

# 시리얼 통신 기반 파라미터 추정에 의한 BLDC모터의 고장검출

(Fault Detection of BLDC Motor Using Serial Communication Based Parameter Estimation)

서석훈\* · 유정봉 · 우광준

(Suhk - Hoon Suh · Jeong - Bong You · Kwang - Joon Woo)

## 요 약

본 논문에서는 데이터 수집 보드로부터 호스트 컴퓨터로 시리얼 통신 채널을 통하여 전송된 BLDC(Brushless DC)모터의 입력과 출력 정보를 이용하여 모터의 저항값을 추정함으로써 고장을 검출하는 고장검출 시스템을 제안하였다. 프레임 크기가 고정된 프로토콜을 설계하고, 주기적으로 통신이 이루어지도록 하여 시리얼 통신 채널에서 발생하는 대역폭 제한으로 인한 시간지연문제를 해결하였으며, 저항값을 추정하기 위하여 간략화된 BLDC모터 모델과 순환형 최소자승법 알고리즘을 사용하였다. 제안된 고장 검출 방법은 실험을 통하여 성능을 확인하였다.

## Abstract

This paper presents fault detection scheme of Brushless DC(BLDC) motor drive system by estimating BLDC motor resistance using motor input and output data which is transmitted from data acquisition board to host computer over serial communication channel. Since communication time delay has a serious effect on performance, we use periodic and fixed communication protocol. Hence, the delay time is priory known. Simplified BLDC motor model and recursive least square algorithm is used for estimating motor resistance. By experiment result, we confirm the proposed scheme.

Key Words : BLDC motor, fault detection, parameter estimation, serial communication

## 1. 서 론

BLDC모터는 브러시가 없으므로, 고장이 적으며 유지·보수성이 좋다. 또한, 구조적으로 고정자가 권

선이므로 냉각이 용이하여 높은 신뢰성을 갖으며, 속도 및 위치제어가 용이하므로, 전기적 에너지를 기계적인 에너지로 변환해야 하는 응용분야에 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 형태의 전동기는 회전자의 자극을 검출하기 위한 위치센서와 전자적 정류회로를 필요로 하므로 구동회로가 복잡해지고 제어가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 그러나 최근의 반도체 소자 가격의 하락과 제어기술의 발달로 BLDC모터의 응용 범위는 산업용기계, 공정과 의료기기등 신뢰성이 요

\* 주저자 : 단국대학교 전자공학과 박사과정  
Tel : 041-550-3543, Fax : 041-550-3543  
E-mail : shsuh@dankook.ac.kr  
접수일자 : 2002년 6월 7일  
1차심사 : 2002년 6월 12일  
심사완료 : 2002년 8월 9일

## 시리얼 통신 기반 파라미터 추정에 의한 BLDC모터의 고장검출

구되는 곳에 많이 사용되고 있다. 그러나 신뢰성이 높은 BLDC모터 구동 시스템도 여러 가지 원인에 의하여 고장을 일으킬 가능성을 가지고 있다. 과부하와 높은 온도는 고정자 코일을 파괴할 수 있으며, 베어링의 결함은 마찰력을 증가 시킨다. 또한 회전자의 위치를 검출하기 위하여 사용되는 홀소자와 포토인터럽트등은 반도체 소자이므로 환경 변화에 민감하다. 그러나 시스템이 페루프 제어되는 동안에는 구동 시스템 내부에서 발생한 오류는 외부에 나타나지 않으며, 결과적으로 치명적인 오동작을 유발하게 된다. 그러므로 시스템에 치명적인 오동작이 발생되기전에 장비등을 이용하여 주기적으로 구동 시스템을 점검하고 고장의 징후를 발견하는 것이 중요하다. 또한, 최근에는 네트워크를 이용한 분산제어 방법을 이용하여 자동화 시스템을 구현하는 분야가 많아지고 있으므로 네트워크를 이용하여 시스템을 감시하고 시스템의 고장을 검출해야하는 필요성이 증가되고 있다.

고장진단의 목적은 고장이 발생되었을때 고장부위 및 고장정도를 결정하여 이에 대한 정보를 운전자나 다른 시스템에 제공함으로써 고장에 대한 적절한 대응조치를 취하도록 하는데 있으며, 고장부위를 빨리 발견할수록 치명적인 오동작을 방지할 수 있다[1].

모터의 고장검출에는 동적시스템의 고장검출에 사용되는 방법들이 적용된다. Xiang-Qun등은 [2]에서 파라미터 추정방법과 신경회로망을 이용하여 일반적인 DC모터의 고장을 검출하고 식별하는 방법을 제안하였으며, Moseler와 R. Isermann은 [3]에서 간략화된 BLDC모터 모델을 제시하고, 이 모델을 이용한 실시간 고장검출 방법을 제안하였다.

네트워크를 이용한 자동화 시스템의 구성은 케이블수와 잡음 측면에서 장점을 갖는다. Brockett는 [4]에서 네트워크를 이용한 제어문제를 다루었으며, H. Ishii등은 [5]에서 자동화에 사용되는 네트워크는 네트워크에 의한 시간지연이 문제가 될 수 있으므로, 메시지 데이터의 크기가 작아야하며, 샘플링 주기가 고정되어야 한다고 하였다.

본 논문에서는 데이터 수집 보드에서 호스트 컴퓨터로 시리얼 통신채널을 이용하여 전송된 BLDC모터의 입력과 출력정보를 이용하여 BLDC모터의 고장을 검출하는 고장검출 시스템을 제안하였다. 시리얼 통

신 채널에서 발생하는 시간지연 문제는 프레임 크기가 고정된 프로토콜을 설계하고, 주기적으로 통신이 이루어지도록하여 해결하였으며[5], 저항값을 추정하기 위하여 O. Moseler와 R. Isermann이 [3]에서 제시한 간략화된 BLDC모터 모델과 순환형 최소자승법 알고리즘을 사용하였다.

논문의 구성은 2장에서 간략화된 BLDC모터 모델에 대하여, 그리고 3장에서는 최소자승법을 이용한 파라미터 추정 알고리즘에 대하여 소개하였으며, 4장에서는 시리얼 통신 프로토콜, 5장에서는 제안된 고장검출 시스템에 대하여, 6장에서는 실험 및 결과를 기술하였고 7장에서 결론을 맺었다.

## 2. BLDC모터 모델

BLDC모터의 고장검출을 위하여 Moseler와 R. Isermann은 [3]에서 브리지회로에 인가되는 전압, 전류와 회전자의 속도를 이용한 모델을 제안하였다. 본 논문에서는 [3]에서 제안된 BLDC모터 모델을 이용하여 고장을 검출하므로, [3]에서 제안된 BLDC모터 모델을 소개한다.

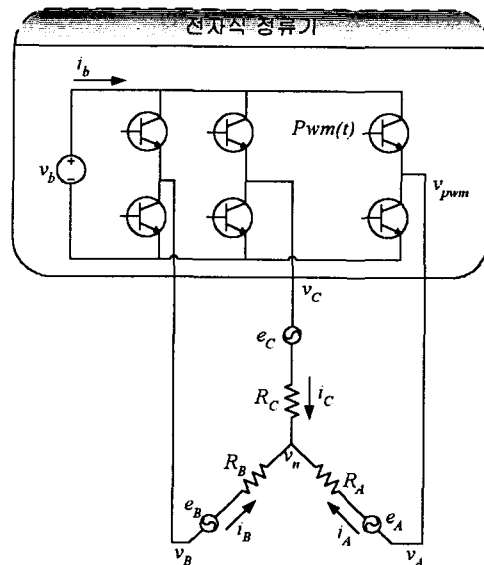


그림 1. 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit

3개의 홀 소자에 의하여 회전자의 위치가 검출되는 4극 3상 Y-결선된 BLDC 모터는 60° 간격으로 인버터에 스위칭 패턴이 인가되며[6] 인덕턴스를 무시한 경우 BLDC모터의 등가회로는 그림 1과 같이 표현되고 A상의 전압방정식은 식(1)과 같이 된다.

$$v_A - v_n = R_A i_A(t) + e_A \quad (1)$$

식(1)에서  $v_A$ 는 A상 전압,  $v_n$ 은 Y-결선 중성점의 전압이며, A상의 역기전력  $e_A$ 는 식(2)와 같이 표현된다.

$$e_A = K_{EA} \omega_r(t) \quad (2)$$

식(2)에서  $K_{EA}$ 은 역기전력 상수이며,  $\omega_r$ 은 회전자의 각속도이다.

따라서 3상에 대한 전압 방정식은 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} v_A - v_n \\ v_B - v_n \\ v_C - v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{EA} \\ K_{EB} \\ K_{EC} \end{pmatrix} \omega_r(t) \quad (3)$$

운전중 BLDC모터는 3상중 1상이 항상 개방 상태이며, 만약 C상이 개방 상태라면  $v_A=v_{pum}$ ,  $v_B=0$ ,  $i_B=-i_A$ ,  $i_C=0$ 이 되고 이를 식(3)에 대입하면, 식(4)의 결과를 얻는다.

$$v_{pum}(t) = (R_A + R_B) i_A(t) + (k_{EA} + k_{EB}) \omega_r(t) \quad (4)$$

식(4)에서  $v_{pum}$ 은 모터의 상에 공급되는 전압으로 인버터에 공급되는 전압  $v_b$ 가 PWM변조된 것을 나타내며,  $v_{pum}=Dum(t) \cdot v_b$ 로 표현된다. 외부 컨트롤러에 의하여 만들어지는 펄스  $pwm(t)$ 은  $pwm(t) \in [-1, 1]$ 이다. 같은 방법으로 나머지 5개의 스위칭 패턴에 대하여 전압 방정식을 구할 수 있다.

조명 · 전기설비비학의논문지 제16권 제5호, 2002년 9월

상에 흐르는 평균 상 전류를  $\bar{i}$ 로 표시하면, 전력은 식(5)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} v_b \cdot i_b(t) &= v_{pum}(t) \cdot \bar{i} \\ &= pwm(t) \cdot v_b \cdot \bar{i} \end{aligned} \quad (5)$$

그러므로 평균 상 전류  $\bar{i}$ 는 식(6)과 같이 된다.

$$\bar{i} = i_b(t) / pwm(t) \quad (6)$$

나머지 5개의 스위칭 패턴에 대하여 평균값을 적용하면 식(7)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \frac{2}{3} (R_A + R_B + R_C) \bar{i} \\ &+ \frac{2}{3} (K_{EA} + K_{EB} + K_{EC}) \omega_r(t) \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에서  $\bar{v} = v_{pum}$ 이며, 식(8)과 같이 치환하면 식(9)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= \frac{2}{3} (R_A + R_B + R_C) \\ K_e &= \frac{2}{3} (K_{EA} + K_{EB} + K_{EC}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\bar{v} = R \bar{i}(t) + K_e \omega_r(t) \quad (9)$$

회전자에서 발생하는 토크는 식(10)과 같이 표현되며, 기계적인 특성은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{el} = K_T \bar{i}(t) \quad (10)$$

$$J \dot{\omega}_r(t) = T_{el} - T_{Losses} - T_{Load} \quad (11)$$

식(10)에서  $K_T$ 는 토크상수를 나타내며,  $J$ 는 회전자의 관성,  $T_{el}$ 은 모터에서 발생하는 토크,  $T_{Losses}$ 는 마찰력등에 의하여 발생하는 손실을 표시하며,  $T_{Load}$ 는 부하 토크를 나타낸다.

시리얼 통신 기반 파라미터 추정예 의한 BLDC모터의 고장검출

식(9)와 식(11)을 블록선도로 나타내면 그림2와 같이 일반적인 DC모터와 같은 형태로 표현할 수 있다 [3].

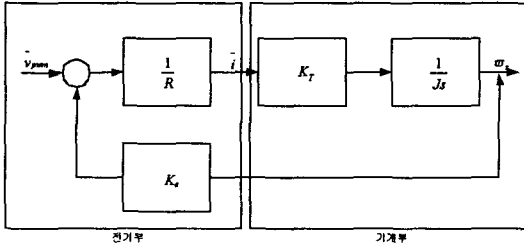


그림 2. 모터모델의 블록선도.  
(R:저항, K<sub>T</sub>:토크상수, K<sub>b</sub>:역기전력 상수, J:회전자 관성)  
Fig. 2. Block diagram of the motor model.  
(R:Resistance, K<sub>T</sub>:Torque constant, K<sub>b</sub>:back-emf constant, J:rotor inertia)

3. 파라미터 추정

본 논문에서는 BLDC모터의 고장을 검출하기 위하여 최소자승법 알고리즘을 이용한 파라미터 추정방법을 사용하였다.

일반적으로 시스템의 입력과 출력의 관계를 이산적으로 표현하면, 식(12)와 같이 표현할 수 있다.

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) \quad (12)$$

u(t)와 y(t)는 각각 시간 t에서의 입력과 출력을 나타내며 식(12)를 식(13)과 같이 정리할 수 있다.

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_n y(t-n) + b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) \quad (13)$$

식(13)을 간단히 표현하기 위하여 파라미터벡터  $\theta$  와 입·출력 벡터  $\varphi(t)$ 를 각각 식(14), 식(15)와 같이 정의하면, 식(13)은 식(16)과 같이 정리된다.

$$\theta = [a_1 \dots a_n \ b_1 \dots b_m]^T \quad (14)$$

$$\varphi(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-n) \ u(t-1) \dots u(t-m)]^T \quad (15)$$

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta \quad (16)$$

과거의 데이터를 이용하여 출력 y(t)를 계산할때는 파라미터  $\theta$ 가 중요한 역할을 하므로 이를 강조하기 위하여 식(16)을 식(17)과 같이 표현한다.

$$\hat{y}(t|\theta) = \varphi^T(t)\theta \quad (17)$$

최소자승법은 파라미터벡터  $\theta$ 를 알지 못하고,  $Z^N$ 으로 표시되는 시간구간  $1 \leq t \leq N$  동안의 입력과 출력 데이터를 가지고 있는 경우 식(18)의  $V_N$ 을 최소화하는  $\theta$ 의 추정치  $\hat{\theta}$ 을 구하는 문제이다.

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y(t) - \hat{y}(t|\theta))^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y(t) - \varphi^T(t)\theta)^2 \quad (18)$$

$\hat{\theta}$ 은 식(19)를 이용하여 구할 수 있으며,

$$\hat{\theta} = \left[ \sum_{t=1}^N \varphi(t) \varphi^T(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^N \varphi(t) y(t) \quad (19)$$

식(19)는 식(20)과 같이 순환형으로 나타낼 수 있다.[7]

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + L(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \\ L(t) &= \frac{P(t-1)\varphi(t)}{\lambda(t) + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \\ P(t) &= \frac{1}{\lambda(t)} \left[ P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda(t) + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

식(20)에서 L(t)는 추정오차에 적용되는 전처리 필터를 나타내며,  $\lambda$ 는 망각인자로 일반적으로 1보다 약간 작은 0.99나 0.95등의 값을 취하거나, 지수함수적으로 감소하는 함수를 도입하여 사용하기도 한다 [8].

#### 4. 시리얼 통신 프로토콜

측정값들이 디지털 코드로 변환된 후 통신채널을 통하여 전송되는 경우에는 통신채널에 의하여 대역폭 제한에 의한 시간지연이 발생된다. 호스트 컴퓨터에서 시리얼 채널을 통하여 수신한 측정 데이터를 이용하여 실시간으로 파라미터를 추정하기 위해서는 통신채널로 인하여 생기는 시간지연에 대한 정보를 미리 알고 있어야 하며 시스템의 설계에 반영되어야 한다[5].

본 논문에서는 시간지연이 일정하게 발생되도록 하기 위하여, 그림3과 같이 고정된 프레임의 프로토콜을 설계하여 사용하였다. 표 1은 통신 프레임의 각 필드에 대한 설명이다.

SOT	A상 전류	A상 전류	B상 전류	B상 전류	전체 전류	전체 전류	PWM	RPM	CS	EOT
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----	-----	----	-----

그림 3. 통신 프레임 구조  
Fig. 3. Communication frame structure

표 1. 통신 프레임  
Table 1. Communication frame

바이트	필드	설 명
1	SOT	통신의 시작
2	A상 전류	A상 전류 상위 바이트
3	A상 전류	A상 전류 하위 바이트
4	B상 전류	B상 전류 상위 바이트
5	B상 전류	B상 전류 하위 바이트
6	전체 전류	전체 전류 상위 바이트
7	전체 전류	전체 전류 하위 바이트
8	PWM	PWM 신호
9	RPM	속도 정보
10	CS	Check Sum
11	EOT	통신 종료

데이터 프레임은 프레임의 시작을 나타내는 SOT(Start of transmission)와 모터의 정보를 담고있는 8개 바이트, 오류 검출을 위한 CS(Check Sum), 그리고 프레임의 종료를 나타내는 EOT(End of transmission)로 구성된다.

조명 · 전기설비학회논문지 제16권 제5호, 2002년 9월

최초의 통신은 호스트 컴퓨터의 요구에 의하여 시작되며, 호스트 컴퓨터가 종료 명령을 보낼 때까지 데이터 수집 보드는 10[msec]마다 그림 3에서 정의된 데이터를 호스트 컴퓨터로 전송한다. 즉, 통신 부하를 줄이기 위하여, 최초 호스트 컴퓨터가 가지고 있던 토큰은 데이터 전송 요구와 동시에 데이터 수집 보드에 전달되고 호스트 컴퓨터의 반환 요구가 있을 때까지 계속해서 데이터 수집 보드가 토큰을 가지고 있도록 프로토콜을 설계하였다. 그림 4는 호스트 컴퓨터와 데이터 수집 보드간에 이루어지는 통신 순서를 표현한 것이다.

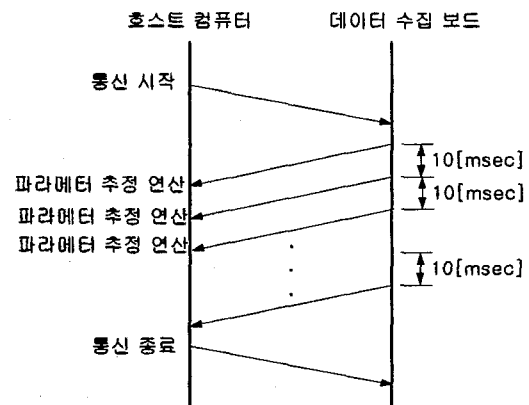


그림 4. 통신 순서  
Fig. 4. Communication sequence

비동기 프로토콜이 19200[bps], 8 data bit, no parity, 1 stop bit인 경우 통신 채널에서 생기는 시간지연은 5.7[msec]이고 호스트 컴퓨터의 계산시간은 3[msec]이므로 통신주기를 10[msec]로 설정하였다.

#### 5. 고장검출 시스템

그림 5는 제안된 고장검출 시스템의 전체구성이다. 통신용 포트가 없는 구동 시스템의 고장을 검출하기 위하여, 고장검출 시스템은 모터의 정보를 얻고, 시리얼 통신 채널을 이용하여 호스트로 전송하는 기능을 수행하는 데이터 수집 보드와 파라미터 추정 알고리즘을 계산하고 고장을 검출하는 호스트 컴퓨터로 구

## 시리얼 통신 기반 파라미터 추정에 의한 BLDC모터의 고장검출

성된다. 호스트 컴퓨터와 데이터 수집 보드는 시리얼 통신 채널을 이용하여 정보를 교환한다. 데이터 수집 보드는 호스트 컴퓨터에서 식(9)의 저항값  $R$ 을 계산할 수 있도록 전류, 속도, PWM정보를 수집한 후 그림 3에 정의된 프레임으로 구성하여 전송한다.

호스트 컴퓨터는 수신된 BLDC모터 정보를 이용하여 식(20)의 순환형 최소자승법 알고리즘을 계산하고, 계산된 결과를 모니터와 파일에 출력한다. 데이터 수집 보드는 10비트 분해능의 A/D 변환기와 타이머/카운터를 내장하고 있는 ATMEL사의 ATmega103 마이크로컨트롤러와 C언어를 이용하여 설계하였으며, 호스트 컴퓨터는 PC와 Visual C/C++을 이용하여 구현하였다.

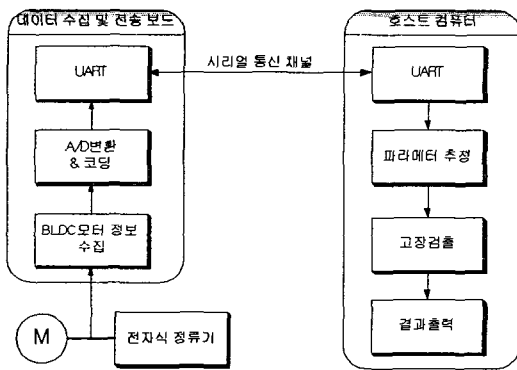


그림 5. 고장 검출 시스템  
Fig. 5. Fault detection scheme

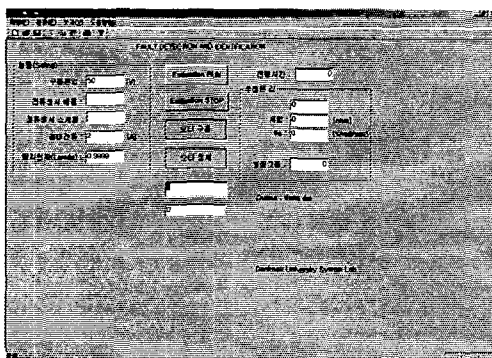


그림 6. 호스트 컴퓨터의 구성  
Fig. 6. Scheme of the host computer.

## 6. 실험 및 결과

실험장치는 BLDC모터와 데이터 수집 및 전송 보드, 그리고 호스트 컴퓨터로 구성된다. 그림 6은 호스트 컴퓨터의 화면 구성이며, 그림 7은 구현된 BLDC모터와 데이터 수집 및 전송 보드의 사진이다.

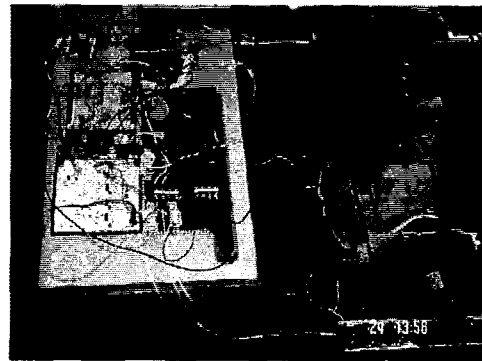


그림 7. 실험장치 사진  
Fig. 7. Picture of experimental set up

실험에 사용된 전동기는 POWERTEC사의 1[HP] 전동기이며, 모델번호는 L42ALA1100700000이고 각 상의 저항( $R_A=R_B=R_C$ )은  $1.07[\Omega]$ , 각 상의 인덕턴스는  $6[mH]$ 이며, 각 상의 역기전력 상수( $K_{EA}=K_{EB}=K_{EC}$ )는  $0.02[V/rpm]$ 이고 토크상수  $K_T$ 는  $0.175[Nm/A]$ 이다. 식(8)을 이용하여  $R$ 과  $K_e$ 를 구하면, 각각  $2.14[\Omega]$ 과  $0.04[V/rpm]$ 가 된다.

### 6.1 파라미터 추정

파라미터 추정을 위하여 BLDC모터에 그림 8(a)와 같은 PRBS(Pseudo-Random Binary Signal)형태의 입력을 인가하였으며 이때 출력인 속도는 그림 8(b)와 같이 나타난다.

입력과 출력 데이터를  $10[msec]$ 마다 샘플링하여 순환형 최소자승법을 이용하여 저항값과 역기전력 상수를 추정하면 그림 9와 같이 나타난다.

추정된 파라미터  $R$ 은 2.8%의 오차를 포함한  $2.08[\Omega]$ 이고,  $K_e$ 는 4%의 오차를 포함한  $0.0384[V/rpm]$ 이다.

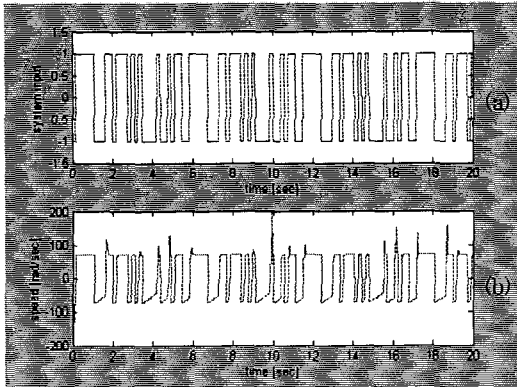


그림 8. 시스템 입력과 출력  
 (a) 시스템 입력,  
 (b) 시스템 출력(BLDC모터 속도)  
 Fig. 8. System input and output  
 (a) system input,  
 (b) system output(BLDC motor speed)

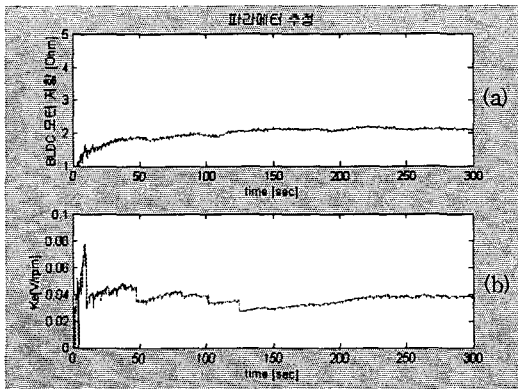


그림 9. 파라미터 추정 결과  
 (a) 추정된 R., (b) 추정된 Ke  
 Fig. 9. Result of parameter estimation  
 (a) estimated R., (b) estimated Ke.

### 6.2 고장검출

고장검출 시스템은 BLDC모터의 고정자 권선 저항의 변화를 검출하여 고장을 판단하므로 BLDC모터의 권선 저항이 정상적인 경우와 권선에 저항이 추가되어 저항값에 변화가 생긴 경우를 비교하였다.

최초 BLDC모터는 정상적으로 운전되다가 300[sec] 후에 3상중 1상에 1[Ω]의 저항을 추가하였으며, 600[sec]후에는 2[Ω]의 저항을 추가하였다. 그림 10은 실험 결과로, 300[sec]와 600[sec]에 추정된 값에 변화가 생기는 것을 확인할 수 있다.

조명 · 전기설비박람회논문지 제16권 제5호, 2002년 9월

### 6.3 통신 지연 시간의 영향

통신 채널에서 생기는 지연시간은 샘플링 시간에 포함할 수 있으므로, 시간지연의 영향을 알아보기 위하여 그림 11에서는 샘플링 시간이 10[msec], 15[msec], 20[msec]인 경우에 추정된 파라미터 값들을 비교하였다. 그림 11에서는 샘플링 시간이 변하면 추정된 파라미터 값들도 변화가 생기며, 샘플링 시간이 일정하게 유지되면 추정된 파라미터 값도 일정하게 유지되고 있다. 그러므로 정확한 파라미터를 추정하기 위해서는 일정한 샘플링 시간이 반드시 지켜져야 한다. 즉, 통신 채널에서 발생하는 시간지연이 일정하게 유지되도록 해야 한다.

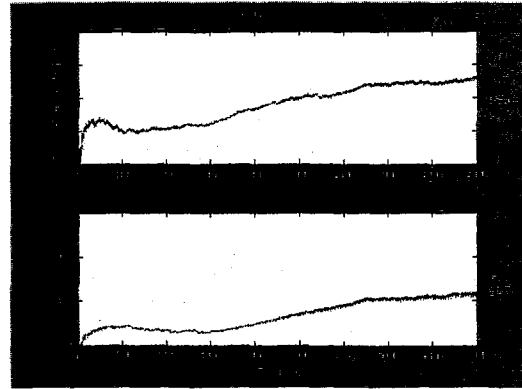


그림 10. 파라미터 변화  
 (a) R의 변화., (b) Ke의 변화  
 Fig. 10. Parameter variation  
 (a) variation of R., (b) variation of Ke

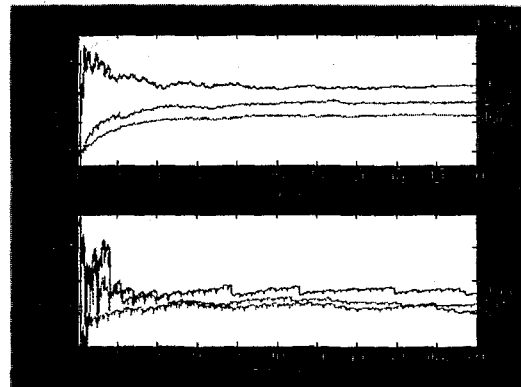


그림 11. 시간지연의 영향  
 Fig. 11. The effect of time delay

## 7. 결론

본 논문에서는 시리얼 통신채널을 통하여 전송된 데이터를 이용하여 BLDC 모터의 고정자권선 저항값의 변화를 실시간으로 감지하여, 고장을 검출하는 시스템을 제안하였으며 실험을 통하여 성능을 확인하였다. 고장검출을 위하여 간략화된 BLDC모터 모델과 순환형 최소자승법을 이용하여 파라미터를 추정하였으며, 통신 채널에서 시간지연이 일정하게 일어나도록 프로토콜을 설계하였다. 또한 실험을 통하여 시간지연의 영향을 분석하였다.

## Reference

- [1] 김지홍, 선형 동적 시스템의 고장진단 알고리즘, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1989.
- [2] Xiang-Qun, Hong-Yue Zhang, Jun Liu, and Jing Yang, "Fault Detection and Diagnosis of Permanent-Magnet DC Motor Based on Parameter Estimation and Neural Network", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, pp. 1021-1030, Oct. 2000.
- [3] O. Moseler and R. Isermann, "Application of Model-Based Fault Detection to a Brushless DC Motor," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, pp. 1015-1020, Oct., 2000.
- [4] R. Brockett, "Stabilization of motor networks," Proc. of 34th Conf. on Decision and Control, pp. 1484-1488, 1995.
- [5] H. Ishii and B. A. Francis, "Stabilization with control networks," Proc. Control 2000 Conf., 2000.
- [6] Electro-Craft Corporation, DC MOTORS SPEED CONTROLS SERVO SYSTEM, 1978.
- [7] LENNART LJUNG, SYSTEM IDENTIFICATION, Prentice Hall PTR : New Jersey , 1999.
- [8] 석진욱, 최경삼, 이종주, 조성원, "시스템 식별을 위한 Erlang 함수의 망각 인자를 가진 개선된 RLS 알고리즘", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제5권, 제4호, pp. 394-401, 1999.

## ◇ 저자소개 ◇

### 서 석 훈 (徐碩薰)

1967년 9월 22일생. 1990년 단국대학교 전자공학과 졸업. 1992년 단국대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자공학과 박사과정.

### 유 정 봉 (庾正鳳)

1964년 3월 5일생. 1988년 단국대학교 전자공학과 졸업. 1990년 단국대학교 전자공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1990-1993 신도리코 . 현재 국립 천안공업대학 전기과 조교수.

### 우 광 준 (禹廣俊)

1946년 11월 8일생. 1974년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1977년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1980년 스트라스브르데 전자제어공학 DEA. 1983년 국립그르노블공과대 제어계측공학 박사. 현재 단국대학교 전자공학과 교수.