

논문 2011-48SC-1-5

dq 전류의 특징을 이용한 인버터의 스위치 개방 고장진단

(Switch Open Fault Diagnosis of Inverter Using Features of dq Currents)

곽 내 정*, 황 재 호**, 홍 원 표***

(Nae Joung Kwak, Jae Ho Hwang, and Won Pyo Hong)

요 약

다양한 산업 응용분야에 사용되는 전동기 구동시스템의 고장은 심각한 문제를 초래한다. 본 논문에서는 전압형 PWM 인버터의 스위치 개방고장에 대한 검출 기법을 제안한다. 제안방법은 dq 전류를 정규화하여 dq 상전류의 평균값으로 고장을 검출하고 1차 분류를 실시한다. 분류된 결과에 따라 dq 상전류의 관계, 값의 범위, 전류의 분포 위치 등의 특징을 이용하여 2차 분류를 실시하여 그 결과로 고장 스위치를 진단한다. 제안방법은 MATLAB을 이용하여 인버터 스위치 개방고장진단에 관한 모의실험을 수행하였고 제안방법의 실용성을 입증하였다. 제안방법은 간단한 알고리즘으로 구현이 가능하며 그로 인해 일반적인 유도전동기 구동시스템에 추가하여 사용하는 것이 가능하다.

Abstract

Faults of motor drive systems to be used for various industrial applications can cause serious problems. In this paper, a method to diagnose switch open fault of a voltage-fed PWM inverter is proposed. The proposed method normalizes dq current and fault-detection and first classification are performed by mean values of dq phase currents, second classification is performed by features such as the relation of dq phase currents, the ranges of those, the positions of those according to the results, and fault switch is diagnosed with the results. The proposed method performs the simulation for diagnosis of inverter switch open faults with MATLAB and identifies the feasibility of the proposed method. Because the proposed method is implemented by simple algorithms, the proposed algorithm can be embedded in general induction motor drive systems and be used.

Keywords : fault diagnosis, inverter, dq current, switch.

I. 서 론

직류를 교류로 변환하는 인버터는 산업용 전동기 구

* 정회원, ** 정회원-교신저자, 한밭대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Eng. Hanbat National University)

*** 정회원, 한밭대학교 건축설비공학과
(Dept. of Building Service Eng. Hanbat National University)

※ The authors would like to gratefully acknowledge the financial support of KESRI (Korea Electrical Engineering & Science Research Institute) under project 2009T100201253

접수일자: 2010년2월2일, 수정완료일: 2010년11월4일

동을 비롯한 수많은 응용분야에 활용되고 있다. 인버터의 설계 및 제어 기술은 높은 수준에 도달했지만 산업 현장에서 예기치 못한 운전 고장으로 인한 고장이 발생하며 이러한 인버터의 고장은 산업 현장에서 사용되는 전체 시스템에 영향을 미쳐 공정자체가 중단되어 이로 인한 피해의 규모는 예측할 수가 없다. 따라서 인버터의 운전 신뢰성 확보는 매우 중요하며 최근에는 인버터 시스템에 대한 고장허용 제어와 관련하여 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 대부분의 산업응용분야에서 널리 사용되는 전압형 인버터에 관한 다양한 연구가 활발하다.

인버터에서 발생될 수 있는 고장^[1]은 크게 직류 링크

캐패시터 단락, 인버터 스위치 개방, 인버터 스위치 단락 등이 있으며 이들 중 직류 캐패시터 단락 고장은 직류 링크 전압 감지 회로를 사용하여 그 고장을 쉽게 판단할 수 있다. 인버터 스위치 단락 고장은 고장 시 전동기 및 인버터에 과전류를 발생시킬 수 있으며 그로인해 추가 고장을 발생시킬 수 있다. 이에 따라 인버터 제어 회로는 단락 고장 등에 의한 과전류를 방지하기 위한 별도의 하드웨어를 활용하여 빠른 감지 특성을 갖도록 하는 것이 일반적이다.

인버터의 고장검출 및 고장진단 기법에 관한 연구는 크게 모델 기반 진단 방법^[2-3], 지식기반 진단방법^[4-5]과 신호기반 진단 방법으로 나뉜다. 모델기반 진단방법^[6-7]은 수학적 모델(정량적, 정성적)에 근거하여 운전 데이터를 분석하고 고장진단을 수행하는 해석적 기법이다. 지식기반 진단 방법은 전문가 시스템^[8]과 인공지능 기법^[9] 등이 이용된다. 신호 기반 진단 방법은 수학적 모델을 사용하지 않고 신호 자체의 특성을 조사, 분석하여 고장을 검출해 내는 방법으로 고장 시 신호의 패턴을 이용하거나 신호의 주파수분석을 통해 고장 진단을 수행하는 방법이다. 모델 기반 진단 방법은 대상의 모델링이 정확하지 않으면 잘못된 고장 경보를 발생할 우려가 있으며 지식 기반 진단 방법 중 전문가 시스템은 숙달된 전문가의 경험에 의한 규칙을 사전에 정의해야 하며 인공지능기법은 퍼지논리, 신경망, 통계적 추론 등을 이용하며 고장 상태의 진단 및 분류를 위해 시뮬레이션이나 실험결과를 통해 오프라인 학습이 필요하고 연산과정이 복잡하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 전압형 PWM 인버터의 스위치 개방이 발생했을 경우, 이를 간단히 검출하고 식별하는 방법을 제안한다. 제안 방법은 dq 상전류의 정규화 값의 평균을 이용하여 1차 분류를 실시하고 분류된 결과에 따라 dq 상전류의 관계, 값의 범위, 상전류의 분포 위치 등의 특징을 이용하여 2차 분류를 실시하여 그 결과로 고장 스위치를 진단한다. 제안방법은 단일 스위치 개방 뿐 아니라 2개의 스위치 개방 시에도 적용이 가능하며 알고리즘 또한 간단하다.

본 논문은 먼저 인버터 고장에 대해 다루고 제안된 방법을 소개한다. 또한 제안된 인버터의 스위치 개방 고장 시 감지방법에 대해 실험결과를 보여 성능을 확인하였다.

II. 인버터 시스템의 고장 및 기존의 고장 진단방법

1. 인버터 시스템의 고장

그림 1은 전동기를 구동하는 전압원 3상 인버터 시스템의 기본 구성도를 보여준다. 인버터 시스템의 고장은 정류기를 포함한 전원측 고장, 스위칭 소자 고장, 부하측 고장, 센서고장, 직류단 커패시터 고장 등으로 구분할 수 있다.

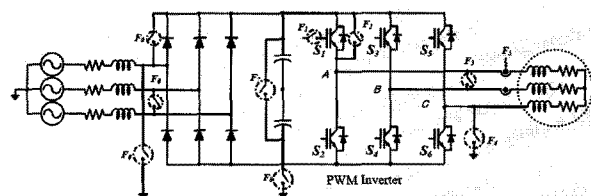


그림 1. 전동기 구동용 전압원 인버터 시스템 및 고장
Fig. 1. Voltage-fed inverter system for motor drive and its faults.

1. 전원단 고장(F_0)
2. 스위치 개방 고장(F_1)
3. 스위치 단락 고장(F_2)
4. 선간 단락 고장(F_3)
5. 한 상 지락 고장(F_4)
6. 전류 센서 고장(F_5)
7. 직류단 모선 지락 고장(F_6)
8. 직류단 커패시터 단락 회로 고장(F_7)

인버터의 고장 중 인버터의 스위칭 소자 고장은 직류단 전해 커패시터의 고장 다음으로 발생빈도가 높은 시스템 고장의 원인이라고 할 수 있다^[3]. 스위칭 소자의 고장 중 빈번하게 발생하는 고장은 스위치 단락회로 고장이며 일반적인 단락회로 판별은 콜렉터-이미터 전압 검출 방법에 의해 이루어진다. 반면 스위칭 개방회로 고장 또한 발생 빈도가 높은 고장이며 시스템의 동작에 따라 시스템의 셧-다운을 야기할 수도 있으나 반드시 시스템의 작동 불능 상태를 야기하는 것은 아니므로 장시간 고장이 검출되지 않고 방치될 수도 있다. 그러나 개방 회로의 고장이 장시간 방치될 경우 전동기의 권선 열화, 베어링 마모등과 같은 2차 고장을 야기할 수 있다. 따라서 스위치 개방 회로의 고장 검출은 2차 고장의 조기 예방 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

2. 인버터 스위칭 소자의 개방 고장 진단방법

인버터 스위치의 개방 고장진단 방법은 전압 감지 센서를 이용한 방법과 소프트웨어만으로 개방 고장을 진단하는 방법으로 나뉜다.

Ribeiro^[3] 등은 인버터의 스위치 개방 고장 감지를 위해 전압 감지 센서를 추가하고 전동기의 각 상에 인가된 실제 전압을 전압 명령과 비교하여 인버터 스위치의 개방 고장을 감지하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 개방 고장 발생 시, 고장을 감지할 때까지의 시간이 짧은 장점이 있으나 전동기의 전압을 감지하기 위한 전압 감지 회로 및 절연 회로 등이 추가로 요구된다.

소프트웨어만을 사용하여 스위치의 개방 고장을 진단하는 방법으로 Mendes 등은 Park의 벡터를 이용하여 고장을 진단하는 방법을 제안하였다^[10]. 그러나 이 방법은 명확한 고장 판단의 기준이 제시되지 않았다. Nejiry^[9] 등은 Park의 벡터 패턴을 특징으로 하는 인공 신경망(ANN)을 이용하여 전동기의 고장진단을 연구하였으나 학습이 필요하다. 또한 Peugeot^[5] 등이 전기적으로 한 주기동안 전류벡터의 궤적을 분석하여 개방 고장을 진단하고 순시주파수 분석을 통한 고장 감지 기법을 제안하였다. 순시주파수 분석의 경우 구현은 쉬우나 고장 스위치의 판별이 불가능하다는 단점이 있으며 과도 상태에서 잘못된 고장진단이 이루어질 우려가 있다. 이것은 스위칭 소자 개방 고장 시 발생하는 전류 특성을 이용한 대부분의 고장진단 방법에서 공통적으로 나타나는 문제로서 과도 상태에서 나타나는 급격한 전류변화 혹은 주파수 변화에 의해 순간적으로 잘못된 고장신호가 발생할 수 있다.

III. dq 상전류 특징을 이용한 인버터 스위치의 고장 진단

1. 스위치 소자의 개방 고장

인버터의 고장진단을 위해 사용되는 신호는 인버터의 3상 전류로 간편한 이용을 위해 식(1)을 이용하여 d-q 변환을 수행한다.

$$V_d = \frac{2}{3}(V_a \sin ut + V_b \sin(ut - 2\pi/3) + V_c \sin(ut + 2\pi/3)) \quad (1)$$

$$V_q = \frac{2}{3}(V_a \cos ut + V_b \cos(ut - 2\pi/3) + V_c \cos(ut + 2\pi/3))$$

정상상태에서 인버터 출력 전류를 식(1)에 의해 dq 변환하여 그 경로를 표현하면 그림 2와 같다. 인버터의

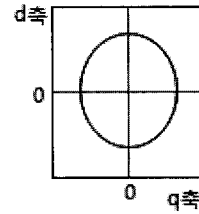


그림 2. 정상상태의 dq 상전류 궤적
Fig. 2. The trajectory of dq phase currents of steady state.

S1 개방	S2 개방	S3 개방	S4 개방	S5 개방	S6 개방	S1, S2 개방
S3, S4 개방	S5, S6 개방	S1, S3 개방	S1, S4 개방	S1, S5 개방	S1, S6 개방	S2, S3 개방
S2, S4 개방	S2, S5 개방	S2, S6 개방	S3, S5 개방	S3, S6 개방	S4, S5 개방	S4, S6 개방

그림 3. 스위칭 개방에 의한 dq 상전류 궤적
Fig. 3. The trajectories of dq phase currents of switch open faults.

고장 중 스위칭 소자의 단락회로는 일반적으로 단락보호 장치를 가동시키므로 개방회로에 의한 고장으로 고려하며 스위칭 소자의 고장은 그림 1의 s1~s6에서 발생한다. 그림 3은 스위치 개방 고장에 따른 전류의 경로를 보인 것으로 3상 유도전동기의 각각의 상전류를 식(1)의 dq 변환을 이용하여 dq축으로 변환한 후 상전류의 궤적을 표현한 것이다. 스위치의 개방고장 중 단일 스위치의 개방과 두 개의 스위치가 동시에 개방고장을 일으켰을 경우를 표현하였다.

dq 변환에 의한 상전류의 궤적은 정상상태는 그림 2와 같이 원형을, 인버터의 스위치가 개방이 되었을 경우는 그림 3에서 볼 수 있듯이 선분과 부채꼴 모양을 나타낸다.

2. 제안방법

본 논문에서는 dq 변환에 의한 상전류의 특징을 이용하여 스위치 개방 고장을 진단하는 방법을 제안한다. 고장진단을 위한 특징으로는 한주기동안의 전류벡터의 값의 분포와 두 전류 값의 관계 및 평균전류벡터를 사

용하였다.

제안방법은 다음과 같은 순서로 인버터 스위치의 개방 고장을 진단한다.

- (1) 전동기의 3상 전류신호를 dq 변환한다.
- (2) 변환된 신호를 정규화한다.
- (3) d, q 전류의 평균을 구한다.
- (4) 평균값의 분포영역을 선택하여 고장유무를 판별하고 1차 분류를 실시한다.
- (5) 1차 분류 결과에 따라 dq 값의 분포, d와 q 전류 값의 관계, d와 q 의 값의 범위 등의 특징으로 2차분류를 실시한다.
- (6) (5)의 결과에 따라 스위치 개방의 진단을 실시한다.

센서를 통해 얻어지는 전류신호는 부하의 크기와 상태, 전류센서의 성능, 시스템의 섭동 및 외란 등의 주위 환경에 따라 영향을 받으며 고장을 판별하기에는 부적절하다. 따라서 외부의 환경과 무관한 전류신호를 얻기 위해 먼저 전류신호의 정규화가 필요하다. 따라서 제안 방법은 먼저 전동기의 입력 신호를 식(1)을 이용하여 dq 변환을 실시한 후 (2)를 이용해 정규화 한다.

$$i_{nx} = \frac{i_x}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} \quad (2)$$

i_{nx} 는 정규화된 3상 전류신호이고 i_x 는 입력되는 3상 신호, i_d 와 i_q 는 dq변환된 신호이다.

정규화된 dq 전류값은 식(3)을 이용해 d전류 및 q전류의 평균전류를 구한다.

$$AV_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_k \quad (3)$$

스위치 개방시 d전류 및 q전류는 그림 3의 모양을 가지며 식 (3)을 이용하여 평균 전류를 구하였을 때 각 평균 전류 값은 그림 3의 각 전류 특성을 반영하게 된다. 따라서 본 논문에서는 평균 전류 값의 특성을 고찰하여 1차 분류를 실시한다. 제안 방법에서 dq 평균전류는 원점영역(d=0, q=0), 수직선영역, 수평선영역, 4모드영역의 네 영역으로 분류하였다. 이때 4모드 영역은 그림 4의 4모드영역으로 설정하여 다시 네 영역으로 분류한다.

1차 분류 결과 중 평균값이 원점 영역으로 분류된 결과는 s1,s2 개방, s3,s4개방, s5,s6 개방과 정상인 경우의

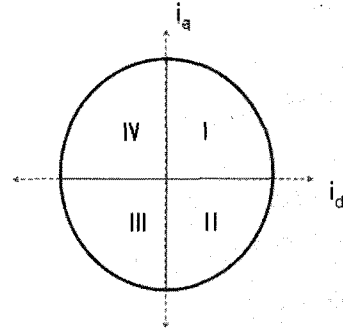


그림 4. dq 전류의 분류 영역
Fig. 4. The classified area of dq currents.

표 1. 스위치 개방에 따른 dq 평균전류의 1차 분류
Table 1. The first classification of dq mean currents of switch open.

	S1 개방	S2 개방	S3 개방	S4 개방	S5 개방	S6 개방	S1, S6 개방
d	-0.5~0	0~0.5	0~0.5	0~0.5	0~0.5	0~0.5	0
q	0	0	0.3~0.8	-0.3~-0.8	0.3~0.8	-0.3~-0.8	0
AV	수평선	수평선	4	2	1	3	0
DT	3, 4	1, 2	1(a), 3(b), 4	1(b), 2, 3(a)	1, 3(a), 4(b)	2(b), 3, 4(a)	
	S3, S4 개방	S5, S6 개방	S1, S3 개방	S1, S4 개방	S1, S5 개방	S1, S6 개방	S2, S3 개방
d	0	0	-0.3~-0.8	0~0.5	0~0.5	-0.3~-0.8	0~0.5
q	0	0	0.3~0.8	-0.3~-0.8	0.3~0.8	-0.3~-0.8	0.3~0.8
AV	0	0	4	3	4	3	1
DT			3(b), 4	3(a)	4(b)	3, 4(a)	1(a)
	S2, S4 개방	S2, S5 개방	S2, S6 개방	S3, S5 개방	S3, S6 개방	S4, S5 개방	S4, S6 개방
d	0.3~0.8	0.3~0.8	0~0.5	0	-0.3~-0.8	0.3~0.8	0
q	-0.3~-0.8	0.3~0.8	-0.3~-0.8	0.3~0.8	0	0	-0.3~-0.8
AV	2	1	2	수직선	수평선	수평선	수직선
DT	1(b), 2	1, 2(a)	2(b)	1(a), 4(b)	3(b), 4(a)	1(b), 2(a)	2(a), 3(b)

4가지가 있다. 원점영역으로 분류된 결과 중 정상인 경우는 그림 2의 dq 전류의 궤적을 참조 할 때 dq 전류 값이 네 영역에 모두 고루 분포해 있는 경우이다. 따라서 본 논문에서는 dq 전류가 네 영역에 고루 분포해 있는 경우를 정상모드로, 그렇지 않은 경우를 고장으로 판별한다.

또한 1차 분류된 분류결과는 동일한 특성을 갖는 2~4종류의 스위치 개방고장이 같은 범주로 분류가 된다. 따라서 각각의 특성을 고려한 새로운 2차 분류가 필요하다. 본 논문에서는 2차 분류 기준으로 정규화된 dq 신호의 분포 영역 및 값의 범위를 사용하였다. 표 1은 1차 분류시 측정된 dq 상전류의 평균값의 범위(d,q) 및 1차 분류된 결과(AV : area of value)를 보여준다. d, q의 평균 값은 신호가 왜란 및 섭동 등으로 왜곡 될 수 있으므로 단일 값을 갖지 않으며 따라서 변동 범위가 존재한다. AV(area of value)의 값 중 1~4는 4모드영역으로 분류되어 4영역 중 한 값으로 표현하며 DT (distribution)는 실제 dq전류가 분포하는 영역으로 그림

표 2. 1차 분류에 따른 2차 분류

Table 2. The second classification according to first classification.

원점	S	s1,s2	s3,s4	s5,s6	
	d	원점근처	-1~1	-1~1	
	re	x	비례	반비례	
수직선	S	s3,s5		s4,s6	
	DT	2,3		1,4	
수평선	S	s1	s2	s4,s5	s3,s6
	DT	3,4	1,2	1,2	3,4
	q	-1~1	-1~1	-0.7~0.7	-0.7~0.7
4 모 드 영 역	1	S	s2,s3	s2,s5	s5
		DT	1	1,2	1,2,4
	2	S	s2,s4	s2,s6	s4
		DT	1,2	2	1,2,3
	3	S	s1,s4	s1,s6	s6
		DT	3	3,4	2,3,4
	4	S	s1,s3	s1,s5	s3
		DT	3,4	1,3,4	1

4를 기준으로 1~4로 표현하였다.

표 1을 기준으로 1차 분류를 실시할 경우 표 2와 같이 최종적인 분류가 가능하다. 1차 분류 결과에 따라 분류된 개방 스위치는 표 2에서 S로 나타냈으며 1차 분류에 따라 2차 분류를 실기하기 위한 특징을 각 분류에 적절하게 d, q, re, DT 등으로 설정하였다.

특징 값으로 선정된 d, q, re, DT는 입력되는 d, q 전류의 값을 이용하여 간단히 계산될 수 있는 값으로 d, q는 d 전류 및 q 전류의 범위, re는 d 전류 값과 q 전류 값의 관계, DT는 d, q 전류값이 분포하는 값의 영역을 나타낸다. 표2의 특징값에 따라 2차 분류는 다음과 같이 실시한다.

1) 원점

- ① d값이 원점 근처일 경우
- ② ①이 아닌 경우에 대해 d와 q의 전류값의 부호가 동일한 경우와 반대인 경우

2) 수평선

- ① DT영역에 의해 분류
- ② ①의 분류 결과를 q의 범위로 분류

3) 수직선과 4모드 영역

- ① DT영역에 의해 분류

2차 분류를 시행할 때, 외란 등으로 인해 정규화 신호는 실제 존재해야하는 영역 외에 존재하는 경우가 발생

된다. 따라서 이를 고려하여 2차 분류 시 샘플링된 데이터의 갯수를 계수하여 샘플링 데이터의 90% 이상이 스위치 개방의 실제 영역에 존재할 경우 해당 스위치 개방으로 분류한다. 즉, s2와 s3가 개방된 경우 d, q 전류의 값은 1영역에만 분포해야하지만 관측 데이터는 1 영역 이외에 4영역이나 3영역에도 존재할 수 있다. 따라서 1영역에 90%이상의 데이터가 존재하면 s2,s3 개방으로 분류한다.

IV. 실험 및 분석

제안방법의 성능을 평가하기 위해 MATLAB 7.6을 이용하여 프로그램을 작성하였다. 전동기 및 전력용 소자들은 SymPowerSystem 3.0의 라이브러리를 참조하였다.

표 3은 실험에 사용된 전동기의 사양으로 전동기는 유도전동기 중 농형(squirrel cage) 전동기를 사용했고 220V전압, 60Hz의 주파수에서 실험했다.

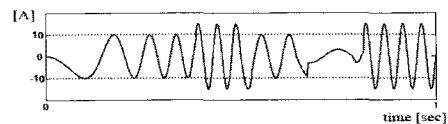
그림 5는 원신호와 정규화 신호의 전류신호를 보여준다. 원신호는 부분적으로 크기변동이 있지만 정규신호는 진폭이 1로 일정하게 유지된다.

그림 6은 RL부하를 이용하여 dq좌표계에서 일정 크기로 전류제어를 하고 고장 상황을 부여하여 원신호와 정규화 신호의 상전류 궤적을 관찰한 결과이다. 고장이

표 3. 전동기 사양

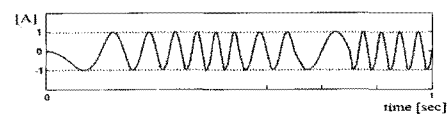
Table 3. The parameter values of motor drive.

stator resistance	0.61Ω	rotor resistance	0.81Ω
stator inductance	3mH	rotor inductance	3mH
number of poles	4	mutual inductance	73mH



(a) 원신호

(a) original signal



(b) 정규화신호

(b) normalized signal

그림 5. 원신호와 정규화 신호의 전류

Fig. 5. Currents of original signal and normalized signal.

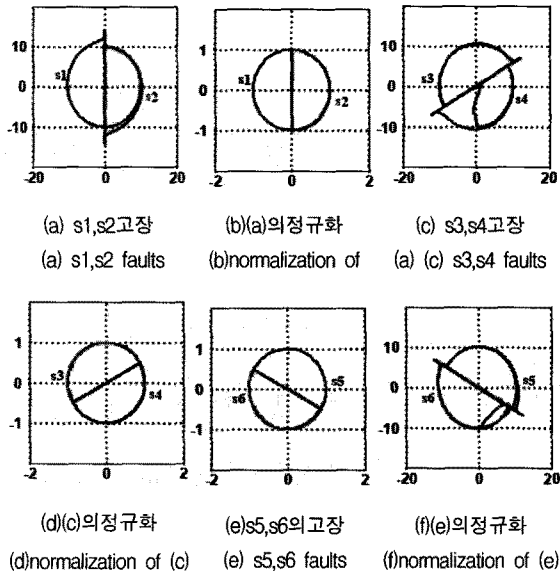


그림 6. 고장 스위치에 따른 dq 상전류 궤적
Fig. 6. The trajectories dq phase currents of Fault switches.

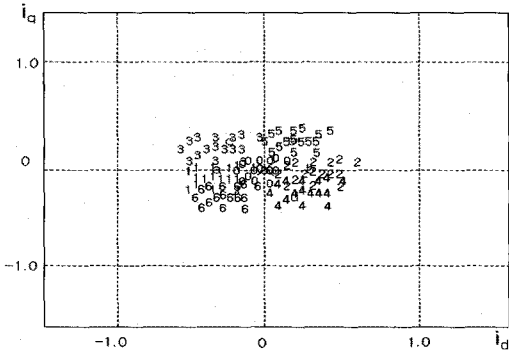


그림 7. 정규화된 dq 평균 상전류 위치
Fig. 7. The position of the normalized dq mean phase currents.

발생한 경우 원신호에는 찌그리진 반원패턴이 나타나는 반면 정규화 신호는 명확한 반원패턴이 나타난다.

그림 7은 정상신호와 스위치 개방 신호중 s1~s6까지 단일 스위치 개방일 경우 dq 전류를 정규화하여 평균전류의 위치를 표현한 것이다. 정상신호는 X로 표현하였고 스위치 개방신호는 a~f의 알파벳으로 표현하였다. 또한 이때 전동기 신호의 저항 및 상호 인덕턴스, 마찰 계수 등에 대하여 표 3의 값에 ±10% 정도의 편차를 주고 평균전류를 구하여 개방 스위치 번호 1~6의 숫자로 표현하였다.

그림 8은 스위치 5가 개방고장을 일으킨 신호의 dq 전류 패턴과 정규화 신호의 평균값의 결과를 보인다. 원신호의 dq 패턴은 외란으로 인하여 전류값의 범위가

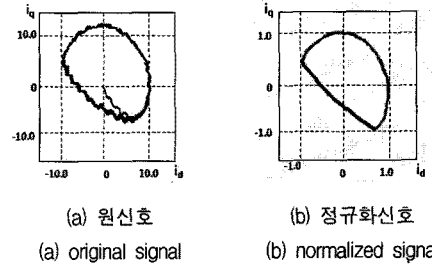


그림 8. 스위치 5의 개방시 dq 상전류 궤적
Fig. 8. The trajectories of dq phase currents of switch 5 open fault.

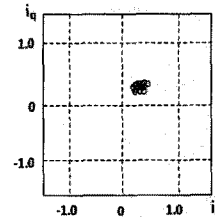


그림 9. 스위치 5개방시 평균전류
Fig. 9. The mean currents of switch 5 open fault.

실제 전류 값인 ±10[A]를 벗어나 측정되며 dq 변환된 전류의 궤적이 왜곡되어 있다. (b)는 제안 방법의 정규화를 이용하여 dq 전류 패턴을 구한 결과로 보정된 결과를 보여준다.

그림 9는 스위치 5의 개방시 정규화 전류를 이용하여 평균 전류값을 구한 결과이다. 그림 9의 결과에서 볼 수 있듯이 스위치 5의 평균전류는 그림 4의 영역분류의 영역 I에 분포하며 이를 이용하여 1차 분류를 실시한다. 그 결과에 의해 다시 2차 분류가 실시되는데 이때 그림 8의 (b)에서 보이는 것처럼 외란 등으로 인해 실제 존재해야하는 영역인 1, 2, 4 영역 외에 3영역에도 값이 존재한다. 그러나 샘플링된 데이터의 갯수를 계수하여 샘플링 데이터의 90% 이상의 값이 스위치 개방의 실제 영역인 1, 2, 4 영역에 존재하므로 s5 개방으로 분류한다.

제안방법이 전동기의 외란에 따라 스위치 신호의 개방 고장 검출 여부를 평가하기 위해 전동기 신호의 외란비율을 ±3%~±15%까지 단계별로 증가시키며 그 결과를 측정하였다. 이때 샘플링 주파수는 3kHz로 하였다. 표 4 결과는 단일 스위치 개방의 경우 외란이 ±15%정도 발생해도 단일 스위치 개방의 경우 오차율 없이 고장진단을 할 수 있음을 보여준다. 그러나 두 개의 스위치가 개방이 되었을 경우 외란이 ±7%정도 첨가 되면 고장진단의 오차가 발생한다. 이것은 전류의 값의

표 4. 외란비율에 따른 오차율

Table 4. Diagnosis error ratio according to the perturbed signal ratio.

고장종류	±3%	±5%	±7%	±10%	±15%
단일스위치 개방	0%	0%	0%	0%	0%
두 개의 스위치 개방	0%	0%	1.5%	3%	6.3%

표 5. 샘플링 주파수에 따른 오차율

Table 5. Diagnosis error ratio according to the sampling frequency.

외란비율	고장종류	1kHz	3kHz	5kHz	7kHz	10kHz
외란 ±5%	단일스위치 개방	0%	0%	0%	0%	0%
	두 개의 스위치 위치 개방	1.3%	1%	0%	0%	0%
외란 ±10%	단일스위치 개방	0%	0%	0%	0%	0%
	두 개의 스위치 위치 개방	4%	3%	0%	0%	0%

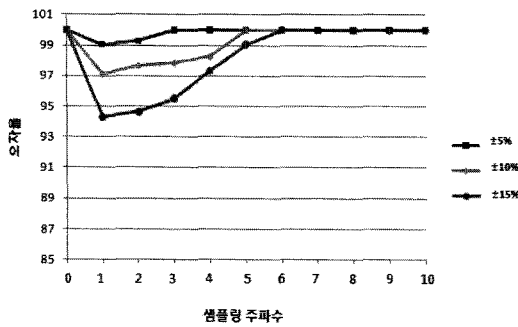


그림 10. 외란율과 샘플링 주파수에 따른 스위치 개방 진단 오차율

Fig. 10. The error ratio of diagnosis of switch open faults according to the perturbed signal ratio and sampling frequency.

변동이 심하게 나타남으로 인하여 위치 판단이 어려운 경우가 발생하거나 2차 분류시 데이터 비율을 이용할 때 측정 데이터의 개수가 충분하지 않기 때문이다. 따라서 샘플링 주파수에 따른 오차율을 분석하였다.

표 5는 샘플링 주파수에 따라 외란을 ±5%와 ±10% 첨가하였을 때 제안방법의 고장진단 결과이다. 스위치의 단일개방의 경우 제안방법은 좋은 성능을 보여준다. 그러나 두 개의 스위치 개방의 경우는 ±5% 외란의 경우 3kHz의 샘플링 주파수에서 1%정도의 오차율을 보이고 외란이 ±10%정도 발생할 경우 3kHz에서는 오차율이 존재하나 5kHz 이상으로 샘플링할 경우는 오차가 발생하지 않아 외란이 증가할 경우 샘플링 주파수를 높

여 스위치의 개방을 검출한다면 좋은 성능을 얻을 수 있다.

그림 10은 단일스위치 개방과 두 개의 스위치 개방 모두에 대하여 외란과 샘플링 주파수의 변화에 따른 오차율을 구한 것이다. 외란 ±5%의 경우는 샘플링 주파수 3kHz, 외란 ±10%는 5kHz, 외란 ±15%는 6kHz로 샘플링할 때 제안방법은 스위치 개방고장을 모두 검출해 낼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 dq 변환에 의한 상전류의 위치 및 특징을 이용하여 스위치 개방 고장을 진단하는 방법을 제안한다. 제안방법은 유도전동기의 3상 전류신호를 dq 변환한 후 정규화한 전류 값을 이용한다. 먼저 d, q 전류의 평균을 구하여 평균값의 분포영역을 선택하여 고장유무를 판별하고 1차 분류를 실시한다. 1차 분류된 결과는 몇 가지 개방 스위치가 한 부류로 분류되며 이를 분류하기 위해 dq 값의 분포, d와 q 전류 값의 관계, d와 q 의 값의 범위 등의 특징으로 2차분류를 실시한다. 2차 분류 결과를 참조하여 개방 스위치를 진단한다. 또한 단일 스위치 개방뿐 아니라 2개의 스위치 개방진단도 가능한 장점이 있다.

제안 방법은 dq 전류의 특징을 이용하여 간단한 알고리즘으로 스위치 개방고장을 진단하며 외란 등의 영향에도 좋은 진단 성능을 보여준다. 따라서 다양한 산업 응용분야에 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] D. Kastha, B. K.Bose, "Investigation of Fault Modes of Voltage-Fed Inverter System for Induction Motor Drive", IEEE Trans. On Industrial Applications, Vol. 30, No. 4, 1994, July/August
- [2] J. Kima, "Analytical investigation of an induction motor drive under inverter fault mode operations", IEE proc. Electr. Power Appl., vol 150, no. 3, 2003.
- [3] R. L. A. Ribeiro, etc, "Fault detection of Open-Switch Damage in voltage-Fed PWM Motor Drive Systems", IEEE Transactions of Power Electronics, vol. 18, no.2, March 2003.
- [4] L. Zhang, L. B. Aris, and I. N. Hulley, "A

knowledge-based system for on-line fault diagnosis of power inverter circuits for AC machine drive”, Proc. EPE’92, vol. 3, pp. 334-339, 1992.

[5] R. Peugeot, 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, Nov/Dec 1998.

[6] D. Diallo, M. E. H. Benbouzid, D. Hamad, and X. Pierre, “Fault detection and diagnosis in an induction machine drive: a pattern recognition approach based on concordia stator mean current vector,” IEEE Trans. on Energy Conv., vol. 20, no. 3, Sept. 2005, pp. 512-519

[7] M. E. H. Benbouzid, G. B. Kliman, “What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?,” IEEE Trans. On energy Conv., vol. 18, no. 2, June 2003, pp. 238-244

[8] K. Debebe, V. Rajagopalan and T. S. Snakar, “Expert systems for fault diagnosis of VSI fed ac drives,” Proc. IAS’91 Conf., pp. 368-373, 1991.

[9] H. Nejjaro et al., “Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current Park’s vector pattern learning approach,” IEEE Trans. Industry Application, vol. 36, no. 3, 2000.

[10] A. M. S. Mendes, A. J. M. Cardoso., and E. S. Saravis, “Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park’s vector approach,” International Conf. IEMD., 1999, pp.704-706

— 저 자 소 개 —



곽 내 정(정회원)
 1993년 2월 충북대학교 정보통신 공학과 학사 졸업
 1995년 2월 충북대학교 정보통신 공학과 석사 졸업
 2005년 2월 충북대학교 정보통신 공학과 박사 졸업
 2005년 3월~2006년 2월 목원대학교 정보통신 공학과 프로그래밍 전문강사
 2006년 3월~2009년 2월 목원대학교 정보통신 공학과 전임강사
 2009년 3월~현재 목원대학교, 한밭대학교 시간강사
 <주관심분야 : 멀티미디어 정보처리, 멀티미디어 통신, 컴퓨터 비전 >



홍 원 표(정회원)
 1978년 3월~1980년 2월 숭실대학교 전기공학과 학사 졸업
 1980년 3월~1982년 3월 서울대학교 대학원 전기공학과 석사 졸업
 1983년 3월~1989년 8월 서울대학교 대학원 전기공학과 박사 졸업
 1979년 12월~1993년 3월 한국전력 전력연구원 선임연구원,
 2007년 8월~2008년 7월 UBC 방문교수,
 1993년 3월~현재 한밭대학교 건축설비공학과 교수
 <주관심분야 : 그린빌딩, 빌딩스마트그리드 및 지능형 최적작업환경 분야>



황 재 호(정회원)-교신저자
 1982년 2월 아주대학교 전자공학과 학사 졸업
 1986년 2월 서울대학교 전자공학과 석사 졸업
 1994년 2월 서울대학교 전자공학과 박사 졸업
 1982년 3월~1992년 2월 전력연구원 부장대리
 1992년 3월~2010년 9월 한밭대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야 : 컴퓨터비전, 영상처리, 디지털신호처리>