

확장칼만필터 및 다중모델 기반 영구자석 동기전동기 권선 개방 고장의 검출 및 분류

김민우¹ · 박준형² · 고상호^{1,†}

¹한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과

²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Detection and Classification of Open-phase Faults in PMSM Using Extended Kalman Filter and Multiple Model

Minwoo Kim¹, Junhyeong Park² and Sangho Ko^{2,†}

¹Department of Smart Air Moility, Korea Aerospace University, Korea

²School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

Abstract

Open-phase fault in a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) occurs due to disconnection of phases of motor windings or inverter switch failures. When an open-phase occurs, it leads to the generation of torque ripples and vibrations in the motor, which can have a critical impact on the safety of the vehicle (including aircraft) using a PMSM as an actuator. Therefore, rapid fault detection and classification are essential. This paper proposes a classification method for detecting open-phase faults and locating fault positions in a PMSM used in aircraft applications. The proposed approach uses an Extended Kalman Filter for fault diagnosis, and it subsequently classifies faults using a Multiple Model filter.

초 록

영구자석 동기전동기의 권선 개방 고장은 권선이 끊어지거나 인버터 스위치의 고장으로 발생한다. 권선 개방 고장이 발생하면 전동기에 토크리플과 진동이 발생하게 되며, 영구자석 동기전동기를 작동기로 사용하는 항공기 등을 포함하는 운행체의 안전성에 치명적인 영향을 미치게 된다. 따라서 신속한 고장 검출 및 분류가 필수적이다. 본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 권선 개방 고장의 검출과 고장 위치 파악을 위한 분류 기법을 제안한다. 제안된 기법은 확장칼만필터를 통해 고장을 검출 후 다중모델 필터를 통해 고장을 분류한다.

Key Words : Permanent Magnet Synchronous Motor(영구자석 동기전동기), Open-phase Fault(권선 개방 고장), Fault Detection(고장 검출), Fault Classification(고장 분류), Extended Kalman Filter(확장칼만필터), Multiple Model(다중 모델)

1. 서 론

최근 환경문제의 중요성이 높아짐에 따라 자동차, 항공기 등 다양한 분야에서 전기식 구동기의 도입이 가속화되고 있다[1]. 그중 영구자석 동기전동기(PMSM; Permanent Magnet Synchronous Motor)는

높은 효율과 토크밀도 등으로 인해 다양한 산업현장에서 보편적으로 사용되는 전동기이다[2]. 이러한 이유로 영구자석 동기전동기의 상태는 자동차 및 항공기의 안전을 결정하는 중요한 요인이며[3], 안정성과 사고 예방을 위해 신속하고 효율적인 고장진단이 필수적이다.

영구자석 동기전동기의 고장은 기계적 고장, 전기적 고장, 자기적 고장으로 나뉘며, 본 논문에서는 전기적 고장 중 권선 개방 결함에 대하여 다룬다. 권선 개방

Received: Nov. 29, 2023 Revised: Dec. 14, 2023 Accepted: Dec. 15, 2023

† Corresponding Author

Tel: +82-02-300-0119, E-mail: sanghoko@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

결함은 주로 강한 전류로 인해 인버터와 권선 간의 연결이 불안정하거나 끊어져서 발생하며, 개방 결함 발생 시 왜곡된 전류가 권선에 인가되어 전동기에 강한 토크 리플과 진동을 발생시킨다[4]. 이러한 현상은 영구자석 동기전동기를 작동기로 사용하는 자동차 또는 항공기의 안정성에 심각한 영향을 미치며 추가적인 기계적 결함으로 이어질 수 있다.

최근 전동기의 권선 개방 고장진단을 위한 다양한 연구들이 이루어지고 있다[5-8]. 개방 결함 발생 시 고정자 전류에서 나타는 고조파 현상을 이용해 전류의 주파수 성분을 분석하여 결함을 진단하는 방법[5], 고정자 저항을 추정하여 개방 결함 발생 시 고조파 저항값의 변화를 통해 고장을 진단하는 방법[6], 3상 전류를 고조파 성분의 합으로 모델링하여 전류를 추정하여 고장을 진단하는 방법[7], d-q축 기준전류와 추정값을 사용하여 새로운 비용함수를 정의하여 고장을 진단하는 방법[8] 등이 있다. 이러한 방법들은 센서 등과 같은 추가적인 하드웨어가 필요하지 않다는 장점이 있으나, 고장 검출은 가능하나 고장 상의 분류가 불가능한 경우, 고장 진단을 위해 복잡한 계산 또는 많은 측정값이 필요한 경우가 있다.

본 논문에서는 확장칼만필터(EKF)와 다중모델(MM)을 사용한 고장 검출 및 분류 알고리즘을 제안하였다. 칼만필터와 다중모델은 주로 상태추정 기법으로 적용되며[9], 이를 활용하여 고장진단 분야에서도 다양한 연구들이 진행되고 있다[10][11].

본 연구에서는 비교적 간단한 d-q축 및 3상 전압방정식을 사용하여 영구자석 동기전동기를 모델링하였으며, 확장칼만필터를 통해 계산된 잔차(residual)를 분석하여 고장을 검출하고 고장이 모델링 된 다중모델 필터를 사용하여 고장을 분류한다. 제안된 고장 검출 및 분류 알고리즘 검증을 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 고장 검출 및 분류 성능을 검증하였다.

2. 영구자석 동기전동기 수학적 모델링

본 논문에서 사용된 영구자석 동기전동기는 4pole-pairs의 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM; Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)이다.

2.1 비고장 상태

Figure. 1은 비고장 상태의 영구자석 동기전동기의 등가회로를 나타낸다. 여기서 R 은 권선의 저항, L 은 권선의 인덕턴스, e_{abc} 는 각 상의 역기전력이다.

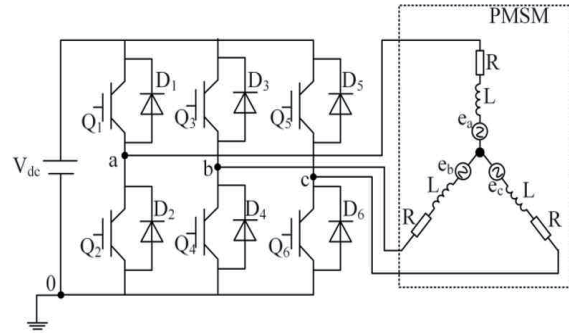


Fig. 1 The electrical equivalent circuit of PMSM drives

영구자석 동기전동기의 3상 전압방정식은 다음과 같이 표현된다[12].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Y결선의 중성점에서 상전류는 다음을 만족한다.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2)$$

여기서 V_a, V_b, V_c 는 각상의 전압이고 i_a, i_b, i_c 는 상 전류이며, L_s 는 권선의 자기 인덕턴스, M 은 상호 인덕턴스이다. 역기전력(e_a, e_b, e_c)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_a &= \omega_e \lambda_{PM} \cos \theta_e \\ e_b &= \omega_e \lambda_{PM} \cos \left(\theta_e - \frac{2}{3} \pi \right) \\ e_c &= \omega_e \lambda_{PM} \cos \left(\theta_e + \frac{2}{3} \pi \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ω_e 는 전기 각속도, λ_{PM} 는 영구자석의 고정자 권선에 쇄교하는 자속, θ_e 는 전기 회전각이다.

제어의 용이성과 회전에 대한 영향을 최소화하기 위해 120° 의 위상차를 갖는 a, b, c 상 변수들을 90° 의 위상차를 갖는 d-q축 좌표계로 변수를 변환한다. 좌표 변환을 위해 사용되는 변환 행렬 $T(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \cos(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta_e - \frac{4}{3}\pi) \\ -\sin\theta_e & -\sin(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta_e - \frac{4}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

변환 행렬을 통해 3상 전압방정식을 d-q축 전압방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$V_{dqm} = T(\theta) V_{abc} \quad (5)$$

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda_{PM} \quad (6)$$

$$L_d = L_q$$

여기서 V_{dq} , i_{dq} , L_{dq} 는 각각 d-q축 전압, 전류, 인덕턴스이며, 표면부착형 영구자석 동기전동기의 경우 d-q축 인덕턴스는 동일하다.

Eq. (1), (2)는 다중모델 필터에서 비교장상태와 고장상태의 모델링에 사용되며, Eq. (5),(6)은 확장칼만 필터에 적용하여 d-q축 전류를 추정하여 잔차를 계산하는데 사용된다.

2.2 고장 상태

Figure. 2는 a상 권선 개방 고장을 나타낸 것이다. a상의 권선이 개방된 경우 a상에는 전류가 흐르지 않게 되며, 전압방정식과 전류방정식은 다음과 같이 표현된다[13].

$$V_a = e_a$$

$$V_b = R_b i_b + L_s \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_c}{dt} + e_b \quad (7)$$

$$V_c = R_c i_c + M \frac{di_b}{dt} + L_s \frac{di_c}{dt} + e_c$$

$$i_a = 0, \quad i_b + i_c = 0 \quad (8)$$

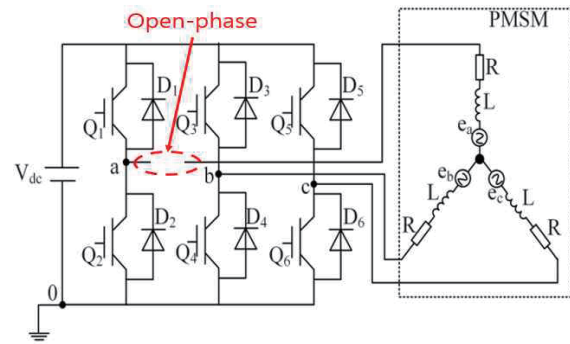


Fig. 2 Configuration of the PMSM with Open-phase fault

3. 고장 검출 및 분류 알고리즘

제안된 고장 검출 및 분류 알고리즘의 흐름도는 Fig. 3과 같다. 확장칼만필터를 통해 d-q축 전류를 추정하고 추정값과의 잔차를 계산 후 CUSUM 알고리즘 [14]을 통해 고장을 검출한다. 그 후 각상의 개방 결함이 모델링 된 다중모델 필터를 통해 고장이 발생한 상을 확률적으로 계산한다.

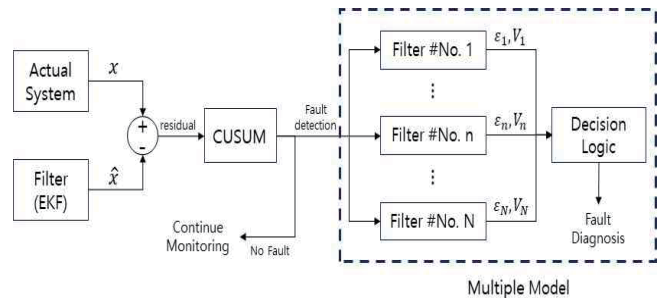


Fig. 3 Fault detection and diagnosis algorithm

3.1 확장칼만필터

영구자석 동기전동기 모델링의 비선형성으로 인해 확장칼만필터를 사용하여 d-q축 전류를 추정한다. Eq. 6을 상태공간 모델로 표현하면 Eq. 9와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{\omega_c L_q}{L_d} \\ -\frac{\omega_c L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\lambda_{PM}}{L_q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, x = [i_d \ i_q]^T, u = [V_d \ V_q \ \omega_c]^T$$

Eq. 9의 상태공간 모델을 이산화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{(k+1)} &= f(x_{(k)}, u_{(k)}) + w_{(k)} \\ y_{(k)} &= h(x_{(k)}) + v_{(k)} \end{aligned}$$

여기서

$$f(x_{(k)}, u_{(k)}) = (I + A \cdot T_s)x_{(k)} + (B \cdot T_s)u_{(k)} \quad (10)$$

$$h(x_{(k)}) = Cx_{(k)}$$

위에서 $w_{(k)}$, $v_{(k)}$ 는 각각 프로세스 및 측정 잡음이 고 T_s 는 샘플링 시간이다. 확장칼만필터는 다음의 절차를 반복하며 수행된다.

- Predict

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k|k-1} &= f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}) \\ P_{k|k-1} &= F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_{k-1} \end{aligned} \quad (11)$$

- Update

$$\begin{aligned} K_k &= P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \\ \hat{x}_{k|k} &= \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - h(\hat{x}_{k|k-1})) \\ P_{k|k} &= (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \end{aligned} \quad (12)$$

- i_{dq} 추정 시

$$Q = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

- i_{abc} 추정 시

$$Q = \begin{bmatrix} 0.03 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

여기서 P 는 공분산 행렬, K_k 는 칼만이득, Q, R 은 각각 시스템 및 측정 잡음의 공분산 행렬이다. Q, R 의 값은 참고문헌[15] 및 시행착오법을 통하여 결정하였다. 확장칼만필터를 통해 d-q축 전류의 측정값과 추정값의 차이인 잔차를 계산한다.

3.2 CUSUM 알고리즘

확장칼만필터를 통해 생산 된 잔차를 분석하여 고장을 검출한다. 이때 데이터 수집과정에서 예상하지 못한 센서 잡음 등으로 인해 발생할 수 있는 오탐지를 방지하기 위해 누적합 기반 분석방법인 CUSUM (CUMulative SUM) 알고리즘을 사용하였다[14].

3.3 다중모델 필터

다중모델 필터는 고장의 종류를 분류할 때 사용되며, 고장이 모델링 되어 있는 각각의 필터를 병렬로 배치하고 실제 측정값을 기반하여 필터링을 수행한다. 필터링을 통해 계산된 각각의 필터의 잔차와 공분산을 베이스 법칙(Eq. 13)에 적용하였으며, 조건부 확률(Eq. 14)을 계산하여 확률이 가장 높은 모델을 고장모델로 분류한다. 다중모델 필터에 사용되는 필터는 확장칼만 필터를 사용하였다.

$$p_i(k+1) = \frac{p(y(k+1)|H_i, J_k)p_i(k)}{\sum_{j=1}^N p(y(k+1)|H_j, J_k)p_j(k)} \quad (13)$$

$$p(y(k)|H_i, J_k) = \frac{\exp[-\frac{1}{2} \varepsilon_i^T V_i^{-1}(k) \varepsilon_i(k)]}{(2\pi)^{m/2} [\det V_i(k)]^{1/2}} \quad (14)$$

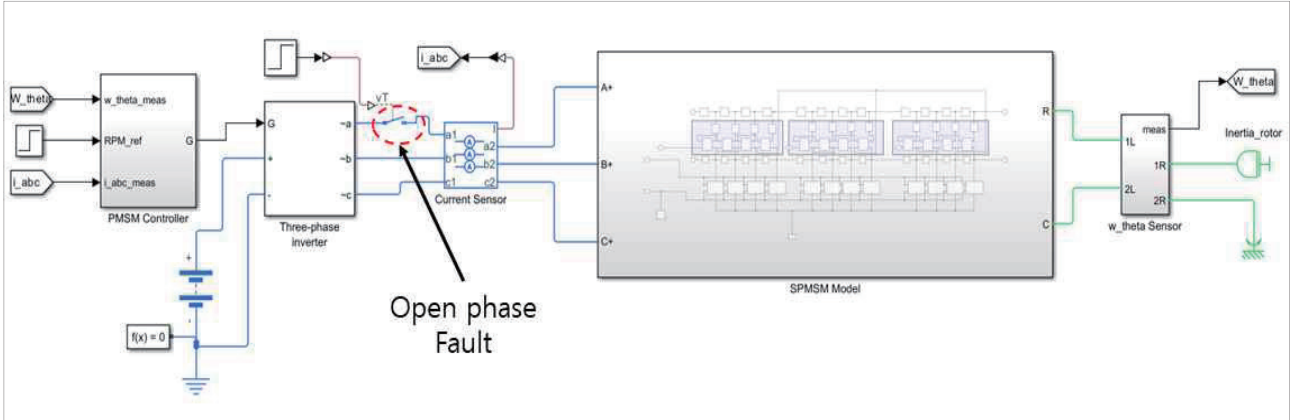


Fig. 4 Matlab/Simscape SPMSM Model

여기서 ε 는 잔차, V 는 공분산, N 은 필터의 개수, $J_k = [u(0), \dots, u(k), y(1), \dots, y(k)]$, i 는 다중모델 필터의 번호, m 은 출력값의 차원이다.

4. 시뮬레이션

Matlab/Simscape를 활용하여 영구자석 동기전동기의 구동 및 고장주입 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 모델의 구성은 Fig. 4와 같다. 모델링에 사용된 영구자석 동기전동기의 사양은 Table. 1과 같다. 고장 진단 알고리즘의 검증에 위해 시뮬레이션 후 0.5 sec에 a상 권선 개방결함을 스텝으로 주입하였으며, 개방 고장 발생 시 3상 전류의 측정값은 Fig. 5와 같다.

Table 1 PMSM parameter

Parameter	Values	Units
Pole Pairs	4	
Phase resistance (R)	0.141	[Ω]
d axis inductance	0.001755	[H]
q axis inductance	0.001755	[H]
Permanent magnet flux linkage (λ_{PM})	0.02	[Wb]
Rotor inertia (J)	0.00109	[$kg \cdot m^2$]

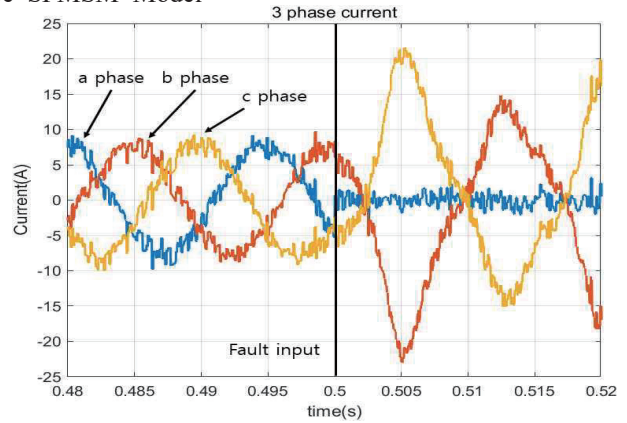


Fig. 5 3-phase current (when a-phase open fault)

4.1 고장 검출

확장칼만필터를 사용하여 d축 전류를 추정하였으며 추정 결과와 계산된 잔차는 Fig. 6와 같다. a상 권선 개방 고장은 0.5 sec에 주입되었으며, 고장발생 시 i_d 의 값이 왜곡되는 것을 확인할 수 있다.

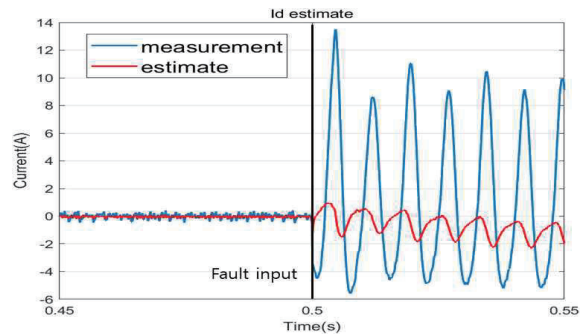


Fig. 6 (a) Result of i_d estimate

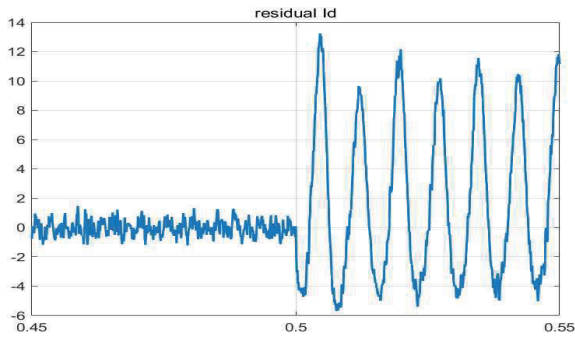


Fig. 6 (b) Calculated residual

계산된 잔차를 CUSUM 알고리즘을 통해 상부 누적합을 계산하면 Fig. 7과 같다. 고장이 발생됨에 따라 잔차가 커지며 누적합이 상승하게 된다. 계산된 누적합이 설정된 임계값을 초과 시 고장으로 탐지한다.

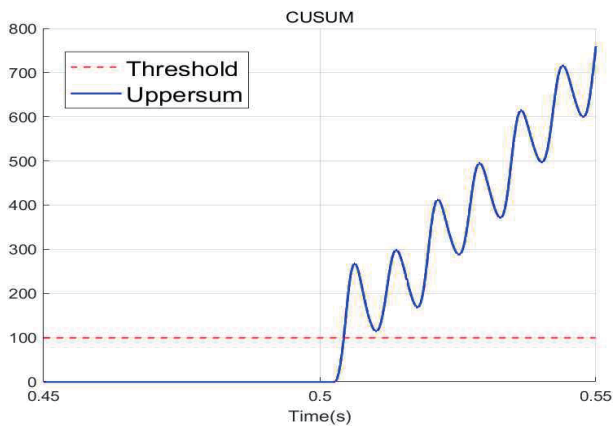


Fig. 7 Result of CUSUM algorithm

고장 검출을 위해 시뮬레이션에서 사용된 임계값은 100이며, 임계값은 상황에 맞게 조절이 가능한 파라미터이다. 임계값을 낮게 설정하면 빠른 고장탐지가 가능하지만 오탐지의 가능성이 높아지며, 이와 반대로 임계값을 높게 설정하면 오탐지의 가능성은 줄어들지만 고장 검출 시간이 길어지는 단점이 있다.

4.2 고장 분류

고장 검출 후 추정값을 총 4개(비고장, a상 고장, b상 고장, c상 고장)의 다중모델 필터에 적용한 결과는 Fig. 8과 같다. 확률은 0에서 1 사이의 값이며, 고장 주입 전 비고장 필터의 확률이 가장 높고 고장 주입 후 비고장 필터의 확률이 감소하고 a상 고장 필터의

확률이 상승한다.

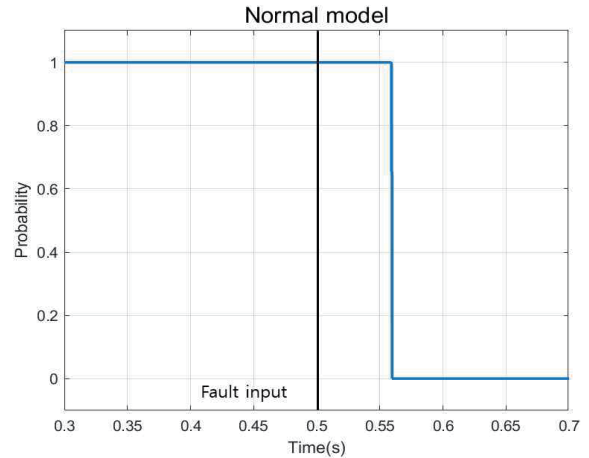


Fig. 8 (a) Normal model probability

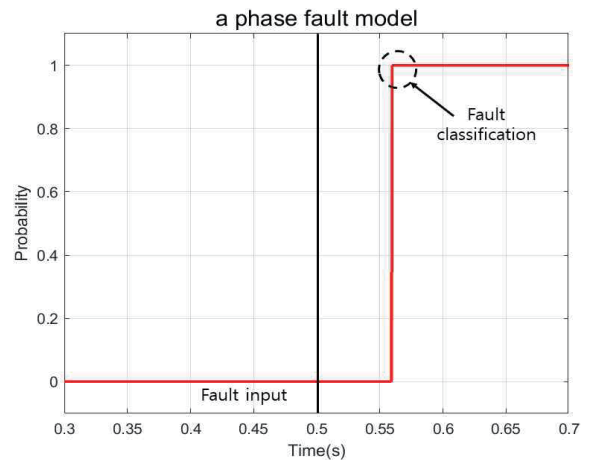


Fig. 8 (b) a phase fault model probability

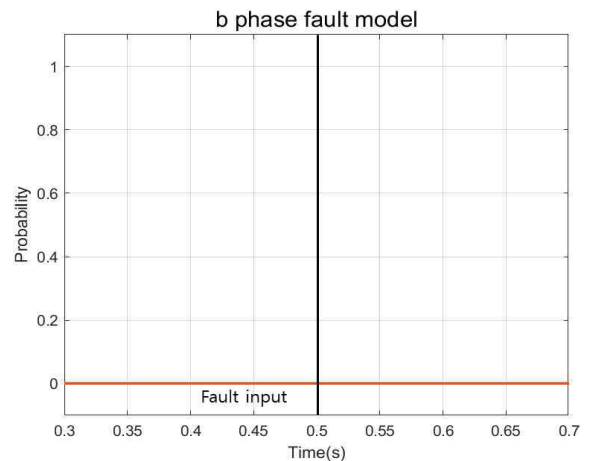


Fig. 8 (c) a phase fault model probability

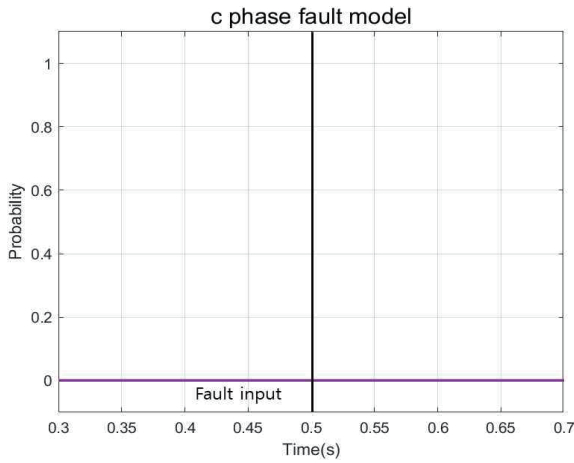


Fig. 8 (d) a phase fault model probability

고장 주입 후 약 0.06sec 후 a상 고장 필터의 확률이 1에 근접하며, a상 권선 개방결함 판단이 가능하다.

5. 결 론

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 권선 개방고장에 대한 고장 검출 및 분류에 대한 알고리즘을 제시하였다. 영구자석 동기전동기의 수학적 모델링을 수행 후 d-q 축 전류를 추정하여 잔차를 계산하고 CUSUM 알고리즘을 사용하여 고장을 검출하였다. 고장 검출 후 고장의 위치를 파악하기 위해 다중모델 필터를 사용하여 고장이 발생한 상을 분류할 수 있게 하였다. 제안된 고장 검출 및 분류 알고리즘의 성능을 검증하고자 Matlab/Simscap 환경에서 시뮬레이션을 수행하였으며, 권선 개방 결함에 대한 고장 검출 및 분류의 성능을 확인하였다.

다중모델 필터를 적용하여 권선 개방 결함 외의 다양한 결함 분류의 수행과 추후 전동기 실험장치를 구성하여 실제 실험을 통해 고장을 모사한 후 고장 진단 알고리즘의 성능을 검증하는 것을 목표로 한다.

후 기

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20015920).

References

- [1] P. Zheng, J. Zhao, R. Liu, C. Tong and Q. Wu, "Magnetic characteristic investigation of an axial-axial flux compound structure PMSM used for HEV", *IEEE Trans on Magnetics*, Vol. 46, no. 6, pp. 2191-2194, 2010.
- [2] B. A. Welchko, T. M. Jahns and S. Hiti. "IPM Synchronous machine drive response to a single-Phase open circuit fault", *IEEE Trans. on Power Electron*, Vol. 17, no. 5, pp. 764-771, Sep, 2022.
- [3] M. W. Kim and S. H. Ko, "Failure Diagnosis Technology Trends and Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors for Aircraft Application", *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 16, no. 6, pp. 129-137, 2022.
- [4] Hang. J, Wu. H, Zhang. J, Ding. S, Huang. Y and Hua. W, "Cost function-based open-phase fault diagnosis for PMSM drive system with model predictive current control." *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 36, no. 3, pp. 2574-2583, 2020.
- [5] Khlaief. A, M. Boussak, and M. Gossa. "Open phase faults detection in PMSM drives based on current signature analysis." *IEEE The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM*, 2010.
- [6] S. G. Ahn, B. G. Park, R. Y. Kim and D. S. Hyun, "Fault diagnosis for open-phase faults of permanent magnet synchronous motor drives using Extended Kalman Filter." *In IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 835-840, 2010.
- [7] Naseri. F, Schaltz. E, Lu. K and Farjah. E, "Real-time open-switch fault diagnosis in automotive permanent magnet synchronous motor drives based on Kalman filter." *IET Power Electronics*, Vol. 13, no. 12, pp. 2450-2460, 2020.
- [8] Hang. J, Wu. H, Zhang. J, Ding. S, Huang. Y and Hua. W, "Cost function-based open-phase fault

- diagnosis for PMSM drive system with model predictive current control.”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 36, no. 3, pp. 2574-2583, 2020.
- [9] S. W. Han, C. S. Kim, G. O. Koh and S. H. ko, “A Study of the Improvement of Air-to-Air Precision Aiming Performance Based on Interactive Multiple Model-Unscented Kalman Filter”, *Journal of The Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 51, no. 3, pp. 167-174, 2023.
- [10] Cha. J, “Transient State Modeling, Simulation, and Fault Detection/Diagnosis of an open-cycle Liquid Rocket Engine.”, *PhD Thesis. Ph. D. D. Dissertation, Korea Aerospace University*, 2019.
- [11] Meskin. N, Naderi. E and Khorasani. K, “A multiple model-based approach for fault diagnosis of jet engines.”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 21, no. 1, pp. 254-262, 2011.
- [12] Pillay. P, and Krishnan. R, “Modeling of permanent magnet motor drives.” *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol. 35, no. 4, pp. 537-541. 1988.
- [13] Hang, J., Zhang, J., Cheng, M. and Ding, S. “Detection and discrimination of open-phase fault in permanent magnet synchronous motor drive system.” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, no. 7, pp. 4697-4709, 2015.
- [14] Granjon. P, “The CuSum algorithm-a small review.”, 2013.
- [15] Sim. H. W, Lee. J. S and Lee. K. B, “On-line parameter estimation of interior permanent magnet synchronous motor using an extended Kalman filter.”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 9, no. 2, pp. 600-608, 2014.