정자 저항을 추정하여 간접적으로 고장을 판별하는 방법 대신에 고장이 실제 일어나는 부분인 FET의 on 저항을 추정하여 직접적으로 고장을 판별하여 고장 유무 판단이 간단하다는 점, 셋째, 모터 코일의 중성점 전압과 고정자 상전압 차이를 측정하는 대신 인버터에 공급되는 DC 전압을 측정하여 입력으로 사용하여 중성점 단자가 불필요하며 또한 요구되는 센서 숫자가 적다는 점에서 차이가 있다. 마지막으로 본 논문에서는 필터의 오차 한계성을 증명하였다는 점이다.

본 논문의 구성은 II 장에서는 BLDC 제어시스템의 구조 및 인버터 고장에 대해 설명하고, III 장에서는 EKF에 의한 고장추정 방법으로서 BLDC 인버터 모델의 등가회로와 시스템 식을 제시하고, IV 장에서는 필터의 추정오차 한계성을 증명한다. V 장에서는 하드웨어 실험으로 제시된 고장 검출 및 분리 방법의 타당성을 보이며 VI 장에서는 결론을 맺는다.

II. BLDC 제어시스템 구조 및 고장유형

1. BLDC 제어시스템 구조

BLDC 모터 제어시스템은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

R_s 는 고정자 저항, L_s 는 고정자 자기 인덕턴스(self inductance), e_{as} , e_{bs} , e_{cs} 는 각각 a, b, c 상의 역기전력(back electromotive force)이다. V_{dc} 는 인버터에 공급되는 DC 전압이다. 고정자 등가회로의 동적 모델은 3상 평형상태를 유지하여 다음과 같이 표현 할 수 있다[5].

$$v_{kn} = R_s i_k + L_s \frac{di_k}{dt} + e_{ks} \quad (k = a, b, c) \quad (1)$$

여기에서 v_{kn} 은 고정자 중성점에 대한 각 상의 전압이며 i_k 는 각 상에 흐르는 전류이다.

BLDC 전동기의 회전자는 영구자석으로 구성되어 회전자 위치에 따른 릴럭턴스(reluctance)의 변화가 없고, 고정자 3상 권선들이 대칭인 경우 3상 권선의 자기 인덕턴스 L_s 와 권선들 간의 상호 인덕턴스 M 은 모두 동일하므로 전동기가

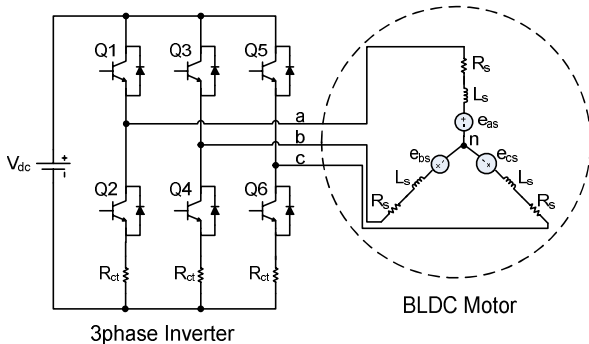


그림 1. BLDC 모터 제어 시스템.
Fig. 1. BLDC motor control system.

동작중일 때의 고정자 인덕턴스(L_o)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$L_o = L_s - M \quad (2)$$

상호 인덕턴스 M 의 크기는 $L_s \cdot \cos 120^\circ$ 와 같으므로 인덕턴스 식 (2)는 다음과 같다.

$$L_o = \frac{3}{2} L_s \quad (3)$$

상호 인덕턴스를 고려한 BLDC 전동기의 최종적인 전압 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[5,6].

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_o & 0 & 0 \\ 0 & L_o & 0 \\ 0 & 0 & L_o \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3상 인버터는 그림 1에서와 같이 스위칭을 위한 Q1~Q6의 6개의 FET로 이루어져 있다. 본 논문에서는 전류 측정을 위한 션트저항(shunt resistor)인 R_{ct} 를 아래쪽 FET에 부착한다고 가정한다.

BLDC 모터의 구동 방법은 그림 2와 같이 120° 간격으로 발생하는 사다리꼴 형태의 역기전력이 평탄한 구간에 구형과의 전류를 흘려줌으로써 토크 맥동이 없는 원활한 구동이 가능하다. 구간은 총 6개로 이루어져 있고, 각 구간은 전기적으로 60° 로 이루어져 한 주기는 전기적으로 360° (전기적인 1회전)을 의미 한다. 역기전력의 크기는 회전자의 위치에 따라 달라지기 때문에, 역기전력의 검출은 홀(hall) 센서를 사용한 회전자의 위치 검출로 간접적으로 이루어진다. 전류 인가 방법은 2개의 스위치만 동작하는 2상 여자 방식으로 각 스위치를 120° 통전방식으로 구동 한다[5].

BLDC 모터의 제어 구간은 표 1과 같이 총 6개의 구간으로 나누어지고, 구간에 따라 스위칭 되는 FET 소자가 달라지므로 각 상의 전압, 전류의 크기와 극성이 바뀐다. 이 특성을 이용하여 각 스위칭 구간별로 간략화 된 등가회로를 만들고, 고장 검출을 위한 시스템 모델링에 사용한다.

2. BLDC 제어시스템 고장유형

BLDC 제어시스템의 고장은 주로 인버터에서 발생된다. 인버터의 주요 고장 유형은 직류링크단의 커패시터 고장, 홀센서 및 전압·전류 센서의 고장, 스위칭 소자(FET, IGBT)의 고장 등이 있다. 고장에 따른 증세를 원인별로 분류하면 표 2와 같다[4].

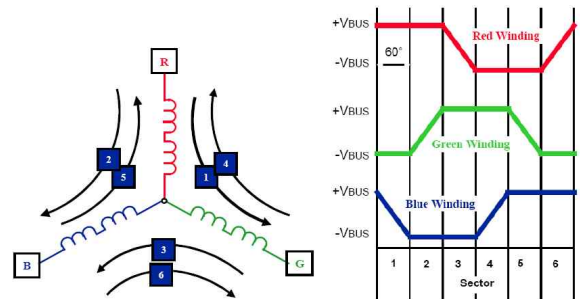


그림 2. 6-스텝 사다리꼴 통전 [10].
Fig. 2. Six-step Trapezoidal Commutation.

표 1. BLDC 제어 구간.

Table 1. Sequence of the BLDC control.

Seq.	Hall sensor			Gate Signal		Phase Current		
	H3	H2	H1			a	b	c
1	0	0	1	Q1	Q6	+I	0	-I
2	0	1	1	Q3	Q6	0	+I	-I
3	0	1	0	Q3	Q2	-I	+I	0
4	1	1	0	Q5	Q2	-I	0	+I
5	1	0	0	Q5	Q4	0	-I	+I
6	1	0	1	Q1	Q4	+I	-I	0

표 2. BLDC 인버터 고장유형.

Table 2. Failure type of the BLDC inverter.

고장 부품	고장 증세	고장 원인
직류 링크단 커패시터	직류 링크단 저전압	직류 링크단 커패시터 성능저하 또는 파손
센서	인버터에 불안정한 구동신호가 인가됨	홀 센서, 전류 센서, 전압 센서 이상
스위칭소자 (FET, IGBT)	1상의 전류가 양 또는 음의 전류만 흐름	1상의 상위 또는 하위 FET 개방(open)
	1상의 전류가 지속적으로 흐름	1상의 상위 또는 하위 FET 단락(short)

직류 링크단의 커패시터가 수명이 저하되거나 파손되면 직류 링크단의 전압은 정상 동작시의 전압보다 낮은 전압이 검출된다. 센서의 고장이 발생하면 측정치가 달라지기 때문에 제어기가 오작동을 하여 불안정한 구동신호가 인가되는 문제가 있다. FET가 개방(open) 고장 발생 시에는 고장이 발생하는 상의 전류가 흐르지 않기 때문에 0이 검출되고, 단락(short) 고장 발생 시 입력 전압과 접지 부분이 단락이 되는 순간이 발생하면 순간적으로 많은 전류가 흘러 같은 상에 연결된 FET는 모두 파괴되는 고장이 발생한다. 본 논문에서는 인버터의 다양한 고장 유형 중에서 고장 발생이 가장 빈번하고, 고장 발생 시 위험성이 큰 스위칭소자 FET의 고장을 다룬다.

III. EKF에 의한 고장 추정 방법

II 장에서 살펴본 BLDC 모터 모델에서 표 1의 6개의 제어 구간 중 1구간은 상위단의 스위치 Q1과 하위단의 스위치 Q6이 on 되기 때문에 전류 흐름은 그림 3과 같이 된다. 같은 방법으로 각 제어 구간별로 총 6개의 등가회로를 만들 수 있다.

그림 3에서 제어 1구간 부분에서만 분리하여 간략화 하면 그림 4와 같은 등가회로로 나타낼 수 있다. 1구간에서 흐르는 전류는 i_a 이고, 인덕턴스 L_o 와 저항 R_s 는 상(phase)에 따른 크기차이가 거의 없기 때문에 동일하다고 가정하면 각각 $2L_o$, $2R_s$ 로 간략화 할 수 있다. 여기서 L_o 는 고정자의 자기인덕턴스 L_s 와 상호 인덕턴스 M 의 관계인 식 (3)과 같이 $1.5L_s$ 로 구할 수 있다. 스위칭 되는 FET Q1, Q6의 내부저항 R_{on} 을 합하여 $R_1 + R_6 = R_{16}$ 으로 표현하였고, 역기전력은 $e_a - e_b$ 로 나타낼 수 있다[7].

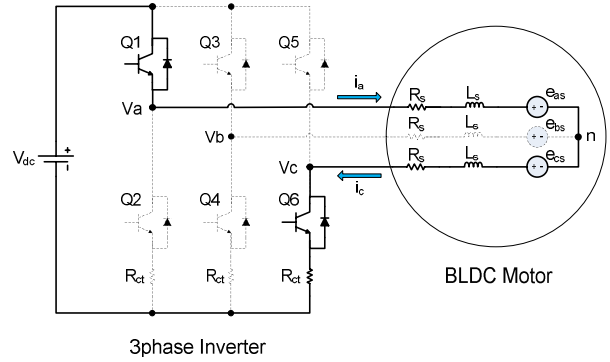


그림 3. 제어 1구간 등가회로.

Fig. 3. Equivalent circuit of section 1.

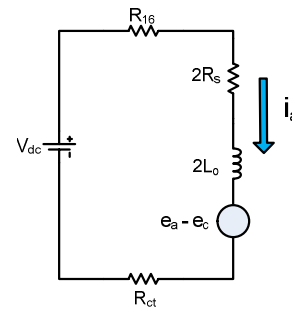


그림 4. 1 구간 간략화 등가회로.

Fig. 4. Simplified equivalent circuit of the section-1.

그림 4의 등가회로를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$V_{dc} = R_{16}i_a + 2R_s i_a + R_{ct}i_a + 2L_o \frac{di_a}{dt} + (e_a - e_c) \quad (5)$$

식 (5)을 i_a 에 대한 식으로 정리하고 R_{16} 은 고장이 발생하지 않은 정상적인 경우에 on 저항값이 변하지 않으므로 $\dot{R}_{16} = 0$ 으로 두어 함께 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{i}_a = \frac{(-R_{16} - 2R_s - R_{ct})}{2L_o} i_a + \frac{1}{2L_o} (V_{dc} - e_a + e_c) \quad (6)$$

$$\dot{R}_{16} = 0$$

입력으로 사용되는 V_{dc} 는 전압센서를 사용하여 측정하며 역기전력 e_a 및 e_c 는 모터의 회전속도를 측정하여 모터의 규격에 제시된 역기전력 상수를 곱함으로써 구할 수 있다.

식 (6)의 시스템 식은 상태변수 i_a 와 R_{16} 이 곱해져 있는 비선형 식으로 이루어졌기 때문에 EKF에 상태변수를 추정하여야 한다. 식 (6)에 공정잡음(process noise)을 포함하여 일반적인 비선형식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x} = f(x, u) + w \quad (7)$$

여기에서 상태변수는 $x = [i_a \ R_{16}]^T$ 이며 입력은 $u = V_{dc} - e_a + e_c$ 이다. w 는 공정잡음으로 백색잡음이고 정규분포를 따른다고 가정한다. 이산시간 EKF를 사용하기 위하여 식 (7)을 오일러 근사를 이용하여 이산시간 시스템으로 근사하면 다음과 같다.

$$x_{j+1} = x_j + f(x_j, u_j) \Delta t + w_j \quad (8)$$

아래첨자 j 가 붙은 변수들은 j 번째 샘플링 시간에서의 값들을 의미하며 Δt 는 샘플링 주기이다.

측정치는 전류이므로 제어 1구간에서는 $i_a = i_c$ 이다. 측정치는 샘플링하여 이산 측정치를 사용한다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_j = H \begin{bmatrix} i_{a,j} \\ R_{16} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$H = [1 \ 0] \quad (10)$$

여기에서 $z_j = i_{a,j}$ 로서 a 상 전류의 j 번째 샘플링에서 측정치를 의미하며 H 는 측정 행렬이다.

EKF에서는 필터의 이득(gain)을 구하기 위하여 비선형 시스템을 선형화하는데 선형화의 기준점은 미리 지정하지 않고 직전 추정치를 사용한다. 식 (8)의 시스템 식을 j 번째 시간에서 선형화 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_j = I + \begin{bmatrix} \frac{(-\hat{R}_{16,j} - 2R_s - R_{\alpha})}{2L_o} & -\frac{\hat{i}_{a,j}}{2L_o} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Delta t \quad (11)$$

여기에서 I 는 단위행렬이며 $\hat{R}_{16,j}$ 및 $\hat{i}_{a,j}$ 는 각각 j 번째 시간에서 직전 추정치이다. 측정식이 이미 선형 식이고 시불변이므로 측정행렬 H 를 그대로 사용한다.

EKF를 구성하기 위한 모델식이 완성되었으므로 잘 알려진 EKF 계산식을 사용할 수 있다. 시스템을 이산시간 형태로 표현하였으므로 이산시간 EKF를 사용하며 이 경우에는 시간갱신(time update)와 측정치 갱신(measurement update)로 나누어 계산한다. EKF의 자세한 식은 참고문헌 [8]에 설명되어 있으며 여기서는 지면 관계상 생략한다.

EKF를 수행하면 R_{16} 이 모터의 동작 중에 추정되는데 추정오차가 0으로 수렴한다는 가정 하에 정상적인 동작에서는 그 값이 FET 제조사의 규격에 제시된 on 저항에 근접한 값이 추정된다. 반면에 고장이 발생하면 규격과 상이한 값이 추정된다. 예를 들어 FET의 개방(open) 고장이 발생하면 FET의 on 저항이 이론적으로 무한대이므로 시간이 지남에 따라 R_{16} 이 계속 증가하게 된다.

지금까지 제어 1구간에서 고장을 검출하는 방법을 설명하였다. 나머지 구간에서도 모델식의 상태변수와 계수들만 달리하여 동일한 방법으로 EKF 5개를 독립적으로 실행하면 고장이 발생한 FET를 구별해 낼 수 있다. 예를 들어 제어 1구간에서 고장이 검출되었을 경우에 표 1로 부터 Q1과 Q6 중의 하나 이상이 고장이 발생했음을 검출할 수 있다. 만약 제어 1구간과 제어 6구간에서 동시에 고장이 검출되면 공통적으로 사용된 FET는 Q1이므로 Q1 FET에 고장이 발생했음을 알 수 있다.

본 논문에서 제안하는 방법으로 고장을 검출하였을 때 참고문헌 [13]과 비교하여 장점은 고장이 발생하는 부분인 FET의 on 저항을 직접 추정하여 고장유무 판단이 간단하다는 점을 들 수 있다. 아울러, 필요한 센서가 인버터 DC 공급 전압 측정 센서, 각 상의 전류 센서, 그리고 모터의

회전속도 측정센서로서 모터 중성점 단자가 불필요하다는 점과 요구되는 센서의 수가 적다는 점이다.

IV. 추정오차의 한계성

EKF로 추정하는 경우 항상 문제가 되는 것은 필터의 오차한계성이다. EKF의 경우 오차한계성에 대해 많은 연구결과가 존재하지는 않으나 그 중에서 특정한 조건이 만족되면 추정값이 참값에 가까울 때 즉, 국소적으로(locally) 오차한계성 보장에 관한 연구가 존재한다[14].

참고 문헌 [14]의 정리 4.1에 따르면 추정치가 참값 근처에서 일정한 가관측성 조건을 만족하고 만약 초기 추정치 오차가 한계되어 있으면 EKF의 추정오차는 한계됨을 알 수 있다. 가관측성 조건이란 다음과 같이 정의되는 가관측행렬이 전차원(full rank)을 가져야 한다는 의미이다.

$$U = \begin{bmatrix} H \\ HF_j \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기에서 H 및 F_j 는 식 (10)과 (11)에 정의되어 있는 측정행렬 및 선형화된 시스템 행렬이다. U 를 실제로 구해보면 항상 rank가 2를 가져 full rank 조건을 만족하므로 제안된 EKF는 국소적으로 오차가 한계되어 있음을 알 수 있다.

V. 하드웨어 실험

하드웨어 실험으로 제안한 고장 검출 알고리즘의 적합성을 확인한다. 계수 추정의 대상이 되는 FET의 on 저항은 FET의 드레인(Drain)과 소스(Source) 사이에 존재하는 저항으로, 이 저항 값을 추정하여 고장검출을 수행하게 된다. 전체 시스템은 그림 5와 같이 BLDC 모터, 인버터, 데이터 수집(data acquisition) 및 Matlab 시뮬레이션이 가능한 NI (National Instrument)의 PXI로 이루어진다. EKF는 추정치가 많을수록 정확한 추정이 가능하기 때문에 정밀한 측정 및

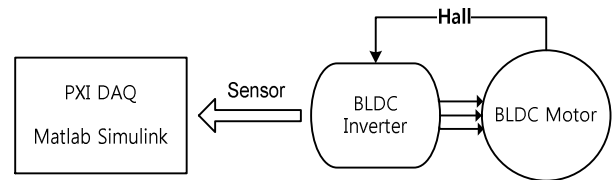


그림 5. BLDC 인버터 고장검출 구성도.

Fig. 5. Block diagram for the fault detection of the BLDC inverter.

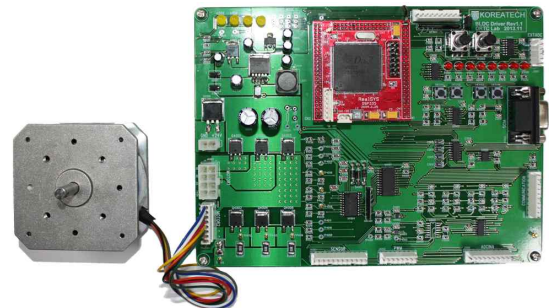


그림 6. 실험에 사용된 BLDC 제어시스템.

Fig. 6. BLDC control system used in experiment.

표 3. BLDC 모터 사양.

Table 3. BLDC motor specification.

항 목	사양
정격전압(V)	24[V]
고정자 저항(R_s)	0.44[Ω]
고정자 인덕턴스(L_s)	1.4[mH]
역기전력 상수(K_e)	0.0315
관성모멘트(J)	5×10^6 [kg.m ²]
마찰 계수(F)	3.8×10^3 [N.m.s]
극수(P)	8

데이터 수집이 가능한 PXI를 사용하였다.

고장 검출의 대상이 되는 BLDC 인버터는 다양한 실험을 위해 자유로운 하드웨어 변경과 다수의 측정 데이터가 필요하기 때문에 그림 6과 같이 제작하여 실험에 사용하였다. 제어기는 Texas Instruments의 32bit DSP (Digital Signal Processor)를 사용하였고, BLDC 모터 구동 및 제어의 기능을 수행한다. 사용된 모터의 사양은 표 3과 같다.

인버터에 사용된 FET는 최대 허용전압 55V, 최대 허용 전류 15A, on 저항 0.075 Ω 특성을 가지는 MOSFET를 사용하였다. 이에 따라 인버터 입력전압은 24V를 인가하였다. 센서값 측정 및 제어 주기는 2 μ sec를 사용하며 15kHz PWM 한주기 속도로 FET를 스위칭 하였다. 모터 회전 속도는 100rpm을 유지하도록 제어하였다.

III장에서 설명한 바와 같이 나머지 제어 구간들에서도 동일한 방법으로 고장진단을 할 수 있으므로 여기서는 제어 1구간에서 고장진단 시험 결과를 제시한다. EKF 필터에 사용된 변수들의 단위는 전압의 경우는 V, 전류는 A, 저항은 Ω 를 사용하였다. 필터 수행에 필요한 설정치들로서 먼저 잡음 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$R = 2 \quad (14)$$

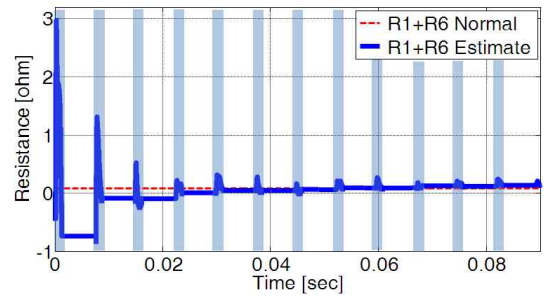
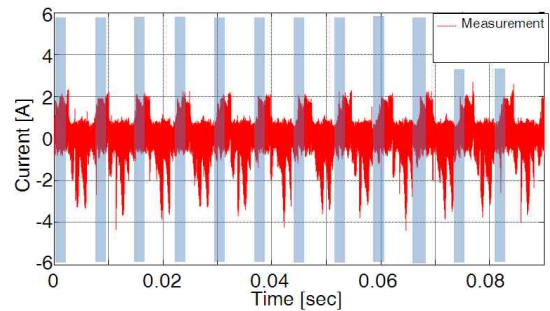
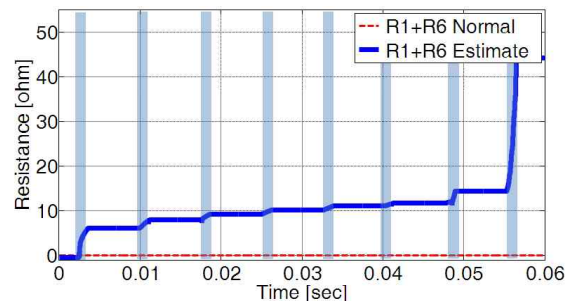
여기에서 Q , R 은 각각 공정잡음 및 측정잡음 공분산 행렬이다. 상태변수 초기치는 다음과 같다.

$$x_0 = [0.1 \ 3]^T \quad (15)$$

오차 공분산 초기값은 다음과 같다.

$$P_0 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (16)$$

실험에 의한 결과를 그림 7~10에 나타내었다. 추정이 이루어진 제어 1구간은 그림에서 회색으로 색칠한 부분이며 나머지 구간에서는 추정치를 그대로 유지하도록 하였다. 그림 7은 정상인 경우 Q1+Q6의 R_{on} 저항 정상치인 0.15 Ω 과 추정치 $\hat{R}_1 + \hat{R}_6$ 과 비교 결과이다. 결과를 보면 초기 추정 상태에서 많은 측정 잡음으로 인해 오차가 크지만 시간이 지날수록 측정값을 기반으로 오차 공분산이 최소가 되는 방향으로 추정이 진행하여 추정치가 정상치를 거의 정확히 추정하는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 정상인 경우와

그림 7. 정상인 경우 $R_1 + R_6$ 정상치/추정치.Fig. 7. $R_1 + R_6$ normal value/estimates when no fault.그림 8. 정상경우 i_c 측정치.Fig. 8. i_c measurements when fault condition.그림 9. 고장 발생 시 $R_1 + R_6$ 정상치/추정치.Fig. 9. $R_1 + R_6$ normal value/estimates when fault condition.

고장 발생인 경우 전류를 비교하기 위하여 i_c 를 도시하였다.

하드웨어 고장 검출 실험은 제어 1구간에서 작동되는 Q1 소자의 개방(open) 고장을 가정하여, DSP의 BLDC 제어 신호 중 Q1의 인가 신호를 주지 않는 방법으로 실험하였다. 실험 결과 저항 추정 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림을 보면 시간이 지날수록 $\hat{R}_1 + \hat{R}_6$ 추정치는 정상치인 0.15 Ω 을 추정하지 못하고 크게 발산하는 것을 알 수 있다. 개방 고장 발생으로 $\hat{R}_1 + \hat{R}_6$ 저항 값이 무한대가 되기 때문이다. 고장의 영향으로 정상에 비해 전류가 얼마나 달라지는지 파악하기 고장 시 전류 측정치를 그림 10에 도시하였다. 그림 8과 비교하면 고장인 경우 순간적인 전류가 약간 증가함을 알 수 있으나 전류만으로는 고장 유무를 판단하기 어려움을 알 수 있다. 이에 비해 그림 8의 저항 추정 결과는 고장 시에는 확연히 다른 결과를 주므로 고장유무

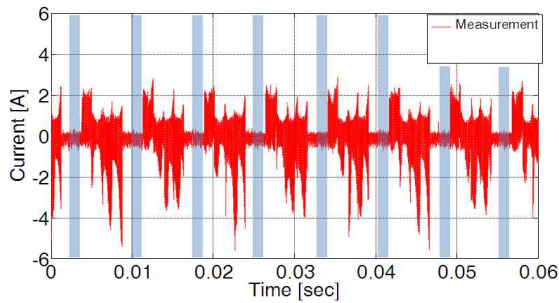


그림 10. 고장 발생 시 i_c 측정치.

Fig. 10. i_c measurements when fault condition.

판단이 가능하다. 하드웨어 실험 결과로부터 EKF를 이용한 계수 추정 방법으로 고장 검출 및 분리가 가능함을 알 수 있고, 제안한 접근법의 적합성을 확인할 수 있다.

단락 고장 시는 직렬로 연결된 FET가 모두 on이 되면 FET의 손상이 염려되어 실험으로 검증한 결과는 제시하지 못하였다. 다만 Matlab library에서 제공되는 모터 및 인버터를 사용하고 제안된 고장진단 방법을 추가한 시뮬레이터를 구성하여 시뮬레이션으로 확인한 결과 단락 시에도 FET on 저항 추정치가 급하게 0 근처 값으로 떨어짐을 확인할 수 있어 제안한 방법이 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

VI. 결론

본 논문에서는 BLDC 제어시스템의 인버터 고장을 대상으로 하여 EKF (Extended Kalman Filter)를 사용한 계수 추정(parameter estimation) 기법으로 고장을 검출하는 방법을 제안하였다. 이를 위하여 먼저 시스템 등가회로에 기반을 두고 모델식을 유도하였다. 다음으로 EKF 방법을 이용하여 3상 인버터를 구성하는 FET의 on 저항을 추정하고, 그에 따라 계수 변동에 따른 고장검출을 수행하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 실제 하드웨어 실험으로 검증하여 타당한 방법임을 확인하였다. 실제 하드웨어 실험에서는 15W급의 BLDC 제어시스템에 전류모델에 의한 고장검출을 수행한 결과 시뮬레이션과 동일하게 고장이 발생한 FET의 R_{on} 치가 고장발생 이후 매우 다르게 추정됨을 확인하여 고장 검출 및 분리가 가능함을 확인하였다.

본 논문의 결과는 자동차를 포함하여 각종 산업에 사용되는 BLDC 모터의 고장 검출에 활용할 수 있어 산업적으로도 매우 유용하다고 판단된다.

REFERENCES

[1] J. J. Lee, H. C. Lee, and J. Y. J, "Model-based fault detection and isolation for electric power steering system," *KSAE*, pp. 2207-2208, 2007.

[2] J. J. Delhotal, "Observer-based Fault Detection and Isolation for Motor Drive Inverters," pp. 9-31, 2011.

[3] J. Klima, "Analytical investigation of an induction motor drive under inverter fault mode operations," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 150, no. 3, pp. 255-262, 2003.

[4] K. H. Kim and D. K. Bae, "Fault diagnosis based on real-time data of the inverter system for BLDCM drive," *Journal of Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (in Korean)*, vol. 12, no. 2, pp. 29-37, 1998.

[5] S. H. Kim, *DC, AC, BLDC Motor Control (in Korean)*, BOGD00, pp. 426-439, 2011.

[6] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, pp. 457-463, 2009.

[7] J. W. Dixon, "Simplified sensorless control for BLDC motor, using DSP technology," *EVS19*, pp. 1435-1436, 2002.

[8] D. J. Simon, *Optimal State Estimation - Kalman, H infinity, and Nonlinear Approaches*, John & Wiley, 2006.

[9] A. Bazzi, A. Dominguez-Garcia, and P. Krein, "A method for impact assessment of faults on the performance of Field-oriented control drives: A first step to reliability modeling," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE, pp. 256-263, Feb. 2010.

[10] D. Torres, *Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering Using a Majority Function*, Microchip, AN1160, pp. 2-4, 2009.

[11] R. Peugot, S. Courtine, and J. P. Rognon, "Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 1318-1326, 1998.

[12] Y. S. Jeong, S. K. Sul, S. Schulz, and N. Patel, "Fault detection and fault-tolerant control of interior permanent-magnet motor drive system for electric vehicle," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 1, pp. 46-51, 2005.

[13] S. G. Ahn, B. G. Park, R. Y. Kim, and D. S. Hyun, "Fault diagnosis scheme for open-phase fault of permanent magnet synchronous motor drive using extended Kalman filter," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics (in Korean)*, vol. 16, no. 2, pp. 191-198, 2011.

[14] K. Reif, S. Günther, E. Yaz, and R. Unbehauen, "Stochastic stability of the discrete time extended kalman filter," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 44, no. 4, pp. 714-728, Apr. 1999.



김 선 기

2008년 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 졸업. 현재 동 대학원 석사과정. 관심분야는 시스템 식별, 실시간 제어, 차량 전자/제어.



성 상 만

1992년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1995년 동 대학원 석사. 2000년 서울대학교 전기공학부 박사. 2000년~2004년 삼성전자 무선사업부. 2004년~현재 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 교수. 관심분야는 항법, 비선형 필터, 시스템 식별 및 선형제어.



강 기 호

1985년 서울대학교 전기공학부 졸업. 1987년 동 대학원 석사. 1996년 INP Grenoble 대학 박사. 1996년~2002년 LG산전 중앙연구소 책임연구원. 2002년~현재 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 교수. 관심분야는 예측/강인 제어, 분산 실시간제어, 차량 전자/제어.