

BLDCM 구동 인버터의 실시간 데이터를 이용한 고장진단

(Fault Diagnosis based on Real-Time Data of the Inverter system for BLDCM drive)

김광현* · 배동관**

(Kwang-Heon Kim · Dong-Kwan Bae)

요 약

이 논문은 브리시리스 직류전동기의 구동 인버터의 실시간 데이터를 이용한 고장진단에 관한 것이다. 구동 인버터의 고장유형을 파악하여 주요 고장증세별로 분류하고, 고장결과를 예측하여 ASCL로 시뮬레이션함으로써 지식 베이스로 구성하였다. 구동 인버터에 대해 실시간으로 감시된 데이터는 전문가 시스템의 추론기관에서 시뮬레이션된 지식베이스와 비교하게 된다. 고장이 발생하면, 운전을 중지시킨 후, 전문가 추론을 함으로써 고장원인을 진단한다. 이로써 구동 인버터에 대해 전문적인 지식을 갖고 있지 않는 사용자에게, 고장원인 제거 및 수리 대책에 관한 전문가의 지식을 신속히 제공하는 것이다.

Abstract

This paper describes the fault diagnosis based on real-time data of the inverter system for brushless DC motor drive. After identifying all the fault types in the inverter system, a preliminary typical analysis of fault types has been classified into the key fault symptoms. The predicted fault performances are then substantiated by using ACSL(Advanced Continuous Simulation Language), and the simulated results are composed of knowledge-base. The real-time measured data from the inverter system are compared with the simulated knowledge-base through the inference engine of expert system, which have been used to diagnose the fault causes. If some faults may occur in the inverter system, this system will be stopped. And then the expertise of elimination and remedial strategies about the fault causes, will be supplied rapidly to operator who doesn't know well about the inverter drive system.

1. 서 론

전동기와 구동장치들이 강인하게 설계 · 제작되었

을지라도 고장이 발생할 가능성은 항상 잠재해 있으며, 전동기 또는 구동장치의 고장으로 인한 생산 지연과 제품 생산성 저하는 심각한 경제적 손실로서 나타나고 있다. 따라서, 전동기와 구동장치의 고장을 예측하여 미리 방지하거나 또는 고장 발생시 고장원인의 신속한 파악과 처리를 지시하여 보수 비용 및

*정회원 : 전남대학교 전기공학과 조교수

**정회원 : 전남대학교 전기공학과 박사과정

접수일자 : 1997. 10. 31.

시간을 감소시킬 수 있는 고장진단 시스템을 사용하는 것이 생산비와 설비비를 절감시키는 실질적 수단이 된다[1]. 이러한 관점에서 산업용 전동기와 구동 장치의 운전특성[2]을 파악하여 고장을 예방하거나, 신속한 고장 처리[3]를 위한 고장진단 시스템에 대한 관심이 확산되고 있다.

최근 유도전동기 구동장치의 고장유형 및 구동장치에 사용되는 센서의 고장검출에 관한 연구[4~8], 고장 진단 및 모니터링 방법에 대한 연구[9]는 보고되고 있다. 또한, 브러시리스 직류전동기(BLDCM) 구동장치의 고장유형에 대해서도 부분적으로 파악[10]된 바 있다. 그러나, 전동기 구동장치가 운전중에 있을 때 실시간으로 또는 실시간 데이터를 이용한 고장진단 방법에 대한 연구는 아직 미미한 실정이다.

따라서, 이 논문은 BLDCM의 디지털 구동장치에 대해서 주요 데이터를 실시간으로 모니터링하여 고장유무를 판별하고, 고장전후의 실시간 데이터에 의해 구동장치의 고장원인을 진단하여 고장원인 및 수리방법을 지시할 수 있는 고장진단용 전문가 시스템의 개발에 관한 것이다. 이 논문에서는 원칩 마이크로프로세서(80196KC)를 이용하여 실시간으로 데이터를 검색하여 고장유무를 판별하고, 실시간 데이터를 저장할 수 있는 데이터 모니터링 시스템을 구성한다. 또한, 고장이 발생한 후에 고장원인 및 수리대책을 지시할 수 있도록 개인용 컴퓨터에 의한 전문가 시스템을 구성한다.

2. BLDCM 구동장치의 고장유형

2.1 BLDCM 디지털 구동장치

이 논문의 실험을 위한 BLDCM의 디지털 구동장치는 그림 1과 같이 구성하여 원칩 마이크로프로세서(80196KC)에 의해 속도제어를 수행하도록 하였다. BLDCM의 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, V_{an} , V_{bn} , V_{cn} : 상당 전압,

R : 상당 저항,

i_a , i_b , i_c : 상당 전류,

p : d/dt , 미분연산자,

L : 상당 인덕턴스,

e_a , e_b , e_c : 상당 역기전력

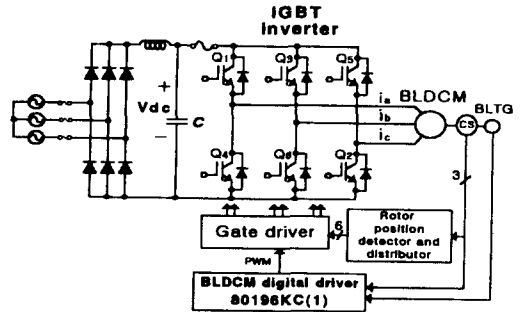


그림 1. BLDCM 디지털 구동장치
Fig. 1. BLDCM digital driver

그림 1, 식 (1) 및 표 1로부터 정격 정상운전상태의 직류단 전압 및 BLDCM의 각 상전류 파형을 시뮬레이션한 결과는 그림 2와 같다. 그림 3은 BLDCM의 실제 정격 정상운전상태에서 직류단 전압 및 BLDCM 입력단의 각 상전류를 실측한 결과로 시뮬레이션 결과와 비교적 잘 일치하고 있다.

2.2 고장유형 및 고장증세

BLDCM 구동장치에서 일어날 수 있는 고장들을 그림 4와 같이 스위치 형태로 모델링하고, 전압 및 전류 센서로부터 검출된 데이터 형태, 즉 고장증세가 유사한 원인별로 분류하면 표 2와 같다. 그림 4에서 스위치 '오프'는 스위치 양단 회로의 개방을 나타내며, 스위치 '온'은 회로의 단락 또는 지락을 나타낸다. 또한, IGBT Q_1 에 대한 고장 모델 스위치 F2와 F3은 나머지 IGBT $Q_2 \sim Q_6$ 에 대해서도 마찬가지로 적용할 수 있으나, 다만 Q_1 에 나타나는 원인과 결과가 위상차만 다를 뿐 똑같은 현상으로 파악할 수 있다.

표 2에 정리한 고장유형 중에서 중요하다고 여겨지는 '고장모드 1~4'만을 이 논문에서는 진단 대상으로 고려하였으며, 이에 대한 각각의 고장모드별 특징 및 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

표 1. 실험용 BLDCM의 정격

Table 1. Specifications of BLDCM for experiments

정격 선간전압(V_L)	111 [V]
정격속도(N)	2000 [rpm]
관성모멘트(J)	2.3×10^{-4} [Kg · m ²]
정격 토크(T)	1.5 [N · m]
상당 인덕턴스(L)	6.4 [mH]
극수	6
상당 저항(R)	2.67 [Ω]
정격 전류(I)	2.5 [A]
토크 상수(K_t)	0.01 [N · m/A]

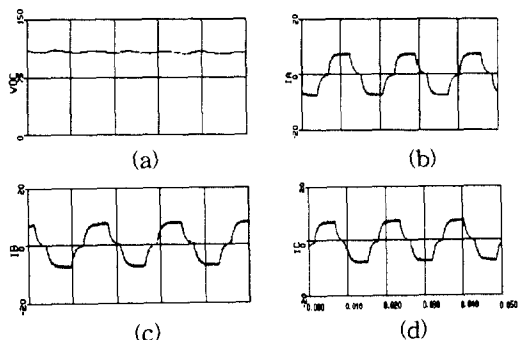


그림 2. 정상 운전상태의 시뮬레이션 파형,
(a) V_{dc} (직류 링크단 전압), (b) i_a (a상 전류),
(c) i_b (b상 전류), (d) i_c (c상 전류)

Fig. 2. Simulated waveforms in normal rated operation,
(a) V_{dc} (DC link voltage), (b) i_a (phase a current),
(c) i_b (phase b current), (d) i_c (phase c current)

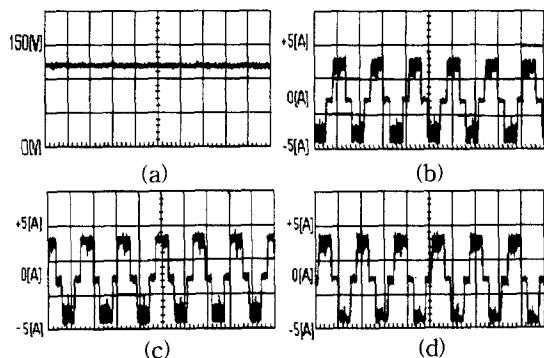


그림 3. 정상 운전상태의 실측 오실로스코프 파형,
(a) V_{dc} (직류 링크단 전압), (b) i_a (a상 전류),
(c) i_b (b상 전류), (d) i_c (c상 전류)

Fig. 3. Measured waveforms in normal rated operation
(a) V_{dc} (DC link voltage), (b) i_a (phase a current),
(c) i_b (phase b current), (d) i_c (phase c current)

1) 고장모드 1

교류 입력 전원부에서의 1상 1선의 지락 고장과

직류 링크단 커패시터 양단의 단락 또는 직류 링크단 (+) 1선의 지락고장이 발생하면, 그림 4의 직류전압 검출위치 M1에서의 검출 전압은 0이다. 또한, 정류부의 1상 다이오드의 개방 또는 단락 고장이 발생하면 M1에서의 전압은 3상 정류부의 정상 동작시의 전압보다는 낮은 전압이 검출된다. 그림 5는 이와 같은 '고장모드 1'의 경우를 시뮬레이션한 결과이다.

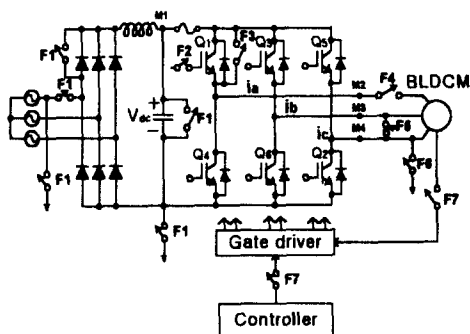


그림 4. 고장유형의 모델링
Fig. 4. Switch model for fault types

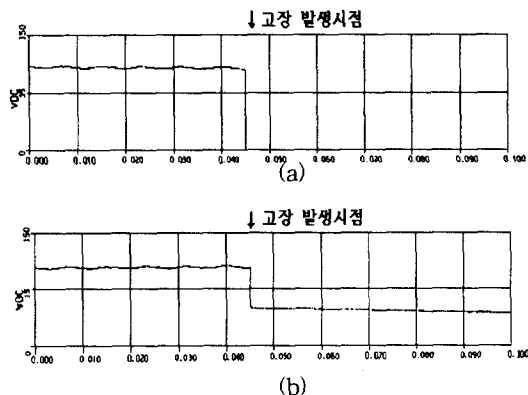


그림 5. 고장모드 1의 시뮬레이션 파형,
(a) V_{dc} (영전압으로 되는 경우),
(b) V_{dc} (저전압으로 되는 경우)
Fig. 5. Waveforms of simulation in fault mode 1,
(a) V_{dc} (when voltage is to zero),
(b) V_{dc} (when voltage is to low)

'고장모드 1'의 교류 입력 전원부 1상 1선의 지락, 직류 링크단 커패시터 양단의 단락, 직류 링크단 (+) 1선의 지락, 또는 정류 다이오드의 단락 고장 시에서는 급격한 전류가 전원단으로 흐르는 전원 단락현상이 발생하므로 신속하게 정류부의 보호동작이

표 2. 고장증세에 따른 분류

Table 2. Fault classifications according to fault symptoms

고장 모드	고 장 증 세	고 장 원 인의 대표적인 예
1	직류 링크단이 저전압 또는 영전압	교류 입력전원단 지락 또는 개방 ⁶⁾
		정류부의 다이오드 개방 또는 단락 ⁶⁾
		직류 링크단의 커패시터 단락 ⁶⁾
		직류 링크단 지락 ⁶⁾
2	어느 1상의 전류가 양의 전류 또는 음의 전류만 흐름	IGBT의 구동부 개방 또는 단락 ⁶⁾
		1상의 상위 또는 하위 IGBT 개방 ⁶⁾
3	어느 1상 전류의 크기가 0이다	전동기 입력단의 1상 개방 ^{6,10)}
4	2상은 서로 동상이며 크기가 1/2, 다른 1상은 정상적으로 동작	전동기 입력단의 선간 단락 ⁶⁾
5	어느 1상 직류전류 지속적인 흐름	1상의 상위 또는 하위 IGBT 단락 ⁶⁾
6	전동기 속도가 감소되고, 어느 1상에는 정상치 이상의 전류가 흐름	전동기 입력단 1상 지락 ⁶⁾
7	인버터에 불안정한 구동신호가 인가되고 있음	제어기에 저전압이 인가되고 있음
		위치센서에 잡음이 혼재되어 있음 ^{9,10)}
		속도센서가 개방되어 있음

수행되어야 한다.

2) 고장모드 2

‘고장모드 2’는 IGBT 게이트 신호단의 개방 또는 단락으로 인해 IGBT가 오프’로 되는 경우이거나 또는 IGBT의 파괴로 개방된 경우이다. 따라서, 해당 IGBT가 정상적으로 ‘온/오프’ 동작이 이루어져야 할 구간에서는 BLDCM의 입력 상전압과 상전류는 0이 된다. 표 3은 a상의 IGBT Q₁에 ‘고장모드 2’가 발생한 경우, BLDCM의 각 동작구간에 따른 각각의 상전류를 나타낸다. 이때 그림 4의 M2~M3의 위치에서의 상전류에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같다.

표 3. 고장모드 2인 경우 동작구간에 따른 상전류 (IGBT Q₁이 개방인 경우)

Table 3. Phase current during each operation period in fault mode 2 (when IGBT Q₁ is open fault)

구 간	스위칭 소 자	고 장 시 전 류	비 고 (정상시 전류)
$-\pi/6 \leq \theta \leq \pi/6$	Q ₅ Q ₆	$i_b = -i_c, i_a = 0$	좌 동
$\pi/6 \leq \theta \leq 3\pi/6$	Q ₆ Q ₁	$i_a, i_b, i_c = 0$	$i_a > 0, i_b < 0, i_c = 0$
$3\pi/6 \leq \theta \leq 5\pi/6$	Q ₁ Q ₂	$i_a, i_b, i_c = 0$	$i_a > 0, i_b = 0, i_c < 0$
$5\pi/6 \leq \theta \leq 7\pi/6$	Q ₂ Q ₃	$i_b = -i_c, i_a = 0$	좌 동
$7\pi/6 \leq \theta \leq 9\pi/6$	Q ₃ Q ₄	$i_a = -i_b, i_c = 0$	좌 동
$9\pi/6 \leq \theta \leq 11\pi/6$	Q ₄ Q ₅	$i_a = -i_c, i_b = 0$	좌 동

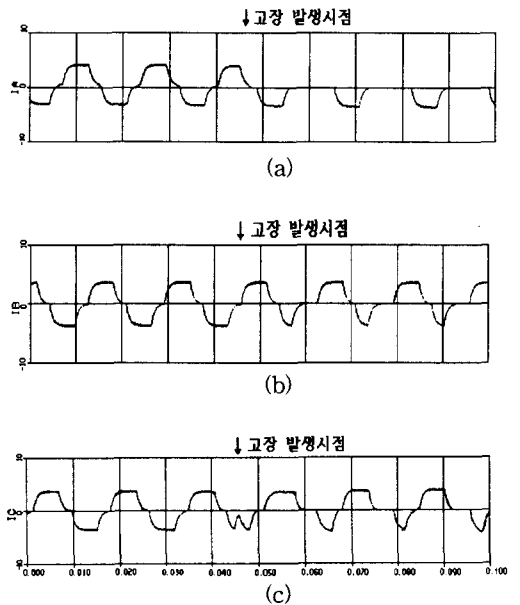


그림 6. 고장모드 2의 시뮬레이션 파형, (a) i_a(a상 전류), (b) i_b(b상 전류), (c) i_c(c상 전류)
 Fig. 6. Waveforms of simulation in fault mode 2, (a) i_a(phase a current), (b) i_b(phase b current), (c) i_c(phase c current)

3) 고장모드 3

‘고장모드 3’은 1상의 상위 또는 하위 IGBT의 게이트 신호단 개방 또는 단락, 또는 IGBT 소자의 개방, 또는 BLDCM 입력단의 1상이 개방되어 나타나는 고장의 경우이다. 실제 IGBT 소자가 정상적으로

‘온/오프’의 동작하고 있더라도 전동기 입력단에서 1상이 개방되면 BLDCM은 불평형 2상 운전상태가 된다. 비록 1상의 전류가 인가되지 않더라도 2상만으로 운전이 가능하지만, 전류와 토크의 맥동이 크기 때문에 속도 맥동이 발생할 수 있으며, 이들의 평균치는 감소한다. 표 4에서 보는 바와 같이 BLDCM 입력단 a상이 개방인 경우, a상의 IGBT Q₁ 또는 Q₄가 동작되는 구간에서는 3상 전류 모두 0이 되어 어떠한 전류의 흐름도 없는 구간이 발생된다. 그림 7은 ‘고장모드 3’인 경우, 각 상전류 파형의 시뮬레이션 결과이다.

표 4. 고장모드 3인 경우 동작구간에 따른 상전류 (BLDCM 입력단의 a상 개방인 경우)

Table 4. Phase currents during the each operating period in fault mode 3(phase a of BLDCM input terminal is open fault)

구 간	스위칭 소자	고 장 시 전 류	비 고 (정상시 전류)
$-\pi/6 \leq \theta \leq \pi/6$	Q ₅ Q ₆	$i_b = -i_c, i_a = 0$	좌 동
$\pi/6 \leq \theta \leq 3\pi/6$	Q ₆ Q ₁	$i_a, i_b, i_c = 0$	$i_a > 0, i_b < 0, i_c = 0$
$3\pi/6 \leq \theta \leq 5\pi/6$	Q ₁ Q ₂	$i_a, i_b, i_c = 0$	$i_a > 0, i_b = 0, i_c < 0$
$5\pi/6 \leq \theta \leq 7\pi/6$	Q ₂ Q ₃	$i_c = -i_b, i_a = 0$	좌 동
$7\pi/6 \leq \theta \leq 9\pi/6$	Q ₃ Q ₄	$i_a, i_b, i_c = 0$	$i_a < 0, i_b > 0, i_c = 0$
$9\pi/6 \leq \theta \leq 11\pi/6$	Q ₄ Q ₅	$i_a, i_b, i_c = 0$	$i_a < 0, i_b = 0, i_c > 0$

4) 고장모드 4

‘고장모드 4’는 BLDCM 입력단의 b상과 c상이 서로 선간 단락이 되는 경우이다. a상 전류는 모든 구간에서 정상적으로 ‘온/오프’로 동작하지만, b상과 c상 전류는 서로 동상이면서 a상 전류에 비해 크기는 1/2이 되고 전류의 흐름은 a상 전류와 반대방향이 된다. 전류와 토크의 맥동이 크기 때문에 속도 맥동이 나타날 수 있으며, 운전시 평균속도는 지령 속도보다 작게 된다. 표 5는 동작구간에 따른 각 상의 전류를 나타내며, 그림 8은 그림 4의 M2~M4 위치에서의 상전류에 대한 시뮬레이션 결과이다.

3. 실시간 데이터 모니터링 시스템

데이터의 실시간 모니터링과 데이터 저장에 관한

제어 프로그램은 8096 어셈블리 언어로 작성되었다. 그림 4의 M1~M4에 위치한 전압센서와 전류센서로부터 실시간으로 데이터를 모니터링하기 위해서 그림 9의 원칩 80196KC내의 A/D 변환기능을 이용하였다. 이때 A/D 입력 채널별로 보호회로를 부착하여 입력신호의 과도한 전압, 전류로 인한 마이크로프로세서의 불안정한 동작요소를 제거하였다.

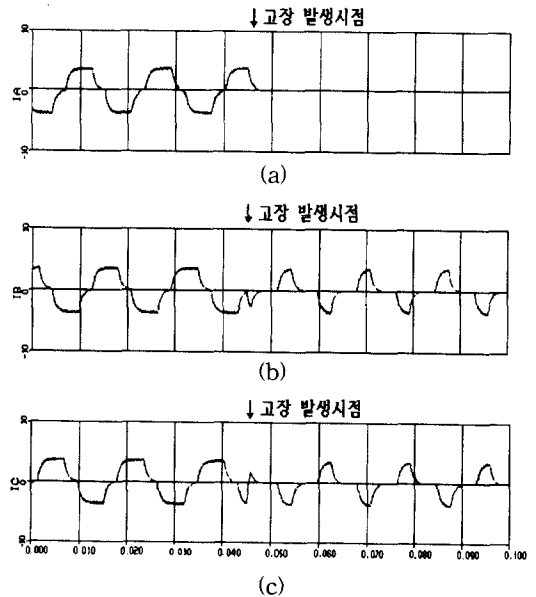


그림 7. 고장모드 3의 시뮬레이션 파형, (a) i_a(a상 전류), (b) i_b(b상 전류), (c) i_c(c상 전류)
Fig. 7. Waveforms of simulation in fault mode 3, (a) i_a(phase a current), (b) i_b(phase b current), (c) i_c(phase c current)

표 5. 고장모드 4인 경우 동작구간에 따른 상전류 (BLDCM 입력단의 b, c상 단락 고장인 경우)

Table 5. Phase currents during the each operating period in fault mode 4 (phase b, c of BLDCM input terminal are is short fault)

구 간	스위칭 소자	고 장 시 전 류	비 고 (정상시 전류)
$-\pi/6 \leq \theta \leq \pi/6$	Q ₅ Q ₆	$i_a = i_b = i_c = 0$	$i_a = 0, i_b < 0, i_c > 0$
$\pi/6 \leq \theta \leq 3\pi/6$	Q ₆ Q ₁	$i_b = i_c = -i_a/2$	$i_a > 0, i_b < 0, i_c = 0$
$3\pi/6 \leq \theta \leq 5\pi/6$	Q ₁ Q ₂	$i_b = i_c = -i_a/2$	$i_a > 0, i_b = 0, i_c < 0$
$5\pi/6 \leq \theta \leq 7\pi/6$	Q ₂ Q ₃	$i_a = i_b = i_c = 0$	$i_a = 0, i_b > 0, i_c < 0$
$7\pi/6 \leq \theta \leq 9\pi/6$	Q ₃ Q ₄	$i_b = i_c = -i_a/2$	$i_a < 0, i_b > 0, i_c = 0$
$9\pi/6 \leq \theta \leq 11\pi/6$	Q ₄ Q ₅	$i_b = i_c = -i_a/2$	$i_a < 0, i_b = 0, i_c > 0$

BLDCM 구동 인버터의 실시간 데이터를 이용한 고장진단

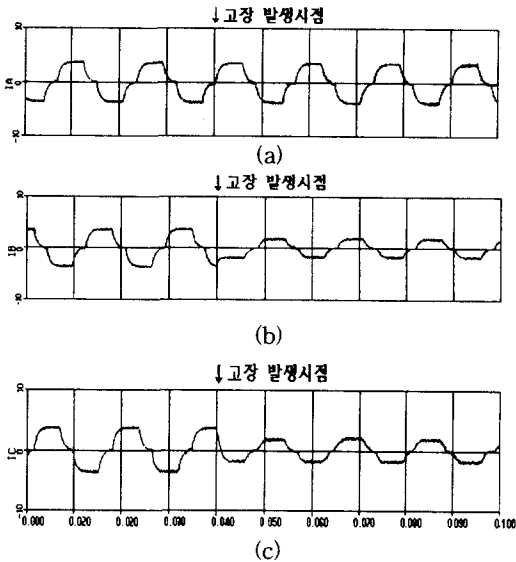


그림 8. 고장모드 4의 시뮬레이션 파형,
 (a) i_a (a상 전류), (b) i_b (b상 전류), (c) i_c (c상 전류)
 Fig. 8. Waveforms of simulation in fault mode 4,
 (a) i_a (phase a current), (b) i_b (phase b current),
 (c) i_c (phase c current)

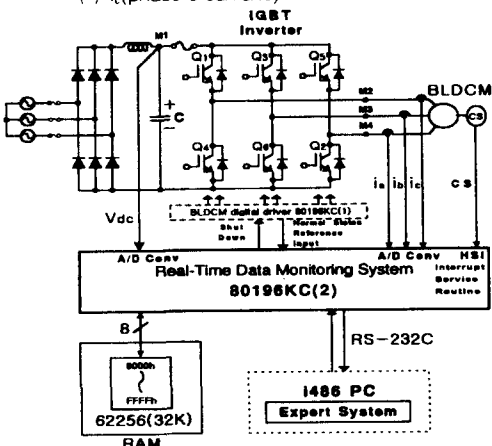


그림 9. 실시간 데이터 모니터링 시스템
 Fig. 9. Real-time data monitoring system

BLDCM의 코뮤테이션 센서(CS)로부터 출력되는 신호의 상승에지(rising edge)와 하강에지(falling edge)를 80196KC의 HSI(High Speed Input)의 인터럽트 신호로 사용하여 이것에 동기되어 고장판별 알고리즘이 수행되도록 하였다. 인터럽트 신호는 전동기의 속도에 따라 인터럽트 발생 주기가 달라지며, 그림 10에서 보는 바와 같이 회전자 위치 θ 에 따른 CS 신호는 서로 120° 의 위상차가 있어 전동기

의 1회전당 6번의 인터럽트 발생, 즉 전동기 1회전당 6번의 데이터 저장과 고장판별 알고리즘이 수행되도록 하였다.

그림 11은 데이터 모니터링 시스템의 80196KC(2)에 의한 고장유무 판별을 위한 알고리즘의 순서도로서 고장유무 판별기능과 고장진단에 사용된 실시간 데이터를 저장하는 기능을 갖고 있다. 예를 들어, CS 신호가 상승에지인 IRQ2 경우, 80196KC(2)는 인터럽트가 발생한 것으로 인지하고, 이때의 직류 링크단 전압, BLDCM 입력 3상 전류의 데이터를 A/D 변환한 후, 정상 운전시의 기준값들을 비교하여 고장유무를 판단하게 된다. 이 논문에서는 BLDCM이 운전상태의 정상상태에 도달한 후, 데이터 저장, 고장유무 판별과 고장진단 루틴이 수행되도록 구성하였으며, 속도와 토크의 변화에 추종하는 과도상태에서의 고장진단은 고려하지 않았다.

80196KC(2)에 내장되어 있는 4개의 A/D 채널로 입력되는 실시간 데이터를 저장하는 메모리 크기를

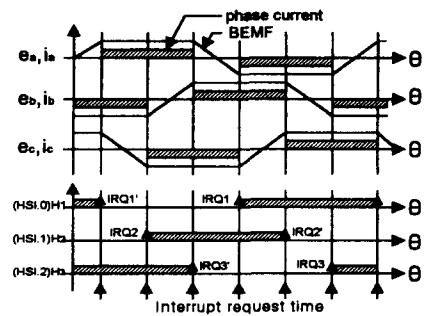


그림 10. 코뮤테이션 센서 신호에 따른 고장유무 판별 시점
 Fig. 10. Fault occurrence distinction interrupt by using commutation sensor signals

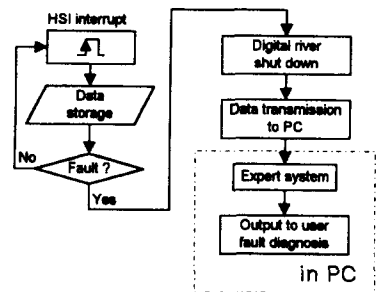


Fig. 11. 데이터의 저장 및 고장유무 판별 순서도
 Fig. 11. Flowchart for fault occurrence distinction and monitoring data storage

각각 4Kbyte로 설정하였으며, 모니터링 시스템의 RAM 62256(32Kbyte)에 항상 일정 샘플링 시간마다 FIFO(First Input First Output)방식으로 데이터를 저장한다. 고장이 발생한 후에도 일정기간 동안 데이터가 저장되도록 하여 고장발생 전후의 데이터를 비교할 수 있도록 하였다. 또한, 저장된 데이터가 소멸되지 않도록 모니터링 시스템은 배터리-백업(battery back-up)시스템으로 구성되어 있다.

실시간 데이터를 저장한 후, 이 데이터와 정상상태에 대한 기준값과 비교하여 고장유무를 판단하도록 하였다. 고장유무에 대한 판단 기준값은 지령속도와 부하전류에 대해 미리 시뮬레이션되어 모니터링 시스템의 RAM에 저장되어 있으며, BLDCM 구동장치로부터 정상상태일 때의 지령속도와 평균 전류값으로부터 기준값을 찾을 수 있도록 하였다.

이 논문에서는 감시용 센서로부터 데이터를 계속하여, 1차적으로 BLDCM의 입력전류에 이상이 있는지를 실시간으로 판별하게 된다. 고장으로 판단되면 데이터 모니터링 시스템의 80196KC(2)는 BLDCM 디지털 구동장치의 80196KC(1)로 인터럽트를 발생하여 구동장치의 동작을 안정적으로 중지시켜 되도록이면 1차적인 고장에 의한 2차적인 고장이 유발되지 않도록 하였다. 이러한 인터럽트에 의해 디지털 구동장치의 80196KC(1)은 교류 입력단의 마그네틱 스위치와 모든 IGBT의 게이팅 신호를 ‘오프’가 되도록 하였다. 다음으로 데이터 모니터링 시스템의 80196KC(2)로부터 메모리에 저장된 고장 전후의 실시간 데이터가 PC로 송신되어 고장진단에 필요한 데이터 베이스가 형성되도록 하였다.

4. 고장진단 전문가 시스템의 구성

이 논문의 전문가 시스템은 그림 12와 같이 크게 지식 베이스와 추론기관으로 구성되어 있다. 지식 베이스는 가장 일반적인 형태인 “규칙에 의한 지식 표현 방법”을 사용하였으며, 지식 베이스는 규칙 베이스와 데이터 베이스로 구성되어 있다. 규칙 베이스에는 각종 경험적 탐색 규칙과 사용자-컴퓨터 인터페이스 등을 위한 제반 규칙 등이 저장되어 있

며, 데이터 베이스는 각 고장유형별로 진단을 하기 위한 정상상태의 시뮬레이션 데이터와 데이터 모니터링 시스템에서 실시간으로 계속된 고장전후의 데이터로 구성되어 있다. 앞서 설명한 바와 같이 시뮬레이션된 정상상태 데이터 베이스(1)과 실시간 데이터 베이스(2)를 규칙 베이스에 의해 비교 추론함으로써 고장진단을 수행하게 된다.

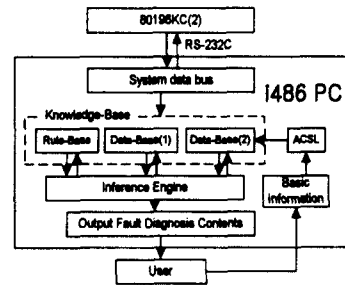


그림 12. 전문가 시스템의 구조
Fig. 12. Schematic diagram of expert system

추론기관은 지식 베이스에 저장된 지식과 규칙, 그리고 사용자로부터 제공된 정보들을 이용하여 추론 및 최적해를 탐색하는 부분이다. 이 논문에서는 두 개의 지식 베이스와 규칙 베이스로 구성된 정보를 이용하여 고장진단을 추론하게 된다. 이 논문에서의 전문가 시스템은 순차적으로 데이터를 처리하면서 문제의 최적해를 추론하고 탐색하는 ‘순방향 추론방식’을 사용하였다. 즉, 이것은 “IF[] THEN[]” 형태로, 즉, [실시간 모니터링 데이터가 시뮬레이션 데이터와 (어떠어떠)하게 다르면], [(어떠한) 고장이다. 그리고, 고장원인은 (~)이다.]와 같은 형태이다.

전문가의 지식과 경험을 컴퓨터 프로그램으로 구현하기 위해서 인공지능 언어인 LISP이나 PROLOG를 사용할 수 있지만, 이 논문에서는 윈도우즈 환경을 구현하는데 용이한 Visual BASIC 언어를 사용하였다.

이 논문의 실시간 고장진단 전문가 시스템을 순서도로 표시하면 그림 13과 같다. 초기화 부분, 데이터의 저장부, 고장 발생시 PC로의 데이터 전송부, 고장진단 전문가 시스템의 실질적인 요소인 고장 추론부 및 고장진단부 등으로 구성되어 있다.

BLDCM 구동 인버터의 실시간 데이터를 이용한 고장진단

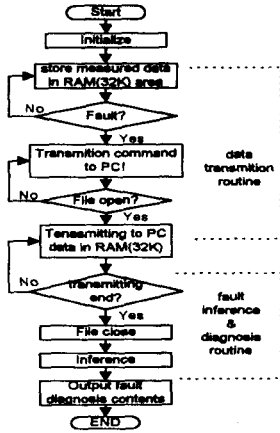


그림 13. 전문가 시스템의 고장진단 순서도
Fig. 13. Flowchart for fault diagnosis in expert system

5. 실험 결과 및 고찰

고장진단을 위한 전문가 추론사슬을 구성하는 탐색순서와 규칙은 각 고장모드 별로 형성되어 있으며, 고장이 발생하면 그림 14~그림 15에서 '고장모드 1'과 '고장모드 3'의 추론사슬의 규칙에 의해 탐색한다. '고장모드 1'의 추론사슬은 첫 번째 규칙에서는 정격 직류 링크단 전압이 인가되고 있는지 확인하고, 두 번째 규칙에서는 인가된 직류 링크단 전압이 정격 전압보다 작고, 또한 세 번째 규칙에서 영 전압이 아니며, 정격 전압의 1/2보다 크거나 작으면, 결론적으로 '고장모드 1'로 판정한다. 만약 여기에 해당하지 않으면 고장모드 2, 3, 4의 추론사슬의 규칙에 의해 해당 고장원인을 탐색하게 된다.

그림 16은 '고장모드 3'인 경우의 전류에 대한 오실로스코프 실측 파형 및 데이터 모니터링 시스템이 실시간으로 모니터링한 데이터를 PC 모니터에 재현

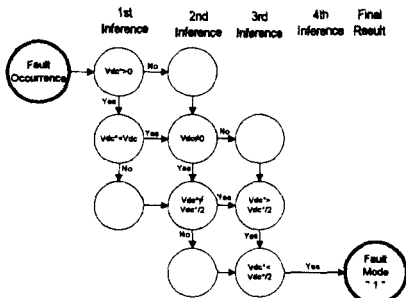


그림 14. 고장모드 1에 대한 추론 사슬
Fig. 14. Inference chain in fault mode 1

한 파형이다. '고장모드 3'에 대한 고장발생 전후의 실시간 모니터링 데이터 및 고장진단 내용은 2장에서 설명한 고장원인 및 시뮬레이션 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그 밖의 고장모드 1, 2, 4에 대해서도 2장의 시뮬레이션 파형, 오실로스코프 실측 파형과 잘 일치함을 확인하였으며, 이 논문에서는 편의상 제시하지 않았다.

고장진단 시스템의 사용자 인터페이스 화면은 BLDCM 디지털 구동장치의 보수·유지 담당자가 고장진단 시스템을 쉽게 이용할 수 있도록 하고, 고장 발생시 고장원인 및 수리대책에 관한 정보를 쉽게

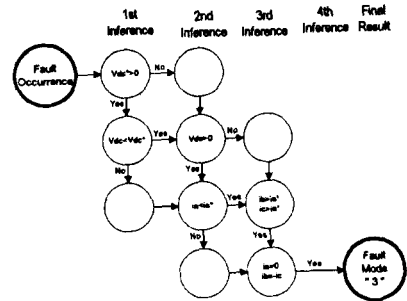


그림 15. 고장모드 3에 대한 추론 사슬
Fig. 15. Inference chain in fault mode 3

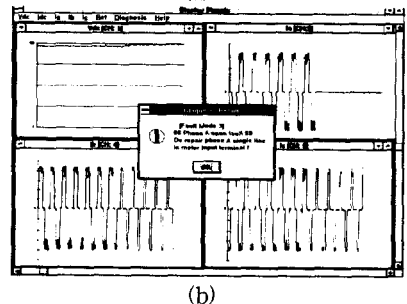
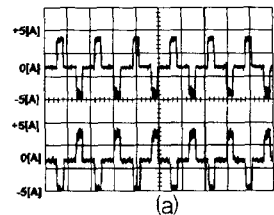


그림 16. 오실로스코프 실측 파형 및 데이터 모니터링 시스템의 계측 파형의 비교 (고장모드 3인 경우),
(a) 오실로스코프에 의한 실측 파형,
(b) 데이터 모니터링 시스템에 의한 계측 파형
Fig. 16. Comparison with simulated waveforms and measured waveforms ones(in case of fault mode 3),
(a) measured waveforms by oscilloscope,
(b) monitored waveforms by data monitoring system

이해할 수 있도록 윈도우즈 환경으로 구성하였다.

6. 결 론

BLDCM 디지털 구동장치의 실시간 데이터를 이용한 고장진단 시스템에 관한 이 논문의 주요내용과 결론으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 원칩 마이크로프로세서(80196KC)를 이용하여 디지털 구동장치와 데이터 모니터링 시스템을 구현 하였다.

2) BLDCM 구동장치의 일반적인 고장유형을 검토하였다.

3) BLDCM 디지털 구동장치와 실시간 데이터 모니터링 시스템을 제작하고 전문가 시스템의 알고리즘을 구성하여 실험한 결과, 각 고장모드별 시물레이션 파형, 고장 발생시 실측된 오실로스코프 파형과 데이터 모니터링 시스템에 의한 모니터링 데이터를 PC 윈도우즈 화면에 재현한 계측 파형이 서로 일치함을 알 수 있었다.

4) 임의로 발생시킨 고장에 대해 실시간 고장판별과 고장발생후 전문가 시스템에 의한 고장진단이 신속, 정확하게 이루어짐을 확인할 수 있었다.

5) 이 논문의 결과는 BLDCM 구동장치에 대해 전문적인 지식을 갖고 있지 않는 산업체 운전·보수·유지 담당자 또는 구동장치 판매자에게 신속한 고장원인 파악과 수리대책에 관한 전문가의 지식을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 주요 설비에 사용되는 구동장치의 운전상태에 대한 모니터링과 구동장치의 개발단계에서의 모니터링 시스템으로 응용이 기대된다.

향후 연구과제로는 이 연구에서 제시한 고장원인 이외의 고장에 대한 진단기능 및 다른 종류의 전동기 구동장치에 대해서 전문가 추론에 대한 지식 베이스를 추가함으로써 산업 생산설비에 사용되는 모든 전동기 구동장치의 고장진단 전문가 시스템으로 확장할 수 있도록 하는 것이다.

참 고 문 헌

[1] Joseph Sottle, Lawrence E. Holloway, "An over-

view of fault monitoring and diagnosis in mining equipment," Transaction on Industry Application of IEEE, vol.30, no.5, pp.1326~1332, 1994.

- [2] Olorunfemi Ojo, Ishwar Bhat, "Analysis of faulted induction motor fed with pwm inverter," in Conference Recording of IEEE/IAS Annual Meeting, pp.647~655, 1992.
- [3] Ren Spěe and A. K. Wallace, "Remedial strategies for brushless dc drive failures," Transaction on Industry Application of IEEE, vol.26, no.2, pp.259~266, 1990.
- [4] Paul V. Goode, Mo-yuen Chow, "Neural/fuzzy systems for incipient fault detection in induction motors," in Proceeding of IEEE/IECON, pp.332~337, 1993.
- [5] Ewen Ritchie, Xiaolan Deng and Tapani Jokinen, "Diagnosis of rotor faults in squirrel cage induction motors using a fuzzy logic approach," in Proceeding of ICEM, pp.348~352, 1995.
- [6] G. Gentile, N. Rotondale, "Investigation of inverter-fed induction motors under fault conditions," in Proceeding of IEEE/ PESC, pp.126~132, 1992.
- [7] C. S. Berendsem et al., "Detection of sensor faults with observer structures in control loops," in Proceeding of IEEE/IECON, pp. 344~348, 1993.
- [8] Debaprasad Kastha and Bimal K. Bose, "Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor drive," Transaction on Industry Application of IEEE, vol.30, no.4, pp. 1028~1037, 1994.
- [9] K. Debebe, V. Rajagopalan, "Diagnosis and monitoring for ac drives," in Conference Recording of IEEE/IAS, pp.370~377, 1992.
- [10] Alan K. Wallace, Reně Spěe, "The simulation of brushless dc drive failures," in Proceeding of IEEE/ PEDS, pp.199~205, 1988.

◇ 著 者 紹 介 ◇



김 광 현(金光憲)

1960년 12월 27일생. 83년 전남대 계측 제어공학과 졸. 86년 서울대 대학원 전기공학과 졸(석사). 92년 서울대 대학원 전기공학과 졸(박사). 현재 전남대 전기공학과 조교수.



배 동 관(裵東冠)

1969년 3월 17일생. 94년 전남대 전기공학과 졸. 96년 전남대 대학원 전기공학과 졸(석사). 현재 전남대 대학원 전기공학과 박사과정.