

분석모델에 의한 전압형 PWM 전동기 구동시스템에서의 고장검출

임성정
현대중공업(주) 기계전기연구소

Fault Detection on Voltage-source Inverter by Analytical Model

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

Abstract - This paper presents an analytical model-based approach 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 in faulty mode. The proposed method has been verified in simulation results.

1. 서 론

산업분야에서 가장 많이 적용되는 것은 전압형 인버터로 제어되는 유도전동기이다. 이들 교류 구동시스템은 발생하는 고장의 종류(예로 입력 정류기 부분이나 전력 인버터 부분, 또는 제어시스템부분 등)에 따라 민감하다. 일반적으로 이들 고장 중에 하나가 발생하면 구동시스템의 정지하게 될 것이다. 이러한 정지비용은 매우 비싸며 고장허용제어시스템의 개발을 촉진하게 되었다.

고장허용기법을 개발하기 위한 기본 요구사항은 일반적인 시스템 운영을 완전히 이해해서 그 특성을 다른 고장의 종류인 경우와 비교할 수 있다[1]. Bose와 Kastha[2]는 다양한 고장모드에서 전압형 유도기 구동시스템의 체계적인 분석을 하였다. Debebe[3]은 고장모드를 판별하기 위해서 전문가시스템의 사용을 제안하였다. 고장진단으로부터 Spee와 Wallace[1]은 무브러시 직류 구동시스템에서 고장조건을 검출하기 위한 시스템의 대칭성 분석을 제안하였다. Blaabjerg[4]는 dc link에서 한 개의 전류센서를 사용하여 전압형 PWM 인버터에서의 출력전류를 결정하기 위한 기법을 도입하였다. 이러한 해결방안은 시스템 전체의 보호를 위해서는 효과적임을 입증하였지만 고장을 판별하기 위해서는 부적절하다. 가장 최근 Mendes[5]는 교류 구동장치에서 전압형 인버터 고장진단을 위한 전동기 평균전류의 Park's 벡터 모니터링을 사용을 제안하였다. 위의 모든 기법들은 고장발생을 검출하기 위해서 적어도 기본 1주기가 소요된다.

본 논문은 전압형 인버터의 고장진단을 위한 기법을 제안하였으며 고장사태에 대하여 분석하였다. 제안된 진단시스템은 구동장치의 입력변수만을 사용한다. 고장검출방법은 전류벡터 해석을 기초하였으며 유도전동기 구동장치에 적용하였다. 제안된 방법은 시뮬레이션에서 검증하였다.

2. 구동시스템의 고장과 보호

그림 1은 전류분석에 초점을 둔 전동기 구동장치의 구조를 나타내었다. 스위칭 전력의 단계에서 고장의 종류는 6가지로 다음과 같이 분류된다.

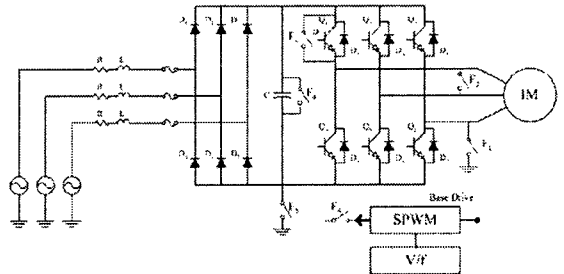


그림 1. 고장종류에 대한 구동시스템의 구조

- F1: 전동기 입력단자에서 1선 지락고장
- F2: 전동기 입력단자에서 선간 단락고장
- F3: dc-link 지락고장
- F4: dc-link 캐패시터 단락고장
- F5: 스위치 제어회로 입력단의 개방
- F6: 스위치 Q1의 단락고장

3. 고장해석

고장은 구동장치의 여러 요소에서 다양한 형태로 발생한다고 가정하였으며 다음과 같다.

- 1) 전원계통 - 1상 단락/지락 고장, 2상단락/지락고장, 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 전류제어의 출력(β_b)는 T2의 부동작에 의한 (i_b)의 감소를 보상하기 위해서 증가하게 되며 제어가 불가능하고 (β_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 고장단 상에서 전류를 없애주는 결과가 나타나며 고장단 상에서 dc 전류오프셋을 발생시킨다. 이러한 오프셋은 건전한 상에 동등하게 분배된다. 전류 dc 오프셋성분과 회전자 계 사이의 상호작용은 고정자 전류주파수에서 맥동 토크를 발생한다. 더욱이 전류 dc 오프셋성분은 인버터의 상, 하단 TR에 불평형 전류스트레스를 발생시키며 이들 TR에 열적 결합을 일으킬 수 있게 된다[2]. 이 방법은 고장의 검출 및 분리를 위하여 제안되었다. 직교시스템

에서 전류벡터 궤적의 분석을 기초한 방식이다. 전류센서는 이미 구동장치를 제어하기 위하여 사용되고 있다고 가정하였다.

4. 방법 : 전류벡터궤적의 분석

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

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \sqrt{\frac{3}{2}} i_a \\ i_\beta &= \sqrt{2} i_a + \frac{1}{\sqrt{2}} i_b \end{aligned} \quad \dots \quad (1)$$

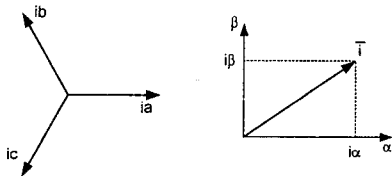


그림 2. 직교변환

전류는 주기적으로 샘플링된다고 가정하였다. 이때 비울 Ψ 는 전류궤적의 기울기를 나타내며 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

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

여기서 $k, k-1$ 는 현재 샘플과 이전 샘플을 나타낸다. 고장이 없는 경우 전동기 전류는 정현파를 유지하며 결과적으로 전류벡터 궤적은 원이 된다. 이 경우 Ψ 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

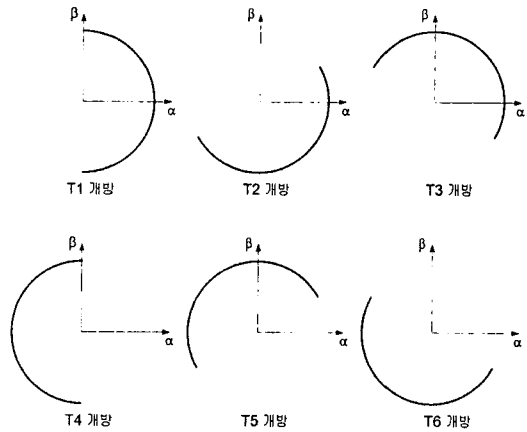


그림 3. 고장모드에서 전류벡터궤적

4.2 고장진단

1) 그림 3의 전류궤적의 관측에서 전류반주기동안 식(2)의 Ψ 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 Ψ 는 $\sqrt{3}$ 이 되지만 식(3)에서 주어진 관계는 검증되지 않는다. 따라서 센서오프셋은 식(8)을 사용하여 추정할 수 있다.

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

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

4.3 분석모델에 의한 고장진단시스템

그림 4는 고장진단시스템에 대한 블록도를 나타내었다. 고장검출과 고장판별 모두를 수행할 수 있으며 그 절차는 다음과 같다.

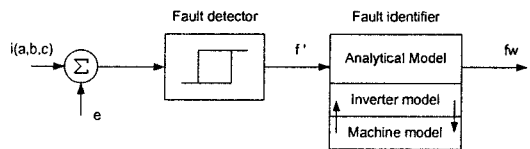


그림 4. 고장진단시스템 블록도

- 1) 1단계: 전류 $i(a,b,c)$ 를 측정한다.
- 2) 2단계: 측정오차 (e)를 발생한다.
- 3) 3단계: 고장검출기(fault detector)에서 고장유무를 결정한다.
- 4) 4단계: 고장판별기(fault identifier)에서 고장종류를 결정한다.

5. 시뮬레이션 결과

전체시스템(공급원-인버터-기기-제어기-검출시스템)은 MATLAB Simulink를 사용하여 시뮬레이션을 수행하

었다. 실험시스템의 파라미터는 표 1에 수록하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

부분	항목	값
인버터	스너버 저항 (R_s)	1e5 ohm
	스너버 캐패시터 (C_s)	inf F
	개시저항 (R_{on})	1e-3 ohm
	전방 전압 (V_f)	0 volt
	전방 시간 (T_f)	1e-6 sec
	지연 시간 (T_t)	2e-6 sec
유도전동기 파라미터	용량 (P_n)	3 hp
	극수 (pole pair)	2
	전압 (V_n)	220 V
	주파수 (f)	60
	고정자 저항 (R_s)	0.435 ohm
	고정자 인덕턴스(L_s)	2 mH
	회전자 저항 (R_r)	0.816 ohm
	회전자 인덕턴스 (L_r)	2 mH
	상호 인덕턴스 (L_m)	69.31 mH
	마찰력 (f)	0.0
관성력 (J)	0.089 kg·m ²	

인버터의 T1이 $t=833$ (ms)에서 고장이 발생한다고 설정하였다. 그림 5는 각각 전동기 전류와 검출결과 파형을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 진단시스템은 고장발생후 전류 한주기에 고장을 검출, 분리한다. 이는 전류 한주기가 상전류 변화이 실패하는 것을 검출할 필요가 있다는 사실을 알 수 있기 때문이다.

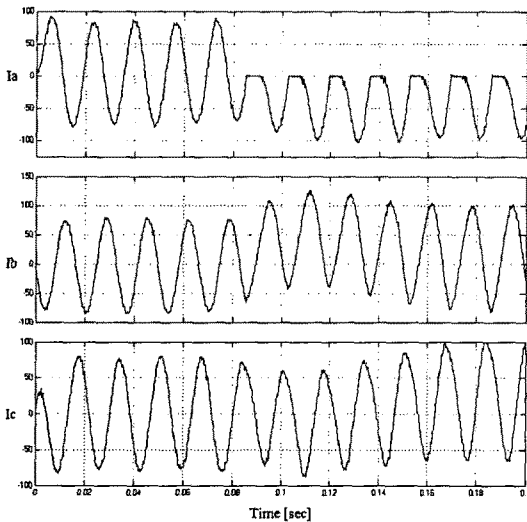


그림 5. 시뮬레이션 결과파형 : T1 개방

그림 6은 전류벡터 궤적을 나타내었다. 궤적은 그림 3에서 보는 바와 같이 T1상의 문제를 알 수 있다.

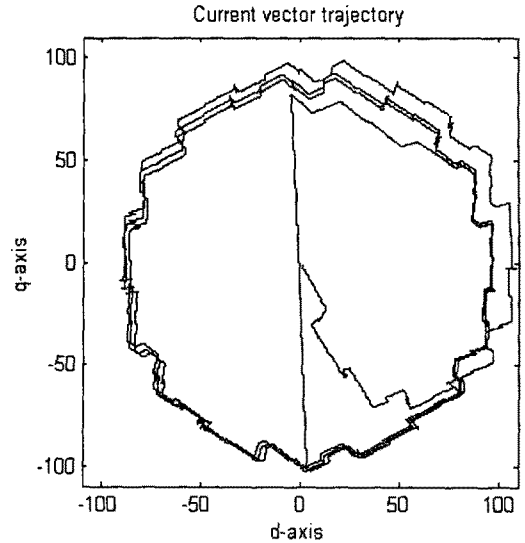


그림 6. 전류벡터 결과파형 (T1개방)

7. 결론

본 논문은 전류벡터 분석을 기초한 접근법을 제안하였다. 방법은 전압형 인버터와 전류센서에서 고장의 검출 및 분리를 위한 전류벡터 궤적 분석을 기초한 방법이다. 모든 고장(TR, 센서)은 검출되고 분리된다. 분석모델을 기반한 접근법은 시뮬레이션에서 그 효율성을 검증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] R. Spee and A.K. Wallace, "Remedial strategies for brushless dc drive failures", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.26, No.2, pp.259-266, 1990.
- [2] 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.
- [3] K. Debebe et al., "Expert systems for fault diagnosis of VSI fed ac drives", *Conference of Rec. IAS91*, pp.368-373, 1991.
- [4] F. Blaabjerg et al., "Single current sensor technique in the dc link of three-phase PWM-vs inverters: A review and a novel solution", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.33, No.5, pp.1241-1453, 1997.
- [5] A.M.S. Mendes and A.J. Marques, "Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed ac drives by the average current park's vector approach", *Conference of Rec. IEMDC*, pp.704-706, 1999.