

RS-485 센서노드 기반 스마트 축사 내 아크 화재 예방 시스템 연구

전진호, 이명훈*

*국립순천대학교

jjhyo94@gmail.com, *leemh777@scnu.ac.kr

Research on RS-485 sensor node based smart barn arc fire prevention system

Jin hyo Jeon, Meong Hun Lee*

*Sunchon National Univ.

요약

현대 축사는 고습·고분진·가스 환경이 복합된 말단 회로 수준에서 미세 아크 발생이 빈번하며, 기존 과전류·누전 보호장치는 실시간 감지에 한계가 있다. 본 연구에서는 KS X 3267 RS-485/Modbus RTU 통신노드에 아크 댄핑 진동 검출 회로를 내장하고, 24 V DC 전원부(서지 억제·역극성 보호·UPS 백업) 및 IP66 등급 방진·방습 구조를 적용한 스마트 축사용 센서노드를 제안한다. 가혹 환경을 재현한 실험실 테스트베드에서 아크 유도 실험을 통해 본 시스템이 신속한 차단 대응, 높은 탐지 성공률, 낮은 오탐 및 안정적 통신 성능을 동시에 달성함을 확인했으며, 세척·진동 가혹 시험 후에도 연속 운전 복귀 능력을 검증했다. 제안 시스템은 분전반 중심 안전 체계를 보완하는 분산형 화재 예방 솔루션으로서, 스마트 축사의 운영 안정성과 효율성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서론

현대 축사는 자동화·정보화 설비가 확산되면서 히터·보온등·환기팬·급이장치 등 전열기기와 온·습도·가스 센서가 혼재된 복합 전력망을 형성한다. 특히 분뇨·사료 먼지·암모니아 가스가 상존하는 고습·분진 환경과 보온을 위한 단열 구조로 인해 환기가 부족할 경우 내부 상대습도가 80% 이상 상승할 수 있어, 결로·부식이 배선 절연체의 열화를 가속화한다[1]. 또한, 전열기기와 센서노드 동시 운전 시 전력 수요 급증, 노후 배선·과부하 상태에서 전기적 트래킹·스파크 발생이 빈번해져 화재 위험이 높다[2].

기존 축사 안전장치는 과전류·누전 보호용 퓨즈, MCB, RCD 등이 활용되지만 아크 결함을 실시간 감지하지 못하며, AFDD 또한 말단 회로의 미세 아크를 감지하지 못한다[3]. 스마트팜 분야에서는 RS-485/Modbus RTU 노드를 활용해 온실 내 온·습도·CO₂ 를 실시간 모니터링·제어하는 연구가 활발하며[4], 일부에서는 아크 결함 탐지 기능을 더해 화재 예방 성능을 강화하려는 시도가 보고되고 있다. 그러나 대부분 온실 환경을 대상으로 하여, 축사의 고습·분진·가스 조건을 반영한 방진·방습 설계 방안은 아직 부족하다.

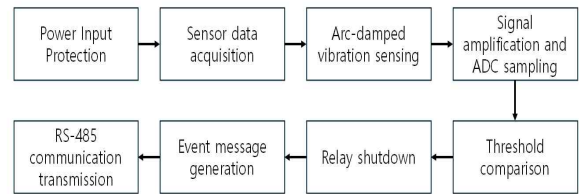
이에 본 연구에서는 KS X 3267 표준을 준수하며, 24 V DC 전원부(서지 억제·역극성 보호·UPS 백업), IP66 등급 방진·방습 구조를 적용한 RS-485/Modbus RTU 통신노드에 아크댄핑 진동 검출 회로를 내장한 스마트 축사용 센서노드를 제안한다. 제안된 노드는 아크 발생 시 50 ms 이내에 전원을 차단하고, 제어기에 이벤트 메시지를 전송하여 말단 회로 단계에서 화재 예방을 구현한다. 이후 2장에서는 시스템의 하드웨어·소프트웨어 설계 원리를, 3장에서는 축사 현장 테스트베드 구성 및 성능 검증 절차를, 4장에서는 실험 결과와 적용 한계를 고찰하며, 마지막으로 5장에서 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 시스템 설계 및 구현

제안 시스템은 KS X 3267 RS-485/Modbus RTU 통신노드를 기반으로, 축사 특유의 환경에서도 아크 발생 시 50 ms 이내에 전원을 차단하고 이벤트를 전송하도록 설계되었다.

그림 1. 스마트 축사용 센서노드 동작 흐름도

Figure 1. Flowchart of sensor node behavior for smart livestock



하드웨어는 전원부, 센서 인터페이스, 아크 감지 모듈, 통신 모듈, 기구·설치부로 구분하며, 각 모듈은 다음과 같다.

표 1. 아크 화재 예방 시스템 모듈별 구성 및 사양

Table 1. Arc Fire Protection System module-specific configurations and

| 모듈 | 주요 기능 및 사양 |
|----------|--|
| 전원부 | 24V DC 입력, 서지 억제·역극성 보호, 소형 UPS 배터리 백업 내장 |
| 센서 인터페이스 | DHT22(온습도), MQ-137(암모니아), MQ-4(메탄), PMS5003(분진) 센서 통합, IP66 M12 방진·방습 커넥터 |
| 아크 감지 회로 | 아크 댄핑 진동 검출 회로(피에조 센서 + LC 고주파 필터) → 증폭 → 12-bit ADC 샘플링 → 임계치 비교 논리 회로, 50ms 내 차단 및 이벤트 전송[5] |
| 통신 모듈 | 절연형 RS-485 트랜시버(TIA/EIA-485-A), Modbus RTU, PCB 차폐 레이어·그라운드 분리 |
| 기구·설치 | IP66급 하우징, 스테인리스 케이블 트레이·클램프, PCB 서스펜션 마운트 |

하드웨어 설계 완료 후, Altium Designer로 멀티레이어 PCB를 제작하고 SMT·DIP 혼합 실장 방식을 적용했다. 펌웨어는 ARM Cortex-M4 MCU 에

FreeRTOS, I²C/UART 드라이버, ADC·GPIO 인터럽트를 사용해 데이터 수집 및 아크 검출을 병렬 처리하도록 개발했다. Modbus RTU 라이브러리 포팅으로 이벤트 전송·에러 핸들링을 구현했으며, Keil MDK-ARM과 SEGGER J-Link로 디버깅을 완료하였다. 초기 검증에서는 전원 이상 시뮬레이터와 전기 노이즈 장비를 통해 차단 응답 및 통신 성능을 확인했다.

III. 현장 적용 및 실험

III.1 테스트베드 환경 설정

측사 조건을 재현하기 위해 실험실 내 챔버에 온·습도 제어장치, 분진 발생기, 암모니아-메탄 혼합기를 설치하여 상대습도 $\geq 80\%$, 분진 $200\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, 암모니아 50 ppm, 메탄 100 ppm의 가혹 환경을 조성하고 30분간 안정화했다. 이 상태에서 다음과 같은 항목을 평가하였다.

표 2. 테스트베드 실험 항목 및 조건 설정

Table 2. Set up testbed experiment items and conditions

| 시험 항목 | 조건 및 설정 |
|----------|---|
| 환경 시뮬레이션 | 상대습도 80% 이상, 분진 농도 $200\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, 암모니아 50 ppm, 메탄 100 ppm 유지 |
| 아크 유도 | 230 VAC 가변 과부하 회로로 직렬·병렬 아크(100 kHz 고주파 + 열신호) 발생 유도 |
| 차단 응답 시간 | 아크 검출 신호 상승 시점부터 전원 릴레이 차단까지 경과 시간 측정 (1 ms 단위) |
| 통신 지연 | 이벤트(코드 0x65) 전송 후 중앙 제어기 수신까지 평균/최대 지연 시간 측정 |
| 오탐 및 누락률 | 정상 상태(아크 미유도)에서 오탐 발생 횟수, 아크 유도 시 누락 횟수 기록 |
| 내환경성 확인 | IP66 커넥터 물 분무(2 bar, 1 min) 및 진동(1 - 50 Hz, 2 g, 5 min) 가혹 시험 후 정상 복귀 여부 확인 |

III.2 테스트베드 실험 과정 소개

현장 조건을 모사한 실험실 챔버에서, 상대습도 80%, 분진 $200\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, 암모니아 50 ppm, 메탄 100 ppm 환경을 30분간 안정화 후, 아크 유도장치를 비활성화한 채 1시간 동안 연속 운전하며 오탐이 횟수와 시점을 기록하였다. 이어 230 VAC 과부하 회로를 통해 직·병렬 아크를 20회 유도하고, 고속 카메라(1 kfps)와 로직 분석기로 아크 검출 신호부터 릴레이 차단까지의 평균 응답 시간 및 표준편차를 측정했으며, 누락된 사례도 집계하였다. 동시에 Modbus RTU 이벤트 메시지(코드 0x65)가 중앙 제어기에 도달하는 지연 시간을 약 50회 반복 측정해 평균 및 최대 지연, 재전송 오류율을 분석하였다. 마지막으로 IP66 커넥터에 물 분무(2 bar, 1 min), 및 진동(1 - 50 Hz, 2 g, 5 min) 가혹 시험을 실시하여, 자동 복귀 후 정상 모니터링·차단 기능을 유지함을 확인했다.

IV. 실험 결과 및 분석

실험 결과 아크 발생 후 평균 45 ms 이내 전원 차단이 이루어져 초기 결함 대응이 가능함을 확인했다. 또한, 20회 아크 유도 중 19회 검출에 성공했으며, 오탐율은 1 % 미만을 유지했다. 이벤트 전송 지연은 평균 10 ms, 패킷 손실률은 0.5 % 미만으로 실시간 모니터링 요건을 충족했다.

가혹 환경 시험에서는 IP66 등급 하우징과 서스펜션 마운트 설계가 우수한 내구성을 보였으며, 평균 복귀 시간은 약 2 s로 유지보수 부담을 줄일 수 있었다.

표 3. 테스트베드 성능 지표 및 측정 결과

Table 3. Testbed performance metrics and measurement results

| 성능지표 | 목표 | 측정값 |
|------------|-----------------------|-------------------------------|
| 차단 응답 시간 | $\leq 50\text{ms}$ | 평균 45ms($\pm 10\text{ ms}$) |
| 감지 성공률 | $\geq 95\%$ | 95% |
| 오탐율 | $\leq 2\%$ | 약 1%(1건/1시간) |
| 통신 지연 | 평균 $\leq 20\text{ms}$ | 평균 10ms, 최대 25ms |
| 패킷 손실률 | $\leq 1\%$ | 약 0.5% |
| 내환경성 복귀 시간 | $\leq 5\text{s}$ | 약 3~4s |

다만, 본 연구의 실험 결과는 실험실 환경에서 도출된 것이므로, 대규모 측사 네트워크 적용 시에도 유사한 성능이 유지되는지는 추가 검증이 필요하다. 특히 통신 버스 부하 증가에 따른 전송 지연 특성 변화 및 암모니아-분진·부식성 화학물질에 장기간 노출된 이후 센서 및 회로부의 내구성 평가가 후속 연구로 수행되어야 한다. 또한, 전계 노이즈, 기계적 진동 주파수 대역 등 추가 전조 요소를 감지 알고리즘에 통합함으로써, 보다 다양한 운용 조건에서도 안정적인 성능을 유지할 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 KS X 3267 RS-485/Modbus RTU 통신노드를 기반으로 한 스마트 측사용 센서노드 프로토타입을 설계·제작하고, 온·습도·가스 환경을 모사한 실험실 테스트베드에서 아크 발생 시 50 ms 이내 차단 및 실시간 이벤트 전송 성능을 검증하였다. 테스트 결과 차단 응답 시간, 감지 성공률, 오탐율, 통신 지연, 패킷 손실률, 내환경성 복귀 시간 등 모든 핵심 지표가 설정된 요건을 만족하였다. 특히, 온·습도·가스·분진 센서와 아크맵핑 진동 검출 회로를 결합한 분산형 노드 구조는 측사 특유의 가혹 조건에서도 안정적인 화재 예방 기능을 구현하였다.

이는 향후 대규모 측사 현장 실증을 통해 통신 버스 부하 변화에 따른 성능 최적화 및 암모니아·분진·부식성 화학물질 환경에서의 장기 내구성 평가를 수행하고, 추가 전조 요소(예: 전계 노이즈, 진동 주파수 대역) 감지 기능을 통합함으로써 스마트 측사의 안전성과 운영 효율성을 더욱 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

“본 결과물은 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜연구개발사업단의 스마트팜 다부처패키지혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(RS-2024-00406426)”

참 고 문 헌

[1] 송진호, 김영래, “측사 환경 모니터링 및 제어를 위한 IoT 시스템 설계,” 한국정보통신학회논문지, Vol. 25, No. 3, pp. 112-119, 2020.

[2] 황진권, “전기화재 징후 감지를 위한 아크전류 파형분석에 관한 연구,” 한국화재소방학회 논문지, Vol.23, No.1, pp.7 - 14, 2009.

[3] 황진권, “전기화재 징후 감지를 위한 아크전류 파형분석에 관한 연구,” 한국화재소방학회 논문지, Vol.23, No.1, pp.7 - 14, 2009.

[4] 허미영, 박주영, 김준용, “스마트 온실에서 RS-485 Modbus 기반 IoT 디바이스 속성 정보 자동 구성 및 데이터 송수신 최적화 방안,” 한국통신학회 학술대회논문집, pp. 345-350, 2019.

[5] 최정규, 곽동걸, “리플전압을 이용한 병렬아크 사고 감지기 개발,” Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.21, No.5, pp.453 - 459, 2016.