

초분해능 기법을 이용한 전동기 정밀 상태진단

박용기¹, 고진환^{2*}

¹경상국립대학교 기술경영학과, ²경상국립대학교 전자공학과

Precise Diagnosis of Motor status using Super Resolution Techniques

Yong-Gi Park¹, Jinhwan Koh^{2*}

¹Department of Management of Technology, Gyeongsang National University

²Department of Electronic Engineering, ERI, Gyeongsang National University

요약 전동기는 사용시간과 동작 상황에 따라 베어링이 파손되기도 하고, 마모로 인한 동적 및 정적 편심, 회전자 바의 손상, 권선의 절연 열화로 인한 단락 현상 등 다양한 결함을 일으키게 된다. 이를 적시에 발견하지 못하고 방치할 경우 유도전동기뿐만 아니라 구동되는 핵심 설비의 고장을 발생시키게 된다. 이는 주요 사용처인 생산현장의 시스템에 악영향을 미쳐 경제적 손실과 시스템의 복구를 위한 추가 인력 및 시간 손실을 초래하고, 심할 경우 인적 피해도 가져올 수 있다. 따라서 유도전동기의 조기 감시 및 진단은 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 전동기로부터 취득한 전압과 전류 신호의 특징을 추출, 분석하여 결함의 유형을 진단하는 방법은 이미 많은 연구가 이루어졌다. 본 연구에서는 결함의 유형을 파악할 수 있는, 더욱 정밀한 파라미터를 도출하는 기법을 연구하였다. 기존의 신호해석기술인 FFT, STFT(short time FT), Wavelet 해석법은 해상도 등의 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 super resolution 기법들 (MUSIC(multiple signal classification), root-MUSIC, ESPRIT, Pisarenco, MPM(matrix-Pencil method) 등을 사용하여 기존의 한계를 뛰어넘는 기법을 제시하고자 한다. 본 연구를 통하여 상태진단 알고리즘을 개발함으로써, 운전정보감시 또는 설비 건강지수 시스템에 탑재가 가능하다.

Abstract Motors can have a variety of faults, including damage to bearings, dynamic and static eccentricity due to wear, damage to rotor bars, and short circuits due to deterioration of insulation in windings. These faults depend on the period of use and operating circumstances. If a fault is not discovered right away, an induction motor and the equipment that it drives will both fail. This has a negative impact on the system at a production site, which is where it is used most frequently. As a result, there will be financial loss, an increase in labor requirements and recovery time, and potential harm to people in more serious circumstances. It is crucial to monitor and diagnose induction motors as soon as possible. Much research has been done on how to diagnose the type of fault by extracting and analyzing the characteristics of the voltage and current signals acquired from a motor. In this study, we derived a more precise parameter that can identify the type of defect. Existing signal analysis techniques such as FFT, short time FT (STFT), and wavelet analysis have limitations such as resolution. In this study, we propose a technique that overcomes the limitations by using super-resolution techniques (MUSIC (multiple signal classification), root-MUSIC, ESPRIT, Pisarenco, MPM (matrix-Pencil method), etc.). By developing a condition diagnosis algorithm, it is possible to use the proposed technique in operation information monitoring or a facility health index system.

Keywords : Motor Diagnosis, Super Resolution Techniques, Precise Estimation, MUSIC, MPM

본 논문은 한국연구재단 NRF-2020R1F1A1062177 및 정보통신기획평가원 (IITP-RS 2022-00156409)의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jinhwan Koh(GyeongSang National Univ.)

email: jikoh@gnu.ac.kr

Received February 20, 2023

Revised March 21, 2023

Accepted May 12, 2023

Published May 31, 2023

1. 서론

유도전동기는 산업 전반에 걸쳐 사용되고 있는 가장 중요한 전기기기 중 하나이다. 전동기를 이용한 구동장치는 구동축과 베어링, 감속기가 연결되어 있다. 유도전동기는 전기적, 기계적 결합 발생 시 특정 주파수에서 이상 신호가 나타나게 되며 이 이상 신호를 검출하여 결합을 진단할 수 있다. 보통은 전류와 진동 신호 각각을 이용한 슬립 및 회전 주파수 계산을 통해 시간 및 주파수 영역의 결합별 진단 파라미터를 계산한다.

전동기는 사용시간과 동작 상황에 따라 베어링이 파손되기도 하고, 마모로 인한 동적 및 정적 편심, 회전자 바의 손상, 권선의 절연 열화로 인한 단락 현상 등 다양한 결함을 일으키게 된다. 이를 적시에 발견하지 못하고 방치할 경우 유도전동기뿐만 아니라 구동되는 핵심 설비의 고장을 발생시키게 된다. 이는 주요 사용처인 생산현장의 시스템에 악영향을 미쳐 경제적 손실과 시스템의 복구를 위한 추가 인력 및 시간 손실을 초래하고, 심할 경우 인적 피해도 가져올 수 있다. 따라서 유도전동기의 조기 감시 및 진단은 매우 중요한 문제라 할 수 있다.

최근에 유도전동기의 회전자와 고정자의 전류 및 진동 신호분석, 고정자 권선의 부분 방전(Partial Discharge : PD) 측정 등을 통하여 고장검출을 위한 다양한 방법들이 연구되고 있다[1-9].

구체적으로 전류 신호는 회전자 바 결합과 편심 결합, 진동 신호는 베어링 결합, 부분 방전 신호는 고정자 권선의 절연진단 파라미터 계산에 이용하였다[6,10-13].

본 논문에서는 유도전동기의 전압 및 전류 신호에 초분해능 기법을 적용하여 더욱 정밀한 감시 진단 알고리즘을 제안한다. 2장에서는 가능한 결합진단에 관해 기술하고, 기존에 사용되고 있는 방법에 관해 설명한 후, 초분해능 기법을 설명한다.

2. 전동기 결합의 진단

2.1 회전자 결합진단

회전자 봉 파손 진단을 위해서는 회전자 측 대역 주파수의 크기를 점검하고, 회전자 케이지의 신호를 평가하게 된다. 회전자 봉 시험에서는 특성 주파수 요소를 판정하게 되는데, 전류 스펙트럼에서 회전자 케이지의 성능이 떨어지면 특성 주파수가 발생하게 된다.

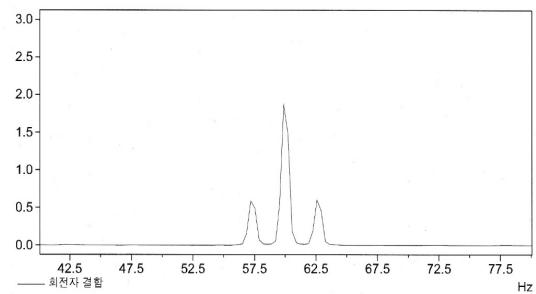


Fig. 1. Frequency spectrum of a motor with a rotor defect

위의 Fig. 1과 같이 봉의 파손은 전류 스펙트럼에서 전원 주파수로부터 슬립 주파수의 2배만큼 떨어진 2개의 측대역 주파수 성분이 전원 주파수 좌우에 발생한다.

2.2 고정자 상태 분석

고정자 권선의 결합은 고정자 슬롯 주파수를 관찰함으로써 판별할 수 있다. 이때의 중심 주파수는 편심의 경우와 유사하게 고정자 슬롯의 수에 회전 주파수를 곱하여 계산하게 된다. 전동기 고정자 결합 시에는 중심 주파수의 주변에 회전자 주파수가 측대역 성분으로 나타나게 된다.

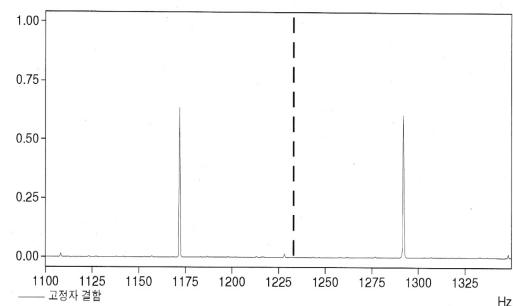


Fig. 2. Current frequency spectrum of a motor indicating a stator defect

Fig. 2는 고정자 결합을 나타내는 주파수 스펙트럼이다. 좌측 실선이 중심 주파수 위치를 나타내며 좌측 실선은 회전자 주파수가 변조된 측대역 주파수 위치를 나타낸다.

2.3 베어링 결합의 진단

볼 또는 률리로 구성된 베어링에서 결합이 발생되어

이것이 진행되면 매우 특별하고 예측 가능한 특성 주파수가 발생한다. 이는 가속도계 등을 이용한 기계적 진동 감시 기술에서 오랫동안 사용되어 온 기술로써, 전원 신호분석에도 이 예측 가능한 특성 주파수가 혼입된다.

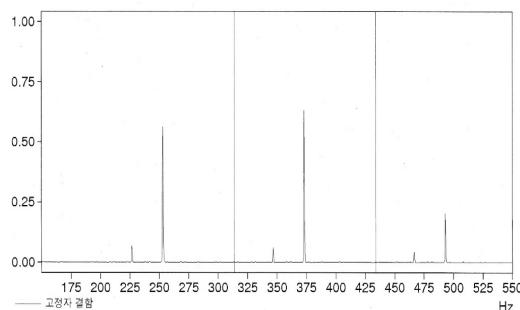


Fig. 3. Current spectrum in case of bearing outer ring failure

베어링 외륜 결함이 발생하였을 때 주파수축에서 탐지한 전류 스펙트럼을 나타낸다. 비교적 낮은 주파수에서 특성 주파수 성분을 탐지하는 것이 가능한 장점이 있다. Fig. 3의 실선은 외륜 결함 시에 나타나는 기본 주파수 대역이다. 이 신호가 전원 주파수에 변조되어 전류 스펙트럼에 나타나게 된다.

2.4 편심의 진단

정적 편심은 높은 주파수 대역 스펙트럼이나 낮은 주파수 스펙트럼을 관찰하여 진단할 수 있다. 높은 주파수 대역을 이용한 정적 편심 진단은 중심 주파수의 측대역 성분을 이용한다. $f_{ecc_static} = (RB \cdot f_{rm}) \pm n \cdot f_e$ 식에서 중심 주파수 성분은 계산되지 않는데 이는 중심 주파수가 스펙트럼 상에서 정점으로 나타나는 것이 아니고 분석을 위한 기준을 나타내는 것이기 때문이다.

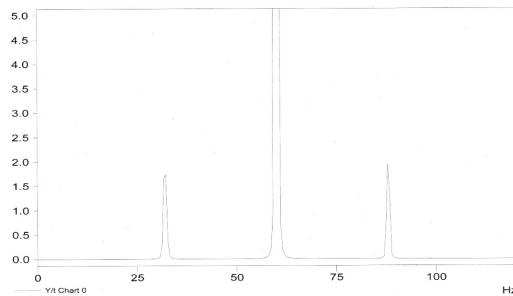


Fig. 4. Low-band frequency spectrum of current at motor eccentricity

따라서 정적 편심은 회전자 봉의 수와 전동기 회전 주파수의 곱으로 계산되는 중심 주파수를 기준으로 전원 주파수의 훌수 배수 측대역 주파수를 관찰하여 진단할 수 있다. Fig. 4는 모터 편심의 예를 나타낸다.

동적 편심의 스펙트럼은 정적 편심과는 다르게 회전 주파수가 중심 주파수의 측대역으로 관찰되는 특징이 있다. 이를 간략히 표현하면 $f_{ecc_static} = (RB \cdot f_{rm}) \pm (n \cdot f_e) \pm f_{rm}$ 와 같다.

2.5 날개 또는 깃 통과 주파수 계산

송풍기, 팬의 블레이드 통과 주파수나 펌프의 깃 통과 주파수는 축회전 주파수에 블레이드나 깃의 수를 곱하여 구한다.

결함이 있는 깃의 블레이드의 통과 주파수는 전원 주파수를 중심으로 측대역 주파수 형태로 나타난다. 이 성분은 전류 스펙트럼에서 뚜렷하게 나타나는데 전원 주파수와의 변조로 인해 진동성분이 측대역에서 나타나게 된다.

Table 1은 ISO 19035-2에서 제공하는 모터 상태 모니터링에 관한 추천을 도식화한 것이며, Table 2는 전원 전류/전압에 다른 모터 상태의 이상 여부를 판단하는 예를 정리한 표이다.

Table 1. Motor condition monitoring technology recommended by ISO 19035-2

condition monitoring	What can be monitored	What can be monitored
Performance	Power voltage, current, input, output, coupling stress	On-line measurement, supply voltage asymmetry is current asymmetry, Identification of causes of winding overheating and insulation defects
air gap torque	current, voltage	Cracks in rotor rods and short-circuits in stator coils during start-up and operation
vibration	Vibration Displacement, Velocity, Acceleration	Able to identify mechanical and electrical faults stator current
stator current	motor supply current	Identify rotor rod damage
shock pulse	Vibration acceleration (bearing housing)	Shock wave monitoring due to rolling bearing defects
acoustic emission	Audible and ultrasonic frequencies	Contact between rolling elements, presence or absence of cracks
speed fluctuations	Rotational speed change of motor	Identification of rotor defects, air gap eccentricity, misalignment, etc.

partial discharge	impedance	Check motor insulation status
leakage flux	Axial leakage flux	Identification of rotor rod damage, stator winding short-circuit
temperature	Bearing outlet temperature, winding temperature	Bearing friction, overheating of winding
oil particles	Abrasive particles, dust in the lubricating oil	Friction, abrasion, partial discharge, contamination
surge test	Echo pulses of high-voltage, high-frequency pulses	Diagnosis of winding defects
visual inspection	visual, camera, videotape	trend monitoring

Table 2. Possible types of status diagnosis with power supply voltage/current monitoring

gear fault	$F_{tr} = \frac{N_g}{60N_p}$
belt fault	$F_{Belt} = \frac{C_p}{L} \cdot N_p$
Faulty blade or impeller	$f_{blade} = (N_{blade} \cdot f_{rm}) \pm f_e$

f_{rm} = operation frequency

n = Number of rolling elements (balls)

BD = rolling element diameter

PD = pitch diameter

β = rolling element contact angle

f_{outer} = outer race frequency

f_{inner} = inner race frequency

3. 신호분석 기법

3.1 고전적 분석기법

가장 기본적인 신호해석기법으로 스펙트럼 영역을 고속 푸리에 변환을 사용하여 취함으로써, 하모닉 등의 정보를 얻어낼 수 있다. 그 역변환을 빠르게 수행하는 효율적인 알고리즘이지만 짧은 시간에 일어나는 고조파들에 대한 정확한 정보를 확인할 수는 없다. 스펙트럼의 분해능은 최대주파수/데이터개수가 되며 고조파가 중간 주파수를 가진다면 파악되지 않는 단점이 있으며, 데이터가 적을 때 스펙트럼 분해능이 부족하게 된다.

FFT의 단점을 보완하기 위해 사용되는 신호분석 기술로서 STFT(Short Time Fourier Transform)가 사용될 수 있다. STFT는 Window의 크기에 따라 주파수와 시간 축의 해상도를 조절할 수 있지만, 주파수축과 시간축의 해상도를 동시에 조절하지 못한다는 단점이 있다. 역시 데이터가 적을 때 스펙트럼 분해능이 부족하다.

신호분석기법으로 wavelet을 사용할 수 있으며, wavelet은 신호가 sine, cosine으로 표시되지 않는 이미지 같은 경우 신호분석이 용이하다. 그러나 회전하는 전동기의 전압/전류는 sine cosine의 형태를 가지므로, wavelet 분석기법은 적절하지 않게 된다.

3.2 MUSIC, root MUSIC

MUSIC 알고리즘은 입력 공분산 행렬(input covariance matrix)의 고유구조(eigen structure)를 이용한 고정밀 다중신호 분류법(high resolution multiple signal classification technique)이다[11].

MUSIC 알고리즘의 장점은 아주 가까운 간격의 신호를 구분하여 추정할 수 있다는 장점이 있으며, FFT와

STFT의 단점을 보완할 수 있다.

Root-MUSIC 알고리즘은 MUSIC 스펙트럼에 대응하는 MUSIC 다항식의 근을 구하여 값을 추정한다[12]. Root-MUSIC 알고리즘은 MUSIC 알고리즘의 방위 분해능을 향상시키지만 어레이 센서의 개수 두 배 정도의 차수를 갖는 다항식의 해를 구하기 때문에 데이터의 개수가 많은 경우 MUSIC 알고리즘이보다 많은 계산 시간이 요구된다.

3.3 ESPRIT

ESPRIT 알고리즘은 MUSIC 알고리즘의 계산과 저장상의 조건을 크게 감소시키고 값을 판별하기 위해 모든 가능한 steering 벡터를 사용한다[13].

센서 어레이가 서로 직선 (fixed translational) 거리 만큼 떨어진 두 개의 서브 어레이 (subarrays)의 해당 소자들로 구성된 크기가 같고 동일한 두 서브어레이로 분해할 수 있는 구조를 가지게 하면 효과적인 장점을 살릴 수 있으며, ESPRIT 알고리즘의 핵심은 안테나 어레이의 직선 변위 불변성(translational invariance)으로 야기된 신호서브스페이스(underlying signal subspace)의 회전 변위 불변성(rotational invariance)을 이용한 것이다.

3.4 Matrix Pencil

Matrix Pencil을 이용한 알고리즘은 복소 지수들 (complex exponentials)의 합으로 나타내어지는 신호 파라미터들의 추정과 입력되어지는 Matrix pencil의 eigen decomposition을 이용한다[14,15].

Pencil이라는 용어는 1960년 Gantmacher[16]에서 유래했으며 Sarkar[14,15]는 복소 지수 합계의 지수를 얻기 위해 수학적 모델을 개발했다. 실제로 MPM은 고유 구조 접근 방식의 변형이며 입력 공분산 행렬 대신 입력 Pencil Matrix를 사용한다. 잡음 성분을 null space로 매핑하여 신호 성분을 정확하게 구분할 수 있게 된다.

4. 시뮬레이션

전동기 오류에서 가장 많은 결함을 주는 베어링 결함 (41%)의 경우를 시뮬레이션 하였으며 그 결과가 Fig. 5 - Fig. 8에 나타나 있다. 여기서 전동체 직경, BD=0.5m, 피치직경, PD=0.6m, 컨택각도 = 7도, 운전주파수는 60Hz, SNR=10dB 일 경우이다. 샘플개수는 64개

이다. Fig. 5는 외부 베어링 결함 시 FFT와 MUSIC 스펙트럼을 보여주며, MUSIC 기법이 정밀한 분해능을 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 SNR이 20 dB일 경우의 스펙트럼이며 MUSIC 기법이 우위에 있는 것을 보여준다. Fig. 7, Fig. 8은 2개의 주파수 성분이 존재하는 경우이며, 두 경우 모두 MUSIC 기법이 우수한 것을 보여준다. Fig. 8에서는 FFT는 잘못된 결과를 나타내고 있다.

Table 3에서는 각 방법에 따른 베어링 외륜, 내륜, 중심 주파수의 추정을 나타낸다. Matrix Pencil 방법이 가장 좋은 결과를 보여준다.

내부 베어링의 오작동인 경우 각 방법으로 오차를 추정하였으며 잡음에 따른 결과는 Table 4와 같다. 오차는 상대오차로 계산되었으며 오차의 차를 실제값으로 나눈 것이다.

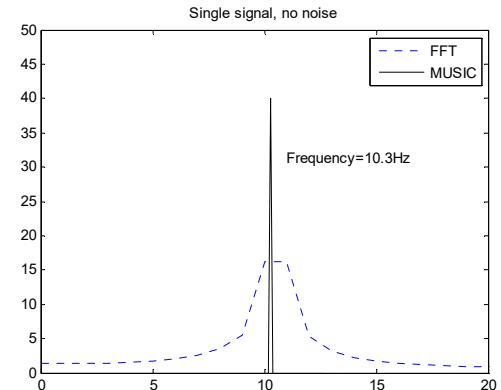


Fig. 5. Low-band frequency spectrum of current at outer bearing defect with no noise

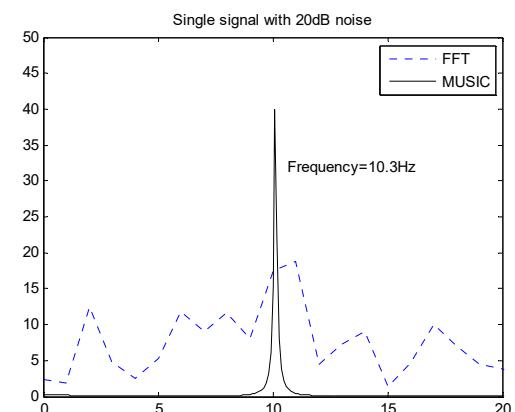


Fig. 6. Low-band frequency spectrum of current at outer bearing defect with SNR 20dB

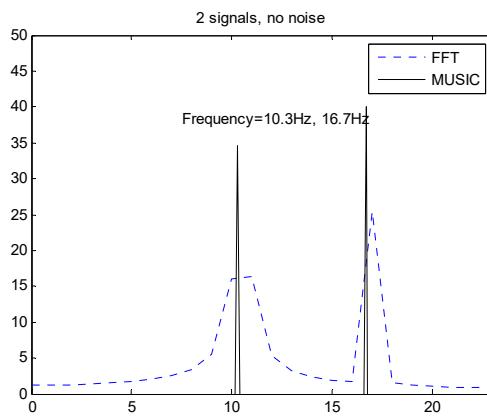


Fig. 7. Low-band frequency spectrum of current at bearing defect with no noise

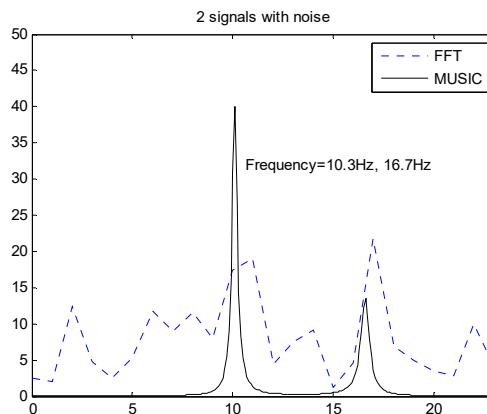


Fig. 8. Low-band frequency spectrum of current at bearing defect with SNR 20dB

Table 3. Simulation results of bearing defect

frequency	Real	FFT	STFT	MUSIC	root-MUSIC	Matrix Pencil
f_{rm}	60Hz	58	58.5	59	59.5	60.1
f_{inner}	183.33	180	180	182	182.7	183.5
f_{outer}	10.00	11.1	11	10	10.1	10

Table 4. Error in the estimation of inner bearing defect with respect to SNR

noise level	No noise	20dB	10dB	5dB
FFT	1.0%	4.0%	-	-
STFT	1.0%	4.0%	-	-
root MUSIC	0.1%	0.1%	5%	-
Matrix Pencil	0.0%	0.8%	4%	-

5. 결론

본 연구에서는 전동기의 결함의 유형을 파악할 수 있는 더욱 정밀한 파라미터를 도출하는 기법을 연구하였다. 기존의 신호해석기술인 FFT, STFT(short time FT), Wavelet 해석법은 해상도 등의 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 super resolution 기법을 MUSIC(multiple signal classification), root-MUSIC, ESPRIT, Pisarenco, MPM(matrix-Pencil method) 등을 사용하여 기존의 한계를 뛰어넘는 기법을 제시하였다. 본 연구를 통하여 전동기의 상태진단 알고리즘을 개발함으로써, 운전정보 감시 또는 설비건강지수 시스템에 탑재가 가능하다.

References

- [1] P. Chattopadhyay, N. Saha, C. Delpha, and J. Sil, "Deep Learning in Fault Diagnosis of Induction Motor Drives," in 2018 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chongqing), 2018, pp. 1068-1073.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PHM-Chongqing.2018.00189>
- [2] P. Gangsar and R. Tiwari, "Comparative investigation of vibration and current monitoring for prediction of mechanical and electrical faults in induction motor based on multiclass-support vector machine algorithms," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 94, pp. 464-481, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.03.016>
- [3] K. Kim and A. G. Parlos, "Induction motor fault diagnosis based on neuropredictors and wavelet signal processing," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 7, no. 2, pp. 201-219, Jun. 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2002.1011258>
- [4] H. Razik, G. Didier, M. B. R. Correa, and E. R. C. da Silva, "The remote surveillance device in monitoring and diagnosis of induction motor by using a PDA," in 2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007, pp. 84-89.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/POWERENG.2007.4380216>
- [5] N. Mehala and R. Dahiya, "Motor current signature analysis and its applications in induction motor fault diagnosis," 2nd National Conference on Recent Trends in Communication and Computing (RTCC), 2008, pp. 442-448.
- [6] H. Jeong-ho, S. Joong-ho, and C. Kyu-hyung, "Fault Diagnosis of Induction Motor Using Inverter Input Current Analysis," Journal of the Korean Society of Industrial Science and Technology, vol. 17, no. 7, pp. 492-498, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.7.492>

-
- [7] K. B. Kim, T.-U. Jung, Y.-W. Yoon, D.-H. Hwang, and J.-H. Seon, "Development of Fault Diagnosis Technology for Inverter Driven Induction Motors by Current and Vibration Signal Analysis," Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Conference, 2013, pp. 729-730.
 - [8] Y. S. Byun, H.-J. Park, G.-D. Kim, and Y.-J. Han, "Induction Motor Failure Diagnosis System," Proceedings of the Korean Electrical Society Conference, 2001, pp. 2172-2174.
 - [9] S. M. Park, O. Jeon, and J.-S. Kim, "Motor failure diagnosis method using motor voltage current measurement and PLL technique," Proceedings of the Korean Society of Power Electronics Conference, 2021, pp. 518-519.
 - [10] J. Han, D. Choi, S. Park, and S. Hong, "Motor failure prediction based on DT-CNN considering outlier data," Journal of the Korean Society of Control and Robot Systems, vol. 26, no. 11, pp. 932-939, 2020.
 - [11] R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.
 - [12] A. J. Barabell, "Improving the Resolution Performance of Eigenstructure-based Direction Finding Algorithm," Proc. Of the IEEE Int'l Conf. On Acoustics, Speech, and Signal Processing-83, 1983, pp. 336-339.
 - [13] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 37, no. 7, pp. 984-995, 1989.
 - [14] Y. Hua and T. K. Sarkar, "Generalized pencil-of-function method for extracting poles of an EM system from its transient response," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 37, no. 2, pp. 229-234, 1989.
 - [15] T. K. Sarkar and O. Pereira, "Using the Matrix Pencil Method to Estimate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 37, no. 1, pp. 48-54, 1995.
 - [16] F. R. Gantmacher, "Theory of Matrices Volume 1," Chelsea, New York, 1960.

박 용 기(Yong-Gi Park)

[정회원]



- 2017년 3월 : 경상국립대학교 글로벌 경영학 졸업
- 2023년 2월 : 경상국립대학교 기술경영학 박사수료
- 2005년 4월 ~ 현재 : (주)프로웰 대표이사

〈관심분야〉

모터제어, 인공지능, 기술경영

고 진 환(Jinhwan Koh)

[정회원]



- 1999년 12월 : 시라큐스대학교 전기공학 박사 졸업
- 2003년 3월 ~ 현재 : 경상국립대학교 공과대학, 공학연구원, 전자공학과 교수

〈관심분야〉

레이더시스템, 리모트센싱, 인공지능