

항공기용 영구자석 동기전동기 고장진단의 기술 동향 및 분석

김민우 · 고상호[†]

한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과

Failure Diagnosis Technology Trends and Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors for Aircraft Application

Minwoo Kim, Sangho Ko[†]

Department of Smart Air Mobility, Korea Aerospace University, Korea

Abstract

Recently, the technology of aircraft drivers has been transitioning from the existing hydraulically-focused mechanical system to an all-electric one due to the high precision and ease of maintenance of electric drivers. Consequently, the failure of an aircraft's electric motor can have fatal consequences. To ensure aircraft safety, efficient and timely fault diagnosis methods are required prompting the active pursuit of research into fault diagnosis technology. This paper introduces and analyses the failure types and failure diagnosis technology trends of permanent magnet synchronous motors among electric motors.

초 록

최근 항공기용 구동기는 전기식 구동기의 높은 정밀도 및 유지관리의 용이성 등으로 인해 기존 유압 중심의 기계시스템에서 전기구동 중심(More/All Electric)으로 기술이 변화하고 있다. 따라서 항공기의 전기 전동기 고장은 치명적인 결함을 넘어 인명피해로도 이어질 수 있다. 전기 전동기의 고장진단은 항공기의 안전성을 보장하는데 필수적인 요소이다. 이에 따라 효율적이고 적절한 고장진단이 요구되며 이러한 고장진단 기술 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 전기 전동기 중 영구자석 동기전동기의 고장 유형과 고장진단 기술 동향에 대해 소개하고 분석한다.

Key Words : Permanent Magnet Synchronous Motor(영구자석 동기전동기), Failure Type(고장 유형), Failure Diagnosis(고장진단), Electro Mechanical Actuator(전기식 구동기)

1. 서 론

최근 항공우주 분야의 트렌드는 MEA/AEA(More/All Electric Aircraft) 시스템으로 변화되고 있다[1]. 기존의 유압구동 시스템은 고온고압에 취약하며 높은 유지비용이 발생하는 단점이 있다. 이에 반해 전기식 구동

기(EMA; Electro Mechanical Actuator)는 높은 토크, 구조의 단순화, 정비성의 향상 그리고 항공기 이륙중량 감소 효과 등의 장점이 있다[2]. 이러한 장점으로 EMA는 기존의 비행 제어에 사용되었던 유압시스템을 대체 할 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 더불어 최근 모터 기술과 디지털 제어기술의 발전으로 인해 EMA로의 변화 속도는 더욱 가속화되고 있다. 지속적인 EMA의 도입으로 인해 전기 전동기의 상태가 전체 항공기의 안전을 결정하는 중요한 요인이 되었다[3]. 항공기의 비행 조건으로 인해 EMA는 낮은 온도, 진

Received: Dec. 07, 2022 Revised: Dec. 09, 2022 Accepted: Dec. 12, 2022

[†] Corresponding Author

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

© The Society for Aerospace System Engineering

동, 고속 비행 등 악조건 상황에서 운용되어야 하며, 이러한 이유로 사고를 최소화하기 위한 전기 전동기의 고장진단 시스템은 필수적이다. 전기 전동기의 고장진단 연구는 60년대부터 시작되었으며 최근에는 컴퓨터 및 신호처리 기술의 발전과 AI 기술 등으로 인해 전기 전동기의 고장진단 기술은 빠르게 발전해왔다[4]. 다양한 전기 전동기 중 본 논문에서 다루는 영구자석 동기전동기(PMSM; Permanent Magnet Synchronous Motor)는 높은 전력밀도와 효율로 인해 EMA에 보편적으로 사용되는 전동기이다[5].

본 논문에서는 PMSM의 고장 유형과 고장진단 기술 동향에 대해서 기술하고자 한다. 대략적인 전개는 다음과 같다. 다음 2장에서는 PMSM의 대표적인 고장 유형에 대한 소개를 하고, 3장에서는 다양한 고장진단 기술의 동향 및 방법에 대하여 기술한다.

2. PMSM 고장 유형

PMSM의 고장 유형에는 기계적 고장, 전기적 고장, 자기적 고장 등이 있으며, 각 유형별 특징은 Appendix A와 같다.

2.1 기계적 고장

기계적 고장에는 베어링 결함, 편심 결함, 공극 불균형 등이 있다. 모터 고장 중 약 40~50%는 베어링 결함과 관련된 고장이다[6]. 베어링 결함은 진동, 회전축 편심, 과부하, 윤활 불량 등으로 발생하며, 부하가 균형적인 정상 조건에서도 피로 고장이 발생할 수 있다[7]. 일반적인 베어링 고장에는 마모 및 균열이 있다[8]. 베어링 결함은 공극 불균형 및 편심과 같은 회전기기의 다양한 추가적인 결함을 발생시킨다[9]. 회전축 편심은 정적 편심과 동적 편심으로 나뉜다. Fig 1. 과 같이 정적 편심은 회전자 축이 회전축과 정렬되었지만, 고정자 축과 정렬되지 않았을 때 발생하며, 동적 편심은 회전자 축이 고정자 축과 정렬되었지만, 회전자 축과 정렬되지 않았을 때 발생한다. 일반적으로 두 종류의 편심은 공존하여 나타난다[10]. 이러한 편심 결함은 진동, 소음 등 추가적인 동적 및 자기적 결함을 발생시킨다. 공극 불균형 결함은 편심으로 인해 발생하는 결함 중 하나로, 고정자와 회전자 사이에 불균

일한 공기층이 형성되는 현상이다. 공극 불균형이 발생하면 공극 내 투과율이 변화하며, 이에 따라 내부 자속 불균형을 일으킨다[11]. 이러한 불균형은 고정자와 회전자의 진동을 일으키며 서로 간의 마찰로 인해 권선을 절연 고장 등을 발생시킬 수 있다[12].

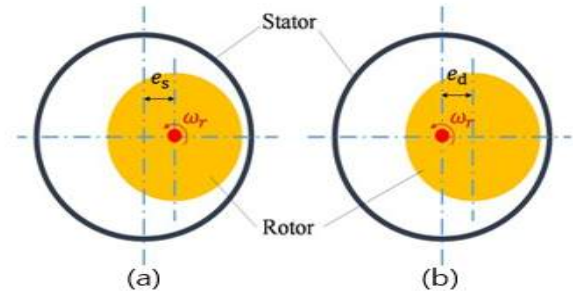


Fig. 1 Schematic plot of eccentricity (a) Static eccentricity, (b) Dynamic eccentricity [10]

2.2 전기적 고장

전기적 고장에는 모터 권선의 잘못된 연결, 접지 오류, 고정자 권선의 단락 및 개방 등이 있다[13]. 그중 Fig 2.와 같은 고정자 권선의 단락은 전기적 고장의 80%를 차지할 정도로 가장 흔하게 발생하는 고장이다[14].

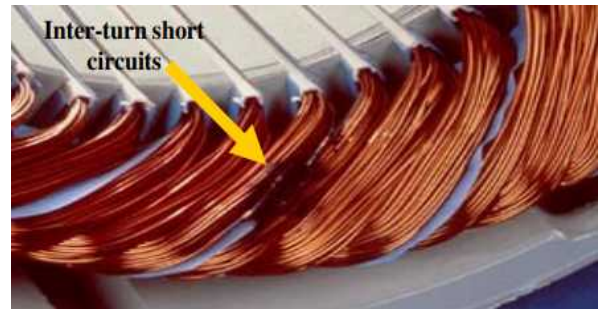


Fig. 2 inter-turn short circuit[17]

권선의 단락은 모터의 운용 시간이 증가하며 고온, 진동 등의 영향으로 권선의 절연 효과가 떨어지면서 발생한다. 권선 단락 결함이 발생하면 단락된 경로를 통해 많은 양의 전류가 흘러 과도한 열을 발생시키며, 다른 고정자 권선으로 결함이 전파될 수 있어 신속한 고장진단이 더욱 중요하다[15]. 권선의 개방은 지속적인 열로 인한 전원 모듈과 권선 간의 들뜸과 균열에 의해 주로 발생한다. 개방 고장은 왜곡된 전류를 권선에 인가함으로써 다른 정상상태의 전류를 증가시키고

중성점 전압의 불균형을 일으킨다[16]. 이로 인해 다른 부품에 2차적인 결함을 발생시킬 수 있다.

2.3 자기적 고장

PMSM 회전자의 영구자석은 온도, 고정자의 큰 전류, 자체 노화에 의해 감자(Demagnetization)될 수 있다[18]. 감자는 회복 가능성에 따라 가역 감자와 비가역 감자로 나뉘며, 가역 감자는 특정 임계점을 넘지 않는 한 모터가 정지하고 일정 시간 후 자성을 회복하고 비가역 감자는 임계점을 넘어 발생하며 자성이 회복되지 않는다. 이런 비가역 감자는 Fig 3.와 같이 내부 자속 불균형을 일으켜 모터에 소음과 진동을 유발하며, 전체적인 모터의 성능을 저하시킨다[19].

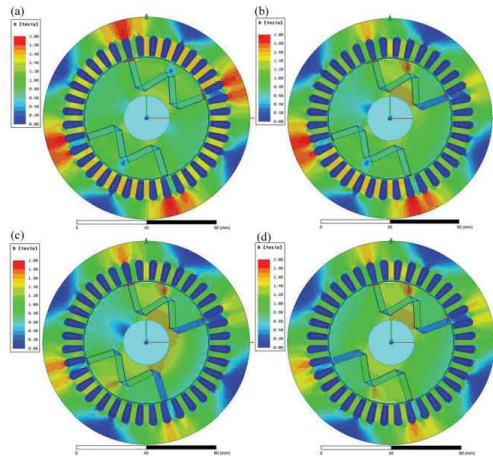


Fig. 3 Magnetic field density (a) healthy, (b) 12.5% less two magnets, (c) 25% less magnet, (d) 25% less two magnets opposite side [20]

3. PMSM 고장진단 기법

PMSM 고장진단에는 다양한 기법들이 존재한다. 대표적으로 1) 전류, 전압, 온도 등 측정 신호를 기반으로 하는 신호기반 기법, 2) 수학적 모델을 기반으로 예측 신호와 측정 신호의 차이를 이용하는 모델기반 기법, 3) 인공지능(AI; Artificial Intelligent)기반 기법 등이 있다[21]. 각 기법별 특징은 Appendix B와 같다.

3.1 신호기반 기법

앞서 PMSM에 발생할 수 있는 다양한 결함들에 대하여 설명하였다. 이러한 결함들이 발생 시 PMSM에는 전압변화, 전류변화, 소음, 진동 등 다양한 결함 현상들이 나타나는데, 이러한 결함 현상을 센서 등을 통해 취득 후 신호처리 기법을 통하여 고장을 진단한다. 신호처리 기법으로는 FT(Fourier Transform), WT(Wavelet Transform), HHT(Hilbert Huang Transform) 등이 있다.

(1) FT(Fourier Transform)

FT는 시간에 대한 신호를 주파수 성분으로 분해하는 변환이다. 신호처리를 위한 FT에는 FFT(Fast Fourier Transform) 및 STFT(Short-time Fourier Transform)를 사용한다. FFT는 이산화된 시간 신호의 FT를 얻기 위한 효율적인 알고리즘이다. Fig 4. 는 FFT를 통한 회전자 자석 손상 고장진단 사례이다. FFT의 단점은 특정 주파수 성분의 시간정보를 표시할 수 없어 잘못된 진단으로 이어질 수 있다[22]. 이런 단점을 보완하기 위해 사용되는 방법이 STFT이다. STFT는 Time Window를 정하여 FFT를 수행하는 방법으로, 정해진 Time Window의 크기에 따라 시간과 주파수 분해능의 성능이 달라진다[23].

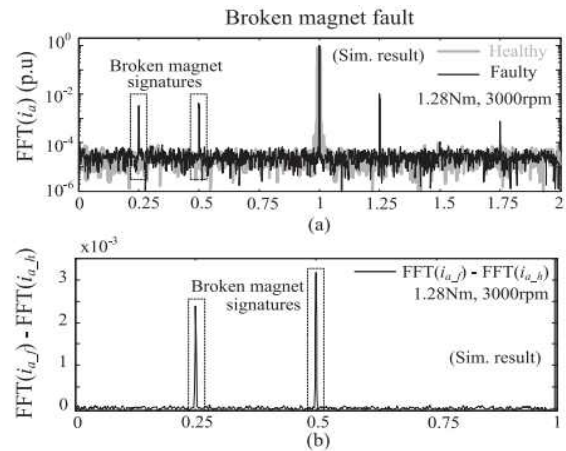


Fig. 4 (a) result, $FFT(i_a)$, (b) result, $FFT(i_{a_f}) - FFT(i_{a_h})$ [24]

(2) WT(Wavelet Transform)

Time Window의 크기에 따라 분해능 성능이 달라지는 STFT와 달리, WT는 다양한 Time Window에서의 주파수 분석을 가능하게 한다. 저주파 정보를 위한

긴 Time Window와 고주파 정보를 위한 짧은 Time Window 등 신호의 스펙트럼이 Time Window에 따라 어떻게 변하는지 알 수 있어 넓은 대역폭에 퍼져있는 결함정보를 찾아내기에 유용하다[25].

(3) HHT(Hilbert Huang Transform)

HHT는 분석 중인 신호 자체의 IMF(Intrinsic Mode Functions)[26]에서 발생하는 순간 주파수를 기반으로 한다[27]. EMD(Empirical Mode Decomposition)는 분석 중인 신호를 바탕으로 고유의 주파수 성분을 추출하는 방법이며, EMD를 통해 입력신호를 각각의 주파수 성분인 IMF로 분해한다. 따라서 HHT는 변화하는 입력신호에 따라 적응적으로 신호처리가 가능하여 앞서 설명한 신호처리 기법들의 시간 및 주파수 분해능으로 인한 문제를 최소화할 수 있다[28].

3.2 모델기반 기법

모델기반 기법은 Fig 5.와 같이 실제 측정 신호와 모터 모델의 예측신호를 비교하여 결함을 진단한다. 따라서 신뢰성이 있는 결함 진단을 위해서는 높은 수준의 모터 모델 정확도가 요구된다. 이러한 모터 모델은 수학적, 물리적 구성요소, 실험 데이터 및 유한요소법을 기반으로 얻어질 수 있다[29, 30]. 모델기반 기법의 장점은 PMSM의 정상적인 작동신호와 결함신호를 분리하기 때문에 작은 고장도 비교적 신속하게 진단할 수 있다. 모델기반 기법 고장진단 기법에는 상태 관측기(State Observer) 사용 및 파라미터 추정(Parameter Estimate) 등이 있다.

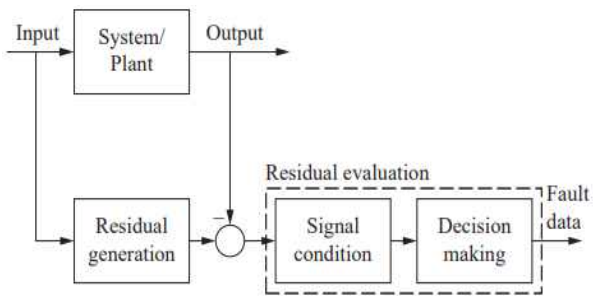


Fig. 5 Basic scheme of model based diagnosis[29]

(1) 상태 관측기

상태 관측기는 PMSM의 정상상태를 기반으로 한 신호를 출력한다. 참고문헌[31]은 상태 관측기를 사용하여 얻은 정상상태의 PMSM의 dq축 전류와 실제

PMSM을 통해 얻은 dq축 전류의 잔차를 이용하여 고장을 진단한 사례이다. 상태 관측기를 활용한 고장진단은 PMSM 모델의 정확도와 파라미터 변동 등에 의해 성능이 달라질 수 있다는 단점이 있다[32]. 따라서 높은 정확도의 PMSM 모델이 필요하다.

(2) 파라미터 추정

파라미터 추정을 이용한 고장진단은 PMSM의 파라미터를 실시간으로 추정하고 정상상태의 파라미터와 비교하여 고장을 진단하는 기법이다. 인덕턴스, 자속 쇄교, 고정자 저항, 회전자 관성, 마찰계수 등이 PMSM의 파라미터로 사용된다[33]. 결함의 발생시 PMSM의 파라미터 변화가 발생한다. 예를 들어 고정자 권선 단락 고장 발생 시 Fig 6.와 같이 고정자 인d축저항과 q축저항의 추정값에 76%의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다[34]. 이러한 파라미터 추정을 위한 방법으로는 RLS(Recursive Least Square), APA(Affine Projection Algorithm), EKF(Extended Kalman Filter), MRAS(Model Reference Adaptive System) 등이 있다[35].

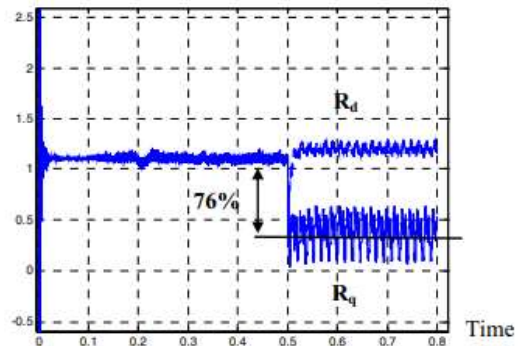


Fig. 6 Estimated parameter(R_d , R_q) in case 5 turn short circuits[34]

3.3 AI 기반 기법

컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어와 데이터 분석기술의 발전으로 인해 AI를 기반한 고장진단 기술이 주목받고 있다[36]. 신호 및 모델기반과는 달리 PMSM의 모델이나 신호 패턴이 필요하진 않지만, 진단의 정확도를 높이기 위해 많은 양의 신호 데이터가 필요하다[37]. AI 기법에는 ANN(Artificial Neural Network), Fuzzy logic 등이 있다.

(1) ANN

ANN은 가장 일반적으로 사용되는 알고리즘으로, input layer, hidden layer, output layer로 구성된다. ANN의 장점은 학습과 데이터 처리 능력이다. 입출력 간의 상호작용을 찾아내고 비선형적인 대량의 데이터를 신속하게 처리할 수 있다. 또한 새로운 입력정보에 대한 대응이 가능하다. 이러한 장점은 특히 작동 지점, 고장의 심각성과 같은 많은 요인들에 의해 달라지는 PMSM 고장특성에 적용하는데 용이하다[38]. 그 중 Deep Learning 알고리즘은 ANN을 기초로 하는데, 고장진단에 사용되는 Deep Learning 모델 중 가장 많이 사용되는 모델은 CNN(Convolutional Neural Network)이다[13]. CNN은 2차원 구조의 데이터를 사용할 수 있어 이미지를 인식하기 위한 패턴을 찾는 데 주로 사용된다. CNN을 통해 PMSM에서 얻은 시간-주파수 데이터를 2차원 이미지화하여 결함 신호의 패턴을 학습하고 결함을 진단한다[39]. ANN의 단점으로는 망의 내부가 블랙박스 속성을 가지고 있어 입출력 관계를 명확히 이해가 불가능 하다[40]. Fig 7. 은 PMSM 고장진단에 활용된 ANN의 예이다.

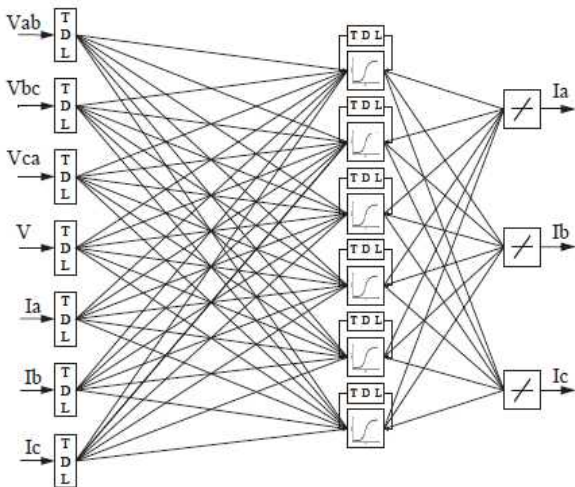


Fig. 7 Structure of a ANN[29, 41]

(2) Fuzzy logic

Fuzzy logic은 경험적인 인간의 인식 과정을 모방하여, 부정확하고 모호한 입력 데이터를 기반으로 명확한 결정을 내리는 방법을 제공합니다. Fuzzy rule, Fuzzy variable, Fuzzy set으로 구성되며 정확하지 않

은 데이터에 대한 유연성이 뛰어난 장점이 있다[42]. 일반적인 Fuzzy logic의 구성은 Fig 8.과 같다. Fuzzy logic은 추론 능력을 장점으로 지니고 있지만 신경망과 같은 학습 능력이 없다는 단점이 있어, ANN과 융합한 Neuro-Fuzzy 방법[43] 및 Adaptive Fuzzy [44]와 같은 다른 기법들과 융합하여 단점을 극복하는 기법들이 사용되고 있다.

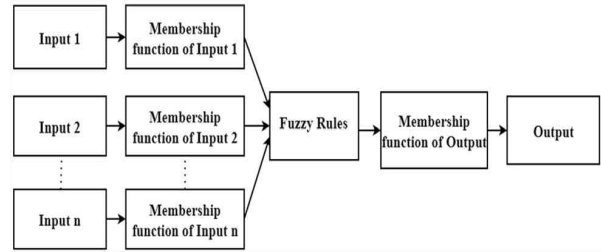


Fig. 8 Block diagram of Fuzzy logic system[45]

4. 결 론

항공기 유지보수비용 감소, 경량화, 환경문제 등으로 인해 기존의 유압시스템을 대체하여 EMA 적용이 늘어나며 항공기 시장의 MEA/AEA화는 가속화되고 있다. EMA용 전기 구동기로 높은 전력밀도 및 효율의 장점이 있는 PMSM의 사용이 늘어남에 따라 항공기의 안정성을 보장하기 위해 PMSM의 고장진단 기술이 더욱 중요해지고 있다.

본 논문에서는 PMSM 고장진단의 기술동향에 대하여 조사하였으며 고장진단 기법들과 특징을 분석하였다. PMSM은 제조, 조립의 편차와 결함발생 시 결함 종류 및 정도에 따른 다양한 결함 신호와 파라미터들의 변화로 인해 고장진단의 어려움이 있다. 최근 컴퓨터 기술 및 신호처리 기술의 발달로 인해 각 기법들을 융합하여 단점을 보완하는 방법이 다양하게 이루어지고 있어, PMSM 고장진단 연구가 활발해질 것으로 판단한다.

후 기

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20015920).

References

- [1] G. Qiao, G. Liu, Z. Shi, Y. Wang, S. Ma and T. C. Lim, "A review of electromechanical actuators for More/All Electric aircraft systems." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, pp. 4128-4151, 2018.
- [2] S. S. Kim, H. J. Park, D. Kim, D. H. Kim, S. B. Kim J. Lee and J. Y. Choi, "Research to Predict the Thermal Characteristics of Electro Hydrostatic Actuator for Aircraft." *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 16, no. 3, pp 84-92, 2022.
- [3] Z. Yin, N. Hu, J. Chen, Y. Yang and G. Shen, "A review of fault diagnosis, prognosis and health management for aircraft electromechanical actuators." *IET Electric Power Applications*, pp. 1249-1272, 2022.
- [4] J. Zheng, Z. Wang, D. Wang, Y. Li and M. Li. "Review of fault diagnosis of PMSM drive system in electric vehicles." *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE, pp. 7426-7432, July 2017.
- [5] P. Giangrande, V. Madonna, G. Sala, A. Kladas, C. Gerada and M. Galea, "Design and testing of PMSM for aerospace EMA applications." *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, pp. 2038-2043, 2018.
- [6] Y. E. Zhongming and W. U. Bin, "A review on induction motor online fault diagnosis." *Third International Power Electronics and Motion Control Conference*. IEEE, pp. 1353-1358, August 2000.
- [7] J. A. Rosero, J. Cusido, A. Garcia, J. A. Ortega and L. Romeral, "Broken bearings and eccentricity fault detection for a permanent magnet synchronous motor." *In IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pp. 964-969, November 2006.
- [8] J. Tian, C. Morillo, M. H. Azarian and M. Pecht, "Motor bearing fault detection using spectral kurtosis-based feature extraction coupled with K-nearest neighbor distance analysis." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* vol. 63, no. 3, pp. 1793-1803, 2015.
- [9] S. Nandi, H. A. Toliyat and S. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors— A review." *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719-729, 2005.
- [10] F. Lin, S. Zuo and W. Deng, "Impact of rotor eccentricity on electromagnetic vibration and noise of permanent magnet synchronous motor." *Journal of Vibroengineering*, vol. 20, no. 2, pp. 923-935, 2018.
- [11] K. Saad and G. Mirzaeva, "Space-time representation of the main air gap flux of a three phase squirrel cage induction motor and its application to detect eccentricity." *In 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference IEEE*, pp. 1466-1472, May 2015.
- [12] D. G. Dorrell, W. T. Thomson and S. Roach, "Analysis of airgap flux, current, and vibration 5s as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors." *IEEE Transactions on Industry applications*, vol. 33, no. 1, pp. 24-34, 1997.
- [13] Y. Chen, S. Liang, W. Li, H. Liang and C. Wang, "Faults and diagnosis methods of permanent magnet synchronous motors: A review." *Applied Sciences*, vol. 9, no. 10, pp. 2116, 2019.
- [14] X. Liu, W. Miao, Q. Xu, L. Cao, C. Liu and P. W. Pong, "Inter-turn short-circuit fault detection approach for permanent magnet synchronous machines through stray magnetic field sensing." *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 18, pp. 7884-7895, 2019.
- [15] K. H. Kim, "Simple online fault detecting scheme for short-circuited turn in a PMSM through current harmonic monitoring." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, No. 6, pp. 2565-2568, 2010.
- [16] U. M. Choi, J. S. Lee, F. Blaabjerg and B. K. Lee, "Open-circuit fault diagnosis and fault-tolerant control for a grid-connected NPC inverter." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 10,

- pp.7234-7247, 2015.
- [17]M. Sahraoui, A. Ghoggal, S. E. Zouzou, A. Aboubou and H. Razik, "Modelling and detection of inter-turn short circuits in stator windings of induction motor." *In IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pp. 4981-4986, November 2006.
- [18]T. Ishikawa, Y. Seki and N. Kurita, "Analysis for fault detection of vector-controlled permanent magnet synchronous motor with permanent magnet defect." *IEEE transactions on magnetics*, vol. 49, no. 5, pp. 2331-2334, 2013
- [19]M. Zhu, W. Hu and N. C. Kar, "Torque-ripple -based interior permanent-magnet synchronous machine rotor demagnetization fault detection and current regulation." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 2795-2804, 2016.
- [20]R. E. Quintal-Palomo, "Analysis of Current Signals in a Partially Demagnetized Vector Controlled Interior Permanent Magnet Generator." *Power Electronics and Drives*, vol. 4, no. 39, pp. 179-190, 2019.
- [21]C. Wu, C. Guo, Z. Xie, F. Ni and H. Liu, "A signal-based fault detection and tolerance control method of current sensor for PMSM drive." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 12, pp. 9646-9657, 2018.
- [22]S. P. Mogal and D. I. Lalwani, "A brief review on fault diagnosis of rotating machineries." *Applied Mechanics and Materials*, vol. 541, no. 2, pp. 635-640, 2014.
- [23]J. Rosero, J. Cusido, A. Garcia, L. Romeral and J. A. Ortega, "Detection of stator short circuits in PMSM by mean of joint time-frequency analysis." *In 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, pp. 420-425, September 2007.
- [24]T. Goktas, M. Zafarani and B. Akin, "Discernment of broken magnet and static eccentricity faults in permanent magnet synchronous motors." *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 2, pp. 578-587, 2016.
- [25]J. Rosero, L. Romeral, E. Rosero and J. Urresty, "Fault Detection in dynamic conditions by means of Discrete Wavelet Decomposition for PMSM running under Bearing Damage." *In 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 951-956, February 2009.
- [26]R. C. Sharpley and V. Vatchev, "Analysis of the intrinsic mode functions." *Constructive Approximation*, vol. 24, no. 1, pp. 17-47, 2006.
- [27]R. Yan and R. X. Gao, "Transient signal analysis based on Hilbert-Huang transform." *In 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, vol. 2, pp. 1198-1202, May 2005.
- [28]Z. Wang, J. Yang, H. Ye and W. Zhou, "A review of Permanent Magnet Synchronous Motor fault diagnosis." *In 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, pp. 1-5, August 2014.
- [29]E. A. Bhuiyan, M. Akhand, M. Azad, S. K. Das, M. F. Ali, Z. Tasneem, M. R. Islam, D. K. Saha, F. R. Badal, M. H. Ahamed and S. I. Moyeen, "A survey on fault diagnosis and fault tolerant methodologies for permanent magnet synchronous machines." *International Journal of Automation and Computing*, vol. 17, no. 6, pp. 763-787, 2020
- [30]B. Vaseghi, N. Takorabet and F. Meibody-Tabar, "Fault analysis and parameter identification of permanent -magnet motors by the finite-element method." *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 9, pp. 3290-3295, 2009.
- [31]M. A. Mazzoletti, G. R. Bossio, C. H. De Angelo and D. R. Espinoza-Trejo, "A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, pp. 7218-7228, 2017.
- [32]W. Huang, J. Du, W. Hua, W. Lu, K. Bi, Y. Zhu and Q. Fan, "Current-based open-circuit fault diagnosis for PMSM drives with model predictive control." *IEEE Transactions on Power Electronics*,

- vol. 36, no. 9, pp. 10695-10704, 2021
- [33]M. S. Razaq and J. W. Jung, "A comprehensive review of state-of-the-art parameter estimation techniques for permanent magnet synchronous motors in wide speed range." *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 7, pp. 4747-4758, 2019
- [34]M. Khov, J. Regnier and J. Faucher, "Detection of turn short-circuit faults in stator of PMSM by on-line parameter estimation." *In 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp. 161-166, June 2008.
- [35]M. S. Razaq and J. W. Jung, "A comprehensive review of state-of-the-art parameter estimation techniques for permanent magnet synchronous motors in wide speed range." *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 7, pp. 4747-4758, 2019.
- [36]B. Cai, Z. Wang, H. Zhu, Y. Liu, K. Hao, Z. Yang, Y. Ren, Q. Feng and Z. Liu, "Artificial intelligence enhanced two-stage hybrid fault prognosis methodology of PMSM." *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021.
- [37]B. Cai, Y. Zhao, H. Liu and M. Xie, "A data-driven fault diagnosis methodology in three-phase inverters for PMSM drive systems." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 7, pp. 5590-5600, 2016.
- [38]T. Shen, A. Kilic, C. Thulfaut and H. C. Reuss, "An Intelligent Diagnostic Method for Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) in the Electric Drive of Autonomous Vehicles." *In 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'19 ECCE Europe)*, pp. 1-10, September 2019.
- [39]L. Wen, X. Li, L. Gao and Y. Zhang, "A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 7, pp. 5990-5998, 2017.
- [40]S. S. Moosavi, A. Djerdir, Y. Ait-Amirat and D. A. Khaburi, "ANN based fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor under stator winding shorted turn." *Electric Power Systems Research*, vol. 125, pp. 67-82, 2015.
- [41]J. Quiroga, D. A. Cartes, C. S. Edrington and L. Liu, "Neural network based fault detection of PMSM stator winding short under load fluctuation." *In 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 793-798, September 2008.
- [42]J. Quiroga, L. Liu and D. A. Cartes, "Fuzzy logic based fault detection of PMSM stator winding short under load fluctuation using negative sequence analysis." *In 2008 American Control Conference*, pp. 4262-4267, June 2008.
- [43]H. S. Dakheel, Z. B. Abdulla and H. J. Jawad, "Faults detection and diagnoses of permanent magnet synchronous motor based on neuro-fuzzy network." *International Journal of Applied*, vol. 8, no. 2, pp. 173-185, 2019.
- [44]A. Bechkaoui, K. Ouamrane, A. Ameer and D. Taibi, "Detection of turn short circuit fault in PMSM variable speed based on adaptive fuzzy logic and sliding-mode control". *In 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1-6, December 2015.
- [45]S. Moosakunju, V. P. Mini, S. Ushakumari, N. Mayadevi and R. Harikumar, "A hybrid fault detection and diagnosis algorithm for five-phase PMSM drive." *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1-13, 2022.

APPENDIX A

Table 1 PMSM Fault Types

| 구 분 | | 증 상 | 원 인 |
|-----------|---------|------------------|-------------------------|
| 기계적 결함 | 베어링 결함 | 진동, 소음 | 진동, 회전축 편심, 과부하, 윤활불량 등 |
| | 편심 결함 | 진동, 소음, 토크 리플 | 정렬 불량, 베어링 공차 등 |
| | 공극 불균형 | 진동, 소음, 권선 절연 결함 | 회전축 편심 |
| 전기적 결함 | 권선 단락 | 열 발생, 영구자석 감자 | 고온, 과부하, 진동 등 |
| | 권선 개방 | 권선 전류 증가, 작동불가 | 고온 |
| 자기적 결함 | 영구자석 감자 | 자력 비대칭, 소음, 진동 | 고온, 과전류, 자체 노화 등 |

APPENDIX B

Table 2 PMSM Fault Diagnosis Methods

| 구 분 | | 장 점 | 단 점 |
|-------|--|------------------------------------|-------------------------------|
| 신호 기반 | FFT (Fast Fourier Transform) | 빠른 주파수 성분 분해 | 결함의 시간정보를 알 수 없음 |
| | STFT (Short-Time Fourier Transform) | 시간 정보가 포함된 주파수 성분 분해 | Time Window에 따른 시간-주파수 분해능 변화 |
| | WT (Wavelet Transform) | 넓은 대역폭의 결함정보 파악 용이 | 신호의 고주파 대역 분해 한계 |
| | HHT (Hilbert Huang Transform) | 입력신호에 따른 적응적 신호처리 가능 | 신호처리 시간 증가 |
| 모델 기반 | 상태 관측기 | 작은 결함도 정확 및 신속하게 진단가능 | 모델 정확도에 따른 성능 변동 |
| | 파라미터 추정 | 측정된 잡음신호에 영향이 적음, 다양한 작동상태에서 적용 가능 | 복잡한 설계 및 계산 |
| AI 기반 | ANN (Artificial Neural Network) | 학습을 통한 입출력 관계 파악, 다량의 데이터 신속한 처리 | 다량의 학습데이터 필요, 내부 입출력 관계 불분명 |
| | Fuzzy logic | 모호한 데이터의 유연한 처리 | 학습능력 없음 |