

지식기반 모델에 의한 전압형 인버터에서의 고장검출

임성정  
현대중공업 기전연구소

Fault detection on voltage source inverter by knowledge-based model

Rim, Seong-jeong  
Electro-mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Co.

**Abstract** - This paper presents an approach based on knowledge models to detect and isolate faults in a voltage source inverter. These faults do not affect the existing system protections. A diagnosis system which uses only the input variables of the drive is presented. It is based on the analysis of the current-vector trajectory and of the instantaneous frequency in faulty mode. These two methods have been verified in simulation results.

1. 개요

산업처리공정에서 자동화 추세는 좀더 복잡하고, 대규모 시스템으로 유도하게 되었다. 이러한 시스템에서 불의의 정지에 의한 피해비용은 크기 때문에 고장 검출, 고장 분리 및 고장 예측은 매우 경제적인 가능성을 가진다. 고장검출방법[1]이 최근에 도입되고 있는 추세이며 이에 대한 연구는 다음과 같다.

- 1) 해석적 이중화(analytical redundancy)[2]
- 2) 지식기반 접근법(knowledge-based approach)[3] (고장트리, 전문가시스템, 퍼지, 신경망)

본 논문은 고장조건에서 구동장치의 운전을 지속시키려는 경우 고장사태에 대하여 분석하였다. 제안된 진단 시스템은 구동장치의 입력변수만을 사용한다. 고장검출 방법은 전류벡터 해석을 기초하였으며 유도전동기 구동장치에 적용하였다. 제안된 방법은 시뮬레이션에서 검증하였다.

2. 시스템 구조

그림 1에서 보는 바와 같이 시험시스템은 다음과 같이 구성되어있다.

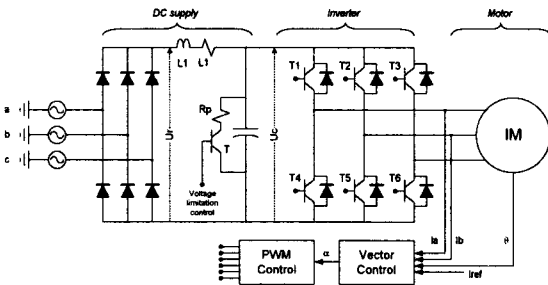


그림 1. 시험시스템

- 1) DC supply
- 2) PWM 인버터 (인버터 주파수 = 20kHz)
- 3) 유도전동기, 기계적 부하
- 4) 속도/전류 아날로그 제어장치
- 5) DAS가 장착된 PC; 데이터처리는 off-line으로 수행

3. 고장해석

고장은 구동장치의 여러 요소에서 다양한 형태로 발생한다고 가정하였으며 다음과 같다.

- 1) 전원계통 - 1상 단락/지락 고장, 2상 단락/지락 고장, 3상고장
- 2) DC bus - 정류기 다이오드 off, 캐패시터 고장, 전압센서 고장, 전압제한용 TR의 on/off 전환불능
- 3) PWM 인버터 - TR의 on/off 전환불능
- 4) 전류센서 고장
- 5) 제어장치, 전동기내부고장 (단락회로, 회전기편심 등)

본 논문에서는 TR, 전류센서 고장만을 고려하였다. 인버터 TR이 ON되지 않을 경우, 기기의 상전류는 정현파가 되지 않는다. 예로, b상전류( $i_b$ )가 (+) ( $i_b > 0$ ) 이고, TR T2가 동작하지 않는다면 ( $i_b$ )는 (+)bus에 연결되지 않고 D5에 의해서 (-)bus에 연결된다. 결과적으로 ( $i_b$ )는 0으로 감소한다. 이 기간동안 전류제어기의 출력( $\beta_b$ )는 T2의 부동작에 의한 ( $i_b$ )의 감소를 보상하기 위해서 증가하게 되며 제어가 불가능하고 ( $\beta_b$ )는 최대 양수값에 도달하게 된다. ( $i_b$ )는 전류기준이 (+)일 때는 0을 유지하게 된다. 전류기준이 부호가 바뀔 경우 T2는 사용하지 않게 되므로 ( $i_b$ )는 정상적으로 제어된다.

결과적으로 이러한 형태의 고장은 전류 반주기동안 고장난 상에서 전류를 없애주는 결과가 나타나며 고장난 상에서 dc 전류옴셋을 발생시킨다. 이러한 옴셋은 건전한 상에 동등하게 분배된다. 전류 dc 옴셋성분과 회전자계 사이의 상호작용은 고정자 전류주파수에서 맥동 토오크를 발생한다. 더욱이 전류 dc 옴셋성분은 인버터의 상, 하단 TR에 불평형 전류스트레스를 발생시키며 이들 TR에 열적 결함을 일으킬 수 있게 된다[4]. 이들 두가지 방법은 고장의 검출 및 분리를 위하여 제안되었다.

- 1) 첫 번째 방법은 직교시스템에서 전류벡터 궤적의 분석을 기초한 방식이다.
- 2) 두 번째 방법은 전류벡터의 순시주파수를 사용한 방식이다.

전류센서는 이미 구동장치를 제어하기 위하여 사용되고 있다고 가정하였다.

4. 방법 1: 전류벡터궤적의 분석

직교변환은 그림 2에 나타난 바와 같이 상전류에 적용하였다. 3상전류( $i_a, i_b, i_c$ )는 2상시스템( $i_\alpha, i_\beta$ )으로 변환한다.  $i_a + i_b + i_c = 0$ 이라고 가정하면 ( $i_\alpha, i_\beta$ )는 다음과 같이 주어진다.

$$i_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} i_a$$

$$i_\beta = \sqrt{2} i_b + \frac{1}{\sqrt{2}} i_c \dots (1)$$

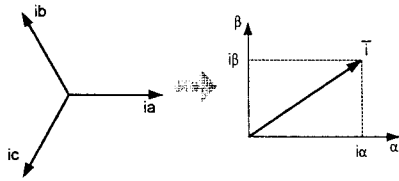


그림 2. 직교변환

전류는 주기적으로 샘플링된다고 가정하였다. 이때 비율  $\Psi$ 는 전류제적의 기울기를 나타내며 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi = \frac{i_{\alpha(k)} - i_{\alpha(k-1)}}{i_{\beta(k)} - i_{\beta(k-1)}} \dots \dots \dots (2)$$

여기서 k, k-1는 현재 샘플과 이전 샘플을 나타낸다. 고장이 없는 경우 전동기 전류는 정현파를 유지하며 결과적으로 전류벡터 제적은 원이 된다. 이 경우  $\Psi$ 의 값은 항상 변경된다.

4.1 사례연구

- 1) B상 TR의 개방 : T2나 T5가 개방되었을 경우 b상 전류( $i_b$ )는 전류반주기동안 0이 된다. 식(1), (2)에서  $\Psi = \sqrt{3}$ 이 되고 식(3)과 같은 관계가 성립한다.

$$i_a = \sqrt{3}i_\beta \dots \dots \dots (3)$$

측정에서 오프셋이 있는 경우, 측정된 전류는 0이 아니므로 상수( $i_b = i_0$ )가 된다. 그러면 ( $i_a, i_\beta$ )는 식(4)와 같은 관계가 성립된다.

$$i_a = \sqrt{3}i_\beta - \sqrt{6}i_0 \dots \dots \dots (4)$$

- 2) A상 TR의 개방 : 고장모드동안 앞에서와 같은 추론을 통하여 식(1), (2)에서  $\Psi = \infty$ 이 되고 식(5), (6)과 같은 관계가 성립한다.

$$i_a = 0, i_\beta = \sqrt{2}i_b \text{ (센서오프셋이 없는 경우)} \dots (5)$$

$$i_a = i_0, i_\beta = \sqrt{2}i_b + \frac{i_0}{\sqrt{2}} \text{ (센서오프셋이 } i_{0\beta} \text{인 경우)} \dots (6)$$

- 3) C상 TR의 개방 : 이 경우  $\Psi = -\sqrt{3}$ 이 되고 식(7)의 관계가 성립한다.

$$i_a = -\sqrt{3}i_\beta \dots \dots \dots (7)$$

그림 3의 리사쥬(lissajous)도는 다른 고장사례에 있어서 다른 전류제적을 가짐을 나타내고 있다.

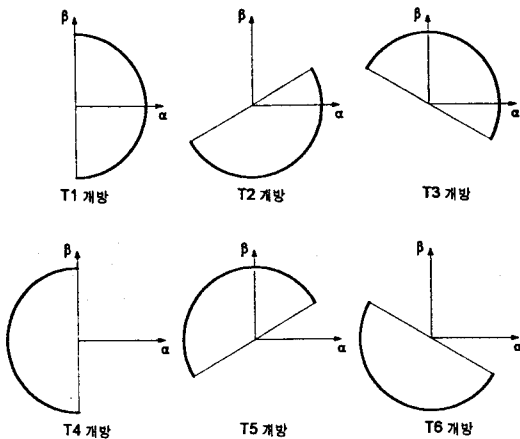


그림 3. 고장모드에서 전류벡터제적

4.2 고장진단

- 1) 그림 3의 전류제적의 관측에서 전류반주기동안 식(2)의  $\Psi$ 는 상수이고 나머지 반주기동안은 ( $\sqrt{3}, -\sqrt{3}, \infty$ )중의 한가지 값을 가지게 된다. 따라서 PWM인버터의 고장난 상은 이 상수값을 알기만 하면 특징지을 수 있게 된다. 고장난 TR은 전류변환이 고장난 상에서 실수하는 것을 결정함으로써 분리된다. 또한 고장난 상의 전류센서에서 측정 오프셋도 검출할 수 있다. 예로 센서오프셋을 가진 T2가 개방되면  $\Psi$ 는  $\sqrt{3}$ 이 되지만 식(3)에서 주어진 관계는 검증되지 않는다. 따라서 센서오프셋은 식(8)을 사용하여 추정할 수 있다.

$$i_0 = -\frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - \sqrt{3}i_\beta) \dots \dots \dots (8)$$

- 2) 센서고장이 발생하면 기울기가 항상 상수이며 전류도 항상 한주기동안은 0이 되기 때문에 측정된 전류는 0이 되고 센서고장은 검출할 수 있다.

5. 방법 2: 순시주파수 분석

두 번째 접근법인 전류벡터의 순시주파수는 인버터에서 TR고장을 검출하는데 사용된다. 전류벡터 순시주파수( $f_i$ )는 그림 4에 나타난 전류벡터 위상  $\theta_s$ 의 도함수를 사용하여 계산할 수 있다.

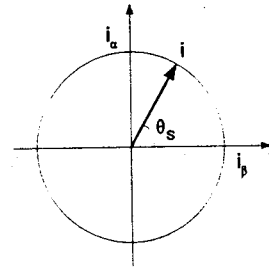


그림 4. 전류벡터 위상의 도함수

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt}(\theta_s),$$

$$|\vec{i}| = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \dots \dots \dots (9)$$

전류 샘플링 주파수는 20 x 전류주파수이다. 위상전류벡터의 도함수는 그림 5에 나타난 식(10)을 사용하여 추정한다.

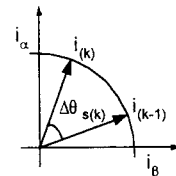


그림 5. 위상 전류벡터의 도함수

$$\Delta \theta_s \cong \sin(\theta_{s(k)} - \theta_{s(k-1)})$$

$$\cong \sin \theta_{s(k)} \cos \theta_{s(k-1)} - \sin \theta_{s(k-1)} \cos \theta_{s(k)}$$

$$i_{\alpha(k)} = i_{(k)} \cos(\theta_{s(k)})$$

$$i_{\beta(k)} = i_{(k)} \sin(\theta_{s(k)})$$

$$i_{(k)} = \sqrt{i_{\alpha(k)}^2 + i_{\beta(k)}^2} \dots \dots \dots (10)$$

따라서 순시주파수는 식(11)을 사용하여 추정할 수 있다.

$$f_i = \frac{1}{2\pi T} \frac{1}{i_{\alpha(k)} i_{\beta(k-1)}} (i_{\beta(k)} i_{\alpha(k-1)} - i_{\beta(k-1)} i_{\alpha(k)}) \dots (11)$$

여기서, T는 전류 샘플링 주기

1) 고장조건에서 식(11)과  $(i_{\alpha})$ 가  $(i_{\beta})$ 에 비해  $(i_{\alpha(k)} = k_0 i_{\beta(k)}, i_{\alpha(k-1)} = k_0 i_{\beta(k-1)})$ 함에 따라 순시주파수는 0이 된다. 인버터 고장을 검출하기 위하여  $(f_i)$ 가 문턱값( $f_{i(min)}$ )보다 작은지를 검사하면 충분하다.

2) 측정용셋이 전류센서에서 존재한다면, 추정된 주파수는 0이 아니며  $(i_{\beta(k)})$ 과  $(i_{\beta(k-1)})$ 사이의 차이에 의존하게 된다. 즉  $(i_{\alpha(k)} = k_0 i_{\beta(k)} + k_1)$ 이 된다.

$$f_i = \frac{1}{2\pi T} \frac{1}{i_{\alpha(k)} i_{\beta(k-1)}} (i_{\beta(k)} i_{\beta(k-1)}) k_1 \dots (12)$$

여기서,  $k_0, k_1$ 은 상수

회전자 위치센서( $\theta_s$ )(구동장치의 제어를 위하여 사용되는)에서 얻어지는 순시 주파수와 전류의 기본주파수 성분( $f_s$ )을 비교함으로써 전류용셋의 유무를 가진 인버터 고장은 진단할 수 있다. 즉  $f_i > f_s + S$  또는  $f_i > f_s - S$ 이라면 인버터고장은 존재한다. (문턱값 S는 10Hz와 같다)

순시주파수 접근법은 전류벡터 궤적방법에 비하여 구현하기가 용이하다. 인버터 고장은 검출되지만, TR 고장을 분리하지는 못한다.

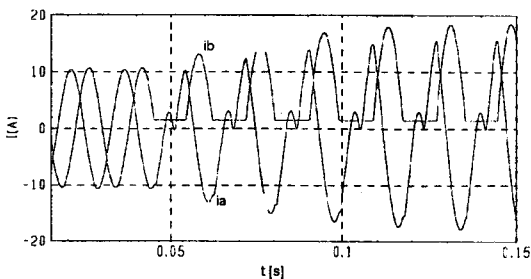
## 6. 시뮬레이션 결과

전체시스템(공급원-인버터-기기-제어기-검출시스템)은 MATLAB Power System Blockset을 사용하여 모의하였다. 실험시스템의 파라미터는 표 1에 수록하였다.

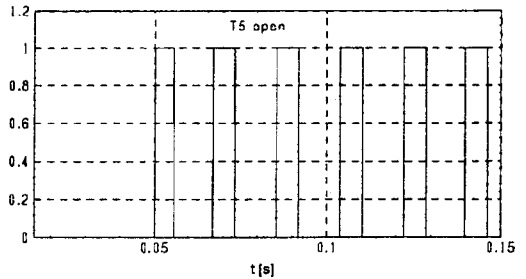
표 1. 시뮬레이션 파라미터

부분	항목	값
DC supply	직류측 인덕턴스 (L1)	2 mH
	직류측 저항 (R1)	0.12 ohm
	dc link 캐패시터 (C1)	1000 uF
전압제한 제어장치	Rp	20 ohm
	Uh(상단 문턱값)	390 V
	Ub(하단 문턱값)	370 V
전동기, 부하파라미터	용량 (P)	7 kW
	극수 (p)	4
	EMF (k)	0.1625
	인덕턴스 (Ls)	5 mH
	고정자 저항 (Rs)	0.3 ohm
	마찰력 (f)	3.2e-3
	관성력 (J)	6e-3 kg·m <sup>2</sup>
부하 토크 ( $\Gamma_c$ )	0:20 Nm	

T5가 t=45[ms]에서 고장이 발생한다고 설정하였다. b상 전류센서의 움셋이 1[A]이고 속도기준값이 150



(a) 전류 파형



(b) 검출 결과

그림 6. 시뮬레이션 결과 : T5 개방, b상 센서움셋

(rad/s)이다. 그림 6(a), (b)는 각각 전동기 전류와 검출결과 파형을 나타낸다. 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 진단시스템은 고장발생후 전류 한주기에 고장을 검출, 분리한다. 이는 전류 한주기가 상전류 변환이 실패하는 것을 검출할 필요가 있다는 사실을 알 수 있기 때문이다.

그림 7은 전류벡터 궤적을 나타내었다. 궤적은 그림 3에서 보는 바와 같이 T5상의 문제를 알 수 있다.

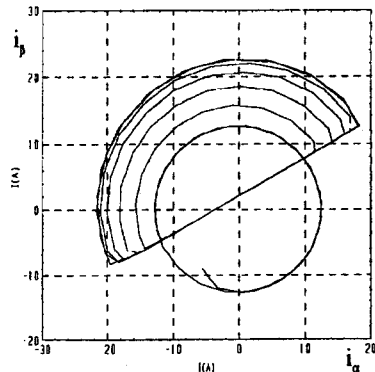


그림 7. 전류궤적 결과파형 (T5개방, b상 센서움셋)

## 7. 결론

본 논문은 전류벡터 분석을 기초한 2가지 접근법을 제안하였다. 첫 번째 방법은 전압형 인버터와 전류센서에서 고장의 검출 및 분리를 위한 전류벡터 궤적 분석을 기초한 방법이다. 모든 고장(TR, 센서)은 검출되고 분리된다. 두 번째 방법은 전류벡터의 순시주파수를 추정하는 방법으로서 고장 TR의 분리는 불가능하다. 이들 지식기반 접근법은 시뮬레이션에서 검증하였다.

### [참고 문헌]

- [1] R.J.Patton, "Robust model-based diagnosis: The state-of-the-art," *Proc. of IFAC Symp. SAFEPROCESS*, Espoo, Finland, pp.69-74, 1994.
- [2] P.M.Franck, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy-A survey and some new results," *Automatica*, Vol.26, No.3, pp.459-474, 1990.
- [3] R.Iseman, "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing," *Automatica*, Vol.29, No.4, pp.815-835, 1993.
- [4] D.Kastha and B.K.Bose, "Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.30, No.4, pp.1028-1037, 1994.