

BLDC 전동기 운전 특성을 이용한 새로운 고장 검출 기법 구현

이정대, 박병건, 김태성, 류지수, 현동석
한양대학교

Fault Detection of BLDC Motor Based on Operating Characteristic

Jung-Dae Lee, Byoung-Gun Park, Tae-Sung Kim, Ji-Su Ryu, Dong-Seok Hyun
Hanyang University

ABSTRACT

This paper proposes a novel sensorless fault detection algorithm for a brushless DC(BLDC) motor drive system. This proposed method is configured without the additional sensor for fault detection and identification. The fault detection and identification are achieved by a simple algorithm using the operating characteristic of the BLDC motor. This proposed method can also be embedded into existing BLDC motor drive systems as a subroutine without excessive computational effort. The feasibility of a novel sensorless fault detection algorithm is validated in simulation.

1. 서 론

현대 산업사회가 생산성 향상을 위해 생산 설비의 자동화, 대용량화 다기능화가 이루어짐에 따라 생산 시스템의 신뢰도에 대한 중요성이 점차 증가되고 있다. 산업 현장에서 구동 시스템의 고장 발생시 공정 자체가 중단될 수밖에 없고, 이로 인해 발생하는 피해의 규모는 심각 할 것이다. 본 논문에서는 사용범위가 점차 증가하는 BLDC 전동기의 구동에 있어서의 고장에 대한 신뢰도를 향상시킬 수 있는 인버터 고장 검출 기법에 대해 연구하였다.

인버터 시스템에 대한 고장 검출 기법에 관하여 많은 연구가 이루어지고 있으며 관련 논문들을 살펴보면, 전문적인 지식을 기초로 작성된 값과 실제값을 비교하여 고장을 검출하는 방법^[1], 폴 전압을 측정하여 고장 여부를 분석하는 방법^[2, 3] 등 많은 방법들이 제안되었다. 하지만 고장을 판단하는데 최소한 한 주기이상 시간이 걸리거나 고장 검출이 복잡하고, 센서와 같은 추가적인 구성을 필요로 한다는 단점들을 가지고 있다. 또한 기존의 방법들에서는 고장의 검출과 확인 및 격리 등을 통합한

고장 허용 시스템에 대한 완벽한 시스템을 찾기는 힘들다.

본 논문에서 제안한 고장 검출 방법은 BLDC 전동기의 구동특성을 이용함으로써 추가적인 비용과 장치가 필요 없을 뿐만 아니라 기존의 방법에 비해 고장을 검출하는 시간을 단축시킴으로써 고장 발생 후 시스템의 제어 성능을 우수하게 유지할 수 있다. 그리고 통합된 완벽한 고장 허용 제어 시스템의 구현을 위하여, 제안한 고장 검출 기법에 양방향 스위치를 이용하여 고장이 발생한 상의 격리와 동시에 직류 링크 중성점을 연결함으로써 4-스위치로 구동시키는 재구성 방법^[4]을 채택하여 적용하였다. 제안한 고장 허용 시스템의 가능성과 우수성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

2 제안한 고장 허용 시스템

본 논문에서 제안한 방법은 히스테리시스 전류 제어기에 간단하게 고장 검출 알고리즘을 추가함으로써 고장 검출을 위한 센서나 추가 구성없이 소프트웨어적인 방법으로 인버터 스위치의 개방된 상고장을 검출하는 방법이다. 이러한 고장 검출을 위해서는 고장 상황에 대한 적절한 이해가 필요하다.

2.1 고장 검출 원리

BLDC 전동기 구동회로에서 스위치 또는 한 상이 개방된 고장을 일으켰을 때는 전류가 흐를 수 없게 되어 실제전류는 기준전류를 추종할 수 없다. 실제전류와 기준전류의 차가 미리 선정된 임계값(th)을 초과하게 되면, 다음과 같은 논리로 시스템은 오류를 탐지하게 된다.

```
IF  $|I_{ref} - I_{act}| > th$  THEN error  
ELSE normal
```

발생된 오류가 연속적으로 고장 검출 시간(T_{fault}) 이상 지속된다면 다음과 같은 논리에 의해 고장으로 판단하여 $Fault_Flag$ 1의 신호는 발생한다.

IF (*count a* > *T_{fault}*) **THEN** *Fault_Flag 1 high*
ELSE *normal*

고장 검출에 필요한 시간은 일반적으로 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$T_{fault} = K \times \frac{1}{p \times \omega_{ref}} \times \frac{1}{mode}$$

(3)

T_{fault} : 고장 판단 시간 *K* : 고장 판단에 대한 민감도
p : 전동기의 극수 *ω_{ref}* : 기준 속도
mode : Mode 수

고장이 발생한 스위치의 검출 원리는 *Fault_Flag 1* 신호가 발생하고, 다음 *Mode*에서 *Fault_Flag 2* 신호 상태에 따라 고장 스위치는 검출 되어진다. 일정시간 이후 실제전류가 기준전류를 추종하지 못한다면 *Fault_Flag 2* 는 *High*의 신호를 발생하며, 하단 스위치 이상을 검출하고, *Low*로 유지된 경우 상단 스위치 이상을 검출한다. 고장 스위치를 검출하는 논리는 다음과 같다.

Next Mode And after *count b*
IF *I_r e f^{act}* **THEN** *Fault_Flag 2 high*
ELSE *Fault_Flag 2 low*

Table 1은 *Fault_Flag*의 상태에 따른 고장 스위치 검출 원리를 보여준다.

표 1 6-Mode 변환 시 고장 스위치의 판별

Table 1 The Fault State of Switches in Six-Mode Conversion

Mode Conversion	Flag 1 (Previous Mode)	Flag 2 (Next Mode)	Fault Switch
Mode 6 ⇨ Mode 1	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>S₅</i>
	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>S₆</i>
Mode 1 ⇨ Mode 2	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>S₆</i>
	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>S₁</i>
Mode 2 ⇨ Mode 3	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>S₁</i>
	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>S₂</i>
Mode 3 ⇨ Mode 4	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>S₂</i>
	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>S₃</i>
Mode 4 ⇨ Mode 5	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>S₃</i>
	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>S₄</i>
Mode 5 ⇨ Mode 6	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>S₄</i>
	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>S₅</i>

2.2 전체적인 고장 허용 시스템 구성

본 논문에서 제한한 고장 검출 기법을 적용한 고장 허용 시스템의 전체적인 구성은 그림5와 같다.

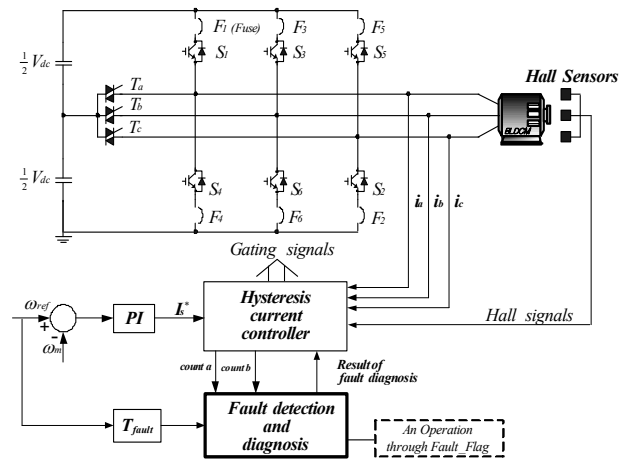


그림 5 전체적인 고장허용 구동시스템 구조

Fig. 5 The overall structure of the proposed fault tolerant drive system

3. 시뮬레이션

제안한 방법의 우수성을 입증하기 위하여 기존에 제안되어진 기준전류 추정오차에 근거한 고장 검출 방법^[5]과 비교 되어졌다. 시뮬레이션을 위해 사용된 BLDC 전동기의 정격과 파라미터들은 표 2와 같다.

표 2 BLDC 전동기의 정격과 파라미터들
 Table 2 Ratings and Parameters of BLDC Motor

정격 전압	V	300 [V]
정격 토크	<i>T_e</i>	0.662 [Nm]
정격 속도	<i>N_r</i>	3,000 [rpm]
저항	<i>R_s</i>	11.9 [Ω]
인덕턴스	<i>L_s</i>	2.07 [H]
역기전력 상수	<i>K_e</i>	22.9 [V/rpm]
극 수	<i>P</i>	4

전동기의 파라미터와 고장 시점 모두 동일한 조건에서 이루어졌다. 기존의 방법의 살펴보면, 그림 6(a)는 24.8 [ms]에서 인버터의 고장이 발생하였을 때 3상의 전류 파형을 보여주며, 고장 확인을 위한 고장 검출 시간이 한 모드 이상의 시간이 필요하기 때문에 그림 6(a)와 같이 *Mode 1*에서 상단 스위치가 고장이 발생하였을 때 오차 검출 시간이 고장 검출 시간에 이르지 못한 상태에서 스위칭 패턴의 변화로 시스템의 정상적인 동작을 수행하였기 때문에 고장으로 인식하지 않는다. 그러므로 기존 방법은 시스템 신뢰성 저하는 피할 수 없다. 그림 6(b)는 고장 발생에 따른 회전자 속도의 변화를 보여준다.

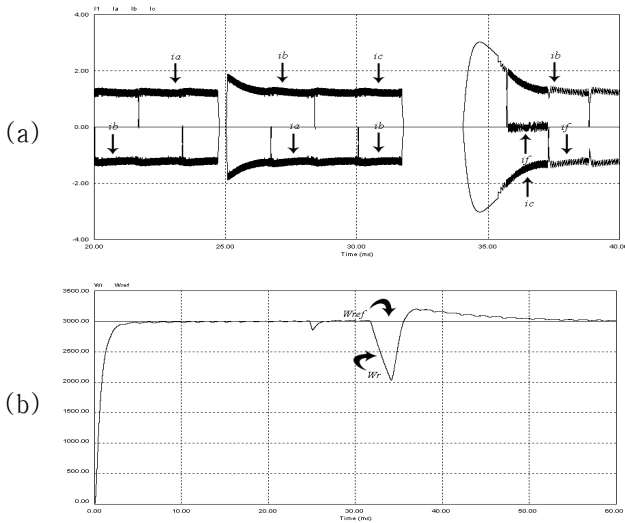


그림 6 기준전류 추정오차에 근거한 기존의 방법의 시뮬레이션 결과 (a) 고장 전류파형 (b) 회전자 속도

Fig. 6 Simulation results of the existing method by difference of reference and actual current. (a) Faulty current waveform (b) Rotor speed

제안한 방법은 기존의 방법과 달리 모드 변화 시점에서 고장 검출이 이루어지기 때문에 기존의 방법의 문제점을 피할 수 있다. 그림 7은 제안한 방법을 이용한 고장 허용 시스템의 시뮬레이션 결과이다. 그림 7(a)에서 24.8 [ms]에서 고장이 발생하였을 경우, 고장이 발생한 후 2.3 [ms]의 빠른 고장 판단과 고장 상 검출, 시스템의 재구성으로 인하여 정상적으로 동작하는 것을 볼 수 있다. 그림 7(b)에서 볼 수 있듯이 고장 발생 후 기준전류를 추종하지 못하고, 고장 판단이 되어지는 시간 *count a*와 이후의 *Mode*에서 고장 상 검출을 위한 시간 *count b*를 보여준다. 그림 7(c)는 *count* 시간 이후에 *Fault_Flag* 신호가 발생하는 것을 보여준다. 그림 7(d)는 회전자 속도가 고장에 영향을 받지 않고 기준 속도를 잘 추정하는 것을 보여준다.

4. 결 론

제안한 고장 검출기법은 인버터 스위치의 개방된 고장이 발생하여도 빠른 고장 검출로 인하여 제어성을 빠르게 회복하며 연속적인 운영이 가능하였다. 본 방법은 간단한 제어 알고리즘을 소프트웨어에 추가함으로써 저가의 고장에 강인한 제어 시스템을 구성 할 수 있다. 이러한 고장 검출 시스템의 실현 가능성은 기존의 재구성 방법을 적용하고, 시뮬레이션을 통하여 고장에 강인한 특성을 검증하였다. 제안한 시스템은 관련 응용분야에 적용 시 저가의 비용으로 고장 발생시에도 제어 성능을 유지하여 연속적인 운영을 할 수 있기 때문에 시스템의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있을 것이다.

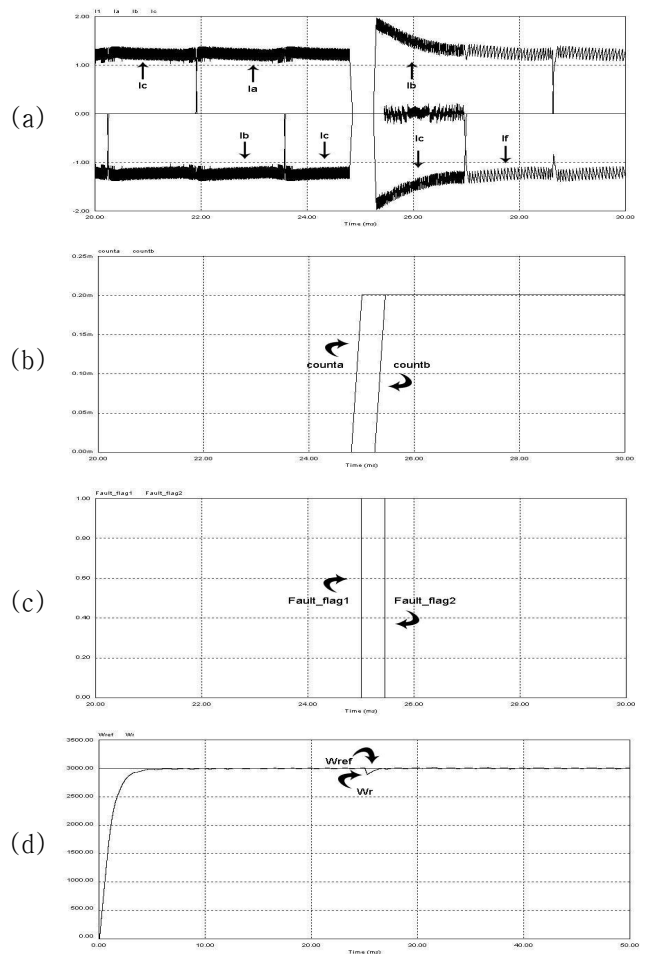


그림 7 제안한 방법을 이용한 고장 허용 시스템의 시뮬레이션 결과 (a) 상전류파형 (b) counting 시간 (c) 고장 판단과 고장 상 검출 시간 (d) 회전자 속도

Fig. 7 Simulation result using the proposed method (a) Phase current waveform (b) Counting time (c) Fault detecting and identification time (d) Rotor speed

참 고 문 헌

- [1] R. Spee and T. Lipo, "Remedial strategies for brushless dc drive failures," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 26, No. 2, pp. 259-266, Mar./Apr. 1990.
- [2] R. L. A. Ribeiro, C. B. Jacobina, E. R. C. da Silva and A. M. N. Lima, "Fault Detection of Open-Switch Damage in Voltage-Fed PWM Motor Drive Systems," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 18, No. 2, pp. 587-593, Mar. 2003.
- [3] R. L. A. Ribeiro, C. B. Jacobina and E. R. C. da Silva, "Fault-Tolerant Voltage-Fed PWM Inverter AC Motor Drive Systems," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 51, No. 2, pp. 439-446, Apr. 2004.
- [4] Byoung-Kuk Lee, Tae-Hyung Kim and M. Ehasani, "On the Feasibility of Four-Switch Three-Phase BLDC Motor Drives for Low Cost Commercial Applications: Topology and Control," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 164-172, Jan. 2003.
- [5] Byoung-Gun Park and Tae-Sung Kim, Ji-Su Ryu, Byoung-Kuk Lee, Dong-Seok Hyun, "Fault Tolerant System under Open Phase Fault for BLDC Motor Drives," *IEEE-PESC*, pp. 182, June. 2006.