[붙임 1]

기술수요조사서 (과제제안)

연구개발 과제명	직류철도 급전장애 신속복구를 위한 고장위치 표정 시스템 개발

□ 제안기관

기관명	김포골드라인SRS		우선순위	상(○) 중( ) 하( )
제 안 담당자	부서	전기팀	직위	팀장
	성명	김재만	연락처	휴대폰 : 010-5229-2332 e-mail : maniiman@gimpogoldline.com
활용 예정 부서	부서	전기팀	직위	팀장
	성명	김재만	연락처	휴대폰 : 010-5229-2332 e-mail : maniiman@gimpogoldline.com

□ 제안과제

구 분	내 용
1. 연구개발 필요성	○ **적용 설비 및 운영환경** • 김포골드라인은 총연장 23.6 km 전 구간이 지하인 노선으로, 직류 750 V, 제3 궤조 하면접촉 및 주행레일 귀환방식을 적용하고 있음 • 특히 고촌~김포공항 구간은 약 5.6 km의 <u>긴 터널과 한강 아래 60~80 m 깊이 구간을 지나므로, 급전장애가 나면 현장에 접근하고 고장 지점을 찾는 데 많은 시간과 인력이 듦</u> • 따라서 고장이 나면 직원이 현장을 돌아보기 전에 <u>고장 구간과 위치를 빠르게 계산해 표출해 주는 기술이 필요</u>함

구 분	내 용

표 1. 제안기관 급전설비 및 운영환경 현황

구분	현황
노선 연장	23.6 km (전 구간 지하)
급전방식	DC 750 V 제3궤조 하면접촉 · 주행레일 귀환
변전소	8개소(변전소당 피더 4개)
한전 수전점	4곳(양촌 차량기지·김포공항·풍무·장기)
장대터널	고촌~김포공항 5.6 km, 도보 접근·탐색 최난 구간
하저 구간	한강 지하 60~80 m 통과 · 습도 높음
운행 편성	29개 편성 → 34개 편성 증차 예정 (실운행 26대 → 30~31대로 증가)
운행 시격	증차 완료 시 2분 10초대로 단축 예정
유지관리 인력	야간 근무 2명, 변전실 점검 외 선로 도보 점검 불가

❍ 현재 발생하는 문제와 영향

- 직류 급전계통에 단락·지락 고장이 나면 보호계전기와 고속도차단기(HSCB)가 해당 구간의 전기를 자동으로 끊음. 그러나 설비가 하는 일은 여기까지이며, 고장 지점은 사람이 직접 찾아야 함

  ※ (현재 대응 순서) 근무자가 변전실로 먼저 출동 → 계전기 동작 기록 확인 → 고장 추정 구간을 걸어서 순회 → 눈으로 고장 지점 확인

- 현행 방식으로는 다음과 같은 문제가 생김

1) 초기 대응 지연

– 고장 위치를 모르기 때문에 일단 변전실로 출동해야 하므로 초기 대응이 늦어짐

– 경험이 적은 근무자가 다른 변전실로 잘못 출동한 사례가 있음(풍무~김포공항 구간 고장 때 풍무 변전실로 출동해 대응이 늦어짐)

– 야간 근무자가 2명뿐이어서 변전실 점검과 선로 순회를 동시에 하기 어려운 여건임.

2) 안전 문제

– 고장 위치를 모른 채 작업자가 본선에 들어가 찾아야 하므로 감전·야간 작업·장대터널 위험에 그대로 노출됨

– 고촌~김포공항 5.6 km 구간은 걸어서 접근하기조차 어려워 찾는 시간과 위험이 함께 커짐

3) 운영 문제 — 급전 재개 시점이 위치 확인에 종속

– 위치를 모르면 고장이 없는 구간까지 정전 상태로 두어야 하므로 운행 재개가 늦어짐

– 증차·배차간격 단축이 예정되어 한 구간을 동시에 달리는 열차가 늘어나므로, 위치 확인 지연에 따른 영향받는 열차도 많아질 예정임.

구 분	내 용

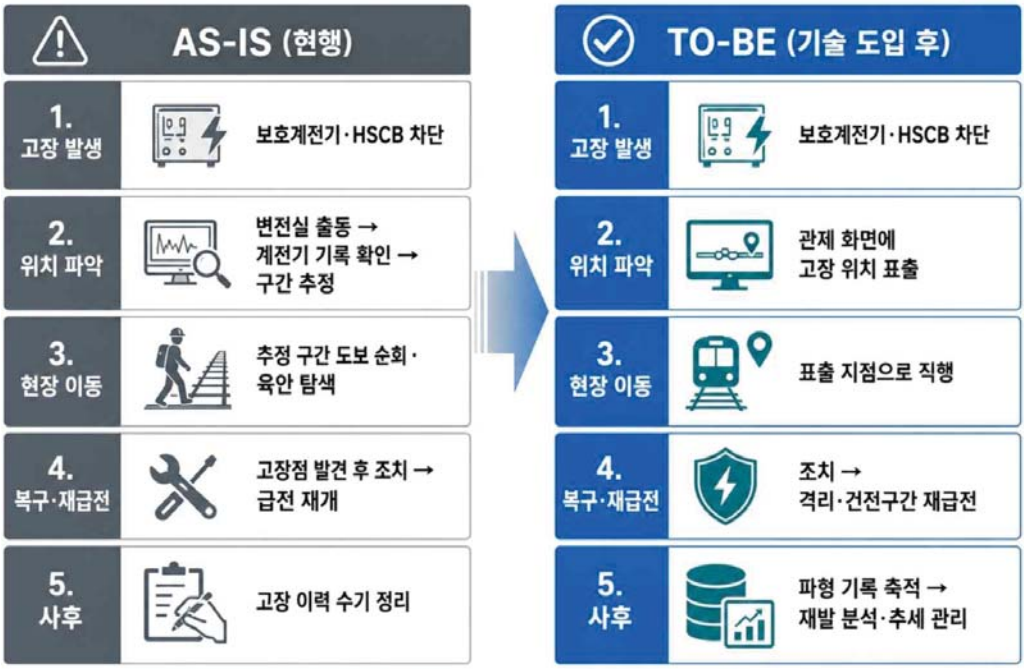


그림 1. 현행 대응과 개선 후 대응의 비교

❍ 문제의 시급성 및 근거

1. 제안기관의 최근 3년 급전계통 고장 실적

- 최근 3년(2023~2025년) 운영자료 기준으로 급전계통 보호계전기 동작은 총 9건임. <u>고장 후 실제 위치를 찾기까지 평균 180 분, 전기를 다시 넣기까지 평균 60 분이 소요되었으며, 고장 위치를 찾는 데 건당 평균 7 명이 240 분 투입</u>됨

2. 급전 장애 한 건이 노선 운행 중단으로 번진 사례

- <u>국내 직류 도시철도·경전철에서 전력 공급 장애 한 건으로 운행이 멈춘 뒤 정상화까지 수 시간에서 하루 가까이 걸린 사례가 반복</u>되고 있음. 2026년 9월 대구도시철도 3호선은 사고 지점을 찾는 데만 3시간여가 걸린 것으로 보도됨

표 2. 국내 직류 급전 노선의 전력 공급 장애에 따른 운행 중단 사례

일시	노선	중단~정상화	출처
2013.08.15	서울 지하철 7호선	06:15 발생 → 08:08 복구(약 2시간)	이투데이 2013.08.15
2017.12.25	우이신설선 (경전철)	05:54 사고 열차 정지 → 06:20 전 열차 중단 → 14:00 구간 나눠 부분 운행 → 익일 05:30 첫차 정상화	서울신문 2017.12.26
2019.04.18	서울 지하철 5호선	10:58 단전 → 오후 1시께까지 2시간 넘게 정상 운행 차질	한국일보 2019.04.18
2019.10.02	서울 지하철	18:57 발생	이투데이

구 분	내 용

	7호선	→ 20:17 복구(약 1시간 20분)	2019.10.02
2026.09.07	대구 도시철도 3호선	19:38 단전 → 20:10 일부 구간 운행 → 익일 00:43 긴급 복구 → 05:30 첫차 정상화	대구일보 2026.09.08
2026.09.14	서울 지하철 2호선	11:51 정전 → 12:20 운행 재개(약 29분)	파이낸셜 뉴스 2026.09.14

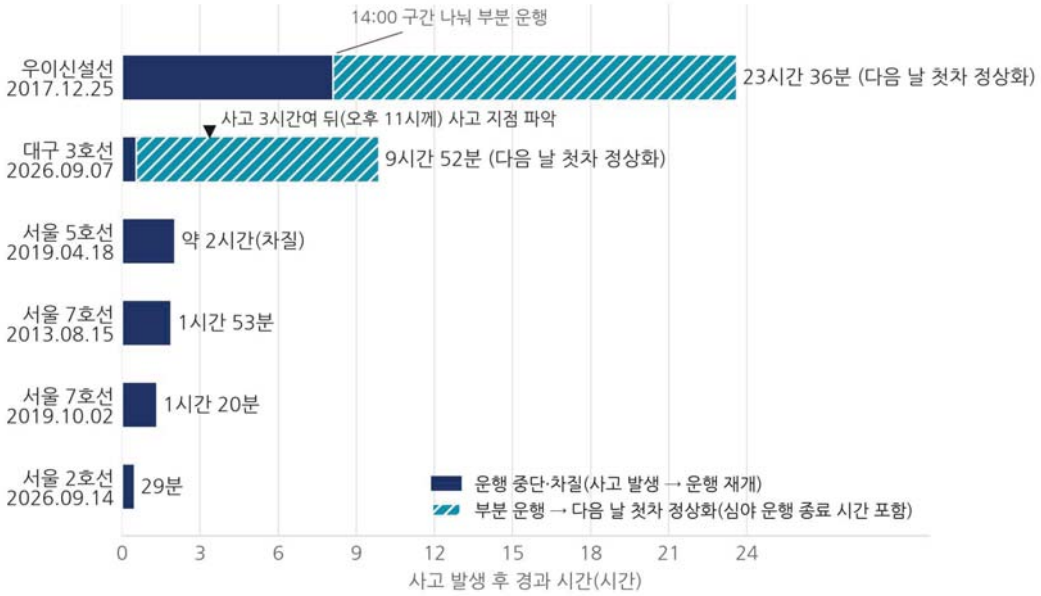


그림 2. 국내 급전 장애 사고 발생부터 정상 운행까지 걸린 시간

그림 3. 급전 장애 사고 현장 (언론 보도·조사보고서 사진)

① 대구 도시철도 3호선 수성못역 운행 중단 안내문(2026.09.07, 서울신문)

② 우이신설선 단전 사고 당일 솔샘역 선로의 관계자들(2017.12.25, 연합뉴스)

③ 서울 지하철 5호선 단전으로 운행된 특별수송차량(2019.04.18, 연합뉴스)

- 해외에서도 급전 장애로 수 시간 운행이 멈춘 사례가 있음. 사고 조사기관은 ‘고장 케이블을 분리하지 못한 채 복구를 시도한 점’과 ‘터널 안 고장 지점을 알아낼 수단이 없었던 점’을 문제로 지적함

구 분	내 용

표 3. 해외 도시철도 급전(견인 전력) 장애 사례와 공식 발표 금액·조치

일시	도시·노선	내용	중단·영향	공식 발표 금액·조치
2005.04.07	미국 뉴욕 지하철	144번가 변전소 직류 600 V 차단기 단락·폭발 화재(정비 중)	열차 4편 역 밖 정지, 승객 약 720명 선로 대피·열차 간 이동 등	US$2,500만 (변전소 복구 추정비)
2011.12.15 2011.12.17	싱가포르 MRT 남북선	열차가 전력을 잃고 정지, 승객이 어두운 터널을 걸어 다음 역으로 이동	2건: 5시간 (12.7만 명) 7시간 (9.4만 명)	S$200만 (2건 벌금 합계, 건당 법정 최고액)
2015.01.12	미국 워싱턴 WMATA	제3궤조 급전 케이블 아크로 터널 연기 발생	사망 1명 부상 91명	US$12만 (초기 추정 피해액)
2015.07.07	싱가포르 MRT 남북·동서선	터널 누수로 제3궤조 애자 절연이 약해져 전원 트립, 두 노선 전체 중단	2시간 이상 (41.3만 명)	S$540만 (벌금 부과)
2020.10.14	싱가포르 MRT 남북·동서선, 순환선	급전용 22 kV 케이블 단락. 고장 케이블을 격리하지 못한 채 복구를 시도하다 인접 순환선까지 정전	216분 (약 11만 명) 69분 (약 1.3만 명)	22 kV 케이블 약 150 km 교체 계획
2025.05.22	홍콩 MTR 장군오선	견인 전력 공급 계통 고장, 터널 안 가공 전차선 고장	17:14 중단 → 22:33 완전 복구 (약 5시간)	HK$1,920만 (서비스 이행 리베이트)

3. 운행 중단의 경제적 피해

- 국내에서는 피해 금액이 공개된 사례가 확인되지 않았지만, 해외에서는 운영사 벌금·승객 환불·설비 복구비가 공식 발표됨
- 운행이 멈추면 열차를 타려던 승객의 시간이 그만큼 손실됨. 이용객 수를 확인할 수 있는 국내 두 사례에 수도권 철도 승객의 시간가치(1인·1시간당 10,489원, 한국교통연구원)를 적용하면, **서울 2호선(20~29분 중단)은 약 1.8억~3.1억 원, 우이신설선(약 7시간 40분 전면 중단 후 부분 운행)은 이용객이 2호선의 4% 수준인데도 약 2.6억~5.1억 원의 승객 시간 손실로 환산**됨
- 위치 확인이 빨라지는 등의 개선으로 **2호선 중단시간이 29분에서 19분으로 10분 줄어든다고 가정하면 승객 시간손실이 약 1.3억 원(지연 가중 시 약 4.0억 원) 줄어들 수 있음**.

표 4. 운행 중단 사례별 가정별 승객 시간손실 환산 예시

항목	서울 지하철 2호선 (2026.09.14)	우이신설선 (2017.12.25)	근거
일평균 이용객	1,988,000명	72,115명	2호선: 서울교통공사 2025년 수송실적 / 우이신설선: 사고 전달(2017

구 분	내 용

			년 11월) 하루 평균 (서울신문 2017.12.25)
중단 시간	20분 ~ 29분	전면 460분 + 부분 운행 약 630분	전면 중단 시간은 언론 보도의 발생·재개 시각 기준 전 노선 중단으로, 우이신설선 14:00 이후는 부분 운행(운행 종료 24:30)으로 따로 가정
중단 중 새로 타려던 승객	약 3.5만 ~ 5.1만 명	약 2.9만 명	일평균 × 중단시간 ÷ 하루 운행시간(약 19시간)
열차 안 승객	약 3.5만 명	40여 명 (26분 갇힘)	2호선: 일평균 × 평균 승차시간(20분 가정) ÷ 하루 운행시간/ 우이신설선: 서울신문 2017.12.25 보도
부분 운행 시간대 승객	—	약 4.0만 명	일평균 × 부분 운행시간 ÷ 하루 운행시간. 솔샘~신설동은 1개 편성이 1개 선로를 왕복(서울신문 2017.12.25)
1인당 손실시간	새 승객: 중단시간의 1/2 열차 안: 중단시간 전부	중단 중: 30~60분 부분 운행: 15~30분	우이신설선 중단 중 승객은 대체 교통으로 옮겨 간다고 보고 30~60분
환산 ① 기본	약 1.8억 ~ 3.1억 원	약 2.6억 ~ 5.1억 원	승객 × 1인당 손실시간 × 시간가치 10,489원/인·시(한국교통연구원 「2023년 국가교통조사」 수도권 철도, 2022년 기준)
환산 ② 지연 가중	약 5.5억 ~ 9.2억 원	약 7.7억 ~ 15.4억 원	① × 지연시간 가중치 3 — 참고용 민감도(영국 철도업계 수요예측 편람 PDFH 2009년판의 평균 지각시간 가중치, Wardman·Batley 2014 재인용)

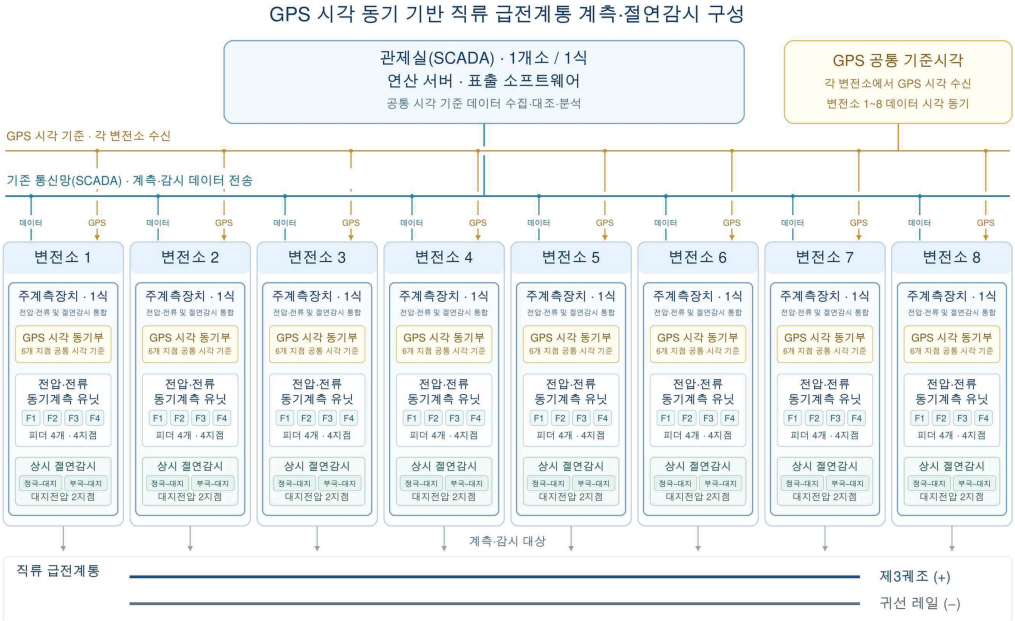
○ 대안과 기존 기술·제품의 한계

- 고장 위치 확인을 앞당기기 위해 검토할 수 있는 대안은 아래와 같음. 그러나 모두 고장 위치를 계산하지 못하거나 제안기관 계통에 적용할 수 없어 연구개발이 필요함

표 5. 대안별 검토 결과

대안	한계	판단
순회점검 인력·주기 강화	야간 근무 2명 체계에서 선로 도보 점검 병행 불가, 장대터널 5.6 km 도보 접근 곤란 — 위치 미상 상태의 본선 진입 위험은 그대로 남음	근본 해결 아님
기존 보호계전기·고속도차단기 활용	고속도차단기는 과전류·전류변화율(di/dt)로 구간 차단만 수행하며 고장 거리를 산출하지 않음	위치 정보 산출 불가
상용 표정장치 구매	국내 상용 고장점표정장치는 교류(AT급전) 전기철도용이며, 국내 직류 도시철도 환경에 적용 가능한 양산형 직류 고장위치 표정장치는 확인되지 않음	조사 범위 내 구매 조달 곤란
교류 급전용 표정 기법 전용	직류 급전계통은 선로 임피던스가 작고 부하전류가 크며 아크저항·레일 누설이 개입하여 교류 급전용 임피던스-거리 표정 기법을 직접 적용할 수 없음	적용 불가
급전 구간 세분화(개폐 설비 추가)	구간을 나누어도 구간 안의 고장 지점은 순회로 찾아야 하며, 설비 증설 공사가 필요함	근본 해결 아님

구 분	내 용
	○ **연구과제로 개발해야 하는 이유(공동연구 필요성)** • (연구개발 필요 이유) 직류 급전계통은 선로 임피던스(저항 성분)가 작고 부하전류가 크며, 아크저항·레일누설의 영향을 받음. 그래서 교류 철도에서 쓰는 '임피던스로 거리를 계산하는 방식'을 그대로 쓸 수 없음. 국내 계통에서 직접 측정하고 실증해야 하므로 기성품 구매가 아닌 연구개발이 필요함 • 이 문제는 기성품 구매로도, 제안기관(김포골드라인SRS) 혼자서도 해결할 수 없음. 따라서 한국철도기술연구원과의 공동연구로 해결하고자 함 – 제안기관은 급전계통을 운영·유지관리하는 기관으로, 고장 위치 계산 알고리즘을 설계·검증할 연구 인력·해석 도구·시험 설비가 없음 – 직류 제3궤조 계통에서 고저항 지락(저항을 거쳐 약하게 흐르는 지락)까지 검증된 양산 장치가 없어 구매로 조달할 수 없음 – 운행 중인 실제 계통에서는 고장을 마음대로 만들 수 없어 인공 고장시험 횟수와 조건이 크게 제한됨. 미리 모의해석(컴퓨터 시뮬레이션)으로 검증하지 않으면 적은 실증 기회만으로 성능을 확인하기 어려움 – 본 수요는 공고 유형1 지원내용 「철도 시설·운영기관이 운영·유지관리를 위해 구매하는 독점 수입품 등의 국산화 개발 및 기타 수요 기술·제품 개발」에 해당함. 국내 직류 도시철도에 쓸 수 있는 해외 양산품도 확인되지 않으므로, 국산화하면 제안기관이 유지관리 주체로서 직접 대응할 수 있음 ○ **기술개발의 시급성과 기관 내부 우선순위** 1. 증차·배차간격 단축으로 커지는 운행 영향 • 편성을 29개에서 34개로 늘릴 예정이며, <u>실제 운행 열차는 26대에서 30~31대로 증가 예정</u> • <u>증차 후 배차간격이 2분 10초대로 줄어</u> 변전소 사이 한 구간에 열차 7~8대가 동시에 다님 • 고촌~김포공항 5.6 km 터널 구간에는 열차 6대가 밀집 운행할 예정임 ※ 7~8대는 변전소 사이 구간 기준, 6대는 터널 구간 기준으로 집계 범위가 다름 • <u>동시에 달리는 열차가 많을수록 급전장애 한 번의 영향이 커지므로, 위치 확인이 늦어지면 곧 여러 열차의 지연으로 이어짐</u> 2. 철도안전관리체계 강화 요구 • 중대시민재해 예방과 예방 중심 유지관리에 대한 요구가 커지고 있음 • 고장 위치를 모르는 상태로 작업자를 본선에 투입하지 않는 체계로 바꾸는 것은 안전관리 측면에서도 우선 과제임

구 분	내 용
	3. 기관 내부 우선순위 • <u>중차·배차간격 단축을 앞두고 '고장 위치를 바로 알려주는 체계' 확보를 기관의 우선 과제</u>로 정했으며, 본 과제를 그 해결 수단으로 판단함 • 본 기술수요는 제안기관 내부 우선순위 「상」으로 제안하며, 실증에 필요한 현장·자료·인력을 우선 지원할 계획임 • 결론적으로, 고장이 나면 현장 순회 전에 고장 구간과 위치를 빠르게 알려주어 탐색시간과 복구시간을 줄이고, 위치를 모른 채 본선에 들어가는 일을 최소화하는 직류철도 고장위치 표정기술이 필요함
2. 현장수요 및 확산 가능성	**○ 제안기관 내 적용대상과 예상 필요수량** • (적용대상) 본선 변전소 8개소 • (예상 필요수량) 변전소마다 여러 피더와 측정 개소를 한 장치로 통합 관리하면서 변전소당 시스템 1식, 최소 시스템 8식이 필요함(중앙설비 포함) – 각 변전소의 전압·전류 데이터를 GPS 시각으로 맞추는 기능 필요 – 측정 피더: 변전소당 4개 × 8개소 = 32개 – 상시 절연감시 포함 시 정·부극 대지전압 개소: 변전소당 2개 × 8개소 = 16개  그림 4. 전체 시스템 구성 표 6. 제안기관 적용대상 및 예상 필요수량 적용 대상 | 수량 | 설치 장치 | 산정 근거 변전소 | 8개소 / 8식 | 전압·전류 데이터 GPS 시간 동기 전압·전류 및 상시 정극·부극 대지전압 절연감시 유닛 | 변전소 개소별 1개 관제 | 1개소 / 1식 | (중앙설비) 연산 서버 · 표출 소프트웨어 | 중앙 집중 연산·표출 1식 기준

구 분	내 용

○ **반복구매·교체·확대 적용 가능성**

- (1단계 도입) 실증에 성공하면 본선 변전소 8개소 모두에 같은 사양을 적용함 → 노선 전체가 단일 사양이므로 반복 구매가 쉬움
- (예비품·교체) 계측장치·연산서버의 예비품 확보와 노후 교체 때마다 반복 수요가 생김 → 교체 주기·수량은 장치 수명 사양을 정한 뒤 산정
- (보호설비 개량 연계) 노후 보호계전기·고속도차단기를 개량할 때 고장위치 표정 기능을 함께 넣어 적용 범위를 넓히는 방안 검토
- (기능 확대) 상시 절연감시를 함께 쓰면 고장 전 단계의 절연 저하 추세까지 관리할 수 있어 절연감시 장치의 추가 도입 수요로 이어짐
- 반복·교체 수요의 구체적인 수량·시기는 제안기관 설비 개량 계획과 함께 확정

○ **유사한 수요가 예상되는 다른 철도기관·노선**

- 직류 급전을 쓰는 국내 도시철도·경전철 운영기관은 모두 고장 위치를 순회 점검으로 찾고 있어 같은 문제를 안고 있음. 급전 변전소 수량만 약 248개소 임.
- 특히 DC 750 V 제3궤조 방식 노선은 제안기관과 설비 조건이 가장 비슷한 수요처임

표 7. 유사 수요가 예상되는 국내 직류 급전 노선군

구분	대상	제안기관과의 공통점
동일 조건	DC 750 V 제3궤조 경전철 노선	급전방식·전압·귀환 방식 동일 → 알고리즘·장치 사양 직접 적용
유사 조건	DC 1,500 V 가공전차선 도시철도	직류 급전·순회점검 의존 구조 동일 → 알고리즘·장치 사양 변경 적용
파급 조건	직류 급전 신규 노선	설계 단계부터 표정 설비 반영 가능

표 8. 국내 예상 시장 상세

운영기관	노선	급전전압·방식	급전 변전소 개수
서울교통공사	1~8호선	DC 1,500 V 가공전차선·강체가선	97
서울시메트로9호선	9호선	DC 1,500 V 가공전차선	7
우이신설경전철	우이신설선	DC 750 V	5
남서울경전철	신림선	DC 750 V	3
부산교통공사	1~3호선	DC 1,500 V 가공전차선·강체가선	30
부산교통공사	4호선	DC 750 V 제3궤조	4
부산김해경전철	부산김해선	DC 750 V	8

구 분	내 용

대구교통공사	1~3호선	DC 1,500 V	29
인천교통공사	1호선 / 2호선	DC 1,500 V 가공전차선 / DC 750 V	24
광주교통공사	1호선	DC 1,500 V 가공전차선·강체가선	8
대전교통공사	1호선	DC 1,500 V 가공강체가선	7
김포골드라인SRS	김포골드라인	DC 750 V 제3궤조 하면접촉	8
용인에버라인	에버라인	DC 750 V 제3궤조	11
의정부경전철	의정부선	DC 750 V 제3궤조	7
합계			**248**

표 9. 추가 신설 노선(예상 시장)

노선	형식·급전	단계
서울 서부선	고무차륜 AGT · 새절~서울대입구 15.6 km 16개 역	2026년 착공 목표
서울 동북선	철제차륜 AGT	공사 중
서울 위례선	노면전차	공사 중
양산 도시철도	DC 750 V 제3궤조 집전식	건설 중 · 2026년 12월 개통 예정

○ 시장규모와 비용 절감 효과

- (국내 시장규모) 위 표의 국내 직류 급전 변전소 <u>248개소에 목표가격을 적용</u>하면, <u>고장위치 표정 기능만으로 약 155억 원 규모로 추정됨. 상시 절연감시 기능까지 추가할 경우, 약 310억 규모로 추정</u>됨.

표 10. 국내 시장규모 추정

구분	산정식	규모
고장위치 표정 기능	변전소 248개소 × (8개소 일괄 약 5억 원 ÷ 8개소)	약 155억
고장위치 표정 기능 + 상시절연감시 기능	변전소 248개소 × (8개소 일괄 약 10억 원 ÷ 8개소)	약 310억

※ 제안기관의 사례인 변전소 8개소와 중앙 연산·표출 설비를 함께 구성할 때 약 5억 원이 소요됨에 따라, 변전소 1개소당 금액으로 나누어 적용함(중앙 설비 포함)

- **(비용 절감 효과)** 하기 기대효과 산정표에 따라 고장 위치 확인 시간이 줄면 복구시간·열차 지연·순회 인력·불필요한 급전 차단이 함께 줄어 비용이 절감됨.
- <u>제안기관에 적용할 경우</u>, 위치 확인이 빨라지는 등의 개선으로 중단시간이 60분

<table>
<tr><th>구 분</th><th>내 용</th></tr>
<tr><td></td><td>

에서 20분으로 줄어든다고 가정하면 승객 시간손실이 연간 약 3억 원(지연 가중 반영) 줄어들 수 있음. 또한 표출시간 1분, 순회 투입인원 2명(1시간 소요)로 개선시, 연간 약 1억원의 효과가 있음. 즉, <u>승객시간 손실 감소와과 순회인력 절감에 따른 비용절감효과는 연간 약 4억원에 이르는 수준임.</u>

표 11. 기대효과 산정

효과 항목	산정식
복구시간 단축	(현행 위치확인 시간 − 표출 시간) × 연간 고장 건수
열차 지연 손실 절감	단축 시간 × 지연 편성 수 × 지연 비용 단가
순회 인력 절감	(현행 순회 시간 − 직행 시간) × 투입 인력 × 인건비 단가
불필요 급전차단 축소	오판단 건수 × 평균 정전 범위 × 영향 편성 수

○ 기술 도입에 따른 안전성 향상·비용 절감 등 기대효과

- **(기술)** 직류 급전계통 고장 위치를 실시간으로 표시하는 기술 확보 · 고장 구간 자동 판별로 장애 대응 신뢰성 향상 · 보호설비 디지털화와 스마트 유지관리 기반 마련 · 국내 철도환경에 맞는 기술 국산화 · 향후 AI 기반 예지보전(절연 저하 추세 감시)으로 확장
- **(안전)** 작업자가 본선에 들어가기 전에 고장 위치를 알 수 있어 위치를 모른 채 걸어서 찾는 일이 줄어듦 · 야간 2명 근무 체제에서도 출동 범위를 좁혀 인력 부족에 대응 가능
- **(운영)** 위치 확인이 빨라진 만큼 복구시간(MTTR)과 운행 재개 시점이 앞당겨짐
  ※ 고장 구간만 정확히 끊어 정상 구간의 불필요한 정전을 피함
- **(경제)** 순회점검 인력·시간 절감 · 열차 지연·운행 중단에 따른 사회적 비용과 긴급복구 비용 절감 · 국산화로 국내 직류 운영기관 확대 적용 및 해외 진출 기반 마련

</td></tr>
<tr><td>3.
요구기술
및
적용조건</td><td>

○ 해결하고자 하는 문제와 필요한 기술·제품의 개요

- 제안기관은 <u>직류 급전계통에 고장이 나면 고장 위치와 우선 점검 구간을 빠르게 확인</u>하여, 현장 순회·탐색 시간을 줄이고 복구를 돕는 설비가 필요함
- 이를 위해 <u>여러 변전소를 같은 시각에 계측(다지점 동기계측)하고, AI로 고장을 분석하며, 절연 상태를 상시 감시하는 기능을 하나로 묶은 계측·감시 시스템을 도입</u>하고자 함
- <u>개발 설비는 기존 보호계전기·고속도차단기의 설정값·결선·동작 방식을 전혀 바꾸지 않는 '부가 설비</u>'로 만들어야 함
- 고장 차단은 지금처럼 기존 보호설비가 맡고, 개발 설비는 차단 전후 데이터를 분석해 고장 위치와 관련 정보를 알려주는 '사후 고장점 표정'을 수행함. <u>보호계전기가 동작하지 않는 약한 지락(고저항 지락) 의심 상황도 별도로 감시해 관제 화면에 표시</u>해야 함

</td></tr>
</table>

구 분	내 용

- AI·최적화 기법으로 고장 위치 후보 탐색·위치 추정, 고장과 정상 운전의 구분, 절연 이상 추세 분석을 수행함. 적용 기법은 모의·실측 데이터로 효과를 검증해 선정하며, 운영자에게 분석 결과와 함께 판정 상태와 신뢰도를 보여주어야 함

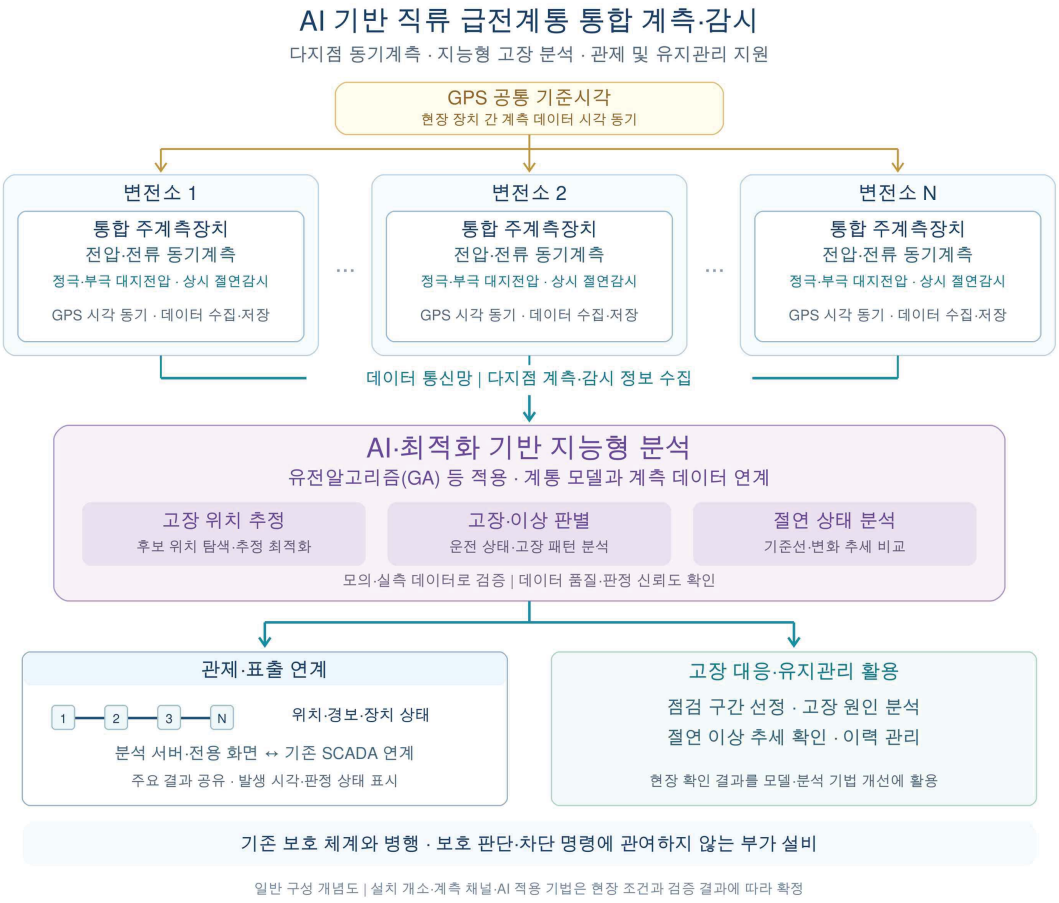


그림 5. 기술·제품의 개요

○ 필수 기능과 요구성능

1. 필요한 기능 요건

- 다음 기능을 갖추어야 함
  - 급전 단락과 지락(고저항 지락 포함) 고장 검출
  - 고장 지점의 거리·구간 정보, 고장 파형 기록, 표출 시각 제공
  - 상시 절연감시: 고장 전 단계의 절연 저하 추세를 감시해 예방 점검에 활용
  - 절연감시 데이터를 장기간 쌓아 분석할 중앙 서버 구성(변전소 계측 장치는 고장위치 표정 기능과 같이 사용)

2) 성능 요구조건

- 단락·지락 고장 위치를 실제 위치와 ±200 m 이내 오차로 계산하고, 고장 후 1분 이내에 관제 화면에 표시해야 함(차단기 동작 시각 기준. 보호계전기가 동작

구 분	내 용

하지 않는 이상 상황은 기준 시각을 협의해 정함). 고저항 지락의 검증 범위는 사전에 협의하며, 고장 구간·거리와 함께 추정 위치 앞뒤 각 200 m의 우선 점검 범위를 제공함

- 변전소 간 시각을 정확히 맞추고 계측 품질을 확보하며, 보호계전기가 동작한 모든 고장의 전후 파형을 빠짐없이 기록함
- 보호계전기가 동작하지 않은 이상 상황도 기록할 수 있도록 별도 검출 조건을 두고, 시각 동기 이상과 데이터 누락 여부를 확인할 수 있게 함
- 정·부극 대지전압과 장치·통신·시각 동기 상태를 상시 감시함. 분석 결과는 '위치 산정 성공 / 이상 의심 / 표정 불가 / 데이터 부족'으로 나누어 표시하고, 판정이 안 된 상태를 '정상'으로 표시하지 않도록 함
- 보호계전기·고속도차단기의 설정값·결선·동작 방식을 바꾸지 않고 설치·운영해야 함. 개발 설비는 보호 판단이나 차단 명령에 관여하지 않으며, 장치가 멈추거나 통신이 끊겨도 기존 보호·관제 기능에 영향이 없어야 함

표 12. 요구 성능(필수/권장)

구분	항목	제안기관 요구 수준
필수	단락 고장 표정 오차	실제 고장위치 대비 ±200 m 이내
필수	지락 고장 표정 오차	고저항 지락 포함 실제 고장위치 대비 ±200 m 이내 (고저항 지락의 검증 범위는 사전 협의)
필수	표출 시간	고장 발생 후 1분 이내 관제 표출 (차단기 동작 시각 기준 측정)
필수	표정 성공률	유효시험 최소 80% 이상 (유효시험 횟수는 협의하에 설정)
필수	고장 파형 기록	보호계전기 동작 건 전수 기록
필수	기존 설비 불간섭	보호계전기 정정·결선 변경 없이 설치 가능
필수	시각 동기	변전소 간 동기 오차의 표정 오차 기여분이 요구 오차 이내
권장	절연 열화 경보	점검 계획 수립 가능 수준의 사전 경보
권장	기록 보존	고장 이력 장기 보존 및 재분석 가능

○ 연구개발 목표(안)

1. 최종목표

- <u>DC 750 V 제3궤조 급전계통에서 단락·지락 고장 위치를 실제 위치 대비 ±200 m 이내로 계산</u>해 <u>고장 후 1분 이내에 관제에 표시</u>하고, <u>상시 절연감시 기능</u>을 포함한 고장위치 표정 시스템을 개발·현장 실증

2. 연구내용

구 분	내 용

– 1차년도:
  · 요구사항 정의
  · 계통 정수 측정
  · 상세 설계
  · 1차 시제품(주계측·절연감시·전위계측·서버) 제작
  · 공장 모의 고장시험

– 2차년도
  · 2차 현장 적용품 제작
  · 우선 적용 3개소 설치
  · 현장 실증(6개월 이상)
  · 인공 고장시험(공인시험기관 입회 1회 포함) 기반 성능 판정

2. 정량 성과지표

표 13. 연차별 성과지표

성과지표	현행 수준	1차년도	2차년도(최종)	확인 방법
단락 고장 표정 오차	위치 산출 설비 없음 (도보 순회 탐색)	공장 모의 고장시험으로 위치 산정 기능 확인	실제 위치 대비 ±200 m 이내	인공 고장시험
지락 고장 표정 오차	위치 산출 설비 없음	공장 모의 고장시험으로 위치 산정 기능 확인	실제 위치 대비 ±200 m 이내 (고저항 지락 검증 범위 사전 협의)	인공 고장시험·실제 고장 대조
표출 시간	변전실 출동 후 계전기 기록 확인	—	고장 발생 후 1분 이내	차단기 동작~표출 로그
표정 성공률	—	—	유효시험 80% 이상 (횟수 협의)	시험계획서 N·M 판정
고장 파형 기록	고장 이력 수기 정리	공장시험 기록 누락 0건	보호계전기 동작 건 전수 기록(누락 0건)	동작 기록 전수 대조
개발 설비	—	설계검증품 제작	현장 적용품 3개소 설치·실증	실증 결과보고서

※ ±200 m 목표는 교류(AT 급전) 전기철도 고장점표정장치가 실제 운용하는 수준을 직류 급전계통에서 달성하겠다는 의미임
※ 1차년도는 설계·제작 단계로 현장 측정이 없으므로, 위치 오차는 2차년도 현장 실증에서 판정함
※ 정량적 연구목표와 세부 개발범위는 연구책임자 및 참여기업 매칭 후 협의를 통해 보완

구 분	내 용
	○ **목표의 도전성 및 차별화 포인트**

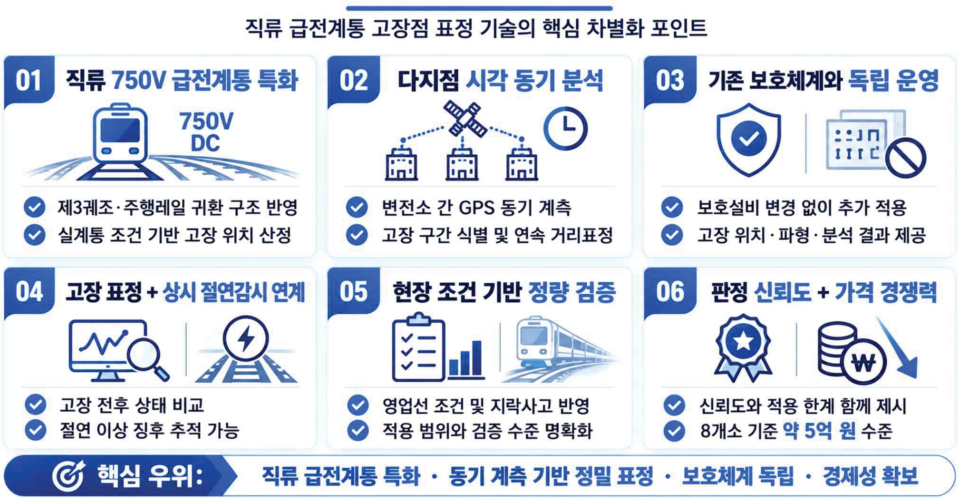


그림 6. 핵심 차별화 포인트

- (직류 급전계통에 특화된 표정 기술) 비교 대상인 교류 AT 급전계통용 표정장치와 구분하여, 본 과제는 직류 750 V 제3궤조·주행레일 귀환 계통을 대상으로 함. 실제 계통의 접지방식, 정류기 구성 및 급전 조건을 반영하여 고장 위치 산정 기법의 적용 가능성과 성능을 검증함
- (다지점 시각 동기 기반 분석) 변전소(과제 실증 3개소, 본선 도입 시 8개소)의 피더 계측과 정극·부극 대지전압 계측 데이터를 GPS 공통 시각 기준으로 취득하고, 변전소 간 데이터를 비교·분석하여 고장 구간 식별 및 연속 거리표정에 활용함
- (기존 보호 체계와 독립된 부가 설비) 기존 보호설비의 차단 판단과 동작에 관여하지 않는 계측·분석 설비로 구성함. 보호계전기 정정값 변경 없이 고장 위치, 관련 파형 및 분석 결과를 제공하여 현장 점검과 고장 원인 분석을 지원함
- (고장 표정과 상시 절연감시의 연계) 고장 발생 시 위치 산정 기능과 정극·부극 대지전압의 상시 감시 기능을 통합함. 정상 운전 상태의 기준선과 변화 추세를 축적하여 절연 이상 징후 확인 및 고장 전후 상태 비교에 활용함
- (현장 적용 조건에서의 정량 검증) 제3궤조·주행레일 귀환 계통에서 ① 영업선 가압 조건, ② 사전에 정의한 고저항 지락 범위, ③ 구간 내 연속 위치 산정, ④ 실제 위치 대비 정량 오차 평가를 함께 고려하는 것을 차별화 목표로 함. 기존 연구·제품과의 비교 결과는 적용 계통, 고장저항 범위, 표정 방식 및 검증 수준을 구분하여 제시함
- (판정 신뢰도와 적용 한계 제시) 고장 위치 산정 결과와 함께 데이터 품질 및 판정 신뢰도를 확인할 수 있도록 구성함. 검증 범위를 벗어나거나 데이터가 불충분한 경우에는 판정 보류 또는 표정 불가 상태를 표시하여 운영자가 결과의 활용 범위를 판단할 수 있도록 함

구 분	내 용

- (가격 경쟁력) 교류 전기철도 유사 시스템을 8개소에 설치할 경우 약 8~10억 원 소요되는 데 비해, 표정 기능 목표가격은 8개소 기준 약 5억 원 수준임

○ 적용장소·운영조건 및 기존 시스템과의 연계조건

1. 협의 단계에서 확정할 계측·동기 사양

- (기록 및 검증 조건) 상시 순환 기록과 고장 시 자동 기록(트리거)의 조합, 고장 전후 저장시간, 보호계전기 동작 기록과의 대조 방법을 정함. AI 학습에 쓴 데이터와 최종 성능평가 데이터를 분리해 현장 성능을 객관적으로 확인함

표 14. 계측·동기 사양 (표정 오차를 좌우하는 항목 — 협의 단계에서 확정 필요)

항목	확정이 필요한 내용	확정 주체·시기
샘플링률 · ADC 분해능	표정 사용 주파수 대역 수용 가능 수준	연구책임자·참여기업 / 요구정의 단계
안티에일리어싱 필터	차단 주파수·차수	연구책임자·참여기업 / 요구정의 단계
전류센서 대역·포화 특성	고장전류 범위에서의 응답 대역 및 포화 여부	참여기업 / 실측 단계
채널 간 위상 오차	동일 장치 내·장치 간 허용 위상 오차	참여기업 / 실측 단계
시각 동기 방식	지하 구간 GPS 안테나 인입 경로, 홀드오버 성능, PTP 배포 구조	제안기관·참여기업 / 설계 단계
기록 트리거	상시 순환 기록과 고장 트리거 기록의 조합	참여기업 / 설계 단계

2. 설치 환경 및 운영 조건

- 주계측장치는 변전소·전기실 안에 설치하며, 설치 공간을 고려해 하프랙 크기의 소형 계측반을 우선 적용함. 최종 크기와 배치는 유지관리 작업 공간, 방열, 케이블 인입 조건을 확인해 설계 단계에서 확정함
- 기존 주회로를 자르거나 바꾸지 않고 신호를 받는 것이 원칙임. 차단기반 안 트랜스듀서(TD)의 여유 출력이나 계측용 단자를 우선 활용하고, 기존 계측·보호 기능에 영향이 없는지 확인함. 필요하면 절연형 신호 분배·변환 장치를 사용함
- 기존 TD 출력의 신호 종류·측정 범위·정확도·응답 특성을 확인해 동기계측과 파형 분석에 쓸 수 있는지 검토함. 요구성능을 맞추기 어려운 지점은 별도 센서 적용을 제안기관과 협의함
- 제어전원·통신 경로·접지는 기존 변전소 설비를 활용하되, 전원 용량·통신 여유·접지 구성을 미리 확인함. 전원 보호·신호 절연·접지 방식 등 세부 사양은 설계 단계에서 확정함
- 변전소·전기실의 온도·습도·분진·전자파 환경을 고려해 장치를 구성하고, 점검·교

구 분	내 용

체가 쉽게 배치함. 케이블과 단자에는 식별표를 붙이고 설치도면·결선 정보를 유지관리 자료에 반영함

- 설치와 신호 연결은 승인된 작업계획에 따라 진행하고, 작업시간과 설비 정지 여부는 운영 일정에 맞춰 협의함. 설치 전후 기존 설비의 정상 동작과 계측값·통신·시각 동기 상태를 점검한 뒤 실증 운전을 시작함

3. 기존 시스템과의 연계

- 참여기업은 계측·분석 결과를 SCADA로 보내기 위한 통신 맵·프로토콜·인터페이스 명세를 제공하고 연계 시험을 지원함. 기존 SCADA 화면 반영과 설정 변경은 기존 SCADA 업체가 맡는 것을 원칙으로 하며, 범위·일정·비용은 제안기관 및 해당 업체와 협의해 정함
- 개발 시스템의 전용 소프트웨어는 상세 파형 조회·고장 위치 분석·이력 관리를 맡고, 기존 SCADA에는 고장 위치·경보·장치 상태 등 운영에 꼭 필요한 정보만 연계함. 화면 구성과 경보 처리 방식은 전기팀·관제의 요구를 반영해 확정함
- 연속 파형과 고장 전후 상세 데이터는 개발 시스템으로 따로 전송·저장하고, SCADA에는 상태·경보·분석 결과 위주로 보냄. 기존 통신망을 쓸 경우 데이터량과 통신 부하를 검토해 기존 관제 기능에 영향이 없는지 확인함

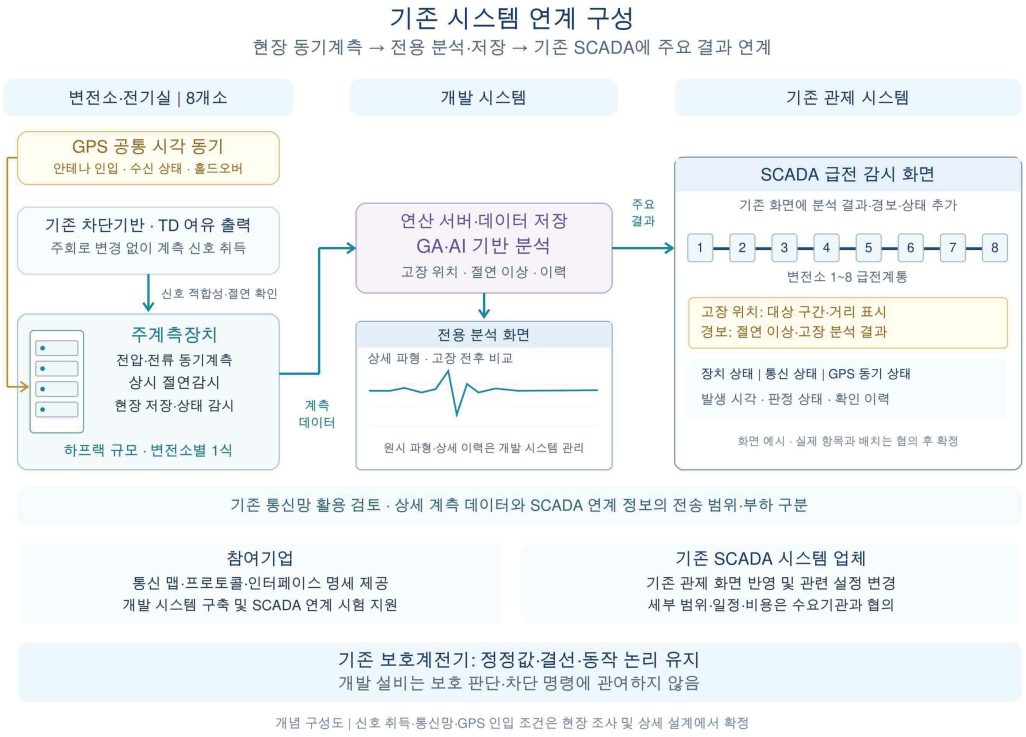


그림 7. 기존 시스템 연계 구성

- 기존 보호계전기의 설정값·결선·동작 방식은 바꾸지 않으며, 개발 설비는 보호 판단과 차단 명령에 관여하지 않는 부가 설비로 운영함. 개발 설비가 멈추거나 통

구 분	내 용

신이 끊겨도 기존 보호 기능에 영향이 없도록 연결함

- 변전소마다 측정한 데이터를 같은 시각 기준으로 비교할 수 있도록 GPS 시각 동기 체계를 갖춤. 지하 설치 환경이므로 GPS 안테나 설치 위치·인입 경로·케이블 길이·시각 신호 전달 방식은 현장 조사 후 확정함
- 기존 통신망의 접속·보안 절차에 따라 접근 권한과 연계 범위를 정함. 통신이 끊기면 현장에 임시 저장했다가 복구 후 다시 보내는 기능을 검토하고, 장치 이상·통신 장애·시각 동기 이상을 운영자가 구분해 볼 수 있게 함

○ 안전·유지관리·가격 등 필수 고려사항

표 15. 도입 시 필수 고려사항

구분	제안기관 요구	확인 시점
주회로 무개입	급전 주회로 개조 및 차단 논리 개입 없을 것	설계 검토
설치 시 정전	설치·결선 작업의 야간 비운행 시간대 완료 가능 — 영업 정전 최소화	설치 계획 수립
오동작 영향	본 설비 고장이 급전·보호 기능에 영향 없을 것 (독립 전원·독립 회로)	설계 검토
유지관리 부담	연간 점검 주기·소요 시간·예비품 범위가 현행 유지관리 체계에서 수용 가능할 것	유지관리 매뉴얼
목표 가격	표정 기능은 변전소 8개소 기준 약 5억 원 수준 상시 절연감시까지 적용시 약 10억 원 수준	협약·구매 단계
공급 지속성	장치 단종·부품 수급 대비 유지관리 및 대체 방안 확보	협약 단계

○ 요구 충족 시 문제 해결 범위

- 위 기능·성능이 충족되면 1항에서 제시한 문제 중 ‘위치를 몰라서 생기는 지연과 위험’이 크게 줄어듦. 다만 표정 성공률(유효시험 80% 이상)과 표시된 지점의 현장 확인·안전 절차를 전제로 하며, 고장 차단과 복구 작업 자체는 본 설비의 범위가 아니므로 아래와 같이 구분함

표 16. 요구 충족 시 개선되는 범위와 범위 밖 사항

구분	내용	관련 문제(1항)
개선	고장 위치를 관제 화면에 표출 → 변전실 선출동·인접 변전실 오출동 축소	초기 대응 지연
개선	표출 지점 양쪽 각 200 m 우선 점검 → 위치 미상 상태의 본선 진입·도보 탐색 축소	안전 문제
개선	고장 구간 식별 → 개폐 가능 구간 내 건전 구간 조기 재급전, 운행 재개 시점 단축	운영 문제
개선	상시 절연감시 → 고장 전 단계 절연 열화 추세를 점검 계획에 반영	예방 유지관리
범위 밖	고장 차단 — 기존 보호계전기·고속도차단기가 담당(본 설비는 보호 판단·차단에 관여하지 않음)	—
범위 밖	고장점 조치·복구 작업 — 현장 인력이 수행	—
보완 절차	표정 신뢰도 미달·표정 불가 시 무효 표시 후 기존 순회 절차로 전환	—

구 분	내 용
	○ **예상되는 기술적 난점과 대응 방안** • **(접지방식·귀환회로 조건)** 접지 방식, 주행레일의 절연 상태, 귀환전류 경로에 따라 고장 신호의 모양과 적용 가능한 계산 방법이 달라질 수 있음 → 실제 결선·접지 자료로 계통 해석 모델을 만들고, 조건별 민감도 분석으로 적용 범위와 한계를 확인함 • **(정류기 구성·리플 특성)** 정류기의 직렬·병렬 구성, 펄스 수, 운전 상태에 따라 리플(전압 맥동) 성분을 이용하는 분석 방법의 효과가 달라질 수 있음 → 현장 파형과 모의해석 결과를 비교해 쓸 수 있는 특징을 고르고, 리플 활용이 어려운 조건에서는 전압·전류·대지전압을 이용하는 대안 방법을 검토함 • **(고저항 지락 검출·위치 계산)** 고저항 지락은 고장 신호가 작아 정상 운전 중 변동이나 계측 잡음과 구분하기 어려움. 본 과제의 핵심 기술 위험으로 관리함 → 고장저항·고장 위치·부하 조건을 조합한 모의시험과 현장 검증으로 '검출 가능한 범위'와 '위치 계산이 가능한 범위'를 각각 평가함 • **(정상 운전과 고장의 구별)** 열차 출발·회생제동·급전 상태 변화로 생기는 전압·전류 변동을 고장으로 잘못 판단할 수 있음 → 정상 운전 데이터를 충분히 확보하고, 여러 지점의 전압·전류·대지전압을 시간·위치별로 비교해 고장 판정 기준과 오경보 억제 성능을 검증함 • **(계통 정수·급전 구성의 불확실성)** 선로·귀환회로 정수의 오차나 급전 구성 변화가 위치 계산 결과에 영향을 줄 수 있음 → 설계자료와 현장 측정값으로 해석 모델을 보정하고, 조건 변화에 따른 위치 오차를 평가함 • **(GPS 시각 동기·계측 품질)** 변전소 간 시각 차이, 센서 편차, 채널별 지연, 데이터 누락으로 여러 지점 데이터의 비교 정확도가 떨어질 수 있음 → 필요한 시각 동기 정확도를 정하고, 센서·채널 교정, 동기 상태 확인, 데이터 품질 점검 기능을 갖추어 분석에 부적합한 데이터의 처리 기준을 마련함 • **(AI 학습 데이터 부족)** 실제 고장 데이터가 적고 정상 운전 데이터에 치우칠 수 있어 AI 학습과 성능 검증에 제약이 있음 → 모의·실험·현장 데이터를 구분해 활용하고, 학습에 쓰지 않은 고장 사례로 성능을 검증함. 모의 데이터와 실측 데이터의 차이를 확인해 현장 적용성을 평가함 • **(실제 고장·현장시험 기회 제한)** 실증기간 중 실제 고장이 날지 예측하기 어렵고, 인공 고장시험은 운행·설비 안전 조건 때문에 시행 범위가 제한될 수 있음 → 시뮬레이션 → 실험실 시험 → 승인된 현장시험 순으로 단계적으로 수행하고, 실제 고장이 나면 현장 확인 위치와 분석 결과를 비교해 추가 검증함 • **(기존 보호·관제 설비와의 병행 운용)** 장치 설치와 통신 연계 과정에서 기존 보호·관제 기능에 영향을 주지 않아야 함 → 연결 방식과 통신 부하를 미리 검토하고, 설치·시운전 때 기존 기능이 정상인지 확인함. 개발 설비가 고장 나거나 통신이 끊겨도 기존 보호 체계는 독립적

구 분	내 용
	으로 동작하도록 구성함
4. 시험 · 인증 및 현장실증 계획	○ **적용에 필요한 시험·검사·인증·승인 사항** • 현장 적용을 위해 시험 규격은 협약 단계에서 확정하고, 철도안전법상 승인·신고 대상인지 확인함. 설치·통신 연계·관제 표시에 필요한 제안기관 내부 승인은 실증 시작 전에 마침 • 2차년도 현장 인공 고장시험 때 <u>공인시험기관 입회 시험을 1회 시행하여 현장 성능에 대한 공인 성적서를 확보</u>함 • **직류 급전계통 고장위치 표정장치**에 대한 국내 철도표준(KRS)이 없으므로, <u>실증 결과를 바탕으로 KRS 제정을 제안</u>함 • 참여기업과 제안기관은 점검 주기·예비품·소프트웨어 갱신·장애 대응 체계를 협의해 유지관리 매뉴얼에 반영함. 실증 성공기준을 충족하고 제안기관의 검증 확인을 거치면 관제 절차에 반영하고 본선 도입을 추진함

표 17. 시험, 검사 및 승인 사항 상세

구분	항목	확인·수행 주체	시기·비고
전기적 안전	변전소 설치 환경에 따른 사전 안전 확인	참여기업	실증기간 (M16~19) 내
현장 성능 공인시험	현장 인공 고장시험 시 공인시험기관 입회, 성능 성적서 발급	참여기업·공인시험기관	실증기간 (M19~24) 중 1회
철도안전법	철도안전법상 승인·신고 대상 여부 확인	연구책임자·제안기관	보호 비관여 부가설비로서 대상 여부 확인 필요
기관 내부 승인	설비 설치·통신 연계·관제 표출에 대한 내부 승인	제안기관	실증 착수 전 완료
유지관리 조건	점검 주기·예비품·소프트웨어 갱신·장애 대응 체계	참여기업·제안기관	유지관리 매뉴얼로 제공
표준화	철도표준(KRS) 제정 제안	연구책임자·참여기업	실증 결과 확보 후
본선 도입 조건	실증 성공기준 충족, 제안기관 검증 확인, 관제 절차 반영	제안기관·연구책임자	실증 결과보고서 기준

○ **현장실증이 가능한 장소와 대상**

• 제안기관은 김포골드라인 본선의 DC 750 V 제3궤조 급전계통을 현장실증 대상으로 제공함

• 실증 노선은 총연장 23.6 km 전 구간 지하 노선으로, 실제 운행 환경에서 데이터 수집·고장 위치 분석·상시 절연감시 기능의 적용성을 확인함

• 변전소 8개소 중 3개소를 우선 적용 대상으로 정해 장치를 설치하고 초기 실증

구 분	내 용

을 수행함. 우선 적용 개소는 계통 구성, 인접 변전소 간 데이터 비교 가능성, 설치 공간, 신호 취득 여건, 통신 환경을 고려해 착수 단계에서 제안기관이 연구수행기관과 협의해 확정함

표 18. 실증 제공 범위

제공 항목	내용	비고
실증 노선	김포골드라인 본선 전 구간 (23.6 km, 전 구간 지하)	영업 운행 중인 실선로
실증 개소	전체 변전소 8개소 중 3개소 우선 적용 개소는 착수 단계 지정	최종 우선적용 개소 제안기관과 협의하여 확정
설치 공간	변전소·전기실 내 하프랙 규모 설치 공간	
제어전원·통신	기존 변전소 제어전원 및 통신 경로	용량·경로는 설계 단계 확정
신호 취득점	차단기 반 TD 여유 포인트	기존 회선 무접촉 전제
운영 데이터	단선결선도, 계통 정수, 보호계전기 동작 기록, 고장 이력	보안 절차에 따라 제공

❍ 실증기간·운영조건 및 운행·안전상 제약

- 총 24개월 중 현장 실증은 6개월 이상으로 하며, 2차년도 하반기에 시행
- 진행 순서: 실증 구간 선정 → 장치 설치 → 인공 고장시험 → 성능 판정
- (작업 시간) 본선 작업은 영업 종료 후 야간 비운행 시간에만 가능하며, 단전·선로 차단과 복구 시간을 빼면 실제 작업 시간은 더 짧음
- (출입 절차) 본선·변전소 출입은 제안기관 출입 절차와 안전교육 이수가 필요하며, 작업 시 안전관리자가 입회함
- (영업 무영향) 설치·시험 작업은 다음 날 첫차 운행에 영향이 없어야 하며, 끝내지 못하면 원상 복구할 수 있는 단위로 계획함
- (인공 고장시험) 야간 비운행 시간에 한해 제안기관의 사전 승인과 안전 조치를 전제로 협의하며, 시행 여부와 조건은 제안기관이 확정함
- (비상 중단) 운행 장애·기상 악화 등이 생기면 실증 작업을 즉시 중단하고 운행 안전을 최우선으로 함

표 19. 인공 고장시험 시행을 위해 사전 합의할 조건

항목	합의가 필요한 내용	확정 주체
고장 저항 범위	모의 고장 저항의 범위와 단계	제안기관·연구책임자
전류·에너지 한도	시험 시 허용 고장전류 및 투입 에너지 상한	제안기관

구 분	내 용

시험 위치·횟수	시험 시행 위치 수와 위치별 반복 횟수	제안기관·연구책임자
보호 정정 검토	시험 중 보호계전기 동작 예상 및 정정 영향 검토	제안기관
접지·방전 절차	시험 전후 접지·방전 및 인터록 절차	제안기관
중단 조건·책임자	시험 중단 기준 및 현장 안전책임자 지정	제안기관

❍ 성능 확인방법과 성공 여부 판단기준

- (판정 원칙) 사전에 합의한 시험 조건에서 '시험 횟수 대비 기준을 만족한 횟수'로 판정함. 단락·지락 각각 N회 시험 중 허용오차 이내로 위치를 계산한 결과가 M회 이상인지 확인하고, 표정 불가·미검출·오차 초과 건도 모두 기록해 객관성을 확보함
- (이렇게 정한 이유) 실증기간 중 실제 고장이 몇 번, 어떤 형태로 날지 예측할 수 없으므로 실제 고장만으로 성공률을 판정하기는 어려움. 따라서 계획된 인공 고장시험으로 주요 성능을 검증하고, 실제 고장이 나면 보호계전기 기록·현장 확인 위치·조치 결과를 분석 결과와 비교해 현장 적용성을 추가로 확인함
- (판정 방법·절차) 시험 전에 항목별 시험 조건, 시행 횟수(N), 최소 만족 횟수(M), 허용오차, 유효시험 인정 조건, 재시험 기준을 시험계획서에 정하고 관계기관이 합의함. 위치 정확도는 실제 위치와의 오차로, 파형 기록은 보호계전기 동작 건과 하나하나 대조한 누락 여부로, 표출 시간은 차단기 동작부터 관제 화면 표시까지 1분 이내인지로 평가함. 오경보는 무부하 시간대 기준선과 순회·점검 결과를 비교해 확인하며, 기록 누락이 생기면 원인 분석·조치·재확인까지 마쳐야 성공으로 판단함

표 20. 성능 확인방법 및 성공 판단기준

평가 항목	확인 방법	비교 기준	성공 판단기준
표정 정확도(단락)	인공 고장시험	시험 시 인가한 실제 고장 위치	시행 N회 중 허용 오차 이내 M회 이상
표정 정확도(지락)	인공 고장시험	현장 확인 실제 고장 위치	시행 N회 중 허용 오차 이내 M회 이상
표정 성공률	유효 인공 고장시험 전체	허용 오차 이내 산정 건수(M) / 유효시험 건수(N)	M/N 80% 이상 (N은 시험계획서에서 협의 설정)
파형 기록	실증기간 보호계전기 동작 건 전수 대조	제안기관 보호계전기 동작 기록	미기록 건 0 목표 — 미기록 발생 시 원인 분석·조치를 성공기준에 포함
표출 시간	차단기 동작 시각 ~ 관제 표출 시각 로그 측정	차단기 동작 시각	고장 발생(차단기 동작) 후 1분 이내
시각 동기	변전소 간 동기 상태·	요구 표정 오차	동기 오차의 표정 오차 기

구 분	내 용

	오차 로그 점검		여분이 요구 오차 이내
기존 설비 불간섭	설치 전후 기존 보호·관제 설비 정상 동작 확인	설치 전 동작 상태	정정·결선 변경 없음, 기존 기능 이상 없음
오경보	무부하 시간대 기준선 및 영업 운전 조건(열차 기동·회생제동) 대비 이상 통보 건 검토	제안기관 순회·점검 결과	허용 빈도는 기준선 축적 후 제안기관 확정

표 21. 표출·경보 → 조치 연결 절차 (실증에서 확립)

구분	표출·경보 내용	제안기관 조치	확인 방법
고장 표정	고장 위치(거리·구간) 관제 표출	해당 지점 직행 점검 → 조치 → 급전 재개	현장 확인 위치와 대조
구간 격리	고장 구간 식별	개폐구간 매핑에 따른 격리·건전구간 재급전	재급전 범위 기록
절연 열화 경보	분압비·전위 추세 이상	해당 구간 계획 점검 편성 → 애자 상태 확인	점검 결과와 경보 대조
무효 표시	표정 신뢰도 미달 표시	기존 순회 절차로 전환	무효 표시 빈도 기록

❍ 실증을 위해 사전에 해결해야 할 사항

표 22. 실증 착수 전 해결 사항

번호	해결 사항	주체	시기
1	계통 정수(선로 임피던스 등) 실측 계획 수립 및 시행	참여기업·제안기관	요구정의 단계
2	계통 접지방식 확인, 지락 표정 방식의 성립 조건	제안기관	요구정의 단계
3	정류기 구성(직렬/병렬 12펄스 등) 확인	제안기관	요구정의 단계
4	기존 트랜스듀서(TD) 여유 포인트 사양·대역 확인	제안기관·참여기업	요구정의 단계
5	시각 동기 경로 확보 — 지하 구간 GPS 안테나 인입 또는 대체 방식	제안기관·참여기업	설계 단계
6	기존 SCADA 시스템 업체와의 연계 협조 범위·일정 확정	제안기관	설계 단계
7	설치·시험 작업의 내부 승인 및 정보보안 검토 완료	제안기관	설치 전

구 분	내 용

8	인공 고장시험 시행 가능 여부·조건 확정	제안기관	실증 전
9	실증 설비 철거 및 본선 양산품 도입 조건 사전 협의	제안기관·연구책임자	실증 중

5. 도입 및 활용계획

○ 실증 성공 시 적용대상과 예상 도입수량

- <u>실증 설비는 개발품이므로 과제 종료 후 철거하는 것이 원칙이며, 실증에 성공하면 본선에는 양산 제품을 새로 도입</u>함
- 아래 수량은 현재 기준 계획이며, 내부 승인 절차를 거쳐 확정할 예정임

단계	시기	대상	수량	비고
1 실증 설비 철거	과제 종료 시점	실증 적용 변전소 3개소	실증 설치분 전량	개발품 철거 원칙
2 본선 도입 (양산품)	과제 종료 후 1~2년	변전소 8개소 + 중앙 설비	8식 일괄	내부 예산 절차
3 노후 교체 연계	설비 개량 주기	보호설비 개량 대상	개량 계획 연동	반복 수요

※ 1식의 구성은 8개 변전소 별로 1) 고장위치 표정기능 시스템만 탑재 2) 고장위치 표정기능+상시절연감시 시스템 중 하나의 안으로 최종 선정하여 구성

○ 목표가격 또는 구매 가능한 가격수준

- (목표가격) 1안 및 2안 중 최종 선정 예정

표 23. 목표 가격 수준

구분	범위	목표 가격 수준	산정 근거
1안	고장점표정 기능(중앙 설비 포함)/ 8개 변전소	약 5억 원	교류 유사 시스템 8개소 약 8~10억 원 대비, 본 과제 개발·실증 전제
2안	고장점표정 기능 + 상시 절연감시 기능(중앙설비 포함)/ 8개 변전소	약 10억 원	1안에 절연감시 유닛·서버 추가

※ 위 금액은 기술협의 단계의 대략적 규모이며, 사양 확정 후 견적과 내부 심의를 거쳐 확정함

○ 예상 도입시기와 예산 확보계획

- (예상 도입시기와 예산 확보) <u>5억~10억 원 규모는 지방자치단체 지원 요청을 통해 확보를 추진할 수 있는 수준</u>이며, 실제 예산 편성은 내부·외부 절차에 따름

구 분	내 용

표 24. 도입 시기 및 예산 확보

구분	내용	확정 상태
도입 검토 시점	과제 종료(M24) 후 실증 결과보고서·검증 확인서를 근거로 내부 검토 착수	계획
1차 도입 목표 시기	과제 종료 후 1~2년 내 본선 도입	계획
예산 항목	자본적 지출(설비 취득) 또는 경상 예산 구분	내부 확정 대상
예산 확보 경로	기관 자체 예산 편성 및 지방자치단체 지원 요청 병행 검토	계획
내부 승인 절차	소요 제기 → 심의 → 예산 반영 → 계약	내부 확정 대상
구매 방식	성과공유제·시범구매 등 구매연계 제도 활용 가능성 검토	검토 중

❍ 성과공유제 등 구매연계 방식의 활용 가능성

- (성과공유형 공동개발) 제안기관은 우선 적용 변전소 3개소의 실증 현장, 급전계통·설비 자료, 운영·고장 데이터, 현장 검증 인력을 지원하고, 참여기업은 주계측 장치와 분석·표출 소프트웨어의 개발·설치·성능 개선을 맡음. 성과공유제 적용 요건을 확인한 뒤 공동 목표, 기관별 역할, 성과 확인 방법, 성과공유 방식을 미리 협의해 협약에 반영함
- (성과 확인 기준) 본 조사서 3항의 요구성능을 기준으로 위치 정확도, 고저항 지락 검출 성능, GPS 시각 동기 성능, 상시 절연감시·관제 연계 기능을 검증함. 고장 탐색시간 단축, 현장 점검 업무 감소, 유지관리 편의성 등 운영 효과도 평가해 구매 검토 근거로 활용함
- (성과 달성 시 구매 연계) 요구성능과 현장 운용 적합성이 확인되면, 공고 유형1의 '우선 구매 노력 권고'에 따라 양산품 본선 도입과 후속 구매를 검토함. 추가 계측·예비품·향후 교체 수요도 조사해 구매 대상·수량·금액을 구체화하고 내부 예산에 반영함
- (성과공유 방식) 후속 구매 연계, 유지보수 지원, 소프트웨어 개선, 기술지원 조건 등을 참여기업과 협의함. 제안기관은 안정적인 운영·유지관리 기반을, 참여기업은 실증 실적과 제품 개선 결과를 확보하도록 구체적인 이행 조건을 정함
- (시범구매 등 제도 활용) 기술개발제품 시범구매 등 공공구매 지원제도의 참여 요건과 구매 주체 자격을 확인해 적용 가능한 제도를 검토함. 참여기업이 제도를 신청할 때 필요한 실증 결과·성능 검증 자료·현장 활용 의견을 제공하고, 필요하면 관계기관과 구매 연계 방안을 협의함
- (구매 추진 절차) 전기팀·관제가 실증 결과와 도입 필요성을 검토해 구매 사양과 예산을 마련하고, 구매·계약 부서 검토와 내부 승인 절차에 따라 추진함. 계약 방식(수의계약 포함)은 관련 법령·제도와 내부 규정에 따라 결정함

<table>
<tr><th>구 분</th><th>내 용</th></tr>
<tr><td></td><td>

○ **예상 결과물 및 도입 후 운영·내부 활용**

표 25. 예상·요구 결과물

구분	결과물	비고
기술·제품	직류 급전계통 고장위치 표정·상시 절연감시 통합 시스템(주계측장치 · 상시 절연감시 유닛 · 전위계측장치 · 연산서버·표출 소프트웨어)	실증용 개발품 3개소
소프트웨어	고장위치 표정 알고리즘 프로그램 등록	기술이전 기반
설계·문서	설계도, 제작사양서, 관제 연계 규격서(통신 맵·프로토콜), 운용·유지관리 매뉴얼	문서 일식
시험·인증	공장시험 성적서, 공인시험 성적서, 인공 고장시험 결과, 실증 결과보고서	시험·인증
표준안	직류 급전계통 고장위치 표정장치 철도표준(KRS) 제정 제안안	실증 결과 기반
데이터·교육	실증기간 축적 파형·기준선 데이터 및 고장 이력 정리본, 운영·유지관리 교육 및 절차서	전자 파일 · 교육 시행

- (운영 주체) 제안기관 전기팀과 관제가 운영함. 전기팀은 계측·절연감시 정보로 설비 상태를 확인하고 유지관리하며, 관제는 고장 시 화면에 표시된 고장 위치를 확인해 현장 대응을 지원함
- (고장 대응 절차 반영) 기존 고장 대응 절차에 '고장 위치 분석 결과 확인' 단계를 추가해 점검 구간 선정과 고장 원인 분석에 활용함
- (기존 보호 체계와 병행) 개발 설비는 고장 분석·유지관리를 돕는 부가 설비로 운영하며, 기존 보호설비 교체나 보호계전기 설정 변경 없이 함께 사용함
- (데이터 관리) 계측 데이터와 고장 이력을 쌓아 고장 전후 비교와 반복 고장 분석에 활용하고, 매뉴얼에 따라 장치·통신·GPS 시각 동기 상태를 점검함
- (과제 종료 시 인수) 기술문서, 시험·검증 자료, 실증 데이터를 넘겨받고 담당자 교육을 통해 본선 도입 후 운영·유지관리에 활용함. 실증용 설비는 과제 종료 후 철거함

</td></tr>
<tr><td>6.
수요기관
협력·지원
계획</td><td>

○ **연구개발 과정에서 수요기관이 담당할 역할**

- 제안기관은 운영 요구사항 제시, 자료·실증 현장 제공, 현장 성능 검증을 맡으며, 개발품이 실제 운영과 유지관리에 적합한지 확인함
- 개발 초기 요구사항 협의부터 설치·시운전, 실증 결과 확인, 본선 도입·구매 검토, 타 운영기관 확산 지원까지 단계별로 참여함

○ **현장·설비·데이터 제공 및 실증 참여·피드백 계획**

- 항목별 지원 가능 여부와 전제조건은 아래 표와 같으며, 세부 범위와 일정은 보유 자료·현장 여건·내부 승인 절차를 고려해 실무 협의체에서 확정함

</td></tr>
</table>

구 분	내 용

표 26. 제안기관 역할별 지원 계획 및 수행 가능 여부

구분	지원 내용	수행 가능 여부	전제 조건
자료 제공	급전계통 단선결선도, 변전소·전기실 배치	가능	보안 절차에 따른 제공
자료 제공	정류기 구성·접지방식·계통 정수 자료	가능	보유 자료 범위 내
자료 제공	고장 이력, 보호계전기 동작 기록	가능	기록 보존 범위 내
자료 제공	최근 3년 고장 건수·복구지연시간·지연실적	조건부 가능	내부 기록 취합 필요
현장 지원	변전소·전기실 설치 공간 (하프랙 규모)	가능	개소별 현장 확인
현장 지원	제어전원·통신 경로 제공	조건부 가능	용량·경로 설계 확인 후
현장 지원	야간 비운행 시간대 작업 시간 확보	가능	작업 계획 사전 승인
현장 지원	본선·변전소 출입 절차 및 안전관리자 입회	가능	안전교육 이수 전제
시험 협조	인공 고장시험 시행	협의 필요	시험 조건·안전 조치 합의 후 확정
성능 검증	실제 고장 건 현장 확인 위치 제공	가능	실증기간 중
성능 검증	성능평가 참여 및 검증 확인서 발급	가능	성공기준 합의 전제
도입 검토	실증 결과에 따른 본선 도입(양산품)·구매 검토	가능	내부 승인 절차
확산 지원	타 운영기관 대상 실증 결과 공유	가능	연구책임자 협의

○ 3자 역할 분담 및 희망 협력분야

- 3자 역할 분담 희망안

표 27. 3자 역할 분담 희망안

수행 주체	희망 역할	주요 수행 내용
한국철도기술연구원	알고리즘 개발 및 시뮬레이션 검증	계통 해석 모델 수립, 표정 알고리즘 설계, 모의 케이스 기반 정확도 검증, 시험 조건 설계 및 결과 판정
제안기관 (김포골드라인SRS)	현장·자료 제공 및 성능 검증	실증 현장·설비 제공, 운영·고장 자료 제공, 요구사항 확정, 실증 결과 확인, 도입 검토
참여기업 ((주)링크드파워)	장치 설계·제작 및 현장 구현	검증된 알고리즘의 장치 탑재, 계측 하드웨어 설계·제작, SCADA 통신 맵·프로토콜 제공, 사업화

※ 위 역할 분담은 제안기관의 희망안이며, 연구책임자·참여기업 매칭 후 협의해 확정함

구 분	내 용

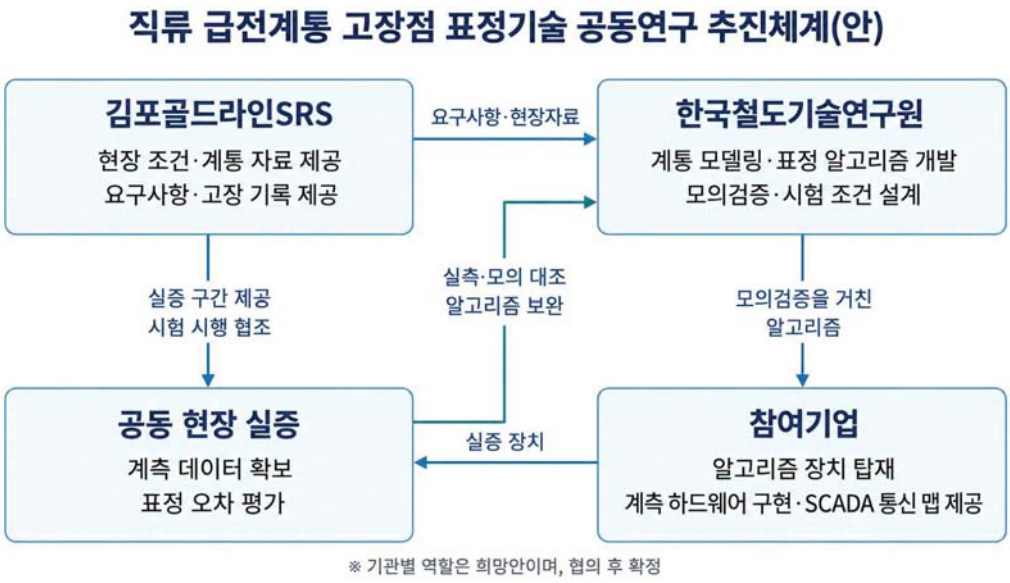


그림 9. 공동연구 추진체계(안)

❍ 협력 체계 및 의사소통

- (실무 협의체) 제안기관 전기팀·관제, 한국철도기술연구원 연구책임자, 참여기업으로 실무 협의체를 구성하고 단계별 착수·완료 시점에 정기회의를 엶. 일정 조정이나 현장 이슈가 생기면 수시로 협의함
- (창구 일원화) 제안기관의 협의 창구는 전기팀으로 일원화하고, 관제 운영·통신 연계·구매 검토는 담당 부서와 협의함. 현장 작업·출입·안전관리는 제안기관 절차를 따름
- (역할 분담) 한국철도기술연구원은 계통 해석 모델, 고장 위치 계산 알고리즘 개발, 시뮬레이션 검증을 맡음. 제안기관은 운영 요구사항 제시, 현장·자료 제공, 실증 결과 확인을 맡고, 참여기업은 장치 설계·제작, 알고리즘 탑재, 관제 연계용 통신 맵·프로토콜 제공, 현장 기술지원을 맡음
- (단계별 확인) 요구사항 확정, 설치·시운전 완료, 실증 결과 검토, 최종 인수 단계마다 공동 확인을 하고, 결과와 보완사항은 회의록·점검표로 관리함
- (변경 관리) 사양·일정·시험 범위를 바꿀 때는 영향과 대책을 검토해 협의체에서 합의하고 문서로 남김. 예산·계약·운영에 영향이 있는 사항은 각 기관의 내부 승인을 별도로 받음
- (자료 관리) 운영 데이터와 설비 자료의 제공·사용·보관·외부 공개 범위를 미리 합의하고, 제안기관 보안 절차에 따라 관리함
- (실증 종료 처리) 실증 종료 전에 설비 철거 일정, 인수 대상(문서·데이터), 담당자 교육, 본선 도입 시 유지보수 지원 범위를 협의해 종료 계획에 반영함

구 분	내 용

그림 10. 협력 체계 및 의사소통 구성

○ **연구성과 도입 검토 및 확산 지원 계획**

- 실증에 필요한 현장·데이터·인력을 배정하고, 실증 결과가 성공기준을 충족하면 도입을 적극 검토함
- 본 조사서와 <u>구매의향서를 제안기관 명의로 제출함</u>

7. 예상 개발기간 및 소요예산

- <u>총 연구기간: 2년 (24개월)</u>
  - 설계·제작·승인 약 18개월 + 현장 설치·실증(공인시험 입회 포함) 약 6개월

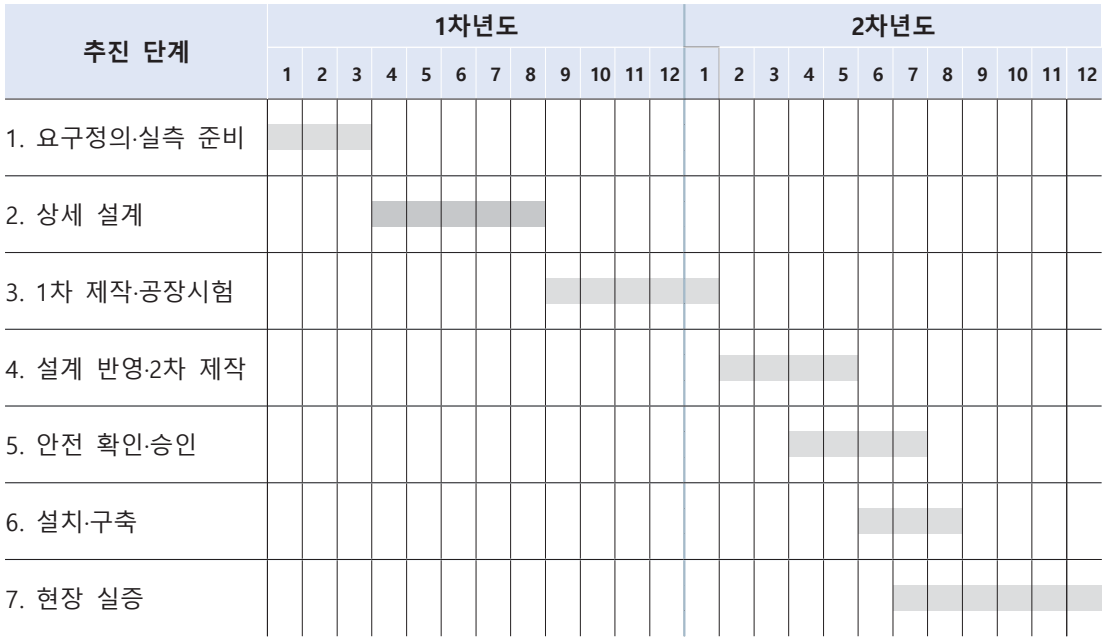
표 28. 개발·실증 로드맵 24개월

단계	기간	주요 내용
1. 요구정의·실측 준비	M1~3	요구사항 확정, 계통 정수 실측 계획, 접지방식·정류

구 분	내 용

		기 구성·TD 사양 확인
2. 상세 설계	M4~8	회로·외함·소프트웨어 설계, 알고리즘 상세화, 계통 정수 실측·보정
3. 1차 제작·공장시험	M9~13	1차 설계검증품 제작(주계측 3식·절연감시 3식·전위계측·서버), 교정, 모의 고장시험
4. 설계 반영·2차 제작	M14~17	공장시험 결과 설계 반영, 현장 적용품 재제작 및 재시험
5. 안전 확인·승인	M16~19	전기적 안전 확인, 철도안전법 대상 여부 확인, 내부 승인·정보보안 검토(현장 입회 공인시험은 7단계)
6. 설치·구축	M18~20	우선 적용 3개소 현장 설치, 통신·시각동기 구축, 시운전
7. 현장 실증	M19~24	기준선 축적, 인공 고장시험(공인시험기관 입회 1회 포함), 성능 판정, 최종보고

표 29. 연구개발 추진 일정



한국철도기술연구원장 귀하