

배전반 전류 신호 기반 산업용 원심펌프 운전 이상징후 분석 방법 제안

손환민, 허장욱*

국립금오공과대학교 전자공학부, *국립금오공과대학교 기계시스템공학과

sonkihy@kumoh.ac.kr, *hhjw88@kumoh.ac.kr

A Proposed Method for Analyzing Operating Anomalies in Industrial Centrifugal Pumps Using Switchboard Current Signals

Son Hwan Min, Hur Jang Wook*

Department of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology,

*Department of Mechanical Systems Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

요 약

산업 현장의 원심펌프는 공정 냉각수 순환 등 연속 운전 조건에서 핵심 설비로 사용되며, 운전 상태 변화나 이상 징후를 조기에 파악하는 것이 중요하다. 본 논문은 배전반에 설치 가능한 전류 센서를 이용하여 펌프-모터 구동 시스템을 비침습적으로 모니터링하고, 1초 단위 RMS 전류(필요 시 전압 포함)를 기반으로 운전 상태 변화를 분석하는 방법을 제안한다. 제안 방법은 (1) 전류 수준 및 운전 특성에 기반한 구간 구분, (2) 슬라이딩 윈도우 기반 통계적 특징 추출(평균, 표준편차, RMS, 최대값 등), (3) 표준화(z-score) 기반 특징 해석, (4) 이상 구간을 시각화하는 절차로 구성된다. 본 연구는 현장 제약으로 고장 재현이 어려운 환경에서 적용 가능한 전류 기반 분석 절차를 정리하고, 향후 실제 장기 데이터 수집 결과를 기반으로 운전 상태 분석 및 이상 구간 해석을 확장하는 것을 목표로 한다.

I. 서 론

원심펌프는 산업 공정에서 냉각수 순환 및 유체 이송을 담당하는 핵심 장비로, 연속 운전 환경에서는 작은 운전 변화가 누적되어 설비 성능 저하나 유지보수 비용 증가로 이어질 수 있다. 일반적인 상태감시는 진동, 압력, 유량 등 다양한 센서를 활용하지만, 현장에서는 설치 공간, 배선 및 정비성, 비용 제약으로 추가 계측이 어려운 경우가 많다. 반면 배전반에서 측정 가능한 전류 신호는 비침습적으로 계측할 수 있어 적용성이 높고 장기 데이터 축적에도 유리하다.

다만 실제 공정 환경에서는 고장 상태를 임의로 재현하기 어렵고, 고장 발생 빈도도 낮아 고장 유형 분류 중심 접근에 필요한 학습 데이터 확보가 제한된다. 이에 본 논문은 고장 유형을 세분화하기보다, 장기 운전 전류 데이터에서 특징을 추출하고 정상 기준 대비 변화로 이상 후보 구간을 표시하는 절차를 정리하여 현장 적용 가능한 분석 흐름을 제안한다.

II. 본론

본 연구는 자동차용 정밀고무부품 제조사인 TSR 업체의 공정 냉각수 순환 라인에서 24시간 연속 운전되는 산업용 원심펌프를 대상으로 하며, 대상 설비는 WILO 원심펌프(모델: PSV-1080C)이다(Fig 1). 데이터 수집은 배전반 내부에 전력 로거(HIOKI PW3360)를 설치하여 RMS 전류(RMS 전압)를 취득하고, 1초 단위 RMS 값으로 저장한다. 1초 RMS 기반 접근은 고주파 원신호 저장 대비 데이터 용량을 줄이면서도 장기 운전의 추세 변화 및 변동성 증가를 관찰하는 데 적합하다. 대상 설비의 모터 정격출력, 정격전압 및 정격전류와 계측·분석 조건은 Table 1에 요약하였다.[1-2]



Fig. 1. 대상설비(WILO PSV-1080C) 외형 및 설치 환경

Table 1. 대상 원심펌프/모터 사양 및 계측·분석 조건

구분	내용
대상 설비	WILO 산업용 원심펌프 (PSV-1080C)
운전 환경	공정 냉각수 순환(24h)
모터 정격 출력	7.5KW
전원/주파수	3상 AC/60Hz
정격 전압	220/380V
정격 전류	25.8A @ 220V / 14.9A @ 380V
계측 장비	HIOKI PW3360
입력 데이터	I _{rms} , V _{rms}
저장 형식	CSV 파일 형식
분석 윈도우 길이 W	60s
윈도우 이동 간격	10s

수집된 시계열 데이터는 시간 정렬 후 전처리를 수행한다. 짧은 결측 구간

은 선형 보간으로 보정하고, 장시간 결측은 분석에서 제외한다. 이후 1초 RMS 전류 시계열에 대해 길이 $W = 60$ 초 윈도우를 적용하고, 윈도우 이동 간격(step)은 10초로 설정하여 윈도우별 특징을 계산하였다. 각 윈도우에서 평균(mean), 표준편차(std), RMS(rms), 최대값(max)을 기본 특징으로 사용하며, 정상 전류 수준에서도 변동이 증가하는 구간을 구분하기 위해 변동계수(CV)를 핵심 지표로 포함한다. CV는 윈도우 평균 μ 및 표준편차 σ 로 다음과 같이 정의한다.

$$CV = \frac{\sigma}{|\mu| + \epsilon}$$

여기서 ϵ 은 수치적 안정화를 위한 작은 값이다. 또한 특징 간 스케일 차이를 줄이고 구간 비교를 용이하게 하기 위해 각 특징 값 x 에 대해 z-score 표준화를 적용한다.

$$z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x + \epsilon}$$

본 논문은 실제 공정에서 고장 상태를 임의로 재현하기 어려운 점을 고려하여, 이상 후보 구간을 정상 기준 분포 대비 통계적 변화 관점에서 표시한다. 기준 구간은 초기 운전 데이터 중 설비 운전이 안정적인 기간(예: 운전 조건이 일정한 구간)으로 정의하고, 해당 구간에서 특징 분포를 산출한다. 이후 변동계수(CV)가 기준 구간의 상위 분위수(예: 95%)를 초과하는 경우를 변동성 증가 후보로 정의한다. 또한 단발성 스파이크로 인한 오차를 줄이기 위해 $CV > \tau_{CV}$ 조건이 연속 M 개 윈도우 이상(예: $M = 3$, step = 10 s 기준 최소 30 s 지속) 만족될 때만 이상 후보 구간으로 확정한다. 더불어 인접 후보 구간 사이의 간격이 짧은 경우(예: 30 s 이내) 하나의 구간으로 병합하여 결과를 정리한다. 최종적으로 Irms 및 CV의 시간 축 변화와 함께 이상 후보 구간을 표시하는 형태로 결과를 제시한다(Fig. 2, Fig. 3).[3-5]

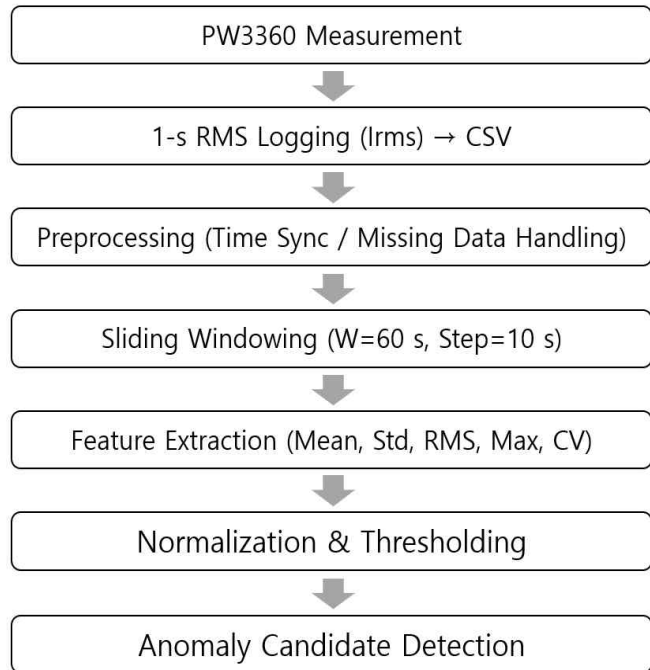


Fig. 2. 전류데이터 수집 및 특징 기반 분석 절차

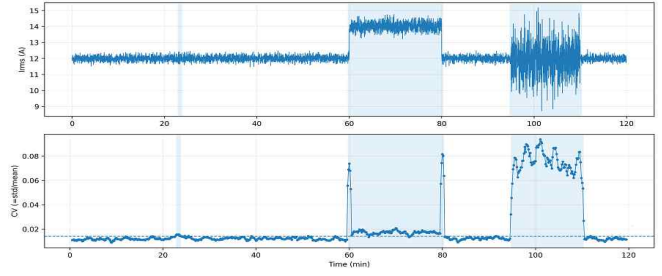


Fig. 3. Irms 및 변동계수(CV) 기반 이상 후보 구간 표시(예시)

III. 결론

본 논문은 배전반에서 취득 가능한 전류 신호를 활용하여 산업용 원심펌프의 운전 상태 변화 및 이상 후보 구간을 분석 하는 특징 기반 분석 절차를 제안하였다. 제안 방법은 1초 RMS 전류 데이터를 윈도우 기반으로 처리하여 통계적 특징(mean, std, RMS, max, CV)을 추출하고, z-score 표준화 및 기준 구간 분포 기반 임계치를 적용하여 정상 대비 변동성 증가 후보 구간을 표시하는 방식으로 구성된다. 또한 단발성 변동에 의한 오차를 줄이기 위해 연속성 조건과 후보 구간 병합 규칙을 적용함으로써 이상 후보 구간을 보다 안정적으로 도출하였다.

또한 본 연구는 전류 기반 이상 후보 구간 표시 단계에 초점을 맞추어, 실제 공정에서 고장 재현 및 고장 라벨 확보가 어려운 환경에서도 적용 가능한 절차를 정리하였다. 향후에는 장기 실측 데이터 축적을 통해 기준 구간 및 임계치 설정의 타당성을 정량적으로 검증하고, 운전 이력(정지/기동, 밸브 조작, 유지보수 기록)과의 연계 분석을 수행할 예정이다. 나아가 전류 신호와 함께 진동·압력 등 추가 센서 정보를 결합하고, 학습 기반 진단·이상탐지 모델 및 성능지표를 포함하는 방향으로 확장함으로써 보다 정교한 설비 상태 진단 체계를 구축할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터사업의 연구결과(IITP-2025-RS-2024-00438430, 기여율 50%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업(IITP-2025-RS-2020-II201612, 기여율 50%)의 지원을 받아 수행된 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Han, et al., “The use of model-based voltage and current analysis for condition monitoring of centrifugal pumps...,” 2025.
- [2] P. K. Pradhan, et al., “Fault detection in a centrifugal pump using vibration and motor current signature analysis,” 2012.
- [3] “Condition Monitoring of Centrifugal Pumps Using Motor Current Signature Analysis (MCSA),” 2018.
- [4] H. Adaika, et al., “An MCSA-Based Platform for Fault Detection in Centrifugal Pump...,” Sensors, 2025.
- [5] S. Bruinsma, et al., “Motor current and vibration monitoring dataset for various faults in centrifugal pumps,” 2024.