論 文 16-2-12

영구자석 동기전동기 드라이브의 확장형 칼만필터를 이용한 개방성 고장진단 기법

安聖國*, 朴昞建**, 金來瑛***, 玄東石†

Fault Diagnosis Scheme for Open-Phase Fault of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive using Extended Kalman Filter

Sung-Guk Ahn, Byoung-Gun Park, Rae-Young Kim, and Dong-Seok Hyun

요 약

본 논문에서는 영구자석 동기전동기 구동용 인버터 스위치에서 개방성 고장이 발생하여도 구동 성능을 유지하기 위한 고장진단 기법이 제안 되었다. 제안한 고장진단 기법은 확장형 칼만필터에 의해 실시간으로 추정된 고정자 저항이 개방성 고장발생 시 고장발생 위치에 따라서 다르게 추정되는 것을 이용하여 고장을 진단한다. 고장진단을 위한 제어 알고리즘을 별도의 하드웨어 구성없이 기존의 제어 프로그램에 추가함으로써 비용을 저감 시킬 수 있으며 추정된 고정자 저항은 상수 변동에 영향을 받는 제어기의 전동기 상수로 사용함으로써 제어 성능을 향상 시킬 수 있다. 제안한 고장진단 기법의 타당성은 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, the fault diagnosis scheme for PMSM drives has been proposed to maintain control performance under a switch open-phase fault of inverter. When the open-phase fault occurs, the stator resistances of PMSM are estimated by Extended Kalman Filter (EKF) in real time and can appear differently according to the location of fault occurrence to check the fault detection and identification. The control algorithm is configured without the additional device and low cost by adding the existing control program. Also, by using motor parameter the estimated stator resistance value improves the control performance of the controller affected by parameter variation. The feasibility of the proposed fault diagnosis algorithm is validated in simulation and experiment.

Key Words : PMSM, Fault Diagnosis, Open-Phase Fault, EKF, Stator Resistance

1. 서 론

영구자석 동기전동기 (Permanent Magnet Synchron-ous Motor)는 고효율, 고역률, 높은 토크, 넓은 속도 범위에서 제어가 용이한 장점들로 인하여 가전 및 산업응용 제품에서 사용이 증가되고 있다[1]. 최근에는 영구자석 동기전동기 드라이브의 성능 향상과 더불어 사용량 증가에 따른 신뢰성은 매우 중요한 요소로 고려되고 있다. 산업 현장에서 구동 시스템의 고장이 발생한다면 사용 효율이 저하되거나 공정 자체가 중단되어 고장지연 시간으로 인해 큰 손실이 발생될 수 있다.

†교신저자 : 정회원, 한양대 전기제어생체공학부 교수
E-mail : dshyun@hanyang.ac.kr
*학생회원, 한양대 대학원 전기공학과 석사과정
**정회원, 한양대 대학원 전기공학과 박사과정
***정회원, 한양대 전기제어생체공학부 교수
접수일자 : 2010. 11. 2 1차 심사 : 2010. 11. 25
심사완료 : 2010. 12. 28

이러한 피해 규모를 최소화하기 위해서 정확한 고장진단과 고장 허용 시스템에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다 [2-6].

기존에 제안된 전력변환 기기에서 발생하는 스위치의 개방성 고장 검출은 하드웨어적으로 센서 혹은 검출회로 등을 추가적으로 구성하는 방법과 추가적인 하드웨어 없이 소프트웨어적으로 알고리즘을 구성하는 방법들이 있다. 추가적으로 하드웨어를 추가하는 방법들은 인버터의 폴 전압을 검출하여 고장 여부를 분석하는 방법 [2], 스위치 턴-온 시 게이트 드라이브의 고장 검출 회로를 이용하여 고장 유무를 판단하는 방법 [3] 등이 있다. 이러한 방법들은 개방성 고장 발생 시, 고장발생과 검출 사이의 시간이 짧고, 정확한 고장진단 성능을 가지고 있다. 하지만 전압 측정에 있어서 센서와 절연회로등과 같은 추가적인 구성을 필요로 하기 때문에 시스템 비용이 증가하는 단점을 가지고 있다. 소프트웨어적인 구성을 이용한 방법들은 사용자의 경험 혹은 실험에 의해 얻어진 정상 동작에 대한 정보와 실제 구동 시에 발생하는 값을 비교하여 고장을 검출하는 방법 [4]과 한 주기의 전류 궤적을 분석하여 고장 시 직류-링크 또는 출력 부하 전류의 변화를 검출하여 고장이 발생한 스위치와 상을 판별하는 방법 [5], 퍼지 혹은 neural-network를 이용하여 고장을 검출하는 방법 [6] 등이 있다. 이러한 방법들은 추가적인 회로 없이 개방성 고장을 검출 할 수 있는 장점을 가지고 있으나 전동기 모델의 전동기 파라미터 혹은 부하 변동과 같은 비선형적 특성 때문에 고장 검출에 대한 외부 환경 변화에 강인한 성능을 갖기 어렵다. 또한, 최소 한 주기 이상 고장 검출 시간이 필요하거나 고장검출과 확인을 다른 방법으로 구성하여 사용함으로써 고장 검출을 위한 알고리즘이 복잡해지는 단점들을 가지고 있다.

본 논문에서는 영구자석 동기전동기 드라이브의 신뢰성을 확보하기 위한 새로운 고장진단 기법을 제안하였다. 제안한 고장진단 기법은 개방성 고장 발생 시 확장형 칼만필터에 의해 실시간으로 추정된 고정자 저항 값이 고장 발생 위치에 따라서 다르게 나타나는 것을 관찰하여 고장검출과 고장확인이 이루어진다. 제안한 방법은 추가적인 센서가 필요 없을 뿐만 아니라 기존 방법에 비해 공간전압벡터 PWM에서 6개의 구간 중 두 개의 구간 이내로 고장을 검출하여 고장검출 시간을 단축시킬 수 있다. 제안된 고장진단 모델의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였고 실제 동일 고장 조건에서 실험을 통하여 가능성과 우수성을 검증하였다.

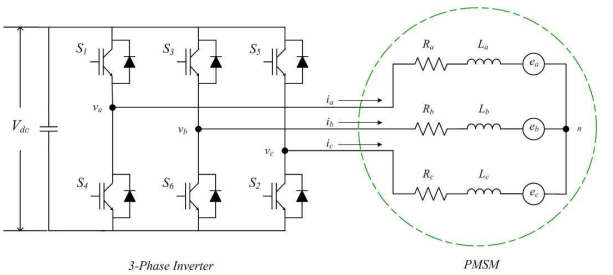


그림 1 영구자석 동기전동기 드라이브 등가회로
Fig. 1 The electrical equivalent circuit of PMSM drives

2. 영구자석 동기전동기 모델링 및 확장형 칼만필터

2.1 영구자석 동기전동기 시스템 방정식

그림 1은 영구자석 동기전동기 구동 시스템의 등가회로를 보여주고 있다. 기존의 d-q 모델은 2상을 고려한 것으로서 각 상의 저항 변화를 추정하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 다음과 같이 3상 전압방정식을 이용하였다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 \\ 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 i_a, i_b 및 i_c는 각각 상전류이고, v_a, v_b와 v_c는 각각 상전압이다. 또한 L_a, L_b 및 L_c는 각 상의 인덕턴스, R_a, R_b 및 R_c는 각 상의 저항을 나타낸다. e_a, e_b 및 e_c는 각 상의 역기전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_a &= \omega_r \lambda_f \cos\theta_r \\ e_b &= \omega_r \lambda_f \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ e_c &= \omega_r \lambda_f \cos(\theta_r + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ω_r은 전기 각속도, λ_f는 쇄교자속, θ_r은 회전자 위치를 나타낸다.

전동기가 정상 운전 시에는 한 샘플링 내에서 고정자 저항의 변화량이 0에 가깝기 때문에 $dR/dt = 0$으로 표현 할 수 있다. 고정자 저항 변화를 추정하기 위한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_j \\ R_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dfrac{R_j}{2L_j} - \dfrac{i_j}{2L_j} \\ 0 \qquad\qquad 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_j \\ R_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{1}{L_j} \\ 0 \end{bmatrix} [v_j - e_j] \quad (3)$$

$$y(t) = [1 \;\; 0] \begin{bmatrix} i_j \\ R_j \end{bmatrix} \quad (j = a, b, c) \quad (4)$$

여기서, R_j는 추정값이며 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t)+Bu(t)\\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned} \tag{5}$$

$x(t)=[i_j \quad R_j]^T$ 이고, $u(t)=[v_j-e_j]^T$ 이며, 이는 입력 값이다. 그리고 $y(t)=[1 \quad 0]^T$ 이며, 이는 출력값이고 A, B, C는 다음과 같다.

$$A=\begin{bmatrix}-\frac{R_j}{2L_j} & -\frac{i_j}{2L_j}\\ 0 & 0\end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix}\frac{1}{L_j}\\ 0\end{bmatrix}, C=[1 \quad 0] \tag{6}$$

위의 식들을 바탕으로 상태방정식을 구성하여 확장형 칼만필터 알고리즘을 적용하면 R_a, R_b, 및 R_c를 쉽게 추정할 수 있다.

2.2 확장형 칼만필터 (EKF) 알고리즘

확장형 칼만필터는 시스템의 모델자체를 근사하는 것이 아니라 시스템은 비선형 상태로 두고 연산을 수행하는 과정에서 각 구간의 거동을 선형화 하여 계산을 하므로 본래의 비선형 시스템의 거동에 더욱 가까운 해를 구할 수 있다. 확장형 칼만필터의 디지털 구현을 위해, 시스템 방정식 식 (5)를 이산화 하면 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}x(k+1) &= A_d(k)x(k)+B_d(k)u(k)\\ y(k) &= C_d(k)x(k)\end{aligned} \tag{7}$$

여기서, T_s 는 샘플링 시간이다. 따라서 이산화된 시스템 방정식의 A_d, B_d, C_d 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}A_d &= \begin{bmatrix}1-\frac{R_j}{2L_j}T_s & -\frac{i_j}{2L_j}T_s\\ 0 & 0\end{bmatrix},\\ B_d &= \begin{bmatrix}\frac{1}{L_j}T_s\\ 0\end{bmatrix}, \quad C_d=[1 \quad 0]\end{aligned} \tag{8}$$

식 (7)에서 외란을 포함한 비선형 이산화 모델은 다음과 같이 구현 할 수 있다.

$$\begin{aligned}x(k+1) &= A_d(k)x(k)+B_d(k)u(k)+w(k)\\ y(k) &= C_d(k)x(k)+v(k)\end{aligned} \tag{9}$$

여기서, $w(k)$는 공정잡음 이고, $y(k)$는 센서를 통한 시스템의 출력, 그리고 $v(k)$는 측정 잡음이다. 공정잡음과 측정잡음은 각각 평균이 0이고 공분산을 나타내는 Q, R 행렬을 가지고 있다. 위의 과정을 이용하여 확장형 칼만필터 알고리즘은 다음의 단계들로 구성된다.

2.2.1 예측단계

$$\tilde{x}(k+1)=A_d(k)\hat{x}(k)+B_d(k)u(k) \tag{10}$$

2.2.2 공분산 행렬의 추정단계

$$\tilde{P}(k+1)=F(k+1)\hat{P}(k)F^T(k+1)+Q \tag{11}$$

$$F(k+1)=\frac{d}{dx}A_d(k)x+B_d(k)u(k)\big|_{x=\hat{x}(k+1)} \tag{12}$$

2.2.3 칼만필터 이득계산

$$\begin{aligned}K(k+1) &= \tilde{P}(k+1)H^T(k+1)\times\\ &\quad [H(k+1)\tilde{P}(k+1)H^T(k+1)+R]^{-1}\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}H(k+1) &= \frac{d}{dx}C_d(k)x\big|_{x=\hat{x}(k+1)}\\ &= [1 \quad 0]\end{aligned} \tag{14}$$

2.2.4 상태추정 단계

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= \tilde{x}(k+1|k)\\ &\quad + K(k+1)[y(k+1)-H(k+1)\hat{x}(k+1|k)]\\ \hat{y}(k+1) &= H(k+1)\tilde{x}(k+1)\end{aligned} \tag{15}$$

2.2.5 추정오차의 공분산 행렬

$$\hat{P}(k+1)=[I-K(k+1)+H(k+1)]\tilde{P}(k+1) \tag{16}$$

2.2.6 업데이트

$k=k+1, x(k)=x(k+1), P(k)=P(k+1)$로 값을 업데이트 후 다시 2.2.1로 돌아가서 반복적인 계산으로 원하는 값을 추정한다. "~"는 예측과정을 나타내고, "^"는 추정과정을 나타낸다.

3. 제안한 고장진단 기법

제안한 고장진단 기법은 개방성 고장이 발생할 경우 확장형 칼만 필터에 의해 추정된 고정자 저항이 비정상적인 저항 값으로 나타나는 특성을 이용한다. 그림 2는 제안한 고장진단 기법의 흐름도를 나타낸다.

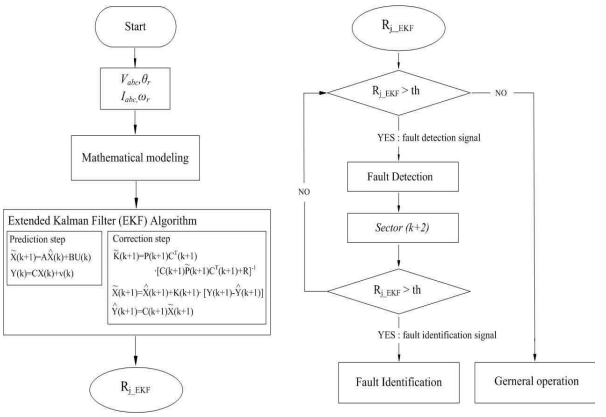


그림 2 확장형 칼만필터를 이용한 고장진단 흐름도
Fig. 2 Flowchart for the diagnosis using EKF

확장형 칼만필터를 이용해서 고정자 저항을 추정하여 고장발생 여부를 판단하기 위한 고장검출 부분과 고정자 저항값을 관측하여 고장위치를 알아내는 고장확인 부분으로 나눌 수 있다. 각 상의 고정자 저항은 확장형 칼만필터로 추정되고 고장 발생 시 변화되는 고정자 저항과 주어진 문턱저항의 비교를 통해 고장을 진단한다.

3.1 개방성 고장에 대한 고정자 저항 변화

그림 3은 공간전압벡터 PWM을 구성하는 8가지 공간전압벡터를 나타낸다. 그림 1에서 인버터 스위치 6개 중에서 A상 스위치 S_1에 개방성 고장이 일어나는 경우를 고려한다면 공간전압 벡터 PWM에서는 각 섹터 별 인접한 전압 벡터을 사용하므로 그림 3에서 벡터 V_1, V_2, V_6, 및 V_7 에서 S_1이 도통 된다. 하지만 S_1에서 개방성 고장이 발생하면 인버터는 기준전압과 같은 전압을 합성할 수 없게 된다. 고정자 저항 변화를 살펴보기 위해 고정자 저항에 관계된 식은 다음과 같다.

$$R_j = -\frac{L_a}{i_a}\frac{di_a}{dt} + \frac{v_a - e_a}{i_a} \tag{17}$$

그림 4(a)에서 스위치 S_1 개방성 고장이 발생한다면 각 상의 전류가 순간적으로 거의 흐르지 못한다. 따라서 A, B와 C상의 전류는 짧은 순간 감소하게 되므로 식(16)에서 각 상의 고정자 저항은 증가하게 된다. 물론, 단자전압과 역기전력 성분에도 영향을 주겠지만 전류의 감소량에 비하면 크게 영향을 받지 않는다. 그림 4(b)에서 스위치 S_1 개방성 고장이 발생한다면 A상의 전류는 거의 0으로 감소하고 B상의 전류는 증가

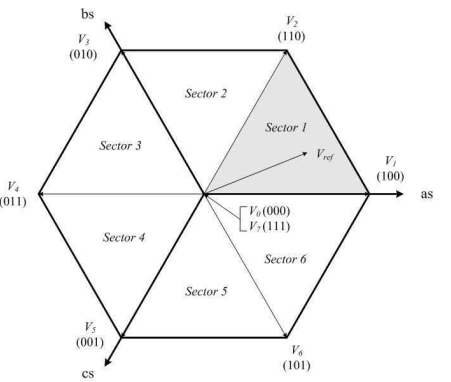


그림 3 공간전압 벡터
Fig. 3 Space vector modulation

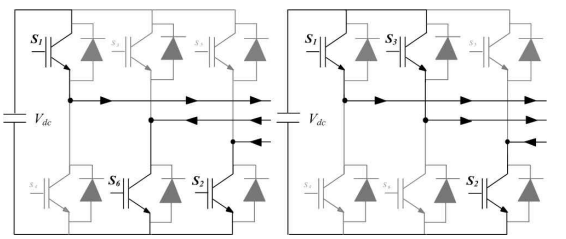


그림 4 유효전압 벡터
Fig. 4 Effective voltage vector

하고 C 상의 전류는 변화가 없다. 따라서 식(17)에서 A상의 고정자 저항은 증가하게 되고, B상의 고정자 저항은 감소하게 된다. 첫 번째, A상의 고정자 저항은 V_1과 V_2에서 계속 증가했고, B상의 고정자 저항은 V_1에서 증가했고 V_2에서는 감소했다. 마지막 C상의 고정자 저항은 V_1에서 감소했고 V_2에서는 변화가 없다. 이러한 과정을 통하여서 개방성 고장이 발생하였을 경우 추정되는 고정자 저항의 변화를 구분할 수 있다. 스위치 S_1에서의 개방성 고장뿐만 아니라 모든 스위치의 개방성 고장을 고려하여 각 상의 고정자 저항의 변화를 표 1에 나타내었다.

3.2 고장검출

일반적으로 전동기의 고정자 저항은 온도 변화에 따라 영향을 받는다. 온도에 대한 고정자 저항 값은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R = R_0(1 + \alpha \triangle T) \tag{18}$$

여기서, R_0는 기준온도 $T = 25℃$일 때 저항, α는 저항온도 계수, $\triangle T$ 는 온도 변화량이다.

표 1 개방성 고장에 따른 고정자 저항 변화
Table 1 Resistance variation for open-phase fault

	V_1 (100)	V_2 (110)	V_3 (010)	V_4 (011)	V_5 (001)	V_6 (101)
S_1	R_a ↑ R_b ↑ R_c ↑	R_a ↑ R_b ↓ R_c —	●	●	●	R_a ↑ R_b — R_c ↓
S_3	●	R_a ↓ R_b ↑ R_c —	R_a ↑ R_b ↑ R_c ↑	R_a — R_b ↑ R_c ↓	●	●
S_5	●	●	●	R_a — R_b ↓ R_c ↑	R_a ↑ R_b ↑ R_c ↑	R_a ↓ R_b — R_c ↑
S_4	●	●	R_a ↑ R_b — R_c ↓	R_a ↑ R_b ↑ R_c ↑	R_a ↑ R_b ↓ R_c —	●
S_6	R_a — R_b ↑ R_c ↓	●	●	●	R_a ↓ R_b ↑ R_c —	R_a ↑ R_b ↑ R_c ↑
S_2	R_a — R_b ↓ R_c ↑	R_a ↑ R_b ↑ R_c ↑	R_a ↓ R_b — R_c ↑	●	●	●

● no effect — no change

만약 개방성 고장이 발생한다면 확장형 칼만필터에 의해 추정된 고정자 저항이 급격하게 증가한다. 온도 변화에 따른 고정자 저항과 개방성 고장에 의한 고정자 저항의 변화는 정확하게 구분된다. 다음 식과 같이 고장을 검출한다.

$$\begin{cases} F_D = 1 & \text{if } R_{th} < R_{j_EKF} \\ F_D = 0 & \text{if } R_{th} > R_{j_EKF} \end{cases} \quad at \ \ Sector(k) \quad (19)$$

여기서 R_{th}는 고장 검출을 위한 고정자 저항의 문턱값이다. 영구자석 동기전동기 구동회로에서 스위치에 개방성 고장이 발생하였을 때 확장형 칼만필터로 추정된 고정자 저항(R_{j_EKF})이 문턱저항값 (R_{th})을 초과하게 되면, 위와 같이 고장검출 신호(F_D)를 발생 시킨다.

3.3 고장확인

회전자 위치에 따라 고정자 저항을 관측하여 고장위치를 알아내는 고장확인 부분이다. 고장 검출 후 고장상의 위치를 찾아내기 위해 최소 두 섹터의 시간 내에 확인이 가능하다. 이러한 방법은 그림 3의 어느 섹터에서든지 사용 할 수 있다. 고장 확인 알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{cases} F_I = 1 & \text{if } R_{th} < R_{j_EKF} \\ F_I = 0 & \text{if } R_{th} > R_{j_EKF} \end{cases} \quad at \ Sector(k+2) \quad (20)$$

확장형 칼만필터로 추정된 고정자 저항(R_{j_EKF})이 두 섹터가 지난 후에도 문턱저항값(R_{th})을 초과한다면 고장검출 신호(F_I)를 발생 시킨다. 고장 상 이외에도 문턱저항값 보다 크다면 고장검출 신호를 발생할 수 있지만 두 섹터 시간 동안 고정자 저항 변화를 검출하여

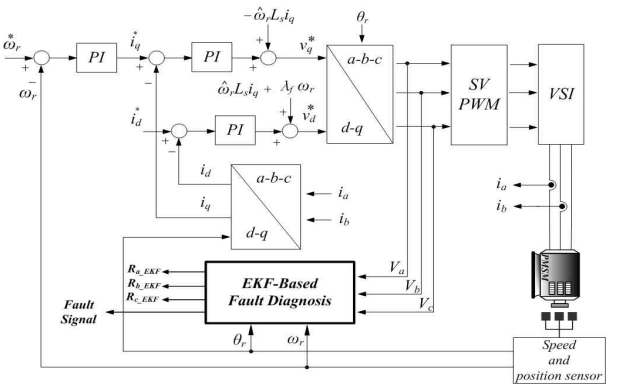
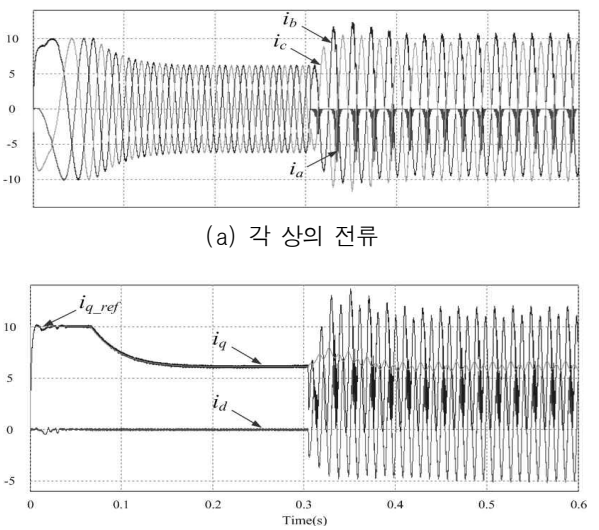


그림 5 제안한 고장진단을 포함한 전체 구성도
Fig. 5 Block diagram with the proposed fault diagnosis



(a) 각 상의 전류

(b) d-q전류

그림 6 S_1의 개방성 고장 발생 시 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Simulation results under the open-phase fault of S_1

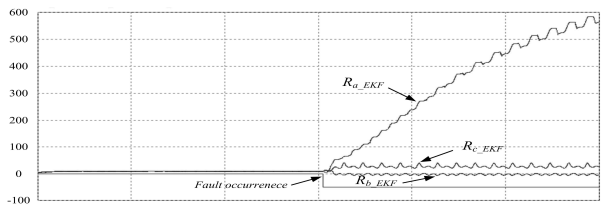
정확하게 고장상의 위치를 확인할 수 있다. 제안한 고장진단 시스템을 적용한 전체적인 시스템의 블록도는 그림 5와 같다.

4. 시뮬레이션

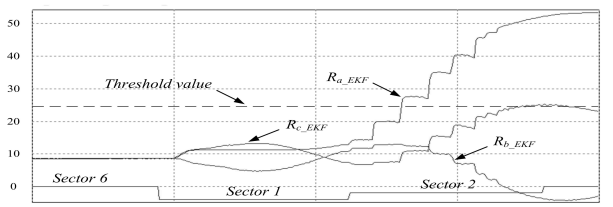
제안한 방법의 타당성을 입증하기 위하여 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 제안한 고장진단 기법의 구현 가능성을 보기 위해 일반적인 재구성 방법을 적용하였다. 시뮬레이션에 사용된 영구자석 동기전동기의 파라미터는 표 2와 같다. 시뮬레이션에서는 상단 스위치에서의 개방성 고장을 고려하였으며, 고장은 A상 상단 스위치 S_1에서 발생 하였다.

표 2 영구자석 동기전동기의 파라미터
Table 2 Parameters of PMSM

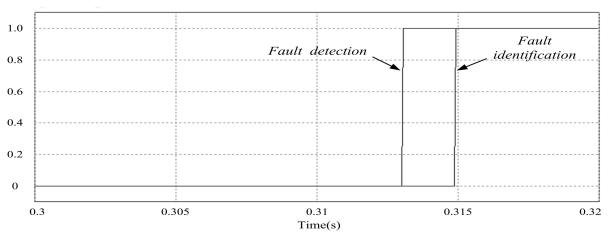
파 라 미 터	기 호	값
정격 용량	W	250 [W]
정격 속도	N_r	1500 [rpm]
정격 토크	T_e	7.5 [kgf-cm]
고정자 저항	R	4.3 $[\Omega]$
고정자 인덕턴스	L	0.027 [H]
쇄 교 자 속	λ_f	0.1 [Wb]
극 수	P	4



(a) 추정된 각 상의 고정자 저항 값



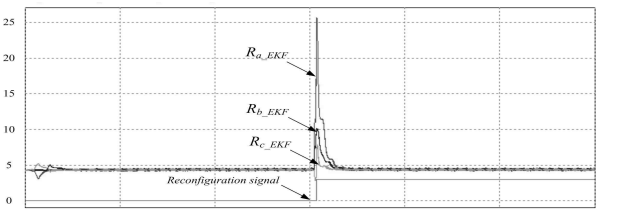
(b) 확대된 고정자 저항값 변화



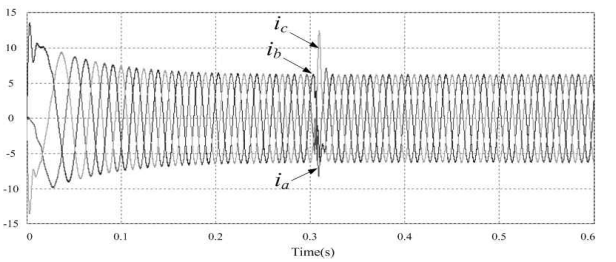
(c) 고정 검출 과 확인 신호

그림 7 A상 상단 스위치 S_1의 개방성 고장 발생 시 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation results under the open-phase fault of the upper switch S_1 in the phase A

그림 6은 A상 상단 스위치 개방성 고장 발생 시 상전류와 dq전류 파형이 왜곡되는 것을 보여준다. 스위치 S_1의 개방성 고장 발생 시 고장 상의 양의 전류는 단자 전압에 양의 전압이 인가되지 않으므로 양의 전류는 급격히 감소한다. 하단 스위치 (S_2)는 도통 하므로 음의 전류가 A상에 흐른다. 또한 고장 상 이외의 B와 C상에서는 감소된 q축 전류를 보상하기 위해 전류가 약간 상승함을 볼 수 있다. 그림 7(a)는 확장형 칼만필터에 의해 추정된 각 상의 고정자 저항과 고장



(a) 추정된 각 상의 고정자 저항



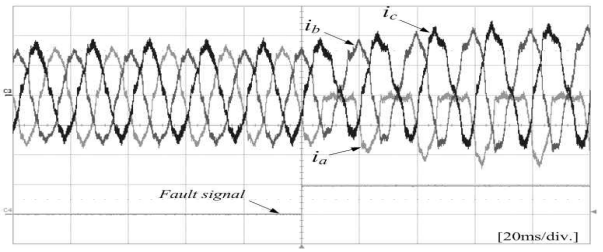
(b) 각 상의 전류

그림 8 제안한 고장 진단 방법을 적용한 고장허용시스템의 시뮬레이션 결과
Fig. 8 Simulation results of fault tolerant system with the proposed fault diagnosis scheme

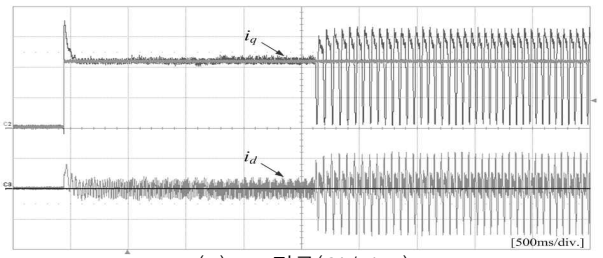
발생 신호 파형이다. 확장형 칼만필터에 의해 추정된 고정자 저항값이 B상과 C상의 고정자 저항값을 A상 고정자 저항값과 비교하였을 때 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이렇게 추정된 고정자 저항값이 비정상적인 고정자 저항값으로 나타나는 특성을 이용해서 고장을 검출 할 수 있다. 그림 7(b)에서 추정된 각 상의 고정자 저항값들의 확대된 파형, 문턱저항 값과 섹터를 판별해주는 파형을 볼 수 있다. 그림 7(c)는 문턱저항값에 의해 고장검출 신호와 고장확인 신호를 볼 수 있다. 그림 8은 A상 상단 스위치 개방성 고장 발생 시 신속한 고장검출 이후 양방향 스위치 턴-온으로 인한 각 상의 고정자 저항, 재구성 발생 신호와 전류의 재구성 시스템 파형을 각각 보여준다. A상 상단 스위치 개방성 고장 발생 시 고장검출과 고장확인 신호의 수행 후, 재구성 신호에 의한 구동 시스템이 빠른 시간 내에 정상적으로 동작하는 것을 볼 수 있다.

5. 실험 결과

본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 제안한 인버터 개방성 고장진단 방법의 가능성을 판단하기 위해 시뮬레이션과 동일한 조건에서 실험 하였다. 실험은 A상의 상단 스위치 S_1에 대한 개방성 고장을 고려하여 실험하였다.



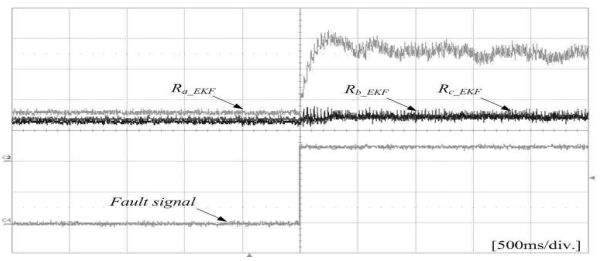
(a) 각 상의 전류(1A/div.)와 고장발생 신호(5V/div.)



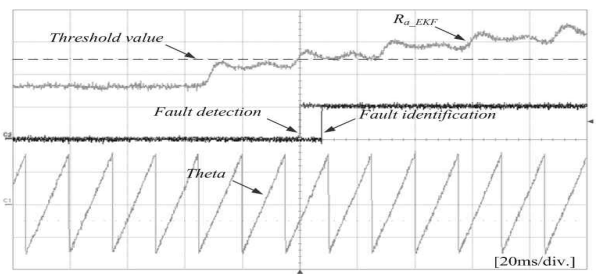
(b) d-q전류(2A/div.)

그림 9 A상 상단 스위치 S_f의 개방성 고장 시 실험 결과

Fig. 9 Experimental results under the open-phase fault of the upper switch S_f in the phase A



(a) 추정된 고정자 저항(2Ω/div.)과 고장 신호(2V/div.)

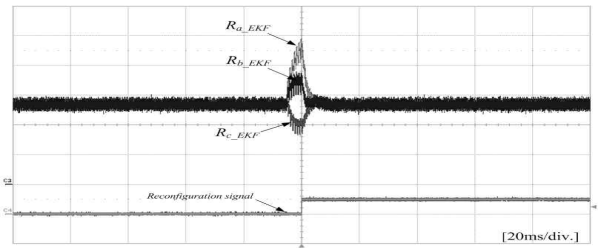


(b) 추정된 고정자저항(2Ω/div.)과 회전자 위치(2V/div.)

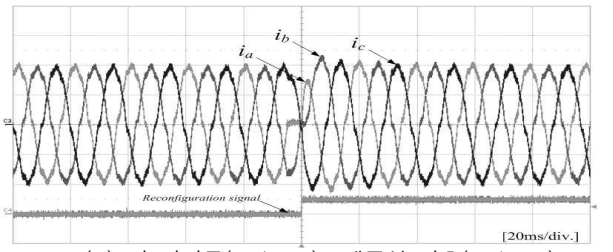
그림 10 A상 상단 스위치 S_f의 개방성 고장 발생 시 제안한 고장진단 기법을 이용한 실험 결과

Fig. 10 Experimental results with proposed fault diagnosis scheme under the open-phase fault of the upper switch S_f in the phase A

인버터의 개방고장 상태는 고장 시점에서 단자 전압 명령에 관계없이 IGBT의 게이트 드라이버에 강제로 턴-오프 신호를 인가하여 구성하였다.



(a) 추정된 고정자 저항(2Ω/div.)과 재구성 신호(5V/div.)



(b) 각 상전류(2A/div.), 재구성 신호(1V/div.)

그림 11 제안한 고장 진단 방법을 적용한 고장허용시스템의 실험 결과

Fig. 11 Experimental results of fault tolerant system with the proposed fault diagnosis scheme

그림 9는 인버터 A상 상단 스위치에 개방성 고장 발생 시 각 상의 전류 파형, 고장신호와 dq축 전류를 각각 보여준다. 개방성 고장 발생 후 고장상인 A상에 양의 전류는 흐르지 않고 음의 전류만 흐르는 것을 볼 수 있고, B와 C상의 전류가 q축 전류를 보상하기 위해서 약간 증가하는 것을 실험파형을 통해 알 수 있다. 그림 10(a)는 인버터의 A상 상단 스위치 S_f에 개방성 고장 발생 시 확장형 칼만필터에 의해 추정된 각 상의 고정자 저항과 고장 발생 신호 파형을 보여준다. 고장 상과 그 외에 상의 변화가 확연히 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 개방성 고장이 발생한 A상의 고정자 저항이 급격하게 증가하였다. 그림 10(b)는 A상 상단 스위치에 개방성 고장이 발생하고 고정자 저항과 문턱 저항값의 비교를 통해 고장검출 신호와 두 섹터 시간 내에 일련의 과정을 반복함으로써 고장 확인 신호를 각각 보여준다. 그림 11은 인버터 A상 상단 스위치에 개방성 고장 발생 시 빠른 고장 검출과 재구성 시스템으로 인하여 정상적으로 동작하는 것을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 영구자석 동기 전동기 구동 인버터의 개방 고장에 대한 제어 특성해석과 고장 모델을 제시했다. 개방성 고장 발생 후 PWM 벡터제어의 두 섹

터 구간 내에 빠르게 고장을 검출하고 위치를 확인함으로써 고장 피해를 최소화 시키고 재구성 시스템을 통해서 제어성능을 유지할 수 있다. 고장진단을 위한 제어 알고리즘을 기존의 시스템에 프로그램으로 추가함으로써 별도의 하드웨어 구성없이 제조비용을 감소시키고 고장에 강인한 제어 시스템을 구현하여 신뢰성을 확보하였다. 제안된 고장진단 방법의 실현 가능성과 우수성을 보이고자 시뮬레이션과 실험을 통하여 고장에 대한 강인한 특성을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] P. Pillay and P. Freere, "Literature survey of permanent magnet ac motors and drives", *in conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*. pp. 74-84. 1989.

[2] 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, 2004, Apr.

[3] Jingwei Zhu, Ertugrul N., Wen Liang Soong, "Detection and Remediation of Switch Faults on a Fault Tolerant Permanent Magnet Motor Drive with Redundancy", *2007 Second IEEE Conf. on Ind. Electronincs and Applications.* pp. 96-101, 2007.

[4] R. Spee and T. Lipo, "Remedial strategies for brushless dc drive failures", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 26, No. 2, pp. 259-266, 1990, Mar./Apr.

[5] R. Peuget, S. Courtine, and J. P. Rognon, "Fault Detection and Isolation on a PWM Inverter by Knowledge-BasedModel", *IEEE Trans. on Ind. Applicat.,* Vol. 34, No. 6, pp. 1318-1326, 1998, Nov./Dec.

[6] M. Awadallah and M. Morcos, "Automatic diagnosis and location of open-switch fault in brushless DC motor drives using wavelets and neuro-fuzzy systems", *IEEE Trans. on Energy Conversion,* Vol. 21, No. 1, pp. 104-111, 2006, Mar.

저 자 소 개

안성국(安聖國)

1983년 10월 19일생. 2009년 명지대 전기공학과 졸업. 2011년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). LS산전 연구원.

박병건(朴昞建)

1979년 4월 16일생. 2005년 명지대 전기정보제어공학부 졸업. 2007년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

김래영(金來瑛)

1974년 6월 6일생. 1997년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 미국 버지니아 공대(Virginia Tech) 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1999년~2004년 (주) 효성 중공업 연구소 선임연구원. 2009년~2010년 미국 National Semiconductor Post Doc. Researcher. 2010년~현재 한양대 전기생체공학부 조교수. 당 학회 국문지 편집위원.

현동석(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 뮌헨 공과대학 교환교수. 2003년 IEEE, Fellow Member. 1979년~현재 한양대 전자전기공학과 교수. 2000년 당 학회 회장 역임.