

# AI 기반 영상 인식 기법을 활용한 수배전판넬 볼트 풀림 감지 및 사고 예방 방안 연구

감치옥\*

\*한국폴리텍대학

e-mail:kamcu99@kopo.ac.kr

## A Study on Energy Efficiency Improvement Strategies Based on Smart Grid Technology

Chi-Uk kam\*

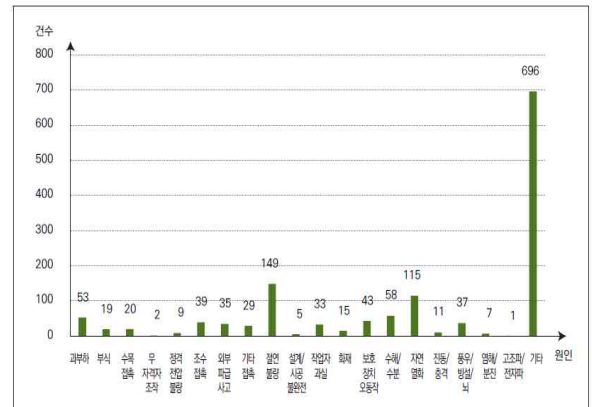
\*Dept. of Electrical Engineering, Ulsan Campus of Korea Polytechnic

### 요 약

This study proposes a practical method for the early detection of bolt loosening in critical fastening points of power distribution panels. To this end, we capture the angular variation of anti-loosening markings (torque markings) in images and apply deep learning-based computer vision techniques to automatically determine the degree of loosening. Fastening defects caused by vibration, thermal expansion, and long-term operation of electrical equipment can lead to arcing and fires, thereby necessitating a highly reliable monitoring technology. In this paper, we design a pipeline that integrates an object detection model with an angle estimation model and evaluate its performance using a dataset that includes real field footage. Experimental results show that the system can detect subtle rotations on the order of  $1^\circ$ , achieving an abnormal-state classification accuracy of over 95% with a false alarm rate below 2% under a  $\pm 3^\circ$  threshold. These findings confirm that the proposed approach, leveraging non-contact, real-time, and automated operation, can enhance the safety of power facilities and advance preventive maintenance frameworks.

### 1. 서 론

전력설비의 안전사고는 다양한 원인으로 발생하나, 최근 통계에 따르면 절연 상태의 열화로 인한 사고가 두드러집니다. 기설비의 노후 및 사용 환경에 따른 절연 성능 저하로 발생한 사고가 149건으로 전체 설비사고의 10.8%를 차지하여, 전기설비 사고 유형 중 가장 높은 비중을 보였습니다. 또한 전기설비의 자연 열화에 기인한 사고가 115건(8.4%)으로 집계되어, 장기 운전 및 환경 스트레스가 설비 신뢰성에 미치는 영향을 시사합니다. 이러한 수치는 체결 불량, 절연 열화, 자연 열화 등 시간이 지남에 따라 누적되는 결함 요인이 전력설비 사고의 주요 위험군임을 보여주며, 비접촉·상시·정량 감시가 가능한 지능형 모니터링 기술의 필요성을 더욱 부각합니다. 본 연구가 제안하는 마킹 기반 영상 인식 방법은 체결부의 미세 회전 변화를 실시간으로 포착함으로써, 절연 열화와 자연 열화에 수반될 수 있는 체결 상태 저하를 조기에 감지하고, 사고로의 진행을 사전에 차단할 수 있는 실용적 방안을 제공합니다.



[그림 1] 원인별 설비사고 분포

[표 1] 원인별 설비사고 유형 정리

### 2. 관련 연구

원인	구분	계	과부하	부식	수목접촉	무자격자 조작	정격전압불량	조수접촉	외부파급사고	기타접촉	절연불량	설계/시공불안전	작업자과실	화재	보호장치오동작	수해/수분	자연열화	진동/충격	풍우/빙설/뇌	염해/분진	고조파/전자파	기타
사고건수(건)		1,376	53	19	20	2	9	39	35	29	149	5	33	15	43	58	115	11	37	7	1	696
구성비(%)		100.0	3.9	1.4	1.5	0.1	0.7	2.8	2.5	2.1	10.8	0.4	2.4	1.1	3.1	4.2	8.4	0.8	2.7	0.5	0.1	50.6

## 2.1 전통적 점검 방식

전력설비 체결부 점검은 주로 육안 검사, 체결 토크 측정, 열화상 카메라 활용에 의존해 왔습니다. 그러나 패널 도어 내부(예: LBS 패널)의 협소 공간, 차단기 및 버스바 주변의 반사·차광 환경, 운전 중 접근 제한 등으로 인해 초기 미세 풀림의 조기 탐지에는 한계가 존재합니다. 특히 투시창내 촬영 환경에서는 시야각·난반사 영향으로 마킹의 정밀 판독이 어렵다는 보고가 있습니다.



[그림 2] 전통적방식의 문제점을 확인하기 위한 수배전시설

## 2.2 영상 인식 기반 연구 동향

최근 제조·전력 설비에서 객체 탐지와 포즈/각도 추정 기술이 결합 진단에 적용되고 있습니다. 특히 컬러 코딩된 버스바(예: R-S-T-N 구분) 및 체결부 토크 마킹을 활용하면 비접촉 방식으로 조립 상태를 정량화할 수 있어, 패널 내부 구조(차단기, 애자, 버스바 지지대)가 복잡한 환경에서도 확장성이 높다는 장점이 강조되고 있습니다. 다만 투시창 촬영 시 왜곡·반사, 내부 조명 차이, 마킹 페인트 열화 등 도메인 특이 변수가 성능에 영향을 미친다는 점이 추가 연구 과제로 남아 있습니다.

## 3. 연구 방법

### 3.1 볼트 마킹 방식

#### 3.1.1 적용 대상

LBS 패널 내부 버스바 지지대 및 연결부 체결 볼트, 차단기/애자 결합부 등 반복 진동·열팽창이 발생하는 주요 체결 지점을 대상으로 합니다. 첨부 사진에서와 같이 컬러 버스바(흑·적·청·백) 라인 상의 체결부는 시인성이 높고 고정 프레임이 용이하여 마킹 기반 모니터링에 적합합니다.

#### 3.1.2 마킹 규격

볼트 헤드와 인접 부재(브래킷 또는 버스바 표면)에 형광색 또는 반사색 단일 라인 마킹을 시행합니다. 초기 체결 직후 기준각을 설정하고, 마킹의 상대 각도 및 간격 변화를 추적합니다. 고휘도(형광 오렌지/옐로) 또는 반사 도료를 사용해 투시창越し 촬영과 내부 조명 변화에도 대비하며, 라인 폭·길이(예: 폭 2~3 mm, 길이 8~12 mm)를 표준화하여 모델 학습의 일관성을 확보합니다.

#### 3.1.3 개선 포인트(현장 반영)

투시창 반사·스크래치와 내부 조명으로 인한 대비 저하를 고려해, 마킹 색상은 버스바 색과 충분히 구분되도록 설정합니다(예: 적색 버스바에는 형광 옐로/라임, 청색에는 형광 오렌지). 또한 체결부 주변에 그리스·먼지 축적 가능성이 있어, 방오성 도료 또는 얇은 보호 코팅을 병행하여 장기 시인성을 유지합니다.

## 3.2 AI 인식 구조

### 3.2.1 입력 영상

고정형 CCTV 또는 패널 전면부에 설치 가능한 소형 카메라를 사용합니다. 사진과 같은 투시창越し 관측 환경을 기본 시나리오로 설정하며, 카메라-체결부 간 거리와 시야각을 고정해 기준 프레임 확보를 용이하게 합니다.

### 3.2.2 전처리

객체 탐지(예: YOLO 계열)를 통해 체결부 볼트와 마킹 후보를 검출합니다. 투시창 난반사 억제에 위해 편광 필터 사용과 함께, 영상 단계에서 반사 하이라이트 억제(밝기 클리핑 보정, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) 및 왜곡 보정을 적용합니다. 패널 내부 규격이 일정하므로, 레일/브래킷 구멍 패턴을 활용한 약식 기하 보정(원근 변환)으로 각도 추정 오차를 줄입니다.

### 3.2.3 특징 추출

검출된 영역에서 마킹 라인을 세그먼트화하고 기준각 대비 상대 회전각( $\Delta\theta$ )을 계산합니다. 라인 피팅 시 허프 변환 또는 러버스트 선형 회귀를 적용해 반사·노이즈에 대한 강건성을 확보합니다. 버스바 방향(수직/수평)의 기하 기준을 보조 피쳐로 활용하여 마킹-구조물 상대 각도 기반의 정규화를 수행합니다.

### 3.2.4 판별

$\Delta\theta$ 에 대한 임계값 기반 규칙과 학습 기반 분류를 결합합니다. 예를 들어  $\pm 3^\circ$ 를 1차 임계로 두되, 조도 저하·부분 가림이 있는 프레임에서는 신뢰도 가중치를 적용해 경보 지연 또는 재확인 로직을 실행합니다. 다중 볼트 동시 추적을 위해 ID 트래킹을 도입하고, 프레임 간 누적 변화량(누적  $\Delta\theta$ )과 변화 속도( $d\Delta\theta/dt$ )를 함께 모니터링하여 일시적 오탐을 줄입니다.

### 3.2.5 현장 특화 보정

투시창 환경: 유리 반사 패턴을 백그라운드 모델로 학습해 반사 성분을 제거하고, 편광 필터 각도 최적화를 통해 마킹 대비를 향상합니다.

색상 편차: 버스바 색상별 맞춤 색공간 변환(HSV/YCrCb)로 마킹 추출의 견고성을 확보합니다.

진동/셔터 블러: 짧은 노출 시간과 전자식 손떨림 보정 설정을 권장하며, 알고리즘 측면에서는 모션 블러 증강으로 강건성을 확보합니다.

## 4. 결론

본 연구는 수배전판넬 볼트 체결 상태를 AI로 감시하는 방법을 제안하였으며, 차후 조기 경고 체계로서 화재 및 감전사고 예방에 기여할 수 있음을 실증할 예정입니다.

## 참고문헌

- [1] 한국전기안전공사 2024년 전기재해통계분석
- [2] 강지호 “수배전반 열화진단 원격 모니터링 시스템 개발”  
2018년 제 49회 대한전기학회 학술대회 pp. 1307~1308