논문집 다운로드

대한전기학회 전기물성·응용부문회

2026년 추계학술대회 및 정기총회

2026. 10. 22(목) ~ 24(토)

소노캄 경주

분야

- 전기재료
- 광전자 및 전자파
- 전력IoT·센서
- 스마트 대전력 및 고전압
- 전력설비 자산관리



THE KOREAN INSTITUTE OF
ELECTRICAL ENGINEERS(KIEE)

사단법인 대한전기학회 전기물성·응용부문회

목 차

▌초대의 글 ····· 2

▌2026 전기물성 · 응용부문회 임원 ····· 3

▌2026 전기물성 · 응용부문회 추계학술대회 조직위원회 ····· 4

▌2026 전기물성 · 응용부문회 추계학술대회 일정 ····· 5

▌2026 전기물성·응용부문회 개회식 및 정기총회 ····· 6

■ 초청강연 : 해상풍력의 다음 병목, 계통과 전기 인프라 ····· 7

▌좌장 및 발표자 진행안내 ····· 8

▌좌장 명단 ····· 9

▌등록 안내 ····· 10

▌학술대회장 배치도 ····· 10

▌소노캄 경주 찾아오시는 길 ····· 11

▌학술프로그램

■ 전기재료 기술위원회 주관 : 최신 전력반도체 연구/개발 동향 ····· 12

■ 광전자 및 전파기술위원회, 전파IoT · 센서기술위원회, 한전 전력연구원 공동개최 : 미래 전력망 혁신을 위한 광전자 · 전파 · IoT · 센서 기술 ····· 12

■ 스마트대전력 및 고전압 기술위원회 주관 : 고전압 DC 전하거동의 측정과 해석기술 ····· 13

■ 전력설비 자산관리 기술위원회 주관 : 전력설비 자산관리 고도화를 위한 기술·정책 동향 및 실증 현황 ····· 13

▌논문 차례 [구두/포스터]

■ 구두 발표 1 ····· 14

■ 구두 발표 2 ····· 14

■ 구두 발표 3 ····· 15

■ 구두 발표 4 ····· 15

■ 구두 발표 5 ····· 16

■ 구두 발표 6 ····· 16

■ 포스터 발표 1 ····· 17

■ 포스터 발표 2 ····· 21

초대의 글



존경하는 전기물성・응용 부문회 회원 여러분, 안녕하십니까?

저희 대한전기학회 전기물성・응용 부문회는 우리나라 전기공학 분야의 핵심이 되는 전기재료, 스마트대전력 및 고전압, 광전자 및 전자파, 전력설비자산관리, 전력IoT·센서 등 5개 분야 기술위원회를 기반으로 하고 있으며, 기초연구부터 기기개발과 산업현장에서의 적용까지 미래를 선도할 수 있는 기술개발을 주도하고 있습니다.

천년 고도 경주의 가을빛이 깊어 가는 10월, 대한전기학회 전기물성・응용부문회 2026년도 추계학술대회를 경주 보문단지에서 개최하게 되었습니다. 바쁘신 가운데에도 함께해 주시고자 하는 모든 분들께 진심으로 감사드리며, 부문회를 대표하여 따뜻한 환영의 인사를 드립니다.

이번 학술대회에는 부문회 역사상 가장 많은 논문이 접수되었고, 사전 등록 역시 역대 최대를 기록하였습니다. 이는 전기물성 · 응용 분야를 향한 회원 여러분의 깊은 관심과 열정, 그리고 꾸준한 연구가 맺은 결실이라 생각합니다. 소중한 연구 성과를 보내 주신 모든 저자분께 깊이 감사드립니다.

10월 22일부터 24일까지 사흘간 열리는 이번 대회에서는 구두 및 포스터 논문 발표를 통해 최신 연구 성과가 폭넓게 공유됩니다. 각 기술위원회가 마련한 기술포럼에서는 분야별 현안과 미래 기술의 방향에 대해 깊이 있는 논의가 이어질 것입니다.
특히 이번 대회에서는 **"해상풍력의 다음 병목, 계통과 전기 인프라"** 주제로 전문가 초청 강연을 마련하였습니다. 해상풍력은 탄소중립 시대의 핵심 에너지원으로, 대용량 해저 케이블과 HVDC, 절연 소재, 전력기기의 신뢰성 확보, IoT 센서 등 우리 부문회의 전문성이 크게 기여할 수 있는 분야입니다. 이번 강연이 학계와 산업계가 함께 나아갈 길을 모색하는 뜻깊은 계기가 되기를 기대합니다.

아울러 정기총회를 통해 부문회의 한 해를 돌아보고 앞으로의 계획을 함께 나누며, 각종 시상식을 통해 우수한 연구 성과를 거둔 회원 여러분의 노고를 격려하고자 합니다.

끝으로 이번 학술대회를 위해 헌신해 주신 조직위원회와 학술위원회, 각 기술위원회 위원장님과 위원 여러분, 그리고 아낌없이 후원해 주신 기관과 기업 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

사흘간의 학술대회가 참석하신 모든 분께 새로운 영감과 활발한 교류의 장이 되기를 바라며, 아름다운 경주의 가을 정취도 함께 누리시기를 바랍니다. 여러분의 건강과 무궁한 발전을 기원합니다.
감사합니다.

2026년 10월 22일

대한전기학회 전기물성・응용부문회 회장 **우 정 욱**

2026년도 전기물성 · 응용부문회 임원

구 분	이름	소 속	직위
회 장	우정욱	한전 전력연구원	부원장
부회장	나완수	성균관대학교	교수
	이기근	아주대학교	교수
	김정배	비츠로일렉트릭	전무
	이찬주	HD현대일렉트릭	전무
	신구용	한전 전력연구원	수석연구원
감사	박재준	중부대학교	교수
	홍성제	전자기술연구원	수석
총무 이사	강형구	한국교통대학교	교수
	박병석	한전 전력연구원	수석연구원
재무 이사	이수연	서울대학교	교수
	배채윤	LS Electric	수석
편집 이사	장승진	중앙대학교	교수
	박태식	국립목포대학교	교수
	윤광석	서강대학교	교수
	정채균	한전 전력연구원	책임
	강승택	인천대학교	교수
	이형규	한국표준과학연구원	책임연구원
	박성희	동우일렉트릭㈜	이사
	신호섭	군산대학교	교수
	최세용	강원대학교	교수
학술 이사	김명진	충북대학교	교수
	양성은	한전 전력연구원	책임연구원
	오승열	한전 전력연구원	책임연구원
	정지학	한국폴리텍대학	교수
	권구영	공주대학교	교수
	김정길	동아대학교	교수
	한가람	포항가속기연구소	책임연구원
	박혜리	동아대학교	교수
	방수식	한국공학대학교	교수
	김선혁	공주대학교	교수
기술 이사	박형준	한국전자통신연구원	책임연구원
	석오균	부산대학교	교수
	정진교	한국전기연구원	책임연구원
	김홍규	효성중공업	고문
	박명혜	한전 전력연구원	소장
사업 이사	박현주	한전 전력연구원	수석연구원
	이방욱	한양대학교	교수
	정재룡	GS건설	팀장

구 분	이름	소 속	직위
사업 이사	박준석	국민대학교	교수
	장유철	HL만도	팀장
	최영욱	한국전기연구원	책임
	장성욱	동의대학교	교수
	김동석	한국원자력연구원	선임연구원
	이춘권	부경대학교	교수
국제 이사	이세희	경북대학교	교수
	강동원	중앙대학교	교수
	유승건	한국전기연구원	선임연구원
	김현섭	군산대학교	교수
	우정민	인천대학교	교수
	김민희	계명대학교	교수
협동 이사	이동준	지투파워	부사장
	임장섭	목포해양대학교	교수
	홍동석	대한전선	연구소장
	윤중락	삼화콘덴서	연구소장
	최원	대림대학교	교수
	김태환	EPRI	기술리더
	최형준	새빛테크㈜	대표
	주형준	한전 전력연구원	책임연구원
	장용무	가천대학교	교수
	권중지	LS전선	책임연구원
	김영화	(주)에셈블	연구소장
	양병모	DNV	한국지사장
	서황동	효성중공업	팀장
	신승환	오창 다목적방사광가속기구축사업단	단장
	김선우	동우일렉트릭	대표이사
	문병철	일진전기	상무
	정성일	다다올	부사장
	강혜민	한국에너지공과대학교	교수
	유현용	고려대학교	교수
	류기환	KATRI 시험연구원	책임연구원
	김용한	HD현대일렉트릭	상무
	김준연	HD현대일렉트릭	책임
	정병규	경북대학교	교수
	김민기	국립공주대학교	교수
	길태현	경희대학교	교수
	심민섭	경상국립대학교	교수

2026 전기물성 · 응용부문회 추계학술대회 조직위원회

학술대회장	우 정 욱 (한전 전력연구원 부원장)
부대회장	나 완 수 (성균관대학교 교수) 이 기 근 (아주대학교 교수) 김 정 배 (비츠로일렉트릭 전무) 이 찬 주 (HD 현대일렉트릭 전무) 신 구 용 (한전 전력연구원 수석연구원)
조직위원장	김 명 진 (충북대학교 교수)
조직위원	양 성 은 (한전 전력연구원 책임연구원) 오 승 열 (한전 전력연구원 책임연구원) 정 지 학 (한국폴리텍대학 교수) 권 구 영 (공주대학교 교수) 김 정 길 (동아대학교 교수) 한 가 람 (포항가속기연구소 책임연구원) 박 혜 리 (동아대학교 교수) 방 수 식 (한국공학대학교 교수) 김 선 혁 (공주대학교 교수)
기술위원회 위원장	석 오 균 (부산대학교 교수) : 전기재료 기술위원회 이 세 희 (경북대학교 교수) : 스마트 대전력 및 고전압 기술위원회 박 형 준 (한국전자통신연구원 책임) : 광전자 및 전자파 기술위원회 박 태 식 (국립목포대학교 교수) : 전력설비자산관리 기술위원회 박 명 혜 (한전 전력연구원 소장) : 전력IoT • 센서 기술위원회

2026 전기물성 · 응용부문회 추계학술대회 일정

■ 일 시 : 2026년 10월 22일(목)~24일(토)

■ 장 소 : 소노캄 경주

<table>
<tr><th>일자</th><th>시간</th><th>프로그램</th><th colspan="4">내 용</th><th>장소</th></tr>
<tr><td rowspan="8">10/22
(목)</td><td>12:40~17:00</td><td>등 록</td><td colspan="4">등록</td><td>B1 로비</td></tr>
<tr><td rowspan="2">13:00~14:30
(90분)</td><td rowspan="2">기술위원회
포럼</td><td colspan="2">기술위원회 포럼(1)
최신 전력반도체 연구/개발 동향</td><td colspan="2">기술위원회 포럼(2)
미래 전력망 혁신을 위한
광전자·전파·IoT·센서 기술
(한전 전력연구원 공동개최)</td><td rowspan="2">각 룸</td></tr>
<tr><td colspan="2">사파이어 Ⅰ</td><td colspan="2">사파이어 Ⅱ</td></tr>
<tr><td>14:30~14:40</td><td>휴 식</td><td colspan="4">Break Time</td><td></td></tr>
<tr><td>14:40~15:10
(30분)</td><td>대의원회</td><td colspan="4">전기물성 • 응용부문회 대의원회</td><td>에메랄드 Ⅰ</td></tr>
<tr><td>15:10~16:10
(60분)</td><td>포스터
세션 1</td><td colspan="4">포스터 발표 1
전기재료, 스마트 대전력 및 고전압,
전력IoT • 센서, 전력설비 자산관리</td><td>B1 로비</td></tr>
<tr><td>16:10~17:30
(80분)</td><td>개회식 및
정기총회</td><td colspan="4">전기물성 • 응용부문회 개회식 및 정기총회
시상식 : 논문상, 기술상, 특별상
각 기술위원회별 우수활동 기관 시상식
장학생 시상식 / 하계 기관장 수상자 시상식
Japan-Korea Young Researcher
Exchange Program Award</td><td rowspan="2">그랜드볼룸 Ⅰ</td></tr>
<tr><td>17:30~18:10
(40분)</td><td>초청강연</td><td colspan="4">제목 : 해상풍력의 다음 병목, 계통과 전기 인프라
문고영 대표
(알더블유이 리뉴어블즈 코리아(유) 공동대표 / 한국외국기업협회(FORCA) 회장)</td></tr>
<tr><td>18:20~20:00</td><td>만 찬</td><td colspan="4">buffet (장소 : 담음)</td></tr>
<tr><td rowspan="9">10/23
(금)</td><td>08:30~16:00</td><td>등 록</td><td colspan="4">등 록</td><td>로비</td></tr>
<tr><td rowspan="2">09:00~10:30
(90분)</td><td rowspan="2">구두세션 1</td><td>구두 1</td><td>구두 2</td><td>구두 3</td><td>구두 4</td><td rowspan="2">각 룸</td></tr>
<tr><td>전기재료</td><td>광전자 및
전자파</td><td>스마트 대전력 및
고전압</td><td>전력설비
자산관리</td></tr>
<tr><td>10:30~10:40</td><td>휴 식</td><td colspan="4">Break Time</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">10:40~12:10
(90분)</td><td rowspan="2">기술위원회
포럼</td><td colspan="2">기술위원회 포럼(3)
고전압 DC 전하거동의 측정과
해석기술</td><td colspan="2">기술위원회 포럼(4)
전력설비 자산관리 고도화를 위한
기술·정책 동향 및 실증 현황</td><td rowspan="2">각 룸</td></tr>
<tr><td colspan="2">에메랄드 Ⅰ</td><td colspan="2">에메랄드 Ⅱ</td></tr>
<tr><td>12:10~13:30</td><td>중 식</td><td colspan="4">중식 (장소 : 소담)</td><td></td></tr>
<tr><td>13:30~14:30
(60분)</td><td>포스터
세션 2</td><td colspan="4">포스터 발표 2
전기재료, 스마트 대전력 및 고전압,
전력설비 자산관리, 광전자 및 전자파</td><td>B1 로비</td></tr>
<tr><td rowspan="3">14:30~16:00
(90분)</td><td rowspan="3">구두세션 2</td><td colspan="2">구두 5</td><td colspan="2">구두 6</td><td rowspan="3">각 룸</td></tr>
<tr><td colspan="2">스마트 대전력 및 고전압</td><td colspan="2">전력IoT·센서</td></tr>
<tr><td colspan="2">에메랄드 Ⅰ</td><td colspan="2">에메랄드 Ⅱ</td></tr>
<tr><td>16:00~16:10</td><td>휴 식</td><td colspan="4">Break Time</td><td></td></tr>
<tr><td>16:10~16:30</td><td>시상식</td><td colspan="4">우수논문 시상식</td><td>그랜드볼룸 Ⅰ</td></tr>
<tr><td>10/24
(토)</td><td>09:00~13:00</td><td>간담회</td><td colspan="4">산 • 학 • 연과 C부문 상생, 발전을 위한 간담회</td><td></td></tr>
</table>

※ 학술대회 진행시 접수 현황에 따라 변경될 수 있음.

2026 전기물성 · 응용부문회 개회식 및 정기총회

■ 일 시 : 2026년 10월 22일(목)~24일(토)

■ 장 소 : 소노캄 경주 그랜드볼룸 I

<table>
<tr><th>시간</th><th>행사내용</th></tr>
<tr><td>16:10~16:15</td><td>사 회 : 강형구 총무이사
개회사 : 우정욱 (전기물성·응용부문회 회장)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">16:15~17:00</td><td>특별상 시상식
우형주 학술상 : 이기근 교수(아주대학교)
백용현 학술상 : 임장섭 교수(목포해양대학교)
이덕출 학술상 : 양성은 책임(한전 전력연구원)
구자윤-ISH 학술상 : 박현주 수석(한전 전력연구원)
논 문 상 : 임종필(충남대학교)
기 술 상 : 김용한 상무(HD현대일렉트릭)</td></tr>
<tr><td>하계학술대회 우수논문 기관장상 수상자 시상식
<table>
<tr><th>No</th><th>기관장 상명</th><th>논문제목 / 저자</th></tr>
<tr><td>1</td><td>기후에너지환경부 장관상</td><td>보이드 결함이 모의된 에폭시 절연 접속함에서의 부분방전 센서별 신호 특성 분석
정연하*, 고현상, 구동철, 최병화, 정낙훈(한국전력공사)</td></tr>
<tr><td>2</td><td>한국전력공사 사장상</td><td>배전설비 재사용 의사결정 프레임워크에 관한 연구
구본혁*, 김예찬, 김재상, 이제희, 장찬혁, 반인후,
고기원, 강형구(한국교통대)</td></tr>
<tr><td>3</td><td>한국전기연구원 원장상</td><td>PMVE 기반 SF 6 대체 절연가스 혼합물의 절연 및 차단성능 평가
장현재*, 오연호, 전장은, 오호석, 권두경, 송기동(한국전기연구원),
김진규(경북대)</td></tr>
<tr><td>4</td><td>한국토지주택공사 사장상</td><td>케이블 탈기 공정 단축을 위한 저메탄 XLPE 절연재 개발
김선각*, 이태권, 김찬욱, 이영주(한화솔루션)</td></tr>
<tr><td>5</td><td>한국수력원자력 사장상</td><td>EPR 절연재료의 평가 지표에 따른 활성화에너지 분석
김성용*, 김동욱, 황률, 오선민, 이방욱
(HVDC 전력연구실, 한양대 ERICA)</td></tr>
<tr><td>6</td><td>전력거래소 이사장상</td><td>FDS 연계 고에너지아크손상 분석을 위한 유한요소 기반의 DC 아크 해석
김형준*, 이세희(경북대)</td></tr>
<tr><td>7</td><td>한국서부발전 사장상</td><td>방향성 코로나 방전 모니터링용 고감도·초고속 태양광 차단형 UV-C SAW 센서 어레이를 위한 Al_2O_3 개질 β-Ga_2O_3 구조체
Nawaz Faisal*, 이기근(아주대)</td></tr>
<tr><td>8</td><td>한국남동발전 사장상</td><td>DFT 및 유한요소법 기반 다중 스케일 해석을 통한 HVDC용 폴리프로필렌의 공간전하 거동 분석
유승건, 권익수(한국전기연구원), 김민희*(계명대)</td></tr>
<tr><td>9</td><td>한국중부발전 사장상</td><td>SiC 전력소자의 Edge Termination 구조에 따른 고에너지 양성자 조사 중 Single Event Burnout 특성 분석
김상엽*, 김정태, 박가영, 최수빈, 석오균(부산대)</td></tr>
<tr><td>10</td><td>한국전력기술 사장상</td><td>유한요소해석을 활용한 에폭시 마이크로복합체의 열전도율 예측기법 연구
함연우*, 유광열, 김명진(충북대)</td></tr>
<tr><td>11</td><td>LS ELECTRIC 사장상</td><td>질소 플라즈마 처리 시간에 따른 GZO:N/IGZO TFT의 전기적 특성 변화 분석
홍민주*, 김용상(성균관대)</td></tr>
<tr><td>12</td><td>HD 현대 일렉트릭 사장상</td><td>FTA를 활용한 전력용 변압기 Risk-based Inspection 점검항목 선정에 관한 연구
박재덕*, 이승윤, 임선우, 박태식(목포대)</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>시간</th><th>행사내용</th></tr>
<tr><td>16:15~17:00</td><td>

장학생 시상식

No	성명	소속	직위
1	강규혁	부산대학교	박사과정
2	구본혁	한국교통대학교	박사과정
3	김상엽	부산대학교	박사과정
4	김예찬	한국교통대학교	박사과정
5	김윤겸	공주대학교	석사과정
6	류재현	중앙대학교	석사과정
7	박수민	부산대학교	석사과정
8	박재덕	국립목포대학교	연구원
9	성현모	중앙대학교	석사과정
10	안영국	Tokyo City University	박사과정
11	이승윤	국립목포대학교	박사과정
12	이주봉	부경대학교	석사과정
13	정현수	국립목포대학교	박사과정
14	정형준	공주대학교	석사과정
15	천창영	충북대학교	박사과정

우수활동 기관 현판식

No	기관	연구실
1	한국교통대학교	강형구 교수님 연구실
2	부산대학교	석오균 교수님 연구실
3	한국전자통신연구원	박형준 책임연구원 연구실

Japan-Korea Young Researcher Exchange Program Award

Mr. Jumpei Ezaki (Ehime University)

</td></tr>
<tr><td>17:00~17:30</td><td>제27회 전기물성·응용부문회 정기총회</td></tr>
<tr><td>17:30~18:10</td><td>

• **초청강연**

제목 : 해상풍력의 다음 병목, 계통과 전기 인프라

(제도 전환 이후, 한국 해상풍력이 전기물성·응용 분야에 여는 시장과 기술 과제)

문고영 (알더블유이 리뉴어블즈 코리아(유) 공동대표 / 한국외국기업협회(FORCA) 회장)

초청강연 자료집

</td></tr>
<tr><td>18:20~20:00</td><td>만찬(장소이동) 장소 : 담음</td></tr>
</table>

좌장 및 발표자 진행안내

1. 구두 세션 발표 안내

- 발 표 시 간 : 15분 (발표, 질의. 응답)
- 시청각 기자재 : 빔프로젝터 사용
- 발표자 준비물 : 발표용 파일(USB) 준비

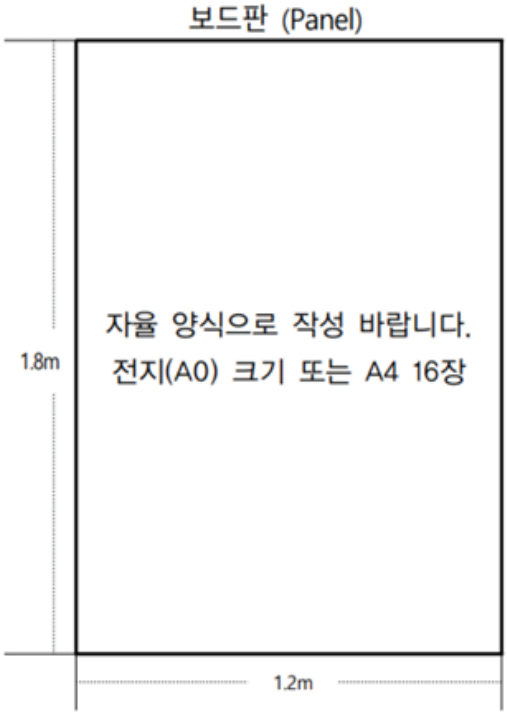
2. 포스터 세션 발표 안내

- 포스터 발표 준비요령은 다음과 같음.

• 발표시간 : 60분
• 발표준비 : 발표 시작 5분전까지 포스터 부착
저자 중 1명은 필히 포스터 앞에서 질문에 답변을 하여야 함.
• 발표종료 : 논문 발표 후 5분 이내에 포스터 부착물을 뗄 것.

1) Panel 크기 : 120cm(가로)×180cm(세로)
2) 제목, 저자, 소속 글자 크기 (가능한 한 맞출 것)
3) 내용은 간결하고 분명할 것.
4) 논문 내용은 A4용지 16장 이내로 제한 함.
단, 오른쪽은 예시이며 자유형식으로 부착 발표 가능.
ex) A4, A3, 전지 등 Panel 크기 넘지 않으면 됨.
5) 포스터 발표 판넬 견본 (옆 그림 참조)

※ 논문 번호 외에는 본인이 직접 만들어서 발표시작 전에 주어진 번호의 Panel에 부착하여야 함.
(부착용 테이프나 핀은 등록 데스크에 준비되어 있음.)
※ 논문번호는 대회본부에서 부착함.



• 판넬 이미지 바꿈.

3. 좌장 진행 안내

① 좌장은 담당 분과 시작 10분전까지 발표장에 입실
② 발표자들이 모두 참석했는지 발표시간 전에 확인
③ 발표시간은 구두발표 15분(질의응답 포함), 포스터발표 60분
④ 시간을 알리는 종은 3분 남았을 경우 한번, 종료 시각일 경우 두 번 종을 울림
⑤ 좌장은 좌장석에 비치되어 있는 좌장보고서를 작성하신 후 진행요원에게 전달
⑥ 좌장은 구두발표의 경우 연구책임자, 포스터 발표의 경우 주저자의 발표장 참석을 확인

좌 장 명 단

구두 세션

일정	위치	발표분야	발표논문	좌 장
구두세션 1 10월23일 09:00~10:30	사파이어 Ⅰ	전기재료	OS1 01~05	김정길 교수 (동아대학교)
	사파이어 Ⅱ	광전자 및 전자파	OS2 06~11	박병석 수석 (한전 전력연구원)
	에메랄드 Ⅰ	스마트 대전력 및 고전압 Ⅰ	OS3 12~15	이세희 교수 (경북대학교)
	에메랄드 Ⅱ	전력설비 자산관리	OS4 16~20	박태식 교수 (목포대학교)
구두세션 2 10월23일 14:30~16:00	에메랄드 Ⅰ	스마트 대전력 및 고전압 Ⅱ	OS5 21~24	임장섭 교수 (목포해양대학교)
	에메랄드 Ⅱ	전력IoT・센서	OS6 25~28	박명혜 소장 (한전 전력연구원)

포스터 세션

구 분	장소	발표분야	발표논문	좌 장
포스터 세션 1 10월22일 15:10~16:10	B1 로비	전기재료 Ⅰ	PS1 001~011	김동석 박사 (한국원자력연구원)
		스마트 대전력 및 고전압기술 Ⅰ	PS1 012~023	박혜리 교수 (동아대학교)
			PS1 024~035	김명진 교수 (충북대학교)
		전력IoT・센서	PS1 036~047	김영현 책임 (한전 전력연구원)
		전력설비 자산관리Ⅰ	PS1 048~055	강형구 교수 (한국 교통대학교)
포스터 세션 2 10월23일 13:30~14:30	B1 로비	전기재료 Ⅱ	PS2 056~066	석오균 교수 (부산대학교)
		스마트 대전력 및 고전압기술 Ⅱ	PS2 067~080	강형구 교수 (국립한국교통대학교)
			PS2 081~092	김민희 교수 (계명대학교)
		전력설비 자산관리 Ⅱ	PS2 093~101	박태식 교수 (목포대학교)
		광전자 및 전자파	PS2 102~113	박형준 책임 (한국전자통신연구원)

등록 안내

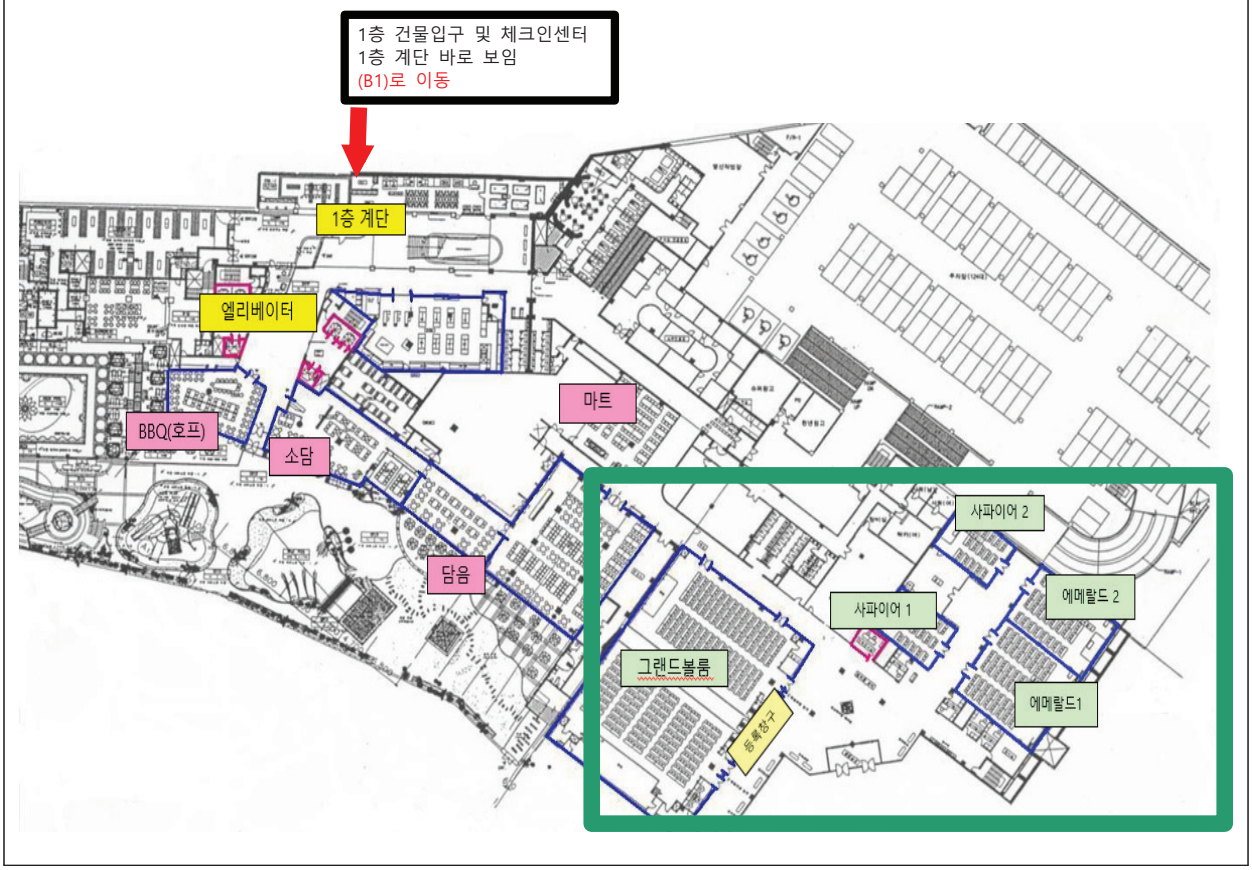
등록비

구 분	정회원	준회원(석사)	준회원(학부)	비회원	등록 기한
사전등록	200,000	140,000	50,000	230,000	10월 2일까지
현장등록	230,000	170,000	80,000	250,000	행사 당일

* 등록시 제공사항 : 만찬(22일), 중식(23일) 기념품

학술대회장 배치도

소노캄 경주 B1



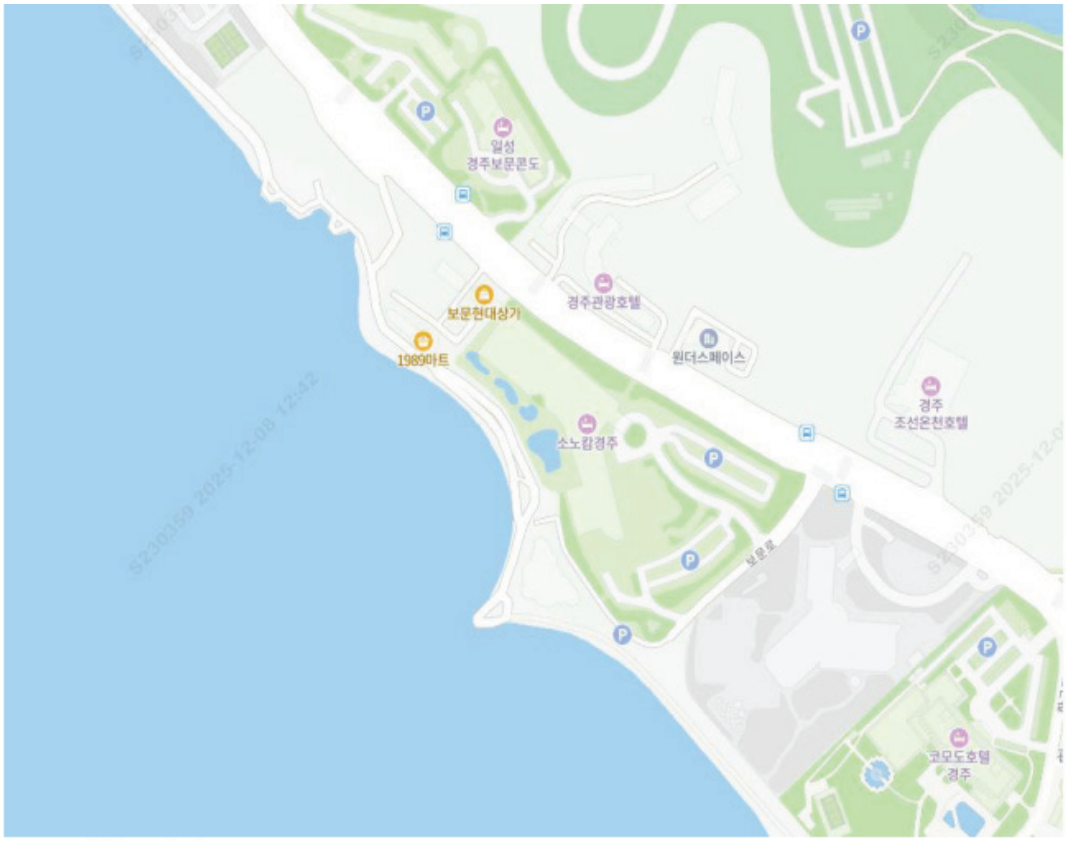
* **B1 로비** : 등록창구 (네임텍 및 영수증, 논문집, 기념품 수령)
* **각 룸** : 초청강연, 포럼, 구두발표, 포스터발표, 대의원회, 정기총회, 우수논문시상식

* **10/22(목)**
  사파이어 1 : 최신 전력반도체 연구/개발 동향
  사파이어 2 : 미래 전력망 혁신을 위한 광전자·전파·IoT·센서기술
  에메랄드 1 : 대의원회, 개회식 및 정기총회

* **10/23(금)** : B1 로비 : 포스터 발표
  사파이어 1.2 / 에메랄드 1.2 : 구두발표
  에메랄드 1 : 고전압 DC 전하거동의 측정과 해석기술
  에메랄드 2 : 전력설비 자산관리 고도화를 위한 기술·정책 동향 및 실증 현황
  그래드볼륨 1 : 우수논문 시상식

* **10/24(토)** : 산・학・연과 C부문 상생, 발전을 위한 간담회 (*행사일정 및 인원에 따라 취소 및 변경될 수 있습니다.)

찾아오시는 길



※ 주소: 경상북도 경주시 보문로 402-12

구분	출발지	이동 구간	소요시간
자차	서울	서울 → 경주	약 4시간
자차	부산	부산 → 경주	약 1시간 30분
자차	강원	강원 → 경주	약 4시간

구분	출발지	이동 구간	소요시간
고속버스	서울고속버스터미널	서울고속버스터미널 → 경주고속터미널	약 4시간
KTX	수서역	수서역 → 경주역	약 2시간
SRT	부산역	부산역 → 경주역	약 30분

경주역에서 오시는 길

택시 이용 시	버스 이용 시
경주역 택시승강장 탑승 (약 25분 소요, 요금 약 2만원)	700번, 710번 버스 탑승 → 소노캄 경주(보문관광단지) 인근 정류장 하차 (약 50분 소요)

학 술 프 로 그 램

전기재료 기술위원회 주관

최신 전력반도체 연구/개발 동향

소노캄 경주 B1 사파이어 I 10월 22일(목) 13:00~14:30

사회 : 석오균 교수 (부산대학교)

시 간	발 표 제 목	발 표 자
13:00~13:18	차량용 및 우주항공용 전력반도체 설계기술	석오균 교수 (부산대학교)
13:18~13:36	Wafer-level double pulse test 기술	강혜민 교수 (한국에너지공과대학교)
13:36~13:54	GaN-based HEMT Technology	김정길 교수 (동아대학교)
13:54~14:12	WBG 전력반도체 기반 고전력밀도 전력변환 기술	김민기 교수 (국립공주대학교)
14:12-14:30	전력반도체의 우주방사선 영향 신뢰성 평가	김동석 책임 (한국원자력연구원)

광전자 및 전파기술위원회, 전파IoT • 센서기술위원회, 한전 전력연구원 공동개최

미래 전력망 혁신을 위한 광전자 · 전파 · IoT · 센서 기술

소노캄 경주 B1 사파이어 II 10월 22일(목) 13:00~14:40

사회 : 박형준 책임(한국전자통신연구원)

시 간	발 표 제 목	발 표 자
13:00~13:20	AIDC 저전력화를 위한 광인터커넥션 기술	이종진 책임 (한국전자통신연구원)
13:20~13:40	레이저 무선 전력전송 연구동향	전창수 책임 (고등광기술연구원)
13:40~14:00	부분방전 펄스의 특성과 측정기술	선종호 책임 (한국전기연구원)
14:00~14:20	한국전력 AI 기술 개발 추진 동향	박병석 수석 (한전 전력연구원)
14:20~14:40	한수원 생성형AI(Hy-Nuri) 구축 및 활용사례	정찬준 차장 (한국수력원자력)

스마트대전력 및 고전압 기술위원회 주관

고전압 DC 전하거동의 측정과 해석기술

소노캄 경주 B1 에메랄드 I 10월 23일 (금) 10:40~12:10

사회 : 이준호 교수 (호서대학교)

시 간	발 표 제 목	발 표 자
10:40~11:10	미래의 에너지안전	송길목 에너지안전 PD (에너지기술평가원)
11:10~11:40	고전압 절연성능의 이해와 예측을 위한 물리 기반 수치해석 - 전하수송에서 멀티스케일 모델링까지	김민희 교수 (계명대학교)
11:40~12:10	DC 전압 하에서의 공간전하 측정 기술 및 절연재료 평가	안영국 특별연구원 (Tokyo City University)

전력설비 자산관리 기술위원회 주관

전력설비 자산관리 고도화를 위한 기술·정책 동향 및 실증 현황

소노캄 경주 B1 에메랄드 II 10월 23일 (금) 10:40~12:10

사회 : 박태식 교수(국립목포대학교)

시 간	발 표 제 목	발 표 자
10:40~10:45	전기물성・응용부문회 회장 인사말씀	우정욱 회장 (전기물성·응용부문회)
10:45~11:02	전력설비 자산관리 체계 고도화 방향과 추진 현황	최우성 팀장 (한전 전력연구원)
11:02~11:19	AI 기반 전력설비 자산관리 솔루션	서황동 팀장 (㈜효성)
11:19~11:36	자산관리 개발 현황 및 국제표준 (2026년 CIGRE 참관기)	강형구 교수 (국립한국교통대학교)
11:36~11:53	AI 기반 전력설비 자산관리 시스템 개발 현황	서영덕 Manager (LS ELECTRIC)
11:53~12:10	전력설비 자산관리 향후 연구 및 개발 방향	박태식 교수 (국립목포대학교)

논문 차례 [구두/포스터]

구두발표 1 전기재료

사파이어 I **10월 23일(금) 09:00~10:30** **좌장 : 김정길 교수(동아대학교)**

OS1-01 P-shield 구조를 적용한 650V SiC planar MOSFET의 단락 특성 분석 ····· 29
김주희, 김상엽, 강규혁, 최수빈, 박가영, 정준기, 석오균(부산대)

OS1-02 다중 에피택셜 성장 공정을 적용한 1.2 kV SiC Super Junction MOSFET 설계 ····· 30
박수민, 정준기, 양승리, 김상엽, 강규혁, 김주희, 석오균(부산대)

OS1-03 SiC MOSFET, SBD 내장 MOSFET 및 Cascode JFET의 구조 의존적 False Turn-on 메커니즘 비교 및 고온 거동 분석 ····· 31
강규혁, 정승완, 박진우, 류종현, 석오균(부산대)

OS1-04 고에너지 양성자 조사에 따른 SiC Edge Termination의 산화막 전계 집중과 불완전 이온화 영향 분석 ····· 32
김상엽, 김정태, 김주희, 석오균(부산대)

OS1-05 상용 Si 및 SiC MOSFET의 게이트 전하 구성비 비교 ····· 33
김현진, 김민재, 하민우(명지대), 김민기(공주대), 강동원(중앙대)

구두발표 2 광전자 및 전자파

사파이어 II **10월 23일(금) 09:00~10:30** **좌장 : 박병석 수석(한전 전력연구원)**

OS2-06 탄소나노튜브 폴리머 코팅 및 저직경 FBG 기반 자외선 센서 감도 향상 연구 ····· 35
박정원, 안태정(조선대)

OS2-07 실시간 레이저빔 분석 및 능동제어 ····· 36
전창수(광주과학기술원)

OS2-08 재사용발사체의 GBAS 기반 운용을 위한 위성 가시성 분석 ····· 37
황수설(한국항공우주연구원)

OS2-09 내부 기준 신호를 활용한 광섬유 전류센서의 위상 복조 및 측정 안정성 연구 ····· 38
박형준(한국전자통신연구원), 송민호(전북대)

OS2-10 광주파수영역 반사계 기반 극저온 액면 감지 시스템의 구현 및 특성 분석 ····· 39
김대길, 최유빈, 박형준(한국전자통신연구원)

OS2-11 가스절연개폐장치에서 단일 및 다중 결함에 따른 부분방전 펄스 특성 분석 ····· 40
홍태윤, 선종호(한국전기연구원)

구두발표 3 스마트 대전력 및 고전압 I

에메랄드 I **10월 23일(금) 09:00~10:30** **좌장 : 이세희 교수(경북대학교)**

OS3-12 HVDC 변압기 부싱의 포일 변형 및 비접지 결함에 따른 과도 전계 특성 해석 ····· 43
김관혁, 곽유진, 이방욱(한양대), 이종건(한전 전력연구원)

OS3-13 배전급 진공차단기(VCB)의 주요 열화인자 기반 상태 진단 및 잔존 수명 평가 ····· 44
권정훈, 전영균, 배채윤(LS 일렉트릭), 강희원(한국기계전기전자시험연구원),
김명진(충북대)

OS3-14 에폭시/SiO_2 나노복합재료의 전하 트랩 깊이 평가 방법 ····· 47
천창영, 함연우, 구도영, 권도희, 김명진(충북대), 김민희(계명대)

OS3-15 Polarity Dependence of Discharge Light Emission in an Electrical Tree Branch Leading to Breakdown in Silicone Rubber ····· 48
Jumpei Ezaki, Aoto Ueno, Hyeon-Gu Jeon, and Haruo Ihori(Ehime University)

구두발표 4 전력설비 자산관리

에메랄드 II **10월 23일(금) 09:00~10:30** **좌장 : 박태식 교수(목포대학교)**

OS4-16 복소 모호성 함수를 이용한 케이블 전파상수 추정 ····· 50
이주봉, 김한성, 이춘권(부경대)

OS4-17 지식그래프 기반 GNN을 활용한 변압기 고장 가설 추론 및 점검 우선순위 선정 연구 ····· 52
이승윤, 임선우, 정현수, 박태식(목포대)

OS4-18 유연 자원의 계통 특성을 고려한 신뢰도 CoF 산정에 관한 연구 ····· 53
임선우, 정현수, 오세훈, 박태식(목포대)

OS4-19 전력케이블 자산관리를 위한 Health Index 프레임워크 개발에 관한 연구 ····· 55
김예찬, 구본혁, 고기원, 반인후, 이제희, 장찬혁, 강형구(한국교통대), 김원영, 권중지,
박재우(LS전선)

OS4-20 결측정보를 고려한 철거 배전설비 재사용 판정 알고리즘 ····· 56
구본혁, 김예찬, 이제희, 장찬혁, 반인후, 고기원, 강형구(한국교통대)

구두발표 5 스마트 대전력 및 고전압 II

에메랄드 I **10월 23일(금) 14:30~16:00** **좌장 : 임장섭 교수(목포해양대학교)**

OS5-21 이중층 절연 구조에서 공간전하 분포와 전도전류 측정을 통한 계면전하 분석 ····· 58
안영국, Hiroaki Miyake, Naoshi Hirai, Yasuhiro Tanaka(Tokyo City University)

OS5-22 불평등 전계에서 SF_6 가스의 DC 중첩 뇌임펄스 극성별 절연파괴 특성 분석 ····· 59
고건, 권일, 이방욱(한양대), 허창근, 황휘동, 정동훈(효성 중공업연구소)

OS5-23 단락에너지 노출에 따른 K6 친환경 절연가스의 PMVE 농도 변화 및 절연내력 평가 ····· 60
장현재, 오연호, 전장은, 오호석, 권두경(한국전기연구원), 김진규(경북대)

OS5-24 기중 코로나 결함의 DC 부분방전 개시전압 측정에 관한 연구 ····· 61
김예찬, 구본혁, 이제희, 장찬혁, 고기원, 반인후, 강형구(한국교통대),
김용주(O&M Korea)

구두발표 6 전력IoT · 센서

에메랄드 II **10월 23일(금) 14:30~16:00** **좌장 : 박명혜 소장(한전 전력연구원)**

OS6-25 재생에너지 발전현황 모니터링을 위한 신재생 데이터 통합 플랫폼 기술 개발 ····· 63
김영일, 노재구, 김예리, 신진호(한전 전력연구원)

OS6-26 효율적인 유사사례 탐색을 위한 데이터 증강 방법론 ····· 64
이현민, 장민영, 박병석(한전 전력연구원)

OS6-27 AI 기반 전력시장 온톨로지 구축 자동화 및 응용 ····· 65
최윤아, 권성구, 김시연(한전 전력연구원)

OS6-28 전력설비 전선 이상진단을 위한 AI 이상판별 파이프라인 설계 ····· 66
김영현, 박병석, 박명혜(한전 전력연구원)

포스터 발표 1 10월 22일(목), 15:10~16:10

▌전기재료 ▐

B1 로비 **좌장 : 김동석 박사(한국원자력연구원)**

PS1-001 MLCC의 유전 흡수를 측정하는 Standard인 MIL-PRF-19978의 이해 ····· 68
김현진, 김민재, 하민우(명지대), 김민기(공주대), 강동원(중앙대)

PS1-002 전력기기 에폭시 절연소재의 정량평가에 관한 연구 ····· 69
손흥민, 김성일, 김상기, 송민규, 서주영(한국전력공사)

PS1-003 폐 XLPE 재생 기술을 활용한 전력케이블 개발 ····· 70
양종석, 박찬주, 신동훈, 홍동석(대한전선 기술연구소)

PS1-004 0.6/1kV 전력케이블용 PP 절연 컴파운드의 조성에 따른 열노화 및 전기·기계적 특성 연구 ····· 71
이경용, 박주환, 이인영, 이종규, 김연환(에스와이폴리텍 기술연구소)

PS1-005 PLZT 커패시터의 초기 용량, 유효 용량 및 공칭 용량 비교 ····· 72
김현진, 김민재, 하민우(명지대), 김민기(공주대), 강동원(중앙대)

PS1-006 p-GaN HEMT의 중이온 유발 SEE 완화를 위한 TCAD 시뮬레이션 연구 ····· 73
이아현(한국원자력연구원, 동아대), 김정길(동아대),
김동석(한국원자력연구원 , 과학기술연합대학원대)

PS1-007 알루미나 마이크로 필러가 혼합된 폴리프로필렌계 절연재료 복합체의 열적 · 전기적 특성에 대한 고찰 ····· 74
주교연, 조문정, 홍신기, 장은지, 유승건(한국전기연구원), 김성준, 권나현(부산대)

PS1-008 1.2 kV SiC MOSFET의 게이트 구조별 감마선 및 양성자 복합 영향평가 ····· 75
김연준(한국원자력연구원, [2]한국에너지공과대), 이준혁, 강혜민(한국에너지공과대),
김동석(한국원자력연구원, 과학기술연합대학원대)

PS1-009 AI/ML 기반 ITO 나노입자의 가상 합성 조건별 물성 예측 및 최적화 ····· 76
홍성제, 한철종(한국전자기술연구원)

PS1-010 AI/ML 기반 OLED 증착 소재 사전 혼합 공정 및 물성 예측 모델링 ····· 77
홍성제, 이찬재(한국전자기술연구원)

PS1-011 Ni 및 Cu 나노입자의 합성 변수별 AI/ML 기반 물성 예측 모델링 ····· 78
홍성제(한국전자기술연구원)

▌스마트 대전력 및 고전압기술 ▏

B1 로비 **좌장 : 박혜리 교수(동아대학교)**

PS1-012 대용량 신전선(HCSC) 적용에 따른 362kV GIS 과부하 정격 정립 필요성 고찰 ····· 80
오승열, 이종건, 정문규, 이철학, 정민경, 구재홍(한전 전력연구원),
김성태(한국표준과학연구원)

PS1-013 고분자 복합재료의 열-전기적 거동에 관한 이미지 기반 모델링 ····· 81
김민희(계명대), 권익수, 유승건(한국전기연구원)

PS1-014 HVDC 변환용 변압기 진단시스템 개발 ····· 82
이종건, 정민경, 주형준, 구재홍(전력연구원)

PS1-015 오염 및 결로 조건에 따른 에폭시 몰드 부싱의 전계분포 특성 연구 ····· 83
천창영, 김재훈, 김명진(충북대)

PS1-016 Bakelite 절연물의 AC 및 DC 관통 절연파괴 특성 분석 ····· 84
반인후, 김예찬, 구본혁, 고기원, 장찬혁, 이제희, 강형구(한국교통대)

PS1-017 비균일 DC 전계에서 전계 의존 전하 주입을 고려한 PINN 기반 양극성 전하 수송 해석 ····· 85
이도헌, 이세희(경북대)

PS1-018 해저케이블 Factory Joint의 부분방전 측정 방법에 대한 연구 ····· 86
원용욱, 정재철, 홍동석(대한전선)

PS1-019 해수 대류에 의한 해저케이블 열방산 특성 분석 ····· 87
임종필, 박흥석, 박민솔, 나진용, 정채균(한전 전력연구원), 홍순명, 이익형(한국전력공사)

PS1-020 프레스보드지 적층 조건에 따른 DC 관통절연파괴 특성 분석 ····· 88
오선민, 유찬열, 김성용, 황률, 이방욱(HVDC 전력연구실, 한양대 ERICA),
양부승(HD현대일렉트릭), 박상훈(일진전기)

PS1-021 두 원형 공극의 배열각에 따른 부분방전 특성 ····· 89
최민준, 고동현, 권오민, 김명진(충북대)

PS1-022 3심 아머 해저케이블의 손실 산정 방법에 따른 허용전류 비교 분석 ····· 90
박민솔, 박흥석, 임종필, 정채균(한전 전력연구원), 홍순명, 이익형(한국전력공사)

PS1-023 50/1500us 임펄스 전류 인가에 따른 직류 차단기용 금속 산화물 바리스터의 동적 V-I 특성 편차 분석 ····· 91
이정철, 권일, 곽유진, 오연주, 이방욱(한양대), 정동훈, 황휘동,
허창근(효성중공업 연구소)

B1 로비 **좌장 : 김명진 교수(충북대학교)**

PS1-024 금속 증기 재증착 계수가 LTE 직류 아크 특성에 미치는 영향에 관한 수치해석 연구 ····· 93
김형준, 이세희(경북대)

PS1-025 유효 일함수 변화에 따른 피뢰침 선단의 초기 스트리머 개시 특성 분석 ····· 94
유찬종, 최성은, 장경훈(한국건설생활환경시험연구원)

PS1-026 유한요소해석을 이용한 유전체의 트랩에너지 추정 ····· 95
김민우, 신효준, 이도헌, 이세희(경북대)

PS1-027 변압기 유로 형상 조건과 유속을 고려한 절연유 유동대전 특성 연구 ····· 96
정세원, 이은수, 김준범, 이예진, 김민희(계명대)

PS1-028 증용량 신전선의 표면전계 저감 효과 분석 ····· 97
최경섭, 김로이, 신동혁(한전 전력연구원)

PS1-029 저압 소전류 DC 차단기 내 플레이트 재질의 자성 유무 및 배치 조건에 따른 아크 거동 및 소호 특성 분석 ····· 98
오연주, 곽유진, 이정철, 이방욱(한양대 ERICA), 이규호(LS ELECTRIC)

PS1-030 압력 변화에 따른 K6 친환경 절연가스의 AC 절연파괴전압 특성 ····· 99
장찬혁, 김예찬, 구본혁, 이제희, 반인후, 고기원, 강형구(한국교통대)

PS1-031 반향 지배 고정자에서 교차 스펙트럼 그래프 지문을 이용한 AE 기반 부분방전 위치추정 ····· 100
김민희(계명대), 조용성(한국전기연구원)

PS1-032 OF케이블 선로에서 철거된 유입 접속함의 정밀 분석을 통한 유지보수 방안 고찰 ····· 101
정연하, 고현상, 구동철, 최병화, 정낙훈(한국전력공사)

PS1-033 DC 전기장에 따른 절연유-프레스보드 계면의 전기이중층 거동 분석 ····· 102
이은수, 정세원, 김준범, 이예진, 김민희(계명대)

PS1-034 전압 파형에 따른 도선 절연체 보이드의 부분방전 및 전기적 거동 분석 ····· 103
김준범, 이은수, 이예진, 정세원, 김민희(계명대)

PS1-035 PMJ 접속함 돌기 결함에 따른 개폐임펄스 영향 분석 ····· 105
고현상, 구동철(한전 전력연구원), 김우종, 홍순명(한국전력공사)

▌전력IoT · 센서

B1 로비 **좌장 : 김영현 책임(한전 전력연구원)**

PS1-036 시간영역반사측정법(TDR)을 이용한 PCB 기반 전압 센서의 내부 결함 검출 방법 ····· 107
김준수(HD현대일렉트릭)

PS1-037 UHF 센서를 이용한 회전기 부분방전 측정시험 연구 ····· 108
조철희, 민병운, 배광돈, 이단비(HD현대일렉트릭)

PS1-038 나노입자/박막 하이브리드 구조를 이용한 HfO_2 기반 SAW UV-C 센서 개발 ····· 109
마르조나 라비모바, 누리딘 타바칼로프, 이기근(아주대)

PS1-039 계약문서 사전검토 지원을 위한 문서 분석 시스템 ····· 111
김아영, 김영준, 박병석(한전 전력연구원)

PS1-040 사이클 분할 응답 특징과 인공지능 기반 전략적 접근을 통한 바나듐 산화물 기반 표면탄성파 가스 센서의 가스 선택성 분석 ····· 112
KOEU SOK IM, NawazFaisal, 이기근(아주대)

PS1-041 Local Controller를 활용한 우선순위 기반 전기차 충전소 전력제한 분배 알고리즘 기초연구 ····· 114
최지원, 강수경, 최인지, 박병석(한전 전력연구원)

PS1-042 V2G 활성화를 위한 AMI 연계 V2G 융합기술 검토와 경제성 평가 프레임워크 제안 ····· 115
최인지, 강수경, 최지원, 박병석(한전 전력연구원)

PS1-043 초고압 GIS용 광통신 기반 LPIT 신호전송 구조의 설계 및 성능 검증 ····· 117
이정복, 박주언, 김준수(HD현대일렉트릭)

PS1-044 온디바이스 AI 기반 예방진단 알고리즘 성능 평가 방법 설계 ····· 118
옥승훈, 정호용, 정무구(HD현대일렉트릭)

PS1-045 배전자동화용 e-WSN 이기종 단말의 상호운용성 구현 및 검증 ····· 119
신수호, 김영현, 김종주, 박병석, 박명혜(한전 전력연구원)

PS1-046 전력설비 감시 및 제어를 위한 고출력 GW 기반 e-WSN 현장 실증 ····· 120
김종주, 김영현, 박병석, 신수호(한전 전력연구원)

PS1-047 무선망 기반 차량 촬영 이미지 원격전송 및 클라우드 연계 전력설비 이상판별 시스템 ····· 122
최백균, 김영현, 박병석, 박명혜(한전 전력연구원)

▌전력설비 자산관리 Ⅰ

B1 로비 **좌장 : 강형구 교수(국립한국교통대학교)**

PS1-048 23kV 건조공기 개폐장치 분해가스 진단을 위한 에폭시 절연물 열화생성물 특성 분석 및 정량평가 ····· 124
전태현, 곽병섭, 김아름, 임병훈, 김예슬, 박현주(한전 전력연구원)

PS1-049 Model Reference Adaptive System을 통한 전력전자 시스템 디지털 트윈에 관한 연구 ····· 125
김태훈, 박재덕, 이승윤, 박태식(목포대)

PS1-050 점검 불확도를 고려한 전력용 변압기의 점검주기 선정에 관한 연구 ····· 127
박재덕, 이승윤, 임선우, 박태식(목포대)

PS1-051 GFM 인버터 건전도 지수(Health Index)에 관한 연구 ····· 129
정현수, 오세훈, 오정식, 박태식(목포대)

PS1-052 국내 계통 환경을 고려한 분로리액터의 신뢰도 CoF 산정에 관한 연구 ····· 131
오세훈, 김태훈, 이지연, 박태식(목포대)

PS1-053 산란계수 기반 변압기 디스크 권선 등가회로 정수 추정 ····· 133
성현모, 장승진(중앙대)

PS1-054 노후 풍력발전설비 안전등급 평가항목 및 판정체계 구축을 위한 기초연구 ····· 134
류재현, 성현모, 장승진(중앙대)

PS1-055 물리정보 신경연산자를 활용한 변압기 절연지 열화 예측 ····· 135
임재현, 김명진(충북대)

포스터 발표 2 10월 23일(금), 13:30~14:30

▌전기재료 Ⅱ

B1 로비 **좌장 : 석오균 교수(부산대학교)**

PS2-056 기생 커패시턴스를 활용한 이중 게이트 박막 트랜지스터 기반 μLED 화소 회로 ····· 137
우혜원, 이현준, 여준호, 김용상(성균관대)

PS2-057 모듈형 멀티레벨 컨버터 적용을 위한 3.3–10 kV급 SiC MOSFET 스위칭 손실의 정량적 분석 ····· 138
김기용, 박현용, 강혜민(한국에너지공과대), 유선호(한전 전력연구원)

PS2-058 패키지 형태에 따른 SiC MOSFET 크로스토크의 정량 비교 ····· 140
박현용, 이준혁, 강혜민(한국에너지공과대)

PS2-059 P-shield 및 CSL 구조 최적화를 통한 6.5 kV 4H-SiC Trench IGBT 설계 ····· 141
문호연, 김준성, 강혜민(한국에너지공과대)

PS2-060 OLEDoS 디스플레이 구현을 위한 누설 방지 구조 및 공정 기반 소자 최적화 ····· 143
하대철, 김용상(성균관대)

PS2-061 채널 둘레-면적비에 따른 a-IGZO 박막 트랜지스터의 문턱전압 이하 스윙 변화 분석 ····· 144
이형노, 김용상(성균관대)

PS2-062 Epoxy/DGEBA:YDCN 함량별 Composites의 전기적, 기계적 그리고 열적특성 연구 ····· 145
김찬, 남재원, 장동호, 박재준(중부대), 김병철(한국폴리텍대), 이보인(Deesys), 임필남(이티에스이엔지), 김병준(서원엠이씨)

PS2-063 압전 에너지 하베스팅 기반 간헐 부하 구동을 위한 전원관리 회로의 설계 및 구현 ····· 148
김종민, 조항백, 김민기(공주대)

PS2-064 고주파 전력 변환을 위한 유한 및 무한 DC-Feed 인덕턴스 Class E 인버터의 비교 분석 ····· 149
홍석주, 안설호, 김원호, 김민기(공주대)

PS2-065 인공지능 기반 진동 센서를 활용한 투명 재료 분류 시스템 ····· 150
임현빈, 김동겸, 김원호, 김민기(공주대)

PS2-066 고전압 절연재용 iPP/MA-g-PP/SiO_2 복합체의 절연특성 분석 ····· 151
홍신기(큐슈공업대, 한국전기연구원), 주교원, 장은지, 조문정, 유승건(한국전기연구원), Masahiro Kozako(큐슈공업대)

▌스마트 대전력 및 고전압기술 II

B1 로비 **좌장 : 강형구 교수(국립한국교통대학교)**

PS2-067 고주파 PWM 전압의 dv/dt 파형에 따른 기중 방전 특성 유한요소 해석 ····· 153
최태영, 조은빈, 이세희, 신효준(경북대)

PS2-068 DC 전계 내 세라믹 및 실리콘 고무 표면의 물방울 변형과 섬락 특성 비교 ····· 154
김린우, 류가윤, 박범진(경국대)

PS2-069 SiO_2/h-BN 이종필러 첨가에 따른 에폭시 복합재료의 열적 특성 변화 ····· 155
천창영, 유광열, 함연우, 김명진(충북대)

PS2-070 적층 유전체 간 유전율 비에 따른 전계분포 해석 ····· 156
임성현, 황재은, 박혜리(동아대), 임동영(한국폴리텍대)

PS2-071 회전기 운전 온도에 따른 고정자 코일용 SGT의 전계완화 성능 분석 ····· 157
함연우, 권도희, 구도영, 강대한, 김명진(충북대), 김유민(한국전기연구원)

PS2-072 온도상승계수 기반 알루미늄 나전선의 접속 방식에 따른 발열특성 통계적 분석 ····· 158
김가현, 서예슬, 임장섭(목포해양대)

PS2-073 접촉저항을 고려한 압축 슬리브의 열적 거동 분석 ····· 159
정민우, 이세희(경북대)

PS2-074 전기차 스케쥴링에 따른 변압기 열화 양상 변화 분석 ····· 160
유태종, 김명진(충북대)

PS2-075 tanδ 기반 수트리 진단의 한계 검토를 위한 XLPE 유전특성 측정 및 유한요소해석 ····· 161
서예슬, 김가현, 임장섭(목포해양대)

PS2-076 전력용 변압기 DGA 시각화를 위한 열화진행 패턴 분류 및 모델링 ····· 162
김수정, 서예슬, 김가현, 이경민, 임장섭(목포해양대)

PS2-077 다각 구조 철탑의 환경조화 외장재 적용방안에 관한 연구 ····· 163
오준암, 심다보(한전 전력연구원)

PS2-078 OF 지중송전 케이블 접속함 내 사용되는 에폭시 절연물의 전압과 온도 가속에 따른 전기트리 특성에 관한 연구 ····· 164
박재준, 김건희, 김태영, 강민수, 셀조드(중부대), 허인회(대광중전기),
표판식(한전 전력연구원)

PS2-079 전압 상승시간 및 두께에 따른 폴리프로필렌 절연필름의 공간전하 축적과 국부전계 왜곡 해석 ····· 166
이예진, 김준범, 이은수, 정세원, 김민희(계명대)

PS2-080 복합 부분방전 신호 분리를 위한 DBSCAN과 HDBSCAN의 군집 특성 정량 분석 ····· 168
장경훈, 유찬종, 최성은(한국건설생활환경시험연구원)

B1 로비 **좌장 : 김민희 교수(계명대학교)**

PS2-081 장거리 선로 적용을 위한 산업용 전력케이블에서의 VLF tanδ 판정 기준의 확장 ····· 170
이경민, 김가현, 서예슬, 천미소, 임장섭(목포해양대)

PS2-082 열적 열화에 따른 Stress Grading Tape의 전기전도 특성 변화 분석 ····· 171
강대한, 함연우, 최민준, 양재희, 유태종, 김명진(충북대)

PS2-083 초고압케이블 접속함 에폭시 마이크로콤포지트의 전기트리특성 연구 ····· 172
박재준, 강민규, 김미르, 김재현, 최민기(중부대), 이세인(한국EDC기술),
전완수(에스원), 권태광(타키온스), 나상호(한국폴리텍대)

PS2-084 Kapton 절연 REBCO 선재의 절연구조와 진공 조건에 따른 턴간 절연파괴 특성 ····· 174
고기원, 구본혁, 김예찬, 반인후, 이제희, 장찬혁, 강형구(한국교통대)

PS2-085 AI를 활용한 다각 구조 철탑의 설계 최적화에 관한 연구 ····· 175
심다보, 오준암(한전 전력연구원)

PS2-086 온도에 따른 절연유 함침 프레스보드의 DC 도전율 특성 분석 ····· 176
이재민, 유찬열, 배영준, 이방욱(한양대), 고원희(HD현대일렉트릭), 박상훈(일진전기)

PS2-087 관로 구간 타회선 고장에 따른 케이블 온도 특성 분석 ····· 177
나진용, 김동규, 임종필, 김민주, 정채균(한전 전력연구원)

PS2-088 임펄스 환경에 따른 변압기 내부 전계 분포 특성에 대한 연구 ····· 178
양재희, 권오민, 김명진(충북대)

PS2-089 DC 코로나 개시전압 판정에 미치는 방전 반복률 및 임계값 설정의 영향 분석 ····· 179
이제희, 구본혁, 김예찬, 장찬혁, 반인후, 고기원, 강형구(한국교통대),
김용주(O&M Korea)

PS2-090 전하 트랩의 국소화 특성 분석을 위한 유효 퍼텐셜 모델링 연구 ····· 180
황재은, 박혜리(동아대)

PS2-091 HVDC 변환용 변압기 진단시스템 개발 ····· 182
정민경, 이종건, 구재홍, 주형준(전력연구원)

PS2-092 VLF tanδ 판정기준의 발전과 개정 ····· 183
천미소, 김가현, 서예슬, 김수정, 임장섭(목포해양대)

▌전력설비 자산관리 II

B1 로비 **좌장 : 박태식 교수(목포대학교)**

PS2-093 Wasserstein 거리를 활용한 TDR 기반 케이블 상태 모니터링 ····· 185
김윤겸, 권구영(공주대)

PS2-094 케이블 전파 모델을 활용한 S-파라미터 기반 고장 위치 및 반사계수 추정 기법 ····· 186
정형준, 권구영(공주대)

PS2-095 냉동기 단기 정지 및 재가동에 따른 냉동창고의 전기·열 응답 특성 분석 ····· 187
최성은, 서상욱, 유찬종, 장경훈(한국건설생활환경시험연구원)

PS2-096 실시간 건전도 평가를 위한 IGBT 모의시험 모델링에 관한 연구 ····· 188
오정식, 김태훈, 박재덕, 박태식(목포대)

PS2-097 DGA 기반 절연유 유종·고장유형 분류와 자산관리 적용 가능성 ····· 190
김아름, 전태현, 곽병섭, 김은영, 박현주(한전 전력연구원)

PS2-198 배전용 대용량 신규 피복 가공전선 운전용량 실증 평가 ····· 191
성재경, 정종만, 박창열(한전 전력연구원)

PS2-199 전력설비 투자가치 기반 투자계획 최적화 기법별 성능 분석 ····· 192
안병현, 황재상, 이홍석, 최우성(한전 전력연구원)

PS2-100 열적 등가 연령을 반영한 CNAIM 기반 몰드변압기의 건전도 평가 ····· 193
구본혁, 김예찬, 이제희, 장찬혁, 반인후, 고기원, 강형구(한국교통대)

PS2-101 UHF 부분방전 센서 감도 시험을 위한 유효높이 적용 방안 ····· 194
최원, 석복렬(대림대), 조종호(SMND)

▌광전자 및 전자파

B1 로비 **좌장 : 박형준 책임(한국전자통신연구원)**

PS2-102 전이금속이 도핑된 광섬유 코어의 광-열 변환 특성을 이용한 감쇠 계수 제어형 마이크로히터 ····· 196
김연관, 박유빈, 김보현, 안태정(조선대)

PS2-103 수직 전극 기반 다채널 Lock-in amplifier를 이용한 금속 위치 식별 시스템 ····· 197
박기쁨, 안주희, 한나연, 심성민, 김정무(전북대)

PS2-104 임피던스 변화를 이용한 수위 레벨 센서 ····· 199
한나연, 안주희, 박기쁨, 심성민, 김정무(전북대)

PS2-105 편광 제어형 필터의 스펙트럼 응답 모델링 및 조정 메커니즘 해석 ····· 201
박소연, 함상우, 이용욱(부경대)

PS2-106 다중 모드 광섬유에 새겨진 나선형 장주기 광섬유 격자를 기반으로 한 변형률, 온도 동시 측정 ····· 202
함상우, 박소연, 이용욱(부경대)

PS2-107 전력계통 통신 인프라 적용을 위한 기상환경 모델을 활용한 자유공간 광통신 링크 특성 연구 ····· 203
조민재, 안정현, 박시웅(전북대)

PS2-108 전력설비 통신망의 강우 환경 대응을 위한 자유공간 광통신 빔 발산 특성 연구 ····· 204
안정현, 조민재, 박시웅(전북대)

PS2-109 GIS 기반 전력설비 측정개소 선정에 관한 기초 연구 ····· 205
홍지수, 최경섭, 안호성(한국전력공사)

PS2-110 전동기 상태판정을 위한 교류전류 구간분할 최적화 알고리즘 개발 ····· 206
박건희, 선종호, 윤영우(한국전기연구원)

PS2-111 등가회로 시뮬레이션을 이용한 부싱 누설전류 측정용 변류기의 부하저항별 위상오차 분석 ····· 207
박건희, 선종호, 윤영우(한국전기연구원)

PS2-112 임피던스 측정을 이용한 컨베이어 벨트 위 물체 식별 시스템 ····· 208
안주희, 한나연, 박기쁨, 심성민, 김정무(전북대)

PS2-113 고전압 모니터링을 위한 $LiNbO_3$의 전기-광 효과 기반 전압센서 ····· 210
황형용, 이주영, 정찬우(한국광기술원)

구두 발표 1

전기재료

(OS1 01~05)

좌장 : 김정길 교수(동아대학교)



P-shield 구조를 적용한 650V SiC planar MOSFET의 단락 특성 분석

Short-Circuit Characteristics of 650V SiC planar MOSFETs with a P-Shield Structure

김주희[1], 김상엽[1], 강규혁[1], 최수빈[1], 박가영[1], 정준기[1], 석오균[2*]
[1]부산대학교 전자전기공학과, [2]부산대학교 전기전자공학부
(*교신저자: ogseok@pusan.ac.kr)

SiC MOSFET은 단락 시 높은 전류 밀도로 인해 파괴될 수 있어 단락 전류를 제한하는 설계가 요구된다. 그러나 단락 전류를 줄이기 위한 구조 변경은 단위 면적당 온저항($R_{on,sp}$) 증가를 동반하여, 단락 전류 제한 특성과 온상태 특성 간 trade-off를 발생시킨다. 본 연구에서는 이를 완화하기 위해 N-source 마스크 기반 P-shield 구조를 제안하였으며, 기존 구조와 제안 구조의 단면을 그림 1에 나타냈다. $R_{on,sp}$와 단락 전류의 관계를 분석하고자 P-shield 구조의 셀 피치를 조절하여 $R_{on,sp}$가 각각 1.61 및 1.37 mΩ·cm^{2}인 두 조건을 TCAD로 구현하였다.

그림 2는 V_{DD}= 300 V, V_{GS}= 15 V, t_{SC}= 3 μs 조건에서 동일한 칩 면적을 기준으로 환산한 단락 전류의 비교 결과이다. 기존 구조의 $R_{on,sp}$와 최대 단락 전류는 각각 1.44 mΩ·cm^{2}와 496.1 A였으며, 두 P-shield 구조 모두 기존 구조보다 낮은 최대 단락 전류를 나타냈다. 특히 $R_{on,sp}$가 1.37 mΩ·cm^{2}인 P-shield 구조의 최대 단락 전류는 336.0 A로 기존 구조 대비 32.3% 감소하였다. 이러한 전류 감소는 P-shield와 N-drift 영역 사이의 P-N 접합에서 확장된 공핍영역이 유효 전류 경로를 제한한 결과로 판단된다. 따라서 제안 구조는 추가 마스크 공정없이 낮은 $R_{on,sp}$와 단락 전류 제한 특성을 동시에 확보할 수 있는 설계 방안을 제시한다.

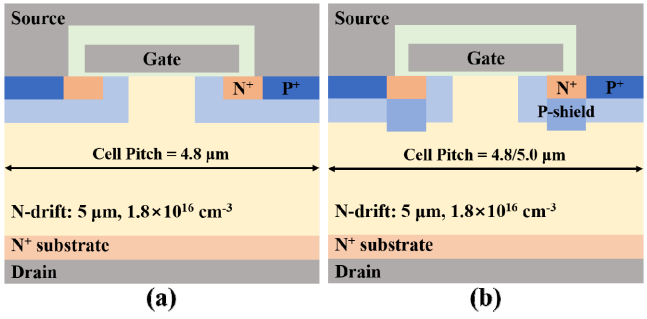


그림 1. 650 V SiC planar MOSFET 단면 구조: (a) 기존 구조, (b) N-source 마스크를 활용한 P-shield 구조

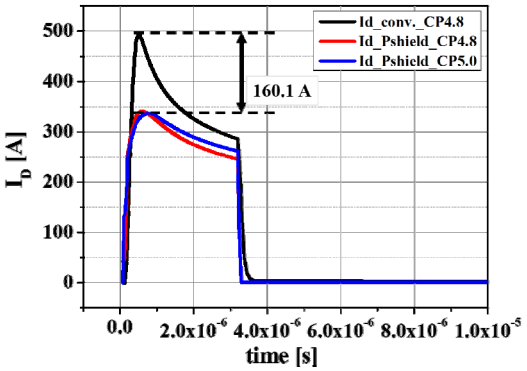


그림 2. V_{DD} =300 V, V_{GS}= 15 V, t_{SC}=3 μs 조건에서 기존 구조와 P-shield 구조의 단락 전류 특성

주제어: SiC MOSFET, P-shield, 단락 특성, 단위 면적당 온저항, TCAD 시뮬레이션

Keywords: SiC MOSFET, P-shield, Short-Circuit, Specific On-Resistance, TCAD simulation

[감사의 글]
이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국산업기술진흥협회가 지원하는 “계약정원제 활용사업”과 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 글로벌 TOP 전략연구단 지원사업 우주항공반도체 전략연구단(과제번호 GTL25052-000)의 지원을 받아 수행되었습니다.

다중 에피택셜 성장 공정을 적용한 1.2 kV SiC Super Junction MOSFET 설계

Design of a 1.2 kV SiC Superjunction MOSFET Using a Multi-Epitaxial Growth Process

박수민[1], 정준기[1], 양승리[1], 김상엽[1], 강규혁[1], 김주희[1], 석오균[2*]
[1]부산대학교 전기전자공학과, [2]부산대학교 전기전자공학부
(*교신저자: ogseok@pusan.ac.kr)

본 연구에서는 다중 에피택셜 성장 (MEG) 공정을 적용하여 0.9 mΩ·cm²의 단위면적당 온저항 ($R_{on,sp}$)을 갖는 1.2 kV SiC super junction MOSFET 구조를 제안한다. 고농도 n-pillar를 적용하는 경우 낮은 온저항을 구현하는 데 유리하지만, 고농도의 pillar 간 접합에서 전계가 집중되어 조기 항복이 발생할 수 있다. 이를 완화하기 위해 MEG 공정과 채널링 이온주입을 통해 고농도 n-pillar 적용에 적합한 p-pillar 형성 방식을 도출하였다.

그림 1은 다중 이온주입으로 형성한 균일 p-pillar 구조와 MEG 공정 및 채널링 이온주입으로 형성한 비균일 p-pillar 구조의 도핑 프로파일을 나타내며, 표 1은 두 구조의 전기적 특성을 비교한 결과이다. 균일 p-pillar 구조에서는 off 상태에서 고농도 pillar 접합에 전계가 집중되고 공핍층 확장이 제한되어 조기 항복이 발생한다. 반면, 제안한 비균일 p-pillar 구조에서는 p-pillar의 저농도 영역으로 공핍층이 확장되어 전계 집중이 완화되며, 항복전압이 1393 V로 증가하였다. 또한, on 상태에서는 n-pillar 측의 공핍 폭이 감소하여 전류 경로가 넓어지며, $R_{on,sp}$는 0.9 mΩ·cm²로 감소하였다. 이는 MEG 공정과 채널링 이온주입을 활용한 비균일 p-pillar 설계를 통해 고농도 n-pillar에서도 높은 항복전압과 낮은 $R_{on,sp}$를 동시에 확보할 수 있음을 나타낸다.

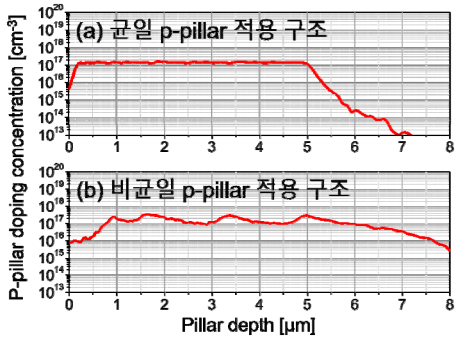


그림 1. (a) 균일 p-pillar 및 (b) 비균일 p-pillar 구조의 깊이에 따른 도핑 농도 프로파일

표 1. 균일 p-pillar 구조와 비균일 p-pillar 구조의 전기적 특성 비교

구조	단위 면적당 온저항	항복전압
균일 p-pillar 적용 구조	1.11 mΩ·cm²	962 V
비균일 p-pillar 적용 구조	0.90 mΩ·cm²	1393 V

주제어: 탄화규소, 수퍼정션 MOSFET, 다중 에피택셜 성장, 채널링 이온주입

Keywords: Silicon Carbide, Super-Junction MOSFET, Multi-Epitaxial Growth, Channeling Ion Implantation

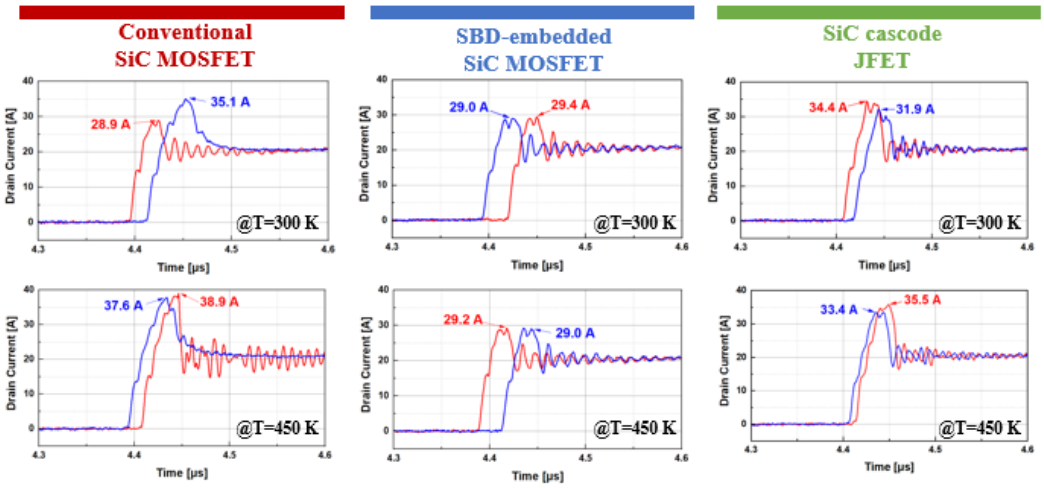
[감사의 글]
본 연구는 SK키파운드리㈜ 산학협력 프로젝트「전기차 응용을 위한 1.2 kV SiC MOSFET 소자 설계 및 공정 기술 개발」, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원이 지원하는 대학ICT연구센터(ITRC) 사업(IITP-2026-RS-2024-00438288), 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원이 지원하는 산업혁신인재성장지원사업(RS-2025-02214408)의 지원을 받아 수행되었음.

SiC MOSFET, SBD 내장 MOSFET 및 Cascode JFET의 구조 의존적 False Turn-on 메커니즘 비교 및 고온 거동 분석

Architecture and Temperature Dependent Gate-Bias Effects on Switching Transients in SiC Power Devices

강규혁[1], 정승완[1], 박진우[1], 류종현[1], 석오균[2*]
[1]부산대학교 전기전자공학과, [2]부산대학교 전기전자공학부
(*교신저자: ogseok@pusan.ac.kr)

SiC 전력반도체의 고속 스위칭 시 발생하는 높은 dv/dt는 소자의 기생 턴온 (False Turn-On, FTO)을 유발하여 추가적인 과도전류 및 스위칭 스트레스를 발생시킬 수 있다. 일반적으로 이를 억제하기 위해 음의 오프상태 게이트 바이어스가 사용되지만, 게이트 바이어스 변화는 소자의 역방향 도통 경로와 역회복 특성에도 영향을 미치므로 전체 스위칭 과도전류가 반드시 감소하는 것은 아니다. 본 연구에서는 conventional SiC MOSFET, SBD-integrated SiC MOSFET 및 cascode SiC JFET의 세 가지 구조를 대상으로 Double Pulse Test (DPT)를 수행하고, 0 V와 -5V의 오프상태 게이트 바이어스 및 온도 변화에 따른 turn-on 과도전류 특성을 비교하였다. 실험 결과, conventional MOSFET과 SBD-integrated MOSFET은 상온에서 0 V 조건에서 더 큰 전류 peak를 나타낸 반면, cascode JFET은 -5V 조건에서 더 큰 peak를 보였다. 또한 온도가 증가함에 따라 역회복 및 commutation 성분의 영향이 증가하여 게이트 바이어스에 따른 전류 특성이 변화하였다. 이를 통해 음의 게이트 바이어스의 효과는 기생 턴온 억제뿐만 아니라 소자 구조별 역방향 도통 및 역회복 특성을 함께 고려하여 평가할 필요가 있음을 확인하였다.



주제어: 실리콘 카바이드, 스위칭 소자, 오동작으로 인한 전원 켜짐, 역회복, 신뢰성, 역방향 게이트-소스 전압

Keywords: SiC, MOSFET, False Turn-on, Reverse Recovery, Reliability, negative gate-source voltage

[감사의 글]
본 연구는 정부(과학기술정보통신부) 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업 (IITP-2026-RS- 2024-00438288) 및 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원 지원사업 화합물전력반도체 고도화기술개발사업에 의한 연구임(양면발열 SiC 전력모듈 국산화 기반 250kW급 EV인버터 수요연계 기술개발, 2410011969)

고에너지 양성자 조사에 따른 SiC Edge Termination의 산화막 전계 집중과 불완전 이온화 영향 분석

Analysis of Oxide Electric Field Crowding and Incomplete Ionization Effects in SiC Edge Termination Structures under High Energy Proton Irradiation

김상엽, 김정태, 김주희, 석오균*
부산대학교 전기전자공학과
(*교신저자: ogseok@pusan.ac.kr)

우주환경에서 SiC 전력반도체는 고에너지 입자에 의해 Single-Event Burnout(SEB)이 발생할 수 있으며, Edge termination 구조는 소자 가장자리의 전계 분포와 파괴 거동에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 고에너지 양성자 조사 시 FLR 구조에서 발생하는 전계 집중과 불완전 이온화의 영향을 분석하였다.

Field-Limiting-Rings (FLR)이 적용된 1.2 kV급 SiC 소자에 100 MeV 양성자를 역바이어스 조건에서 조사하여 SEB 특성을 평가하고, 3D profiler를 통한 파괴 소자의 표면을 그림1에 나타내었다. 또한 TCAD를 이용하여 Al acceptor의 불완전 이온화 적용 여부에 따른 전계 분포 변화를 비교하였다.

그림 2는 불완전 이온화 적용 유무에 따른 전계분포 단면을 보여준다. TCAD 해석에서 불완전 이온화를 적용하지 않은 경우 최대 전계는 SiC 내부의 기존 전계 집중 지점에서 약 2.67 MV/cm로 나타났다. 반면 불완전 이온화를 적용하면 전계 집중이 field plate 모서리 아래 산화막 영역으로 이동하며 최대 16.2 MV/cm까지 증가하였다.

이는 고에너지 양성자에 의한 SEB 해석에서 불완전 이온화가 FLR 구조의 전계 분포와 산화막 전계 집중에 중요한 영향을 미침을 보여준다.

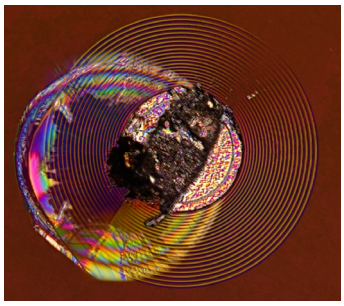


그림 1 고에너지 양성자 조사 후 SEB가 발생한 FLR 소자의 3D profiler 이미지.

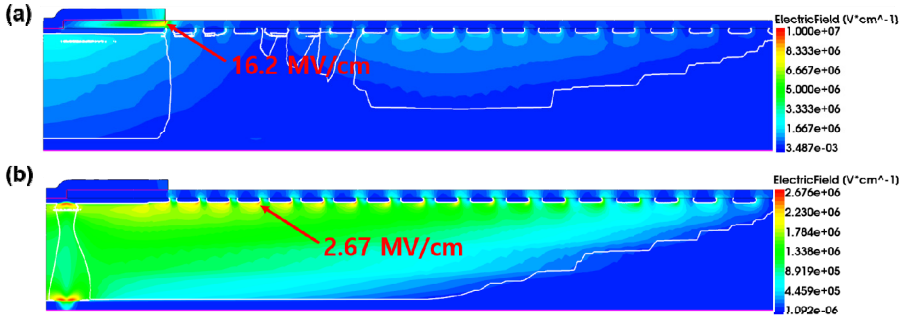


그림 2 불완전 이온화 (a) 적용 및 (b) 미적용에 따른 FLR 구조의 전계 분포.

주제어: SiC 전력반도체, Single-Event Burnout, Edge Termination, 불완전 이온화, 고에너지 양성자

Keywords: SiC Power Semiconductor, Single-Event Burnout, Edge Termination, Incomplete Ionization, High-Energy Proton Irradiation

[감사의 글]
이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2026-RS-2024-00438288)

상용 Si 및 SiC MOSFET의 게이트 전하 구성비 비교

Comparison of Gate-Charge Composition in Commercial Si and SiC MOSFETs

김현진[1], 김민재[2], 김민기[3], 강동원[4], 하민우[1*]
[1]명지대학교 전기공학과, [2]명지대학교 기계시스템공학부, [3]국립공주대학교 전기전자제어공학부, [4]중앙대학교 에너지시스템공학부 (*교신저자: isobar@mju.ac.kr)

전력 MOSFET의 게이트-드레인 전하 (Q_{gd})는 밀러 구간에서 드레인-소스 전압 변화와 관련되므로 스위칭 특성을 결정하는 주요 인자이다. 본 연구에서는 Si 및 SiC MOSFET의 전체 게이트 전하 (Q_g)에 대한 Q_{gd}와 게이트-소스 전하 (Q_{gs})의 구성비 차이를 규명하고자 하였다.

분석 대상은 제조사 데이터시트에서 Q_g, Q_{gd} 및 Q_{gs}가 제시된 650 V급 107개와 1200 V급 97개 등 총 204개 소자이다. 소자별 Q_{gd}/Q_g와 Q_{gs}/Q_g를 계산한 후 정격전압과 재료에 따라 평균하였다.

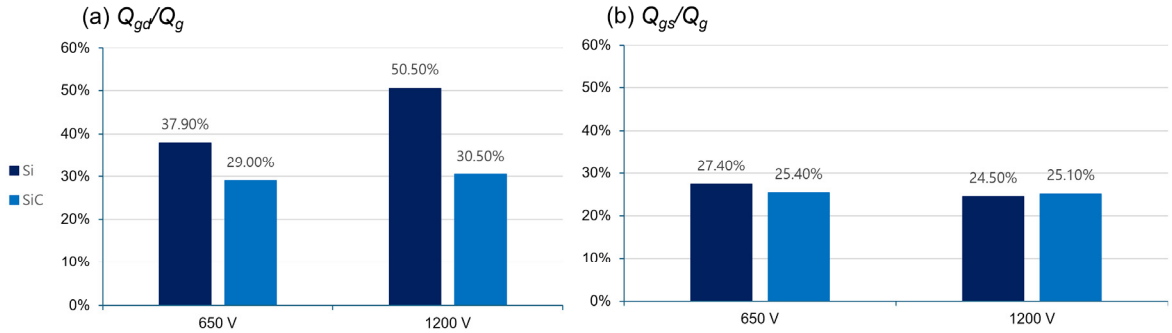


그림 1. 정격 전압과 반도체 재료에 따른 평균 게이트 전하 구성비

그림 1과 같이 평균 Q_{gd}/Q_g는 650 V급에서 Si MOSFET 37.9%, SiC MOSFET 29.0%였으며, 1200 V급에서는 각각 50.5%와 30.5%였다. SiC MOSFET의 Q_{gd}/Q_g은 Si MOSFET 값보다 각각 8.9%와 20.0% 낮았다. 반면 평균 Q_{gs}/Q_g의 두 반도체 소자 간 차이는 두 정격 전압 군에서 모두 2% 이내였다.

따라서 조사한 SiC 제품군은 전체 게이트 전하 중 밀러 구간 관련 전하의 비중이 상대적으로 낮은 경향을 보였다. 이 결과는 고주파 전력변환기의 스위칭 소자 선정과 게이트 구동회로 설계 시 밀러 구간의 전하 부담을 비교하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다. 다만 이 구성비에는 데이터 시트별 게이트 전하 측정 전압과 전류 조건의 차이가 포함되므로 제품군의 경험적 경향으로 해석해야 한다.

주제어: Si MOSFET, SiC MOSFET, 게이트 전하, 게이트-드레인 전하, 밀러 구간

Keywords: Si MOSFET, SiC MOSFET, gate charge, gate-drain charge, Miller plateau

[감사의 글]
This research was supported by the Gyeonggi ANCHOR Program (Project No. 2026-ANCHOR-09-A15, Project Title: Optimization of Magnetics Design for a 50 kW Bidirectional Power Converter in ESS (Energy Storage System) Applications).

구두 발표 2

광전자 및 전자파

(OS2 06~11)

좌장 : 박병석 수석(한전 전력연구원)



탄소나노튜브 폴리머 코팅 및 저직경 FBG 기반 자외선 센서 감도 향상 연구

Sensitivity Enhancement of Ultraviolet Sensors Based on Carbon Nanotube Polymer Coating and Reduced-Diameter FBG

박정원, 안태정
조선대학교 광기술공학과 광소자측정연구실
(*교신저자: taejung@chosun.ac.kr)

전력 변압기, 개폐기 및 송전 설비에서 발생하는 코로나 방전은 절연 열화와 고장 진행을 예측하는 주요 현상이다. 코로나 방전은 오존, 음향, 전자파와 함께 자외선을 방출하므로, 자외선 신호를 이용하면 비접촉 방식으로 방전 위치와 발생 여부를 진단할 수 있다. 본 연구에서는 자외선 영역에서 넓은 흡수 특성과 광열 변환 효율을 갖는 CNT를 폴리머와 혼합하여 FBG에 코팅하고, 직경 80 μm의 특수 광섬유에 FBG를 형성하여 125μm FBG와 비교함으로써 저직경 구조의 민감도 향상 효과를 분석하였다

센서 제작을 위해 평균 직경 3-5 nm, 길이 300-500 μm의 탄소나노튜브를 아세톤에 넣어 초음파 수조를 통해 분산하고 교반기를 이용해 아크릴레이트 폴리머와 섞어 24시간 교반하여 CNT-아크릴레이트 복합 폴리머를 제작하였다. 이후 복합 폴리머를 900 μm 몰드를 장착한 리코터를 이용하여 80 μm 및 125 μm FBG에 코팅하고, 380-385 nm UV LED와 365nm 외부 UV LED를 사용하여 충분히 경화하였다. 또한 비교군으로 아조벤젠 폴리머 및 아크릴레이트 폴리머가 코팅된 FBG 센서도 동일한 방식으로 제작하였다.

UV LED 광세기를 4.86, 9.45, 13.8, 17.8, 21.1 mW/cm²로 증가시키며 1분 조사/소등을 3회 반복한 결과, 모든 센서에서 광세기 증가에 따른 반복적인 반사 파장 이동이 관찰되었다. CNT 코팅 80 μm FBG의 평균 파장 이동량은 0.127, 0.241, 0.344, 0.426, 0.526 nm로 증가하였고, 125 μm FBG에서는 0.070, 0.127, 0.179, 0.225, 0.262 nm로 나타났다. 선형 피팅 결과, 0-21.1 mW/cm² 범위에서 CNT80 센서는 0.02408 nm/(mW/cm²)의 민감도를 나타냈으며, Azo80 대비 약 1.33배, Acryl80 대비 약 2.87배 높은 값을 보였다. 125 μm FBG에서도 CNT 코팅 센서는 아조벤젠 대비 약 2.12배, 아크릴레이트 대비 약 1.56배 높은 민감도를 보였다. 특히 저광량 영역인 0-5 mW/cm²에서도 CNT80 센서는 0.02656 nm/(mW/cm²)의 민감도와 R^2=0.988의 선형성을 보였으며, CNT125는 0.01479 nm/(mW/cm²)와 R^2=0.998의 우수한 선형 응답을 나타냈다.

본 연구에서는 CNT 복합 폴리머가 코팅된 80 μm 및 125 μm 직경 FBG 센서를 제작하고, 아조벤젠 및 아크릴레이트 폴리머 코팅 센서와 비교하였다. CNT 복합 폴리머는 높은 자외선 흡수 및 광열 팽창 특성으로 가장 큰 파장 이동을 유도하였고, 80 μm FBG 구조는 동일한 코팅 조건에서 125 μm FBG보다 높은 민감도를 제공하였다. 특히 CNT 코팅 80 μm FBG는 0.02408 nm/(mW/cm²)의 최고 민감도를 보여 고감도 자외선 검출에 적합함을 확인하였다. 제안된 센서는 제작 안정성과 재현성이 우수하며, 광섬유 센서의 절연성, 내식성 및 다중화 특성을 유지하므로 전력 설비의 코로나 방전 모니터링에 적용 가능할 것으로 기대된다.

주제어: 코로나 방전, 탄소나노튜브, FBG, 자외선 센서

Keywords: corona discharge, carbon nanotube, FBG, ultraviolet sensor

[감사의 글]
이논문은2026년도정부(산업통상자원부)의재원으로한국산업기술진흥원의지원을받아수행된연구임(RS00411221, 2026년산업혁신인재성장지원사업) 또한한국전자통신연구원연구운영지원사업의일환으로수행되었음. (26ZK1100, 호남권지역산업기반ICT 융합기술고도화지원사업)

실시간 레이저빔 분석 및 능동제어

Real-time laser beam analysis and control

전창수[1]
[1]광주과학기술원 고등광기술연구원
(*교신저자: changsu.jun@gist.ac.kr)

인공지능 기술 혹은 알고리즘은 레이저 성능의 한계를 극복하는 데에도 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구에서는 레이저 시스템의 실시간 모드성분 분석 (Modal Decomposition) 및 능동 제어 (Adaptive Control) 사례를 소개한다.

수치적 모드성분 분석 기법은 단순 레이저빔 이미지로부터 레이저 빔 각 고유모드별 성분 비율 (Modal Weight)와 상대적 위상 (Relative Phase)을 산출·분석한다. 특히 SPGD (stochastic parallel gradient descent) 알고리즘 및 좌표계 정립, sub-sampling 기법을 통해 다중 모드 실측 빔을 10^{-3} 급의 에러함수를 가지도록 실시간 분석을 구현하였으며, 이는 레이저 빔에 대한 정밀한 정보를 제공하여 고출력 레이저, 모드분할 광통신 등 다양한 모드성분 분석 응용 분야에 적용될 수 있다.

레이저빔 분석 분야 외에도, 레이저 특성을 능동제어하여 성능을 개선할 수 있다. 예를 들어, 비편광 레이저의 편광 능동제어를 통한 20 dB 이상의 선편광 소광비 구현, Target-in-the-Loop 최적화 기반 레이저 빔모양 제어, 그리고 다중 레이저의 결합 위상 제어 (Coherent Beam Combining) 등 몇 가지 응용 기술과 연구 결과를 소개한다. 이처럼 빔 모니터링 및 분석 정보를 바탕으로 능동 제어 소자 및 알고리즘을 연동하면, 출력 특성을 자율적으로 제어하여 레이저의 성능을 극대화하고 유지보수 필요없이 항상성이 유지되는 레이저 시스템을 구현할 수 있다.

주제어: 광섬유 레이저, 모드 성분 분석, 능동 제어

Keywords: Fiber laser, modal decomposition, adaptive control

재사용발사체의 GBAS 기반 운용을 위한 위성 가시성 분석

Satellite visibility analysis for GBAS-based operation of reusable launch vehicles

황 수 설
한국항공우주연구원 우주발사체연구소 발사체기술개발부 발사체전자팀
(교신저자: sooseul@kari.re.kr)

본 연구는 재사용발사체(Reusable Launch Vehicle, RLV)의 안전하고 정밀한 착륙 유도를 위해 지상기반보강시스템(Ground-Based Augmentation System, GBAS)을 적용할 때 요구되는 GNSS 위성의 가시성을 분석한다. 최근 우주 발사체의 경제성과 재사용성이 핵심 화두로 떠오르면서, 발사체를 정해진 착륙지점에 정확히 안착시키기 위한 고정밀 항법 시스템의 중요성이 강조되고 있다. 그러나 재사용발사체는 일반 상용 항공기에 비해 현저히 높은 속도로 대기권에 재진입하며, 하강 과정에서 극심한 고기동과 급격한 기체 자세(Attitude) 변화를 겪는다. 또한 발사체 착륙지점 주변의 지형적 제약 및 발사체 동체 구조에 의한 안테나 차폐 현상 등으로 인해 위성 신호를 수신하기에 매우 불리한 환경에 놓이게 된다. 이러한 환경에서 기존 민간 항공용으로 설계된 GBAS 운용 개념을 발사체 운용에 그대로 적용하게 되면 가시 위성 수의 부족이나 기하학적 배치 악화로 인해 요구되는 항법 정확도와 무결성을 보장하기 어려울 수 있으므로 발사체를 안전하게 착륙시키기 위한 고정밀 유도·항법·제어(Guidance Navigation and Control, GNC) 기술의 확보가 필수적인 과제로 대두되고 있다.

이와같은 운용 및 환경적인 영향을 극복하기 위해, 본 연구에서는 재사용발사체의 대기권 재진입부터 최종 착륙에 이르는 하강 궤적을 모델링하고, GBAS 환경 하에서의 위성 가시성 시뮬레이션을 수행하였다. 현재 운용되고 있는 다양한 위성항법시스템의 위성 배치 정보와 GBAS 지상국의 위치를 결합하여 발사체의 실시간 이동 경로에 따른 가시 위성 개수 변화를 산출하였다.

시뮬레이션 분석 결과, 발사체의 고도 하강 속도와 선회 기동 구간에 따라 위성의 기하학적 배치가 급격히 변화되는 것으로 분석되었고, 발사체에 장착된 위성 수신용 안테나의 위치에 따라서도 가시 위성의 개수에 많은 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한, GBAS 기반의 보강 정보가 발사체 회수 유도·항법·제어(GNC) 시스템의 요구 성능을 만족하며 항법 정확도를 안정적으로 유지할 수 있는 유효 작동 범위를 도출하였다.

본 연구를 통해 도출된 위성 가시성 분석 결과는 향후 재사용발사체 운용을 위한 GBAS 지상국 설비의 최적 배치, 다중 위성항법 시스템 간(GPS/Galileo/Beidou) 연동 전략 수립, 그리고 발사체 안전 착륙을 위한 항법 시스템 설계의 핵심적인 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 재사용발사체, 지상기반보강시스템, 위성항법시스템, 위성 가시성, 정밀 착륙

Keywords: Reusable Launch Vehicle, GBAS, GNSS, Satellite Visibility, Precision Approach

[감사의 글]
본 연구는 우주항공청의 재원으로 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 : RS-2023-00301757, 차세대발사체개발사업)

내부 기준 신호를 활용한 광섬유 전류센서의 위상 복조 및 측정 안정성 연구

Phase Demodulation and Measurement Stability of a Fiber-Optic Current Sensor Using an Internal Reference Signal

박형준[1], 송민호[2*]
[1]한국전자통신연구원, [2]전북대학교 전자공학과
(*교신저자: msong@jbnu.ac.kr)

광섬유 전류센서는 전자기 간섭에 대한 내성과 넓은 측정 범위를 바탕으로 전력설비의 전류 계측에 활용될 수 있다. 그러나 온도 변화 등 외부 환경의 영향으로 발생하는 간섭계의 위상 변동은 측정 신호의 안정적인 해석을 어렵게 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 영향을 완화하고 복조 구조를 간소화하기 위해, 센서 내부에서 얻은 기준 신호를 활용하는 위상 복조 방식의 동작 특성과 적용 가능성을 검토하였다.

광대역 광원, 광섬유 간섭계 및 반사형 센서 코일로 측정계를 구성하고, 광섬유 브래그 격자를 이용하여 전류 정보가 포함된 측정 신호와 내부 기준 신호를 구분하였다. 기준 신호를 처리하여 샘플링 시점을 결정하는 내부 트리거를 생성하고, 직교 샘플링과 위상 연산을 통해 전류에 따른 위상 성분을 추출하였다. 입력 전류가 달라지는 조건과 간섭계에 열적 외란이 가해지는 조건에서 측정 신호 및 복조 출력의 변화를 살펴보았다.

실험에서는 입력 전류의 변화에 따라 측정 신호의 위상이 달라지는 반면, 기준 신호는 전류 변화의 영향을 받지 않아 샘플링 기준으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 반복 측정에서는 출력이 비교적 일정하게 유지되는 특성이 관찰되었다. 또한 열적 외란 조건에서 기존 록인 증폭기 기반 복조 방식과 비교한 결과, 내부 기준 신호를 활용한 방식은 시험 조건 내에서 외란에 따른 파형 변동을 완화하고 전류에 대응하는 복조 파형을 유지하는 경향을 보였다.

이러한 결과는 환경 변화에 따른 위상 변동을 포함하는 내부 기준 신호를 샘플링에 활용함으로써 전류 유도 위상을 안정적으로 추출할 수 있음을 시사한다. 본 방식은 광섬유 전류센서의 복조 구조를 단순화하고 외란에 대한 측정 안정성을 높이기 위한 접근 방법으로서, 전력설비용 광학 계측 시스템의 구현에 활용될 수 있을 것으로 기대된다..

주제어: 광섬유 전류센서, 내부 기준 신호, 직교 샘플링, 위상 복조, 측정 안정성

Keywords: Fiber-Optic Current Sensor, Internal Reference Signal, Quadrature Sampling, Phase Demodulation, Measurement Stability

광주파수영역 반사계 기반 극저온 액면 감지 시스템의 구현 및 특성 분석

Implementation and Characterization of an Optical Frequency Domain Reflectometry-Based Cryogenic Liquid Level Detection System

김대길*, 최유빈, 박형준
한국전자통신연구원 호남권연구본부
(*교신저자: heffy@etri.re.kr)

탄소중립 및 에너지 전환에 따라 액체수소, LNG 등 극저온 에너지원의 저장·이송 기술 중요성이 확대되고 있으며, 초전도 전력기기와 극저온 에너지 저장설비 등 다양한 전력·에너지 시스템에서 극저온 환경의 안전한 운용 기술이 요구되고 있다. 특히 극저온 액체의 액면 변화는 저장량 관리뿐만 아니라 기화 손실, 압력 변화 및 설비 안전성과 직접적으로 연관되므로, 액면 위치를 실시간·연속적으로 감지할 수 있는 고신뢰 센싱 기술이 필요하다. 본 연구에서는 전자기적 영향을 받지 않으며 연속적인 공간 분포 측정이 가능한 광주파수영역 반사계(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR) 기반 분포형 광섬유 센싱 시스템을 구현하고 극저온 액면 감지 특성을 규명하고자 하였다.

구현된 OFDR 시스템은 협대역 가변 레이저를 이용하여 1534-1566 nm의 파장 범위를 100 nm/s의 속도로 연속 스윕하도록 구성하였다. 총 길이 20 m의 센싱 광섬유에서 발생하는 Rayleigh 후방산란광과 기준광의 간섭신호를 측정하고, 푸리에 변환 및 국부 스펙트럼 상관분석을 통해 위치별 스펙트럼 이동을 분석하였다. 센싱 광섬유의 일부를 액체질소에 침지하여 액체 영역과 기체 영역에서 발생하는 분포 신호 특성을 비교하였다.

측정 결과 액체질소에 침지된 구간과 기체 영역 사이에서 뚜렷한 국부 Rayleigh 스펙트럼 이동 차이가 관찰되었으며, 이를 통해 광섬유를 따라 극저온 액체와 기체의 경계 위치를 구분할 수 있었다. 또한 20 m 센싱 구간 전체에 대한 연속적인 분포 측정이 가능하였으며, 액면 변화에 따라 스펙트럼 이동의 경계 위치가 함께 변화하는 것을 확인하였다. 실제 액면과 OFDR 기반 검출 위치의 차이는 최대 3 mm로 확인되었다.

이상의 결과를 통해 OFDR 기반 분포형 광섬유 센싱 기술이 극저온 액체의 액면 위치를 연속적으로 감지하는 데 적용 가능함을 확인하였다. 향후 극저온용 센싱 케이블 구조와 신호처리 기법을 최적화할 경우 액체수소 저장탱크 및 극저온 전력·에너지 설비의 상태감시 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 광주파수영역 반사계, 극저온, 액면 감지, 분포형 광섬유 센서, 액체질소

Keywords: Optical Frequency Domain Reflectometry, Cryogenic, Liquid Level Detection, Distributed Fiber-Optic Sensor, Liquid Nitrogen

[감사의 글]
본 연구 논문은 한국전자통신연구원 내부연구개발사업 차세대주역 신진연구개발과제의 일환으로 수행되었음. [25YK1300, 극저온 환경 극복을 위한 광섬유 광주파수영역 반사계 기반 mm급 고정밀 액면 감지 기술 개발]

가스절연개폐장치에서 단일 및 다중 결함에 따른 부분방전 펄스 특성 분석

Analysis of Partial Discharge Pulse Characteristics under Single and Multiple Defect Conditions in Gas-Insulated Switchgear

홍태윤[1], 선종호[1]
[1]한국전기연구원
(*교신저자: jhsun@keri.re.kr)

가스절연개폐장치(Gas-Insulated Switchgear, GIS)에서는 다양한 절연결함에 의해 부분방전이 발생하며, 실제 설비에서는 서로 다른 결함이 동시에 존재할 수 있다. 본 연구에서는 SF_6 GIS에서 단일 및 다중 결함 조건에 따른 부분방전 펄스 특성의 변화를 분석하고자 하였다. 코로나, 파티클 및 연면방전을 모의하고 UHF 센서를 이용하여 각 조건에서 부분방전 펄스 300개를 동일한 측정조건으로 취득하였다. 그림 1은 단일 및 다중 결함 조건에서 측정된 대표 부분방전 펄스 파형을 나타낸다.

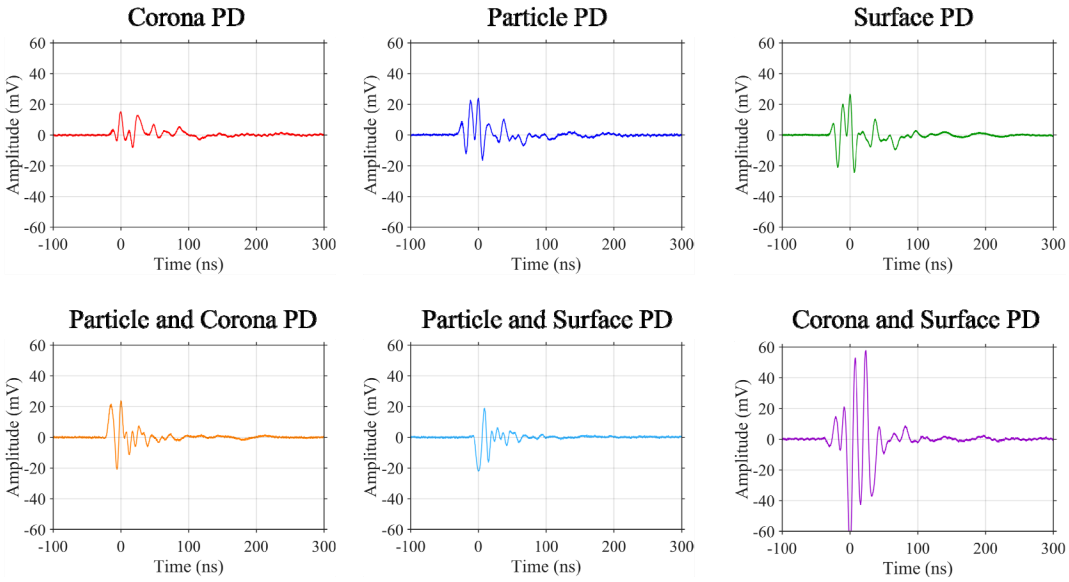


그림 1. 단일 및 다중 결함 조건에서 측정된 대표 부분방전 펄스 파형

측정된 펄스는 시간영역의 등가 시간 길이와 주파수영역의 등가 대역폭을 산출하고, 이를 이용하여 시간-주파수 기반의 펄스 맵으로 나타내었다. 그림 2와 같이 단일 결함의 펄스는 주로 T^2 약 800~3,000, W^2 약 0.5×10^4~9.5×10^4 범위에 분포하였으며, 파티클 방전은 상대적으로 낮은 T^2와 W^2 영역에 집중되었으며, 연면방전은 T^2 및 W^2가 증가하는 방향으로 넓게 분포하였다. 다중 결함에서는 대응되는 단일 결함의 분포와 중첩되는 펄스가 존재하였으나, 동시에 단일 결함의 주요 분포 영역을 벗어나는 펄스도 확인되었다. 특히 파티클-연면 및 파티클-코로나 조건에서는 T^2와 W^2가 증가하는 방향으로 분포가 확장되었으며, 연면-코로나 조건에서도 단일 결함의 분포와 다른 영역에 펄스가 형성되는 특성이 나타났다. 이는 다중 결함 조건에서 측정되는 펄스의 시간-주파수 특징이 단일 결함에서 구축된 특징 분포와 동일하게 유지되지 않을 수 있음을 보여준다.

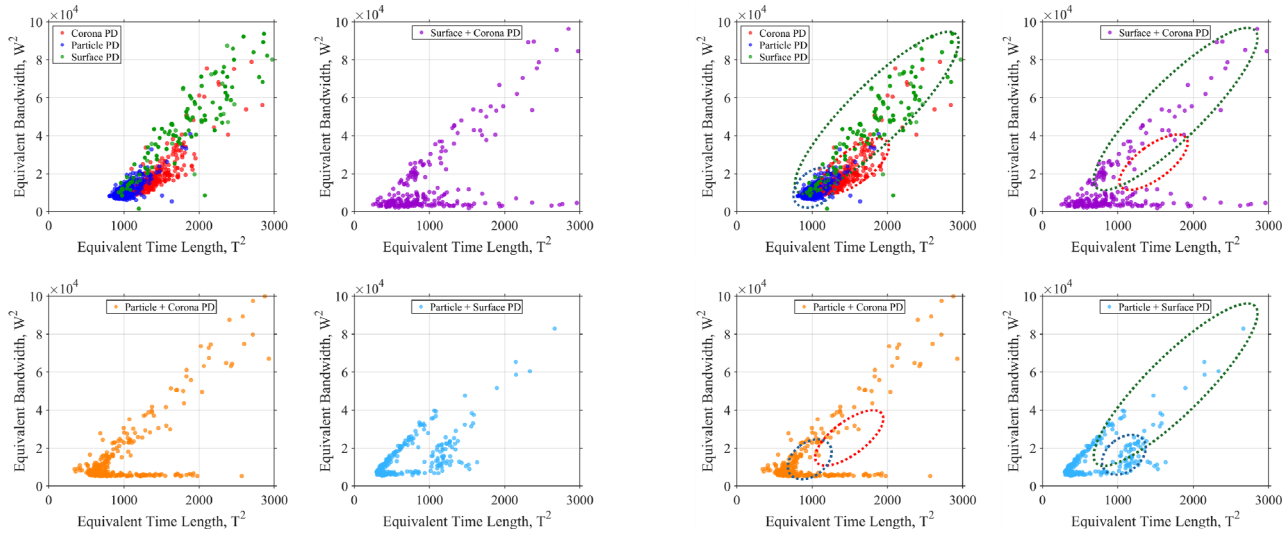


그림 2. 단일 및 다중 결함 조건에 따른 부분방전 펄스의 시간-주파수 분포

이러한 결과로부터 다중 결함 조건에서 측정되는 부분방전 펄스의 특징 분포는 단일 결함에서 형성된 특징 분포와 완전히 동일하게 나타나지 않음을 확인하였다. 따라서 단일 결함의 부분방전 펄스를 기반으로 구축된 특징 정보를 실제 GIS 진단에 적용하기 위해서는 다중 결함 조건에서 나타나는 펄스 및 특징 분포의 변화를 함께 고려할 필요가 있다.

주제어: 부분방전, 가스절연개폐장치, 시간-주파수 분석

Keywords: Partial Discharge, Gas-Insulated Switchgear, Time-Frequency Analysis

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임
(과제번호: 20225500000120, 과제명: 특고압 직류배전용 계측·진단 및 신뢰성 평가 기술개발).

구두 발표 3

스마트 대전력 및 고전압 I

(OS3 12~15)

좌장 : 이세희 교수(경북대학교)



HVDC 변압기 부싱의 포일 변형 및 비접지 결함에 따른 과도 전계 특성 해석

Analysis of Transient Electric Field Characteristics in HVDC Transformer Bushings with Foil Deformation and Ungrounded Defects

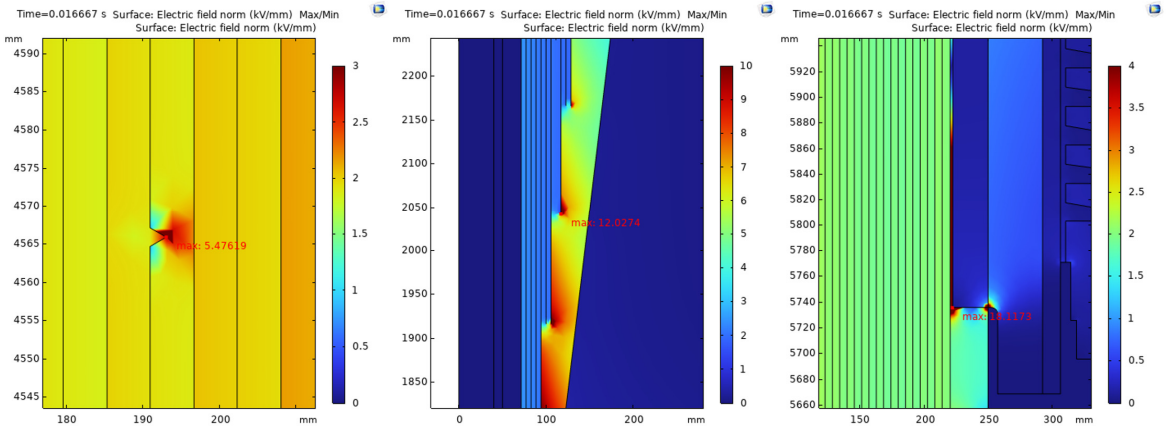
김관혁[1], 곽유진[1], 이종건[2], 이방욱[1*]
[1]한양대학교 전자공학과, [2]한국전력공사 전력연구원
(*교신저자: bangwook@hanyang.ac.kr)

HVDC 변환용 변압기의 절연 취약 요소인 부싱은 장기 복합 스트레스에 노출되며 미세 결함에 따른 절연파괴 위험이 상존한다. 특히 알루미늄 포일의 왜곡, 길이 편차, 접지 불량은 국부 전계 왜곡과 부분방전을 유발하는 주요인이다. 이에 본 연구는 FEM 기반 시변 해석으로 내부 포일 변형 및 비접지 결함이 과도 전계 집중에 미치는 영향을 규명하였다.

정상 모델과 3대 결함 모델에 DC 375kV, 기본파(50Hz) 및 주요 고조파(3,5,7,11,13)를 합성한 복합 파형을 인가하였다. 이를 바탕으로 전계(ec), 열(ht), 자계(mf)를 연계한 전자기-열 다중물리 시변 연성 해석을 수행하였다.

해석 결과, 모든 결함에서 정상상태 도달 전인 과도 구간에 최대 전계가 발생했다. 과도 피크 전계는 포일 찌그러짐 시 5.48kV/mm(+42.0%), 길이 단축 시 12.03kV/mm(+27.0%)였으며, 비접지 결함은 18.12kV/mm(+30.6%)로 가장 가혹한 집중도를 보인 후 이후 정상상태에서 완화되었다.

이는 결함 내재 부싱의 절연 파괴 취약점이 정상 운전이 아닌 전압 인가 직후 과도 상태에 형성됨을 시사한다. 본 결과는 실시간 상태 진단 모델 수립 및 취약부 보강을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.



주제어: RIP 부싱, 고조파, 다중물리 연성해석, 시변해석, 알루미늄 포일 결함

Keywords: RIP Bushing, Harmonic, Multiphysics-Coupled Simulation, Time-dependent Analysis, Aluminum Foil Defect

[감사의 글]
본 연구는 2024년도 한국전력공사(KEPCO)의 연구과제 지원을 받아 수행되었음 (R23TA16)
본 연구/논문/성과는 2026년도 한국 정부 [기후에너지환경부](직류그리드에너지혁신연구센터)재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다.(20224000000160, DC그리드 에너지 혁신연구센터)

배전급 진공차단기(VCB)의 주요 열화인자 기반 상태 진단 및 잔존 수명 평가

권정훈*, 전영균*, 배채윤*, 강희원**, 김명진***
LS 일렉트릭*, 한국기계전기전자시험연구원**, 충북대학교***

Condition Diagnosis and RUL Assessment of Distribution-Class VCBs Based on Key Degradation Factors

Jung Hun Kwon*, Young Gyun Jeon*, Chae yoon Bae*, Hee Won Kang**, Myung Chin Kim***
LS Electric Co., Ltd.*, Korea Testing Certification Institute**, Chungbuk National University***

Abstract - 본 논문에서는 중고압 배전설비의 핵심 보호기기인 진공차단기(VCB)의 복합 열화 메커니즘을 분석하고, 핵심 진단 파라미터 기반의 잔존수명(Remaining Useful Life, RUL) 평가 모델을 제안하였다. VCB의 주요 수명 한계요인을 고체 절연물의 절연 열화, 메커니즘부 그리스 고착, VI 진공도 저하, 누적 차단 에너지에 따른 접점 및 내부 절연 열화의 네 가지 관점에서 정의하였다. 각 열화 요인에 대해 Arrhenius 기반 온도·환경 가중 수명 모델과 VI 극간 tanδ 기반 수명 정량화 모델을 구축하였다. 제안 기법의 유효성을 검증하기 위해 PT&T 가혹 동작 VCB, GS EPS LNG 복합화력발전소의 실 운전 VCB, 세아제강 해안가 염해 환경의 옥외 VCB를 대상으로 사례연구를 수행하였다. 분석 결과, 제안한 진단 파라미터는 VCB의 열화 상태 및 RUL 평가에 효과적으로 적용 가능한 것으로 확인되었으며, 이를 기반으로 CBM 및 리스크 기반 스마트 자산관리(Asset Management) 체계로의 확장 가능성을 제시하였다. 본 연구 결과는 고경년 전력설비의 예지보전 고도화와 최적 갱신 시점 결정을 위한 기술적 기반으로 활용될 수 있다.

1. 서 론

진공차단기(VCB)는 전력 계통의 정상 개폐와 고장 전류 차단을 담당하는 핵심 배전 보호기기로, 우수한 소호 성능과 친환경적 구조를 바탕으로 산업용 플랜트 및 수배전 설비에 폭넓게 적용되고 있다. 최근에는 설계수명인 20~30년에 도달하거나 이를 초과한 고경년 VCB의 비중이 증가하면서 절연파괴, 조작부 오동작 및 차단 성능 저하에 따른 설비 고장 위험이 커지고 있다.

VCB의 수명과 신뢰성은 고체 절연물, 조작 메커니즘, 통전부 및 VI의 상태에 의해 복합적으로 결정된다. 장기 운전 시 온도, 습도, 오염 및 반복 개폐 스트레스에 의해 절연물 트래킹, 그리스 고착, 진공도 저하, 접점 아크 침식 등이 복합적으로 진행될 수 있으나, 기존의 단순 주기 점검 중심 TBM 방식만으로는 이러한 열화 상태를 정량적으로 평가하는 데 한계가 있다.

이에 따라 본 연구에서는 VCB의 4대 핵심 구성 요소별 열화 메커니즘과 주요 진단 파라미터를 기반으로 상태 진단 및 잔존수명(RUL) 평가 방법론을 제안하였다. 특히 운전 온도 및 환경 가혹도를 반영한 가중 수명 예측 모델과 VI 극간 tanδ 기반 RUL 평가 체계를 구축하였다.

또한 제안 기법의 실효성을 검증하기 위해 PT&T 가혹 동작 시험 설비, LNG 복합화력발전소 운전 VCB, 해안가 오염 환경의 옥외 VCB를 대상으로 현장 실증을 수행하여, 기존 TBM을 보완할 수 있는 CBM 기반 통합 상태 진단 및 수명평가 기술의 적용 가능성을 검토하였다.

2. VCB 열화 특성 및 수명 평가

VCB의 수명은 VI, 통전부, 외부 절연물 및 메커니즘부의 상태에 의해 결정되며, 각 부품 중 가장 먼저 한계수명에 도달한 부품이 VCB 전체 수명을 좌우한다. 주요 열화 스트레스는 전기적 스트레스(전압·TRV·차단전류), 기계적 스트레스(개폐횟수·충격·피로), 열적 스트레스(온도 상승·열사이클), 환경적 스트레스(습도·분진·염분·진동)로 구분되며, 구성 부품별로 열화 메커니즘과 진단 파라미터가 서로 다르다.

따라서 VCB의 수명평가는 단일 인자가 아닌 부품별 열화 특성, 운전 이력 및 환경 스트레스를 종합적으로 반영한 상태기반 평가가 필요하며, 이를 통해 유지보수 비용·고장 리스크·교체 비용을 고려한 최적 갱신 시점을 선정하는 것이 중요하다.

2.1 VI(Vacuum Interrupter)의 진공도 열화 및 수명 특성

VCB의 수명은 핵심 구성품인 VI(Vacuum Interrupter)의 진공도와 내부 절연 성능에 크게 좌우된다. 장기 운전 및 반복 개폐에 따라 Bellows 피로, 미세 누설(Slow Leak), Outgassing 등으로 내부 압력이 상승할 수 있으며, 일정 임계 영역에 도달하면 절연 내력이 급격히 저하될 수 있다. 특히 장기 사용 VCB에서는 이러한 진공 성능 저하가 주요 열화 인자로 나타난다.

또한 VI는 반복적인 전류 차단 과정에서 발생하는 아크에 의해 Cu-Cr 접점 침식 및 금속 증기(Metal Vapor) 비산이 발생하며, 금속 증기가 세라믹 내벽에 퇴적되면서 도전성 오염 및 내부 절연 성능 저하를 유발한다. 따라서 VI 열화는 단순 사용 연수뿐 아니라 누적 차단 에너지(Cumulative Breaking Energy)와도 밀접한 관련이 있다.

본 연구에서는 누적 차단 에너지 증가에 따라 VI 극간 tanδ가 증가하는 경향을 확인하였으며, 이를 기반으로 VI 내부 절연 상태를 평가하는 진단식을 도출하였다. 특히 극간 tanδ는 세라믹 내벽의 도전성 오염과 내부 절연 열화를 민감하게 반영하여, 기존 내전압 시험이나 접촉저항·개폐시간 측정보다 VI의 열화 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 상태기반진단(CBM) 핵심 파라미터로 활용 가능성이 높다.

2.2 VCB 통전부의 열화 특성 및 수명 평가

VCB의 통전부는 주접점, 접촉부, 도체 및 연결부로 구성되며, 장기 운전 시 접촉저항 증가와 국부 과열이 주요 열화 현상으로 나타난다. 반복적인 부하 전류 통전과 단락 전류 차단에 따른 아크 에너지, 접점 마모·침식, 접촉 압력 저하, 접촉면 산화 및 체결력 저하가 이러한 열화를 가속한다. 특히 단락 전류 차단 시 발생하는 아크는 접점 표면의 용융·증발·침식(Erosion)을 유발하며, 반복적인 차단 스트레스가 누적되면 접점 형상과 접촉 상태가 악화되어 접촉저항 및 온도 상승으로 이어질 수 있다. 따라서 접촉저항, 부하 전류에 따른 온도 상승 및 열화상 기반 ΔT는 통전부 상태를 평가하는 주요 진단 파라미터로 활용할 수 있다.

본 연구에서는 부하율과 누적 차단 에너지 증가에 따른 접점·접속부 온도 상승 특성을 분석하여 통전부 열화 상태를 평가하는 진단 모델을 도출하였다. 통전부 상태는 단일 지표보다는 접촉저항, 온도 상승, 누적 차단 에너지, 개폐이력 및 접점 마모 상태를 종합적으로 평가하는 것이 적절하며, tanδ정전용량 등 유전 특성은 VI 내부 절연 상태 진단 항목과 구분하여 해석할

필요가 있다.

2.3 VCB 절연물의 열화 특성 및 수명 평가

VCB의 절연물은 상간 및 대지 간 절연 유지와 기계적 지지를 담당하며, 에폭시 몰드 절연물, 절연 로드, 지지 애자 및 부싱 등으로 구성된다. 장기 운전 중 온도, 습도, 오염, 전계 및 기계적 스트레스가 누적되면 절연 성능 저하, 표면 열화, 부분방전 및 연면 섬락으로 이어질 수 있다.

특히 고분자 절연물은 온도 상승에 따라 열 산화 및 분자 구조 열화가 가속되며, 고습·오염 환경에서는 표면 도전성과 누설전류가 증가하여 트래킹 및 연면 절연 성능 저하가 촉진된다. 본 연구에서는 가속 열화 시험을 통해 열화 시간 증가에 따른 AC 절연 파괴 강도 감소를 확인하고, Arrhenius 모델과 Weibull 분석을 적용하여 온도 기반 수명식을 도출하였다. 특히 Weibull 1% 파라미터를 저확률 파괴 영역의 절연 신뢰성 지표로 활용하였다. 또한 온도뿐 아니라 오염도와 상대습도를 복합적으로 고려한 수명 평가를 수행하였으며, 오염도와 습도가 증가할수록 예상 수명이 감소하는 경향을 확인하였다. 본 연구 조건에서 Light 오염 및 포화 운전온도 60℃ 기준 약 22년 수준의 예상 수명이 평가되었다.

현장 상태 진단에는 절연저항, tanδ 부분방전 및 표면 오염 상태 등이 활용 가능하며, 절연 파괴 강도는 파괴 시험 특성상 주로 실험실 기반 수명 모델 및 한계값 설정에 활용하는 것이 적절하다.

2.4 조작 메커니즘 및 윤활 그리스의 열화 특성

VCB의 조작 메커니즘은 스프링, 링크, 베어링 및 슬라이딩 구조로 구성되며, 수십 ms 이내에 정확하게 투입·개방되어야 하므로 윤활 그리스의 상태가 기계적 동작 신뢰성에 직접적인 영향을 미친다.

장기 운전 중 열과 산소에 노출된 그리스는 기유 분리·증발 및 산화가 진행되고, 반복적인 기계적 전단 스트레스에 의해 증주제 구조가 변화하면서 Gelling 및 Dry-out 상태로 열화될 수 있다. 이러한 그리스 경화는 가동부의 마찰력을 증가시켜 Opening Time 지연을 유발하며, 가속 열화 시험에서는 트립 동작 시간이 정상 한계 40 ms를 초과해 58.7 ms까지 증가하는 특성이 확인되었다.

또한 기계적 동작 지연은 리미트 스위치의 동작을 늦춰 트립 코일 통전시간을 45.3 ms에서 88.5 ms까지 증가시킬 수 있으며, 결과적으로 코일 과열·소손 및 완전 개방 불능(Stuck) 고장으로 이어질 가능성이 있다.

따라서 조작 메커니즘의 상태 진단에서는 Opening Time, 트립 코일 전류 및 통전시간, 동작 속도와 그리스 상태를 종합적으로 평가하는 것이 중요하며, 장기 신뢰성 확보를 위해서는 주기적인 그리스 점검 및 재윤활 관리가 필요하다.

3. 현장 실증 사례 연구(Case Study)

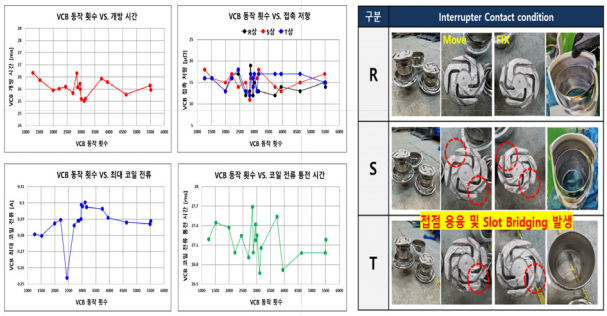
3.1 Case 1: 사내 PT&T VCB의 가속 차단 스트레스 열화 진단 평가

본 연구에서는 제안한 VCB 상태 진단 파라미터의 유효성을 검증하기 위해 PT&T Back-to-Back 시험용 VCB를 대상으로 실증 평가를 수행하였다. 해당 설비는 환경·열적 스트레스 영향은 제한적인 반면 반복적인 부하 개폐 및 단락 차단 스트레스가 집중되는 환경으로, VI 및 접점의 전기적 열화 특성을 분석하기에 적합하다.

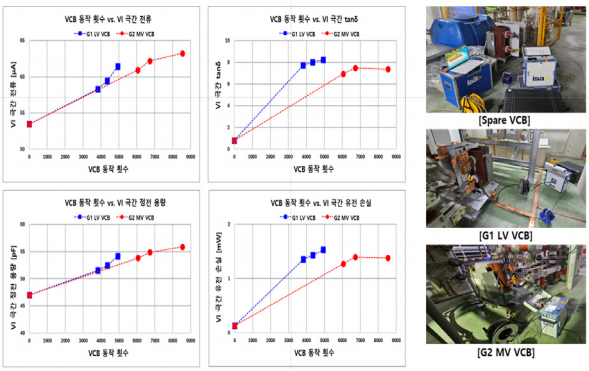
기존의 단순 동작 횟수(Operation Count)와 차단기 상태 변화 간에는 뚜렷한 상관성이 나타나지 않았으며, 개폐시간과 접촉저항 역시 변화가 제한적이었다. 반면 VI 극간 tanδ와 유전 손실은 동작 횟수 및 누적 차단 에너지 증가에 따라 뚜렷하게 상승하였다. 이는 반복 차단 시 발생한 금속 증기가 VI 세라믹 내벽에 침적되어 도전성 오염막을 형성하기 때문으로 판단된다.

한계 수명 도달 후 VI 해체 분석에서도 접점 용융, Slot Bridging 및 금속 오염이 확인되었으며, 이러한 내부 열화 상태는 극간 tanδ 증가와 높은 상관성을 나타냈다. 이를 통해 극간 tanδ가 기존 접촉저항 및 개폐시간보다 VI 내부 절연 열화를 민감하게 반영하는 진단 파라미터임을 확인하였다.

따라서 단순 동작 횟수 기반 TBM의 한계를 보완하기 위해 누적 차단 에너지와 극간 tanδ를 결합한 상태진단 기법을 적용할 수 있으며, 이는 반복 차단 스트레스에 따른 VI 열화 상태 및 잔존수명(RUL) 평가에 활용 가능하다.



<그림 1> PT&T VCB의 동작 횟수 기반 기존 진단 파라미터 및 VI 내부 접점 열화 비교



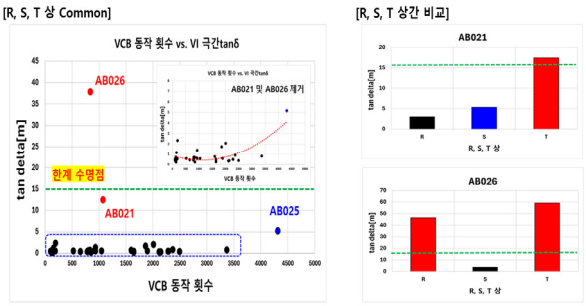
<그림 2> PT&T VCB의 동작 횟수에 따른 VI 극간 유전 특성

3.2 Case 2: 대형 LNG 화력발전소(GS EPS) 실운전 VCB의 상별 열화 진단 평가

본 연구에서는 제안한 VCB 상태 진단 기법의 현장 적용성을 검증하기 위해 GS EPS LNG 복합화력발전소 2·3호기의 VCB 20대와 ACB 17대를 대상으로 오프라인 정밀 진단을 수행하였다. 주요 진단 항목은 개폐시간, 접촉저항, 코일 전류 및 VI 극간 tanδ였으며, 특히 tanδ 기반 Condition Index를 활용하여 VI 내부 절연 열화 상태를 평가하였다.

분석 결과, 개폐시간과 접촉저항은 정상임에도 극간 tanδ가 비정상적으로 상승한 VCB가 확인되었다. 대표적으로 AB021과 AB026은 동작 횟수가 각각 1,075회와 837회로 많지 않았지만, 특정 상의 tanδ가 수명 임계 기준 1.0%에 도달하거나 초과하였다. 이는 단순 동작 횟수만으로는 실제 VI 내부 절연 열화를 충분히 반영하기 어렵다는 것을 보여준다. 이러한 tanδ 증가는 반복적인 차단 과정에서 발생한 금속 증기 및 입자의 세라믹 내벽 침적에 따른 도전성 오염과 관련된 것으로 해석된다. 또한 상별 진단 결과 특정 상에서 열화가 집중되는 상간 비대칭 특성도 확인되어, 실제 열화는 동작 횟수보다 차단 스트레스의 크기와 누적 가혹도에 더 큰 영향을 받을 수 있음을 확인하였다.

따라서 본 현장 실증을 통해 극간 tanδ 기반 Condition Index가 실제 운전 중 VI 내부 절연 열화를 민감하게 평가할 수 있으며, 단순 동작 횟수 기반 TBM을 보완하는 CBM 및 잔존수명(RUL) 평가용 핵심 진단 파라미터로 활용 가능함을 확인하였다.



〈그림 3〉 VCB 동작 횟수에 따른 극간 tanδ 측정 결과

3.3 Case 3: 옥외 가혹 환경 VCB의 절연 열화 진단 평가

해안 인접 가혹 환경에서 장기 운전된 22.9 kV VCB를 대상으로 외부 절연물의 열화 특성과 환경 기반 수명평가 기법의 현장 적용성을 검증하였다. 대상 설비는 약 12년간 운전되었으며, 염분·전도성 분진·고습에 지속적으로 노출되어 IEC 60815 기준 Very Heavy 오염 환경으로 평가되었다.

현장 진단 결과, 절연물 표면에서 방전 흔적, 탄화(Carbonization), 변색 및 연면 방전(Surface Discharge)이 확인되었다. 이는 염분과 분진에 의해 형성된 표면 오염층이 고습·결로 조건과 결합하면서 표면 도전성 및 누설전류를 증가시키고, 반복적인 표면 방전을 촉진한 결과로 판단된다.

또한 오염도, 상대습도 및 운전 온도를 반영한 환경 가중 수명평가 모델을 적용한 결과, 운전 포화 온도 60~70 ℃ 조건에서 고체 절연물의 예상 수명은 약 11~15년으로 평가되었으며, 실제 운전 연수인 12년과 유사한 수준을 나타냈다. 이는 대상 설비가 외부 절연 열화의 위험 임계 영역에 근접했음을 시사한다.

따라서 본 사례를 통해 tanδ 기반 전기적 진단과 환경 가혹도 기반 수명평가를 결합한 상태기반 진단 기법이 실제 옥외 VCB의 열화 상태와 잔존수명 평가에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.



〈그림 4〉 세아제강 옥외 배전반 VCB의 절연 열화 현장 진단 및 수명 평가 결과

4. 결 론

본 연구에서는 중고압 배전 전력 계통 핵심 보호 기기인 진공차단기(VCB)의 복합적 환경-기계-전기 열화 요인을 분석하고, 신뢰성 정량 데이터를 결합하여 핵심 상태 진단 파라미터 및 고해상도 잔여 수명 평가 모델을 수립하였다.

첫째, 절연 재료의 전도도 변화 실험을 통해 표면 오염 및 결로 조건 하에서 연면 Flashover 강도가 55% 이상 손실됨을 검증하였으며, 오염 가중치 계수를 투사한 아레니우스 수명식을 확립하여 정량적이고 현장 적합성 있는 환경 열화 거동 분석을 달성하였다.

둘째, 장기 운전 그리스의 화학적 성상 노화에 기인한 검화 고착 메커니즘을 규명하고 기계적 트립 동작 시간 지연과 트립 코일 인입 연속 특성의 가시적인 동기화 파라미터를 도출하였으며, 방진·공조 환경 유무에 따른 2~3년 주기의 정량적 그리스 재도포 유지보수 기준을 정립하였다.

셋째, 극간 tanδ 분석 알고리즘과 잔존 수명 경험식을 수립하여 VI 내부의 절연 건전성 지표를 비파괴적으로 정량 추적할 수 있음을 입증하고, 사내 대용량 가속 동작 시험(PT&T 10,152회 완수 시료), 발전소(GS EPS 상별 독립 열화 분석) 및 가혹 염해 배전 현장(세아제강 AMS)의 실제 실증 사례 연구를 통해 모델의 실용성과 타당성을 확인하였다.

본 연구를 통해 도출된 핵심 파라미터들과 수명 예측 알고리즘은 지능형 자산 관리 플랫폼인 Beyond X AMS의 핵심 Condition Index 알고리즘으로 반영되어 운용 중이며, 향후 온라인 다층 진단 솔루션의 고도화 및 전력 인프라의 예지보전 신뢰성 극대화에 크게 이바지할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구에서 수행된 주변 온도 및 부하율에 따른 온도 시험은 2024년도 한국기계전기전자시험연구원에 지원을 받아 이루어진 연구입니다. 관계부처에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] 일본전기설비학회, "공장 전기 설비의 상태 진단 및 갱신 권장 시기 조사 보고서," 2011.

[2] JEMA, "Guide for Maintenance and Life Evaluation of High Voltage Vacuum Circuit Breakers," Japanese Electrical Manufacturers' Association Report, JEM-TR 232, 2020.

에폭시/SiO_2 나노복합재료의 전하 트랩 깊이 평가 방법

Evaluation Method for Charge Trap Depth in Epoxy/SiO_2 Nanocomposites

천창영[1], 함연우[1], 구도영[1], 권도희[1], 김민희[2], 김명진[1*]
[1]충북대학교 전기공학부, [2]계명대학교 전기공학과
(*교신저자: mckim@cbnu.ac.kr)

고분자 나노복합재료는 우수한 절연 특성을 기반으로 전력설비용 절연재료에 적용될 가능성이 높다. 특히 TiO_2, SiO_2 및 Al_2O_3와 같은 무기 나노필러의 첨가는 절연파괴강도 향상, 공간전하 축적 억제 및 전기전도 특성 변화에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 전기적 특성은 고분자와 나노필러의 계면에 형성되는 전하 트랩과 밀접한 관련이 있지만, 기존 측정법만으로는 나노필러 첨가에 따른 트랩 깊이를 직접적이고 정량적으로 평가하는 데에는 한계가 있다. 이에 본 연구는 X선 광전자 분광법(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)을 이용하여 에폭시 나노복합재료의 정공 트랩 깊이를 평가하였다.

정공 트랩 깊이를 산출하기 위해 비스페놀 A형 에폭시 필름, 평균 입자 크기가 20 nm인 SiO_2 나노분말 및 SiO_2를 5 wt% 첨가한 에폭시/SiO_2 나노복합재료(epoxy/SiO_2 nanocomposite, ENC)를 준비하였다. 에폭시와 SiO_2는 절연재료이므로 XPS 측정 과정에서 대전(charging)에 의한 절대 결합에너지의 이동이 발생할 수 있다. 따라서 대전의 영향을 최소화하기 위해 각 시료의 절대 에너지 위치 대신 코어 준위(core level, CL)와 가전자대 최대값(valence band maximum, VBM)의 상대적인 에너지 차이를 이용하였다. 이때 에폭시와 SiO_2의 CL-VBM 에너지 차이와 ENC 내 코어 준위 사이의 CL-CL 에너지 차이를 정공 트랩 깊이 산출에 적용하였다.

에폭시, SiO_2 및 ENC 시료에서 각각 C 1s-VBM, Si 2p-VBM 및 Si 2p-C 1s의 에너지 차이를 측정하였다. VBM은 XPS 가전자대 스펙트럼의 선형 외삽을 통해 결정하였다. 에폭시의 C 1s와 VBM은 각각 284.44 eV와 3.89 eV, SiO_2의 Si 2p와 VBM은 각각 103.64 eV와 4.07 eV였으며, ENC의 C 1s와 Si 2p는 각각 284.52 eV와 102.52 eV였다. 이를 바탕으로 에폭시/SiO_2 계면의 가전자대 오프셋을 계산한 결과, 정공 트랩 깊이는 1.02 eV로 산출되었다.

본 연구에서는 XPS를 이용하여 에폭시/SiO_2 계면의 밴드 정렬을 결정하고 SiO_2 나노필러에 의해 형성된 정공 트랩 깊이를 1.02 eV로 정량적으로 평가하였다. 또한 기존 연구가 C_6H_{14}와 같은 단쇄 올리고머 모델로 단순화된 LDPE계 나노복합재료를 대상으로 하였다면, 본 연구는 상대적으로 복잡한 DGEBA 분자구조($C_{21}H_{24}O_4$)를 기반으로 하는 에폭시 나노복합재료에도 해당 평가 방법을 적용할 수 있음을 보였다는 점에서 의의가 있다.

주제어: 에폭시 나노복합재료, 이산화규소, X선 광전자 분광법, 정공 트랩 깊이, 가전자대 최대값

Keywords: Epoxy Nanocomposite, Silicon Dioxide, X-ray Photoelectron Spectroscopy, Hole Trap Depth, Valence Band Maximum

[감사의 글]
본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의하여 수행된 기초연구사업임. (RS-2020-NR049604)

Polarity Dependence of Discharge Light Emission in an Electrical Tree Branch Leading to Breakdown in Silicone Rubber

Jumpei Ezaki, Aoto Ueno, Hyeon-Gu Jeon, Haruo Ihori*

Department of Materials Science and Engineering, Ehime University

*Corresponding Author: ihori.haruo.mc@ehime-u.ac.jp

It is important to understand the propagation mechanism of electrical trees for improved insulation performance. In this study, we investigated the light emission characteristics of electrical tree branches in silicone rubber under AC voltage, focusing on high-intensity emissions and their polarity dependence.

The specimen configuration and experimental setup are shown in Fig. 1. A 60 Hz AC voltage was applied to a needle–counter electrode system with a gap of 1.6 mm, and the emission behavior was recorded using a high-speed camera at 1,000 fps. The light emissions during the 600 ms immediately before breakdown were analyzed, and high-intensity emission events were extracted using the 95th and 98th percentile thresholds.

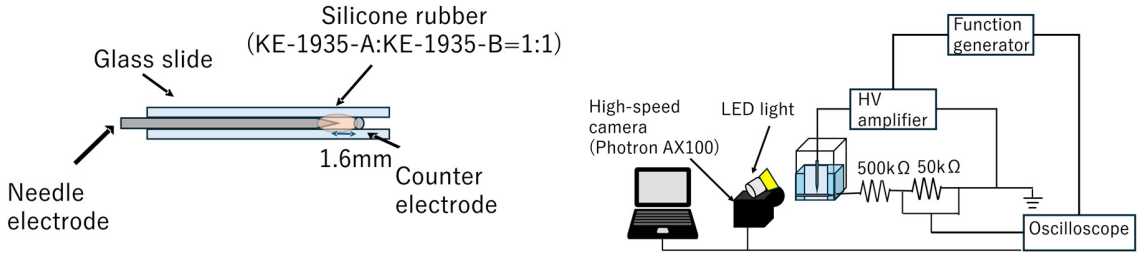


Fig. 1. Specimen configuration and experimental setup.

Figure 2 shows the emission intensities of branches B1 and B2 in a specimen under positive and negative voltage polarities. B1 was the main branch that led to the final breakdown. In B1, high-intensity emissions were more frequently observed under positive voltage polarity. In particular, above the 98th percentile threshold, 7 events were observed under positive polarity and 2 under negative polarity.

These results suggest that high-intensity emissions under positive polarity are associated with the branch leading to breakdown.

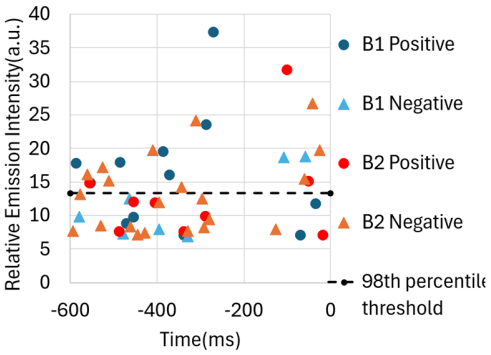


Fig. 2. Emission intensities of branches B1 and B2 under positive and negative

Keywords: Electrical tree, Silicone rubber, Light emission, Breakdown, Polarity

[Acknowledgments]

This work was partially supported by a JSPS KAKENHI Grant Numbers JP22K04046.

구두 발표 4

전력설비 자산관리

(OS4 16~20)

좌장 : 박태식 교수(목포대학교)



복소 모호성 함수를 이용한 케이블 전파상수 추정

이주봉*, 김한성* ,이춘권*†
국립부경대학교*

Estimation of Cable Propagation Constants Using Complex Ambiguity Function

Ju-Bong Lee*, Han-Seong Kim*, Chun-Kwon Lee*†
Pukyong National University*

Abstract - 본 논문에서는 유한 길이 복소 정현파의 인가 및 반사신호로부터 모호성 함수 (ambiguity function, AF)를 구성하고, 0 도플러 단면의 지연축 푸리에 변환을 이용하여 케이블 전파상수를 추정하는 방법을 제시한다. 교차 AF 및 자기 AF의 지연축 스펙트럼 비를 사용하여 케이블 응답을 구성하고, 그 크기와 위상에서 감쇠 상수 및 위상 상수를 각각 산출하였다. 시뮬레이션에서 100 m RG-58 동축 케이블 모델에 10 MHz, 400 ns 정현파를 적용한 결과, 7.68-12.35 MHz에서 설정한 전파상수에 대한 주파수 의존성을 재현하였다. 감쇠상수와 위상상수의 RMSE는 각각 1.26 μNp/m 및 1.31 μrad/m로 나타났다. 이를 통해 복소 AF가 유한 길이 반사신호에 포함된 국부 광대역 전파 정보를 일관되게 보존함을 확인하였다.

1. 서 론

전력 및 통신 설비에 사용되는 케이블은 장기간 운용되는 동안 도체 손실, 절연 열화 및 외부 환경의 영향을 받으며, 이러한 변화는 신호의 감쇠와 위상 지연에 영향을 줄 수 있다. 케이블은 대부분 구조물 내부나 지중에 설치되므로 전체 구간을 직접 점검하기 어렵고, 한쪽 단자에서 신호를 인가하고 반사응답을 분석하는 반사파계측법이 널리 활용되고 있다. 반사파계측법은 케이블을 철거하지 않고도 전파 특성과 임피던스 변화를 분석할 수 있어 케이블 상태 진단과 결함 위치 추정에 유용하다.

그 중 계단 주파수 파형 반사파계측법은 특정 주파수의 정상상태 응답으로부터 인가신호와 반사신호의 크기 및 위상 관계를 추정할 수 있다 [1]. 그러나 신호 지속 시간이 짧거나 케이블의 왕복 전파지연이 길어지면 과도응답이 관측구간에서 차지하는 비중이 증가한다. 이 경우 인가신호와 반사신호가 충분히 안정화된 정상상태 구간을 확보하기 어려우며, 정상상태 구간을 전제로 하는 기존 추정법의 적용 범위가 제한될 수 있다. 따라서 정상상태 형성 여부에 대한 의존성을 줄이면서도 신호의 크기와 위상 정보를 함께 회수할 수 있는 분석 방법이 필요하다. 한편 유한한 시간 동안 인가되는 정현파는 캐리어 주파수 주변에 국부적인 주파수 대역을 형성한다. 이는 하나의 유한 길이 정현파가 캐리어 주파수뿐만 아니라 인접 주파수의 케이블 응답도 포함할 수 있음을 의미한다. 따라서 인가신호와 반사신호 사이의 복소 상관 구조를 이용하면 정상상태 구간만을 선택하지 않고도 해당 대역의 전파 정보를 분석할 수 있다.

위그너 - 빌 분포와 모호성 함수는 각각 시간 - 주파수 영역과 지연 - 도플러 영역에서 신호의 상관 구조를 표현하며 서로 푸리에 변환 관계를 갖는다 [2, 3]. 본 연구에서는 두 표현을 이용하여 유한 길이 정현파의 인가 및 반사 특성을 시각적으로 비교하고, 전파상수 추정에는 복소 교차 모호성 함수의 0 도플러 단면을 직접 사용한다. 이를 통해 정상상태 구간에 의존하지 않고 케이블의 복소 응답을 구성하고, 감쇠상수와 위상상수를 추정할 수 있는 방법을 제시한다. 제안 방법의 적용 가능성은 시뮬레이션을 통해 10 MHz 유한 지속시간 정현파를 알려진 RG-58 케이에 인가하여 검토하였다.

2. 본 론

2.1 AF 기반 전파상수 추정

시간 창 $w(t)$를 갖는 인가 복소 정현파를 다음과 같이 정의한다.

$$x(t) = w(t)\exp(j2\pi f_c t) \tag{1}$$

여기서 f_c는 복소 정현파의 캐리어 주파수이다. 길이 L 인 케이블의 종단 반사계수가 $\Gamma(f)$, 인가신호의 주파수 응답 $X(f)$ 일 때 반사신호의 주파수 응답 $R(f)$은 다음과 같다.

$$R(f) = X(f)\Gamma(f)\exp(-2\gamma(f)L) \tag{2}$$

$$\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f) \tag{3}$$

여기서 $\gamma(f)$, $\alpha(f)$와 $\beta(f)$는 각각 케이블의 전파상수, 감쇠상수와 위상상수이다. 위상 스윕으로 재구성한 복소 신호를 사용하면 실수 신호의 양수 및 음수 주파수 대칭에 의한 교차항을 줄이면서 인가 및 반사신호의 직교 성분을 함께 보존할 수 있다 [4]. 인가신호와 반사신호 $r(t)$의 복소 교차 AF는 다음과 같이 정의된다.

$$A_{rx}(\tau,\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t+\frac{\tau}{2})x^*(t-\frac{\tau}{2})e^{-j2\pi\nu t}dt \tag{4}$$

여기서 ν는 도플러 주파수, τ는 지연을 의미한다. 케이블을 선형 시불변 시스템이라 가정할 때, 추정에 필요한 정보는 $\nu = 0$ 인 0 도플러 단면에 집중된다. 인가신호의 AF와 반사신호의 AF에 대해 이 단면을 지연축으로 푸리에 변환하면 교차 스펙트럼과 자기 스펙트럼을 각각 얻을 수 있다.

$$M_{rx}(f) = F_\tau\{A_{rx}(\tau,0)\} = R(f)X^*(f) \tag{5}$$

$$M_{xx}(f) = |X(f)|^2 \tag{6}$$

여기서 $F_\tau\{\bullet\}$는 지연축으로의 푸리에 변환을 의미한다. 교차 AF의 복소 0 도플러 단면은 인가신호를 위상 기준으로 유지하므로, 이 두 스펙트럼의 비를 취하면 인가신호 스펙트럼이 제거되어 다음과 같은 케이블 응답이 얻어진다.

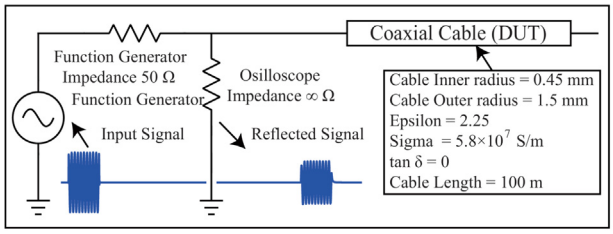
$$Q_{AF}(f) = \frac{M_{rx}(f)}{M_{xx}(f)} = \Gamma(f)e^{-2\gamma(f)L} \tag{7}$$

따라서 $\Gamma(f)$를 알고 있거나 개방 종단에서 $\Gamma(f) \approx 1$ 로 둘 수 있으면 전파상수는 다음 식으로 계산된다. 위상상수의 정수 2π 모호성은 케이블의 공칭 저손실 RLGC 위상상수와 가장 가까운 값을 선택하여 제거하였다.

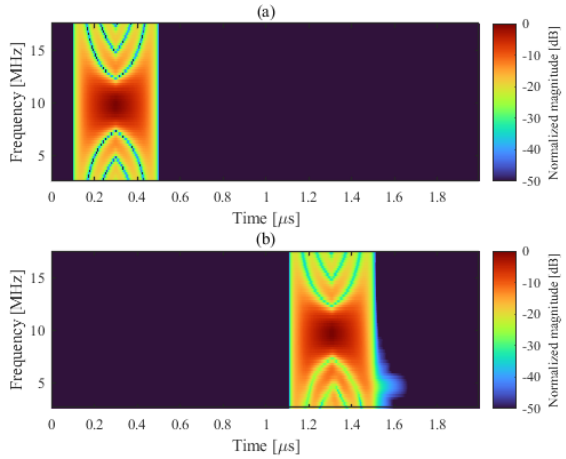
$$\hat{\alpha}(f) = -\frac{\ln|Q_{AF}(f)\Gamma(f)|}{2L} \tag{8}$$

$$\hat{\beta}(f) = -\frac{unwrap\angle|Q_{AF}(f)\Gamma(f)|}{2L} \tag{8}$$

이산 신호에서는 0 도플러 교차 AF를 인가 및 반사신호의 복소 상호상관으로, 자기 AF를 인가신호의 자기상관으로 직접 계산하였다. 이후 지연 원점이 FFT 배열의 첫 샘플에 오도록 재배열 한 뒤 지연축 FFT를 수행하였다. 이렇게 함으로, 전체 교차 WVD를 계산한 후 2차원 푸리에 변환하는 과정과 이론적으



<그림 1> 신호 인가 및 취득 시스템



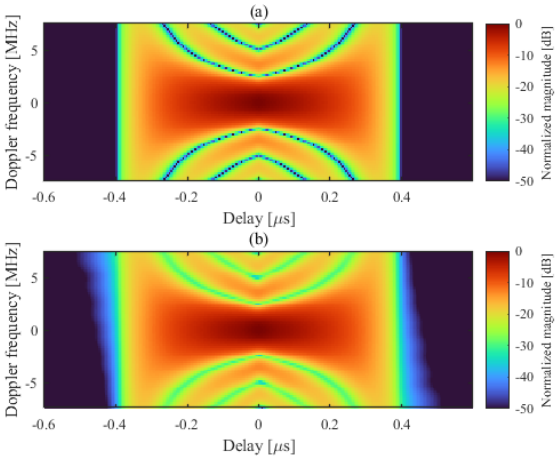
<그림 2> 인가신호와 교차 WVD (a) 인가신호 (b) 반사신호

로 동등하지만, 추정에 필요한 $\nu = 0$ 인 0 도플러 단면만 계산하므로 연산량을 줄일 수 있다. 스펙트럼 비를 계산할 때 $|M_{xx}(f)|$가 작은 주파수에서는 나눗셈에 의한 잡음 영향이 급격히 증가할 수 있으므로, 본 연구에서는 f_c를 포함하면서 최댓값 대비 -25 dB 이상인 연속 구간만 추정 대역으로 채택하였다.

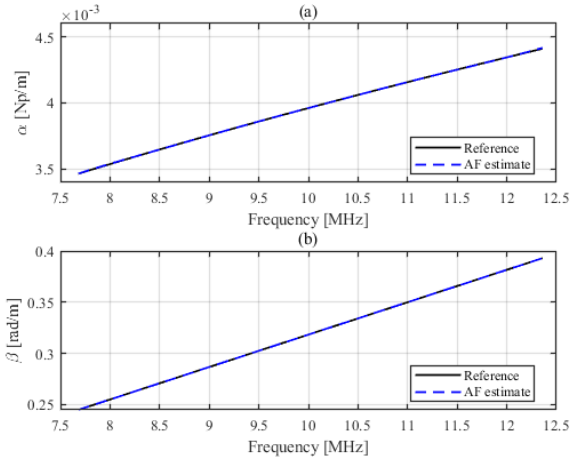
2.2 시뮬레이션 설정 및 결과

제안된 방법론을 검증하기 위해 길이 100 m의 알려진 RG-58 동축 케이블 모델을 사용하였다. 내부 및 외부 도체 반경은 각각 0.45 mm 및 1.5 mm. 비 유전율은 2.25, 도전율은 5.8×10^7 S/m 로 설정하였다. f_c는 10 MHz, 신호 지속 시간은 400 ns, 샘플링 주파수는 1.25 GHz이며, 측정 대상 케이블 모델을 통과한 후 입력 임피던스가 $\infty\,\Omega$으로 설정된 오실로스코프가 연결되어 반사신호를 측정한다.

그림 2(a), (b)는 인가 신호 반사 신호의 자기 및 교차 WVD를 보여준다. 인가 신호 및 반사 신호의 자기 WVD 및 교차 WVD에서 f_c 뿐만 아니라 더 넓은 대역의 성분들이 WVD 상에서 검출된다. 반사 신호의 교차 WVD의 경우 인가 신호의 자기 WVD와 비교하여 케이블 응답으로 인한 과도응답이 반영된 것을 확인할 수 있다. 그림 3(a), (b)는 인가신호, 반사신호의 자기 및 교차 AF를 각각 보여준다. 반사신호에서는 왕복 전파에 따른 지연, 감쇠와 분산이 AF 표현에 함께 반영된다. 입력 스펙트럼이 최댓값의 -25 dB 이상인 연속 구간을 유효 추정 대역으로 선택하였기 때문에 유효 추정 대역은 7.68-12.35 MHz으로 얻어졌다. 이 AF에서의 $\nu = 0$을 따라 얻어진 스펙트럼을 통해 추정된 감쇠상수 및 위상 상수는 각각 그림 4(a), (b)에 있다. 기준값은 시뮬레이션에서 설정한 케이블 파라미터를 기반으로 계산되었으며, 추정된 감쇠상수 및 위상상수에 대한 각각의 오차는 1.26 μNp/m 및 1.31 μrad/m로 즉 0.03179 %, 0.0004 % 수준으로 얻어졌다. 이 결과는 단일 유한 길이 정현파의 f_c 근처의 스펙트럼을 사용하여 케이블 응답을 추정하여도 스펙트럼 dB가 충분히 높을 경우 비교적 안정적으로 추정할 수 있음을 시사한다.



<그림 3> 인가신호와의 AF (a) 인가신호 (b) 반사신호



<그림 4> 전파상수 추정 결과 (a) 감쇠상수, (b) 위상상수

3. 결 론

본 논문에서는 복소 입사 및 반사신호의 AF로부터 케이블 전파상수를 추정하는 방법을 제시하였다. 0 도플러 교차 AF와 자기 AF의 지연축 스펙트럼 비를 사용하면 유한 길이 정현파에 포함된 국부 광대역 케이블 응답을 직접 구성할 수 있다. RG-58 모델에 대한 기초 시뮬레이션에서 제안한 방법은 유효 대역의 감쇠상수와 위상상수를 안정적으로 추정하였다. 향후에는 잡음, 종단 반사계수와 측정 경로의 영향을 포함한 실험 검증 및 다양한 신호를 사용한 방법론의 확장 검토를 수행할 예정이다.

감사의 글

"본 연구는 2025년도 중소벤처기업부 및 중소기업기술정보진흥원의 팁스(TIPS) 프로그램(딥테크 트랙) 지원을 받아 수행된 연구입니다. " (RS-2025-23753016)

[참 고 문 헌]

[1] C.-K. Lee, G.-Y. Kwon, and Y.-J. Shin, "Condition assessment of I&C cables in nuclear power plants via stepped-frequency waveform reflectometry," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 1, pp. 215-224, Jan. 2019.

[2] L. Cohen, Time-Frequency Analysis, Prentice Hall, 1995.

[3] P. M. Woodward, Probability and Information Theory, with Applications to Radar, Pergamon Press, 1953.

[4] 이주봉, 권구영, 이춘권. "위상 스윕 기반 복소 신호 추정을 통한 시간-주파수 영역 반사파계측법에서의 신호 검출 성능 향상." 전기학회논문지 75.8 (2026): 1872-1878.

지식그래프 기반 GNN을 활용한 변압기 고장 가설 추론 및 점검 우선순위 선정 연구

Transformer Fault Hypothesis Inference and Inspection Prioritization Using a Knowledge Graph-Based Graph Neural Network

이승윤, 임선우, 정현수, 박태식*
국립목포대학교
(*교신저자: Tspark@mokpo.ac.kr)

변압기 고장 진단에서는 여러 검사에서 얻은 관측결과를 종합해 가능한 고장을 추론하고, 이를 확인하는 데 필요한 후속 점검으로 연결하는 과정이 중요하다. 이에 본 연구에서는 검사 관측과 문헌에 제시된 검사 능력 지식을 결합하여, 고장가설 평가를 바탕으로 점검 우선순위를 산출하는 지식그래프 기반 그래프 신경망의 적용 가능성을 규명하고자 하였다. 이를 위해 관측·측정 대상·고장가설·점검방법을 노드로 정의하고, 이들 간의 연관성을 역관계를 포함한 8개 관계 유형으로 표현하였다. 이러한 그래프에서 관측과 점검 지식을 함께 학습할 수 있도록 은닉 차원 32의 2층 R-GCN을 구성하였다.

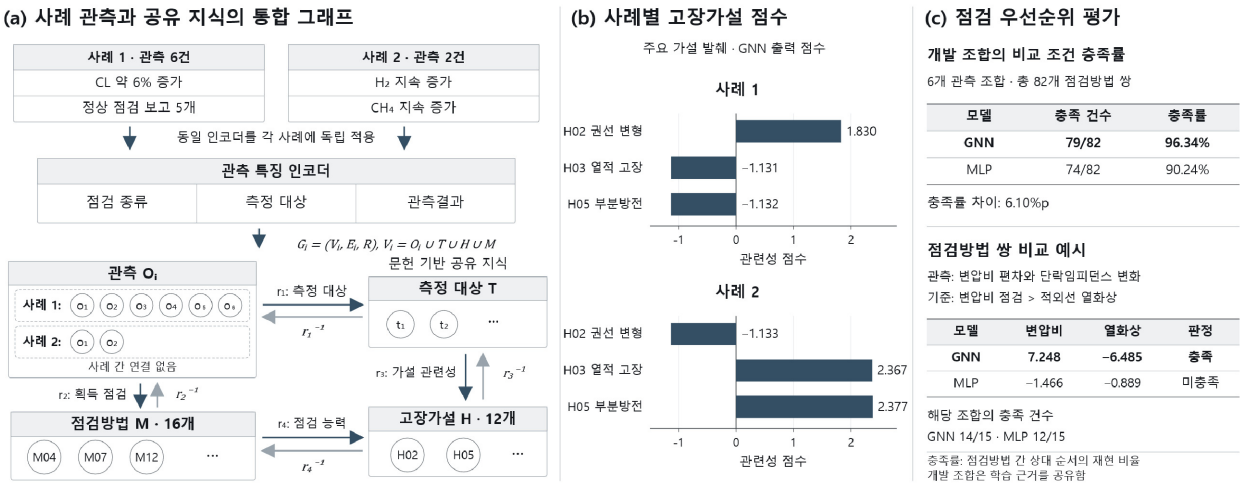


그림 1 관측 기반 지식그래프 구조와 GNN의 고장가설 추론 및 점검 우선순위 평가 결과

문헌 근거로 구성한 44개 관측 상태를 학습자료로 사용하고, 복수의 점검 관측을 결합한 6개 조건을 검증자료로 활용하였다. 검증 결과, 점검 간 우선순위 일치율은 GNN이 96.34%(79/82)로 MLP의 90.24%(74/82)보다 6.10%p 높았다. 이후 학습에 사용하지 않은 실제 고장 사례 2개에 적용하여 고장가설 추론과 후속 점검 추천 결과를 확인하였다. 첫 사례에선 누설 리액턴스와 FRA를 각각 1·2순위로, 두 번째 사례에선 전기적 부분방전 점검을 1순위로 추천하여 실제 후속 점검과 부합하였다. 이는 점검 관측과 문헌 지식을 통합한 GNN이 고장가설 평가에서 후속 점검 선정으로 이어지는 의사결정 과정을 지원할 수 있음을 보여준다.

주제어: 변압기, 지식그래프, 그래프 신경망, 점검 우선순위 선정
Keywords: Transformer, Knowledge graph, Graph neural network, Inspection prioritization

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 전남광주통합특별시의 재원으로 전라남도앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과입니다.(2026-ANCHOR-14-001)
본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단-이공학학술연구기반구축(R&D)사업(대학중점연구소_글로컬랩)의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 결과입니다. (RS-2025-25398164)

유연 자원의 계통 특성을 고려한 신뢰도 CoF 산정에 관한 연구

A Study on the Calculation of Reliability CoF Considering Grid Characteristics of Flexible Resources

임선우[1], 정현수[1], 오세훈[1], 박태식[1*]
[1]국립목포대학교 전기공학과
(*교신저자: Tspark@mokpo.ac.kr)

재생에너지의 계통 연계 확대에 따라 발전 출력의 변동성과 불확실성에 대응하고 전력 수급 균형을 유지하기 위한 계통 유연성의 중요성이 증가하고 있다. 이에 따라 유연 자원의 출력 및 소비전력 조정 능력을 활용하여 계통을 안정적으로 운영하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 유연 자원의 고장은 전력 공급능력과 계통 지원 기능의 상실을 초래할 수 있으므로, 안정적인 계통 운영을 위해서는 이러한 고장 영향을 반영할 필요성이 있다. 따라서 유연 자원 설비를 대상으로 Risk 기반 자산관리시스템을 구축하기 위해서는 유연 자원의 운전 특성과 계통 파급 등을 반영한 CoF(Consequence of Failure)를 산정해야 한다. 본 연구에서는 유연 자원 설비를 대상으로 공급능력 상실에 따른 계통 영향을 고려한 신뢰도 항목 CoF 산정 방법을 제안하였다.

유연 자원은 발전 출력 또는 소비전력을 조절하여 전력 수급 변화에 대응하고 계통의 수급 균형 유지에 기여하는 자원이다. 유연 자원에서 고장이 발생할 경우, 유효전력의 과잉 공급 또는 출력 부족으로 계통에 주파수 등 안정도에 영향을 미치게 된다. 계통의 안정도 대응 관련 용량이나 응답 속도가 충분하지 못할 경우, 발전 설비 탈락 혹은 해당 계통의 정전으로 이어질 수 있다. 이는 기존의 전력설비와 달리 설비의 고장으로 인해 즉시 정전으로 이어지는 것이 아닌 유연 자원의 특성이 반영된 CoF 산출 방법이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 유연 자원의 단일 고장에 따른 전력 공급능력 상실을 고려하여 신뢰도 CoF 산식을 제안하였다. 제안된 산식은 유연 자원의 복구 시간, 출력 용량, 대체 전력 확보시간의 비율, 전력단가, 고장시 계통에 영향을 미칠 확률 등을 고려하여 아래와 같이 산식을 제안하였다.

$$CoF_{reliablity} = D_{fm,i} \times C_i \times (1 - r_{rep,i}) \times SMP \times P_{imp|F} \quad (1)$$

제안한 산식의 적용성을 검토하기 위해 PV, 풍력 및 ESS가 연계된 배전 계통으로 세 가지 사례를 구성하여 연계된 유연 자원의 신뢰도 항목 CoF를 산출하였다. 고장복구 시간 $D_{fm,i}$은 문헌에서 제시한 수리·복구 시간을 참고하여 설정하였으며, 유연 자원의 출력용량은 각 설비의 연계된 사례를 설비의 정격출력을 적용하였다. 대체 전력 확보시간의 비율은 고장 이후 대체자원의 전력 공급이 확보되기까지 소요되는 시간을 고장 복구 시간으로 나누어 산정하였다. 전력 단가는 국내의 계통한계가격인 SMP(System Marginal Price)를 적용하여 산정하였으며, 26년 7월 값을 적용하여 133.8 원/kWh로 Case Study를 구성하였다. 고장 시 계통 영향의 조건부확률은 문헌의 과도불안정 사례를 참고하여 18%로 가정하였다. 이러한 입력값을 적용한 자원별 신뢰도 CoF 산정 결과는 표 1과 같다.

표 1 유연 자원 연계 계통 Case별 유연 자원 CoF 산정 결과

Case	$D_{fm,i}$ [h]	C [MW]	$r_{rep,i}$	SMP[원/kWh]	$P_{imp\|F}$[%]	신뢰도 CoF[원]
PV	120	300	0.0015	133.8	18	865,723
풍력	87	131	0.0024	133.8	18	274,035
ESS	4	350	0.0520	133.8	18	31,964

유연 자원의 신뢰도 CoF를 산정한 결과, 본 연구에서 설정한 조건에서는 고장 복구시간이 상대적으로 긴 PV와 풍력의 CoF가 ESS보다 높게 나타났다. 다만, 본 결과는 문헌 자료를 기반으로 설정한 가정 조건에서 산출되었으므로, 향후 실증 계통의 운전 데이터와 유연 자원이 연계되는 배전망의 특성을 반영하여 산정 방법의 타당성을 검증하고 보완할 필요가 있다.

본 논문에서는 유연 자원의 특성을 반영하여 신뢰도 CoF를 산출하였으며, 추후 유연 자원을 포함한 배전망의 Risk 기반 자산관리시스템(AMS) 구축에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 자산관리, 유연 자원, CoF

Keywords: Asset Management, Flexible Resources, Consequence of Failure

[감사의 글]

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 전남광주통합특별시의 재원으로 전라남도앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재 양성체계(앵커)의 결과입니다.(2026-ANCHOR-14-001)

본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단-이공학학술연구기반구축(R&D)사업(대학중점연구소_글로컬랩)의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 결과입니다. (RS-2025-25398164)

전력케이블 자산관리를 위한 Health Index 프레임워크 개발에 관한 연구

A Study on the Development of a Health Index Framework for the Asset Management of Power Cables

김예찬[1], 구본혁[1], 고기원[1], 반인후[1], 이제희[1], 장찬혁[1], 김원영[2], 권중지[2], 박재우[2], 강형구[1*]
[1]국립한국교통대학교 전기공학과, [2]LS전선(주)
(*교신저자: kang@ut.ac.kr)

전력설비 자산관리는 자산의 상태와 위험도를 정량화한 지표를 근거로 의사결정을 수행하며, Health Index가 그 대표적인 지표이다. 전력케이블의 경우 케이블 시스템의 특성상 상태 정보의 취득이 어렵고 각 상태 평가 항목마다 설명력이 상이하여 하나의 지표로서 다루기 어렵다. 또한, 상태 정보의 결손이 종합된 결과를 왜곡할 수 있으며, 종합된 하나의 점수만으로는 어느 열화 원인이 지배적인지, 어떠한 유형의 개입이 필요한지 명확하게 드러나지 않는다. 따라서, 본 연구에서는 전력케이블 자산관리에 효과적으로 활용할 수 있는 Health Index 프레임워크를 개발하고자 하였다.

본 연구에서 제안하는 프레임워크는 상태 정보의 입력 및 상태 점수의 산출, 열화 원인별 평가 축 구분 및 점수 종합, 설비 속성에 따른 보정, 등급 판정의 순서로 구성된다. 입력 정보는 설비의 현재 상태를 직접 설명하는 정보와 그 상태 점수를 보정하는 정보로 분리하였으며, 전자는 상태 점수를 이루고 후자는 상태 점수를 설비의 속성에 따라 보정하도록 역할을 구분하였다. 항목별 상태 점수에는 데이터의 품질과 최신성을 반영한 신뢰도 계수를 부여하고, 가중치로서 상태 점수에 곱해지도록 하였다. 열화 원인에 따라 구분한 평가 축의 점수는 각 축의 상대적 중요도를 반영하여 종합하였다. 종합된 점수는 구간별 등급으로 구분하여 설비 간 비교와 조치 우선순위 판단에 활용하도록 하였으며, 가장 높은 점수를 나타낸 평가 축을 제시하도록 하여 개입 전략 수립이 용이하도록 하였다.

본 연구에서 개발한 전력케이블 Health Index 프레임워크는 데이터의 설명력을 설비의 상태 지표에 반영하고 지배적인 열화 원인을 함께 제시한다는 측면에서 의사결정의 근거로서 기능할 것으로 기대된다. 향후 실제 선로에 대해 모의 적용함으로써 평가 축의 상대적 중요도, 보정 범위의 타당성을 검토하고 위험도 기반 의사결정 지표로 확장하고자 한다.

주제어: 건전도 지수, 자산관리, 전력케이블

Keywords: Health Index, Asset Management, Power Cable

[감사의 글]
이 논문은 LS전선(주)의 지원으로 수행되었음.

결측정보를 고려한 철거 배전설비 재사용 판정 알고리즘

Reuse Decision Algorithm for Retired Distribution Equipment with Missing Information

구본혁[1], 김예찬[1], 이제희[1], 장찬혁[1], 반인후[1], 고기원[1], 강형구[1*]
[1]국립한국교통대학교 전기공학과
(*교신저자: kang@ut.ac.kr)

철거된 배전설비의 재사용 여부는 설비 상태뿐 아니라 시험·점검 및 이력정보가 재사용 판정을 내릴 만큼 충분한지를 함께 검토해야 한다. 그러나 관측된 시험값만으로 산정한 건전도지수(Health Index, HI)는 누락된 평가항목에 따라 최종 처분이 달라질 가능성을 나타내기 어렵다. 특히 안전성 부적합, 필수시험 누락 및 자료 신뢰도 부족은 다른 양호 인자의 높은 점수로 상쇄되어서는 안 된다.

본 연구에서는 철거 배전설비의 재사용을 위해 안전조건, 필수정보, 절차품질 및 결측정보를 순차적으로 반영하는 규칙 기반 판정 알고리즘을 제안하였다. 대상은 주상·지상 변압기, 가공·지중 개폐기 및 콘크리트 전주의 5종으로 하였다. 알고리즘은 재사용, 조건부 재사용, 정비 후 재사용, 정보 보완 후 재판정, 원인규명 후 재판정, 대체개소 재평가, 기술적·경제적 부적합 및 재활용·폐기의 처분을 출력한다. 안전성 부적합과 필수정보 부족은 HI와 독립된 선행 조건으로 처리하였다.

결측 인자는 평가에서 제외하지 않고 전체 가중치 체계에 유지하였다. 관측 인자의 가중치 합을 c, 관측 HI를 Ho 라 할 때, 결측 점수가 0~100 범위에 있다고 두면 완전자료 HI의 가능구간은 다음과 같다.

$$L = cH_o, \quad U = cH_o + 100(1-c)$$

제안 방법은 가능구간 내 모든 HI 범주에서 기술적 처분이 동일할 때만 처분을 확정하고, 결측값에 따라 처분이 달라질 수 있으면 정보 보완 후 재판정으로 분류한다. 다만 결측된 물리인자에 숨은 결함은 측정시점, 기준 미달 시 조치 및 책임자를 포함한 결측 처리계획으로 관리하도록 하였다.

5종 설비의 잠정 평가 프로파일을 적용한 합성자료 검증에서, 결측 인자가 하나 이상인 66,451건을 대상으로 완전자료 결과와 비교하였다. 제안 알고리즘은 62.4%의 기록에 대해 최종 처분을 제시하였고, 완전자료 기준 처분과 비교한 처분 오판정은 발생하지 않았다. 반면 관측값의 평균 HI만을 이용한 규칙은 5.9%의 기준 처분 불일치를 보였다. 또한 제안 방법은 보류와 오판정 비용의 상대적 크기를 고려한 비교에서, 보정이 필요 없는 규칙 중 가장 낮은 기대비용을 나타냈다.

주제어: 건전도지수, 결측정보, 재사용 판정, 정보충족도, 철거 배전설비

Keywords: Decision certification, Equipment reuse, Health index, Missing information, Retired distribution equipment

[감사의 글]
본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술진흥원(KIAT) (과제번호 : RS-2026-25500724)과 2026년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20222480001596)

구두 발표 5

스마트 대전력 및 고전압 II

(OS5 21~24)

좌장 : 임장섭 교수(목포해양대학교)



이중층 절연 구조에서 공간전하 분포와 전도전류 측정을 통한 계면전하 분석

Analysis of Interfacial Charge via Space Charge Distribution and Conduction Current Measurements in a Double-layer Insulation Structure

안영국[1*], Hiroaki Miyake[1], Naoshi Hirai[1], Yasuhiro Tanaka[1]
[1]Tokyo City University
(*교신저자: g2391004@tcu.ac.jp)

고전압 직류 절연 시스템에 적용되는 이중층 절연 구조에서는 서로 다른 재료의 전도 특성으로 인해 계면에 전하가 축적되고, 이에 따라 각 절연층의 전계 분담이 달라질 수 있다. 특히 온도와 인가 전계가 증가하면 전극으로부터의 전하 주입 및 벌크 내 공간전하 축적이 함께 발생할 수 있어 단순한 전도도 차이만으로 실제 전계 분포를 예측하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 XLPE/PEN 이중층 절연 구조에서 전도전류와 PEA법으로 평가한 계면전하 및 전계 분포를 비교하여 Maxwell-Wagner 계면분극 모델의 적용 가능성과 한계를 규명하고자 하였다. 시료에는 평균 전계 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 및 40 kV/mm를 단계적으로 인가하였으며, 각 전계 단계는 인가 20분 단락 10분으로 유지하였다. 각 조건에서 전도전류를 측정하여 전류밀도를 산출하고, 두 절연재의 전도 특성 차이로부터 Maxwell-Wagner 모델에 따른 계면전하를 계산하였다. 동시에 PEA법을 이용하여 시료 내부의 공간전하 분포를 측정하고, 측정된 전하밀도로부터 계면전하량과 각 절연층의 내부 전계 분포를 도출하였다. 전도전류 밀도로부터 계산한 계면전하와 PEA 측정으로부터 산출한 계면전하는 인가 전계 증가에 따라 유사한 증가 경향을 나타냈으며, 40 kV/mm에서 계면전하량은 약 -1.2 mC/m²에 도달하였다. 계면전하가 증가함에 따라 XLPE와 PEN에 분담되는 전계의 차이도 확대되었으며, 고전계 조건에서는 두 층 사이에 약 35 kV/mm 수준의 전계 차이가 나타났다. 이는 전도도 차이에 의해 형성되는 Maxwell-Wagner 계면분극이 실제 이중층 절연체의 전계 왜곡에 직접적인 영향을 미침을 보여준다. 그러나 고온 또는 고전계에서 전하 주입이 증가할 경우 계면전하는 Maxwell-Wagner 분극뿐 아니라 주입·축적된 공간전하의 영향을 함께 받기 때문에 전도전류 기반 모델만으로 정확한 평가가 어렵다. 따라서 실제 운전 조건에서 이중층 절연 구조의 계면전하와 전계 분포를 평가하기 위해서는 PEA법을 통한 공간전하의 직접 측정이 필요하며, 이는 고전압 직류 복합 절연 시스템의 전계 설계 및 절연 신뢰성 평가에 활용될 수 있다.

주제어: Maxell-Wagner 분극, Pulsed Electroacoustic (PEA) 법, 공간전하, 전도전류, 계면전하

Keywords: Maxwell-Wagner Polarization, Pulsed Electroacoustic (PEA) Method, Space charge, Conduction Current, Interfacial Charge

[감사의 글]
이 연구에 사용된 XLPE 시료는 Sumitomo Electric Industries, Ltd.로부터 제공받았음.

불평등 전계에서 SF_6 가스의 DC 중첩 뇌임펄스 극성별 절연파괴 특성 분석

Polarity Effects on SF_6 Breakdown under DC-Superimposed Lightning Impulses in a Nonuniform Field

고건[1], 권일[1], 허창근[2], 황휘동[2], 정동훈[2], 이방욱[1*]
[1]한양대학교 HVDC 전력 연구실, [2](주)효성 중공업연구소
(*교신저자: bangwook@hanyang.ac.kr)

HVDC 가스절연개폐장치(GIS)에는 운전 중 DC 전압에 뇌임펄스(LI)와 같은 과도전압이 중첩될 수 있으며, 중첩 조건에 따라 절연 성능이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 불평등 전계에서 SF_6 가스의 DC 중첩 LI 극성 조합에 따른 절연파괴 특성을 규명하고자 하였다.

절연파괴 시험은 절대압 0.3 MPa SF_6의 봉-평판 전극계(봉 반경 7 mm, 간극 9 mm)에서 1.2/50 μs LI로 수행하였다. 정·부극성 DC 전압을 LI 부극성 50% 절연파괴전압(U_{50})의 0.3 p.u.로 선인가한 후 정·부극성 LI를 중첩하였으며, 상승·하강법으로 각 조건의 U_{50}을 산출하였다.

실험 결과, LI 정극성의 U_{50}은 LI 단독 대비 반대극성 중첩 시 3.2%, 동일극성 중첩 시 13.8% 감소하였다. LI 부극성의 U_{50}은 LI 단독 대비 반대극성 중첩 시 13.2% 증가하였으나, 동일극성 중첩 시 2.3% 감소하였다. 이러한 극성 조합별 절연내력 차이를 해석하기 위해, 중첩 조건에 따른 전계의 시간적 변화 특성을 분석하였다.

이를 통해 DC 중첩에 따른 절연파괴 특성은 DC와 LI의 극성 조합에 따라 비대칭적으로 나타남을 확인하였으며, HVDC GIS의 과도 절연성능 평가 시 극성 조합을 고려할 필요가 있음을 시사한다.

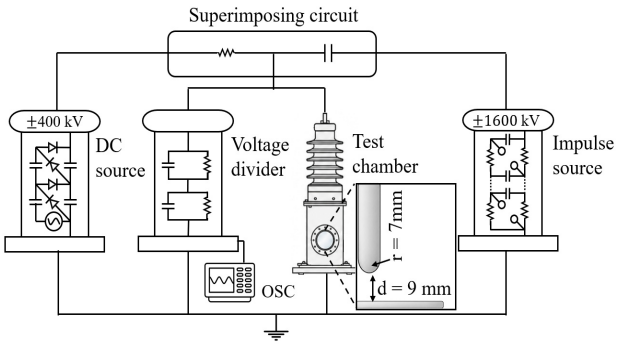


그림 1. DC 중첩 뇌임펄스 실험 회로

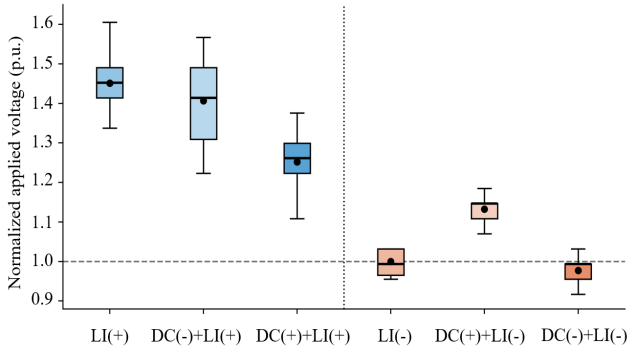


그림 2. 극성 조합에 따른 정규화 절연파괴전압

주제어: SF_6, DC 중첩 뇌임펄스, 절연파괴, 극성 효과, 고전계 유지 특성

Keywords: SF_6, DC-superimposed lightning impulse, breakdown, polarity effect, high-field persistence

[감사의 글]
본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)의 재정 지원을 받아 수행되었으며, 한국산업기술진흥원의 관리 하에 “2026 지역 중점산업 기반 대학기업 연계형 OpenLab 육성지원 사업”의 지원을 받았습니다. (사업번호: B0080219002809).

단락에너지 노출에 따른 K6 친환경 절연가스의 PMVE 농도 변화 및 절연내력 평가

Evaluation of PMVE Concentration Change and Dielectric Strength of K6 Eco-Friendly Insulating Gas under Short-Circuit Arc Energy Exposure

장현재[1], 오연호[1], 전장은[1], 오호석[1], 권두경[1], 김진규[2*]
[1]한국전기연구원 [2]경북대학교 전기공학과
(*교신저자: kjg@knu.ac.kr)

SF_6 대체 절연가스는 낮은 GWP와 충분한 절연·차단성능뿐 아니라 전력기기 수명기간 동안 안정적으로 유지되어야 한다. 국내 개발 K6는 PMVE와 CO_2를 기반으로 하는 저GWP 혼합가스이나, PMVE의 짧은 대기수명과 불포화 탄소 이중결합 특성 때문에 고에너지 아크 노출 시 농도 저하와 절연성능 변화 검증이 필요하다. 본 연구에서는 K6가 충진된 상용 145kV GCB에 145kV, 40kA, 50Hz 조건의 L90 단락전류를 반복 인가하고, 각 차단 후 아크전압, 아크전류 및 아크시간을 계측하여 누적 아크에너지를 산정하였다. 또한 차단기 내부 가스를 회수하여 GC 분석으로 PMVE 농도를 측정하고, 동일 농도의 K6 혼합가스에 대해 IEC 60060 기반 구-평판 전극 V50 시험을 수행하였다. 시험 결과 9회 차단 후 누적 아크에너지는 2.761MJ였으며, PMVE 농도는 초기 10.15 mol%에서 8.00 mol%로 감소하였다. 그러나 8 mol% 조성의 절연내력은 기준 10 mol% 조성과 비교하여 시험오차 범위 내에서 유지되었고, 일부 조건에서는 동등 또는 높은 V50을 보였다. 이는 단락에너지 노출에 따른 PMVE 농도 저하가 곧바로 절연내력 저하로 이어지지 않음을 의미한다. 따라서 K6 혼합가스는 송전급 차단기의 고에너지 차단 조건에서도 절연성능 유지 가능성을 보였으며, 향후 분해생성물, 재료적합성 및 장기 운전조건 평가를 통해 전력기기 적용성을 추가 검증할 예정이다.

<표 1> 단락에너지 노출에 따른 PMVE 농도 및 절연특성변화

항목	결과
시험대상	145kV, 40kA, 가스절연차단기
누적 아크에너지	2.761 MJ
PMVE 초기 농도	10.15 mol%
PMVE 최종 농도	8.00 mol%
농도 감소량	2.15 mol%
절연내력 변화	유의미한 저하 없음

주제어: SF6 대체가스, K6 혼합가스, PMVE, 단락 아크에너지, 절연내력

Keywords: SF6 alternative gas, K6 gas mixture, PMVE, short-circuit arc energy, dielectric strength

[감사의 글]
이 연구는 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본사업임(No. 26A01058)

기중 코로나 결함의 DC 부분방전 개시전압 측정에 관한 연구

A Study on the Measurement of DC Partial Discharge Inception Voltage for a Corona Defect in Air

김예찬[1], 구본혁[1], 이제희[1], 장찬혁[1], 고기원[1], 반인후[1], 김용주[2], 강형구[1*]
[1]국립한국교통대학교 전기공학과, [2]O&M Korea
(*교신저자: kang@ut.ac.kr)

IEC 60270은 PD (Partial Discharge) 측정에 관한 표준으로, DC (Direct Current)에 대해서는 규정된 크기를 초과하는 펄스의 개수로 PD를 평가하도록 하되 그 크기와 개수는 관련 기술위원회가 규정하도록 한다. 또한, 해당 표준은 DC 조건에서 PD의 양을 결정하기 위한 일반적인 방법이 없음을 명시하고 있다. HVDC용 컨버터 변압기의 요구사항을 정의하는 IEC/IEEE 60076-57-129에서는 IEC 60270에 따라 PD를 측정하도록 규정하고 있으며, 2,000 pC 이상에 해당하는 펄스의 발생 개수로 합부를 판정할 뿐 개시전압은 다루지 않는다.

한편, DC에서는 위상 기준이 없어 결함 유형의 식별에 방전 크기와 방전 간 시간 분포가 이용되며, 그 때 특징량을 취득하는 전압은 결함 유형별 PDIV (Partial Discharge Inception Voltage)를 기준으로 정해진다. 즉, PDIV는 결함 유형의 식별을 위해 시스템에 인가할 전압의 크기를 결정하는 기준점이 된다. 그러나, 그 결정 절차가 정립되어 있지 않아 결함 유형별 비교와 그에 따른 개입 전략의 수립이 제한된다. 따라서, 본 연구에서는 기중 코로나 결함을 대상으로 DC PDIV 측정 프로토콜을 제안하고자 한다.

DC PDIV 측정 프로토콜의 검토에 있어서, CIGRE WG D1.67에서 제안한 불평등전계 모의 전극시스템을 활용하였다. 계측은 HFCT (High Frequency Current Transformer)와 MTFA-50을 활용하였다. 검출 임계값은 구 대 평판 전극계에 PDIV 예상 전압을 인가하여 측정한 배경 노이즈를 토대로 설정하였다. 최초 유효 펄스가 검출되는 전압을 탐색하고 그보다 낮은 전압에서 단계적으로 승압하며 각 단계에서 1분 단위로 5회 관측하였다. 실험 결과, 최초 유효 펄스는 6.3 kV에서 검출되었으며, 1분당 1펄스 이상이 5회 연속적으로 유지되는 최저 전압으로 판정한 PDIV는 6.5 kV로 도출되었다.

본 연구의 결과를 통해 결함 유형의 식별을 위한 전압 인가 크기 및 절차, PDIV 측정, 결함 유형 식별을 위한 실험 프로토콜의 재현성을 향상할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 부분방전 개시전압, 직류 부분방전, 코로나 결함

Keywords: Partial Discharge Inception Voltage, DC Partial Discharge, Corona Defect

[감사의 글]
이 논문은 HD현대일렉트릭의 지원과 2025년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계 (RISE)의 결과임 (2025-RISE-11-004-05).

구두 발표 6

전력IoT · 센서

(OS6 25~28)

좌장 : 박명혜 소장(한전 전력연구원)



재생에너지 발전현황 모니터링을 위한 신재생 데이터 통합 플랫폼 기술 개발

Development of Renewable Data Integration Platform for Generation Monitoring

김영일[1], 노재구[1], 김예리[1], 신진호[1]
[1]한국전력공사 전력연구원 디지털솔루션연구소
(*교신저자: yi.kim@kepco.co.kr)

탄소중립 및 친환경 에너지 전환 가속화에 따라 태양광·풍력 등 신재생에너지의 계통 연계 비중이 급격히 증가하면서 기상 조건에 따른 출력 변동성과 계통 안정도 저하 문제가 심화되고 있다.

본 연구에서는 SCADA, ADMS, MDMS 등 이종 전력 운영 시스템의 데이터를 통합하여 전국 단위 신재생 발전량을 실시간으로 감시하고 계통 운영을 효율적으로 지원하는 신재생에너지 데이터 통합 플랫폼을 개발하고자 하였다.

본 연구에서는 2022년부터 2026년까지 4단계에 걸쳐 플랫폼을 구축하였으며, 한전 SCADA 및 ADMS를 통해 송·배전급 신재생 설비의 1분 단위 계측 데이터를 수집하고 AMI 기반 MDMS를 활용해 PPA 거래 설비의 1시간 단위 계량 데이터를 수집·통합하는 구조를 설계하였다. 또한 미계측·미계량 설비에 대해서는 인근 발전설비의 발전 이용률 기반 회귀분석 추정 알고리즘을 적용하였으며, GIS 기반 지리정보와 통합하여 시각화 모니터링 체계를 구현하였다.

플랫폼 구축 결과, 총 98만 호(시장거래 1만 호, PPA 19만 호, 상계거래 78만 호)의 신재생 고객 정보 DB를 구축하였으며, 2026년 기준 총 43.3GW(태양광 34.9GW, 풍력 2.4GW, 연료전지 1.3GW, 기타 4.6GW) 규모 발전설비의 실시간 발전량을 성공적으로 산출·감시하였다. 특히 실시간 계측 대상 32GW 이외에 미계측 설비 약 11GW에 대해서도 추정 알고리즘을 통해 1분 주기 발전 현황을 대시보드로 표출함으로써 전국 단위 관제 정확도를 확보하였다.

본 플랫폼은 이종 관제 시스템 간 데이터 격차를 해소하고 실시간 계통 수급 균형 관리를 가능하게 함으로써, 향후 AI 기반 발전량 예측 및 버추얼 트윈 연계를 통한 차세대 지능형 전력망 관제 체계 구축에 핵심 기초 기술로 활용될 수 있을 것이다.

주제어: 신재생, 발전량, 모니터링, 플랫폼

Keywords: renewable, generation, monitoring, platform

[감사의 글]
이 논문은 한전 자체과제로 2022년도부터 수행한 “신재생 에너지 실시간 데이터 플랫폼 및 유연접속 운영시스템 개발” 과제의 연구결과물입니다.

효율적인 유사사례 탐색을 위한 데이터 증강 방법론

A Data Augmentation Methodology for Efficient Similar-Case Retrieval

이현민, 장민영, 박병석*
한국전력공사 전력연구원

특정 기기에 고장이 나면 과거 고장분석 보고서에서 비슷한 사례를 찾아보는 것이 원인을 밝히고 재발을 막는 데 큰 도움이 된다. 하지만 "이런 질문에는 이 보고서가 정답"이라는 식으로 정리된 학습 자료가 없어서, 기기 고장에 맞는 검색 모델을 만들기 어려웠다. 본 연구는 이 문제를 풀기 위해, 보고서만 있으면 학습 자료를 자동으로 만들어낼 수 있는 데이터 증강 방법론을 제안한다.

방법은 세 단계로 이루어진다. 먼저 생성형 AI가 각 보고서를 읽고 현장 담당자가 실제로 물어볼 법한 질문을 여러 유형으로 만들어낸다. 이때 현업 전문가의 의견을 반영해 질문 유형을 정하고, 표현이 한쪽으로 치우치지 않도록 다양하게 생성하였다. 다음으로 서로 거의 같은 질문과 평가용 질문을 지나치게 닮은 질문을 걸러내어 학습 자료의 품질과 평가의 공정성을 높였다. 마지막으로 겉보기에는 비슷하지만 실제로는 다른 사례인 보고서를 '헷갈리기 쉬운 오답'으로 함께 제시하여, 모델이 사례 간의 미세한 차이까지 구분하도록 학습시켰다.

과거 고장분석 보고서 약 4천 건에 이 방법을 적용해 검색 모델을 학습한 결과, 첫 번째로 제시한 사례가 정답일 확률이 약 46%에서 약 70%로 높아졌다. 현업 전문가가 직접 검토한 질문에서도 같은 개선 경향이 확인되었다. 이는 사람이 정답 자료를 따로 만들지 않고도 보고서만으로 분야 특화 검색 모델을 만들 수 있음을 보여주며, 고장 이력을 활용한 AI 진단 지원 시스템에 활용될 수 있다.

주제어: 유사사례 검색, 데이터 증강, 대규모 언어모델, 대조학습

Keywords: Similar-Case Retrieval, Data Augmentation

AI 기반 전력시장 온톨로지 구축 자동화 및 응용

AI-Based Automation of Power Market Ontology Construction and Its Applications

최윤아[1], 권성구[2], 김시연[2*]
[1]한국전력공사 전력연구원, [2]한국전력공사 전력연구원
(*교신저자: seon.kim@kepco.co.kr)

전력시장 규정, 업무절차 및 시장지표는 밀접하게 연관되어 있으나 서로 다른 문서에 흩어져 있어 출처와 연관 관계를 파악하기 어렵다. 본 연구에서는 원문 출처를 보존한 전력시장 온톨로지의 자동 구축과 근거를 제시하는 질의응답의 적용 가능성을 규명하고자 하였다.

이를 위해 문서 745개를 문맥 단위의 청크로 분할하고, 대규모 언어모델로 개체 16종과 관계 18종을 추출하였다. 추출한 개체와 관계의 유형·방향을 검증하고 명칭을 정규화한 뒤 원문 출처와 함께 저장하였다. 이를 활용한 질의응답에서는 질문 개체를 기준으로 관계를 정·역방향 최대 2단계로 탐색하고 연결된 원문을 근거로 답변을 생성하였다.

온톨로지는 개체 114,301개와 출처별 관계 255,633건으로 구성되었다. 주요 개체는 지표 23,526개, 절차 18,144개, 규정 10,366개였다. 적용 사례인 계통한계가격 질의에서는 전력거래소, 하루전발전계획 및 제2.4.2조의 연결 관계를 확인하였다. 답변에 원문 출처를 함께 제시해 사용자가 정보를 대조할 수 있도록 하였다.

본 연구는 분산된 전력시장 지식의 관계와 출처를 관리하고, 답변의 근거를 원문에서 확인할 수 있는 질의응답 방안을 제시하였다.

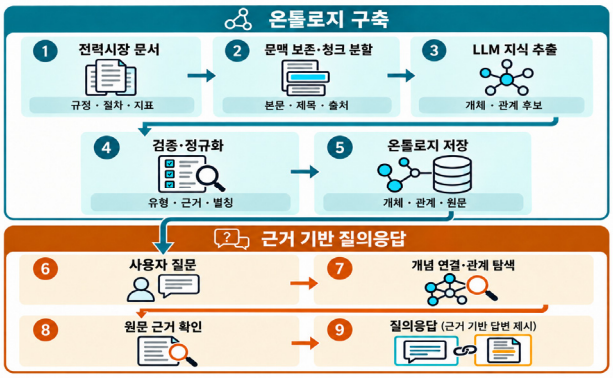


그림 1 AI 기반 전력시장 온톨로지 구축 및 질의응답 절차

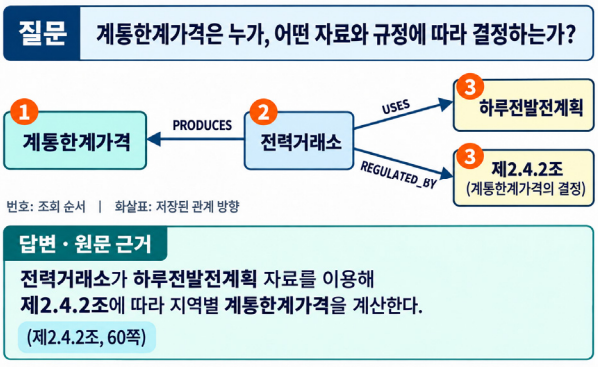


그림 2 실제 추출 그래프를 활용한 질의응답 재현 예시

주제어: 전력시장, 온톨로지, 지식그래프, 대규모 언어모델, 질의응답

Keywords: Power Market, Ontology, Knowledge Graph, Large Language Model, Question Answering

[감사의 글]
이 논문은 한국전력공사 전력연구원의「실시간 전력시장의 비용분석 및 에너지계획 최적화 기술 개발」과제(R24FA01)의 지원을 받아 수행되었음.

전력설비 전선 이상진단을 위한 AI 이상판별 파이프라인 설계

Design of an AI-Based Anomaly Detection Pipeline for Power Line Fault Diagnosis in Power Facilities

김영현[1*], 박병석[1], 박명혜[1],
[1]한국전력공사 전력연구원 디지털솔루션연구소

배전 전선은 선로 전 구간에 걸쳐 분포하고 지상에서 원거리로 관찰되므로, 피복 손상·백화·부풀음 등의 이상을 육안으로 점검하는 데 많은 시간과 인력이 소요되며 점검자에 따라 판단 편차가 발생한다. 이에 광학카메라로 촬영한 설비 이미지에 시각지능 기술을 적용하여 전선 이상판별을 자동화하고자 하였다. 그러나 전선은 6000×4000 해상도의 전체 이미지에서 얇고 긴 형태로 나타나 차지하는 면적이 매우 작기 때문에, 이미지 전체를 입력하는 단순 객체검출(detection) 방식으로는 미세한 이상부위를 식별하기 어렵다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 전선 인식과 이상부위 추정을 단계적으로 분리한 AI 이상판별 파이프라인을 설계하였다.

제안 파이프라인은 ① 전선 영역 인식, ② 전선 영역 Crop 추출 및 확대, ③ 이상부위 추정의 3단계로 구성하였다. 1단계에서는 원본 이미지에서 전선의 위치와 경로를 인식하고, 2단계에서는 인식된 전선을 따라 일정 크기의 부분 영역을 인접 영역과 일부 중첩되도록 Crop하여 추출한 뒤 판별 모델의 입력 크기에 맞게 확대한다. 이때 원본 이미지를 축소하지 않고 부분 영역 단위로 처리하므로 전선 표면의 세부 정보가 보존된다. 3단계에서는 확대된 Crop 이미지에서 이상부위를 추정하고, 그 결과를 원본 이미지 좌표로 환산하여 설비 단위로 표출하도록 설계하였다.

이러한 구조는 전선과 무관한 배경 영역을 판별 대상에서 제외하여 모델이 전선 표면의 이상부위에 집중할 수 있도록 하며, 고해상도 원본을 일괄 축소할 때 소실되는 미세 결함 정보를 확보할 수 있다는 장점이 있다. 또한 전선 인식 모델과 이상부위 추정 모델을 독립적으로 구성하여 단계별 성능 개선과 모델 교체가 용이하도록 하였다.

향후 현장 촬영 이미지를 대상으로 단순 검출 방식과의 비교 시험을 통해 제안 파이프라인의 이상판별 성능을 검증할 예정이며, 송전선·OPGW 등 가늘고 긴 형상을 갖는 타 설비의 영상 진단으로 확장 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 전력설비 진단, 전선 이상판별, 비전-언어 모델, 오탐 재분류, Human-in-the-Loop

Keywords: Power Facility Diagnosis, Power Line Anomaly Detection, Vision-Language Model, False Positive Filtering, Human-in-the-Loop

[감사의 글]
이 논문은 한국전력공사 전력연구원 연구과제의 지원으로 수행되었음. (No.[R26IA05])

포스터 발표 1

전기재료 I

(PS1 001~011)

좌장 : 김동석 박사(한국원자력연구원)



MLCC의 유전 흡수를 측정하는 Standard인 MIL-PRF-19978의 이해

An Analysis of the MIL-PRF-19978 Standard for Measuring Dielectric Absorption in MLCCs

김현진[1], 김민재[2], 김민기[3], 강동원[4], 하민우[1*]
[1]명지대학교 전기공학과, [2]명지대학교 기계시스템공학부, [3]국립공주대학교 전기전자제어공학부, [4]중앙대학교 에너지시스템공학부 (*교신저자: isobar@mju.ac.kr)

적층 세라믹 커패시터 (MLCC)는 소형화 및 높은 신뢰성을 바탕으로 전자 시스템 전반에 널리 적용되고 있다. MLCC에 사용되는 $BaTiO_3$ 기반 유전체는 전계 반응에 따른 전하 정렬 과정에서 '유전 흡수 (dielectric absorption)' 현상을 나타낸다. 이는 커패시터를 완전히 방전시킨 후에도 유전체 내 잔류 전하가 서서히 방출되어 전압이 미세하게 재상승하거나, 특정 주파수 이상에서 용량이 감소하는 현상이다. 유전 흡수가 크면 샘플-앤-홀드 회로나 ADC (아날로그-디지털 변환기)의 정확도를 저하시키고 Q-factor를 떨어뜨린다. 그러나 상용 규격서에는 유전 흡수 관련 정보가 명시되지 않은 경우가 많아, 이를 체계적으로 평가하기 위해 미국 국방성 표준인 MIL-PRF-19978 규격에 대한 이해가 필요하다.

MIL-PRF-19978은 고정 커패시터의 정격 신뢰도 (ER), PIN (part identifying number) 식별 체계 및 평가 기준을 다룬다. 특히 표준 내 기술된 유전 흡수 측정 회로와 시험 절차는 정량적 평가의 기준을 제공한다. 측정 절차는 다음과 같다. 스위치를 연결하여 커패시터를 1시간 동안 DC 전압 (V_2)으로 충전 (초기 서지 전류 50 mA 이하)한 후, 5 Ω 저항에 연결하여 10초간 방전시킨다. 방전 직후 저항을 분리하고 1분 동안 자발적으로 회복되는 유전 흡수 전압 (V_1)을 10,000 MΩ 이상의 고임피던스 electrometer로 측정한다. 유전 흡수 비율 d는 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$d = \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \times 100$$

MIL-PRF-19978은 non-ER (24개 중 1개 불량 허용) 및 ER (40개 중 1개 불량 허용)에 대한 평가 기준을 제시하여 정밀 응용 분야에서의 표준화된 검증 프로토콜을 제공한다.

본 논문에서는 MLCC의 정밀 응용 시 간과하기 쉬운 유전 흡수 현상과 MIL-PRF-19978 규격 기반의 평가 절차를 소개하였다. 유전 흡수는 정밀 커패시터 회로의 성능을 결정짓는 주요 요소이며, 표준화된 측정 규격의 적용은 향후 고신뢰성 MLCC 개발 및 품질 평가를 위한 중요한 지침이 될 것으로 기대된다.

주제어: 적층 세라믹 커패시터, 유전 흡수, MIL-PRF-19978, 신뢰성

Keywords: MLCC, dielectric absorption, MIL-PRF-19978, reliability

[감사의 글]
This research was supported by the Gyeonggi ANCHOR Program (Project No. 2026-ANCHOR-09-A15, Project Title: Optimization of Magnetics Design for a 50 kW Bidirectional Power Converter in ESS (Energy Storage System) Applications).

전력기기 에폭시 절연소재의 정량평가에 관한 연구

A Study on Quantitative Evaluation of Epoxy Insulation Materials for Power Equipment

손흥민, 김성일, 김상기, 송민규, 서주영
한국전력공사 기자재센터
(*교신저자: qksqkwldp@naver.com)

전력기기용 에폭시 절연소재는 제조 공정 품질이 장기 신뢰성을 좌우하는 핵심 소재이나, 최근 온도차가 커지는 겨울철에 고장이 다수 발생하였다. 본 연구에서는 고장 기기의 에폭시 하우징 시편을 대상으로 소재특성을 분석하여 고장 원인을 규명하고, 공정개선 효과를 정량적으로 평가하고자 하였다. 고장품(F)과 정상품(N) 시편을 KS M 3006에 따라 각 9개씩 준비하여 인장강도, 흡습률, DSC, TGA, FT-IR 시험을 수행하였다. 공정개선 전 인장강도는 평균 252.7 kgf/cm²로 규격 하한(600 kgf/cm²)의 42.1% 수준이었고 최대·최소 편차는 3.5배에 달했다. DSC·TGA·FT-IR 분석 결과 고장품이 정상품보다 낮은 값을 보여 불완전 경화가 원인으로 확인되었다. 수지 주입온도를 15℃ 상향하고 경화 공정을 3시간 이상 개선한 후 평균 인장강도는 306.9 kgf/cm²로 21.5% 향상되었다. 흡습률은 고장품·정상품 모두 기준치(0.2%) 이하로 정상 범위였다. 본 결과는 경화 공정 관리를 통해 에폭시 절연소재의 기계적 신뢰성을 정량적으로 개선하여 당사의 규격서에 에폭시 관련 물성치를 추가하여 배전공급 신뢰도가 증가될 것으로 기대된다.

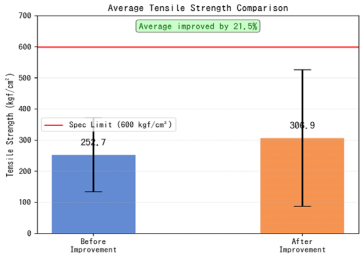


그림 1. 공정개선 전·후 시편별 인장강도 비교

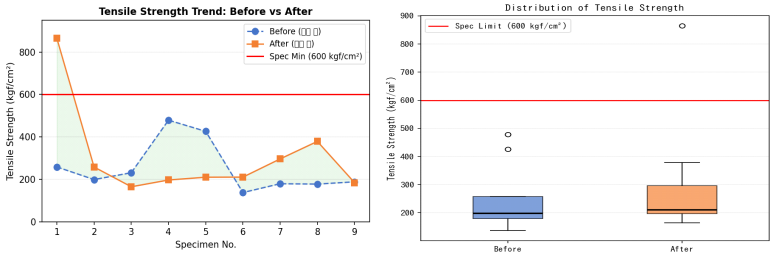


그림 2. 공정개선 전·후 인장강도 평균 및 분포

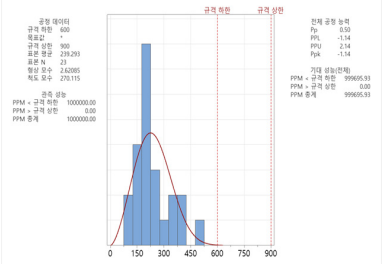


그림 3. 인장강도 공정능력 분석
Pp (공정 성능 지수) : 0.50 [매우 나쁨]
→ 규격 폭 대비 공정 변동이 매우 큼

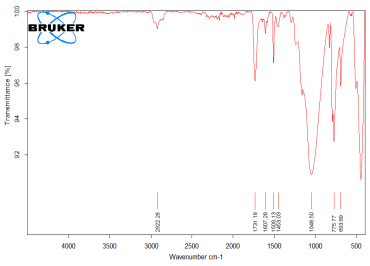


그림 4. 시편 FT-IR 분석 결과

주제어: 에폭시절연소재, 지상개폐기, 인장강도
Keywords: Epoxy Insulation Material, Pad-mounted Switchgear, Tensile Strength

폐 XLPE 재생 기술을 활용한 전력케이블 개발

Development of Power Cables Using Waste XLPE Recycling Technology

양종석, 박찬주, 신동훈, 홍동석*
대한전선(주) 기술연구소
(*교신저자: dshong@taihan.com)

전력케이블의 절연재로 널리 사용되는 가교 폴리에틸렌(XLPE)은 우수한 전기적·기계적 특성을 갖지만, 열경화성 고분자로 사용 후 재용융 및 재가공이 어려워 재활용에 한계가 있다. 특히, 탈가교 과정에서 고분자 주쇄가 손상되면 분자량 감소와 기계적 물성 저하가 발생할 수 있어 고분자 구조를 최대한 유지하면서 재활용할 수 있는 기술이 요구된다. 본 연구에서는 탈가교 기술을 적용하여 폐 XLPE를 재생하고, 이를 활용한 전력케이블용 시스의 제조 및 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

폐 XLPE를 분쇄한 후 압출기에서 탈가교를 수행하였다. 제조된 재생 수지를 신재 선형 저밀도 폴리에틸렌(LLDPE)과 혼합하여 시스 조성물을 제조하고, 기계적 물성, 겔 함량 및 환경응력균열저항성(ESCR)을 평가하였다. 또한, 재생 수지를 적용한 케이블 시제품을 제작하여 현행품과 성능을 비교하였다.

제조된 재생 수지는 겔 함량 1.0[wt%] 이하를 나타냈으며, 기존 고온 열처리 방식으로 제조한 비교 수지 대비 우수한 특성을 보였다. 재생 수지를 적용한 시스 조성물은 우수한 인장강도와 신장률 및 양호한 ESCR을 확보하였다. 실제 케이블 시제품에서도 현행품과 유사한 기계적 물성을 나타냈으며, 열 노화 후에도 양호한 물성 유지 특성을 보였다. 또한, 압출 조건 최적화를 통해 시스 제조 시 압출 작업성을 개선하였다.

본 연구를 통해 탈가교 기술을 이용한 폐 XLPE의 재생 가능성과 재생 수지를 적용한 전력케이블 시스의 우수한 기계적 물성 및 열 노화 특성을 확인하였다. 이를 바탕으로 폐 전력케이블의 재활용 효율 향상과 신재 수지 사용량 절감을 통한 자원순환형 전력케이블 개발의 가능성을 제시하였다.

주제어: 폐 XLPE, 탈가교, 전력케이블, 시스, 자원순환

Keywords: Waste XLPE, Decrosslinking, Power Cable, Sheath, Resource Circulation

0.6/1kV 전력케이블용 PP 절연 컴파운드의 조성에 따른 열노화 및 전기·기계적 특성 연구

A Study on Thermal Aging, Electrical and Mechanical Properties of PP Insulation Compounds for 0.6/1kV Power Cables

이경용*, 박주환, 이인영, 이종규, 김연환
에스와이폴리텍 기술연구소
(*교신저자: kylee@sypolytech.com)

전력케이블 절연재로 널리 사용되는 가교폴리에틸렌(XLPE)은 우수한 전기적·기계적 특성을 갖지만, 제조 과정에서 가교공정이 필요하고 사용 후 재활용에 제약이 있다. 이에 비가교 공정 적용과 재활용이 가능한 폴리프로필렌(PP)계 절연재가 대안으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 0.6/1kV 전력케이블용 PP계 절연 컴파운드의 조성을 최적화하고, 조성 변화에 따른 열노화 및 전기·기계적 특성을 규명하고자 하였다.

PP계 수지와 엘라스토머의 조성을 변화시켜 시험용 절연 컴파운드를 제조하였으며, 물성 평가를 통해 선정된 최적 처방에 대해 Twin 압출기를 이용한 양산 테스트를 진행하였다. 제조된 시료의 초기 인장강도와 신율, 경도 및 체적저항을 측정하고, 150℃에서 240시간 가열노화 후 인장강도와 신율을 재측정하여 초기값 대비 잔율을 평가하였다.

Twin 압출기를 이용한 양산 테스트 시료의 초기 인장강도는 20.87~21.64MPa, 신율은 642.5~687.0%로 나타났다. 150℃에서 240시간 가열노화 후 인장강도는 21.39~23.71MPa, 신율은 562.9~595.9%였으며, 인장강도와 신율의 평균 잔율은 각각 105.6%와 87.4%로 나타났다. 또한 양산 테스트 시료의 체적저항은 7.0×10^{16}~7.4×10^{16}Ω·cm 범위로 측정되어 Lot 간 변화가 크지 않았다.

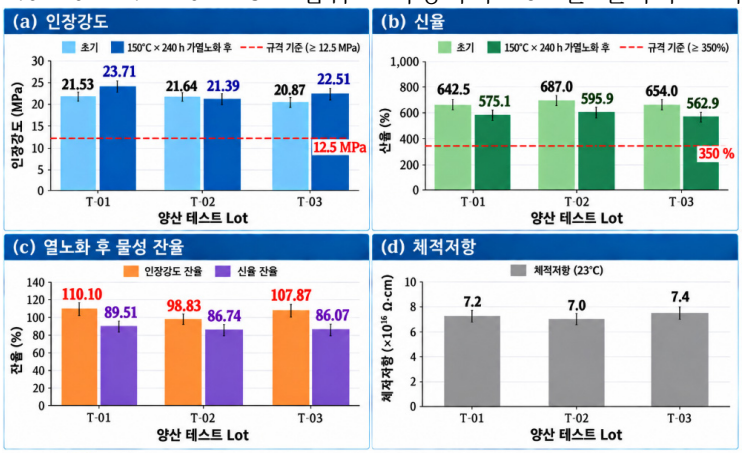


Fig. 1. Twin 압출 양산 테스트 시료의 기계적 · 전기적 특성 및 열노화 후 잔율.
(a) 인장강도, (b) 신율, (c) 열노화 후 물성 잔율, (d) 체적저항.

위 결과로부터 개발된 PP 절연 컴파운드는 양산 테스트에서도 초기 및 열노화 후 기계적 특성과 전기적 절연 특성이 안정적으로 유지됨을 확인하였다. 이를 통해 0.6/1kV 전력케이블용 비가교 PP 절연재로서의 적용 가능성을 확인하였으며, 향후 실제 케이블 압출 및 완제품 특성 평가를 통한 추가 검증을 진행할 계획이다.

주제어: 폴리프로필렌(PP), 전력케이블 절연재, 열노화, 기계적 특성, 체적저항

Keywords: Polypropylene (PP), Power Cable Insulation, Thermal Aging, Mechanical Properties, Volume Resistivity

PLZT 커패시터의 초기 용량, 유효 용량 및 공칭 용량 비교

A Comparative Study on the Initial, Effective, and Nominal Capacitances of PLZT-Based Capacitors

김현진[1], 김민재[2], 김민기[3], 강동원[4], 하민우[1*]
[1]명지대학교 전기공학과, [2]명지대학교 기계시스템공학부, [3]국립공주대학교 전기전자제어공학부, [4]중앙대학교 에너지시스템공학부 (*교신저자: isobar@mju.ac.kr)

PLZT (lead lanthanum zirconate titanate) 커패시터는 인가전압과 신호 진폭에 따라 정전용량이 달라 용량 정의에 따른 비교가 필요하다. 본 연구에서는 500, 700, 900 V급 세 제품의 제조사 사양을 비교하고, PLZT 시료의 기존 실측 자료로 DC 바이어스에 따른 용량을 측정하였다.

초기 용량 (C_0)과 유효 용량 (C_{eff})은 25 ˚C, 1 kHz, 0.5 V_{rms}에서 각각 0 V와 동작전압 (V_{op}) 400, 600, 800 V를 인가한 용량이며, 공칭 용량 (C_{nom})은 매우 느린 주파수인 quasi-static 상태의 평균값이다. 제조사 사양값 비교 결과, C_{eff}는 C_0보다 각각 71.4, 78.6, 85.7% 높고, C_{nom}보다 40.0, 50.0, 48.0% 낮았다. 회로를 설계할 때는 유효 용량을 기준을 설계하면 되고, 커패시터 제품을 비교하기 위해서는 공칭 용량을 사용하면 된다.

그림 1은 500 V급 PLZT 커패시터의 측정된 DC 전압에 따른 용량이다. 측정 전 150 ˚C 열처리 유무가 다른 두 시료 모두에서 전압 증가에 따라 용량이 증가한 후 감소하였다. PLZT 커패시터는 DC 전압에 따라 용량이 달라짐을 알 수 있다. 따라서 리플이 있는 DC-link 회로에서 PLZT 커패시터 설계 시 DC 전압에 따라 용량이 달라질 수 있음을 고려해야 한다.

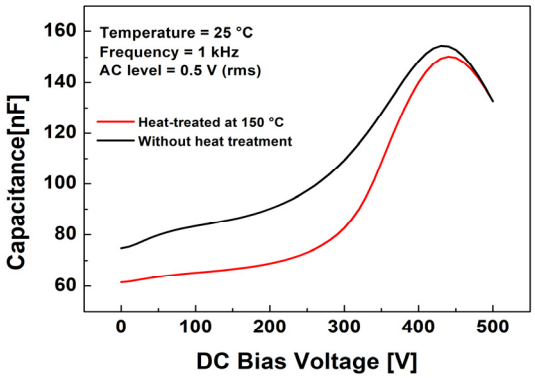


그림 1. 열처리 유무가 다른 PLZT 커패시터의 DC 전압에 따른 측정된 용량 (25 ˚C, 1 kHz 0.5 V_{rms}).

주제어: PLZT, 정전용량, DC 바이어스, DC-link

Keywords: PLZT, capacitance, DC bias, DC-link

[감사의 글]
This research was supported by the Gyeonggi ANCHOR Program (Project No. 2026-ANCHOR-09-A15, Project Title: Optimization of Magnetics Design for a 50 kW Bidirectional Power Converter in ESS (Energy Storage System) Applications).

p-GaN HEMT의 중이온 유발 SEE 완화를 위한 TCAD 시뮬레이션 연구

Study on Mitigation of Heavy-Ion-Induced Single Event Effects in p-GaN HEMTs by using TCAD simulation

이아현[1,3,5], 김정길[4,5], 김동석[1,2*]

[1]한국원자력연구원 양성자과학연구단, [2]과학기술연합대학원대학교 KAERI 스쿨, [3]동아대학교 물리학과, [4]동아대학교 반도체학과,
[5]동아대학교 원자력과학혁신센터 G-LAMP사업단 (*교신저자: dongseokkim@kaeri.re.kr)

우주 환경의 중이온은 반도체 소자에 일시적인 오동작부터 영구적인 손상까지 유발하는 단일사건효과(Single Event Effect, SEE)를 발생시키므로, 우주·국방용 전력소자를 개발하기 위해서는 우주방사선 대응 고신뢰성 확보가 중요하다. p-GaN 게이트 AlGaN/GaN 고전자이동도 트랜지스터(High Electron Mobility Transistor, HEMT)는 우주·국방용 전력소자로 주목받고 있으나, 소자에 필수적인 field plate(FP) 구조가 중이온 유도 과도응답에 미치는 영향은 아직 명확하지 않다. 본 연구에서는 FP 구조에 따른 p-GaN HEMT의 전계 분포와 전하 수집 특성을 비교하여 중이온 유도 과도 드레인 전류의 변화 원인을 규명하고자 하였다.

Sentaurus TCAD를 이용하여 FP가 없는 기준 소자와 길이 2 μm의 gate field plate(GFP), 3 μm의 source field plate(SFP)를 적용한 소자를 각각 모델링하고, 보고된 직류 전류-전압 특성을 기준으로 모델을 보정하였으며[1], FP 길이는 항복전압이 최대가 되는 조건으로 선정하였다. 중이온 조건은 Ta 이온의 LET를 GaN의 물성에 기반하여 단위 길이당 생성 전하량으로 환산한 값을 참고하여 0.6 pC/μm로 설정하였다. 오프 상태에서 드레인 전압 100V를 인가한 조건으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 게이트 가장자리에 중이온을 입사시켜 시간에 따른 드레인 전류와 수집 전하량, 전계 및 전류밀도 분포를 분석하였다.

기준 소자, GFP 소자 및 SFP 소자의 항복전압은 각각 912 V, 1100 V 및 1143 V로 나타났다. 중이온 입사 후 최대 드레인 전류는 기준 소자 대비 GFP와 SFP 소자에서 각각 57.6 %와 60.0 % 감소하였으며, 드레인 수집 전하량도 감소하였다. 전계 및 전류밀도 분포 분석을 통해 FP가 게이트-드레인 영역의 전계 집중을 완화하고 중이온 입사에 따른 국부적인 전류 경로를 재분포시킴을 확인하였다. 이러한 결과는 FP를 통해 중이온 유도 과도전류를 제어 및 억제할 수 있음을 의미하므로, 중이온 유발 SEE를 완화시킬 수 있는 방법이라고 볼 수 있다.

Reference

[1] Jiang, Huaxing, et al. "High-voltage p-GaN HEMTs with off-state blocking capability after gate breakdown." IEEE Electron Device Letters 40.4 (2019): 530-533.

주제어: p-GaN 게이트 HEMT, 필드 플레이트, 중이온, 단일사건효과, 과도 드레인 전류

Keywords:p-GaN gate HEMT, Field plate, Heavy ion, Single-event effects, Transient drain current

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(No. RS-2024-00437064) 및 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(No. RS-2025-25440216).

알루미나 마이크로 필러가 혼합된 폴리프로필렌계 절연재료 복합체의 열적·전기적 특성에 대한 고찰

A Study on the Thermal and Electrical Properties of Polypropylene-based Insulation Composites with Alumina Micro-filler

주교연[1], 김성준[2], 조문정[1], 홍신기[1], 장은지[1], 권나현[2], 유승건[1*]
[1]한국전기연구원, [2]부산대학교 (*교신저자: viola@keri.re.kr)

EV 급속충전 케이블은 발열이 크게 증가하여, 절연재에는 우수한 방열 성능과 낮은 누설전류에 의한 전기적 안정성이 요구된다. 본 연구는 Al_2O_3 (45μm) 필러가 PP계 복합체(EC5100G)의 열전도도·누설전류에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

무충전 PP계 복합체(EC5100G)에 Al_2O_3(45 μm) 필러를 10~40 wt%로 melt-compounding하여 시편을 제작하였다. 열전도도는 C-Therm TCi(ASTM D7984), 누설전류는 (ASTM D257)에 따라 직류 1,000 V, 30분간 측정하였다.

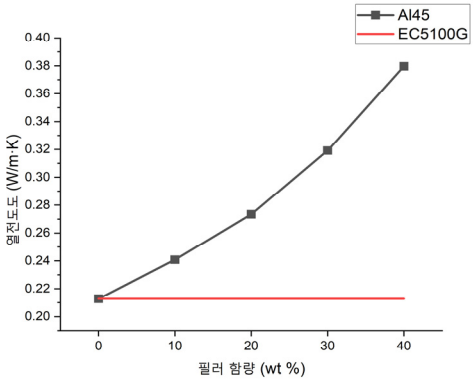


그림1. Al_2O_3(45μm) 필러 함량별 열전도도,
0 wt%: 무충전 PP계 복합체(EC5100G) baseline

표1. 열전도도 (W/m·K)

0 wt% (Baseline)	0.213
10 wt%	0.241
20 wt%	0.273
30 wt%	0.319
40 wt%	0.380

그림1과 같이 열전도도는 필러 함량 증가에 따라 상승하여, baseline(0.213 W/m·K) 대비 40 wt%에서 0.380 W/m·K로 약 78% 증가하였다(표1).

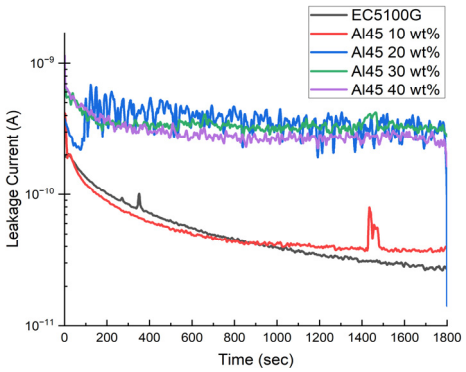


그림2. Al_2O_3(45μm) 필러 함량별 누설전류 시간 의존성(직류 1,000 V, 30분 인가)

표2. 정상상태 평균 누설전류 (pA, 30분 기준)

0 wt% (Baseline)	28.7
10 wt%	37.3
20 wt%	235
30 wt%	323
40 wt%	309

그림2와 같이 누설전류는 baseline(28.7 pA) 대비 증가하였으며, 10 wt%에서 37.3 pA, 20~40 wt%에서는 235~323 pA 수준으로 유지되었다(표2).

이는 Al_2O_3 필러 도입이 방열 성능을 크게 향상시키는 동시에 누설전류 증가를 동반함을 보여주며, 향후 방열 성능과 절연 신뢰성을 동시에 만족하는 최적 필러 함량 설계가 필요함을 시사한다.

주제어: Al_2O_3, PP계 복합소재, 열전도도, 누설전류, 절연재료

Keywords: Al_2O_3, PP-based composite, Thermal conductivity, Leakage current, Insulating material

1.2 kV SiC MOSFET의 게이트 구조별 감마선 및 양성자 복합 영향평가

Irradiation Effects of Combined Gamma-Ray and 100 MeV Proton on 1.2 kV SiC MOSFETs with Different Gate Structures

김연준[1,2], 이준혁[2], 강혜민[2*], 김동석[1,3*]

[1]한국원자력연구원 양성자과학연구단, [2]한국에너지공과대학교 에너지공학부 차세대그리드트랙,

[3]과학기술연합대학원대학교 KAERI 스쿨 방사선과학 (*교신저자: h.kang@kentech.ac.kr, dongseokkim@kaeri.re.kr)

우주 환경에서 동작하는 전력반도체는 총이온화선량(Total Ionizing Dose, TID) 효과와 단일 이벤트 효과(Single Event Effect, SEE)에 동시에 노출되지만, 두 영향을 복합적으로 평가한 연구는 제한적이다 [1-3]. 본 연구에서는 게이트 구조가 다른 상용 1.2 *kV* SiC MOSFET을 대상으로 감마선 선조사로 인해 발생한 TID 효과가 후속 양성자 조사 시 단일 이벤트 번아웃(Single Event Burnout, SEB) 발생에 미치는 영향을 분석하였다.

평면형(C3M0075120D, Wolfspeed), 비대칭 트렌치(IMW120R060M1H, Infineon), 더블 트렌치(SCT4062KEC11, ROHM) 게이트 구조 상용 1.2kV SiC MOSFET chip을 한국원자력연구원 첨단방사선연구소의 Co-60 감마선으로 3, 5, 10 *kGy*까지 선조사 후 문턱전압, 차단 상태 누설전류, 출력 커패시턴스, 항복전압을 측정하였다. 이어서 한국원자력연구원 양성자과학연구단 100 *MeV* 양성자 조사 시설에서 감마선 선량 조건별 샘플의 드레인에 960 *V* (정격전압의 80 %)를 인가한 상태로 최대 5×10^{10} p/cm^2까지 양성자를 조사하였다. 조사 중 드레인 전류를 실시간으로 측정하여 1 *mA*에 도달한 시점을 SEB 발생 전압으로 판정하였다.

감마선 10 *kGy* 조사 후 문턱전압은 평면형 -0.49 *V*, 비대칭 트렌치 -0.71 *V*, 더블 트렌치 -1.47 *V* 각각 이동하였고, 항복전압과 출력 커패시턴스의 변화는 1.5 % 이내였다. 양성자 조사에서는 평면형과 비대칭 트렌치 소자 모두 1.8×10^{9}~1.4×10^{10} p/cm^2에서 SEB 현상이 확인되었지만, 더블 트렌치 소자는 5×10^{10} p/cm^2까지 번아웃이 발생하지 않았다. 본 실험을 통해 추출된 각 샘플별 SEB 단면적은 평면형 1.6×10^{-10} cm^2, 비대칭 트렌치 1.5×10^{-10} cm^2, 더블 트렌치 2.0×10^{-11} cm^2 미만이었다. 다만 감마선 선량에 따른 SEB 발생 플루언스의 일정한 경향은 관찰되지 않았다. 더블 트렌치를 제외한 나머지 샘플에서는 감마선 조사된 시료가 감마선 조사하지 않은 시료 대비 양성자 유발 SEB가 발생하는 플루언스가 낮은 것으로 보아 감마선 선조사로 인해 발생한 TID 영향이 SEB 내성에 영향을 미치는 것으로 예측할 수 있다. 향후 추가 실험을 통해 게이트 구조별 감마선 선량에 따른 SEB 민감도 변화를 통계적으로 정량화할 예정이다.

주제어: 감마선, 양성자, 단일 이벤트 효과, SiC MOSFET, 게이트 구조

Keywords: Gamma-ray, Proton, Single event effect, SiC MOSFET, Gate structure

References: [1] C. Martinella et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 70, no. 8, pp. 1844-1851, 2023. [2] K. Niskanen et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 72, no. 4, pp. 1412-1417, 2025.[3] R. Cao et al., Chinese Physics B, vol. 32, no. 6, art. 068502, 2023.

[감사의 글] This work was supported by the Industrial Strategic Technology Development Program-Alchemist Project(RS-2024-00432559) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, Republic of Korea).

AI/ML 기반 ITO 나노입자의 가상 합성 조건별 물성 예측 및 최적화

AI/ML-Based Prediction and Optimization of Physical Properties of ITO-NPs Across Virtual Synthesis Conditions

홍성제[1], 한철종[1*]
[1]한국전자기술연구원 디스플레이연구센터
(*교신저자: cjhan@keti.re.kr)

디스플레이 등 전자 디바이스의 투명 전극 소재로 사용되는 인듐주석산화물 나노입자(ITO-NPs)는 전기적·광학적 물성을 극대화함과 동시에 부반응상을 억제하기 위해 인듐(In)과 주석(Sn) 원료 물질의 비율을 적절하게 제어해야 한다. 그러나, 조성 변화에 따라 발생하는 비표면적, 결정성 및 2차상 출현 등의 비선형적 편차는 공정 재현성과 ITO-NPs의 양호한 물성 확보를 저해하는 주요 원인이다. 본 연구에서는 기계학습(Machine Learning, ML) 알고리즘을 활용하여 ITO-NPs 조성비에 따른 물성을 사전에 예측하고, 최적의 합성 조건을 도출할 수 있는 AI Modelling Framework를 연구하였다.

우선, 데이터베이스 구축은 In과 Sn 조성비를 97:3부터 60:40까지 제어하여 합성한 ITO-NPs의 BET 비표면적, XRD peak 강도비 및 EDS 원소 조성 데이터를 수집하여 정제하였다. ML 모델 학습은 비선형적 조성 변화에 따른 입도 변화와 결정화 거동 예측의 정확도를 높이기 위해 회귀 모델을 적용하고 단일상 형성 경계를 분류 평가하였다. 그리고 ITO-NPs 가상 합성 공정의 최적화는 조성비에 따른 비표면적 변동성 및 정방형 결정성 유지 영역을 예측하는 Simulation Pipeline을 구현하였다.

실측 데이터를 기반으로 모델을 학습시킨 결과, Sn 첨가량이 20 wt%를 초과할 때 발생하는 SnO_2 2차상 출현 부근의 결정 방향비 변화와 비표면적의 비선형적 변동을 높은 정밀도로 예측하는 것을 확인하였다. 가상 합성 공정 최적화 및 분석 결과, 특정 원료 조성 영역(In:Sn = 90:10 부근)에서 높은 비표면적(~108 m^2/g)과 양호한 결정성을 동시에 확보하며 부반응이 억제되는 최적 공정 구간을 도출하였다. 이를 통해 실제 ITO-NPs 합성 시 발생할 수 있는 실험적 시행착오를 대폭 단축할 수 있는 공정 가이드라인을 확보하였다.

따라서, 본 연구에서는 ML 알고리즘을 활용하여 ITO-NPs의 조성비에 따른 물성 변화를 사전에 예측할 수 있는 AI Modelling Framework를 성공적으로 구축하였다. 또한, 데이터 기반 모사를 통해 목표 조성을 유지하면서 단일상 ITO-NPs를 안정적으로 합성할 수 있는 최적 조건 범위를 제시함으로써, 양호한 물성의 ITO-NPs 합성 공정의 재현성 한계를 극복하고 소재 개발 효율을 극대화할 수 있었다.

주제어: 인듐주석산화물 나노입자, 조성비, 머신러닝 (ML), 가상 합성, 공정 최적화

Keywords: ITO-NPs, Composition Ratio, Machine Learning (ML), Virtual Synthesis, Process Optimization

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 산업통상부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호 RS-2026-25526544)

AI/ML 기반 OLED 증착 소재 사전 혼합 공정 및 물성 예측 모델링

AI/ML-Based Modeling of Physical Properties and Process Prediction for Pre-mixed OLED Deposition Materials

홍성제[1], 이찬재[1*]
[1]한국전자기술연구원 디스플레이연구센터
(*교신저자: chanjael@keti.re.kr)

차세대 고효율 OLED 제조 공정에서는 발광층의 효율과 수명을 극대화하기 위해 두 종류 이상의 유기물을 미리 섞어 사용하는 사전 혼합 및 단일 증원 공동 증착 기술이 점차 중요해지고 있다. 그러나, 서로 다른 화학 구조를 가진 소재들을 혼합할 때 발생하는 승화 온도 및 증기압의 편차는 공정 재현성을 저해하는 주요 원인이다. 본 연구에서는 기계학습(Machine Learning, ML) 알고리즘을 활용하여 OLED 증착 소재 사전 혼합물의 열적·물리적 특성을 사전에 예측하고, 최적의 공정 조건을 도출할 수 있는 AI Modelling Framework를 제시하였다.

우선, dataset 구축은 P-type 및 N-type 호스트 등 대표적인 유기물 쌍의 분자 구조적 특성치(Descriptor), 분자량, 그리고 단일 물질별 실험적 승화 온도 및 열거동 데이터를 수집하여 정제하였다. ML 모델 학습은 비선형적 혼합물 거동과 물성 예측의 정확도를 높이기 위해 Random Forest(RF), XGBoost 및 가우스 프로세스 회귀(Gaussian Processing Regression, GPR) 등의 회귀 모델을 적용 및 비교 평가하였다. 그리고, 사전 혼합 공정 가상화는 혼합 비율에 따른 유효 승화 온도 구간 및 증기압 일치성(Isothermal behavior)을 예측하는 Simulation Pipeline을 구축하였다.

P-type 및 N-type 호스트 소재 쌍의 분자 구조적 특성치와 실험적 승화 온도 데이터를 기반으로 RF, XGBoost, GPR 모델을 학습시킨 결과, GPR 모델이 비선형적 혼합 거동 예측에서 가장 우수한 결정계수(R^2 > 0.92)와 낮은 예측 오차를 나타내었다. 사전 혼합 공정 가상화 및 최적화의 경우 구축된 Simulation Pipeline을 통해 혼합 비율에 따른 유효 승화 온도 구간과 증기압 일치성(Isothermal behavior)을 정밀 분석한 결과, 특정 조성비 영역에서 두 소재 간의 승화 온도 편차가 최소화되어 단일 증원 공동 증착 시 성막 안정성이 극대화되는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 실제 실험 시행착오를 대폭 단축할 수 있는 공정 가이드라인을 확보하였다.

따라서, 본 연구에서는 ML 알고리즘을 활용하여 OLED 증착 소재의 사전 혼합 공정 및 열적 물성을 사전에 예측할 수 있는 AI Modelling Framework를 성공적으로 구축하였다. 또한, GPR 기반 모델을 통해 혼합물 상태에서의 승화 온도 및 증기압 거동을 정밀하게 모사함으로써, 단일 증원 공동 증착 공정의 재현성 한계를 극복하고 최적 공정 조건을 도출할 수 있음을 알 수 있었다.

주제어: OLED, 증착 소재, 사전 혼합, 머신러닝 (ML), 공정 가상화

Keywords: OLED, Deposition Materials, Pre-mixing, Machine Learning (ML), Process Virtualization

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 산업통상부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호 RS-2026-25529892)

Ni 및 Cu 나노입자의 합성 변수별 AI/ML 기반 물성 예측 모델링

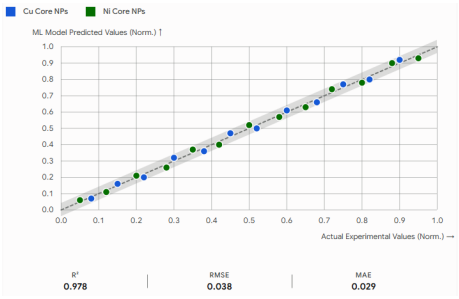
AI/ML-Based Prediction Modeling of Physical Properties of Ni and Cu NPs by Synthetic Parameters

홍성제[1*]
[1]한국전자기술연구원 디스플레이연구센터
(*교신저자: hongsj@keti.re.kr)

본 연구에서는 디스플레이의 전극 및 5G 통신용 CWG(Coaxial Waveguide) 주파수 필터 도전층 코팅 등에 활용되는 Ni 및 Cu 나노입자(NPs)의 합성 조건에 따른 물성 변화를 해석하고, 이를 정량적으로 예측하기 위한 AI/ML 기반의 모델을 구축하였다. 각 전구체 용액에 환원제 농도(0.1, 0.2, 0.3 M) 및 투입 방식을 다변화하여 환원 석출 반응을 유도하였으며, 회차별 석출량, XRD 분석 기반 결정상/입도, TG-DTA 열분석 데이터를 정량 Database 화 하였다.

실험적 관찰 결과, Ni NPs는 환원제 농도 및 추가 투입에 따라 석출 수율이 비선형적으로 증가하였으며, 특히 0.2 M 조건에서 입자 뭉침 없이 약 5 nm 급의 균일한 초미세 입자 형성과 최적의 열적 안정성을 확립하였다. 반면 Cu NPs는 빠른 환원 반응 속도로 인해 5 nm 및 20 nm 급이 공존하는 바이모달(Bimodal) 입도 분포와 표면 산화막(Cu_2O) 형성 특성을 보였으며, 약 270 ℃ 부근에서 특징적인 발열 반응 및 중량 경향 변화를 나타내었다.

이러한 합성 조건 변수(전구체/환원제 농도 등)를 입력 기능(Input Features)으로 설정하고, 석출 수율, 평균 결정립 크기, 표면 산화 비율, 열분해 동작 온도를 타겟 물성(Target Outputs)으로 지정하여 가우시안 프로세스 회귀(GPR) 및 Random Forest(RF) 예측 모델을 학습시켰다. 그 결과, 소량의 고품질 실험 데이터 학습을 통해서도 양호한 예측 신뢰도(R^2 > 0.95)를 확보하였으며, 원하는 목표 물성을 역산하여 최적 합성 공정 조건을 제시하는 데이터 기반 Simulation Framework를 구축하였다.



<AI/ML 예측 모델을 통한 Ni, Cu NPs의 물성 실측값 대 예측값의 상관관계 Parity Plot (R^2 = 0.978)>

주제어: 나노입자 (NPs), 합성 변수, 환원반응, 물성 예측, 머신러닝 (ML)

Keywords: Nanoparticles (NPs), Synthetic Parameters, Chemical Reduction, Prediction of Physical Properties, Machine Learning (ML)

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 산업통상부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호 RS-2026-25526544)

포스터 발표 1

스마트 대전력 및 고전압기술 I

(PS1 012~023)

좌장 : 박혜리 교수(동아대학교)



대용량 신전선(HCSC) 적용에 따른 362kV GIS 과부하 정격 정립 필요성 고찰

A study on the Necessity of Establishing Overload Ratings for 362 kV GIS Applied with Large-Capacity HCSC Conductors

오승열[1], 이종건[1], 정문규[1], 이철학[1], 정민경[1], 김성태[2], 구재홍[1*]
[1]한전 전력연구원 전력계통연구소, [2]한국표준과학연구원 양자기술연구소
(*교신저자: jaehong.koo@kepco.co.kr)

11차 장기 송변전설비계획에 따라 345kV 계통에 대용량 신전선(HCSC)이 확대 적용되고 있으나, 기설 362kV GIS는 대부분 정격전류 6,300A로 설계되어 신전선의 허용전류 및 과부하 운전 조건과의 정합성 문제가 발생하고 있다.

본 연구에서는 기존 검토 자료를 토대로 HCSC 적용 시 GIS 정격전류와의 불일치 정도를 고찰하고 과부하 정격 정립의 필요성을 규명하고자 하였다. 이를 위해 국내 4개 제작사(LS ELECTRIC, HD현대일렉트릭, 효성, 일진전기) 362kV GIS 개발시험 설계자료 및 『전력시장운영규칙』상 과부하 허용범위(120~150%, 6,816~8,520A)를 HCSC 단시간허용전류(6,360A) 및 GIS 정격전류(6,300A)와 비교·검토하였다.

검토 결과, HCSC 단시간허용전류(6,360A)는 GIS 정격전류 대비 약 1% 초과하였으며, 120% 과부하 운전(6,816A) 시에는 초과율이 약 8%까지 확대되는 것으로 나타났다. 또한 제작사별 신품 GIS의 설계여유는 정격전류 기준 13~30% 수준이었으나, 120% 과부하 운전 조건에서는 5~22%로 감소하였으며, 일부 제작사의 경우 설계여유가 최대 약 60%까지 축소되는 것으로 확인되었다.

이는 현행 GIS 정격전류 단일 기준만으로는 HCSC 확대 적용에 따른 과부하 운전 여건을 충분히 수용할 수 없음을 시사하며, 연속·단시간 허용전류를 구분한 GIS 과부하 정격 정립이 필요함을 뒷받침한다.

주제어: HCSC, 362kV GIS, 과부하 정격, 단시간허용전류, 설계여유

Keywords: HCSC, 362kV GIS, Overload Rating, Short-time Withstand Current, Design Margin

[감사의 글]
이 논문은 한국전력공사의 지원으로 수행되었음. (No. R26TA03)

고분자 복합재료의 열-전기적 거동에 관한 이미지 기반 모델링

Image-Based Modeling of Thermal and Electrical Behavior in Polymer Composites

김민희[1], 권익수[2], 유승건[2]
[1]계명대학교 전기공학과, [2]한국전기연구원
(*교신저자: minnie90@kmu.ac.kr)

폴리프로필렌(PP)은 고전압 케이블 절연재로 주목받지만, 열전도도(κ)가 약 0.2 W/(m·K)로 낮아 도체의 열이 절연층에 갇히고 온도·전계 분포가 불균일해진다. 2상 블렌드의 한쪽 상에만 Al_2O_3를 선택적으로 분산시키면 κ를 높일 수 있으나, 이 미세구조가 절연재 내부의 열 흐름과 전계·공간전하 분포를 어떻게 바꾸는지는 실험만으로 확인하기 어렵다. 본 연구에서는 실제 관찰한 미세구조를 해석 모델로 옮겨 이를 규명하고자 하였다.

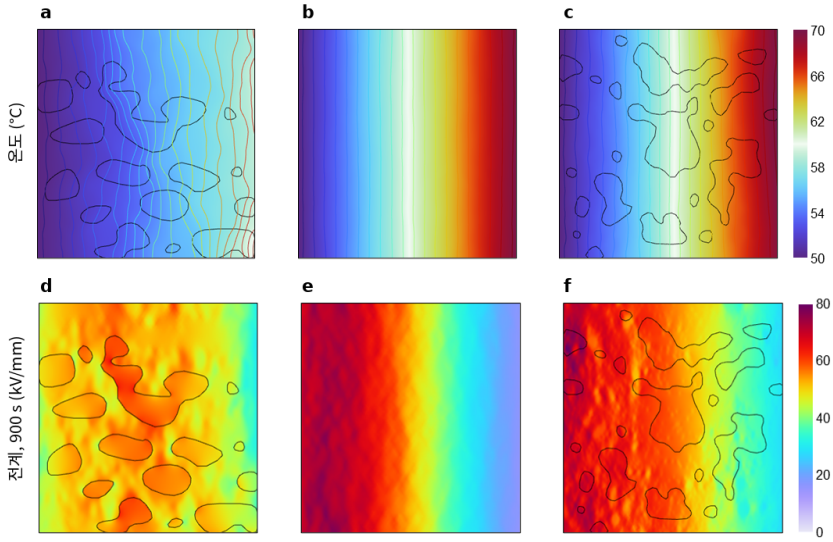


그림 1. 30 phr Al2O3 모델: (a,d) 선택 분산 (b,e) 대조군1 (c,f) 대조군2, (a-c) 정상 상태 온도 분포 (d-f) 900s 전계 분포

30 phr Al_2O_3 복합재의 SEM/EDS 이미지를 100×100 μm 해석 영역으로 재구성하여, 필러가 연속상에만 모인 선택 분산 모델과 두 대조군(단일 매트릭스 MA-g-PP/Al_2O_3, 필러가 양쪽 상에 흩어진 PP/POE/Al_2O_3) 모델을 구성하였다. 위치별 필러 분율에 따라 유전율과 κ를 부여하고, COMSOL에서 열전도-Poisson-양극성 전하수송 방정식을 연계하여 열유속 5×10⁴ W/m²와 5 kV(50 kV/mm)를 가한 상태로 900 s까지 해석하였다.

선택 분산 모델은 필러가 밀집된 연속상을 따라 열이 빠져나가는 경로가 형성되어 최대 온도 상승이 10.4 K에 그친 반면, 두 대조군은 19.9 K, 20.0 K로 약 2배 높았고 유효 κ도 0.534 W/(m·K)로 대조군(0.253)의 2.1배였다(그림 1). 전계는 초기(10 s)에 필러 밀집 영역 주변에 집중되었으나, 전하가 축적된 900 s에는 최대 전계가 69.8 kV/mm로 대조군(77.4, 80.1 kV/mm)보다 낮았고 최대-최소 전계 차이도 42.1 kV/mm(대조군 61.9, 55.3)로 가장 작았다. 이는 필러의 선택적 분산이 열을 빼내는 경로를 만들 뿐 아니라 공간전하 재분포로 장시간 인가 시 국부 전계 상승을 완화함을 의미하며, 본 이미지 기반 해석 기법은 열가소성 케이블 절연재의 미세구조 설계에 활용될 수 있다.

주제어: 다중물리 해석, 선택적 분산, 열전도도, 공간전하, 폴리프로필렌 절연

Keywords: multiphysics simulation, selective dispersion, thermal conductivity, space charge, polypropylene insulation

[감사의 글]
본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 대구광역시의 재원으로 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(과제관리번호: 2026-RISE-03-002)

HVDC 변환용 변압기 진단시스템 개발

Development of a Condition Monitoring and Diagnostic System for HVDC Converter Transformers

이종건[1], 정민경[1], 주형준[1], 구재홍[1]
[1]전력연구원

HVDC 변환용 변압기의 밸브 측 권선의 절연계는 컨버터의 스위칭 동작에 의해 직류 성분과 고조파가 포함된 비정현파 전압에 노출된다. 고장 예방 관점에서, 이러한 전압에서는 동일한 절연 결함에서도 정현파 교류 조건과 다른 부분방전 특성이 나타날 수 있으므로, 운전 전압의 파형 특성을 반영한 시험환경에서 방전 발생 위상과 분포를 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 HVDC 고조파 중첩 환경에서의 부분방전 특성을 평가하기 위하여 고조파 가변형 내전압 시험 시스템을 구축하고, 대표 모의결함에 대한 위상분해 부분방전(PRPD) 패턴을 비교하였다. 먼저 PSCAD 기반 계통 해석으로 Y-Y 결선 상부 및 하부 부싱과 Y-Δ 결선 부싱의 전압 파형을 도출하고, FFT로 추출한 고조파 성분의 크기와 위상을 시험파형 합성에 반영하였다. 이후 전압 제어기, 고조파 발생부, 300 V/100 kV 내전압시험기 및 계측부로 구성된 시험 시스템을 활용하여 기본파에 고조파를 중첩하여 시험전압을 생성하는데 성공하였다. 또한, PSCAD-EMTDC 모델을 활용한 계통 해석 파형과 시험 출력파형의 형상을 위상 정렬 및 정규화 후 비교한 결과, 피어슨 상관계수는 Y-Y 상부 0.9822, Y-Y 하부 0.9634, Y-Δ 0.8614로 기준 파형 대비 높은 일치율을 나타냄을 확인하였다.

시험을 위한 모의결함은 유중 코로나, 플로팅, 연면 및 공극 등 8종으로 구성하였다. 정현파 교류 조건에서 부분방전 개시전압과 안정적으로 방전이 유지되는 전압을 확인한 후, 합성파형의 최댓값을 고려하여 시험전압을 설정하였다. 부분방전 신호는 HFCT 및 UHF 센서로 취득하고, 정현파와 세 종류의 고조파 중첩 전압 조건에서 PRPD 패턴을 비교하였다. 부분방전 측정 결과, 정현파 교류 조건에서는 결함별 대표 PRPD 패턴이 관측되었으나, 고조파 중첩 조건에서는 동일 결함에서도 방전 발생 위상과 분포 형태가 달라졌다. 특히 전압의 크기와 기울기가 급격히 변하는 위상 구간에서 부분방전 신호가 집중되는 경향을 보였다. 이는 고조파 중첩 환경의 부분방전 패턴을 해석할 때 결함 유형과 함께 실제 인가전압 파형을 고려해야 함을 보여준다.

본 연구를 통해 HVDC 밸브 측 전압의 고조파 특성을 반영한 시험체계를 마련하고, 인가전압 파형에 따른 부분방전 패턴의 차이를 확인하였다. 구축한 시험시스템과 부분방전 결함별 측정 결과는 혼재구간의 부분방전 특성 평가 및 진단기준 수립을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

주제어: HVDC 변환용 변압기, 진단시스템, 부분방전

Keywords: HVDC Converter Transformer, Diagnostic System, Partial Discharge

[감사의 글]
본 논문은 한국전력공사 전력연구원에서 수행하는 “변환용 변압기 절연열화 신 진단기술 개발”(R23TA16) 관련입니다.

오염 및 결로 조건에 따른 에폭시 몰드 부싱의 전계분포 특성 연구

Effects of Contamination and Condensation on the Electric Field Distribution of an Epoxy Mold Bushing

천창영[1], 김재훈[1], 김명진[1*]
[1]충북대학교 전기공학부
(*교신저자: mckim@cbnu.ac.kr)

에폭시 몰드 부싱은 MV급 개폐장치의 주요 절연부품으로, 운전 중 표면 오염과 결로에 동시에 노출될 수 있다. 오염물질이 수분과 결합하여 전도성 표면층을 형성하면 부싱 표면의 전계가 재분포되어 국부적인 전기적 스트레스와 절연열화 가능성이 증가할 수 있다. 본 연구에서는 오염 및 결로 조건에 따른 에폭시 몰드 부싱의 전계분포 특성을 규명하고자 하였다.

해석 대상은 높이 152 mm, 연면거리 267 mm의 에폭시 몰드 부싱이며, 고전압측에서 접지측까지 부싱 표면을 따라 약 350 mm의 전계 평가경로를 설정하였다. 환경 조건을 모사하기 위해 부싱 표면에 오염층과 수막층을 적용하고, IEC/TS 60815-1을 참고하여 오염 수준을 Clean, Very Light, Light 및 Medium으로 구분하고, 각 조건의 전기전도도를 각각 0.001, 0.37, 1.6 및 6.5 S/m로 설정하였다. 또한, Humid 조건은 표면에 수막층이 형성된 상태로 모사하였다. 전계분포는 25.5 kV_{rms}, 60 Hz의 교류전압을 인가한 주파수영역 조건에서 유한요소법으로 해석하였다.

Clean-Dry 조건의 최대 전계는 1.5472 kV_{rms}/mm였으며, Clean-Humid 조건에서는 0.7820 kV_{rms}/mm로 약 49.5% 감소하였다. Humid 조건에서 오염도를 Very Light, Light 및 Medium으로 증가시킨 경우 최대 전계는 0.7803 kV_{rms}/mm로 거의 동일하게 나타났다. 이는 본 해석에서 연속적인 오염·수막층의 전기전도도가 일정 수준 이상 증가하면 최대 전계의 변화가 제한되는 포화 경향을 나타낸다. 따라서 실제 결로 환경을 보다 구체적으로 모사하기 위해서는 균일한 수막층뿐만 아니라 부싱 표면에 불규칙하게 분포된 결로 물방울 형상을 고려한 추가 해석이 요구된다.

본 연구는 실제 에폭시 몰드 부싱 형상에서 오염 및 수막 복합조건에 따른 최대 전계의 감소와 포화 경향을 정량적으로 제시함에 의의가 있다. 해석 결과는 향후 불규칙적인 결로 물방울 형상을 고려한 전계해석 모델의 고도화와 MV급 개폐장치 부싱의 절연 취약지점 평가를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

주제어: 에폭시 몰드 부싱, 표면 오염, 결로, 전계분포, 유한요소해석

Keywords: Epoxy Mold Bushing, Surface Contamination, Condensation, Electric Field Distribution, Finite Element Analysis

[감사의 글]
본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의하여 수행된 기초연구사업임. (RS-2025-25429724, RS-2020-NR049604)

Bakelite 절연물의 AC 및 DC 관통 절연파괴 특성 분석

Analysis of AC and DC Puncture Breakdown Characteristics of Bakelite

반인후[1], 김예찬[1], 구본혁[1], 고기원[1], 장찬혁[1], 이제희[1], 강형구[1*]
[1]국립한국교통대학교 전기공학과
(*교신저자: kang@ut.ac.kr)

MVDC 배전 등 직류 설비의 적용이 확대되고 있으나, 고체절연물의 절연파괴 특성은 AC와 DC 전압에서 크게 다르고 DC에서는 전계분포가 도전율에 의해 결정되므로 AC 기준의 절연설계를 그대로 적용하기 어렵다. 본 연구에서는 Bakelite 절연물의 전압 종류에 따른 관통 절연파괴 특성 차이를 규명하고자 하였다.

두께 1 mm의 Bakelite 시료를 KS C IEC 60243-1의 구-구 전극 (Ø20 mm) 사이에 두고, 상온 하 절연유 내에서 1 kV/s로 승압하는 단시간 시험을 AC와 DC에 대해 각 10회 수행하였으며, 결과는 2-파라미터 Weibull 분포로 분석하였다.

표 1 및 그림 1과 같이 척도모수는 DC 16.4 kV, AC 14.7 kV로 DC가 약 12% 높았다. 반면 형상모수는 DC 9.5, AC 24.4였고, 파괴전압 범위도 DC 12.4~18.0 kV, AC 13.2~15.5 kV로 DC의 편차가 컸으며, 최저 파괴전압은 DC가 AC보다 낮았다.

이는 동일 재료라도 전압 종류에 따라 절연파괴의 크기와 분포 특성이 다름을 의미한다. 따라서 Bakelite의 절연설계 시 AC와 DC의 절연특성을 구분하여 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

표 1. 관통 절연파괴전압 및 Weibull 파라미터

구분		DC	AC
절연파괴 전압 [kV]	1회	12.5	15.5
	2회	14.3	14.9
	3회	18.0	14.7
	4회	12.4	14.0
	5회	16.7	15.1
	6회	14.8	13.2
	7회	17.6	14.9
	8회	17.7	13.5
	9회	16.7	14.2
	10회	14.5	14.2
Weibull 파라미터	척도모수 α [kV]	16.4	14.7
	형상모수 β	9.5	24.4

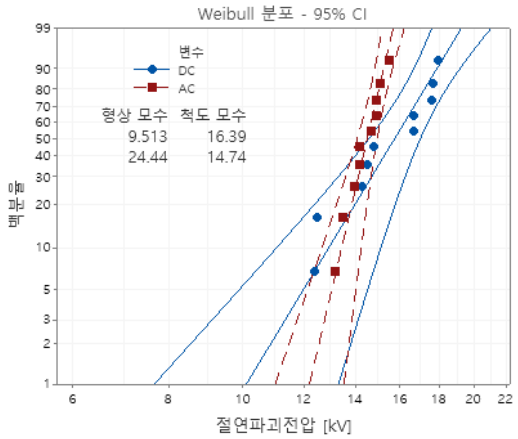


그림 1. 관통 절연파괴전압 Weibull 분포

주제어: 베이클라이트, 관통 절연파괴, 와이불 분포, 절연설계

Keywords: Bakelite, Puncture breakdown, Weibull distribution, Insulation design

[감사의 글]
이 논문은 2025년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계 (RISE) (2025-RISE-11-004-05)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2026-25542125303820682101O1).

비균일 DC 전계에서 전계 의존 전하 주입을 고려한 PINN 기반 양극성 전하 수송 해석

PINN-Based Analysis of Bipolar Charge Transport with Electric-Field-Dependent Charge Injection under a Nonuniform DC Electric Field

이도헌[1], 이세희[1*]
[1]경북대학교 전저전기공학부
(*교신저자: shlees@knu.ac.kr)

고전압 기체 절연 시스템에서는 전극 형상에 의해 비균일 전계가 형성되며, 전계가 집중되는 영역에서는 전하의 생성·주입 및 이동이 국부적으로 증가할 수 있다. 형성된 공간전하는 다시 전계를 왜곡하여 이후의 전하 수송과 방전 거동에 영향을 미치므로 전극 형상에 따른 전계 분포와 전하 수송의 상호작용을 함께 고려하는 것이 중요하다. 기존 Physics-Informed Neural Network(PINN) 기반 전하 수송 연구는 주로 1차원 영역과 일정한 전하 주입 조건을 대상으로 수행되었으며, 저자의 선행연구에서는 이를 2차원 평판-평판 구조와 전계 의존 주입 조건으로 확장하였다. 그러나 균일 전계 구조에서는 실제 전극 형상에 따른 국부 전계 집중과 이에 따른 주입량 변화를 충분히 반영하기 어렵다. 본 연구에서는 2차원 곡면-평판 전극 구조로 확장하여 비균일 DC 전계에서 전계 의존 전자 주입을 고려한 PINN 기반 양극성 전하 수송 모델을 구축하였다. 1 cm × 1 cm 공기 영역에서 곡면 전극에 -10 kV 기준의 지수형 상승 전압을 인가하고 0-10 ns의 과도 구간을 해석하였다. 지배방정식으로 Poisson 방정식과 전자 및 양이온의 drift-diffusion 방정식을 적용하였으며, Townsend 전리와 재결합을 포함하고 곡면 전극에는 국부 전계 크기에 비례하는 전자 주입 경계조건을 설정하였다. 전위, 전자 농도 및 양이온 농도는 각각 독립 신경망으로 표현하였고, 급격한 전하밀도 변화를 효과적으로 학습하기 위해 곡면 전극 형상을 반영한 정규화 공간좌표와 정규화 시간좌표에 다중스케일 Fourier feature를 적용하였다. 해석 결과, 전계가 집중되는 곡면 전극 부근에서 전자 주입이 증가하고 전하가 시간에 따라 영역 내부로 이동하면서 공간적으로 비균일한 양극성 전하 분포가 형성되었다. FEM과 비교한 결과, 전체 상대 L2 오차는 전계 0.045%, 전위 0.019%, 전자 농도 5.64%, 양이온 농도 1.39%로 나타났다. 이를 통해 비균일 전극 구조에서도 전계 의존 주입과 공간전하-전계 상호작용을 PINN으로 재현할 수 있음을 확인하였다.

주제어: 2차원 PINN, 비균일 곡면-평판 전계, 전계 의존 전자 주입, 양극성 전하 수송

Keywords: 2D PINN, Nonuniform Curved-Plane Electric Field, Field-Dependent Electron Injection, Bipolar Charge Transport

[감사의 글]
본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 대구광역시의 재원으로 대구앵커센터의 지원을 받아 경북대학교에서 수행하는 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과입니다.(2026-ANCHOR-03-001)

해저케이블 Factory Joint의 부분방전 측정 방법에 대한 연구

A Study on Partial Discharge Measurement Methods for Submarine Cable Factory Joints

원용욱[1], 정재철[1], 홍동석[1]
[1]대한전선

장조장 해저케이블은 연속적으로 생산하는 것이 이상적이나, 제조 공정상 연속 생산 가능한 길이에 한계가 있어 Factory Joint(FJ)가 적용된다. FJ는 기존 케이블의 절연층에 신규 절연층을 성형·가교하는 형태로 기존 절연체와 신규 절연체 사이에 계면이 형성된다. 이러한 제조 과정에서 보이드, 이물 및 계면 박리 등의 국부적인 결함이 발생할 가능성이 있다. 일반적으로 FJ를 포함하는 장조장 해저케이블은 대형 턴테이블에 대한 쉴드룸 환경에서의 부분방전 시험 진행에 대해 제약이 존재한다.

본 연구에서는 FJ 구간의 쉴드룸 외부 환경에서 부분방전 측정 가능성을 검토하기 위해 보이드 모의결함을 제작하였다. 먼저 쉴드룸에서 IEC 60270에 따라 부분방전 시험을 수행하여 모의결함에서 발생하는 방전량을 정량적으로 확인하였다. 이후 동일한 조건에서 박전극과 High Frequency Current Transformer (HFCT)를 이용하여 부분방전 신호를 측정하고, 현장 적용에 적합한 센서의 검출 특성을 비교하였다. 쉴드룸 외부 환경에서는 동일한 모의결함과 인가전압 조건을 적용하였으며, 간접 calibration 방식을 이용하여 부분방전량을 정량화하였다. 또한 쉴드룸에서 IEC 60270 방식으로 측정된 결과와 비교하여 간접 calibration 방식의 적용 가능성을 평가하고, 현장 조건에서의 최소 부분방전 검출 감도를 확인하였다.

시험 결과, 쉴드룸에서 IEC 60270에 따라 측정된 보이드 모의결함의 부분방전량과 쉴드룸 외부 환경에서 간접 calibration 방식으로 정량화한 방전량은 유사한 수준으로 나타났다. 특히 동일한 모의결함에 동일한 전압을 인가한 조건에서 쉴드룸과 외부 환경의 부분방전 패턴 및 방전량이 유사하게 측정되어 간접 calibration 방식의 적용 가능성을 확인하였다. 또한 박전극과 HFCT의 검출 특성을 비교한 결과, 박전극에서 상대적으로 높은 부분방전 신호가 검출되어 외부 환경 측정에 적용하였다. 최종적으로 제안한 측정 구성에서 약 20pC 수준의 부분방전 신호를 검출할 수 있음을 확인하였으며, 이를 통해 FJ 구간의 쉴드룸 외부 환경에서 부분방전 측정 및 정량화 가능성을 검증하였다.

본 연구를 통해 간접 주입 방식을 이용한 현장 부분방전 검출의 적용 가능성을 확인하였으며, 향후 해저케이블 FJ 구간의 부분방전 진단 및 현장 건전성 평가를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: 해저케이블, Factory Joint, 부분방전, 금속 박전극

Keywords: Submarine Cable, Factory Joint, Partial Discharge, Metal Foil Electrode

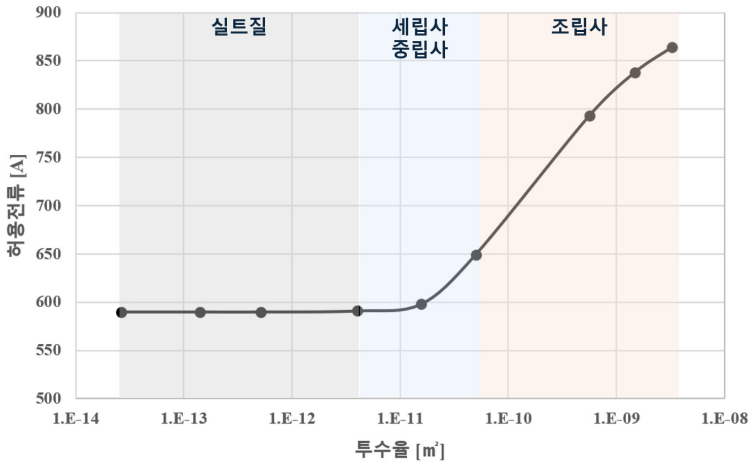
[감사의 글]
본 연구는 기후에너지환경부(MCEEP)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. RS-2024-00449926)

해수 대류에 의한 해저케이블 열방산 특성 분석

Analysis of Heat Dissipation Characteristics of Submarine Cables Due to Seawater Convection

임종필[1], 박흥석[1], 박민솔[1], 나진용[1], 홍순명[2], 이익형[2], 정채균[1]
[1]한국전력공사 전력연구원, [2]한국전력공사
(dlawhdvlf95@kepco.co.kr)

해저케이블의 안정적인 운전과 적정 허용전류 산정을 위해서는 해수로 포화된 지반에서 발생하는 자연대류의 영향을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 해저토양의 투수율에 따른 해수 자연대류가 케이블의 열방산 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. AC 154 kV XLPE 3심 500 mm² 케이블을 대상으로 Brinkman 방정식과 에너지 방정식을 연계한 정상상태 유한요소 해석을 수행하였다. 케이블 중심 매설깊이 2 m, 주위온도 25 ℃, 토양열저항 0.9 K·m/W의 직매설 조건에서 투수율을 2.66×10^{-14}~3.28×10^{-9} m²로 변화시키고 도체 최고온도 90 ℃를 기준으로 연속허용전류를 산정하였다. 낮은 투수율에서는 간극수의 이동이 제한되어 전도가 지배적이었으나, 높은 투수율에서는 자연대류에 의한 상향 열유동이 나타났다. 투수율 5×10^{-11} m²에서는 연속허용전류가 649 A로 나타났다.



그림과 같이 연속허용전류는 590 A에서 최대 864 A로 약 46.4% 증가하였다. 이는 투수율 증가에 따른 자연대류가 열방산을 촉진함을 보여주며, 해저케이블의 허용전류 산정 시 이를 고려할 필요가 있음을 시사한다.

주제어: 연속허용전류, 유한요소해석, 자연대류, 투수율, 해저케이블

Keywords: Ampacity, FEM, Natural convection, Permeability, Submarine cable

프레스보드지 적층 조건에 따른 DC 관통절연파괴 특성 분석

Analysis of DC Puncture Breakdown Characteristics of Layered Pressboard Configurations

오선민[1], 유찬열[1], 김성용[1], 황률[1], 양부승[2], 박상훈[3], 이방욱[1*]
[1]HVDC 전력연구실, 한양대학교 ERICA, [2]HD현대일렉트릭, [3]일진전기
(*교신저자: bangwook@hanyang.ac.kr)

유입용 변압기의 절연설계에서 프레스보드는 오일갭을 다수의 절연 배리어로 세분화해 전압을 분담시킴으로써 절연내력을 높이며, 이를 위해 적층 구조로 구성되는 경우가 많다. 이에 본 연구에서는 적층 구조 프레스보드의 DC 관통절연파괴 특성을 규명하고자 하였다.

시편은 1T 프레스보드 3장 적층 구조와 단일 3T 프레스보드로 구성하였으며, '진공 펌핑-진공 유지-대기압 유지' 순으로 각 40분, 40분, 60분간 진공함침을 실시하였다. 그림 1과 같이 시험 장치를 구성하고, IEC 60243-1에 따라 단시간 상승 시험 절연파괴전압의 40%를 초기 인가전압으로 설정한 뒤 1분마다 5 kV씩 상승시켜 절연파괴 시점까지 인가하는 Step-Up Method를 적용하였다.

실험 결과 그림 2와 같이 단일 3T 프레스보드 대비 1T×3 적층 프레스보드의 관통절연파괴전압(BDV)은 28.60% 상승한 것으로 나타났다. 한편, 상부 전극과 시편 사이에 오일갭을 두고 측정한 경우에는 상승폭이 점차 감소하여, 1mm 조건에서는 18.60%, 2mm 조건에서는 4.28%의 상승률을 나타냈다.

단일 3T 대비 1T×3 적층 프레스보드의 절연내력 향상률은 오일갭이 커질수록 감소함을 확인하였다. 따라서 본 연구 결과는 유입용 변압기 절연설계에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

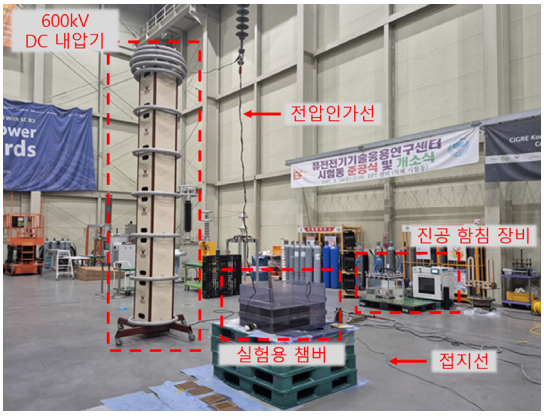


그림 1. 실험 전경 및 진공 함침 장비

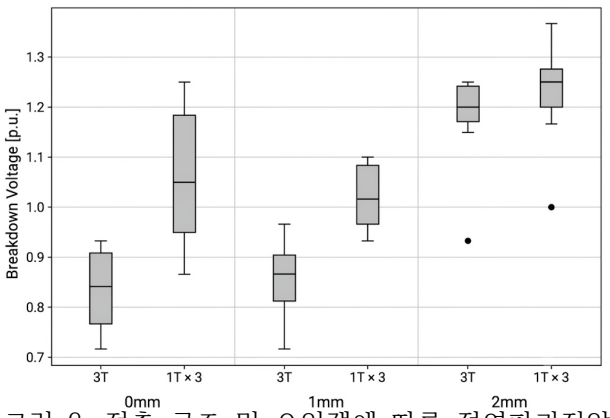


그림 2. 적층 구조 및 오일갭에 따른 절연파괴전압

주제어: 프레스보드, 배리어, DC 관통절연파괴전압, 오일갭

Keywords: Pressboard, Barrier, DC Puncture Breakdown, Oil gap

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 HD현대일렉트릭과 일진전기의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다. (RS-2025-25460496, RS-2025-25462762)

두 원형 공극의 배열각에 따른 부분방전 특성

Partial Discharge Characteristics According to the Arrangement Angle of Two Circular Voids

최민준[1] 고동현[1] 권오민[1] 김명진[1*]
[1]충북대학교 전기공학과
(*교신저자: mckim@chungbuk.ac.kr)

고체 절연체 내부에 형성된 미세 공극은 국부적인 전계 상승을 유발하며 반복적인 방전은 절연 성능 저하로 이어질 수 있다. 실제 전력기기용 절연재에서는 하나의 공극보다 여러 공극이 함께 형성되는 경우가 있으며 이때 공극의 상대적 위치와 반복 방전으로 남는 표면전하가 이후의 전계 상태를 바꿀 가능성이 있다. 따라서 복수 공극 조건에서는 초기 형상만을 기준으로 방전 특성을 판단하기보다 방전 이력에 따른 전계 변화를 함께 살펴볼 필요가 있다.

본 연구는 두 공극의 배치각에 따라 방전 전후의 내부 전계와 부분방전 거동이 어떻게 달라지는지를 비교하는 데 목적을 두었다. COMSOL Multiphysics를 이용해 동일한 크기의 두 공극을 절연체 내부에 구성하고, 배열각을 0°, 30°, 60°, 90°로 설정하였다. 50Hz, ±6kV 첨두의 정현파 전압을 인가하였으며 반복 방전 해석은 500주기까지 수행하였다. 수치해석을 통해 실험에서 직접 확인하기 어려운 공극 내부 전계와 표면전하의 변화를 동일한 기하조건에서 연속적으로 비교하였다. 해석 과정에서는 공극 내부의 최대, 평균 전계와 공극 표면의 전하밀도, PD 발생 빈도 및 방전전하 분포를 함께 분석하였다.

방전이 시작되기 전 최대전계는 0°, 30°, 60°, 90°에서 각각 5.016, 4.893, 4.567, 4.293 kV/mm로 나타나 배열각이 커질수록 낮아지는 경향을 보였다. 그러나 500주기의 반복 PD 이후에는 이와 같은 초기 순서가 유지되지 않았고 내부 전계의 크기는 90° > 0° > 60° > 30°의 순으로 나타났다. 또한 초기 상태와 비교한 평균전계 감소율은 배열조건에 따라 약 43.5~81.6% 범위의 차이를 보였으며 표면전하 축적량과 PD 빈도 방전전하 분포도 각 배열에서 서로 다른 특성을 나타냈다. 그 중에서도 30° 조건에서는 상대적으로 큰 표면전하 축적과 함께 가장 큰 전계 완화가 관찰되었다. 이러한 결과는 두 공극의 PD 거동이 초기 형상에 의한 전계분포만으로 결정되지 않으며 반복 방전 과정에서 형성되는 전하 이력과 전계 재분포를 함께 고려해야 함을 보여준다. 본 연구는 복수 공극에서 나타나는 전계 변화와 방전 양상의 연계를 이해하고, 실제 절연 진단에서 복합 결함 신호를 해석하기 위한 참고자료로 활용될 수 있다.

주제어: 부분방전, 복수 공극, 공극 간 상호작용, 방전 이력, 수치해석

Keywords: Partial Discharge, Multiple voids, Void interaction, Discharge history, Numerical analysis

[감사의 글]
본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의하여 수행된 기초연구사업임. (RS-2026-25602302)

3심 아머 해저케이블의 손실 산정 방법에 따른 허용전류 비교 분석

Comparative Analysis of Ampacity of Three-Core Armoured Submarine Cables Based on Different Loss Calculation Methods

박민솔[1], 박흥석[1], 임종필[1], 홍순명[2], 이익형[2], 정채균[1*]
[1]한전 전력연구원, [2]한국전력공사
(*교신저자: chaekyun@kepco.co.kr)

해상풍력 등 해상 전력설비의 확대에 따라 대용량 전력을 안정적으로 송전하기 위한 해저케이블의 중요성이 증가하고 있다. 해저케이블은 설치 이후 유지보수와 교체가 어렵고, 설계단계에서 산정된 허용전류가 송전용량과 케이블 사양을 결정하므로 안정적인 운용과 경제적인 설계를 위해 허용전류를 합리적으로 평가할 필요가 있다. 특히 3심 아머 해저케이블은 도체손실뿐만 아니라 금속 시스 및 자성 아머에서 발생하는 손실이 온도상승과 허용전류에 직접 영향을 미치므로, 손실 산정 방법에 따른 차이를 정량적으로 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 IEC 60287과 CIGRE TB 908의 손실 산정식을 MATLAB으로 구현하고, 실제 케이블 구조를 기반으로 일부 세부 제원을 대표화한 154 kV 3C×1200 mm² XLPE-SWA 해저케이블 모델에 적용하였다. 계산조건은 60 Hz, 양단접지 및 Contralay 구조로 설정하였다. 포설조건은 균질 해저토에 단독 1회선을 직접매설하는 조건으로 설정하여 인접 열원에 의한 열간섭을 제외하였으며, 케이블 중심 기준 매설심도 1.5 m, 해저토 열저항률 0.8 K·m/W, 주위온도 25℃ 및 도체 최고허용온도 90℃를 적용하였다. CIGRE TB 908에 필요한 자성 아머의 복소 상대투자율은 해당 케이블의 실측값이 아닌 CIGRE TB 908 Appendix C의 대표값인 150-j50을 적용하였다. 계산 결과 정상상태 허용전류는 IEC 60287에서 756.6 A, CIGRE TB 908에서 878.2 A로 산정되어 약 16.1%의 차이를 나타냈다. 각 방법의 허용전류 수렴점에서 아머 손실계수 λ_2는 각각 0.784와 0.097, 아머 손실은 35.5 W/m와 6.1 W/m로 큰 차이를 보였다. CIGRE TB 908에서는 허용전류 증가에 따라 도체 및 시스 손실이 증가하였음에도 자성 아머 손실이 크게 감소하였으며, 총손실은 IEC 60287에서 108.9 W/m, CIGRE TB 908 Method 1에서 99.0 W/m로 산정되었다. 이는 자성 아머의 연합피치, 연합방향 및 자기적 특성을 보다 상세하게 반영하는 손실 산정 방법의 차이가 3심 아머 해저케이블의 허용전류 평가에 유의한 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 다만 본 결과는 대표화된 구조 제원과 복소 상대투자율을 적용한 계산 결과로서 실제 케이블의 정격을 직접적으로 의미하지 않으며, 향후 실측 자기특성을 적용한 추가 검토가 필요하다.

주제어: 3심 해저케이블, 아머 손실, 허용전류, 손실 산정, IEC 60297, CIGRE TB 908

Keywords: Three-Core Submarine Cable, Armour Loss, Ampacity, Loss Calculation, IEC 60287, CIGRE TB 908

50/1500us 임펄스 전류 인가에 따른 직류 차단기용 금속 산화물 바리스터의 동적 V-I 특성 편차 분석

Analysis of Dynamic V-I Characteristic Deviations of MOV for DC Circuit Breaker Under 50/1500 μs Impulse Current

이정철[1], 권일[1], 곽유진[1], 오연주[1], 정동훈[2], 황휘동[2], 허창근[2], 이방욱[1*]
[1]한양대학교 HVDC 전력연구실, [2](주)효성중공업 연구소
(*교신저자: bangwook@hanyang.ac.kr)

최근 직류(DC) 배전망의 핵심 보호설비인 DC 차단기 개발이 부각되고 있다. 차단기 내 직·병렬로 구성된 금속 산화물 바리스터(MOV) 뱅크는 사고 에너지를 흡수하나, 소자 간 특성 편차가 병렬 컬럼 간 전류 불균형을 유발해 특정 소자의 열폭주를 초래할 수 있다. 이에 본 연구에서는 DC 차단 파형과 유사한 50/1500 μs 장파미 임펄스 전류가 인가될 때 MOV의 최대 전압·전류 및 동적 V-I 특성 편차가 심화되는 양상을 정량적으로 규명하고자 하였다.

이를 위해 동일 정격의 상용 저압 MOV 소자 10개에 50/1500 μs 전류를 인가하여 과도 파형과 파두 및 파미구간의 동적 V-I 특성을 도출하였다. 측정 결과, 데이터시트 상 300 A에서 450 V의 최대 전압을 가지는 제품임에도 실제 장파미 인가 시 기준 대비 최대 11.2%의 전압 편차와 12.6%의 전류 편차를 보였다. 또한 그림 1,2와 같이 기준 곡선 대비 동적 V-I 특성은 파두 구간에서 최대 81.3%, 파미 구간에서 최대 18.6%의 기하학적 특성 편차가 발생하여 장파미 환경에서 편차가 크게 심화됨을 확인하였으며 이를 그림 3.에 나타내었다.

이는 기존 정적 특성만으로는 DC 차단기 내에서의 전류 불균형을 예측하기 어려움을 시사한다. 따라서 본 연구에서는 신뢰성 높은 직류 차단기용 MOV 뱅크 설계를 위해서는 장파미 스트레스 하의 동적 V-I 특성 편차를 평가 기준으로 고려해야 함을 실험을 통해 검증하였다..

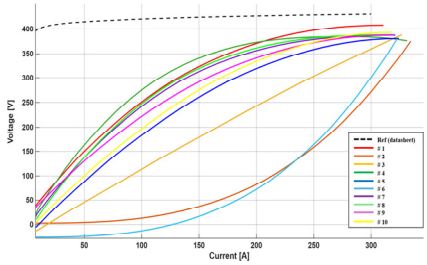


그림 1. 파두 구간 동적 V-I 특성 곡선

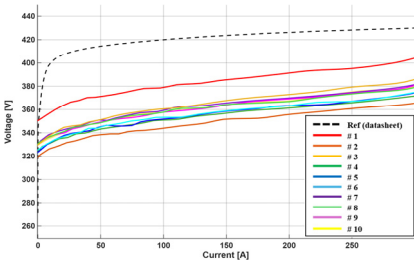


그림 2. 파미 구간 동적 V-I 특성 곡선

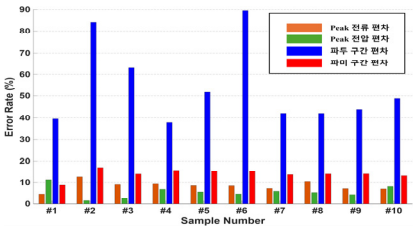


그림 3. 데이터시트 파형 대비 오차율

주제어: DC 차단기, 금속 산화물 바리스터, 임펄스 전류 시험, 동적 V-I 특성

Keywords: DC circuit Breaker, Metal Oxide Varistor, Impulse Current Test, Dynamic V-I Characteristic

[감사의 글]
본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)의 재정 지원을 받아 수행되었으며, 한국산업기술진흥원의 관리 하에 “2026 지역 중점산업 기반 대학기업 연계형 OpenLab 육성지원 사업”의 지원을 받았습니다. (사업번호: B0080219002809)

포스터 발표 1

스마트 대전력 및 고전압기술 I

(PS1 024~035)

좌장 : 김명진 교수(충북대학교)



금속 증기 재증착 계수가 LTE 직류 아크 특성에 미치는 영향에 관한 수치해석 연구

Numerical Study on the Influence of Metal Vapor Redeposition Coefficient on LTE DC Arc Characteristics

김형준[1], 이세희[1*]
[1]경북대학교 전자전기공학부
(*교신저자: shlees@knu.ac.kr)

직류 아크에서 전극의 고온화와 용융·증발로 생성된 금속 증기는 플라즈마의 열역학적·전기적 물성을 변화시켜 아크 온도, 전류밀도 및 전압 특성에 영향을 미친다. 또한 증발된 금속 증기의 일부는 전극 표면으로 재증착될 수 있으므로, 순 금속 증기 유입량과 전극 질량손실을 예측하기 위해 재증착 효과를 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 금속 증기 재증착 계수 변화가 LTE DC 아크의 열·유동 및 전기적 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

축대칭 침-평판 전극 구조에 대해 국부열역학평형(Local Thermodynamic Equilibrium, LTE)을 가정한 수치해석 모델을 구축하고, 전자기장, 유동 및 열전달, 질량 수송을 연성 하였다. 전극 간격은 10 mm로 설정하고 아크 전류는 100, 150 및 200 A로 변화시켰다. 전극 표면의 증발 질량유속은 Hertz-Knudsen-Langmuir 식으로 계산하였으며, 증발 질량 중 전극 표면으로 되돌아가는 비율을 재증착 계수로 정의하여 순 금속증기 유입량에 반영하였다. 재증착 계수는 0.17~1 범위에서 변화시키고, 이에 따른 금속증기 분포, 전극 온도와 질량손실 및 아크의 온도·전기적 특성을 비교하였다.

재증착 계수가 증가함에 따라 전극에서 아크 영역으로 유입되는 순 금속증기량이 감소하였으며, 이에 따라 전극의 총 질량손실 또한 감소하는 경향을 보였다. 반면, 전극의 최대 온도 변화는 상대적으로 작게 나타났다. 재증착 계수는 전극의 열적 거동보다는 금속증기 발생량 및 질량손실 예측에 더 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 전류가 증가함에 따라 재증착 계수에 따른 경향성 차이가 두드러지게 나타난다.

아크 전류가 증가할수록 재증착 계수에 따른 금속증기 발생 및 전극 질량손실의 차이가 증가하였으며, 이는 고전류 아크 조건에서 재증착 모델의 중요성이 더욱 커짐을 의미한다. 본 연구는 최근 확대되고 있는 고전력 DC 전력분배 및 충전 시스템에서 금속증기를 동반한 DC 아크와 전극 침식을 예측하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

주제어: LTE 직류 아크, 금속 증기, 재증착, 전극 재료

Keywords: LTE DC Arc, Metal Vapor, Redeposition, Electrode Material

[감사의 글]
이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2026-25477267)

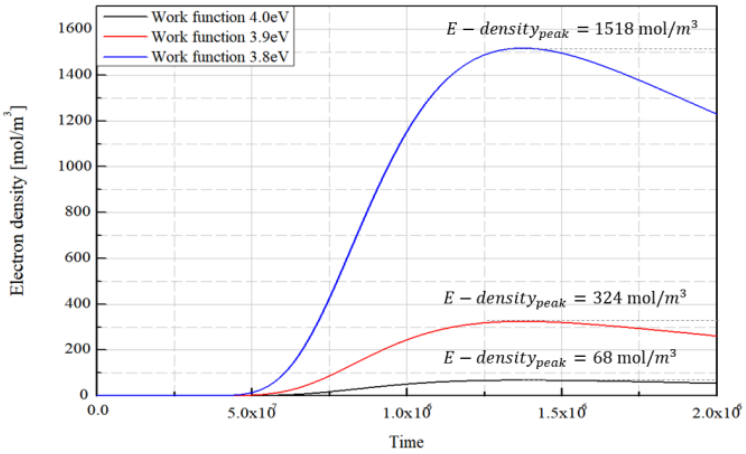
유효 일함수 변화에 따른 피뢰침 선단의 초기 스트리머 개시 특성 분석

Analysis of Initial Streamer Inception at a Lightning Rod Tip with Varying Effective Work Function

유찬종, 최성은, 장경훈*
한국건설생활환경시험연구원 (Korea Conformity Laboratories, KCL)

낙뢰 시 피뢰침 선단에서는 강한 전계로 전자 방출과 공기 이온화가 발생하며, 이는 초기 스트리머 개시에 영향을 줄 수 있다. 그러나 ESE 피뢰침의 내부 트리거링 회로에 의한 전자방출 촉진 효과를 방전 해석에 직접 구현하기는 어렵다. 본 연구에서는 이를 유효 일함수로 등가화하고, 일함수 변화가 초기 스트리머 형성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

COMSOL Multiphysics에서 전극 간격 300 mm, 피뢰침 높이 30 mm 조건으로 300 kV의 1.2/50 μs 표준 낙뢰 임펄스를 인가하였으며, 피뢰침 표면에는 Fowler-Nordheim 전계방출 모델을 사용하였다.



유효 일함수를 4.0, 3.9, 3.8 eV로 변화시킨 결과 최대 전자밀도는 각각 약 68, 324, 1,518 mol/m³로 나타났다. 4.0 eV 대비 3.8 eV에서는 약 22.3배 높은 최대 전자밀도를 보였으며, 일함수가 낮아질수록 시간에 따른 전자밀도 증가가 더욱 뚜렷하게 나타났다.

이러한 연구 결과는 피뢰침 선단의 전자 방출 특성이 초기 스트리머 개시에 영향을 미칠 수 있음을 정량적으로 보여주며, 향후 초기 방전 거동을 해석하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

주제어: 유효 일함수, 전계 전자방출, 초기 스트리머, 낙뢰 임펄스, 피뢰침

Keywords: Effective work function, Field electron emission, Streamer inception, Lightning impulse, Lightning rod

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 산업통상부 및 한국산업기술기획평가원 연구비 지원으로 수행되었음. (RS-2026-25563747, AI 기반 전력설비 화재 예방 스파크 사전 감지 센서 시스템)

유한요소해석을 이용한 유전체의 트랩에너지 추정

Estimation of Trap Energy of Dielectrics Using Finite Element Merhod

김민우, 신효준, 이도헌, 이세희*
경북대학교 전기공학과
(*교신저자: shlees@knu.ac.kr)

고분자 절연재료의 전하 트랩은 전하 축적과 물질의 열화를 좌우하므로 트랩 에너지 분포의 정량적 평가가 중요하다. 트랩 분포는 켈빈 프로브를 이용한 등온 표면전위 감쇠(ISPD)로 평가하나, 대기 중 감쇠에는 체적 전도, 기체 중화, 표면 전도가 함께 섞여 있어 단일 시정수로 필요한 측정 시간을 예측하기 어렵다. 본 연구에서는 FEM 시뮬레이션으로 세 감쇠 메커니즘의 기여를 파악하고, 대기 조건에서 트랩 분포의 평가에 필요한 ISPD 측정 시간을 제시하고자 하였다.

접지 전극 위 에폭시 시편($\varepsilon_r = 5.1, K_V = 2.9 \times 10^{-16}\,[S/m]$, $K_S = 8.5 \times 10^{-19}\,[S]$)의 2차원 축대칭 모델을 구성하고, 각 메커니즘을 개별 적용한 경우의 감쇠를 비교하였다. 그 결과 48시간 동안 표면전하 밀도는 체적 전도, 표면 전도, 기체 중화에 의해 각각 63%, 27%, 87% 감소하였다.

이후 세 메커니즘을 모두 적용한 표면전위에 ISPD 이론을 적용한 결과, 트랩 분포는 0.95eV와 0.99eV에서 피크를 보였으며, 약 50시간 측정 시 분포의 97%를 얻을 수 있었다. 이는 대기 조건에서 ISPD 측정 시간 설정의 기준으로 활용될 수 있다.

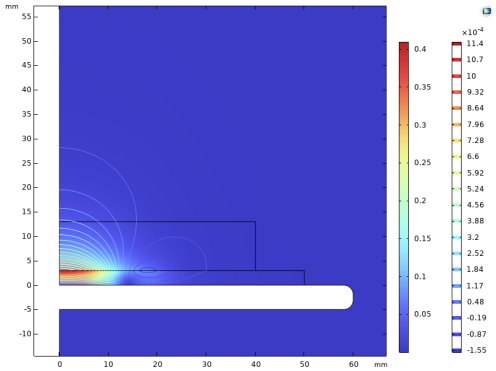


그림1. 초기 전위 및 전계 분포

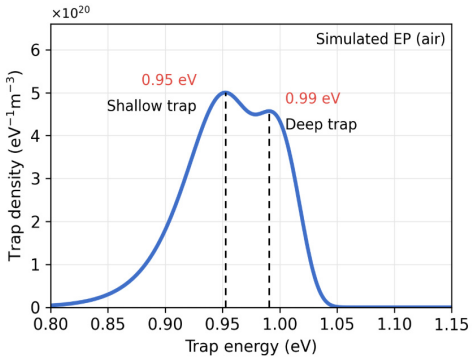


그림2. 트랩 에너지 분포

주제어: 등온 표면전위 감쇠, 트랩 에너지 분포, 유한요소 해석

Keywords: Isothermal Surface Potential Decay(ISPD), Trap Energy Distribution, Finite Element Method(FEM)

[감사의 글]
본 연구는 2026년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업입니다.
(RC-2026-25477267)

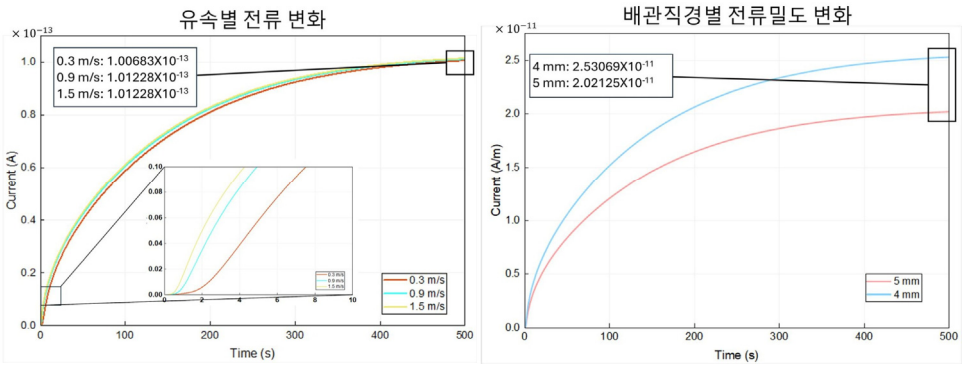
변압기 유로 형상 조건과 유속을 고려한 절연유 유동대전 특성 연구

A Study on the Streaming Electrification Characteristics of Insulating Oil Considering Transformer Flow Channel Geometry and Flow Velocity

정세원, 이은수, 김준범, 이예진, 김민희†
계명대학교 공과대학 전기공학과
minnie90@kmu.ac.kr

전력용 변압기의 냉각 과정에서 발생하는 절연유의 유동대전은 전하 축적을 유발하여 절연 성능에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 COMSOL Multiphysics를 이용하여 배관 내 절연유의 유동대전을 모델링하고, 유속과 배관 직경 변화에 따른 전류 변화를 분석하였다.

COMSOL Multiphysics를 이용하여 25 ℃에서 절연유의 배관 내 유동 및 전하 거동을 수치해석하였다. 유속은 0.3, 0.9, 1.5 m/s, 배관 직경은 4, 5 mm로 변화시켰으며, 이온의 대류·확산·전기장 이동을 고려해 전하 분포와 전류를 산출하였다.



유속이 0.3, 0.9, 1.5 m/s로 증가할수록 초기 구간에서 전류의 증가 속도가 빨라졌으나, 장시간 해석에서는 약 1.0×10^{-13} A 부근으로 수렴하였다.

배관 직경을 4, 5 mm로 변화시킨 경우에도 전류가 증가한 후 안정화되는 경향을 보였다.

이러한 결과는 유속에 따라 초기 전류 발생 특성이 달라지며, 배관 직경에 따른 정상상태 전류의 영향은 상대적으로 작음을 보여준다. 따라서 본 연구는 변압기 강제 송유 냉각계통의 유동대전 예측 및 배관 설계에 기초자료로 활용될 수 있다.

주제어: 유동대전, 절연유, 변압기, 유속, 배관 직경

Keywords: Streaming Electrification, Insulating Oil, Transformer, Flow Velocity, Pipe Diameter

[감사의 글]
본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 대구광역시의 재원으로 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(과제관리번호: 2026-RISE-03-002)

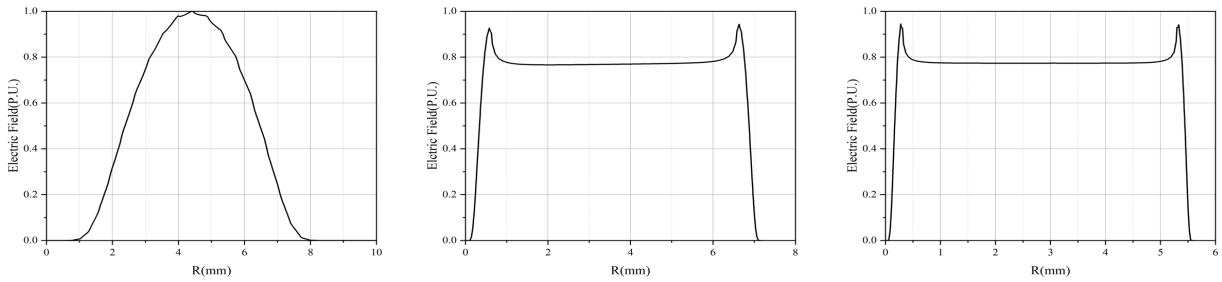
증용량 신전선의 표면전계 저감 효과 분석

Analysis of Surface Electric Field Reduction in Advanced High-Capacity Conductors

최경섭[1*], 김로이[1], 신동혁[1]
[1]한전 전력연구원

사다리꼴 소선을 적용한 증용량 신전선은 기존 원형 소선 전선과 단면 구조가 달라 도체 표면의 전계 집중 특성에도 차이가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 기존 전선 1종과 증용량 신전선 2종을 대상으로 2차원 전계해석을 수행하여, 동일 인가전압에서 표면전계 분포와 최대값을 비교하였다.

전기환경 특성 분석을 위해 동일한 인가전압 조건을 가지는 3종류의 가공 송전선의 소선 단면 면적 및 형상을 반영한 2차원 전계해석 모델을 구축하여 복도체 형상을 제작, 각 전선에 사용된 재료의 물성을 적용하였다. 이후 동일 전압 조건에서 전선 별 최대 전계 및 최대 전계가 형성된 소선의 표면 전계를 산출하여 전선 종류에 따른 전계 집중 특성을 비교하였다.



(a) ACSR (b) ACMR (c) HCSC

그림 1. 전선 별 소선 표면전계 비교 (기존 송전선 최대값 = 1 p.u.)

해석 결과, 증용량 신전선 2종의 최대 표면전계는 기존 전선 대비 약 5~6% 낮게 나타났다. 기존 전선은 원형 소선의 중앙부에서 전계가 높게 나타난 반면, 신전선은 사다리꼴 소선의 중앙부에서 비교적 균일한 분포를 보이고 양쪽 가장자리 부근에서 국부 최대값이 나타났다. 이러한 분포 차이는 소선 형상 및 도체 단면 구조의 차이에 따른 것으로 판단된다.

본 해석 조건에서 증용량 신전선의 최대 표면전계 저감 효과를 확인하였다. 이는 사다리꼴 형태의 소선으로 구성된 신전선이 전기환경 장해 저감에 기여할 가능성을 시사하며, 실제 코로나 소음 등의 저감 효과는 향후 실증시험을 통해 검증할 예정이다.

주제어: 가공송전, 신전선, 표면전계

Keywords: Overhead transmission, High-capacity conductors, Surface electric field

저압 소전류 DC 차단기 내 플레이트 재질의 자성 유무 및 배치 조건에 따른 아크 거동 및 소호 특성 분석

Analysis of Arc Behavior and Interruption Characteristics in Low-Voltage Small-Current DC Circuit Breakers According to Plate Properties and Arrangement

오연주[1], 곽유진[1], 이정철[1], 이방욱[1*], 이규호[2]
[1]한양대학교 ERICA 전자공학과, [2]LS ELECTRIC
(*교신저자: bangwook@hanyang.ac.kr)

저압 소전류 DC 차단기는 자연적인 전류 영점이 존재하지 않고 아크의 불안정성이 높기 때문에 아크 소호를 돕기 위하여 스플리트 플레이트 구조가 주로 적용된다. 본 연구에서는 동일한 실험 조건에서 플레이트 재질의 자성 유무에 따른 차단기 내부 아크의 기초 거동 및 소호 특성을 정량적으로 비교하였다.

실험은 800[V], 32[A] 정격 조건에서 수행하였으며 플레이트 재질의 자성 유무에 따른 특성을 비교하기 위하여 비자성체인 SUS와 강자성체인 EGI를 대상 시료로 선정하였다. 고정 구리 접점 및 이동식 구리 접점으로 구성된 차단 장치에서 개리 속도를 1000[mm/s], 개리 거리는 아크 소호가 보장된 72.5[mm]로 설정하여 Front(고정접점 측), Center(중간부), Tail(이동접점 측) 플레이트 배치에 따른 소호 특성을 측정하였다.

실험 결과, 강자성체인 EGI는 비자성체인 SUS에 비해 아크의 플레이트 내부 유입을 촉진하여 아크 소호 성능을 향상시키는 특성을 나타냈다. Front 조건에서는 후단부에서의 아크 신장에 따라 아킹 타임이 약 11% 감소하였다. Center 조건에서는 전·후단부에서 아크가 신장되어 성공 확률이 10%에서 100%로 증가하였으며, 아킹 타임이 약 36% 감소하였다. Tail 조건에서는 전단부에서의 아크 신장에 따라 아킹 타임이 약 37% 감소하였다.

본 연구를 통해 강자성체인 EGI는 아크를 플레이트 내부로 신속하게 유인하여 소호 능력을 향상시키는 것을 확인하였다. 이는 향후 다양한 부하 전류 영역에서 안정적으로 작동하는 저압 소전류 DC 차단기 플레이트 설계의 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

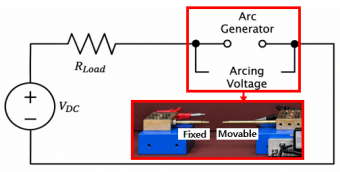


그림 1. 실험 회로 및 장치

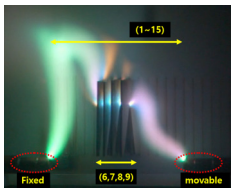


그림 2. Center 배치에서의 아크 형상

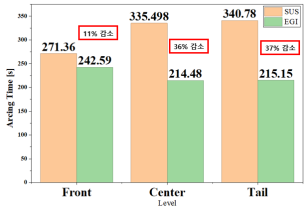


표 1. 플레이트 배치 수준에 따른 재질별 평균 아킹 타임

주제어: DC 차단기, 아크 소호, 스플리트 플레이트, 플레이트 자성, 저전압 소전류

Keywords: DC Circuit Breaker, Arc Extinction, Split Plate, Plate Magnetism, Low-Voltage Small-Current

[감사의 글]
이 논문은 LS ELECTRIC의 지원으로 수행되었음. (No.202600000001157)

이 논문은 산업통상자원부(MOTIE)의 재정 지원을 받아 수행되었으며, 한국산업기술진흥원의 관리 하에 “2026 지역 중점산업 기반 대학기업 연계형 OpenLab 육성지원 사업”의 지원을 받음. (No.B0080219002809)

압력 변화에 따른 K6 친환경 절연가스의 AC 절연파괴전압 특성

AC Breakdown Voltage Characteristics of Eco-Friendly K6 Insulating Gas according to Pressure Variation

장찬혁[1], 김예찬[1], 구본혁[1], 이제희[1], 반인후[1], 고기원[1], 강형구[1*]

[1]국립한국교통대학교 전기공학과

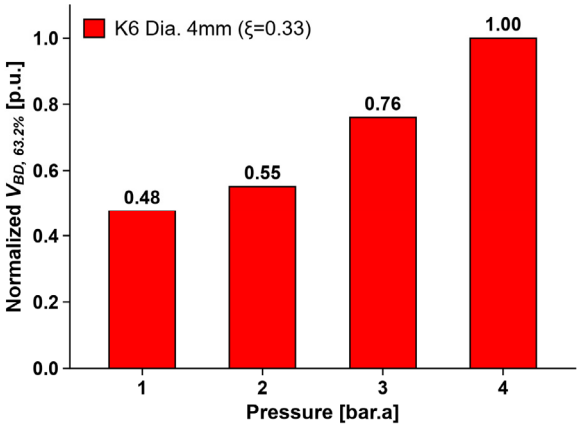
(*교신저자: kang@ut.ac.kr)

SF_6 대체 절연가스로 GWP 1 미만의 K6가 개발되었으나, 충전 압력 설계에 필요한 압력별 절연파괴 특성은 충분히 검토되지 않은 실정이다. 본 연구에서는 압력 변화에 따른 K6의 AC 절연파괴전압 특성을 분석하였다.

직경 4 mm 구 전극과 가장자리를 R40, R20 및 R5 mm의 복합 원호 형상으로 설계한 하부 접지 전극(갭 5 mm, ξ=0.33)을 사용하였다. K6를 1-4 bar.a로 충전하고 60 Hz AC 전압을 1 kV/s로 승압하여 압력별 10회 측정하였으며, 각 압력의 Weibull 척도모수 ($V_{BD,63.2\%}$)를 4 bar.a 기준 p.u.로 정규화하였다.

그림 1과 같이 정규화 $V_{BD,63.2\%}$는 1, 2, 3, 4 bar.a에서 각각 0.48, 0.55, 0.76, 1.00 p.u.로, 1 bar.a 대비 4 bar.a에서 약 2.1배 증가하였다. 구간별 증가 폭은 1-2 bar.a에서 0.07 p.u.로 가장 작았다. 형상모수는 1 bar.a에서 12.7로 가장 낮아 절연파괴전압의 산포가 가장 크게 나타났다.

본 결과는 K6 적용 가스절연기기의 충전 압력 선정 및 절연설계의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.



<그림 1> 압력 변화에 따른 K6의 정규화 AC 절연파괴전압

주제어: 압력, 전계 이용률, AC 절연파괴전압, K6 가스, SF6 가스

Keywords: AC breakdown voltage, Field utilization factor, Gas pressure, K6 gas, SF6 gas

[감사의 글]

본 연구는 한국전력공사의 2025년 선정 기초연구개발 과제 (R25XO03-7)와 2026년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20222480001596)

반향 지배 고정자에서 교차 스펙트럼 그래프 지문을 이용한 AE 기반 부분방전 위치추정

Image-Based Modeling of Thermal and Electrical Behavior in Polymer Composites

김민희[1], 조용성[2]
[1]계명대학교 전기공학과, [2]한국전기연구원
(*교신저자: minnie90@kmu.ac.kr)

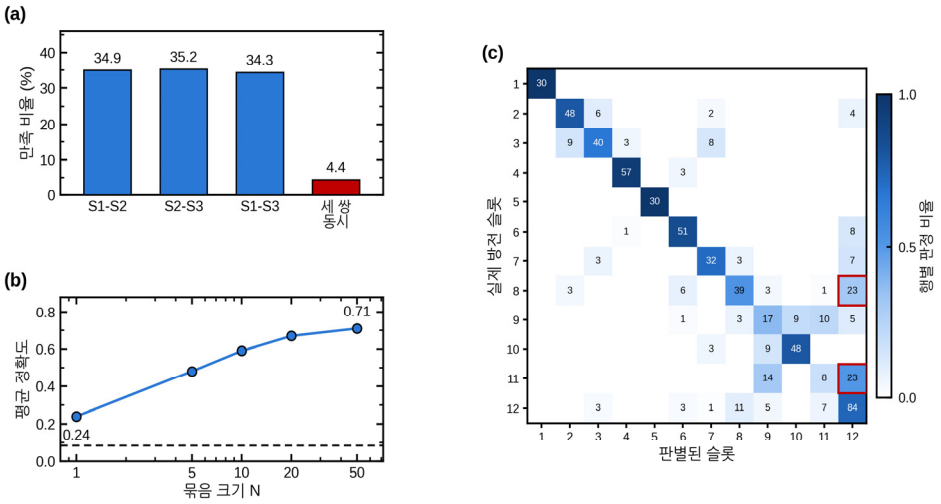


그림 1 반향 지배 고정자에서의AE 기반 부분방전 위치추정. (a) 센서쌍별, 그리고 세 쌍이 동시에 기하학적으로 가능한 시간차 범위(±80 μs)에 드는 비율, (b) 묶음 크기N에 따른12슬롯 판별 정확도(슬롯별 정확도의 평균, 파선은 무작위 추측0.083), (c) 묶음50개 판정의 혼동행렬(숫자는 판정 건수, 붉은 칸은 8→12 및 11→12의 집중 오분류).

회전기 고정자 권선의 부분방전(PD)은 절연 열화의 선행 지표지만, 전기적 측정은 크기만 알 뿐 위치를 몰라 손상부 확인에 권선 분해가 필요하다.

음향방출(AE)은 방전이 만든 탄성파를 겉면에서 받으므로 분해 없이 위치를 확인할 수 있으나, 도달 시간차를 쓰려면 반사 없이 곧장 온 파(직접파)를 골라내야 한다. 하지만 고정자는 금속 구조물이라 반향이 심하다.

본 연구에서는 이 방식의 성립 여부와 센서 간 주파수 관계를 지문으로 쓴 슬롯 구분 가능성을 확인하였다.

반지름 70 mm 원주에 120° 간격으로 붙인 AE 센서 3개로 12슬롯의 방전 신호 12,600개를 얻었다. 신호마다 세 주파수 대역에서 센서 쌍이 함께 진동하는 정도, 늦게 도달하는 시간, 위상이 한 바퀴 돌아 닫히는 정도 등 27개 값을 구한 뒤, 같은 조건의 신호 50개를 묶어 분포를 랜덤포레스트(random forest) 알고리즘으로 판별하였다.

세 센서쌍 시간차가 기하학적 가능 범위(±80 μs)에 모두 든 경우는 4.4%뿐이어서 직접파 기준 계산이 성립하지 않았으나 (그림1a) 슬롯별 정확도 평균은 신호 한 개 0.24, 50개 묶음 0.71로 무작위 추측 (0.083)의 8.5배였고 (그림1b), 정답을 섞으면 성능이 사라져($p \approx 0.005$) 우연이 아님을 확인하였다.

반향을 잡음이 아니라 위치 고유의 전달 특성으로 보면 센서 3개로 12슬롯 구분이 가능하다. 향후 센서 재부착·방전 세기 변화를 포함한 독립 측정으로 일반화를 검증하고, 수치해석을 활용해 오분류 원인을 규명할 계획이다.

주제어: 부분방전, 음향방출, 위치추정, 교차 스펙트럼 지문, 회전기 고정자

Keywords: Partial discharge, Acoustic emission, Localization, Cross-spectral graph fingerprint, Stator

[감사의 글]
이 연구는 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본사업임(No. 26A01062)

OF케이블 선로에서 철거된 유입 접속함의 정밀 분석을 통한 유지보수 방안 고찰

Investigation into Maintenance Strategies Based on Precision Analysis of Field-Retrieved Stop Joints from OF Cable Systems

정연하, 고현상, 구동철, 최병화, 정낙훈
한국전력공사

OF 케이블 선로는 절연유가 함침된 절연지를 절연재로 사용하며, 절연유의 압력을 일정하게 유지하기 위해 에폭시 유니트가 포함된 유입 접속함을 설치한다. 절연파괴 발생 시 절연유 누출로 화재까지 이어질 수 있으므로, 고장 원인을 규명하고 효과적인 진단기술을 개발하여 선로의 안정적인 운영을 지원할 수 있는 체계적인 유지보수 관리방안이 필요하다.

본 연구에서는 2022년 12월 발생한 유입 접속함 고장 및 주변 접속함의 분석 결과를 바탕으로 OF 케이블 선로의 유지보수 계획 수립 방안을 검토하였다. 당시 고장 원인 분석 결과, 에폭시 유니트와 도체 간 접착력 저하로 계면에 공극이 형성되고 절연유가 침투하여 최종적으로 절연파괴로 이어진 것으로 판단되었으며, 이를 통해 에폭시 유니트와 도체의 계면 접착 및 표면 상태가 접속함의 장기적인 절연 신뢰성에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

또한 해당 선로에 설치된 유입 접속함 15개를 철거하여 에폭시 유니트, 벨마우스 및 동박스 등의 상태를 확인하고, X-ray 촬영과 조도 측정을 통해 내부 결함 및 계면 상태를 분석하였다. 외관상 특이사항은 확인되지 않았으나, 고장 접속함과 동일 제조사의 접속함에서 20 ㎛ 이하의 표면 거칠기가 확인되었으며, 공극 및 계면에서 절연유 침투 흔적이 다수 발견되었다.

현재 신규 유입 접속함은 X-ray 검사를 통해 내부 공극 등의 결함을 확인하고 있으나, 계면 결함과 초기 접착력 저하를 직접 확인하는 데에는 한계가 있다. 따라서 1999~2001년 제작된 동일 제조사 유입 접속함을 우선 교체 대상으로 선정하고, 제작연도, 제조사 및 설비 상태를 고려한 단계적 교체계획을 수립할 필요가 있다. 아울러 실규모 모의결함 시험을 통해 개발 중인 전기적·화학적 진단기술을 활용하여 접속함의 상태를 평가하고, 현장 철거품과 시험 결과를 종합하여 OF 케이블 선로의 유지보수 기준 및 관리방안에 반영하고자 한다.

주제어: Oil-filled cable system, 유입 접속함, X-ray, 조도, 유지보수 계획

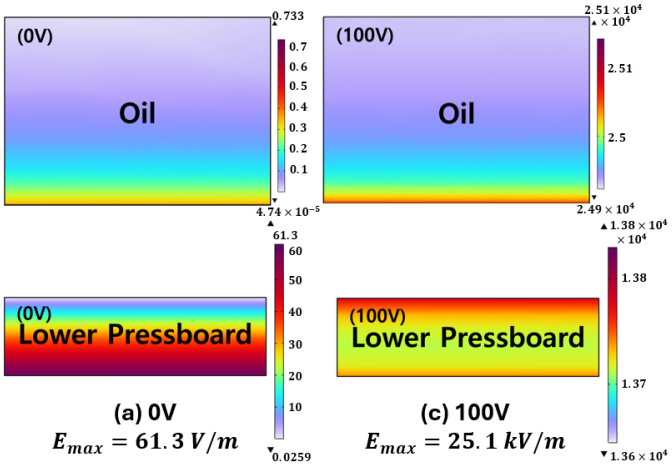
Keywords: OF케이블 선로, Stop Joint, X-ray, Surface Roughness, Maintenance Strategy

DC 전기장에 따른 절연유-프레스보드 계면의 전기이중층 거동 분석

Analysis of Electrical Double Layer Behavior at the Insulating Oil-Pressboard Interface under a DC Electric Field

이은수, 정세원, 김준범, 이예진, 김민희†
계명대학교 공과대학 전기공학과
minnie90@kmu.ac.kr

HVDC 컨버터 변압기에서는 절연유의 강제 유동과 DC 전계로 인해 절연유-프레스보드 계면에 전하가 축적되어 전계 분포와 부분방전 위험에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 외부 DC 전압 크기에 따른 계면 전하 축적, 국부 전계 및 전류 특성 변화를 규명하고자 하였다.



[그림 1] 0 V와 100 V 조건의 절연유 및 하단 프레스보드 전계 분포 (t=500 s)

500 s에서 절연유 영역의 최대 전계는 0 V의 61.3 V/m에서 100 V의 25.1 kV/m로 약 409배 증가하였으며, 하단 프레스보드에서도 61.3 V/m에서 13.8 kV/m로 증가하였다. 이는 외부 DC 전압이 증가할수록 절연유-프레스보드 계면 부근의 국부 전기적 스트레스가 크게 증가함을 보여준다. Streaming Current는 DC 전압 증가에 따라 감소하고 100 V에서 전류 방향이 반전되었으며, 이는 전계 증가에 따른 이온의 전기이동 특성 변화와 확산 및 대류 성분의 상호작용에 의한 것으로 해석된다. 따라서 외부 DC 전계가 계면의 전하 축적과 국부 전계 및 전류 특성에 직접적인 영향을 미치며, 절연계의 전기적 거동을 평가할 때 이를 종합적으로 고려해야 함을 확인하였다.

주제어: 유동대전, 절연유, 프레스보드, 전기이중층, DC 전계

Keywords: Streaming Electrification, Insulating Oil, Pressboard, Electric Double Layer, DC Electric Field

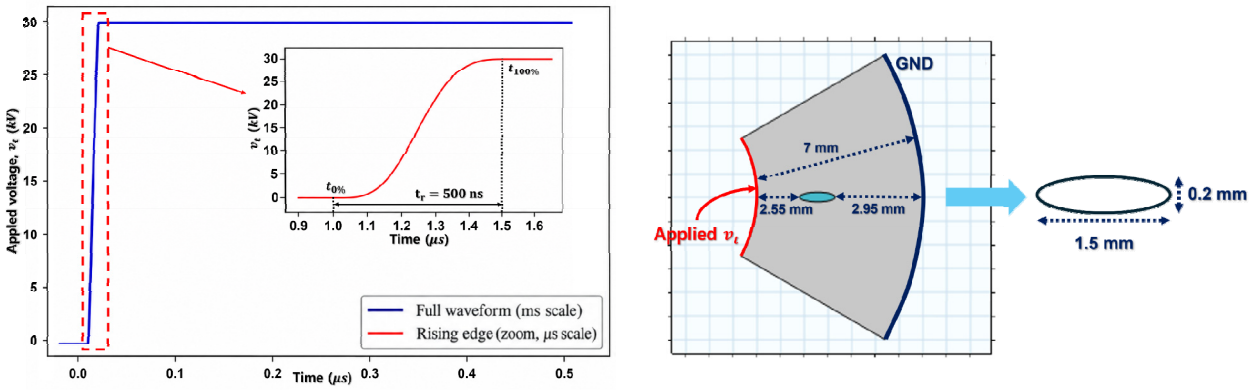
[감사의 글]
본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 대구광역시의 재원으로 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(과제관리번호: 2026-RISE-03-002)

전압 파형에 따른 도선 절연체 보이드의 부분방전 및 전기적 거동 분석

Analysis of Partial Discharge and Electrical Behavior of Conductor Insulation Voids Based On Voltage Waveform

김준범[1], 이은수[1], 이예진[1], 정세원[1], 김민희[1*]
[1]계명대학교 전기공학과
(*교신저자: minnie90@kmu.ac.kr)

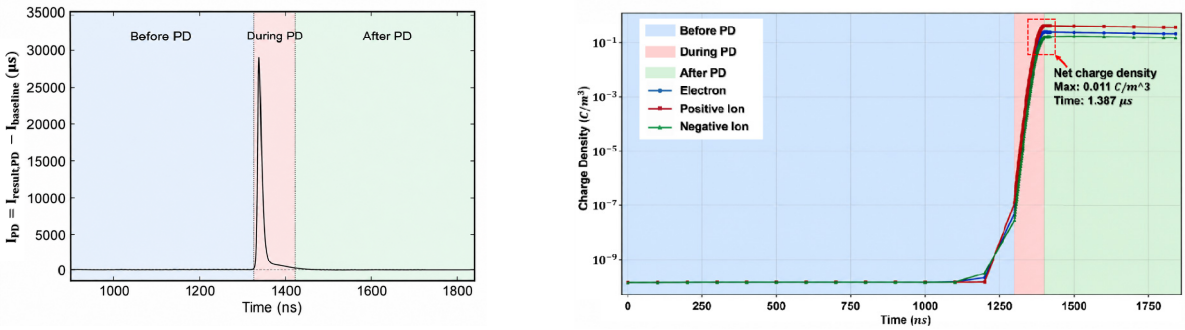
HVDC 시스템 확대와 재생에너지 공급의 불규칙성으로 절연체가 다양한 전압 변화에 노출되는 빈도가 증가함에 따라 절연 신뢰성 확보가 중요해지고 있다. 본 연구에서는 계단 파형 인가 시 보이드 내 지배 전하종에 의한 부분 방전(Partial Discharge, PD) 메커니즘을 규명하고자 하였다.



(a) (b)

Fig. 1. (a) 인가 전압 파형, (b) 절연체와 보이드 모델 형상

COMSOL Multiphysics로 2-D 유체모델 해석을 수행하였으며, Fig. 1(a)와 같이 0 kV에서 30 kV까지 상승시간 500 ns를 갖는 계단 전압을 인가하였고 도선의 고유한 임피던스로 인해 발생하는 과감쇠(Over-damping) 효과는 고려하지 않고 임계 감쇠(Critical-damping) 영역에서 해석하였다. Fig. 1(b)와 같이 상대유전율 2.3인 절연체 내 장축 1.5 mm, 단축 0.2 mm의 타원형 공기 보이드를 구성하였다.



(a) (b)

Fig. 2. (a) terminal current에서 추출한 PD, (b) 시간에 따른 전하 종

PD 발생 과정에서 양이온 밀도는 1.24×10^{-7}에서 0.41 C/m³로 약 6.5자릿수 증가하였으며, 순전하밀도는 1.387 μs에서 0.011 C/m³의 최댓값을 나타냈다. 최댓값 직후 30 ns 동안 전자 밀도는 2.3% 감소한 반면 음이온 밀도는 4.1% 증가하여, 소멸 국면에서 음이온이 상대적으로 오래 잔류하는 특성을 확인하였다.

이는 계단전압 인가에 따른 PD 성장 및 소멸 과정의 전하종별 거동을 정량적으로 보여주며, 반복 PWM 인가 조건에서 잔류전하 거동을 분석하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

주제어: 부분 방전, 공간전하, 보이드, 계단 전압

Keywords: Partial Discharge, Space Charge, Void, Step Voltage

[감사의 글]

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 대구광역시의 재원으로 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(과제관리번호: 2026-RISE-03-002)

PMJ 접속함 돌기 결함에 따른 개폐임펄스 영향 분석

Analysis of the Effects of Protrusion Defects on Switching Impulse Characteristics in PMJ Joints

고현상[1], 구동철[1*], 김우종[2], 홍순명[2],
[1]한전 전력연구원, [2]한국전력공사
(*교신저자: dc.koo@kepco.co..kr)

송전급 지중케이블 선로의 고장 중 접속함 고장은 높은 비중을 차지하며, 이 중 상당수가 제작 및 시공 과정에서 발생한 결함에 기인하는 것으로 보고되고 있다. 특히 최근 휴전선로 재투입 과정에서 PMJ(Premolded Joint) 내부 절연파괴와 함께 다수의 전기트리가 관찰되는 사례가 발생함에 따라, 접속함 내부 미세결함과 개폐과전압 간의 상관관계 규명이 요구되고 있다. 본 연구에서는 PMJ 접속함 내부 돌기 결함이 개폐서지 인가 시 절연성능에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 이를 위해 실제 케이블 선로 개방 후 잔류전하에 의해 형성되는 DC 전계분포와 154 kV 케이블 선로에서 발생 가능한 투입서지를 고려하여, PMJ 내부 돌기의 위치 및 크기에 따른 전계해석을 수행하였으며 동일 조건을 모사한 시편을 제작하여 개폐임펄스 실증시험을 실시하였다. 돌기 크기는 일본전기협동연구에서 제시한 이물 유해크기 산정방법을 참고하여 높이 200μm 및 125μm로 설정하였으며, 돌기의 곡률반경, 밑면 반지름 및 높이 변화에 따른 최대전계를 비교하였다. 실증시험 결과 돌기 결함부에서 전기트리가 형성되고 이후 절연파괴로 진전되는 현상이 확인되었다. 전계해석 결과 200μm 돌기의 최대전계는 기준 전기트리 개시전계인 300kV/mm를 초과한 반면, 125μm 돌기는 300kV/mm에 도달하지 않았다. 다만 실제 PMJ의 절연열화 및 운전조건을 고려할 경우 수명환산계수, 온도보정계수 등의 영향을 반영한 전기트리 개시전계의 재산정이 필요하다. 또한 동일한 돌기 높이에서도 곡률반경과 밑면 반지름에 따라 최대전계가 달라지는 것으로 나타나, 단순히 돌기 높이만으로 결함의 위험도를 평가하기에는 한계가 있음을 확인하였다. 따라서 PMJ 내부 돌기 결함에 대한 관리기준은 결함 크기뿐만 아니라 형상에 따른 국부 전계집중 특성을 함께 고려할 필요가 있다. 향후 금속이물, 보이드 및 동종재료 이물에 대한 추가 해석과 실증시험을 수행하여 PMJ에 적합한 종합적인 내부 결함 허용기준 수립에 활용하고자 한다.

주제어: 지중송전, PMJ, 이물, 개폐서지

Keywords: Underground Transmission, Premolded Joint (PMJ), Foreign Material, Switching Surge

[감사의 글]

포스터 발표 1

전력IoT · 센서

(PS1 036~047)

좌장 : 김영현 책임(한전 전력연구원)



시간영역반사측정법(TDR)을 이용한 PCB 기반 전압 센서의 내부 결함 검출 방법

Internal Defect Detection Method for PCB-Based Voltage Sensors Using Time Domain Reflectometry (TDR)

김준수[1*]
[1]HD현대일렉트릭 ICT솔루션연구실
(*교신저자: junsu.kim@hd.com)

전력 시스템의 디지털 전환이 확산됨에 따라 저전력 전압 변환기(LPVT, Low-Power Voltage Transformer)의 중요성이 증가하고 있으며, 용량성 전압 분배기 구조를 이용한 PCB 기반 전압 센서가 활발히 연구되고 있다. PCB 기반 전압 센서는 소형화 및 제조 용이성 측면에서 장점을 가지지만, 내부 절연층의 결함 발생 시 출력 전압의 크기와 위상 특성이 변화할 수 있어 절연 상태 진단이 필수적이다. 본 논문에서는 PCB 기반 전압 센서의 내부 결함 위치를 검출하기 위한 방법으로 시간영역 반사 측정법(TDR, Time Domain Reflectometry)을 적용하고 그 유효성을 검증하였다.

시험용 센서는 중간 절연층으로 FR4를 적용한 양면 PCB를 이용하여 제작하였다. PCB 패턴 전 구간에서 일정한 특성 임피던스를 유지하도록 설계하였으며, 제작된 PCB는 도체, 스페이서 및 엔드 커버와 조립하여 전압 시험 시료를 구성하였다. 제작된 센서의 1차측에 전압을 인가한 결과, 2차 출력 전압은 입력 전압에 비례하여 증가하였으며, 일정한 변환비를 나타냈다. 또한 입력 전압 전 범위에서 우수한 선형성을 유지하여 전압 센서로서의 적용 가능성을 확인하였다.

결함 탐지를 위해 펄스 발생기와 오실로스코프를 이용한 TDR 측정 시스템을 구성하고, 시료의 2차 출력단에 진폭 1 V, 펄스폭 300 ns의 신호를 인가하였다. 공간 분해능은 입력 펄스의 상승·하강 시간에 의해 결정되며, 상승·하강 시간이 각각 5 ns이고 센서의 유효 비유전율이 약 2.93일 경우 약 43.8 cm의 공간 분해능을 갖는 것으로 계산되었다. 또한 패턴 길이가 약 11 m인 센서의 종단 반사파는 약 128 ns에서 나타날 것으로 예측되었다. 패턴 시작점으로부터 5.9 m 지점에 인위적인 단선을 형성한 결과, 반사파의 상승 시점은 약 66 ns에서 측정되었으며, 이는 이론값인 67.3 ns와 거의 일치하였다. 측정 오차가 펄스 상승시간의 절반 이내로 확인됨에 따라 TDR을 이용한 결함 위치 탐지가 유효함을 검증하였다.

본 연구를 통해 PCB 기반 전압 센서에 TDR 기법을 적용하여 내부 절연 결함의 위치를 효과적으로 검출할 수 있음을 확인하였다. 제안된 방법은 향후 LPVT의 제조 공정 품질관리, 불량 검출 및 상태 감시 기반 열화 진단 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 저전력 전압 변환기, 용량성 전압 분압기, 시간영역 반사 측정법

Keywords: Low-power voltage transformer, Capacitive voltage divider, time-domain reflectometry

[감사의 글]

UHF 센서를 이용한 회전기 부분방전 측정시험 연구

A Study on the Partial Discharge Measurement and Testing of Rotating Machines Using UHF Sensors

조철희[1], 민병운[1], 배광돈[1], 이단비[1]
[1]HD현대일렉트릭
(*교신저자: cho.chulhee@hd.com)

고전압 회전기의 안정적인 운영을 위해 고정자 권선의 절연 열화 진단 중요성이 커지고 있으며, 비접촉식 UHF 센서를 이용한 부분방전 감시 기술은 활선 상태에서도 안전하고 편리하게 회전기를 진단할 수 있어 매우 중요하다.

본 연구에서는 회전기 고정자 권선 모의셀을 대상으로 IEC 60270 규격과 UHF 센서를 이용한 부분방전 측정시험을 동시 수행하여, 절연 열화 진단을 위한 UHF 센서의 신뢰성과 유효성을 규명하고자 하였다.

실험은 차폐실 내에 구축된 회전기 고정자 권선 모의셀에 6.6 kV의 정격전압을 가압한 상태에서 진행되었다. 부분방전 측정은 전통적인 IEC 60270 규격의 측정 방식과 주파수 1.5~2.0 GHz 대역을 수신하는 비접촉식 UHF 센서 방식을 동시에 적용하여 수행하였다.

부분방전 측정 결과, 두 가지 측정 방식 모두에서 특정 위상에 집중되는 부분방전 패턴의 유사성이 뚜렷하게 검증되었다. 정량적 분석 결과, IEC 60270 규격을 통한 접촉식 측정에서는 6.51 kV 인가 시 최대 1.61 nC의 부분방전 전하량이 검출되었고, 동일한 조건에서 UHF 센서를 이용한 비접촉식 측정 결과, 최대 -50.8 dBm의 부분방전 신호 세기가 안정적으로 수신되었다.

동시 측정 시험을 통해 2가지 방식의 부분방전 패턴 유사성이 검증됨에 따라, 회전기 고정자 권선 절연 진단에 있어 비접촉식 UHF 센서의 신뢰성과 유효성이 입증되었다. 향후 이러한 부분방전 신호 패턴 분석 결과를 바탕으로 측정 기술을 더욱 고도화하여, 다양한 산업 현장에서 UHF 센서의 활용 범위를 크게 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 회전기, 부분방전 측정, UHF 센서, 고정자 권선

Keywords: Rotating Machine, Partial Discharge Measurement, UHF Sensor, Stator Winding

[감사의 글]

나노입자/박막 하이브리드 구조를 이용한 HfO_2 기반 SAW UV-C 센서 개발

마르조나 라비모바, 누리딘 타바칼로프, 이기근*
아주대학교, 전자공학과*

Development of HfO_2 - Based SAW UV-C Sensor with Nanoparticle/Film Hybrid Structure

Marjona Rabbimova, Nuriddin Tavakkalov, Keekeun Lee*
Dept of Intelligence Semiconductor Engineering, Ajou University
*Corresponding author: keekeun@ajou.ac.kr

Abstract - Corona discharge on high-voltage equipment emits ultraviolet radiation in the solar-blind UV-C band, enabling detection in daylight. This work compares HfO_2 nanoparticle - only (NP-only), atomic-layer-deposited (ALD) HfO_2 film, and nanoparticle/ALD hybrid sensing layers on a surface acoustic wave (SAW) delay line. The porous NP-only layer produced the largest frequency response, while the hybrid structures showed a more stable response over repeated measurements. These results identify NP-only HfO_2 as the sensitivity-oriented structure and the nanoparticle/ALD hybrid as the most balanced option for sensitivity and repeatability.

1. Introduction

Corona discharge from insulators and transmission-line hardware can precede partial discharge and flashover, making early detection important for power-system maintenance. Solar-blind UV-C detection can operate in daylight because this radiation is strongly attenuated in the atmosphere [1]. Surface acoustic wave (SAW) delay lines offer compact transducers whose frequency changes with the electrical conductivity of a sensing film [2], [3]. Recent SAW UV-C studies demonstrated oxide hetero junction sensing and integrated readout electronics [4], while prior work established an ALD HfO_2 film sensor for corona detection [1]. A porous nanoparticle layer and a continuous ALD film present different surface structures, motivating a comparison of NP-only, ALD-only, and two NP/ALD stacking orders. The objective is to distinguish the largest response from the most repeatable practical structure.

2. Experimental Methods and Results

2.1 Sensor Structure and Fabrication

A two-port SAW delay line operating at 222 MHz was fabricated on 128° YX $LiNbO_3$ with Ti/Pt interdigital transducers (IDTs), following the sensor platform in [1]. HfO_2 was placed in the acoustic propagation region. Frequency shifts were read by an oscillator-based sensor/reference interface while a 220nm UV-C LED was switched on and off [1], [4]. Fig. 1(a) shows the differential readout chain; Fig. 1(b) presents the fabricated device, sensing-layer layout, and magnified IDT region.

2.1.1 HfO_2 Nanoparticle and ALD Layers

Commercial HfO_2 powder with a nominal particle size of 51-80 nm was dispersed in ethanol and deionized water by sonication. A 2-4 μL suspension was drop-cast onto the sensing path without spin coating and dried at 50-60 °C. For the film baseline, 20-30 nm HfO_2 was deposited by ALD at 325 °C using TEMAHf/H_2 O. Hybrid devices used an approximately 15 nm ALD layer either beneath the nanoparticles (NP-on-film) or above them (film-on-NP).

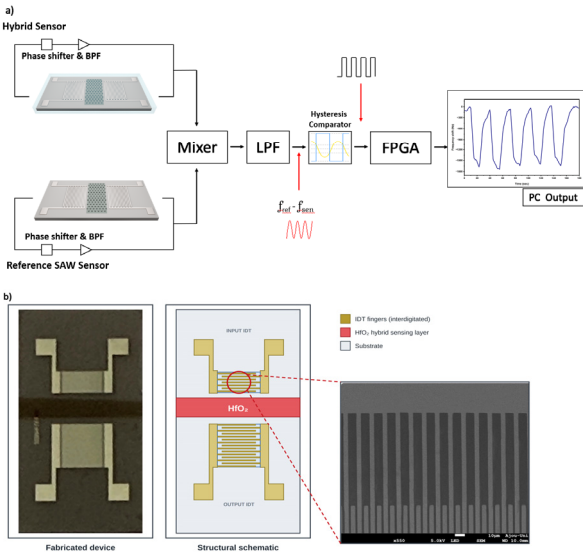


Fig. 1. SAW UV-C sensor structure and readout: (a) sensor/reference oscillator and frequency readout; (b) fabricated device and sensing layer.

2.2 SEM and EDS Characterization

The SEM image in Fig. 2(a) shows a porous network of connected particles with open voids. Measured particle or agglomerate sizes were 85-156 nm, larger than the nominal powder size, consistent with partial agglomeration during drop-casting and drying. The supplied EDS quantification in Fig. 2(b) reports O at 83.30 wt% (98.23 at%) and Hf at 16.70 wt% (1.77 at%). The spectrum and values are reproduced from the provided measurement.

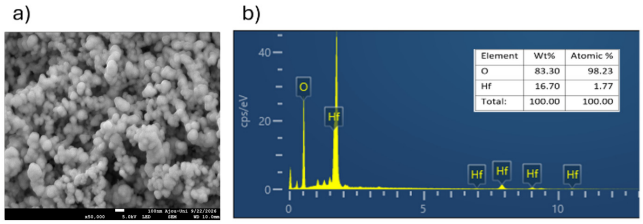


Fig. 2. HfO_2 nanoparticle characterization: (a) SEM image (100 nm); (b) EDS spectrum with Hf and O quantification.

2.2.1 UV-C Sensing Characterizations

Figure 3 presents the UV-C response and cycling behavior of the fabricated sensing structures. Under 220 nm illumination, the NP/ALD hybrid structure exhibited a frequency shift of approximately 5 - 6 kHz, demonstrating a strong UV-C response. The response and recovery times were approximately 10 s and 19 s, respectively. Five repeated UV-C illumination cycles produced clear and repeatable frequency-shift responses. The ALD-only structure showed a response of approximately 1 kHz, providing the baseline response.

The NP/ALD hybrid structure exhibited the largest frequency response among the investigated structures, while maintaining stable cyclic behavior. The enhanced response can be attributed to the combined effects of the high-surface-area nanoparticle layer and the conformal ALD HfO_2 film. Changes in the sensing-layer conductivity couple to SAW velocity and oscillator frequency. These results demonstrate that the NP/ALD hybrid architecture provides both a strong UV-C response and stable repeatability, making it the most suitable structure for the proposed SAW-based UV-C sensor.

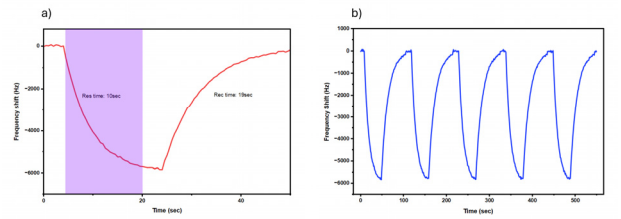


Fig. 3. NP-only UV-C sensing characteristics: (a) frequency response and recovery, including the measured response and recovery times; (b) frequency shift over five repeated UV-C cycles.

The NP-only layer gave the largest response among the compared structures. The two hybrid stacking orders produced shifts of 1.70 ± 0.05 kHz (NP-on-film) and 1.65 ± 0.05 kHz (film-on-NP), with variation within ±3% over five cycles. Changes in sensing-layer conductivity couple to SAW velocity and oscillator frequency [3]. The porous NP network produced the greatest frequency response, while the ALD-containing hybrids retained a substantial response with the most clearly quantified cycle-to-cycle stability. Thus, NP-only HfO_2 is the sensitivity-oriented option, and the nanoparticle/ALD hybrid offers the best balance of response and repeatability.

3. Conclusion

In conclusion, the NP/ALD hybrid HfO_2 structure demonstrated the most favorable sensing performance among the investigated architectures. Under 220 nm illumination, the hybrid structure produced a frequency shift of approximately 5 - 6 kHz while maintaining stable and repeatable responses over repeated cycles. The ALD-only structure showed a lower response of approximately 1 kHz, confirming the enhanced sensing capability of the hybrid architecture. The combination of the nanoparticle layer and conformal ALD HfO_2 film provides an effective sensing interface with enhanced UV-C response and improved measurement stability. Therefore, the NP/ALD hybrid structure was identified as the most suitable architecture for the proposed SAW-based UV-C sensor. Future work will focus on optimizing the ALD thickness and evaluating wavelength dependence, humidity effects, and performance under practical UV-C conditions.

[References]

[1] H. Lee, F. Nawaz, E. Shim, J. Lee, C. Choi, and K. Lee, “Development of HfO_2 -based solar-blind SAW UV-C sensor for corona discharge detection application,” Appl. Sci., vol. 15, no. 1, Art. no. 464, 2025, doi: 10.3390/app15010464.

[2] B. Drafts, “Acoustic wave technology sensors,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 49, no. 4, pp. 795 - 802, Apr. 2001, doi: 10.1109/22.915466

[3] A. J. Ricco, S. J. Martin, and T. E. Zipperian, “Surface acoustic wave gas sensor based on film conductivity changes,” Sens. Actuators, vol. 8, no. 4, pp. 319 - 333, Dec. 1985, doi: 10.1016/0250-6874(85)80031-7

[4] S. Kim, F. Nawaz, H. Lee, S. Jeong, C. Choi, I. Jeon, and K. Lee, “Development of highly sensitive and solar blind surface acoustic wave UV-C photodetector based on the In_2O_3 /Ta_2O_5 nano-heterojunction and its interface electronics,” Sens. Actuators A Phys., vol. 367, Art. no. 115027, 2024, doi: 10.1016/j.sna.2024.115027.

계약문서 사전검토 지원을 위한 문서 분석 시스템

A Document Analysis System for Supporting Pre-Contract Review

김아영, 김영준, 박병석*
한국전력공사 전력연구원
(*교신저자: blue-grid@kepco.co.kr)

전력 IoT·센서 도입사업의 계약 사전 검토에서는 시행품의, 시행계획서, 구매규격서 등 여러 문서에 분산된 계약 조건과 제출 요건을 함께 확인해야 한다. 본 연구는 복수 문서를 계약 단위로 분석하고 검토 결과와 원문 근거를 연계하는 문서 분석 시스템을 제시한다. 시스템은 문서의 텍스트와 페이지 정보를 추출하고 필요한 경우 광학 문자 인식을 수행한다. 이후 규칙과 언어모델을 결합하여 문서 유형과 계약 맥락을 식별하고, 내장 체크리스트를 기준으로 첨부 여부와 명시된 기재 사항을 항목별로 검토한다. 관련 법령·사규는 참고 정보로 연계하며, 항목별 판정 초안과 인용 문구를 생성한다. 생성된 인용 문구의 원문 내 존재 여부를 대조하여 확인 된 경우 해당 대조 단계에서 판정을 유지하고, 대조에 실패한 항목은 '검토 필요'로 조정한다. 검토 결과는 문서명, 페이지 및 인용 근거와 함께 화면과 보고서로 제공하여 담당자가 검토 내용을 원문에서 확인하고 서류를 보완할 수 있도록 지원한다. 실제 운영 중인 웹 서비스에 문서 입력부터 결과 생성까지의 처리 흐름을 구현 및 적용하였으며, 계약 문서의 분류, 항목별 검토, 근거 대조 및 결과 제공을 통합하는 사전 검토 지원 구조를 제시하였다.

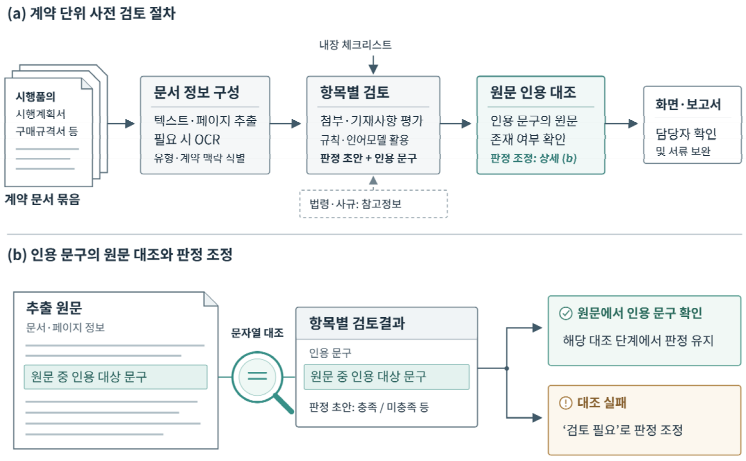


그림 1 계약문서 사전검토 절차 및 원문 인용 대조에 대한 판정

주제어: 전력 IoT·센서, 계약 문서 분석, 사전 검토, 언어모델, 처리시간

Keywords: Contract Document Analysis, Large Language Models, Checklist-based Review, Source Text Matching, Decision Support Systems

[감사의 글]
본 논문은 한국전력공사 전력연구원의 'AI활용 반부패·청렴 및 계약 업무 적정성 안내 챗봇 개발(R25IA06)' 연구과제의 지원을 받아 수행되었음

사이클 분할 응답 특징과 인공지능 기반 전략적 접근을 통한 바나듐 산화물 기반 표면탄성파 가스 센서의 가스 선택성 분석

Towards Gas Selectivity Analysis Using a Strategic Approach Based on Cycle-Segmented Response Features and Artificial Intelligence for Vanadium Oxide-Based Surface Acoustic Wave Gas Sensors

KOEU SOK IM[1], Nawaz Faisal[2], 이기근[2*]
[1]아주대학교 지능형반도체공학과, [2]아주대학교 전자공학과
(*교신저자: keekeun@ajou.ac.kr)

Abstract: A single vanadium oxide (VOx) film on a surface acoustic wave (SAW) device reacts with several gases, so the frequency shift alone cannot identify the gas. This paper presents a strategic approach that gives gas selectivity to one VOx-coated SAW sensor by treating every exposure/purge cycle as an individual sample. Each cycle is segmented and described by amplitude, kinetic and shape features, and ten machine-learning classifiers are compared under stratified cross-validation. For H_2, NH_3 and NO_2, every cycle is classified and the model may answer "unknown" when the cycles conflict.

Keywords: Surface acoustic wave, Vanadium oxide, Gas selectivity, Cycle segmentation, Artificial intelligence

1. Introduction

Monitoring H_2, NH_3 and NO_2 is important for hydrogen infrastructure, industrial safety and air-quality control. SAW sensors are small, sensitive and give a simple frequency output, but metal-oxide films such as VOx interact with both reducing and oxidizing gases, which limits selectivity. This work shows that the temporal pattern of each response cycle, analyzed by AI, can recognize the gas without extra sensing films.

2. Sensor Fabrication and Testing Setup

The sensor is a two-port SAW delay line with a VOx layer deposited in the cavity between the interdigital transducers, where gas adsorption changes the SAW velocity and thus the frequency (Fig. 1a). H_2, NH_3 and NO_2 were supplied by mass-flow controllers in repeated exposure/purge cycles, and the frequency shift was recorded in real time (Fig. 1b).

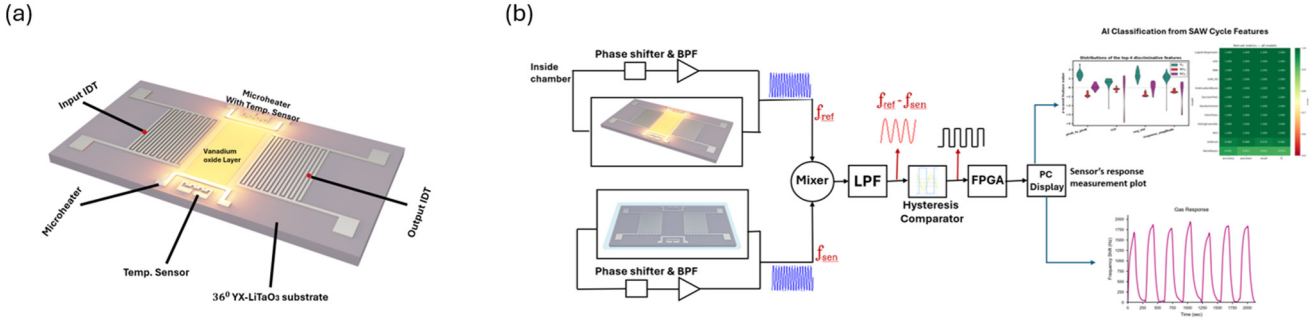


Fig. 1. Schematic and Measurement system and AI output: (a) Schematic of the two-port VOx SAW sensor, (b) discriminant feature space and cycle-wise classification, and sensor response.

3. Cycle-Segmented AI Strategy

Instead of reading the whole sensor record as one signal, every exposure/purge cycle is treated as a separate sample. The record was cut at the valley between successive peaks, giving 30 cycles. Each cycle was then summarized by 47 numbers describing its shape: how large the response is, how fast it rises, how slowly it recovers, and how symmetric the curve is (Fig. 2a, left). A practical difficulty is that the sensor baseline climbs steadily through the measurement, so a late cycle looks larger than an early one even for the same gas. This is removed by describing each cycle relative to its two neighbours: every feature is compared against the average of the cycle before and the cycle after (Fig. 2a, second box). What survives is the part of the response that belongs to the gas rather than to the drift. Every feature was then standardized [1-3]:

$$z_i = (x_i - \mu_i) / \sigma_i \quad (1)$$

Because only 30 cycles are available, no separate test set is set aside; six cycles would be too few to measure

anything. Repeated cross-validation is used instead (Fig. 2a, third box): the cycles are split into groups, the model learns from all but one group and is tested on the one left out, and this rotates until every cycle has been predicted exactly once by a model that never saw it. The whole procedure is repeated 20 times with different groupings and the average is reported. Five classifiers were compared this way and logistic regression scored highest (Fig. 2a, fourth box). Because the three gases do not contribute equal numbers of cycles, models are ranked by the macro-averaged F1 score, which gives each gas the same weight:

$$\text{Macro-F1} = (1/K)\ \Sigma_c\ 2P_cR_c\ /\ (P_c + R_c) \qquad (2)$$

where P_c and R_c are the precision and recall of gas c and $K = 3$. Finally, the model is allowed to answer "unknown". Each exposure period contains the three gases once each, so if the model assigns the same gas twice inside one period it is demonstrably confused; only its most confident answer is kept and the others are marked UNKNOWN (Fig. 2a, right). This never tells the model which gas a cycle is — it only lets the model decline to answer

4. Results and Discussion

The sensor gave repeatable responses with full recovery in every purge (Fig. 2d), so each cycle returns to the same baseline and can be compared with the others. Across all 30 cycles the model identified the gas correctly in 63.3% of cases, against 33% expected from random guessing, with a macro-F1 of 62.5% (Fig. 2b). NO_2 was the most reliable (7 of 10 correct) and H_2 the weakest (4 of 10), most often confused with NH_3. Fig. 2c shows the outcome cycle by cycle in acquisition order, with the true gas above and the predicted gas below; misclassified cycles are ringed in red. The errors are not spread evenly: the early cycles, where the baseline is still rising steeply, account for a disproportionate share. When the abstention rule is applied, 8 of the 30 cycles are marked UNKNOWN and accuracy on the remaining 22 rises to 77% (Fig. 2d). These results show that the shape of a single response cycle already carries gas information from one VOx film, while the spread of the cross-validation score indicates that longer records are needed before a stronger claim can be made.

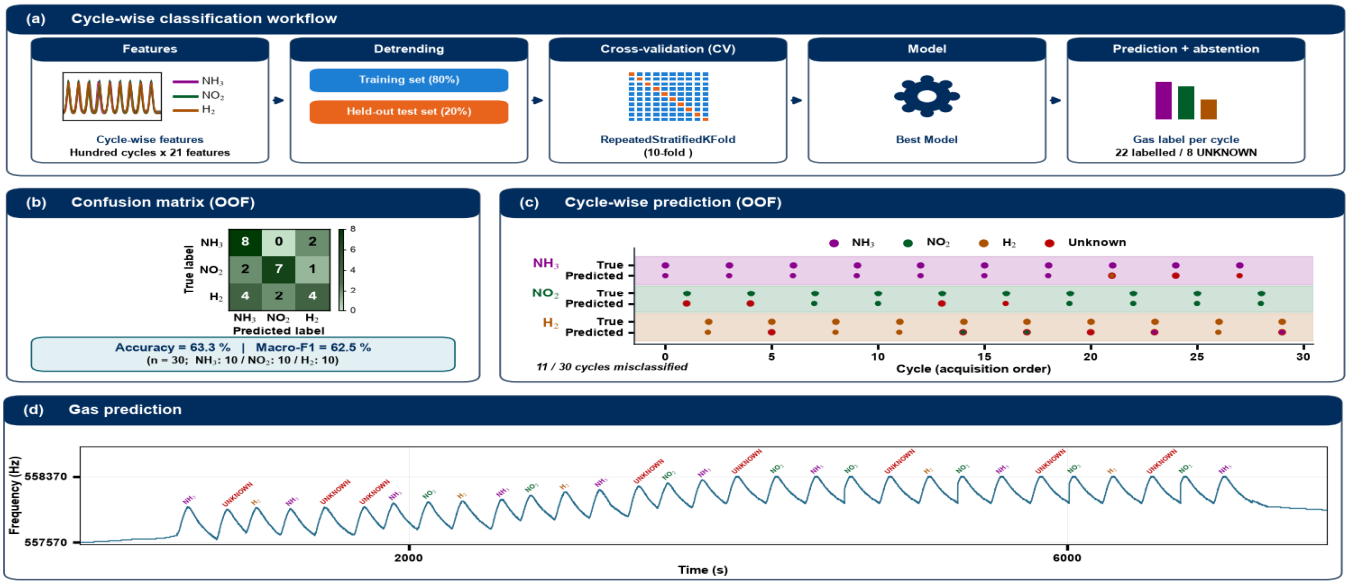


Fig. 2. Cycle-wise classification workflow and prediction results: (a) processing workflow, (b) confusion matrix, (c) cycle-wise prediction, (d) gas prediction on the sensor response.

5. Conclusion

A cycle-segmented AI strategy was proposed for a VOx SAW gas sensor. By using each response cycle as a sample, one sensor identified H_2, NH_3 and NO_2 from the shape of each response cycle alone, with an abstention rule that flags uncertain cycles, offering a simple route to compact electronic-nose systems.

[References]

[1] R. A. Fisher, "The use of multiple measurements in taxonomic problems," *Annals of Eugenics*, vol. 7, no. 2, pp. 179–188, 1936.

[2] R. O. Duda, P. E. Hart, and D. G. Stork, *Pattern Classification*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2001.

[3] S. Marco and A. Gutierrez-Galvez, "Signal and data processing for machine olfaction and chemical sensing: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 11, pp. 3189–3214, 2012.

[4] F. Pedregosa et al., "Scikit-learn: Machine learning in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.

Local Controller를 활용한 우선순위 기반 전기차 충전소 전력제한 분배 알고리즘 기초연구

A Preliminary Study on a Priority-Based Power Limit Allocation Algorithm for Charging Stations via Local Controllers

최지원, 강수경, 최인지, 박병석*
한국전력공사 전력연구원
(*교신저자: blue-grid@kepco.co.kr)

국내 전기차 보급 및 충전인프라 구축의 확대로 향후 전기차 충전수요 관리의 필요성이 증대될 전망이다. 또한 전력계통의 유연성자원으로서 전기차를 활용할 경우, 역송으로 인한 과전압 등을 고려하여 접속용량이나 방전전력에 제한이 발생할 수 있다. 따라서 전기차 충전소의 충전 또는 방전에 대한 전력제한이 생길 수 있는데, 이를 충전소 내 충전기별로 분배하는 제어가 필요하다. 효율적인 제어를 위하여 충전소와 충전소 관리시스템 서버 사이의 국제표준 통신 프로토콜인 OCPP (Open Charge Point Protocol) 2.1에서는 통신을 중개하고 제어명령을 생성할 수 있는 LC (Local Controller)의 개념과 기본 토폴로지를 정의하며, 이를 통해 전력제한을 분배시킬 수 있도록 하였다. 또한 chargingPriority 필드를 통해 트랜잭션별로 우선순위를 부여할 수 있는 기반을 마련하였다. 그러나 구체적인 LC의 제어 알고리즘이나 운영방법은 표준에서 제공하지 않으므로, 본 연구에서는 현재 개발 중인 V2G 인프라를 기준으로 LC를 활용한 우선순위 기반의 전력제한 분배 알고리즘의 기본적인 구조를 제안하였다.

본 연구에서 제안한 알고리즘은 LC가 하위 충전기들의 트랜잭션에 대한 우선순위를 결정하고 이를 바탕으로 전력제한을 분배하도록 한다. 따라서 본 알고리즘의 구조는 우선순위 결정 단계와 전력제한 분배 단계로 나뉘며, 우선순위 결정 단계에서는 현재 SoC (State of Charge), 목표 SoC, 출차예정시각, 충전기 정격전력을 기반으로 [1, 9] 범위의 정수로서 충전 우선순위를 결정한다. 이후 우선순위와 가중치를 활용하여 전력제한을 분배하도록 하며, 단순한 부호변동을 통해 충전뿐만 아니라 방전에 대한 전력제한 또한 처리할 수 있도록 하였다. 이렇게 충전기별로 분배된 전력제한 값은 setpoint로 지령하는 대신 트랜잭션별 충방전 전력제한 필드로 설정하여 기존 충전 스케줄과의 연계를 유지하도록 구성하였다. 향후 이를 기반으로 V2G 유연성자원의 제어에 필요한 알고리즘을 고도화하여 안정적인 계통운영에 기여할 수 있다.

주제어: Local controller, 우선순위, 전력제한, 충전소, OCPP

Keywords: Local controller, priority, power limit, charging station, OCPP

[감사의 글]
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2024-00419642)

V2G 활성화를 위한 AMI 연계 V2G 융합기술 검토와 경제성 평가 프레임워크 제안

Review of Developed AMI-Linked V2G Technology and Proposal of an Economic Evaluation Framework for V2G Adoption

최인지*, 강수경, 최지원· 박병석
한국전력공사 전력연구원
(*교신저자: inji.choi@kepco.co.kr)

본 연구는 V2G충전과 AMI인프라의 융합 아키텍처를 제시한 선행연구의 후속으로 개발한 융합기술을 검토하고 전력회사 관점의 경제성 평가 프레임워크를 제안한다. 기존 계량, 통신 인프라를 활용하는 융합 개념은 중복 구축을 줄일 가능성이 있으나, 실제 구현 내용과 추가 비용, 편익을 확인해야 경제성을 판단할 수 있다. 한국전력공사 공식자료에 의하면 AMI사업은 2024년 2,005만호 보급을 완료하고, 현재는 운영 고도화와 데이터 활용 확대 단계로 전환했다. 이러한 기존 계량, 통신, 보안 인프라는 AMI 연계 V2G 융합기술의 적용 기반이 된다. 에너지신사업 현황 자료에 의하면 전기차 충전사업은 2025년을 기준으로 전국에 공용, 아파트, 전용 충전 인프라 약 1만기를 보유, 운영하고 있으며 2030년까지 13,000기 구축을 목표로 하고 있다.

개발한 융합기술은 충전설비에 AMI의 계량, 통신, 보안 기능을 통합하는 구조이다. 차량과 충전설비 사이에는 ISO 15118-20, 충전설비와 관리시스템 사이에는 OCPP 2.1을 적용 대상으로 검토한다. ISO 15118-20:2022의 양방향 통신규정에 AC DER 서비스를 추가한 개정판은 2026년 7월 발행되었다. OCPP 2.1의 최신 IEC 발행판은 IEC 63584-210:2026이다. 기술별 연계 내용은 표 1과 같다. AMI 기술은 한국전력공사의 최신 보안 통신 기능을 수행하는 AMIGO 계량기를 검토하였다.

표 1. AMI 연계 V2G 융합기술 검토

기술	개발 구성 및 기능	시험 범위
V2G 통신·제어	차량측 ISO 15118-20:2022/Amd 1:2026 서버측 OCPP 2.1 적용	에뮬레이터 단위시험, 상용기기 호환성 검증
AMI 계량·통신·보안	한전 계기 연계, DLMS·Wi-SUN, AMI 서버 연계 및 KCMVP 보안 요구 반영	계기등록·검침·보안통신 및 망 공유 검증
양방향 충방전	EV 에뮬레이터의 OBC·EVCC와 EVSE 연계, 충방전 전력 흐름 모사	실제 차량·계통연계와 보호기능 검증
스마트 충전	상위서버 제어지령에 따른 전력 제한·충방전 제어	상용서버 연동 및 제어효과 측정
기존 V1G 인증	PnC 인증 및 NFC 인증·등록을 포함한 기본 충전 절차	인증서 주입·기동등록·인증·계량·종료 검증

주제어: AMI, V2G, 융합기술, 경제성 평가 프레임워크

Keywords: AMI, V2G, Convergence Technology, Economic Evaluation Framework

다음으로 AMI 인프라를 활용하는 V2G 융합 모델의 경제성 평가 프레임워크를 제안한다. 먼저 기존 설비는 V1G 유지와 AMI 연계·V2G 전환을, 신규 설비는 동일 기능·규모의 독립 구축과 AMI 연계 구축을 비교한다.

한전KDN은 V2G 운영시스템으로 EV-COS의 통신·회원·과금관리, EV-LMS의 배전선로 부하예측·충방전 제어, V2G-OS의 자원제어·정산 기능을 공개하고 있다. 이를 참조하여, 한전의 기존 충전인프라와 AMI 서버 연계, OCPP2.1 기준 개방형 표준 프로토콜을 반영하는 구조를 검토한다. 추가 수익은 한전이 적격 충전부하를 수요관리사업자에 등록하고 국민DR·플러스DR 등에 참여하여 계약상 정산금을 받는 경우로 가정한다. 국민DR은 충전 감축·시간 이동, 플러스DR은 요청시간의 충전 증대로 대응하며, V2G 방전에 대한 DR 참여는 별도 시장규칙 및 제도가 완성 된 후 검토한다.

표 2. AMI 연계 V2G 편익 산정항목 (예시)

항목	산정 방법	참고 자료
초기 구축비 절감	독립 구축 총비용-AMI 연계 구축 총비용	적용 수량 등
통신비 절감	대체 회선대수 월계약단가 × 12	회선계약, 망공유 가능시설
운영비 절감	줄어든 현장출동건수 × 건당 비용 + 실제 감소한 유지관리비	장애, 출동, 유지보수 기록
신사업 창출	기존 V1G대비 신사업 수입 (국민DR, 플러스DR 정산금 + V2G대응 DR제도)	인정실적 정산서 등
V2G 전환비용	전환대수 × 대당 구축비(설비, 설치비) + 공통 시스템, 펌웨어 업그레이드, 보안 , 시험비 등	구축 계획, 전환계획, 연구개발비
추가 운영비	추가, 보완된 망사용비, 운여비 등	추후 확인

이에 따라 최종 연간 순편익 = 통신비절감 + 운영비절감 + 신사업창출 - 전환비용 - 추가운영비이고 초기 구축비 절감 = 적용수량 × 대당구축비 차액 - 공통 추가 구축비 구조로 경제성 평가 프레임워크를 제안한다. V1G도 DR에 참여할 수 있으므로 기존 대비 증가분만 편익으로 인정한다.

본 연구는 개발된 AMI 연계 V2G 기술을 검토하고, 한전의 기존 자산을 활용하는 경제성 평가 프레임워크를 제안하였다. 융합기술의 가치는 통신·운영비 절감과 추가 사업수익뿐 아니라, 한전 계량기가 제공하는 검증된 계량·계측 기반의 신뢰성과 KCMVP 요구에 부합하는 보안성에 있다. 신뢰할 수 있는 계량정보는 충방전 실적 확인과 정산의 기반이 되고, 검증된 암호모듈을 적용한 보안통신은 계량정보와 제어지령의 보호를 뒷받침한다. 이에 따라 V2G 활성화를 위한 경제성, 보안성, 다목적 기능을 갖춘 전력회사의 기술 사업화 모델로 추후 제안하고자 한다.

참고문헌

[1] 박병석 외, “V2G 충전과 AMI 인프라의 융합 아키텍쳐 설계,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2025.
[2] ISO, ISO 15118-20:2022 및 Amd 1:2026
[3] IEC, IEC 63584-210:2026, 2026. 9.; Open Charge Alliance, OCPP 2.1 Edition 2, 2026.
[4] 한국전력공사, AMI 보급완료 실적, KEPCO PLUG 앱, 전기차충전소 운영정보 등
[5] 한전KDN, EV-COS, EV-LMS 및 V2G-OS 솔루션 소개
[6] 전력거래소, 전력시장운영규칙, 2026. 7. 25. 시행본, 제12장·별표26·별표28

초고압 GIS용 광통신 기반 LPIT 신호전송 구조의 설계 및 성능 검증

Design and Performance Verification of an Optical Fiber-Based LPIT Signal Transmission System for UHV GIS

이정복[1*], 박주언[1], 김준수[1]
[1]HD현대일렉트릭
(*교신저자: lee.jeongbok@hd.com)

최근 디지털 변전소 구축 확대와 함께 LPIT(Low Power Instrument Transformer)의 적용이 증가하고 있다. 기존 GIS용 LPIT 시스템은 센서 신호를 컨버터에서 처리한 후 MU(Merging Unit)로 아날로그 전송하는 구조를 사용하고 있어 전자기적 외란 및 시공성 측면의 한계를 가진다. 본 논문에서는 LPIT 컨버터를 센서부(Sensor Converter)와 수신부(Receiver Converter)로 분리하고 광케이블을 이용한 신호 전송 구조를 적용한 광통신 기반 LPIT 시스템을 제안하였다. 또한 입력단에 차동 입력 회로를 적용하고 출력단에 버퍼 증폭기를 적용하여 외란 내성을 향상시켰다.

제안한 LPIT 시스템은 센서부, Optical Fiber Link, 수신부로 구성된다. 센서부에서는 LPCT 및 LPVT 신호를 ADC와 FPGA를 이용하여 디지털화하고, 보정 연산 후 광신호로 변환하여 전송한다. 수신부에서는 광신호를 복원하여 DAC를 통해 아날로그 신호로 변환한 후 MU에 전달한다. 차동 입력 구조를 적용하여 공통모드 노이즈를 저감하였으며 광통신 적용을 통해 GIS와 MU 사이의 장거리 아날로그 전송 구간을 제거함으로써 전기적 절연을 확보하였다.

개발된 시스템은 IEC 60044-7, IEC 60044-8 및 IEC 61869-1 기준에 따라 형식시험을 수행하였다. LPVT 정확도 시험 결과 최대 비오차 0.009%, 최대 위상오차 0.67min을 나타내어 Class 0.2 요구조건을 만족하였으며, LPCT는 최대 비오차 0.007%, 최대 위상오차 0.21min을 나타내어 Class 0.2S 요구조건을 만족하였다. 또한 Temperature Cycle, Lightning Impulse, EMC 및 Vibration 시험을 포함한 주요 형식시험에서 모두 요구조건을 만족하였다.

본 논문에서 제안한 광통신 기반 LPIT 구조는 전기적 절연 확보와 외란 내성 향상에 효과적이며, IEC 기반 형식시험 결과를 통해 초고압 GIS 적용 가능성을 확인하였다. 향후 IEC 61850 Sampled Value 기반 디지털 계측 시스템으로의 확장이 가능할 것으로 기대된다.

주제어 : 저전력 계기용 변성기(LPIT), 가스절연개폐장치(GIS), 광통신, 전자기적 내성, 형식시험

Keywords: LPIT, GIS, Optical Fiber Communication, IEC 61869, EMC

[감사의 글]

온디바이스 AI 기반 예방진단 알고리즘 성능 평가 방법 설계

Design of Perfomance Evaluation Method for On-device AI Based Predictive Disgnostic Algorithms

옥승훈[1], 정호용[1], 정무구[1*]
[1]HD현대일렉트릭
(*교신저자: ok.seunghun@hd.com)

전력기기의 안정적 운영을 위해 전력기기 진단의 필요성은 증가하고 있으며, 진단 시스템은 정확도, 실시간 진단 특성 향상을 위해 AI 기술의 적용이 늘어나고 있다. 이에 최신 온다비이스 AI 기술을 바탕으로 임베디드 엣지 환경에서 기존의 진단 모델을 안정적으로 구동하고 그 성능을 객관적으로 검증할 수 있는 표준화된 성능 평가 방법이 필요하다.

본 연구에서는 전력설비 실시간 감시를 위한 온디바이스 AI 기반 예방진단 알고리즘의 성능 평가 방법을 제안하고자 하였다.

먼저, 성능 평가에 필요한 진단 항목을 선정하였다. AI 기술을 이용하여 진단이 가능한 부분방전 진단, 이상진동 진단, 화재 감시, 작업자 보안 감시 항목을 선정하였고, 성능 평가를 위한 검증 시스템을 설계하였다.

설계된 성능 평가 검증 시스템은 총 4개 진단 항목을 선정하였고, 부분방전은 HFCT, UHF 센서, 이상진동은 진동센서, 화재감시는 열화상 카메라, 작업자 보안 감시는 음성, 영상 센서를 적용하여 설계하였다. 그리고, 온디바이스 AI 칩은 PIM(Processing-In-Memory) 칩을 적용하였다.

본 성능 평가 검증 시스템은 기존 진단 시스템 기반 AI 진단 모델과 온디바이스 AI 기반 진단 모델의 성능 비교 및 시스템 비용 효율성 확인에 사용될 예정이다.

주제어: 온디바이스 AI, 예방진단, , 부분방전

Keywords: On-device AI, Predictive Diagnosis, Partial Discharge

[감사의 글]

배전자동화용 e-WSN 이기종 단말의 상호운용성 구현 및 검증

Implementation and Validation of Interoperability among Heterogeneous e-WSN Terminals for Distribution Automation

신수호, 김영현, 김종주, 박병석, 박명혜
한국전력공사 전력연구원
suho.shin@kepco.co.kr,

배전자동화용 e-WSN은 다양한 제조사의 단말이 함께 운용되는 환경에서 안정적인 데이터 교환이 요구되며, 이기종 장비 간 상호운용성은 설비 구성과 기자재 운용의 유연성을 확보하는 데 중요하다. 그러나 세션 설정과 데이터 통신을 위한 인터페이스 문서가 마련되어 있어도 메시지 버전과 인증 부가 데이터(AAD) 구성에 사용하는 정보가 일치하지 않으면 제조사 간 통신이 제한될 수 있다. 본 연구에서는 e-WSN 이기종 단말의 공통 데이터 처리 기준을 구현에 반영하고, 상호운용성 시험을 통해 해당 기준의 적용에 따른 이기종 통신의 정상 동작 여부를 규명하고자 하였다.

기존 인터페이스 문서를 기반으로 제조사 간 메시지 버전의 적용 기준과 AAD 구성에 사용하는 정보를 일치시키고, 이를 시험 대상 장비에 반영하였다. 검증은 0.5W급 및 3W급 단말을 대상으로 다른 제조사의 단말과 통신하는 구성에서 수행하였으며, FEP 서버를 통한 전체계측 통신을 24시간 동안 확인하였다. 이기종 시험의 합격 기준은 해당 기간의 전체계측 통신성공률 100%로 설정하였다.

시험 결과, 0.5W급은 5개 업체, 3W급은 2개 업체가 상호운용성 시험을 통과하였으며, 이들 모두 이기종 시험의 합격 기준을 충족하였다. 시험에 적용된 이기종 단말 조합에서는 24시간 동안 전체계측 통신성공률 100%를 확인하였다. 이러한 결과는 공통 적용 기준을 반영한 장비가 서로 다른 제조사의 단말과 지속적으로 전체계측 데이터를 교환할 수 있음을 보여준다. 또한 두 출력 등급에서 이기종 통신의 정상 동작을 확인하여 검증 범위를 확보하였으며, 제시한 성공률은 해당 시험 조건에서의 FEP 기반 전체계측 통신 결과에 한정된다.

본 연구는 기존 인터페이스의 세부 적용 기준을 일치시키고 실제 장비로 검증함으로써 배전자동화용 e-WSN 단말의 상호운용성 확보 가능성을 실증하였다. 연구 결과는 이기종 장비의 현장 적용을 위한 검증 근거와 인터페이스 규격 보완에 활용될 수 있으며, 제조사 선택과 설비 유지보수의 유연성 확보에 기여할 것으로 기대된다.

주제어: 배전자동화, e-WSN, 이기종 단말, 상호운용성, 통신 검증

Keywords: Distribution Automation, e-WSN, Heterogeneous Terminals, Interoperability, Communication Validation

[감사의 글]
본 연구는 2026년도 한국전력공사의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

전력설비 감시 및 제어를 위한 고출력 GW 기반 e-WSN 현장 실증

Field Demonstration of a High-Power Gateway-Based e-WSN for Power Facility Monitoring and Control

김종주*, 김영현, 박병석, 신수호

한국전력공사 전력연구원

(*교신저자: 김종주, jongju_kim@kepco.co.kr)

배전자동화(DAS) 및 재생에너지 감시·제어 개소 중 관로 부재나 공가 불가로 자가 광선로를 구축할 수 없는 지역은 무선망에 의존해야 한다. 그러나 기존 e-WSN 게이트웨이(GW)는 송신출력이 낮아 커버리지 반경이 1~2km에 그쳐 전파 미약 개소가 발생하고, 기존 기지국형은 건물 옥상에만 시설할 수 있어 설치 장소에 제약이 있다. 본 연구에서는 전주에 부착하는 고출력 e-WSN GW로 이러한 전파 미약 개소를 해소할 수 있는지 규명하고자 하였다.

송신출력 15W, 이론 전송거리 10km의 전주부착형 고출력 GW를 한전 부산울산본부 관내 울산 여천공단과 김해 진례시례지구 2개소에 시설하고, 기존 GW로부터 2km 이상 떨어져 전파가 미약했던 DAS 19개소를 수용 대상으로 하였다. 울산 여천공단 6개 지점에서는 개소별 여건에 따라 단말 모뎀 출력(0.5W, 3W)과 안테나 이득(1.5dBi, 5.5dBi)의 조합을 달리하여 상·하향 RSSI와 SNR을 측정하였으며, 3개 지점은 0.5W와 3W를 모두, 나머지 3개 지점은 3W만 측정하였다.

고출력 GW의 하향 링크는 모든 측정 지점과 조건에서 SNR 15.9~25.7dB(평균 19.7dB)로 안정적이었다. 반면 상향 링크는 단말 출력에 좌우되어, 0.5W 모뎀의 상향 SNR은 평균 4.0dB(0.5~7.0dB)에 그쳤다. 두 출력을 모두 측정한 3개 지점에서 동일 안테나 기준으로 단말 출력을 3W로 높이자 상향 RSSI는 평균 9.3dB(이론값 7.8dB), 상향 SNR은 평균 6.3dB 개선되었으며, 부두19 지점에서는 상향 SNR이 7.0dB에서 16.0dB로 증가하였다. 안테나 이득 변경(1.5→5.5dBi)에 따른 상향 RSSI 변화는 지점별로 −8.5~+11.1dB로 편차가 컸다.

전주부착형 고출력 GW는 옥상 기지국 없이도 전파 미약 개소의 하향 링크를 확보하며, 3W 단말 모뎀과 함께 적용하면 상향 링크까지 안정적으로 감시·제어할 수 있음을 현장에서 확인하였다. 이는 자가 광선로 구축이 어려운 지역의 배전자동화 및 재생에너지 감시·제어망 구축에 활용될 수 있을 것이다.

주제어: e-WSN, 고출력 게이트웨이, 전주부착형, 전파 미약 개소, 배전자동화

Keywords: e-WSN, High-power gateway, Pole-mounted, Weak-signal area, Distribution automation

[감사의 글]
이 논문은 한전 전력연구원의 지원으로 수행되었음. (No.R21CA02)

무선망 기반 차량 촬영 이미지 원격전송 및 클라우드 연계 전력설비 이상판별 시스템

Wireless Network-Based Remote Transmission of Vehicle-Captured Images and Cloud-Linked Anomaly Detection System for Power Facilities

최백균[1*], 김영현[1], 박병석[1], 박명혜[1],
[1]한국전력공사 전력연구원 디지털솔루션연구소

배전설비 점검은 점검자의 육안 확인에 의존하는 비중이 높아 많은 인력과 시간이 소요된다. 본 연구에서는 차량 주행 중 취득한 배전설비 이미지를 무선망으로 원격 수집하고, 클라우드 기반 데이터 관리와 AI 영상 분석을 연계하는 이상판별 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 차량 탑재형 영상 취득부, 현장 데이터 수집부, 무선 원격전송부, 클라우드 관리부, AI 이상판별부 및 결과 제공부로 구성되며, 각 단계의 입력과 출력을 이미지 식별정보로 연결하여 데이터의 출처와 처리 상태를 추적하도록 하였다.

차량 탑재 광학 촬영장치는 주행 경로 주변의 전선, 애자, 개폐기 등 공중 배전설비 영상을 취득하고 촬영시각·위치·장치 식별정보를 메타데이터로 결합하며, 연속 영상에서는 객체추적으로 중복 장면을 구분하여 대표 프레임을 선별한다. 차량 내 전송장치는 LTE 또는 5G 무선 접속망으로 이미지와 메타데이터를 서버에 전달하며, 통신 단절 시 현장 장치에 임시 저장 후 재전송하는 구조와 이미지 식별정보 기반의 중복 저장 방지 기능을 적용하였다.

클라우드 플랫폼은 대용량 원본 이미지와 촬영시각·위치·설비 종류·분석 상태 등의 메타데이터를 논리적으로 분리하여 관리하되, 상호 연결 관계를 유지하여 설비별 영상 조회와 촬영 이력 추적을 지원한다. AI 이상판별부는 영상 품질 확인과 정규화, 객체탐지 기반 설비별 관심영역 추출을 수행하고, 필요 시 영역분할로 배경 영향을 줄인 뒤 정상 상태와의 특징 차이를 분석하여 이상 후보와 이상영역을 도출한다. 흔들림·가림 등으로 판별이 어려운 영상은 추가 확인 대상으로 분류한다.

운영 화면은 촬영 이미지, 인식 대상, 이상 후보 및 확인 상태를 함께 제공하여 점검자가 원본과 판별 근거를 대조하도록 하였으며, 설비·촬영·판별 정보를 공통 항목으로 정의한 REST API로 배전 운영업무와 연계하도록 설계하였다. 제안 시스템은 현장 영상의 수집부터 분석 결과의 활용까지 일관된 데이터 처리 체계를 구성함으로써 배전설비 점검업무를 지원할 것으로 기대된다.

주제어: 배전설비 점검, 차량 촬영 영상, 무선 원격전송, 클라우드 데이터 관리, AI 이상판별

Keywords: Distribution Facility Inspection, Vehicle-Mounted Imaging, Wireless Remote Transmission, Cloud Data Management, AI Anomaly Detection

[감사의 글]
이 논문은 한국전력공사 전력연구원 연구과제의 지원으로 수행되었음. (No.R26IA05)

포스터 발표 1

전력설비 자산관리 I

(PS1 048~055)

좌장 : 강형구 교수(국립한국교통대학교)



23kV 건조공기 개폐장치 분해가스 진단을 위한 에폭시 절연물 열화생성물 특성 분석 및 정량평가

Characterization and Quantitative Analysis of Thermal Degradation Products of Epoxy Insulation for Decomposition Gas Diagnosis of 23kV Dry-Air Switchgear

전태현[1], 곽병섭[1], 김아름[1], 임병훈[1], 김예슬[1], 박현주[1*]
[1]한전 전력연구원
(*교신저자: hjpark123@kepco.co.kr)

SF_6 대체를 위해 23kV 건조공기 개폐장치의 적용이 확대되고 있으나, 내부 과열 결함 시 에폭시 고체절연물에서 발생하는 분해가스에 대한 진단기준은 아직 마련되어 있지 않다. 본 연구에서는 에폭시 절연물의 열화생성물을 평가하여 과열 결함 진단을 위한 후보 지표가스를 확인하고, 그 발생량을 정량적으로 규명하고자 하였다.

실제 개폐장치 내부 구성품의 체적비(건조공기 87.7%, 에폭시 10.8%, 금속 도체 1.4%)를 반영한 가속열열화 챔버를 구성하고, 300 ℃에서 최대 70시간 열화시킨 후 포집한 가스를 GC-MS로 분석하였다. 또한 Py-GC/TOF-MS(100~900 ℃)로 에폭시의 열분해 거동을 확인하였으며, 표준물질 검량선을 작성하여 주요 생성물을 정량하였다.

분석 결과 에폭시는 약 260 ℃에서 물리적 분해가 시작되고 300~400 ℃에서 화학적 열분해가 급증하였으며, 아세트산, 아세톤, 아세트알데히드, 메탄올, MMA, 페놀, 프로파날 등의 열분해 생성물이 검출되었다. 건조공기 중 가속열화 시에는 아세톤, 아세트알데히드, 메탄올, MMA, 프로파날의 5종이 생성되었고, 이 중 아세톤과 프로파날은 열화시간에 따라 뚜렷한 증가 경향을 보였다. 메탄올 검량선은 결정계수(R^2) 0.9745의 선형성을 나타내었으며, 이를 적용한 결과 메탄올 농도는 열화 2시간 606 ppm에서 70시간 1,620 ppm으로 약 2.7배 증가한 반면, MMA는 216~316 ppm 범위에서 유지되었다.

이상의 결과는 메탄올, 아세톤, 프로파날이 열화 진전을 반영하는 후보 지표가스가 될 수 있음을 보여준다. 향후 나머지 생성물의 검량선 작성과 저온 장기 열화(200~230 ℃, 최대 28일) 시험을 통한 추가 검증으로 최종 지표가스를 선정하고, 이를 건조공기 개폐장치의 분해가스 열화진단기준 설정에 활용할 예정이다.

주제어: 건조공기 개폐장치, 에폭시 절연물, 열화생성물, 지표가스, 검량선

Keywords: Dry-air switchgear, Epoxy insulation, Thermal degradation products, Indicator gas, Calibration curve

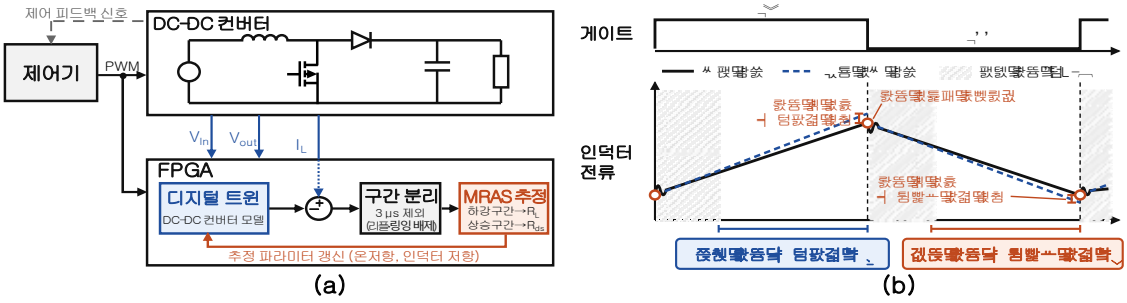
Model Reference Adaptive System을 통한 전력전자 시스템 디지털 트윈에 관한 연구

A Study on Digital Twins of Power Electronics Systems Using Model-Referenced Adaptive Systems

김태훈[1], 박재덕[1], 이승윤[1], 박태식[1*]
[1]국립목포대학교 전기공학과
(*교신저자 : tspark@mokpo.ac.kr)

최근 전력전자 시스템의 자산관리 및 디지털 트윈 구현을 위해 시스템 개발부터 유지 보수까지의 전 주기에서 하나의 모델을 일관되게 활용하려는 요구가 증가하고 있으나, 운전 중 소자 열화로 변하는 파라미터를 모델에 반영하는 방법은 부족한 실정이다. 특히 스위칭 소자는 다이 접합부 열화에 따라 온저항이 증가하므로 이를 감시해야 하지만, 실제 시스템에서 온저항을 직접 측정하려면 고정밀 센서와 추가 계측 회로가 필요하다. 본 논문에서는 일반적인 제어용 센서 신호와 FPGA를 이용해 MOSFET 소자를 포함한 컨버터의 디지털 트윈을 구현하고, 이를 실제 컨버터와 병렬로 연계하여 MRAS를 통해 온저항 파라미터를 실시간 추정함으로써, 운전 중 열화 상태가 반영되는 디지털 트윈의 구현 가능성과 추정 성능을 규명하고자 한다.

제안하는 시스템은 그림 1(a)와 같이 실제 컨버터의 피드백 신호와 게이트 신호를 동일하게 입력받아 실제 컨버터와 병렬로 동작하며, 제어 루프는 실제 컨버터에서만 닫히므로 추정기가 컨버터 운전에 영향을 주지 않는다. 그림 1(b)와 같이 인덕터 전류 리플을 스위치가 켜진 상승 구간과 꺼진 하강 구간으로 나누면, 하강 구간의 전류 기울기에는 인덕터 저항만, 상승 구간에는 인덕터 저항과 온저항이 함께 나타난다. 따라서 하강 구간의 전류 오차로 인덕터 저항을 먼저 추정하고 상승 구간의 전류 오차에서 온저항을 분리한다. 각 구간 시작점에서 트윈의 예측 전류를 측정값에 재동기화하여 오차가 누적되지 않게 하였고, 스위칭 직후 3 μs는 노이즈 및 링잉을 피해 추정에서 제외하였다.



[그림 1] 제안 시스템 구성도(a) 및 구간 분리 추정 방법(b)

파라미터 갱신은 시간척도가 다른 두 루프로 수행한다. Fast loop는 매 구간 끝의 전류 오차를 저항에 대한 전류 감도로 나눈 값의 5 %만큼 저항 추정값을 보정하며, 상승 구간 끝에서 온저항을, 하강 구간 끝에서 인덕터 저항을 갱신한다. Slow loop는 상승 구간의 전류 기울기가 전류에 대해 선형인 점을 이용해 인덕턴스를 누적 추정한다. 인덕턴스와 온저항은 한 구간의 기울기에 같은 방향으로 나타나므로, 거의 변하지 않는 인덕턴스는 느리게, 열화로 변하는 온저항은 빠르게 추적하도록 분리하였다.

검증 모델은 실제 컨버터를 모사하는 기준 모델과 MOSFET 열화 모델로 구성하였다. 기준 모델은 입력 24 V, 출력 48 V, 100 W, 50 kHz의 부스트 컨버터를 MATLAB/Simscape로 구성하였으며, MOSFET은 데이터시트의 온저항-접합온도 특성과 방열판까지의 열 경로를 포함한다. 열화 모델은 NASA MOSFET 가속열화 데이터셋(IRF520N 42개 소자)을 기반으로 두 유형을 주입하였다. 하나는 다이 접합부 손상으로 접합-케이스 열저항이 커지는 열 경로 열화로 데이터셋의 열저항 증가 궤적을 사용하였고, 다른 하나는

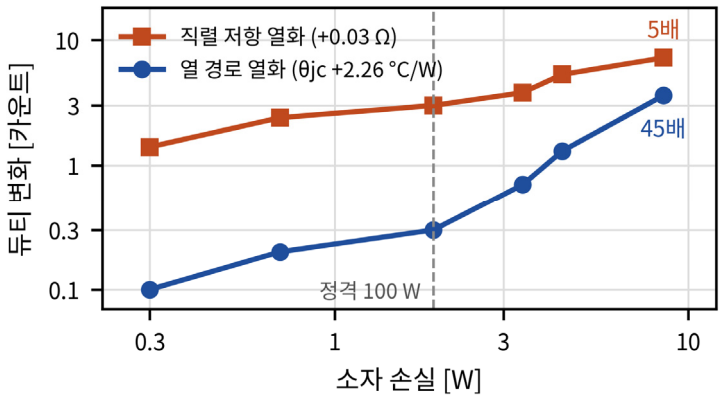
본딩 와이어·접촉부 저항이 커지는 직렬 저항 열화로 온저항에 0.03 Ω을 더하였다. 열화 모델은 데이터셋의 시험 회로를 재현하여 신품 소자 1 % 이내, 고장 직전 소자 2.4 % 이내로 온저항이 일치함을 확인하였다. 외란으로는 인덕터 저항, 다이오드 순방향 전압, 입력 전압 변화를 각각 독립적으로 인가하였다.

표 1과 같이 직렬 저항 열화, 열저항 궤적, 인덕터 저항 변화는 각각 온저항과 인덕터 저항으로 분리 추정되었으며 상호 오귀속은 없었다. 인덕턴스는 200.0 µH로 수렴하였고 전류 잡음 10 mA에서 0.5 %, 30 mA에서 2 % 이내의 오차를 보였다. 인덕턴스를 2 % 틀리게 알아도 온저항 변화량은 +0.031 Ω으로 유지되어, 설치 시 수렴값 대비 변화량으로 열화를 판단하는 자기 기준 방식이 유효하였다. 다이오드 순방향 전압 변화(+50 mV)는 인덕터 저항과 분리되지 않아 두 추정값에 ±12 mΩ의 오프셋으로 나타났으며, 온도 보정 테이블로 처리해야 한다.

표 1. MRAS 분리 추정 결과

시뮬레이션 시나리오	주입한 참 변화	$R_{ds(on)}$ 추정 변화	R_L추정 변화	인덕턴스 추정
직렬 저항 +0.030 Ω	온저항 +0.03Ω	+0.0302 Ω	불변	200.0 µH
열저항 궤적 (데이터셋) +2.26 ˚C/W	온저항 +0.004 Ω	+0.003~0.004 Ω	불변	200.0 µH
인덕터 저항 +3 mΩ	인덕터 저항+3 mΩ	불변	+2.8 mΩ	200.0 µH

열화로 온저항이 커지면 제어기가 듀티를 늘리므로 열화의 효과는 듀티 변화량으로 관측된다. 그림 2와 같이 소자 손실을 0.3 W에서 8.5 W까지 바꾸면 직렬 저항 열화에 의한 듀티 변화량은 5배 커지는 데 비해, 열 경로 열화는 접합 온도 상승을 통해 온저항에 나타나므로 45배 커져 손실에 거의 비례하였다. 따라서 부하 변화에 대한 듀티 변화량의 비례 여부로 두 열화 유형을 구분할 수 있으며, 저손실 운전에서는 열 경로 열화의 효과가 작아 고부하 구간이 판별에 유리하다.



[그림 2] IRF520N 소자 손실에 따른 열화 유형별 듀티 변화량

제어용 센서 신호만으로 실제 컨버터와 병렬로 동작하는 트윈이 MRAS를 통해 온저항 변화를 추적할 수 있음을 보였다. 상승·하강 구간을 나누어 온저항과 인덕터 저항을 분리하였고, 듀티 변화량의 손실 의존성으로 두 열화 유형을 구분하였다. 이 방식은 개발부터 유지 보수까지 하나의 모델을 쓰는 디지털 트윈의 기반이 될 수 있을 것으로 예상되며, 향후 FPGA 구현과 커패시터 ESR, 게이트 열화 추정을 진행할 예정이다.

주제어: 모델 참조 적응 시스템, 디지털 트윈, 필드 프로그래머블 게이트 어레이
Keywords: Model Reference Adaptive System, Digital Twin, FPGA

[감사의 글]
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (NO. RS-2026-25542731)
본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단-이공학학술연구기반구축(R&D)사업(대학중점연구소_글로컬랩)의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 결과입니다. (RS-2025-25398164)

점검 불확도를 고려한 전력용 변압기의 점검주기 선정에 관한 연구

Inspection Interval Selection for Power Transformers Considering Inspection Uncertainty

박재덕[1], 이승윤[1], 임선우[1], 박태식[1*]

[1]국립목포대학교

(*교신저자: points33@naver.com)

전력용 변압기의 점검결과를 통해 건전도 지수를 산정하고, 이를 기반으로 다음 점검주기를 선정할 수 있다. 그러나 측정값이 HI의 배점 기준값에 가까우면 작은 측정오차에도 HI가 달라져 점검주기 결정에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 점검 불확도 중 측정 불확도가 점검주기에 미치는 영향을 분석하였다.

점검항목은 DGA, 유중수분, tan δ, 절연저항, 부분방전(PD)으로 선정하였다. 점검 항목별 측정 불확도는 DGA와 PD는 측정값의 ±10%, 유중수분은 ±3%, tan δ는 측정값의 ±1% 또는 ±0.04%p), 절연저항은 ±5%로 설정하고, 정규분포(σ = a/2) 오차로 취급하였다. 각 항목에서 측정값이 점수 경계를 넘어 점수가 변동할 확률을 구하고, 5개 항목의 하락·유지·상승하는 경우의 수인 총 243개 조합을 합성하여 설비의 HI 분포를 확보한다. 이 분포에서 누적확률이 5% 이하가 되는 최대 HI를 95% 신뢰 하한 HI(95%)로 정의하고, 측정값 HI와 HI(95%)를 PoF 변화율과 형상모수 3.2, 척도모수 71.15년인 Weibull 곡선을 이용해 등가 나이로 환산하였다. 이를 바탕으로 다음 3의 배수 기준년도의 통계 PoF에 도달하기까지의 기간을 점검주기로 산정하였다.

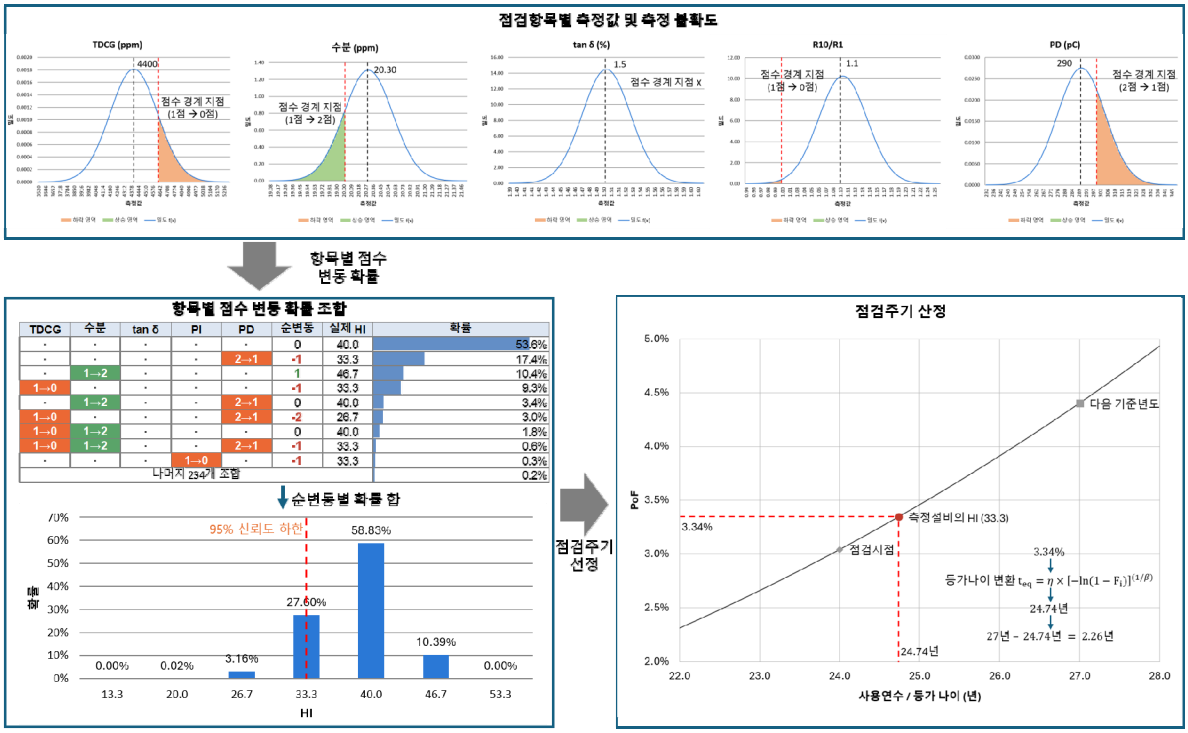


그림 1 측정 불확도를 고려한 점검주기 선정 절차 개념도

사례연구는 표 1과 같으며 사용연수 24년의 설비 A(HI 40)와 설비 B(HI 80)를 대상으로 하였으며, 두 설비 모두 세 항목의 측정값이 불량 측 점수 경계에 근접한 경우이다. 설비 A는 243개 조합 합성 결과 HI가 측정값보다 낮을 확률이 30.8%, HI(95%)는 33.3으로 산정되었고, 등가 나이가 24.45년에서 24.74년으로 늘어 점검주기가 2.55년에서 2.26년으로 11% 단축되었다. 설비 B는 HI가 측정값보다 낮을 확률이 47.4%로 더 커 HI(95%)가 두 단계 아래인 66.7이었으며, 점검주기는 4.46년에서 3.79년으로 15% 단축되었다.

표 1. 시나리오별 HI 분위수 구간과 점검주기 결과

사례	측정값 기준 HI	HI(95%)	등가 나이(년) 기존/제안	점검주기(년) 기존/제안	변동률
A	40	33.3	24.45 / 24.74	2.55 / 2.26	-11%
B	80	66.7	22.54 / 23.21	4.46 / 3.79	-15%

제안한 방법은 기존 HI 기반 점검주기 산정 절차에 측정 불확도를 반영하여, 측정오차로 인해 실제 상태보다 좋게 평가된 설비의 점검이 지연되는 것을 95% 신뢰수준에서 방지함으로써 점검주기를 보수적으로 선정하고 설비 운영의 안전성을 높일 수 있다. 또한 점검주기 단축의 원인이 되는 경계 근접 항목을 설비별로 식별할 수 있으므로, 해당 항목만 선별적으로 재측정하여 불확도를 줄이면 과도한 보수성 없이 안전성과 점검 효율을 함께 확보할 수 있다.

주제어: 전력용 변압기, 점검 불확도, 점검주기, 점검항목
Keywords: Power Transformer, Inspection Uncertainty, Inspection Interval, Inspection Items

[감사의 글]
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (NO. RS-2026-25542731)
본 연구는 한국전력공사의 2025년 착수 사외공모 기초연구 사업에 의해 지원되었음 (과제번호:R25XO03-5)

GFM 인버터 건전도 지수(Health Index)에 관한 연구

A Study on the Health Index for Grid-Forming Inverters

정현수, 오세훈, 오정식, 박태식*
국립목포대학교 전기공학과
(*교신저자: tspark@mokpo.ac.kr)

최근 데이터센터를 중심으로 직류 전력공급 시스템의 도입이 확대되면서, 전력변환을 담당하는 GFM(Grid-Forming) 인버터의 상태평가 필요성이 증가되고 있다. 설비의 초기 상태 대비 열화 정도를 정량화하는 건전도 지수(Health Index)는 주로 변압기를 대상으로 연구되어 구성요소와 열화 특성이 다른 전력설비에 그대로 적용되기 어렵다. 본 논문에서는 GFM 인버터의 건전도 지수 산정 방법을 제안한다. 평가 대상은 부품별 고장점유율(IGBT모듈 34%, 커패시터 30%, 제어보드 26%)과 교체비용을 고려하여 IGBT 모듈(Infineon FF450R12ME4)과 DC-link커패시터(TDK B3277xP)를 주요 구성요소로 선정하였으며, 고장점유율이 높으나 개별 상시 계측이 어려운 제어보드 등 주변 부품은 모듈케이스로 통합하여 평가하였다. 진단항목은 FMEA 결과를 바탕으로 운전 중 상시 측정 가능성, 계측 비용, 선행 연구의 활용 빈도를 고려하여 도출하였으며, 각 진단항목은 제조사 데이터시트의 기준값과 한계값을 바탕으로 항목별 상태점수를 5단계로 구분하였다. 전기적 특성 항목은 초기값 대비 변화량으로 평가하였으며, 온도 항목은 부하 변동의 영향을 배제하기 위해 동일 부하 및 주위온도 조건에서 측정한 값으로 평가하였다. 표 1은 진단항목별 상태점수 산정기준을 나타낸다.

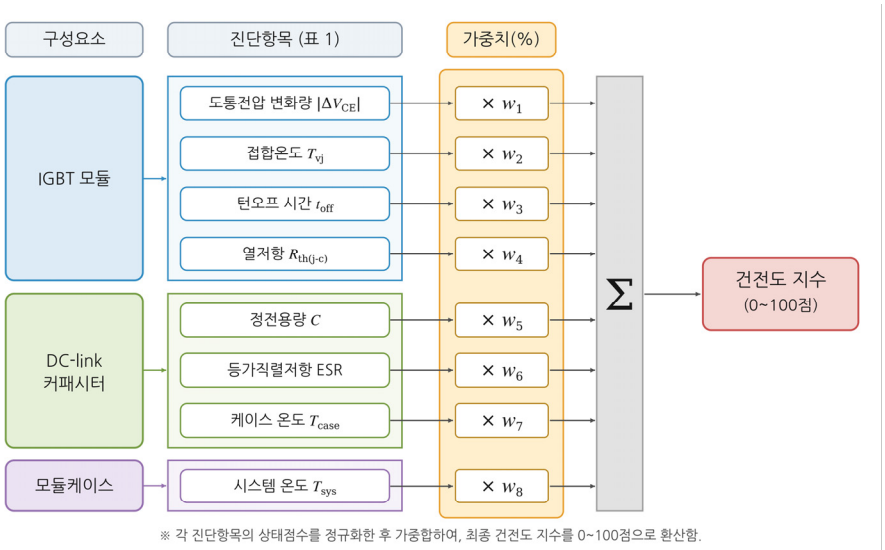
<표1. GFM 인버터 진단항목별 상태점수 산정기준>

구성요소	진단 항목	상태등급 및 점수				
		Very Good (5)	Good (4)	Fair (3)	Poor (2)	Very Poor (1)
IGBT 모듈	$\|\Delta V_{CE}\|$[V]	≤0.088	≤0.175	≤0.263	≤0.350	>0.350
	T_{vj}[°C]	≤131.3	≤137.5	≤143.8	≤150.0	>150.0
	t_{off}[μs]	≤0.613	≤0.655	≤0.698	≤0.740	>0.740
	$R_{th(j-c)}$[K/W]	≤0.0693	≤0.0726	≤0.0759	≤0.0792	>0.0792
커패시터	C[μF]	≥26.66	≥26.33	≥25.99	≥25.65	<25.65
	ESR[mΩ]	≤4.52	≤5.13	≤5.75	≤6.37	>6.37
	T_{case}[°C]	≤95	≤105	≤115	≤125	>125
모듈케이스	T_{sys}[°C]	≤100(Pass)	-	-	-	>100(Fail)

건전도 지수는 그림1과 같이 진단항목을 구성요소별로 묶어 가중치를 부여하는 Norwegian 가중치-합산 방식을 참조하여 산정하였다. 구성요소별 가중치는 문헌의 부품별 고장점유율을 IGBT모듈, DC-link 커패시터, 모듈케이스에 대응시켜 합이 100이 되도록 환산하여 설정하였으며, 구성요소 내 진단항목에는 균등하게 배분하였다. 산정된 건전도 지수는 Kinectrics 변압기 건전도 지수의 등급 구간을 참조하여 85, 70, 50, 30점을 경계로 HI1~HI5 등급으로 구분하였다. 제안한 방법의 적용성을 확인하기 위해 NASA PCoE에서 공개한 IGBT 및 커패시터 가속열화 시험 데이터를 PU 단위로 정규화하여 도통전압, 정전용량, ESR 항목에 적용하였으며, 나머지 항목은 정상 상태로 가정하였다. 커패시터 점수는 정전용량 감소와 ESR 증가로 100점에서 41.7점으로 감소하였다. IGBT모듈은 도통전압이 초기값 대비 22% 감소함에 따라

75.0점이 되었다. 종합 건전도 지수는 100점에서 71.3점으로 단계적으로 감소하였다. 이를 통해 제안한 방법이 구성요소의 열화 정보를 건전도 점수에 정량적으로 반영함을 확인하였다.

<그림1. 가중치-합산 방식의 GFM 인버터 건전도 지수 산정구조>



향후 연구에서는 실제 고장 및 정비 이력을 비교하여 가중치와 등급 경계를 최적화하고, 구성요소별 수명 모델과 운전 부하 조건을 결합하여 고장확률과 잔여 수명을 추정할 계획이다. 나아가 고장에 따른 교체비용을 반영한 위험도 평가 모델로 확장하여, 현장 설비의 정비 및 교체 우선순위 결정에 활용하고자 한다.

주제어: 건전도 지수, GFM 인버터, 자산관리, IGBT, DC-link 커패시터

Keywords: Health Index, Grid-Forming Inverter, Asset Management, IGBT, DC-link Capacitor

[감사의 글]

본 연구는 산업통상부와 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성(R&D, P0031646)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임. 본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 전남광주통합특별시의 재원으로 전라남도앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커) 특성화지방대학(글로컬대학) 30의 결과입니다.(2026-ANCHOR-14-001)

국내 계통 환경을 고려한 분로리액터의 신뢰도 CoF 산정에 관한 연구

A Study on Reliability CoF Estimation of Shunt Reactors Considering Power System

오세훈[1], 김태훈[1], 이지연[1], 박태식[1]*
[1]국립목포대학교 전기공학과
(*교신저자: tspark@mokpo.ac.kr)

분로리액터는 무효전력을 흡수하여 계통 전압을 유지시키는 보상 설비로, 고장이 발생하면 인근 발전기가 출력을 조정하여 전압을 유지해야 하므로 이에 따른 비용이 발생한다. 전력 설비 운영자 입장에서는 계통 안정도 확보와 효율적인 유지·보수 비용 관리를 위해 분로리액터에 대한 자산관리시스템 구축을 고려할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 국내 계통 환경을 고려한 분로리액터의 신뢰도 항목 CoF 산정 연구를 진행하여, 분로리액터 고장에 따른 계통 파급 효과를 정량화하고자 하였다.

분로리액터는 무효전력을 보상하는 설비이므로, 신뢰도 항목의 CoF 산정 시에도 이에 따른 파급 효과를 함께 고려해야 한다. 해외에서는 각국이 자국에서 운영 중인 시장이나 보상 방안을 기반으로 이 비용을 산출하고 있다. NGET는 ORPS 무효전력단가를 기준으로 보상 단가를 책정하여 자사 자산관리시스템에 반영하고 있으며, 미국 CAISO의 경우에는 자체 운영 중인 보상 비용 산식을 기반으로 이를 반영하는 등, 각국 전력망의 무효전력 시장 단가를 기준으로 산출하는 방식을 취하고 있다. 그러나 국내에는 이러한 무효전력 시장이 형성되어 있지 않아 무효전력 단가를 산출하는 데 제약이 있다. 이에 본 연구에서는 CAISO의 보상 방안을 국내 환경에 맞게 적용하여 반영하고자 하였다. 아래 표 1은 NGET와 CAISO에서 각각 운영 중인 보상 비용 산식과 본 연구에서 제안하는 무효전력 보상 비용 산식을 비교하였다.

표 1 무효전력·발전기 제약 비용 산정식 비교

구분	산식
NGET	정전 지속시간 × 연평균 SMP 가격 × (0.42 × 설비에 연결된 발전 설비의 발전량 − 0.62 × 설비에 연결된 송전 수요량)
CAISO	ΔP × (전력판매단가 − max(입찰가, 기준비용))
본 연구 제안식	분로리액터 가용률 × ΔP × SMP × 고장기간

분로리액터의 무효전력 보상 비용 CoF 산식을 검증하기 위해, 분로리액터 용량에 따른 Case Study를 진행하였다. 분로리액터와 연계된 선로의 발전기 출력량이 동일하다고 가정하였을 때, 각 분로리액터의 무효전력 보상 비용은 표 2와 같이 산출되었다.

표 2 제안식 적용 신뢰도 CoF 산정 결과

Case	분로리액터 용량[Mvar]	연계 발전기 용량[MVA]	$\triangle P$ [MW]	SMP [원/kWh]	고장 기간 [h]	신뢰도 CoF [만원]
1	100	1,000	5.01	119.84	180	4,974
2	200	1,000	20.20	119.84	180	20,048

산출 결과, 분로리액터 용량이 커질수록 연계된 발전기가 추가로 출력해야 하는 유효전력량이 증가하고,

이에 따라 무효전력 보상 비용도 함께 상승하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 해외의 무효전력 단가를 그대로 적용하지 않고, 국내 계통 환경에 적합한 무효전력 보상 비용 산출 방안을 제안하였으며, Case Study를 통해 그 적용 가능성을 확인하였다. 향후 분로리액터의 PoF(Probability of Failure)와 결합하면 Risk 기반 자산관리시스템으로 확장할 수 있을 것으로 전망된다.

주제어: 분로리액터, 고장파급영향(CoF), 무효전력 보상, 공급불가 유효전력량, 계통한계가격(SMP), 고장 기간

Keywords: Shunt Reactor, Consequence of Failure (CoF), Reactive Power Compensation, Active Power Capability Loss, System Marginal Price (SMP), Failure Duration

[감사의 글]

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 전남광주통합특별시의 재원으로 전라남도앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과입니다.(2026-ANCHOR-14-001)

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2026-25537902)

산란계수 기반 변압기 디스크 권선 등가회로 정수 추정

Estimation of Equivalent Circuit Parameters of Transformer Disc Windings Using Scattering Parameters

성현모[1], 장승진[1*]
[1]중앙대학교 에너지시스템공학과
(*교신저자: jpromo8@cau.ac.kr)

변압기의 등가회로는 권선의 구조와 재료 특성을 바탕으로 구성되며, 등가회로 정수는 설계정보로부터 산정된다. 그러나 운전 중 권선 변형이나 절연 열화에 의해 등가회로 정수가 변화하므로, 변압기의 상태 평가와 유지관리를 위해 현재 상태가 반영된 등가회로 정수의 추정이 필요하다. 본 연구에서는 권선 양단에서 취득된 산란계수를 이용한 디스크당 등가회로 정수 추정 성능을 규명하고자 하였다.

권선 양단의 산란계수는 전압 및 전류 관계를 나타내는 전달행렬로 변환되며, 동일한 디스크 회로로 구성된 권선의 전체 전달행렬은 개별 디스크 전달행렬의 곱으로 표현된다. 전달행렬의 대각 성분으로부터 등가회로 모델의 전파상수가 추정된다. 이후 전파상수와 전달행렬을 이용한 선형 최소제곱법으로 저항, 인덕턴스, 직렬 정전용량 및 대지 정전용량이 추정된다.

추정 성능의 검증을 위해 Simulink에서 동일한 디스크 88개로 구성된 변압기 등가회로가 모델링되었다. 디스크당 저항은 0.151 Ω, 인덕턴스는 0.324 mH, 직렬 정전용량은 1.04 nF, 대지 정전용량은 22.13 pF로 설정되었다. 양단의 기준 임피던스가 50 Ω으로 설정된 조건에서 1~272.78 kHz의 산란계수가 20 Hz 간격으로 취득되었다. 취득된 산란계수를 이용하여 저항은 0.151 Ω, 인덕턴스는 0.324 mH, 직렬 정전용량은 1.04 nF, 대지 정전용량은 22.13 pF로 추정되었으며, 시뮬레이션 설정값 대비 추정된 값의 상대오차는 모두 1.2×10^{-9} % 이하로 확인되었다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 산란계수 기반 변압기 디스크 권선의 등가회로 정수 추정 정확도가 검증되었다. 향후 제안된 알고리즘의 실제 변압기 적용 가능성이 검증될 예정이며, 이를 기반으로 권선 열화에 따른 등가회로 정수 변화를 모니터링하는 기법이 개발될 예정이다.

주제어: 변압기 권선, 산란계수, 등가회로 정수 추정

Keywords: Transformer winding, Scattering parameters, Equivalent circuit parameter estimation

노후 풍력발전설비 안전등급 평가항목 및 판정체계 구축을 위한 기초연구

A Preliminary Study on Establishing Safety Grade Assessment Items and a Grading System for Aging Wind Turbines

류재현[1], 성현모[1], 장승진[1*]
[1]중앙대학교 에너지시스템공학과
(*교신저자: jpromo8@cau.ac.kr)

최근 5년간 국내에서는 10건의 풍력발전설비 사고가 발생하였으며, 2026년에는 운전 연수 15년 이상의 노후 설비에서 화재와 붕괴 사고가 잇따라 보고되었다. 이에 운전 연수가 20년이 지난 육상 풍력발전설비를 대상으로 안전성 평가제도가 마련되고 있다. 노후 설비의 계속 운전 여부와 보수 우선순위가 합리적으로 판단되려면 일관된 기준에 따른 안전등급 판정 체계가 요구되며, 그 전제로 판정에 사용될 점검 항목이 먼저 정의되어야 한다. 본 연구에서는 노후 풍력발전설비의 안전등급 판정에 필요한 점검 항목을 체계화하고자 하였다.

점검 항목 초안은 풍력발전설비 수명연장 평가 기준인 DNV-ST-0262의 점검 분류를 상위 체계로 하여, IEC TS 61400-28의 상태 평가 항목 및 제작사 정기 점검 매뉴얼의 점검 내용과의 대조를 통해 도출되었다. 도출된 초안에는 풍력발전설비 운영사, 제조사, 진단업체 전문가를 대상으로 실시된 설문의 의견이 반영되었다. 최종 점검 항목은 대분류, 진단 대상, 검사 문항의 3단계 계층으로 정리되었으며, 설비의 기종과 구성에 따라 해당하지 않는 항목은 평가에서 제외되도록 구성되었다.

체계화된 점검 항목은 11개 대분류, 68개 진단 대상, 501개 검사 문항으로 구성되었다. 대분류는 타워, 나셀, 구동계, 로터 블레이드, 피치 시스템, 안전 시스템, 풍향·풍속 센서, 요 시스템, 유압 시스템, 제어·전기설비, 매뉴얼·문서로 구분되었다. 진단 대상은 제어·전기설비에서 14개로 가장 많이 도출되었고 구동계 10개, 안전 시스템 9개 순으로 나타났으며, 검사 문항의 24.0%가 구동계로 가장 큰 비중을 차지하였다. 점검 범위에는 구조·기계·전기설비와 안전 기능뿐 아니라 매뉴얼·문서 관리 상태까지 포함되었다.

본 연구에서 체계화된 점검 항목은 노후 풍력발전설비의 현장 점검에 그대로 적용되어 안전등급 판정의 근거로 활용될 수 있다. 향후 안전등급 판정체계는 풍력발전기 평가와 풍력발전단지 평가의 2단계로 구성될 예정이다. 풍력발전기 평가에서는 필수 안전 기능의 적합성이 우선 판정되어 부적합 설비는 다른 항목의 점수와 관계없이 최하위 등급으로 분류되고, 적합 설비는 해당 항목의 결함 정도와 중요도 가중치가 종합되어 등급이 산정된다. 풍력발전단지 평가에서는 개별 풍력발전기의 판정 결과가 종합되어 단지 등급이 결정되며, 제안된 판정체계는 현장 점검을 통해 검증될 예정이다.

주제어: 노후 풍력발전설비, 안전등급, 점검 항목

Keywords: Aging wind turbines, Safety grade, Inspection items

[감사의 글]
본 연구는 한국전기안전공사의 2026년도 전기안전조사연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

물리정보 신경연산자를 활용한 변압기 절연지 열화 예측

Degradation Prediction of Transformer Insulation Paper Using a Physics-Informed Neural Operator

임재현[1], 김명진[1*]
[1]충북대학교 전기공학부
(*교신저자: mckim@chungbuk.ac.kr)

변압기 절연지의 중합도(DP) 감소 속도는 열점온도에 지수적으로 의존하므로, 장기 온도 이력을 반영하여 잔여수명(RUL)을 산정할 필요가 있다. 본 연구에서는 물리정보 신경연산자(PINO)를 사용하여 DP 및 RUL 추정 정확도와 오차 누적 특성을 규명하고자 하였다. Emsley 노화식의 해석해를 정답으로 삼아 −30~160℃ 범위 내의 온도이력을 갖는 370개의 가상의 변압기를 생성하고 이를 학습하여 출력된 60개의 결과를 같은 조건에서 시험한 조건부 물리정보 인공신경망(PINN)의 결과와 비교하였다.

두 모델에 공통으로 출력된 60개의 변압기 온도이력을 비교한 결과, 수명 종료 조건으로 설정한 DP 250에 도달하는 시점의 오차 중앙값은 PINO가 +86일로 조건부 PINN의 +461일보다 약 81% 작았다. 또한 운전 온도가 낮기 때문에 수명이 극단적으로 길어진 12개 변압기의 50년 온도이력과 100년 온도이력을 각각 입력하여 RUL을 추정한 결과, PINO의 오차 중앙값은 50년 시점 +39일에서 100년 시점 +147일로 증가하였다. 이는 PINO가 장기 계산에서 조건부 PINN보다 장기 계산에 안정적이나 오차 누적은 여전히 발생함을 의미한다.

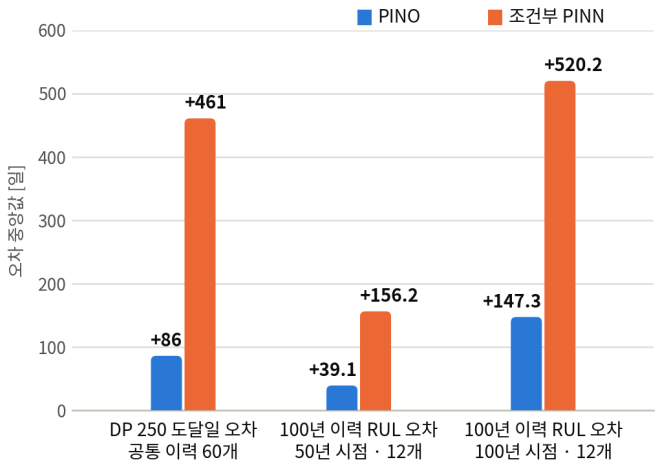


그림 1. 공통 이력 60개에 대한 모델별 시험 결과

주제어: 물리정보 신경연산자, 변압기 절연지, 중합도, 잔여수명, 열점온도

Keywords: Physics-informed neural operator, Transformer insulation paper, Degree of polymerization, Remaining useful life, Hot-spot temperature

[감사의 글]
이 논문은 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의의 지원으로 수행되었음. (2026-RISE-11-014-02) 또한 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의하여 수행된 기초연구사업임. (RS-2026-25602302)

포스터 발표 2

전기재료 II

(PS2 056~066)

좌장 : 석오균 교수(부산대학교)



기생 커패시턴스를 활용한 이중 게이트 박막 트랜지스터 기반 μLED 화소 회로

Double Gate Thin-Film Transistor-Based μLED Pixel Circuit Utilizing Parasitic Capacitance

우혜원[1], 이현준[2], 여준호[3], 김용상[13*]

[1]성균관대학교 디스플레이융합공학과, [2]성균관대학교 첨단디스플레이공학과, [3]성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

(*교신저자: yongsang@skku.edu)

μLED는 빠른 응답 속도, 긴 수명, 낮은 소비 전력 등 다양한 장점으로 인해 많은 주목을 받고 있다. 그러나 기존 화소 회로에서는 펄스 폭 변조 구동을 위한 스윕 신호 인가 시 큰 커패시터를 사용하며, 이로 인해 화소 위치에 따른 RC delay가 발생하여 정확한 계조 표현이 어려울 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 이중 게이트 박막 트랜지스터의 기생 커패시턴스를 활용한 μLED 화소 회로를 제안하였다.

제안한 화소 회로는 이중 게이트 박막 트랜지스터 기반의 인버터를 활용하는 구조로 구성된다. 이중 게이트 박막 트랜지스터의 바텀 게이트에 데이터 전압을 인가하고, 바텀 게이트와 소스 노드 사이의 기생 커패시턴스를 이용하여 데이터 전압을 저장한다. 이를 통해 별도의 커패시터 없이 탑 게이트에 스윕 신호를 직접 인가하여 펄스 폭 변조 구동이 가능하다.

그림 1(a)는 화소 회로에 적용된 이중 게이트 박막 트랜지스터 기반의 인버터를 나타내며, 그림 1(b)는 데이터 전압에 따른 μLED 화소 회로의 애노드 전압 파형을 나타낸다. 데이터 전압을 -8 V에서 2 V까지 인가한 결과, 데이터 전압에 따라 출력 전압의 펄스 폭이 성공적으로 조절되는 것을 확인하였다.

이러한 결과는 제안한 μLED 화소 회로가 별도의 커패시터 없이 펄스 폭 변조 구동이 가능함을 보여주며, 화소 위치에 따라 발생하는 스윕 신호 RC delay로 인한 계조 표현 문제를 완화할 수 있음을 나타낸다.

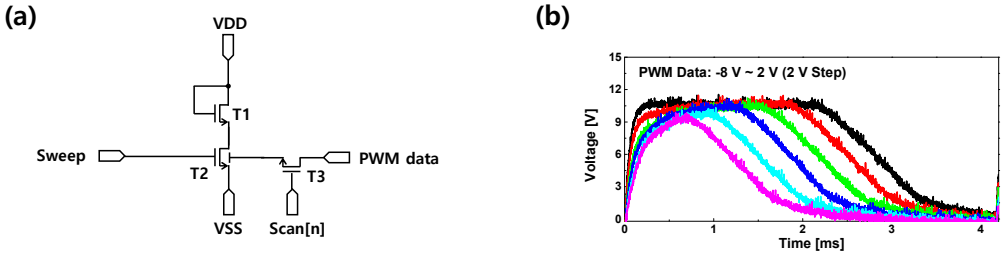


그림 1. (a) 이중 게이트 박막 트랜지스터 기반 인버터, (b) 데이터 전압에 따른 화소 회로 애노드 전압

주제어: μLED, 이중 게이트 박막 트랜지스터, 기생 커패시턴스, 화소 회로

Keywords: μLED, double gate thin-film transistor, parasitic capacitance, pixel circuit

[감사의 글]

본 연구는 IDEC에서 EDA Tool을 지원받아 수행하였습니다.

모듈형 멀티레벨 컨버터 적용을 위한 3.3-10 kV급 SiC MOSFET 스위칭 손실의 정량적 분석

Quantitative Analysis of 3.3-10 kV SiC MOSFETs Switching Loss for Modular Multilevel Converters

김기용[1], 박현용[1], 유선호[2], 강혜민[1*]
[1]한국에너지공과대학교 에너지공학부, [2]한국전력공사 전력연구원
(*교신저자: h.kang@kentech.ac.kr)

고전압 모듈형 멀티레벨 컨버터(MMC) 서브모듈에서 저전압 SiC MOSFET 직렬 구성과 단일 고전압 소자 중 어느 쪽이 유리한지는 손실을 좌우하지만, 3.3 kV 이상 소자의 손실 실측 자료는 부족하다. 본 연구에서는 손실의 전압 등급 의존성을 실측으로 정량화하고자 하였다. 650 V-2.4 kV급 상용 SiC MOSFET 4종에 대해 드레인 전류 15 A, 게이트 저항 3 Ω, 25 ˚C 및 100 ˚C 조건에서 이중 펄스 시험하고, ln E-ln V 선형 회귀로 3.3-10 kV 소자의 손실을 외삽하였다. 턴온 손실은 650 V 67.8 μJ에서 2.4 kV 1,289 μJ로 약 19배 증가하였고, 10 kV 소자는 25.6 mJ로 예측되었다(그림 1). 출력 49.5 kW, 2.5 kHz MMC 서브모듈에서 단일 고전압 소자의 총 손실은 650 V 소자 직렬 구성 대비 3.3 kV급에서 62%, 10 kV급에서 11% 낮았으며(표 1), 손실 역전은 통상의 MMC 주파수보다 높은 영역에서 나타났다(그림 2). 따라서 실제 MMC 동작 조건에서는 단일 고전압 소자가 유리하며, 제안 모델은 미측정 전압 등급의 소자 선정에 활용될 수 있다.

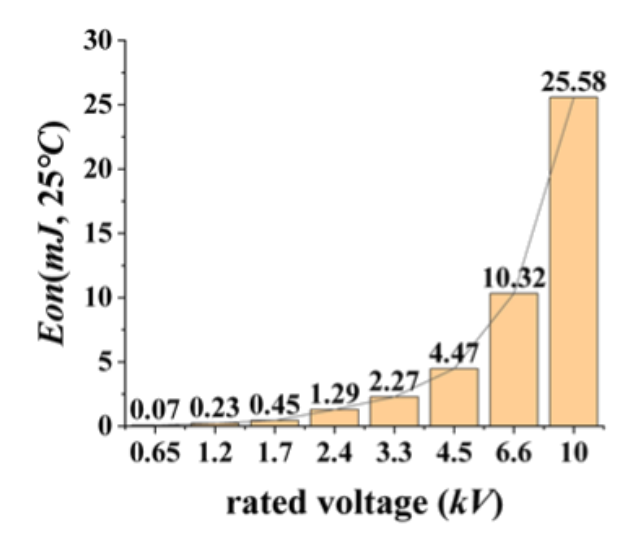


그림 1. 전압 등급별 턴온 손실의 측정값 및 예측값(25 ˚C)

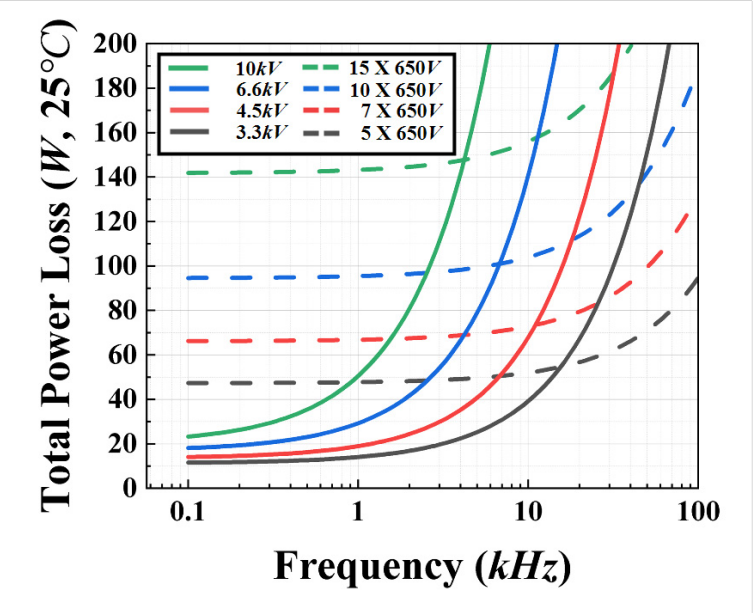


그림 2. 스위칭 주파수에 따른 MMC 서브모듈 총 손실 비교(25 ˚C)

표 1. MMC 서브모듈 구성별 손실 비교(49.5 kW, 2.5 kHz)

출력 전압	구성	스위칭 손실 [W]	도통 손실 [W]	총 손실 [W]	총 손실 감소율
3.3 kV	5 × 650 V	1.2	47.3	48.5	62.1%
	단일 3.3 kV	7.1	11.3	18.4	
4.5 kV	7 × 650 V	1.7	66.2	67.9	63.3%
	단일 4.5 kV	13.6	11.3	24.9	
6.6 kV	10 × 650 V	2.4	94.5	96.9	56.3%
	단일 6.6 kV	31.0	11.3	42.3	
10 kV	15 × 650 V	3.6	141.8	145.4	11.2%
	단일 10 kV	117.8	11.3	129.1	

주제어: SiC MOSFET, 스위칭 손실, 이중 펄스 시험, 곡선 맞춤, 모듈형 멀티레벨 컨버터

Keywords: SiC MOSFET, Switching Loss, Double Pulse Test, Curve Fitting, Modular Multilevel Converter

[감사의 글]

본 연구는 한국전력공사 개방형 R&D 사업의 연구비로 수행된 연구과제의 결과임(No. R23XH01).

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회(NST)의 지원을 받아 수행되었음(항공우주반도체 전략연구사업, No. GTL25051-000).

패키지 형태에 따른 SiC MOSFET 크로스토크의 정량 비교

Quantitative Comparison of Crosstalk in SiC MOSFETs with Different Package Types

박현용[1], 이준혁[1], 강혜민[1*]
[1]한국에너지공과대학교 (KENTECH) 에너지공학부
(*교신저자: h.kang@kentech.ac.kr)

SiC MOSFET half-bridge의 crosstalk는 패키지 기생 성분의 영향을 받지만, 패키지마다 PCB와 배선이 달라 그 영향만 분리하기 어렵다. 본 연구에서는 동일 소자(PCO65N15M1)의 wafer die, D2PAK-7L, TO-247-3L 형태가 crosstalk에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 개발한 probe card로 세 형태를 추가적인 wiring 없이 contact하여, PCB 변경 없이 high side device를 교체하며 V_{DD}= 400 V, I_D= 55 A, V_{GS}= +15/−4 V, R_g= 5,20,50 Ω에서 테스트를 하였다(그림 1). R_g= 5 Ω에서 low side V_{GS}의 negative crosstalk는 wafer die −5.44, D2PAK-7L −3.30, TO-247-3L −2.30 V, positive crosstalk는 +4.88, +2.73, +1.34 V로 TO-247-3L이 wafer die 대비 58 %, 73 % 작았고 순위는 모든 R_g에서 유지되었다. 이는 제안한 측정 방법으로 패키지가 crosstalk에 주는 영향을 정량적으로 비교하였으며, 패키지 선정에 활용될 수 있다.

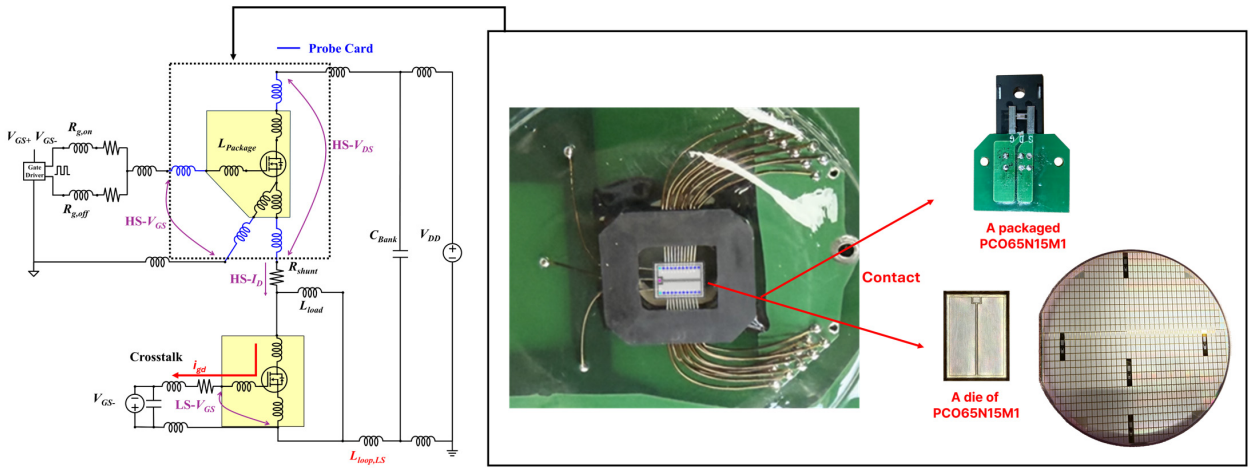


그림1. Probe card 기반 double-pulse test 회로와 wafer die 및 패키지 소자(PCO65N15M1)의 contact 구성

주제어: SiC MOSFET, 크로스토크, 패키지, 프로브 카드, 소스 인덕턴스

Keywords: SiC MOSFET, crosstalk, package, probe card, source inductance

[감사의 글]
이 논문은 한국전력공사 Open R&D 사업(No. R23XH01), 과학기술정보통신부·국가과학기술연구회 항공우주반도체 전략연구사업(No. GTL25051-000) 및 ㈜엠에스테크에스아이의 지원으로 수행되었음.

P-shield 및 CSL 구조 최적화를 통한 6.5 kV 4H-SiC Trench IGBT 설계

Design of a 6.5 kV 4H-SiC Trench IGBT through P-shield and CSL Structure Optimization

문호연, 김준성, 강혜민*
한국에너지공과대학교 에너지공학부
(*교신저자: h.kang@kentech.ac.kr)

4H-SiC trench IGBT에서는 trench corner 전계를 완화하기 위해 P-shield를 적용하지만, 이에 따른 JFET 저항 증가와 epi CSL에 의한 문턱전압 변화로 독립 설계가 어렵다. 본 연구에서는 P-well 하부에 고에너지 이온주입으로 형성한 implanted CSL을 적용하여 채널과 CSL을 분리하고, CSL 깊이와 농도에 따른 전기적 특성을 규명하고자 하였다. TCAD 해석은 300 K에서 N^- drift 농도 8×10^{14} cm^{-3}, 두께 66 μm, gate oxide 50 nm를 고정하고 P-well dose와 CSL 조건을 변화시키며 수행하였다. P-well dose를 8×10^{12}에서 3×10^{13} cm^{-2}로 증가시키면 V_{th}는 5.66에서 13.30 V로 증가한 반면 $V_{CE,sat}$은 8.40에서 9.09 V로 변화하였다. epi CSL 농도를 8×10^{15}에서 5×10^{16} cm^{-3}로 증가시키면 V_{th}가 6.93에서 5.30 V로 감소하였으나, implanted CSL에서는 6.47–6.50 V로 유지되었다. CSL 깊이를 1.3에서 2.3 μm로 확장하면 $V_{CE,sat}$은 9.12에서 6.27 V로 31% 감소하였다. 최종 구조는 V_{th} 6.49 V, $E_{ox,max}$ 3.68 MV/cm, $V_{CE,sat}$ 6.27 V, E_{off} 16.5 mJ을 확보하였다. 이를 통해 implanted CSL이 문턱전압 변동을 억제하면서 도통 특성과 산화막 전계를 동시에 최적화할 수 있음을 확인하였다.

주제어: 4H-SiC, 트렌치 IGBT, P-shield, 이온주입 CSL, 문턱전압

Keywords: 4H-SiC, Trench IGBT, P-shield, Implanted CSL, Threshold voltage

[감사의 글]

This study is the result of a research project conducted with the funds of the Open R&D program of Korea Electric Power Corporation.(No. R23XH01)

This research was supported by the National Research Council of Science & Technology(NST) grant by the Korea government (MSIT) (Aerospace Semiconductor Strategy Research Project No. GTL25051-000).

표 1. 세 split의 전기적 특성 (V_{th} @1 mA/cm², $V_{CE,sat}$ @100 A/cm², $E_{ox,max}$ @6.5 kV, E_{off} @4 kV/49 A). P-well dose split·epi CSL dose split: single-trench, cell pitch 4 μm; implanted CSL dose split: symmetric double-trench, cell pitch 2 μm

Split	조건	V_{th} (V)	$V_{CE,sat}$ (V)	BV (kV)	$E_{ox,max}$ (MV/cm)	E_{off} (mJ)
P-well dose (Cell pitch 4 μm, Epi CSL 8×10^{15})	pWD 8×10^{12}	5.66	8.40	8.43	2.84	20.84
	pWD 1×10^{13}	6.32	8.44	8.40	3.78	19.42
	pWD 3×10^{13}	13.30	9.09	9.10	3.87	10.74
CSL Dose (Cell pitch 4 μm, Epi CSL 2.3 μm)	N-CSL 8×10^{15}	6.93	4.79	8.82	2.91	12.43
	N-CSL 2×10^{16}	6.46	4.55	8.84	3.57	13.88
	N-CSL 5×10^{16}	5.30	4.40	7.93	5.63	37.12
CSL Dose (Cell pitch 2 μm, Implanted CSL 2.3 μm)	N-CSL 2×10^{16}	6.49	6.27	8.32	3.68	16.50
	N-CSL 4×10^{16}	6.50	5.74	8.24	4.73	18.16
	N-CSL 6×10^{16}	6.47	5.49	7.98	5.81	20.08

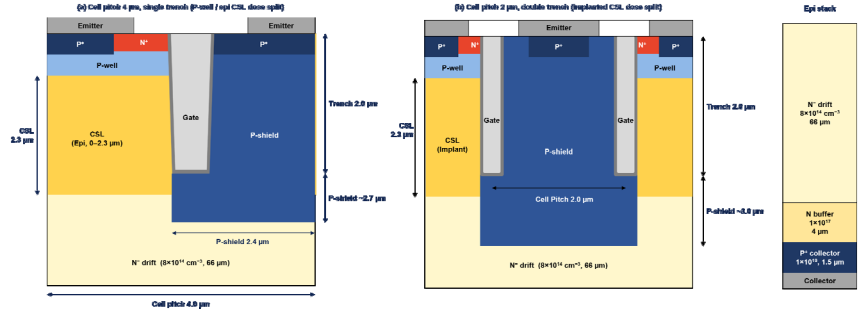


그림 1. 6.5 kV 4H-SiC trench IGBT 단면 개략도: (a) cell pitch 4 μm single-trench, (b) cell pitch 2 μm double-trench

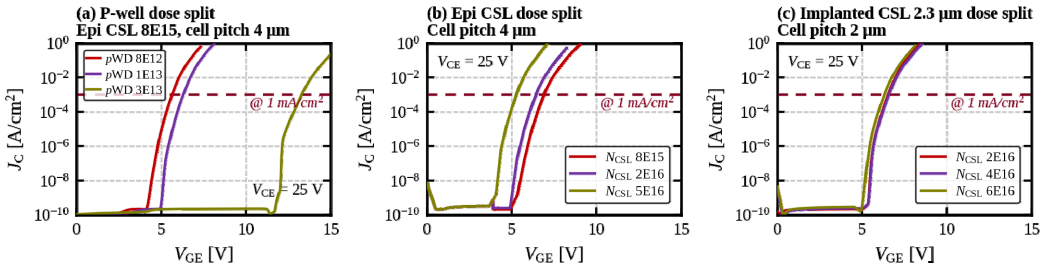


그림 2. Transfer 특성 (V_{CE} = 25 V): (a) P-well dose, (b) epi CSL dose, (c) implanted CSL 2.3 μm dose split

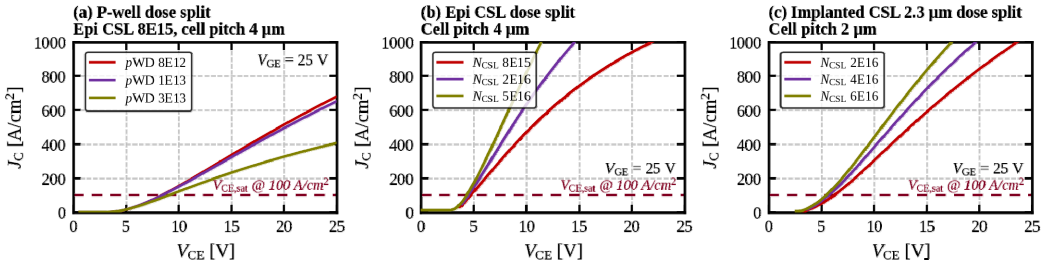


그림 3. Output 특성 (V_{GE} = 25 V): (a) P-well dose, (b) epi CSL dose, (c) implanted CSL 2.3 μm dose split

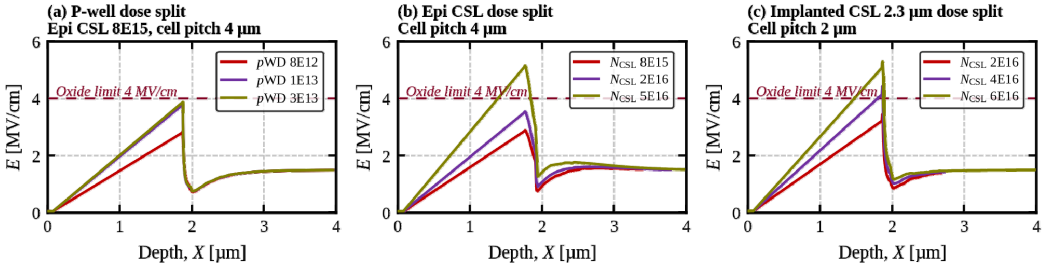


그림 4. 6.5 kV 에서의 Gate Oxide Corner E-field: (a) P-well dose, (b) epi CSL dose, (c) implanted CSL 2.3 μm dose split

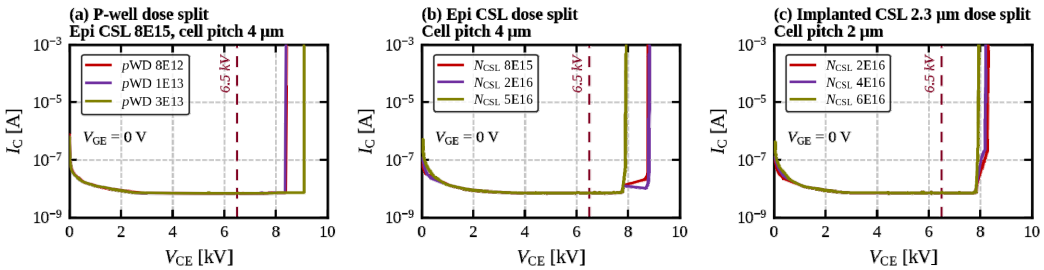


그림 5. Blocking 특성 (V_{GE} = 0 V): (a) P-well dose, (b) epi CSL dose, (c) implanted CSL 2.3 μm dose split

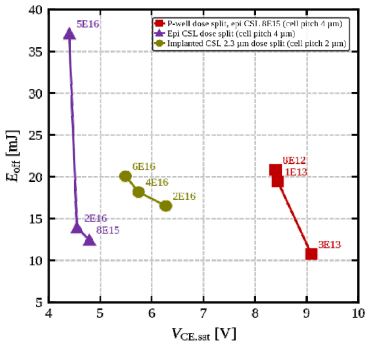


그림 6. 세 split의 $V_{CE,sat}$-E_{off} trade-off

OLEDoS 디스플레이 구현을 위한 누설 방지 구조 및 공정 기반 소자 최적화

Leakage Prevent Structure and Process-Based Device Optimization for OLEDoS Displays

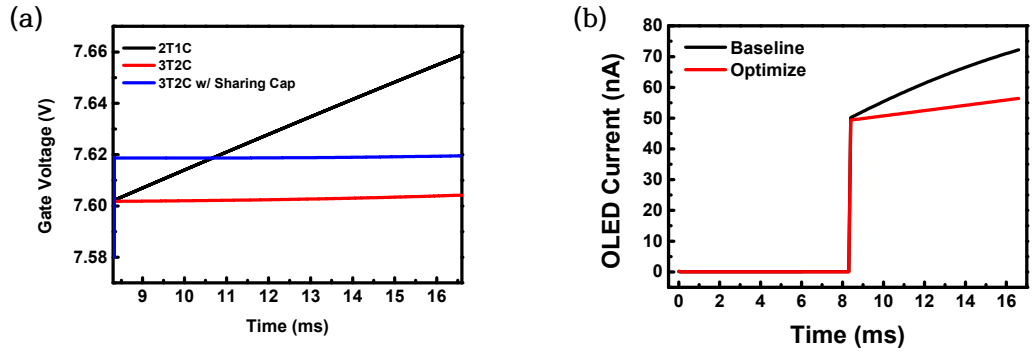
하대철[1], 김용상[1*]
[1]성균관대학교 디스플레이융합공학과
(*교신저자: yongsang@skku.edu)

초고해상도 OLEDoS 디스플레이의 실리콘 백플레인 MOSFET은 큰 누설 전류로 인한 전압 변화와 낮은 SS(Subthreshold Swing) 특성으로 인한 제한된 구동 전압 범위 문제가 있다. 본 연구에서는 회로와 공정의 독립적인 최적화를 통해 누설 전류 한계를 해결하고 안정적인 구동 특성을 규명하고자 하였다.

이를 위해 SPICE 및 TCAD 시뮬레이션 기반으로, 각각의 개선 효과를 분석하였다. 회로 측면에서는 공정 조건의 변경 없이, 인접 화소 간 커패시터를 공유하는 3T2C 화소 회로를 제안한다. 소자 측면에서는 기존 2T1C 구조를 유지한 상태에서, 스위칭(SW) 및 구동(DR) 트랜지스터의 구조와 도핑 농도를 최적화하였다.

시뮬레이션을 통해 검증한 결과, 3T2C 구조 적용 시 발광 구간 전압 변화는 기존 2T1C 대비 최적 조건에서 56.2 mV에서 0.92 mV로, 최악 조건에서 69.6 mV에서 25.5 mV로 개선되었다. 공정 최적화의 경우 2T1C 구조에서 SW 소자의 누설 전류에 의한 전류 변화를 22 nA에서 6 nA로 감소시켰으며, DR 소자의 SS 특성 개선으로 구동 전압 범위를 0.46 V에서 0.89 V로 확대하였다.

본 연구 결과는 누설 전류로 인한 디스플레이 화질 저하 방지 및 표현 휘도 확장에 기여하며, 향후 초고해상도 및 고휘도 AR/VR 기기용 마이크로 디스플레이 개발에 활용될 수 있을 것이다.



[그림 1] (a) 3T2C 구조 적용 시 Gate 전압, (b) 공정 최적화 적용 시 OLED 전류 비교

주제어: OLEDoS, 누설 전류, 구동 전압 범위

Keywords: OLEDoS, Leakage Current, Data Voltage Range.

[감사의 글]
본 연구는 IDEC에서 EDA Tool을 지원받아 수행하였습니다.

채널 둘레-면적비에 따른 a-IGZO 박막 트랜지스터의 문턱전압 이하 스윙 변화 분석

Subthreshold Swing Variation with Channel Perimeter-to-Area Ratio in a-IGZO Thin-Film Transistors

이형노[1], 김용상[1*]
[1]성균관대학교 첨단디스플레이공학과
(*교신저자: yongsang@skku.edu)

비정질 인듐-갈륨-아연 산화물(a-IGZO) 박막 트랜지스터(TFT)의 활성층 형성 단계에서 주로 사용되는 습식 식각은 채널 가장자리 부근에 국소적인 손상 또는 결함 상태를 유발할 수 있다. 활성층 크기가 감소할수록 전체 활성층에서 가장자리 영역이 차지하는 비중은 증가하며, 이에 따라 해당 영역의 결함 상태가 소자의 문턱전압 이하 스윙(SS) 및 문턱 전압(V_{TH})에 미치는 영향이 커질 수 있다. 본 연구에서는 활성층 크기 축소에 따라 나타나는 a-IGZO TFT의 전기적 특성 변화를 채널 둘레-면적비 변화와 연계하여 규명하고자 하였다.

고농도로 도핑된 p형 Si 기판을 게이트 전극으로 사용하고, 200 nm 두께의 SiO_2를 게이트 절연막으로 사용하였다. a-IGZO 활성층은 RF magnetron sputtering을 통해 20 nm 두께로 증착한 후, 350 ℃에서 1시간 동안 열처리하였다. photolithography로 활성층 패턴을 형성한 뒤 1% HCl 용액에서 2분간 습식 식각하여 채널을 정의하였다. 이후 알루미늄을 열 증발 방식으로 증착하여 소스/드레인 전극을 형성하였다. 채널의 너비와 길이는 1000/200, 500/100, 250/50, 200/40 및 100/20 μm/μm로 변화시켰으며, 모든 소자의 W/L 비율은 5로 유지하였다. 전기적 특성은 B1500A를 이용하여 측정하였고, 문턱전압 이하 스윙은 드레인 전류 1 pA에서 100 pA 구간으로부터 추출하였다.

채널 크기가 1000/200 μm/μm에서 100/20 μm/μm로 감소함에 따라 채널 둘레-면적비는 0.012 μm^{-1}에서 0.12 μm^{-1}로 약 10배 증가하였다. 이에 따라 SS는 0.124 V/dec에서 0.511 V/dec로 약 4.1배 증가하였으며, 문턱전압은 0.95 V에서 1.44 V로 0.49 V 양의 방향으로 이동하였다. 채널 둘레-면적비 증가와 함께 나타난 SS 증가 및 문턱전압의 양의 이동은, 습식 식각으로 형성된 채널 가장자리 부근의 식각 유래 결함 상태가 전체 전달특성에 미치는 상대적 기여가 증가했음을 시사한다. 본 결과는 채널 둘레-면적비를 소형 a-IGZO TFT에서 습식 식각 채널 가장자리의 영향을 고려하기 위한 설계 변수로 제시하며, 채널 형상 설계 및 활성층 습식 식각 공정 최적화에 활용될 수 있다.

주제어: a-IGZO 박막 트랜지스터, 문턱전압 이하 스윙, 채널 스케일링, 식각 손상, 채널 둘레-면적비

Keywords: a-IGZO Thin-Film Transistors, Subthreshold Swing, Channel Scaling, Etching Damage, Channel Perimeter-to-Area Ratio

[감사의 글]
이 연구는 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00418086,2026년산업혁신인재성장지원사업)

Epoxy/DGEBA:YDCN 함량별 Composites의 전기적, 기계적 그리고 열적특성 연구

Study on the Electrical, Mechanical, and Thermal Properties of Epoxy/DGEBA:YDCN Composites Based on Content Ratios

김 찬[1], 남재원[1], 장동호[1], 박재준[1†], 김병철[2], 이보인[3], 임필남[4], 김병준[5]
중부대학교 고양캠퍼스 전기전자공학과[1†]
한국폴리텍대학교[2] / Deesys(주)[3] / 이티에스이엔지[4] / 서원엠이씨(주)[5]

YDPN 및 YDCN 계열의 노볼락형 에폭시 수지는 우수한 내열성 및 내약품성을 바탕으로 PCB 및 다양한 전자재료 분야에서 널리 활용되고 있으며, 고분자 네트워크 구조와 조성에 따른 열적, 전기적 및 기계적 특성에 관한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 특히 에폭시 수지의 가교구조와 가교밀도는 유리전이온도(Tg), 절연파괴 특성 및 기계적 강도와 같은 재료의 주요 물성에 영향을 미치는 중요한 요인으로 알려져 있다.

일반적으로 2관능성 에폭시 수지인 DGEBA는 우수한 가공성과 절연특성을 갖는 대표적인 에폭시 소재로 사용되고 있으며, 다관능성 노볼락형 에폭시 수지와의 혼합을 통해 경화 네트워크의 구조 및 가교밀도를 변화시킬 수 있다. 이러한 조성 변화는 에폭시 수지의 열적 안정성뿐만 아니라 절연파괴 특성 및 기계적 특성에도 영향을 미칠 수 있으며, 이에 따라 각 특성 간의 상관관계를 종합적으로 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 2관능성 에폭시 수지인 DGEBA(YD-128)에 o-Cresol Novolac계 에폭시 수지인 YDCN-500-1P를 서로 다른 조성비로 혼합하여 복합 에폭시 시편을 제조하였다. DGEBA:YDCN의 조성비*를 100:0, 90:10, 80:20 및 70:30으로 변화시키고, 이에 따른 유리전이온도(Tg)를 비롯한 열적 특성, HVAC 및 HVDC 절연파괴 특성 등의 전기적 특성, 그리고 인장 및 굴곡강도 등의 기계적 특성을 비교·분석하였다. 이에 따라 DGEBA/YDCN 계열 에폭시 소재의 특성 변화와 조성에 따른 관계를 규명하고자 하였다.

DGEBA:YDCN-500-1P의 조성비*에 따르는 Composites의 특성의 결과는 다음과 같다.

1. 열적 특성(Tg)

Tg의 증가는 고분자 사슬의 분자운동이 제한되어 유리상에서 고무상으로의 전이가 더 높은 온도에서 발생함을 의미하며, 이는 에폭시 네트워크의 열적 안정성이 향상되는 경향과 관련될 수 있다.

1-1) 유리전이온도

Glass Transition Temperature[℃] 에서
조성비*별로 129.36/133.81/134.52/137.12의 수치를 보였다.
90:10에서 상승하고 80:20에서 증가폭이 둔화된 후 70:30에서 다시 증가했다

YDCN의 첨가에 따라 유리전이온도는 129.36℃에서 최대 137.12℃까지 증가하였다. 특히 100:0에서 90:10으로 조성 변화 시 Tg가 4.45℃ 증가하였으며, 90:10에서 80:20 구간에서는 증가폭이 0.71℃로 감소하였다. 이후 70:30에서 다시 137.12℃까지 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 YDCN의 첨가에 따라 에폭시 네트워크 내 분자사슬의 운동성이 제한되고 가교구조가 변화함에 따라 유리전이온도가 상승한 것으로 판단된다.

2. 전기적 특성

전기적 특성 지표의 신뢰성을 위해 와이블(Weibull) 분포를 이용해 재료의 형상 모수(Shape Parameter)와 척도 모수(Scale Parameter)의 값을 얻었다. 그 값은 다음과 같다.

2-1) 전기적 특성 : HVAC절연파괴 강도

ShapeParameter에서 조성비*별로 23.16/43.35/31.03/24.60의 수치를 보였다.
ScaleParameter[kV/mm]에서 조성비*별로 33.81/31.66/32.47/33.92의 수치를 보였다.
90:10 조성에서는 형상모수가 증가하여 절연파괴 강도 데이터의 산포가 상대적으로 감소하는 경향을 나타냈다.
(YDCN의 HVAC 측정 결과는 확보된 시편 수가 충분하지 않아 측정값 간 편차가 크게 나타났다.)

2-2) 전기적 특성 : (+)HVDC절연파괴 강도
ShapeParameter에서 조성비*별로 10.00/9.07/12.38/8.45의 수치를 보였다.
ScaleParameter[kV/mm]에서 조성비*별로 133.51/205.76/208.93/210.19의 수치를 보였다.
HVDC 절연파괴 강도의 Scale parameter는 100:0의 133.51 kV/mm에서 90:10 조성에서 205.76 kV/mm로 크게 증가하였으며, 이후 80:20과 70:30에서는 각각 208.93 kV/mm 및 210.19 kV/mm로 증가폭이 점차 감소하였다. 이는 YDCN의 첨가에 의해 초기 단계에서 절연파괴 특성이 크게 향상된 이후, 일정 함량 이상에서는 그 효과가 점차 포화되는 경향을 나타낸다.

3. 기계적 특성
기계적 특성 지표의 신뢰성을 위해 와이블(Weibull) 분포를 이용해 재료의 형상 모수(Shape Parameter)와 척도 모수(Scale Parameter)의 값을 얻었다. 그 값은 다음과 같다.
3-1) 기계적 특성 : 기계적인장강도
ShapeParameter에서 조성비*별로 40.90/36.94/44.76/18.55의 수치를 보였다.
ScaleParameter[MPa]에서 조성비*별로 71.49/72.38/73.47/79.8의 수치를 보였다.
80:20 영역까지는 수치 변화가 크지 않았으나, 70:30 영역에서 기계적인장강도가 가파르게 상승했다.
여기서, 열적특성(Tg) 또한 129.36 → 133.81 → 134.52 → 137.12℃로 70:30에서 상승한다.
즉, 70:30 조성에서는 Tg와 인장강도가 동시에 증가하는 경향이 관찰되었다. 이는 YDCN 함량 증가에 따른 에폭시 네트워크의 구조적 변화와 분자 간 상호작용 증가가 재료의 열적 특성과 인장 특성에 영향을 미쳤을 가능성을 시사한다.
3-2) 기계적 특성 : 기계적굴곡강도
ShapeParameter에서 조성비*별로 5.09/6.68/13.39/8.77의 수치를 보였다.
ScaleParameter[MPa]에서 조성비*별로 94.18/100.51/109.80/114.11의 수치를 보였다.
굴곡강도의 척도모수는 YDCN 함량 증가에 따라 94.18 MPa에서 114.11 MPa까지 지속적으로 증가하였으며, 이는 인장강도보다 더 일관적인 경향을 보인다.

※DGEBA:YDCN 조성비에 따른 열적, 전기적 및 기계적 특성
(HVAC, HVDC, 인장 및 굴곡강도는 Weibull 분포의 척도모수(Scale Parameter)를 나타냄.)

특성	100:0	90:10	80:20	70:30
Tg (℃)	129.3	133.81	134.52	137.12
HVAC(kV/mm)	33.81	31.66	32.47	33.92
HVDC(kV/mm)	133.51	205.76	208.93	210.19
인장(MPa)	71.49	72.38	73.47	79.80
굴곡(MPa)	94.18	100.51	109.80	114.11

① 열적 특성
→ YDCN 첨가에 따라 Tg가 전반적으로 상승
② 전기적 특성
→ 특히 HVDC 절연파괴 강도가 90:10에서 크게 향상된 후 완만한 증가
③ 기계적 특성
→ 굴곡강도는 전체적으로 지속적인 증가
→ 인장강도는 70:30에서 뚜렷한 증가

결론.

본 연구에서는 2관능성 에폭시 수지인 DGEBA(YD-128)와 o-Cresol Novolac계 에폭시 수지인 YDCN-500-1P를 100:0, 90:10, 80:20 및 70:30의 조성비로 혼합하여 조성 변화에 따른 열적, 전기적 및 기계적 특성을 비교·분석하였다.
열적 특성의 경우, YDCN 함량 증가에 따라 Tg가 129.36 ℃에서 137.12 ℃까지 전반적으로 증가하였다. 특히 100:0에서 90:10으로 조성이 변화할 때 4.45 ℃의 비교적 큰 증가가 나타났으며, 이후 90:10에서 80:20 구간에서는 증가폭이 감소하였다. 이러한 결과는 YDCN 첨가에 따른 에폭시 네트워크 구조 및 분자사슬 운동성의 변화가 Tg에 영향을 미친 것으로 판단된다.
전기적 특성에서는 HVAC 절연파괴 강도의 경우 조성에 따른 뚜렷한 증가 경향은 나타나지 않았으며, 시편 수의 제한으로 인해 일부 조성에서 측정값의 편차가 크게 나타났다. 반면 HVDC 절연파괴 강도의 척도모수는 100:0의 133.51 kV/mm에서 90:10의 205.76 kV/mm로 크게 증가하였으며, 이후 80:20과 70:30에서는 각각 208.93 kV/mm 및 210.19 kV/mm로 증가폭이 감소하였다. 이는 YDCN의 초기 첨가에 의해 HVDC 절연파괴 특성이 크게 변화한 이후, 추가적인 YDCN 함량 증가에 따른 특성 향상 폭이 감소하는 경향을 나타낸다.
기계적 특성에서는 굴곡강도의 척도모수가 94.18 MPa에서 114.11 MPa까지 YDCN 함량 증가에 따라 지속적으로 증가하였다. 인장강도 역시 100:0의 71.49 MPa에서 70:30의 79.80 MPa까지 증가하였으며,

특히 70:30 조성에서 상대적으로 큰 증가가 나타났다. 또한 70:30 조성에서는 Tg와 인장강도가 동시에 증가하는 경향이 관찰되어, YDCN 함량 증가에 따른 에폭시 네트워크의 구조적 변화가 열적 및 기계적 특성에 영향을 미쳤을 가능성을 확인하였다.

종합적으로 DGEBA:YDCN 조성비의 변화는 에폭시 소재의 열적, 전기적 및 기계적 특성에 영향을 미쳤으며, 각 특성은 조성 변화에 따라 서로 다른 증가 및 변화 경향을 나타냈다. 특히 YDCN의 초기 첨가는 Tg와 HVDC 절연파괴 특성의 변화에 비교적 큰 영향을 미쳤으며, YDCN 함량 증가에 따라 굴곡강도는 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 DGEBA/YDCN계 에폭시 소재의 조성 설계 시 열적, 전기적 및 기계적 특성을 종합적으로 고려할 필요가 있음을 보여준다.

주제어 : DGEBA (Bisphenol-A diglycidyl ether), YDCN 노볼락형 에폭시 수지, 가교밀도, 전기트리, 전기절연특성

Keywords: DGEBA (Bisphenol-A diglycidyl ether), YDCN, Crosslink Density, Electrical Treeing, Electrical Insulation Properties

[감사의 글]
(해당사항이 있는 경우만 작성) 이 논문은 00의 지원으로 수행되었음. (No.1234567)

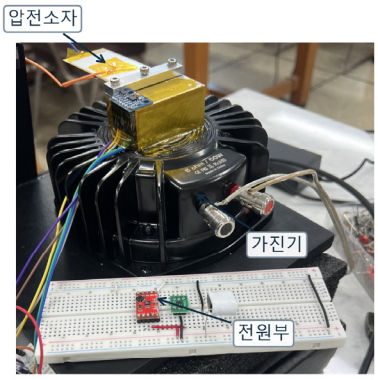
압전 에너지 하베스팅 기반 간헐 부하 구동을 위한 전원관리 회로의 설계 및 구현

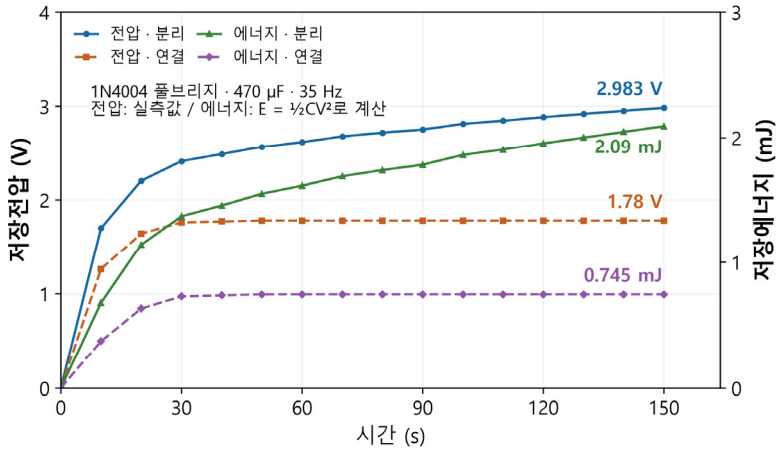
Design and Implementation of a Power Management Circuit for Intermittent Loads Using Piezoelectric Energy Harvesting

김종민, 조항백, 김민기*
공주대학교 전자공학과
(*교신저자: mkk@kongju.ac.kr)

본 논문은 압전 에너지 하베스팅 기반 간헐 부하 구동을 위한 전원관리 회로의 설계 및 구현에 관한 것이다. 압전 에너지 하베스팅 기반 전원관리 회로는 부하를 상시 연결하면 충전 중에도 부하가 전력을 소비하여 저장전압 상승이 제한되는 문제가 있다. 저장전압 상승 제한을 개선하기 위해 충전 중에는 부하를 분리하고, 출력전압이 정상 범위에 도달하면 전원을 공급하며 전압 하강 시 차단하는 전원관리 회로를 제안하였다. 부하 분리 효과를 검증하기 위해 풀브리지 정류기와 470 μF 충전용 커패시터를 사용하여 35 Hz 가진 조건에서 무부하와 47 kΩ 부하 상시 연결 조건의 충전 특성을 비교하였다. 자동 전원제어는 전원관리 IC(LTC3588-1)의 출력전압 상태 신호(PGOOD)와 P채널 로드스위치(TPS22917)를 활용하여 부하 전원을 공급·차단하도록 구성하고 시험하였다. 실험 결과, 150초 후 저장전압은 부하 상시 연결 시 1.78 V, 부하 분리 시 2.983 V로, 상시 연결 방식 대비 약 1.20 V 높았다. 또한 자동제어 회로에서는 47 kΩ 부하에 약 1.64초간 전원을 공급한 후 자동 차단되었다. 이를 통해 충전 중 부하 분리로 더 높은 저장전압을 확보하고, 저장 후 부하에 전원을 공급·차단하는 간헐 구동을 구현하였다.







수집된 에너지는 마이크로컨트롤러의 센서 데이터 수집 및 무선 전송에 활용될 수 있다. 예를 들어, 저장용량을 0.47 F로 확장하고 마이크로컨트롤러(nRF52832)와 가속도 센서(ADXL345)의 소비전류를 5.5 mA로 가정하면, 추가 충전 없이 3.30~3.04 V에서 약 22초의 전원 공급시간이 계산된다. 이러한 에너지 축적 기반의 간헐적 동작 방식은 지속적인 전원 공급이 어려운 환경에서 센서 노드의 자율 동작에 활용될 수 있다. 따라서 본 연구의 결과는 반도체 제조 장비의 상태 모니터링, 고장 진단 및 공정 지능화를 위한 데이터 획득용 에지 컴퓨팅 시스템에 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

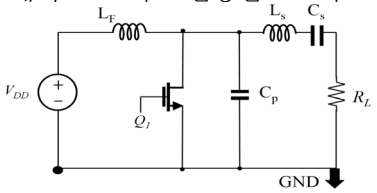
주제어: 압전 에너지 하베스팅, 에너지 저장, 전원관리, 간헐 구동, 로드스위치
Keywords: Piezoelectric energy harvesting, Energy storage, Power management, Intermittent operation, Load switch

고주파 전력 변환을 위한 유한 및 무한 DC-Feed 인덕턴스 Class E 인버터의 비교 분석

Comparative Analysis of Class E Inverters with Finite and Infinite DC-Feed Inductances for High-Frequency Power Conversion

홍석주,안설호,김원호,김민기*
국립공주대학교 전기전자제어공학부 전자공학과
(*교신저자: mkk@kongju.ac.kr)

고주파 전력 변환 시스템에서 Class E 구조의 인버터는 영전압 스위칭 및 영전압 미분 스위칭 조건을 만족함으로써 고전력. 고효율 동작을 구현한다. 그러나 초기에 제시된 무한 대역 RF-Choke(무한 DC-Feed 인덕턴스) 기반 방식은 전압, 전류 파형이 매우 안정적이고 설계가 단순하다는 장점이 있지만 인덕터의 물리적 크기의 한계와 더 넓은 범위의 부하저항과 고주파 범위에서 동작이 어렵다는 문제점을 지니고 있어, 이를 대체하기 위해 제안된 유한 DC-Feed 인덕턴스 구조와의 구체적인 성능 비교·분석 연구가 필수적이다. 본 논문에서는 무한 및 유한 DC-Feed 인덕턴스 조건에 따른 Class E 인버터의 전력 전달 특성 및 효율을 구체적으로 비교·검증함으로써 고주파 (>10MHz) 환경에서 전력 전달 성능을 최적화하고자 하였다.



(a)

<그림 1> Class E 인버터

L_F [μH]	Power [W]	Efficiency (%)
0.1	213.1	98.7
50	203.2	98.6
100	202.3	96.4
150	199.8	87.7

(a)

L_F [μH]	$P_{loss,LF}$[W]	$P_{loss,FET}$[W]
0.1	1.24	2.3
50	5.5	2.66
100	11.9	2.75
150	31.9	2.97

(b)

<그림 2> Inductance에 따른 효율 및 전력

각 소자 파라미터 값들은 모두 제안된 설계표를 참고하여 선정하였다. Class E 인버터는 GaN-FET(GS66508T) 소자를 사용하여 설계하였고 200W, 48V, 13.56MHz의 환경에서 인덕턴스 L_F 에 따른 출력 대비 효율의 정량적인 변화를 <그림 2>의 (a)에 나타내었다. 실험 분석 결과, L_F=0.1μH 대비 약 1,500배 증가한 150μH에서 200W 출력 전력 효율은 98.7%에서 87.7%로 최대 약 11% 감소함을 확인하였다. 본 논문에서는 Class-E 인버터의 L_F 변화에 따른 효율 저하 원인이 전류 리플에 의한 스위치 손실 ($P_{loss.FET}$) 증가보다 인덕터의 등가 직렬 저항(R_{LF}) 지배적 증가에 따른 인덕터 자체의 손실 $P_{loss.LF}$ 에 기인한다는 사실을 <그림 2>의 (b)에 제시하여 규명하였다. L_F 가 커질수록 R_{LF} 상승으로 인해 $P_{loss.LF}$은 1.24W에서 31.9W 까지 급증하는 반면, $P_{loss.FET}$은 상대적으로 미미한 변화를 보였다. 즉, 전체 시스템 손실과 효율 저하는 인덕터 자체의 동손이 결정적인 요인으로 작용하여 무한 인덕터 구조보다 유한 인덕터 구조에서 상대적으로 더 높은 전력 변환 효율을 제공하는 경제적,성능적 장점이 있음을 제시한다.

주제어: Class E, 무한 DC-Feed 인덕턴스, 유한 DC-Feed 인덕턴스, 스위치 손실, 인덕터 손실

Keywords: Class E, Infinite DC-Feed Inductance, Finite DC-Feed Inductance, Switch Loss, Inductor Loss

[감사의 글]
이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO.RS-2026-25598861).

인공지능 기반 진동 센서를 활용한 투명 재료 분류 시스템

Transparent Material Classification Technology Using AI-Based Vibration Sensor

임현빈[1], 김동겸[1], 김원호[1], 김민기[1*]
[1]공주대학교 전기전자제어공학부 전자공학전공
(*교신저자: mkk@kongju.ac.kr)

본 논문은 이미지 센서와 인공지능 기반 진동 센서를 활용한 부품재료의 자동 분류시스템에 관한 것이다. 기존 이미지 기반 분류 기술은 색상과 형태가 뚜렷한 재활용품을 인식하는 데 효과적이나, 투명유리처럼 배경과의 대비가 낮고 시각적 특징이 부족한 재료는 정확히 구분하기 어렵다. 이를 보완하기 위해 부품재료가 분류기에 충돌할 때 발생하는 진동을 피에조 픽업 센서로 측정하고, 푸리에 변환(FFT)를 적용하여 추출한 주파수 특징을 Feedforward Neural Network(FNN) 알고리즘으로 학습하였다. Fig. 1. 구조처럼 실험 환경을 조성한 후, 플라스틱, 알루미늄, 투명유리를 대상으로 이미지, 진동 센서를 이용해서 각 20회씩 총 60회의 인식 실험을 수행하였다. 카메라와의 거리 30cm, 조도 환경 약 413 lux (오차율 ±5%) 기준으로 이미지 센서의 정확도는 각각 75%, 90%, 10%로 나타났다. 반면 마이크 신호의 순간 최대 진폭이 3000을 초과할 때, 진동 신호 기반 소리 센서의 정확도는 플라스틱 85%, 알루미늄 55%, 투명유리 95%였다. 특히 투명유리는 이미지 센서에서 20회 중 2회만 인식되었으나, 소리 센서에서는 19회가 분류되어 인식률이 85% 향상되었다.

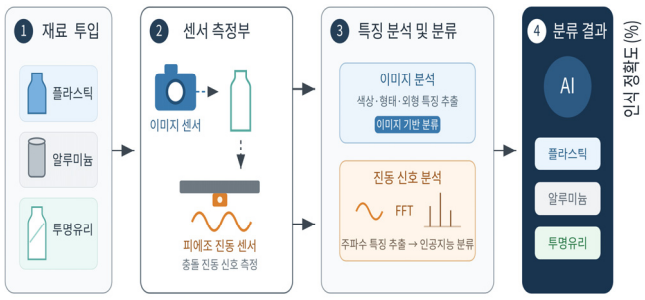


Fig. 1. 제안하는 투명 재료 분류시스템 구조

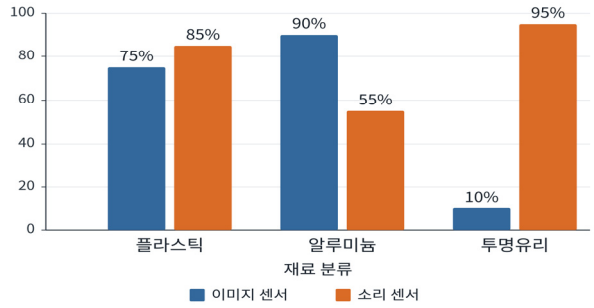


Fig. 2 .센서별 재료 인식 정확도 비교의 시스템 구조 및 성능

진동 신호는 시각적 특징이 부족한 투명 재료를 구분하는데 유용한 정보로 활용될 수 있음을 확인하였다. 이미지의 외형 정보와 진동 신호의 재질 특성을 융합하면 단일 센서의 한계를 보완하고 부품 및 물품의 분류 정확도를 향상시킬수 있으며, 스마트 분리수거함, 반도체 및 재료 분류 등 물체의 재질을 인식·분류하는 피지컬 AI 시스템에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 스마트, 이미지 센서, 소리 센서

Keywords: Smart, Image Sensor, Sound Sensor

고전압 절연재용 iPP/MA-g-PP/SiO_2 복합체의 절연특성 분석

Analysis of Insulation Properties of iPP/MA-g-PP/SiO_2 Composites for High-Voltage Insulation Materials

홍신기[1, 2], 주교원[2], 장은지[2], 조문정[2], Masahiro Kozako[1], 유승건[2*]
[1]큐슈공업대학교 전기전자공학과, [2]한국전기연구원
(*교신저자: violet@keri.re.kr)

친환경 고전압 전력케이블용 절연재료로 폴리프로필렌(PP)이 주목받고 있으며, 첨가제 및 무기 나노필러의 조성에 따른 전기적 특성 변화에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 MA-g-PP 및 나노 실리카(SiO_2) 첨가에 따른 iPP 기반 복합체의 절연파괴 특성과 미세구조 변화를 규명하고자 하였다.

iPP와 Maleic Anhydride-grafted PP(MA-g-PP)를 토크 레오미터를 사용하여 200℃, 60 rpm에서 15분간 용융·혼합하여 MA-g-PP 함량을 1, 10, 30 wt%로 조절하여 시료를 제작하였다. **가장 높은 절연파괴강도를 나타낸 1 wt%와 절연파괴강도가 감소한 10 wt% 사이의 3, 5 wt% 시료에 나노 실리카를 첨가하였다**. 스테인리스 재질의 구-구 전극을 사용하여 실리콘 오일에 함침한 상태에서 시료의 DC 절연파괴강도를 측정하고 SEM을 이용하여 파단면의 미세구조와 SiO_2의 분산 상태를 관찰하였다.

iPP의 DC 절연파괴강도는 379.74 kV/mm였으며, MA-g-PP 1 wt% 첨가 시 560.72 kV/mm로 47.7% 증가하였다. 이후 MA-g-PP 함량이 증가함에 따라 DC 절연파괴강도는 539.65 kV/mm(MAPP10), 344.42 kV/mm(MAPP30)로 감소하는 경향을 보였다. SEM 관찰 결과, **iPP와 MAPP1은 비교적 균일한 파단면을 나타낸 반면, MAPP10 및 MAPP30에서는 상분리와 void 등의 미세구조적 불균일성이 관찰되었다**. SiO_2 1 wt%를 첨가한 경우 DC 절연파괴강도는 MAPP1S1, MAPP3S1 및 MAPP5S1에서 각각 409.62, 436.12 및 386.93 kV/mm로 나타났으며, MAPP1S1은 MAPP1 대비 약 27.0% 감소하였다. 또한 SEM에서 MA-g-PP 함량 증가에 따라 SiO_2의 응집 및 분산 불균일성이 증가하는 경향이 관찰되었다.

본 연구에서는 MA-g-PP 함량과 SiO_2의 분산 상태가 iPP 기반 절연재의 절연파괴 특성에 영향을 미칠 수 있음을 확인했으며, 고전압 절연재 적용을 위해서는 MA-g-PP 함량에 따른 고분자 미세구조와 나노필러의 분산 상태를 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다.

주제어: 폴리프로필렌, 무수말레인산, DC 절연파괴강도, 나노 필러

Keywords: Polypropylene, Maleic Anhydride, DC dielectric strength, Nano filler

[감사의 글]
본 연구는 한국전기연구원의 전기차 고전력 전송케이블용 그래핀/세라믹 기반 고방열 나노복합소재 개발 과제의 지원으로 수행되었음. (26A02115)
본 연구는 한국전기연구원의 125℃급 DC 필름 커패시터용 고전압 절연소재 기술 개발 과제의 지원으로 수행되었음. (26A01008)

포스터 발표 2

스마트 대전력 및 고전압기술 II

(PS2 067~080)

좌장 : 강형구 교수(국립한국교통대학교)



고주파 PWM 전압의 dv/dt 파형에 따른 기중 방전 특성 유한요소 해석

Finite Element Analysis of Air Discharge Characteristics According to dv/dt Waveforms of High-Frequency PWM Voltage

최태영[1], 조은빈[1], 이세희[1], 신효준[1*]
[1]경북대학교 전기공학과
(*교신저자: gywns0817@naver.com)

최근 AI 데이터 센터 및 HVDC 배전망 등 대용량 고전력 수요의 가파른 증가에 따라 솔리드 스테이트 변압기(SST)의 실증 및 활용의 필요성이 강조되고 있다. 그러나 SST의 핵심 전력 변환 모듈인 고주파 변압기(HFT)는 고전압·고주파 펄스폭 변조(PWM) 스위칭 환경에 지속적으로 노출되어 절연체 내부 및 표면의 부분 방전(PD) 위험성이 크다. 특히 권선, 절연 매체, 주변 기체가 맞닿는 삼중 접점(Triple Junction, TJ)은 유전율 불연속성으로 인해 국부적인 전계 집중에 매우 취약하여 전체 절연 계통의 방전 안정성을 저해하는 주원인으로 지목된다. 이에 본 연구에서는 유한요소 해석 기법을 기반으로 인가 전압 및 급격한 전압 상승률 dv/dt 변화에 따른 TJ 경계면 부근의 과도 방전 거동과 전하 다이내믹스를 정량적으로 분석하였다.

본 연구에서는 COMSOL Multiphysics를 활용하여 전극, 절연 필름, 공기층으로 구성된 축 대칭 2차원 TJ 해석 모델을 구축하였다. 시뮬레이션 환경에서는 가혹한 PWM 구동 조건을 모사하기 위해 $-3000\,V$의 고전압 펄스를 인가하고 마이크로초 단위의 과도 전계 및 전하 수송 연계 해석을 수행하여, 시간 변화에 따른 TJ 주변 전계 강도 분포와 전하 플럭스의 시공간적 변화를 도출하였다. 수치해석 결과, 급격한 펄스 전압 인가 직후 TJ 접점 부근에서 전계 왜곡에 의한 강한 전계 집중 피크가 형성되는 것을 확인하였다. 또한 방전 개시 이후 전압 상승률 dv/dt의 변화에 따라 삼중 접점에 축적되는 잔류 표면전하의 이동 속도 및 확산 거동에 정량적 차이가 발생하는 것을 파악하였다.

결론적으로 급격한 dv/dt 상승은 TJ 접점 영역의 과도 용량성 변위 전류를 급격히 증폭시키고, 가속화된 고에너지 전하 충격을 유발하여 유전체 표면 열화 및 부분 방전 개시 전압(PDIV) 저하를 직접적으로 초래하는 것을 확인하였다. 본 연구는 고전압·고주파 스위칭 스트레스 하에서 HFT 절연 계면의 국부 파괴 취약점을 정량화함으로써, 향후 고신뢰성 SST 최적 절연 설계 및 장기 절연 수명 신뢰성 평가를 위한 기초 학술 자료로 폭넓게 활용될 수 있다.

주제어: 솔리드 스테이트 변압기(Solid-State Transformer), 고주파 변압기(High-Frequency Transformer), 펄스폭 변조(PWM), 삼중 접점(Triple Junction), 부분 방전(Partial Discharge), 유한요소 분석(FEM), 전계 집중

[감사의 글]
본 연구는 2026년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업입니다. (RC-2026-25477267)

DC 전계 내 세라믹 및 실리콘 고무 표면의 물방울 변형과 섬락 특성 비교

Comparison of Water Droplet Deformation and Flashover Characteristics on Ceramic and Silicone Rubber Surfaces under DC Electric Field

김린우[1], 류가윤[1], 박범진[1*]
[1]국립경국대학교 전기·신소재공학과
(*교신저자: bjpark@gknu.ac.kr)

고체 절연물 표면에 존재하는 수분은 전계 분포와 표면 방전 거동을 변화시켜 섬락 특성에 직접적인 영향을 미치며, 특히 재질의 젖음성 차이에 따른 물방울 변형 거동을 정량적으로 비교할 필요가 있다. 본 연구에서는 음극성 DC 전계에서 세라믹(Al_2O_3)과 실리콘 고무 표면의 단일 물방울 변형 및 섬락 특성을 비교하였다. 크기 100×100×10 mm의 시편에 전극 간격 20 mm를 적용하고, 40 μL의 물방울을 배치한 후 전압을 0.5 kV 간격으로 단계적으로 증가시켰다. 물방울의 전계 방향 신장 정도를 나타내는 정규화 길이 λ_n과 면적 A_n을 영상 기반으로 산출하였으며, 초기 상태 대비 λ_n이 5% 이상 증가하는 시점을 변형 개시 전압 $Vdef$로 정의하였다. 실험 결과, 세라믹과 실리콘 고무의 평균 $Vdef$는 각각 12.94 kV와 8.26 kV로 나타나 실리콘 고무에서 물방울 변형이 더 낮은 전압에서 시작되었다. 또한 섬락 직전 전압 구간에서 λ_n은 세라믹 1.137±0.051, 실리콘 고무 1.267±0.107로 측정되었으며, A_n 역시 각각 1.004±0.039와 1.182±0.070으로 실리콘 고무에서 더 큰 변형이 관찰되었다. 세라믹은 실리콘 고무보다 높은 섬락 전압을 나타냈으며, 이는 표면 젖음성과 물방울의 전계 유도 변형이 섬락 경로 형성에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 본 결과는 절연재료 종류에 따른 습윤 표면의 DC 섬락 거동을 이해하고, 옥외 절연물의 재질 선정 및 내오손 설계에 활용될 수 있다.

주제어: DC 섬락, 물방울 변형, 세라믹 절연체, 실리콘 고무, 표면 젖음성

Keywords: DC flashover, water droplet deformation, ceramic insulator, silicone rubber, surface wettability

[감사의 글]
이 논문은 국립경국대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

SiO_2/h-BN 이종필러 첨가에 따른 에폭시 복합재료의 열적 특성 변화

Effect of SiO_2/h-BN Hybrid Fillers on the Thermal Properties of Epoxy Composites

천창영[1], 유광열[1], 함연우[1], 김명진[1*]
[1]충북대학교 전기공학부
(*교신저자: mckim@cbnu.ac.kr)

전력설비용 에폭시 절연재료는 운전 중 발생하는 열을 효과적으로 방출하고 열적 안정성을 유지해야 한다. SiO_2를 첨가한 에폭시 복합재료는 전력설비 절연물로 널리 사용되지만, SiO_2의 비교적 낮은 열전도율로 인해 열전달 특성을 개선할 필요가 있다. 본 연구에서는 SiO_2 함량을 고정하고 열전도 특성이 우수한 h-BN 필러를 추가한 에폭시 복합재료의 열적 특성 변화를 규명하고자 하였다.

열적 특성 분석을 위해서 SiO_2 30 wt.%만 첨가한 SE와 SiO_2 30 wt.% 및 h-BN 5 wt.%를 첨가한 SBE1, SBE2, SBE3 시편을 제조하였다. SBE1, SBE2, SBE3에 첨가된 h-BN 입자 크기는 각각 4, 11, 44 μm이며, 모든 시편은 100 ˚C에서 4시간 경화하고 130 ˚C에서 12시간 후경화하여 제작하였다. 열적 특성으로는 열전도율과 겉보기 활성화에너지를 고려하였으며, 열전도율은 열원반법을 이용하여 측정하였다. 또한 겉보기 활성화에너지는 질소 분위기에서 5, 10, 15 및 20 ˚C/min의 승온 속도로 TGA를 수행한 뒤, 각 승온 속도에서 얻은 주 DTG 피크 온도에 Kissinger 방법을 적용하여 산출하였다.

SE 시편의 열전도율은 0.356 ± 0.004 W/(m·K)였으며, SBE1, SBE2, SBE3 시편은 각각 0.399 ± 0.001, 0.472 ± 0.005, 0.465 ± 0.006 W/(m·K)였다. SBE2 시편의 열전도율은 SE 시편보다 약 32.6% 향상되었다. 겉보기 활성화에너지는 SE, SBE1, SBE2, SBE3 시편에서 각각 1.60, 1.66, 2.06, 1.97 eV로 산출되었으며, SBE2 시편의 겉보기 활성화에너지는 SE 시편보다 약 29% 높았다. h-BN을 5 wt.% 첨가한 세 시편 중 11 μm h-BN을 사용한 SBE2가 열전도율 및 겉보기 활성화에너지 모두 우수한 결과를 보였다.

본 연구 결과는 SiO_2와 h-BN의 함유량이 동일해도 h-BN 입자 크기에 따라 에폭시 복합재료의 열전도율과 겉보기 활성화에너지가 달라짐을 보여준다.

주제어: 에폭시 복합재료, 이종필러, 열전도율, 겉보기 활성화에너지

Keywords: Epoxy Composites, Hybrid Fillers, Thermal Conductivity, Apparent Activation Energy

[감사의 글]
본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의하여 수행된 기초연구사업임. (RS-2020-NR049604)

적층 유전체 간 유전율 비에 따른 전계분포 해석

Analysis of Electric Field Distribution According to the Permittivity Ratio of Laminated Dielectrics

임성현[1], 황재은[1], 박혜리[1*], 임동영[2]
[1]동아대학교 전기공학과, [2]한국폴리텍대학
(*교신저자: bakery@donga.ac.kr)

친환경 가스절연개폐기(GIS)의 콤팩트화 및 신뢰성 확보를 위해서는 고체유전체의 전계 집중을 완화하는 절연 설계가 필수적이다. 절연파괴가 높은 전계에서 전자생성확률과 관련되는 물리적 현상이기 때문에, 절연설계와 그 메커니즘의 이해는 전계분포를 기반으로 한다.

본 연구는 공기 중 적층된 고체유전체의 연면플래쉬오버 특성을 파악하기 위해 유전체 간 유전율 비에 따른 내부 전계분포를 해석하였고 측정된 연면플래쉬오버전압의 특성을 설명하기 위해 적용되었다. 베클라이트(BA), 폴리카보네이트(PC), 테플론(TE)으로 조합된 적층 유전체는 구형상의 고전압 전극과 원형 평판 형상의 접지 전극 사이에 배치된다. 여기서, BA, PC 및 TE의 상대 유전율은 각각 5, 2.9 및 2.1이다. 적층된 고체유전체의 전계분포는 COMSOL Multiphysics의 유한요소 해석 모델로부터 도출하였고, 연면플래쉬오버 전압은 실험을 통하여 측정하였다.

해석 모델에서 최대값이 10 kV인 교류전압을 인가했을 때, 적층 유전체 간 유전율 비에 따라 전계분포가 달라졌다. 유전율의 비가 0.42인 TE/BA에서는 상대 유전율이 낮은 TE층에서 높은 전계가 형성되었으며, 유전체 표면의 최대 전계 세기는 7.03 kV/mm로 나타났다. 유전율의 비가 0.72인 TE/PC에서는 상대 유전율이 낮은 TE층에서 높은 전계가 형성되었으며, 최대 전계 세기는 5.89 kV/mm로 나타났다. 이로부터 유전율의 비가 작은 적층 조합에서 더 높은 전계가 형성됨을 확인할 수 있었다. 실험결과, TE/BA, TE/PC의 연면플래쉬오버 전압은 각각 5회 측정값의 평균으로 28.6 kV, 29.4 kV를 얻었다.

이로부터 유전율의 비가 작은 TE/BA에서 상대적으로 높은 전계가 형성되었으며, 연면플래쉬오버 전압이 더 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 적층 고체유전체의 적절한 유전율의 비를 조절하여 전계 집중을 완화할 수 있음을 의미하며, 향후 친환경 전력설비의 절연 내력 향상을 위한 설계 기법으로 활용될 수 있다.

주제어: 가스절연개폐기, 적층 유전체, 연면플래쉬오버, 전계분포, 유한요소해석

Keywords: Gas Insulated Switchgear, Laminated Dielectric, Surface Flashover, Electric Field Distribution, Finite Element Analysis

[감사의 글]
본 과제(결과물)는 교육부와 부산광역시의 재원으로 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 연구결과입니다. (2026-ANCHOR-02-003)

회전기 운전 온도에 따른 고정자 코일용 SGT의 전계완화 성능 분석

Field-Grading Performance of Stress-Grading Tape for Stator Coils under Different Operating Temperatures

함연우[1], 권도희[1], 구도영[1], 강대한[1], 김유민[2], 김명진[1*]
[1]충북대학교 전기공학부, [2]한국전기연구원
(*교신저자: mckim@chungbuk.ac.kr)

고정자 코일의 엔드부에서는 접지층(CAT) 종단에서 전위구배가 급격히 변화하여 국부적인 전계 집중이 발생할 수 있으며, 이를 완화하기 위해 비선형 전도특성을 갖는 Stress Grading Tape(SGT)가 적용된다. SGT는 전도전류에 의한 손실이 발생할 수 있고, 실제 회전기 운전 시 코일의 열과 함께 SGT의 온도 역시 상승할 수 있으므로 온도에 따른 전도특성 변화가 전계완화 성능에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 온도 변화에 따른 SGT의 전도특성을 실험적으로 분석하고 이에 따른 전계완화 성능을 분석하고자 하였다.

실험을 위해 PTFE 막대에 mica tape를 감고 양측에 알루미늄 포일 전극을 형성한 후, 그 위에 SGT와 Heat Shrinkable Tape(HST)를 순차적으로 감아 VPI 공정을 통해 시편을 제작하였다. 실험은 30, 60, 90℃에서 각각 제작된 시편에 1-10 kV의 DC 전압을 단계적으로 인가하여 누설전류를 측정하였으며, 이에 따라 전계에 따른 전도도 값을 산출하였다.

측정 결과, 30, 60 및 90℃에서 모두 전계가 증가함에 따라 SGT의 전도도가 비선형적으로 증가하는 특성이 관찰되었고, 특히 전계가 0.1667 kV/mm에서 0.3333 kV/mm로 증가할 때 전도도는 30℃에서 약 11.7배, 60℃에서 약 10.6배, 90℃에서 약 10.4배 증가하여, 온도 변화에도 비선형적인 증가 거동은 유사하게 유지되는 것으로 나타났다. 반면 0.3333 kV/mm에서의 전도도는 30℃에서 $6.02\times10^{-8}[S/m]$, 60℃에서 $3.15\times10^{-8}[S/m]$, 90℃에서 $2.15\times10^{-8}[S/m]$로 나타났으며, 30℃ 대비 각각 약 47.7% 및 64.3% 감소하였다. 또한, FEM을 활용하여 측정된 온도별 전도특성을 고정자 코일 전계해석에 적용한 결과, 온도 증가에 따라 SGT의 전계완화 성능이 저하되는 경향을 확인하였다.

이를 통해 SGT의 비선형 전도 거동은 온도에 따라 대체로 유지되지만, 전도도 수준은 온도 증가에 따라 감소함을 확인하였다. 따라서 고정자 코일의 설계 시 실제 운전 온도에 따른 전도도 변화를 함께 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

주제어: 스트레스 그레이딩 테이프, 고정자 코일, 비선형 전도특성, 온도 의존성, 전계완화

Keywords: Stress Grading Tape, SGT, Stator Coil, Nonlinear Conductivity, Electric Field Grading

[감사의 글]
본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의하여 수행된 기초연구사업임. (RS-2020-NR049604)

온도상승계수 기반 알루미늄 나전선의 접속 방식에 따른 발열특성 통계적 분석

Statistical Analysis of Thermal Characteristics in Aluminum Bare Conductors by Connection Method Using the Temperature Rise CoefficientCoefficient

김가현, 서예슬, 임장섭*
국립목포해양대학교
(*교신저자: janylim@mmu.ac.kr)

최근 전력 산업에서는 경제성과 경량화를 위해 알루미늄 도체의 도입이 가속화되고 있으나, 낮은 전기전도도와 산화막 형성으로 인해 접속부의 열 관리에 어려움이 있다. 본 연구에서는 주위 온도와 같은 환경 변수를 보상할 수 있는 온도상승계수(K) 분석 모델을 적용하여 알루미늄 나전선 접속부의 전처리 조건 및 접속 방식에 따른 발열특성 및 시공 품질의 재현성을 규명하고자 하였다.

ANSI C119.4 및 ANSI C119.0 규격에 따라 알루미늄 나전선에 압축형 및 볼트형 슬리브를 체결하고, 대조 도체의 온도가 90°C에 도달하는 전류를 인가하여 열적 특성을 평가하였다. 시료는 수밀 컴파운드 제거 범위와 전도성 컴파운드 도포 여부를 주요 변수로 하여 3가지 전처리 조건으로 구성하였으며, 열평형 방정식을 기반으로 인가전류의 제곱과 온도 상승분 간의 선형 회귀 분석을 통해 K값을 도출하였다. 열적 특성을 분석한 결과, 전도성 컴파운드를 도포하지 않은 대조군의 K값은 압축형 슬리브에서 약 0.000206, 볼트형 슬리브에서 0.000204로 나타나 발열이 가장 컸다. 반면, 전도성 컴파운드를 도포한 시료들의 경우 대조군 대비 K값이 40% 이상 감소하여 발열 억제에 크게 기여함이 확인되었다. 특히, 샌딩 작업 및 수밀 컴파운드 제거 정도 등 전처리 차이에 따른 K값의 편차는 5% 미만으로 나타나, 전도성 컴파운드 도포가 시공 품질의 일관성 확보에 핵심적인 역할을 함을 정량적으로 입증하였다.

본 연구 결과는 환경 변수가 통제된 객관적 발열 평가 지표로 의미가 있으며, 향후 70kV급 알루미늄 케이블 접속부의 최적 전처리 가이드라인 및 현장 시공 기준을 수립하는 데 기초 자료로 활용될 수 있다.

주제어: 알루미늄 나전선, 전도성 컴파운드, 온도상승계수, 전처리

Keywords: Aluminum Bare Conductor, Conductive Compound, K-value, Pre-treatment

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원으로 수행되었음. (No. RS-2024-00467852)

접촉저항을 고려한 압축 슬리브의 열적 거동 분석

Analysis of Thermal Behavior of a Compression Sleeve Considering Electrical Contact Resistance

정민우[1], 이세희[1*]
[1]경북대학교 전자전기공학과
(*교신저자: Shlees@knu.ac.kr)

가공배전선로에 사용되는 압축형 분기슬리브는 압착 과정에서 형성되는 접촉상태에 따라 전기적 접촉특성이 달라지며, 접촉계면에서 발생하는 추가적인 전력손실은 접속부의 온도 상승에 영향을 줄 수 있다. 특히 압착 후 접촉압력은 계면 전체에 균일하게 형성되지 않으므로 실제 접촉상태를 고려한 전기적·열적 평가가 필요하다. 본 연구에서는 압축형 분기슬리브의 압착 과정에서 형성되는 접촉압력을 전기적 접촉조건과 연계하여 접속부의 열적 거동을 분석하고자 하였다. 240 mm²급 알루미늄 전선과 130×64×32 mm의 분기슬리브를 대상으로 3차원 기계-전기-열 순차 연성해석 모델을 구성하였으며, 4개의 압착구간에 최대 150 kN의 하중을 순차적으로 적용하였다. 압착해석에서 얻어진 접촉압력은 Cooper-Mikic-Yovanovich(CMY) 모델을 이용하여 접촉컨덕턴스로 변환하였으며, 이후 전류 618.2 A, 외기온도 23.4 ℃ 조건에서 5 h 동안 과도 전기-열 해석을 수행하였다. 해석 결과, 압착하중이 제거된 8.2 s에서 접촉압력은 압착구간을 따라 불균일하게 분포하였으며 국부적으로 약 0.14 GPa까지 나타났다. 이에 따라 접촉계면의 전위차 역시 공간적으로 불균일하게 형성되었으며 최대 절대값은 약 0.63 mV로 나타났다. 5 h 후 전체 해석영역의 온도는 53.2~73.1 ℃로 분포하였고, 슬리브-도체 접촉영역은 약 64.2~64.7 ℃로 나타났다. 접촉계면 내부의 온도차가 약 0.5 K로 제한된 것은 국부적으로 발생한 열이 열전도율이 높은 알루미늄 슬리브와 도체를 통해 주변으로 확산되었기 때문으로 판단된다. 따라서 압축 접속부의 열적 성능을 평가하기 위해서는 균일한 접촉조건을 가정하기보다 압착 후 형성되는 비균일한 접촉압력과 이에 따른 전기적 접촉특성을 함께 고려할 필요가 있다.

주제어: 압축 슬리브, 접촉저항, 접촉압력, 열적 거동, 다중물리해석

Keywords: Compression Sleeve, Contact Resistance, Contact Pressure, Thermal Behavior, Multiphysics Analysis

[감사의 글]
본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 대구광역시의 재원으로 대구앵커센터의 지원을 받아 경북대학교에서 수행하는 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과입니다.(2025-ANCHOR-03-001)

전기차 스케쥴링에 따른 변압기 열화 양상 변화 분석

Analysis of Transformer Ageing Patterns Under Different Electric Vehicle Scheduling Strategies

유태종[1], 김명진[1*]
[1]충북대학교 전기공학부
(*교신저자: mckim@cbnu.ac.kr)

전기자동차 보급이 확대되면서 주거 지역 변압기에는 퇴근 이후의 충전 부하가 저녁 최대 부하와 겹쳐 집중되고 있다. 절연의 열적 열화는 열점 온도에 대해 지수적으로 증가하므로, 같은 충전 요구라도 충전 시점에 따라 변압기 수명손실이 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 전기차 충·방전 스케줄링 방식에 따른 변압기의 열화 양상과, 열화를 제어에 직접 반영하였을 때의 변화를 규명하고자 하였다.

이를 위하여 본 연구에서는 100 kVA 배전변압기에 22 kW급 충전기 20기와 건물 부하, 태양광이 연결된 시설에서의 변압기의 열화양상에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. 부하와 외기온으로부터 IEEE C57.91 기반 열모델의 상부유·열점 온도를 계산하고, 이를 등가 열화계수와 수명손실로 환산하였다. 스케줄링에 따른 차이를 비교하기 위해 동일한 차량 일정과 충전 요구를 적용하고, 충전량 감소에 따른 열화 저감을 구분하도록 충전 요구 충족률과 요금을 함께 평가하였다. 본 연구에서는 전기차 충/방전 스케줄링 기법으로 규칙 기반 제어 (Rule-Based Control: RBC), 모델기반제어 (Model Predictive Control: MPC), 그리고 강화학습 (Reinforcement Learning: RL)을 고려하였다.

시뮬레이션을 실시한 결과, 하루 충전량과 충전 요구 충족률이 같은 조건에서 전기차 스케쥴링 기법에 따라 변압기의 열화계수가 약 50% 감소될 수 있음이 확인되었으며, 이는 충전량을 줄이지 않고 부하의 시간 배분만으로 열화를 줄일 수 있음을 보여준다. 또한, 동일한 MPC라도 목적함수에 열화 비용을 반영하면 충전 요구 충족률과 요금의 변화 없이 등가 열화계수가 9.2~15.7% 추가로 감소하여, 같은 스케줄링 기법에서도 제어 목표의 설정에 따라 열화 정도가 달라졌다. 반면 RL은 같은 열화 정보를 보상에 반영하여도 알고리즘에 따라 -6~+3 %로 효과가 엇갈렸다.

본 연구는 변압기의 열화가 충전량뿐 아니라 충전 시점과 스케줄링 방식에 크게 좌우됨을 확인하였다. 같은 충전 서비스를 유지하면서도 스케줄링 방식에 따라 등가 열화계수는 최대 약 60 % 차이를 보였으며, 이는 충전 시점 조정만으로 설비 증설 없이 변압기 수명손실을 절반 이하로 줄일 수 있음을 의미한다. 따라서 변압기 수명을 고려한 전기차 충전 제어에서는 충전 요구 충족과 함께 부하를 언제 배치할지를 결정하는 과정이 중요하다.

주제어: 전기차 충·방전 스케줄링, 변압기, 열적 열화, 변압기 수명손실, V2G)

Keywords: EV Charging and Discharging Scheduling, Distribution Transformer, Thermal Ageing, Transformer Loss of Life, Vehicle-to-Grid

[감사의 글]
본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의하여 수행된 기초연구사업임. (RS-2026-25602302)

tanδ 기반 수트리 진단의 한계 검토를 위한 XLPE 유전특성 측정 및 유한요소해석

Dielectric Measurement and Finite Element Analysis of XLPE for Examining the Limitations of tan δ-Based Water Tree Diagnosis

서예슬, 김가현, 임장섭*
국립목포해양대학교
(*교신저자: janylim@mmu.ac.kr)

전력케이블의 절연재료인 XLPE(Cross-linked Polyethylene)는 장기간 수분과 전계에 노출되면 절연체 내부의 미세 결함이나 이물질 주변에 나뭇가지 모양의 수트리가 발생할 수 있으며, 이는 전기트리로 전이되어 절연파괴로 이어질 수 있으므로 열화 상태의 진단이 중요하다. 본 연구에서는 XLPE의 열화 전후 유전특성을 측정하고, 유한요소법(FEM)을 이용하여 수트리의 형상과 손실특성이 시편 전체의 비유전율 및 유전정접(tanδ)에 미치는 영향을 분석하였다. 직경 80mm의 XLPE 시편을 600Hz, 16kV에서 14일간 열화시키고, 열화 전후 유전특성을 60Hz에서 1~5kV로 단계적으로 인가하며 3회 반복 측정하였다. 수트리 길이는 약 200~400μm였으며, 이 중 약 395μm를 대표 길이로 선정하여 FEM 해석에 적용하였다. 측정 결과, 평균 비유전율은 열화 전 2.616에서 열화 후 2.613으로 약 0.11% 감소하였고, 이는 시편 두께 차이의 영향으로 추정되며, 수트리에 의한 변화는 미미하였다. 평균 tanδ는 0.9340%에서 0.9407%로 0.72% 증가하였다. 이에 수트리의 크기가 시편 전체의 비유전율에 미치는 영향을 검토하기 위해 수트리 영역의 비유전율을 3.6으로 설정하고 길이와 폭을 변화시켜 해석하였다. 대표 수트리 길이 395μm와 폭 2mm 조건에서 등가 비유전율 변화는 0.034%이었다. 이어 수트리 영역의 손실특성은 수분 함량과 미세 통로 구조 등에 따라 달라질 수 있으므로, 수트리 영역과 XLPE의 tanδ 비를 손실 배율 Ktan으로 정의하고, 값을 5와 10으로 설정하였다. 수트리 체적분율은 기준 시편 체적에서 수트리 영역이 차지하는 비율로 정의하고, 체적분율 구간별로 시편 전체의 tanδ 상대 증가율을 비교하였다. 대표 수트리 형상의 체적분율은 약 0.11%였으며, Ktan이 5와 10일 때 전체 tanδ의 상대 증가율은 각각 0.41%와 0.92%로 나타났다. 반면 체적분율 약 2.14% 조건에서는 전체 tanδ가 각각 1.0300%와 1.1499%로 나타났으며, 열화 전 XLPE의 tanδ 0.9340% 대비 각각 10.28%와 23.11% 증가하였다. 이는 60Hz 해석 조건에서 동일한 수트리 형상이라도 손실 배율에 따라 전체 tanδ 증가율이 달라짐을 보여주며, 전체 tanδ의 작은 변화만으로 수트리 열화 여부를 판단하는 데 한계가 있을 수 있음을 시사한다.

주제어: 가교폴리에틸렌(XLPE), 수트리, 비유전율, 유전정접, 유한요소법

Keywords: Cross-linked polyethylene (XLPE), Water tree, Relative permittivity, Dielectric dissipation factor, Finite element method

[감사의 글]
본 연구는 2026년도 한국에너지기술평가원의 지원으로 수행되었음. (RS-2024-00449926).

전력용 변압기 DGA 시각화를 위한 열화진행 패턴 분류 및 모델링

Classification and Modeling of Degradation Progress Patterns for DGA Visualization in Power Transformers

김수정, 서예슬, 김가현, 이경민, 임장섭*
국립목포해양대학교
(*교신저자: janylim@mmu.ac.kr)

전력용 변압기의 내부 절연 열화와 이상 방전은 설비 고장 및 전력 공급 중단으로 이어질 수 있으므로, 상태 진단에 근거한 유지관리와 교체 우선순위 선정은 필수적이다. 본 연구에서는 다수의 변압기를 분석하기 위해 유중가스분석 (Dissolved Gas Analysis, DGA) 기법을 활용하였다. 이를 정량적 지표로 표현하기 위해 Gas at thermal index (GTI) 및 Gas at discharge index (GDI)를 활용하여 변압기의 진단 결과를 점수 구간별로 비교·분석하고, 3차원 시각화를 통해 교체 우선순위 결정에 활용할 수 있는 상태 평가 특성을 규명하고자 하였다.

본 연구는 변압기 DGA 실측 데이터 600건을 기반으로 데이터 분석을 진행하였다. 이상치 데이터를 정제한 후 주요 유중가스인 수소 (H_2), 아세틸렌 (C_2H_2), 에틸렌 (C_2H_4), 에탄 (C_2H_6), 메탄 (CH_4) 및 프로판 (C_3H_8)의 6종 가스를 분석 대상으로 선정하였다. 각 가스의 로그 정규화 농도를 산출하고 GTI 및 GDI의 진단 결과와 연계하여 3차원 공간에 시각화하였다. 지표 총점은 0~100점 범위에서 20점 간격의 5개 구간으로 구분하였으며, 구간별 120건에 대해 정상 및 정상 외 판정 비율과 세부 진단 등급의 분포를 비교하였다.

분석 결과, 총점 20점 이하 구간의 정상 비율은 GTI 94.2% (113건), GDI 97.5% (117건)였으며, 80점 초과 구간에서는 두 지표 모두 정상 외 판정 비율이 100.0% (120건)로 나타났다. 60점 초과 80점 이하 구간의 정상 외 판정 비율은 GTI 75.8% (91건), GDI 92.5% (111건)로, GDI가 GTI보다 진단 민감도가 16.7%p 높게 도출되었다. 전체 데이터의 정상 외 판정 비율은 GTI 44.0% (264건), GDI 50.3% (302건)로 나타나 두 지표의 판정 분포에 차이가 확인되었다.

결론적으로, DGA 데이터의 3차원 공간 시각화는 특정 점수 구간에 밀집되는 열화 패턴을 시각적으로 모델링하는데 효과적임을 확인하였다. 본 연구의 정량적 비교 및 3차원 시각화는 변압기 간 상대적 상태를 파악하고, 추가 점검 대상 선정과 교체 우선순위 결정에 필요한 기초자료로 활용될 수 있다.

주제어: 전력용 변압기, 유중가스분석, 3차원 시각화, 상태 진단 모델

Keywords: Power Transformer, Dissolved Gas Analysis, 3D Visualization, Condition Diagnosis Model

[감사의 글]
이 논문은 2026년 교육부 재원으로 국립목포해양대학교 국립대학육성사업의 지원을 받아 수행되었음.

다각 구조 철탑의 환경조화 외장재 적용방안에 관한 연구

A Study on the Application Methods of Environmentally Harmonious Exterior Materials for Polygonal Steel Towers

오준암[1], 심다보[1]
[1]한국전력공사 전력연구원

다각 구조 철탑은 시공성과 경제성이 높은 기존 사각 철탑의 트러스 구조를 이용하고 관형지지물의 외관 형상을 유지하여 주민 수용성을 향상시키기 위하여 개발되었다. 따라서 이 논문에서는 주민 수용성을 높일 수 있는 환경조화 외장재와 디자인을 다각도로 고찰하였다.

다각 구조 철탑의 전면을 아연강판 소재로 감싸 관형지지물과 외형적으로 차이가 없는 기본형과 Hamad 공항의 기하학적 구조를 모티브로 한 디자인, 타공 방식의 외장재를 사용하는 방식, 멤브레인 소재를 이용한 트위스트 방식의 외장재, 전통문양을 새겨넣은 외장재, 꼬임방식으로 줄어들면서 올라가고 부분적으로 외관을 감싸는 방식 등 주변환경과 조화할 수 있는 여러가지 디자인을 아래와 같이 검토하였다.

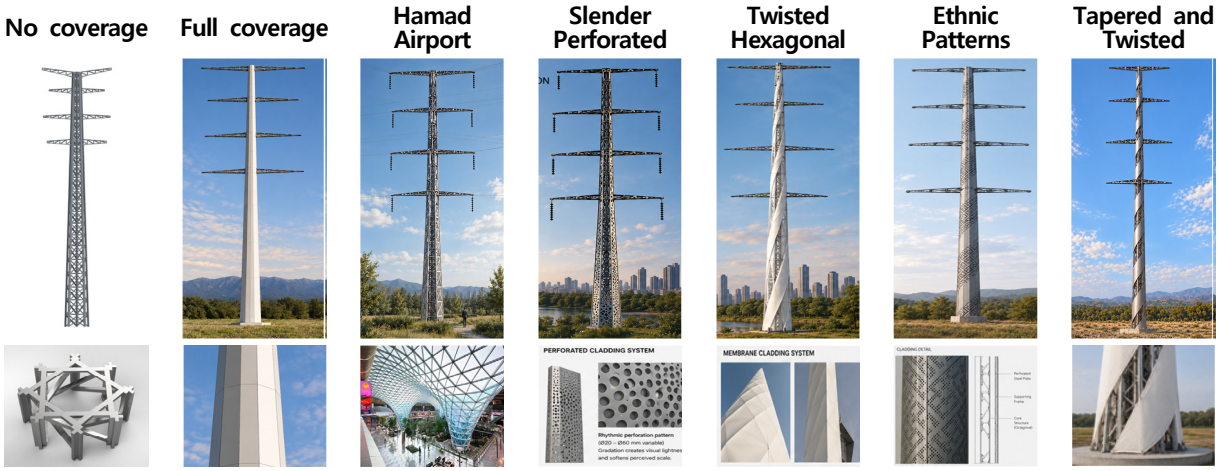


Fig. 1. 다각(8각) 구조 철탑 외장재 소재 및 디자인

향후 외장재 소재별 특성과 접합 방식을 검토하고 CFD(전산유체해석)를 통해 외장재 및 구조물의 안전성 검증하며 공기역학적 안정성을 검증하기 위해 풍동시험을 시행할 계획이다. 기존 관형지지물이 부재 중량이 커 시공이 어렵고 제작비가 비싸 현장 적용이 제한되었다면 다각 구조 철탑은 주민수용성 뿐만 아니라 시공성과 경제성까지 향상시킬 수 있어 최근 급증하는 송전선로 증설 요구 해결에 기여할 것으로 기대된다.

주제어: 다각 구조, 환경조화 철탑, 관형지지물

Keywords: Polygonal structure, Environmentally Harmonious Steel Tower, Tubular structure

[감사의 글]
본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 관형지지물 대체용 다각구조철탑 설계기술 개발 연구과제의 지원으로 수행되었습니다

OF 지중송전 케이블 접속함 내 사용되는 에폭시 절연물의 전압과 온도 가속에 따른 전기트리 특성에 관한 연구

A Study on the Electrical Treeing Characteristics of Epoxy Insulation Used in OF Underground Transmission Cable Joints Under Voltage and Temperature Acceleration

박재준†1, 김건희[1], 김태영[1], 강민수[1], 셀조드[1], 허인회[2], 표판식[3],
[1]중부대학교 고양캠퍼스 전기전자공학전공 †, [2]대광중전기, [3]한국전력공사 전력연구원
(*교신저자: name@univ.ac.kr)

1. 요약

한국의 전력망은 1970년대와 1980년대에 대규모 설비 투자가 이루어진 후 반세기가 지나면서 구조적 노후화 단계에 진입하였다. 이로 인해, 설비의 절연재료는 장기간의 열적, 전기적, 기계적 복합 스트레스로 인해 상당한 열화를 겪었으며, 최근의 가혹한 스트레스로 이러한 열화를 가속하고 있다. 이러한 절연재료에서 절연파괴가 발생하면 대규모 정전으로 직접 이어질 수 있으므로, 열화 상태를 진단하는 기술을 확립해야 한다. 이를 위해, 순수 에폭시 수지와 0.5wt%마이크로 실리카 복합재의 전기적 트리 현상을 분석하기 위해 광학 관찰법과 음향 방출(AE)법을 결합하여 실험하였다.

2. 실험

표1. 시험용 시편 규격 및 사양

항목	사양	비고
시편 재료 ①	CY5995 /HY225+ HY925 (순수 에폭시)	기본체
시편 재료 ②	CY5995 /HY225+ HY925/MCF-200C 65wt%	복합체
시편 크기 (트리 관측용)	20 × 20 × 3 mm	초기 7mm → 3mm 조정
시편 크기 (HVAC 파괴시험)	25 × 25 × 7 mm (절연 거리 4 mm)	IEC 60243 준용
침 전극 재질	텅스텐 (Ogura Jewelry Co., 일본)	
침 전극 직경	1 mm	
침 전극 길이	60 mm	
침 전극 선단 곡률반경	5 μm	고전계 집중 포인트
침 전극 선단 각도	30°	
접지 전극 형태	도전성 실버페이스트 코팅 평판형	체적 저항률 10^{-4} Ω·cm
침-접지 전극 절연 거리	4.0 mm	전체 시편 공통

순수 에폭시 수지는 기계식 교반기를 사용하여 CY 5995와 HY 5996을 100:80 wt%의 비율로 혼합하여 제조하였고, (2) 에폭시/MCF-200C(0.5 wt%) 복합재는 기계식 교반기를 사용하여 순수 에폭시 수지와 MCF-200C(0.5 wt%)를 혼합하여 제조하였다. 매트릭스는 진공 오븐에서 탈포한 후, 침 전극을 미리 배치한 20×3 mm²의 캐비티와 20 mm 높이를 갖는 금형에 주입하여 침-평판 전극 사이의 거리가 4.0 mm가 되도록 하였다. 이후 80℃/6 h, 140℃/8 h 동안 경화하였으며, 내부 응력을 방지하기 위해 실온까지 -0.5℃/min의 속도로 냉각하였다. 마지막으로 에폭시 시편에서 침 전극의 반대쪽 면에 도전성 실버 페이스트를 도포하여 접지 전극을 제작하였다.

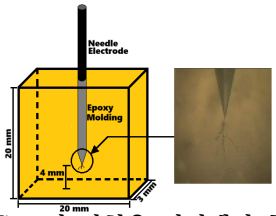


그림 1. HVAC 트리 시험용 시편에서 침 전극과 평판 전극의 배치, HVAC트리 시험용 시편

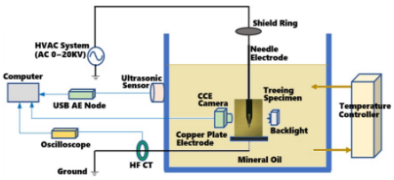


그림 2. HVAC 트리 시험 시스템 개략도

비디오 현미경(NEW ICS Pro, SOMETECH VISION Co., Ltd., Korea)을 침 전극 선단과 정렬하고 60배 배율로 설정하여 트리 개시부터 전기적 절연파괴까지 전체 과정을 연속적으로 관찰하였다. 영상은 IPLUS 소프트웨어를 사용하여 5초 간격으로 자동 저장하였으며, 시계열 데이터로부터 전기 트리의 진행 과정을 분석하였다. AE 시스템: AE 측정 및 분석 장치(Rectuson Co., Korea)는 절연재료 내부에서 에너지 방출에 의해 발생하는 탄성파를 검출할 수 있으며, 광대역 AE 센서(동작 주파수 범위: 100-850 kHz), 데이터 수집 시스템(RTS NODE(USB Module Type)) 및 측정 소프트웨어(RTS-WIN)로 구성된다. 검출 임계값은 25 dB로 설정하였다.

3. 결과 및 검토고찰

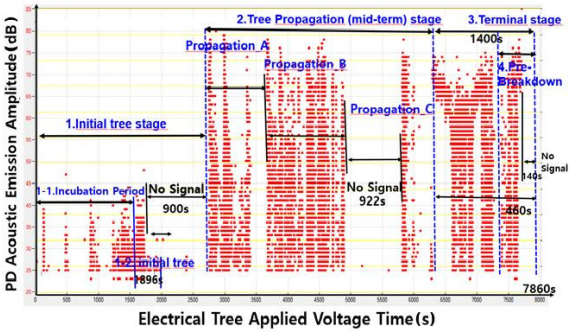


그림 3. 순수 에폭시 수지에서 인가 시간에 따른 음향 진폭 분포(크게 (1)개시, (2)전개, (3)급격한 진행 및 절연파괴)

전파 단계(A·B·C): 트리의 빠른 성장으로 50~80 dB 펄스가 발생하며, 특히 B 단계에서 펄스 빈도가 높게 나타난다. 이는 반복 방전과 채널 내부 기체 압력 변화의 영향이다.

급격한 진행·절연파괴 단계: 30~50 dB 펄스는 감소하지만 50~60 dB 펄스가 급증하고, 절연파괴 직전에는 60 dB 이상 신호와 강한 방전이 집중된다. 이는 절연파괴가 임박했음을 나타낸다.

순수 에폭시 수지에서는 트리 진행이 크게 3단계로 구분된다. 개시 단계에서 초기 트리는 1,946 s에 나타나기 시작하였다. 개시 직후 트리는 약 10 μm의 미세한 중공 터널 형태로 시작되었다. 트리 개시 후 AE 신호가 검출되지 않음에도 광학적으로 트리 진행이 관찰되는 무신호 구간이 있다.

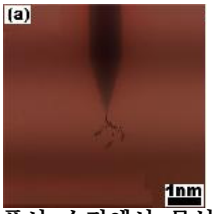


그림 4. 순수 에폭시 수지에서 무신호 구간의 트리 생성 영상

이는 시스템 검출 감도(25 db)이하의 미세한 에너지만 방출되고 있음을 의미한다. 그러므로, 개시 구간, 전파 구간, 절연 파괴 구간에서도 음향이 검출되지는 않았지만 트리 현상이 진행된 것을 알 수 있다.

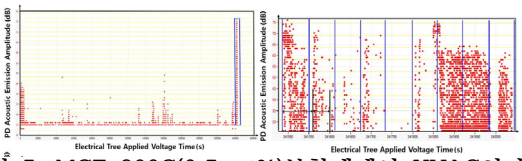


그림 5. MCF-200C(0.5 wt%)복합재에서 HVAC인가 시간에 따른 음향 방출 진폭 분포 왼: 전체 시험 범위 우: 왼 그림의 파란색 상자 영역 확대

수명 특성: 에폭시/MCF 복합재(0.5 wt%)의 절연파괴까지 264,000s (73.3 h)가 걸렸다.이러한 결과는 순수 에폭시 수명인 7,860 s (2.2 h)보다 약 33.6배 긴 수명인 것을 알 수 있다. 트리 개시점은 약 240,000 s (66.7 h)로 전체 수명의 90.9%를 차지한다.

이러한 수명의 현저한 증가는 에폭시 내부에 분산된 마이크로실리카 입자가 전하를 포획하고 트리 진행을 방해했기 때문이다. 그리고 트리가 일단 개시되면 트리진행 속도가 매우 빨라 단 520 s (8,7 min) 만에 절연파괴에 도달했다.

4. 결론

실험결과, 순수 에폭시 수지는 트리 개시 시간이 1,946s, 수명은 7,860s였다. 반면, 에폭시/마이크로실리카(0.5wt%)는 트리 개시 시간이 240,000s, 수명이 264,000s로 순수 에폭시 수지보다 수명은 33.6배 높고, 첫 개시 시간은 수명의 90.9%를 차지했다. 이를 통해 현저한 수명의 증가는 에폭시 내부에 마이크로실리카 입자가 전하를 포획하고 트리 진행을 방해했기 때문이다.

참고문헌

[1] Jae-Jun Park, “Characteristics of AC Treeing for Three Epoxy Resins for High Voltage Heavy Electric Machine Appliances,” The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 67, no. 10, pp. 1322-1329, 2018.

[2] Jae-Jun Park, Jae-Young Lee, “Effect of nano-sized layered silicate on AC electrical treeing behavior of epoxy/layered silicate nanocomposite in needle-plate electrodes,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 141, no. 2-3, pp. 776-780, Sep. 2013.

주제어: Electrical tree, Acoustic emission, Optical observation, Epoxy, Microcomposite
Keywords: Electrical tree, Acoustic emission, Optical observation, Epoxy, Microcomposite

[감사의 글]
(해당 사항이 있는 경우만 작성) 이 논문은 ○○의 지원으로 수행되었음. (No.1234567)(함초롬바탕, 8.5포인트)

전압 상승시간 및 두께에 따른 폴리프로필렌 절연필름의 공간전하 축적과 국부전계 왜곡 해석

Analysis of Space Charge Accumulation and Local Electric Field Distortion in Polypropylene Insulating Films According t Voltage Ramp Duration and Thickness

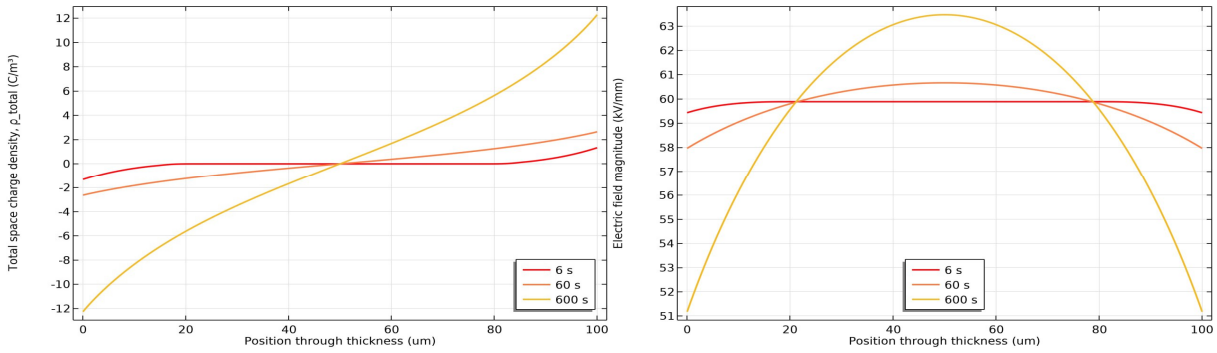
이예진[1], 김준범[1], 이은수[1], 정세원[1], 김민희[1*]

[1]계명대학교 전기공학과

(*교신저자: minnie90@kmu.ac.kr)

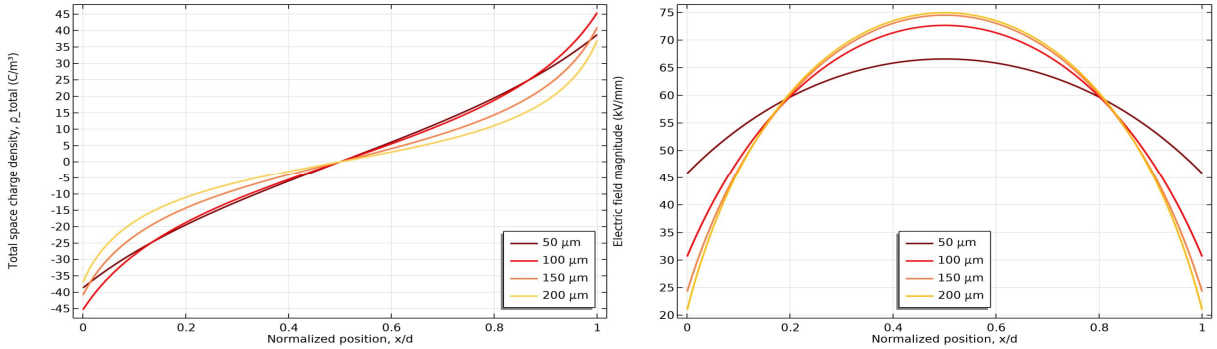
고분자 절연체의 직류 전계 분포는 전압 인가하면 내부의 전계 분포는 전압 인가 이력과 시료 두께에 따른 공간전하 축적량에 영향을 받으며, 이는 절연 성능에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 Bipolar Charge Transport(BCT) 모델을 이용하여 폴리프로필렌(PP) 절연 필름의 전압 상승시간과 두께가 공간전하 및 국부전계 왜곡에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 기준전계는 60kV/mm, 온도는 33℃로 설정하고 전압 상승시간은 6, 60, 600 s로 변화시켰다. 필름 두께는 50, 100, 150, 200μm로 설정하고 각 조건의 공간전하와 전계 분포를 계산하였다. 100μm 시료에서 전압 상승 종료 시 최대 국부전계는 59.884, 60.662, 63.467 kV/mm로 증가하였다. 1,800s 유지 후 최대 국부전계는 두께 증가에 따라 66.576, 72.657, 74.501, 74.945kV/mm로 증가하였다. 200 μm에서는 기준전계 대비 최대 국부전계가 24.91% 증가하였다. 이는 전압 상승시간 증가와 시료 두께 증가에 따라 기준전계 대비 최대 국부전계가 증가하고, 이에 따라 시료 내부의 전계 왜곡이 커짐을 의미한다.

Fig. 1. Effect of voltage ramp duration at the end of the ramp



(a) Space charge distribution (b) Electric field distribution

Fig. 2. Effect of film thickness after 1,800 s DC hold



(a) Space charge distribution (b) Electric field distribution

Table 1. Maximum local electric field for different voltage ramp durations and film thicknesses

Influencing Factor	Condition	E_{max} (kV/mm)	Field enhancement (%)
Ramp time	6s	59.884	-0.19
	60s	60.662	-1.10
	600s	63.467	5.78
Thickness	50μm	66.576	10.96
	100μm	72.657	21.10
	150μm	74.501	24.17
	200μm	74.945	24.91

주제어: 폴리프로필렌, 공간전하, 국부 전계 왜곡, 전압 상승시간, 절연 두께

Keywords: Polypropylene, Space Charge, Local Electric Field Distortion, Voltage Ramp Duration, Insulation Thickness

[감사의 글]

(해당 사항이 있는 경우만 작성) 이 논문은 2026년도 교육부 및 대구광역시의 재원으로 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 지원으로 수행되었음. (과제관리번호 : 2026-RISE-03-002)

복합 부분방전 신호 분리를 위한 DBSCAN과 HDBSCAN의 군집 특성 정량 분석

Quantitative Analysis of DBSCAN and HDBSCAN Clustering Characteristics for Mixed Partial Discharge Signal Separation

장경훈*, 유찬종, 최성은
한국건설생활환경시험연구원 (Korea Conformity Laboratories, KCL)
(*교신저자: khjang@kcl.re.kr)

온라인 부분방전(Partial Dischage, PD) 진단 환경에서는 복수의 방전원과 외부 노이즈가 동시에 측정될 수 있으므로, 충첩된 펄스를 신호원별로 분리하여 각각의 PRPD 패턴을 재구성하는 과정이 필요하다. 특히 신호원별 펄스 발생 빈도와 밀도가 변화할 경우 군집 알고리즘 결과에 따라 PRPD(Phase-Resolved Partial Discharge) 패턴이 달라질 수 있다.

본 연구에서는 복합 부분방전 신호 분리를 위한 DBSCAN과 HDBSCAN의 군집 특성을 입력 펄스 수에 따라 정량적으로 분석하였다. Noise, Internal 및 Surface 신호를 이용하여 서로 다른 펄스 수 조건을 구성하였으며, DBSCAN은 eps=0.02와 MinPts=40, HDBSCAN은 MinPts=20을 적용하였다. 각 알고리즘의 군집 결과는 실제 신호원의 Reference Label과 비교하고, 전체 입력 펄스 중 유효 군집으로 형성된 펄스의 비율과 신호원별 독립 군집 형성 여부를 분석하였다. 각 펄스가 1,000/1,000/1,000개 조건에서 전체 군집 형성률은 DBSCAN 68.17%, HDBSCAN 84.97%로 나타났으며, 400/400/400 조건에서는 각각 35.50%와 99.92%로 차이가 64.42%p 까지 증가하였다. 반면 고밀도 조건에서는 HDBSCAN에서 Internal과 Surface가 단일 군지븡로 병합되는 현상이 관찰되었다. 따라서 두 알고리즘은 입력 펄스 밀도와 신호원 간 분포에 따라 상이한 군집 특성을 나타내며, 복합 부분방전 신호 분리를 위해서는 이러한 특성을 고려한 군집 알고리즘 적용이 필요하다.

표 1 펄스 수 변화에 따른 DBSCAN과 HDBSCAN의 군집 결과 정량 비교

Table 1 Quantitative Comparison of DBSCAN and HDBSCAN Clustering Results with Varying Numbers of Input Pulses

입력 조건 (N/I/S)	Algorithm	Noise	Internal	Surface	Clustered Pulses	군집 형성률	Source Separation
2,000/5,000/5,000	DBSCAN	1,938	3,832	5,070	10,840	90.33%	3 Source
2,000/5,000/5,000	HDBSCAN	1,972	9,994		11,966	-	I+S merged
1,000/1,000/1,000	DBSCAN	786	389	870	2,045	68.17%	3 Source
1,000/1,000/1,000	HDBSCAN	899	651	999	2,549	84.97%	3 Source
400/400/400	DBSCAN	101	112	213	426	35.50%	3 Source
400/400/400	HDBSCAN	400	399	400	1,199	99.92%	3 Source

주제어: 부분방전, DBSCAN, HDBSCAN, 자동군집

Keywords: Partial Dischage, DBSCAN, HDBSCAN, Automatic Clustering

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 산업통상부 및 한국산업기술기획평가원 연구비 지원으로 수행되었음 (RS-2026-25563747, AI 기반 전력설비 화재 예방 스파크 사전 감지 센서 시스템).

포스터 발표 2

스마트 대전력 및 고전압기술 II

(PS2 081~092)

좌장 : 김민희 교수(계명대학교)



장거리 선로 적용을 위한 산업용 전력케이블에서의 VLF tanδ 판정 기준의 확장

Extension of VLF tan δ Diagnostic Criteria in Industrial Power Cables for Long-Distance Line Applications

이경민, 김가현, 서예슬, 천미소, 임장섭*
국립목포해양대학교
(*교신저자: janylim@mmu.ac.kr)

지중 배전선로의 상태 진단에 널리 활용되는 Very Low Frequency (VLF) tanδ 진단법은 케이블 길이에 따라 측정값이 왜곡되는 한계를 지닌다. 특히 단거리 케이블은 정전용량이 작아 접속부 누설전류 및 노이즈의 영향이 상대적으로 크게 반영되어 측정값이 비정상적으로 높게 산출된다. 반면, 600m 이상의 장거리 케이블은 국부적인 절연열화가 전체 체적에 의해 희석됨에 따라, 실제 위험 상태의 케이블이 정상으로 오판될 우려가 있다. 이에 본 연구에서는 케이블 길이에 따른 진단 오차를 낮추고 신뢰성 있는 상태 판정 기준을 확립하고자 길이 보상 (Length Compensation) 기법을 제안한다. 2012년에 개정된 한국전력공사 (KEPCO)의 VLF criteria를 기반으로, 110m~1,500m 범위의 실제 현장 선로 데이터를 표준 기준 길이인 300m에 맞춰 보정하였다. 제안된 길이보상 기법은 2D-Matrix의 Index R을 기준으로 진단 오차가 얼마나 개선되는지 정량적으로 검증하였다.

이를 위해 22.9kV 지중 케이블을 대상으로 $1.5U_0$ 인가전압 조건에서 8회 반복 측정한 tanδ 데이터를 확보하였으며, Weibull 누적분포함수 (CDF)를 활용해 통계적으로 분석하였다. 300m 단위 (300m~1,500m) 의 데이터를 추출하여 Box Plot 기반의 길이별 보정계수(K)를 도출하였으며, 300m 케이블의 중간값을 기준으로 단거리 선로에는 지수보간을, 장거리 선로에는 선형보간을 적용하여 측정값을 보상하였다.

데이터 분석 결과, 길이 보상 전 600m 케이블의 Management Window 내 데이터 분포 비율은 2.13%에 불과했으나, 보상 후 3.85%로 증가하였다. 특히, 장거리 측정 시 정상으로 분류되었던 C등급 데이터가 보상 후 82.3% 증가하였다. 또한, 케이블 교체 권고 기준인 Index R 0.6 이상 데이터의 비율이 보상 전 0.23%에서 보상 후 0.47%로 약 2배 상승하며, 이는 케이블의 표준길이인 300m 기준의 위험 감지 경향성과 높은 일치도를 보였다.

본 연구에서는 길이보상 기법의 활용이 케이블 길이에 기인한 진단 오류를 효과적으로 보상함으로써, 효율적인 전력설비 관리에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 초저주파 유전손실정접, 지중 배전케이블, 길이보상, Index R

Keywords: VLF tan δ, Underground Distribution Cable, Length Compensation, Index R

[감사의 글]
이 논문은 2026년 교육부 재원으로 국립목포해양대학교 국립대학육성사업의 지원을 받아 수행되었음.

열적 열화에 따른 Stress Grading Tape의 전기전도 특성 변화 분석

Analysis of Electrical Conductivity Characteristics of Stress Grading Tape under Thermal Aging

강대한[1], 함연우[1], 최민준[1], 양재희[1], 유태종[1], 김명진[1*]
[1]충북대학교 전기공학부
(*교신저자: mckim@cbnu.ac.kr)

고압 회전기기에서 고정자 권선의 절연성능은 설비의 안정적인 운전과 신뢰성 확보에 중요한 영향을 미치며 절연 열화가 진행될 경우 절연시스템의 성능과 신뢰성이 저하될 수 있다. 특히 고정자 코일의 오버행 영역에서는 접지층인 Conductive Armor Tape(CAT) 종단에 국부적인 전계 집중이 발생할 수 있으므로 이를 적절히 완화하는 것이 중요하다. 이러한 전계 집중을 완화하기 위해 비선형 전도특성을 갖는 Stress Grading Tape(SGT)가 적용되며 SGT의 전도특성은 코일 표면의 전위 및 전계분포에 영향을 미친다. 장기간 운전 과정에서 발생하는 열적 스트레스에 의해 SGT의 전도특성이 변화할 경우 전계완화 특성 역시 달라질 가능성이 있으므로 이에 대한 평가가 필요하다. 본 연구에서는 열적 열화에 따른 SGT의 비선형 전기전도 특성 변화를 규명하고자 하였다.

SGT 시편을 190 ℃ 오븐에서 열적 열화시키고, 누적 열화시간 120 h 간격으로 전도특성을 측정하였다. 측정은 약 30 ℃에서 수행하였으며, 1-10 kV의 DC 전압을 단계적으로 인가하고 각 전압 인가 후 1분 시점의 전류값을 전기전도도 산출에 사용하였다. 인가전압과 전극 간 거리로부터 전계를 산출하고, 측정 전류와 전류가 흐르는 단면적으로부터 전류밀도를 구한 후 전계에 대한 전류밀도의 비로 전기전도도를 계산하였다.

본 연구에서는 열적 열화시간에 따른 SGT의 비선형 전기전도 특성 변화를 측정하고 초기 상태와 비교하였다. 이러한 결과는 향후 열화된 SGT의 전도특성을 고정자 코일의 전계해석에 반영하여 장기 운전조건에서 전계완화 성능과 절연 신뢰성을 검토하기 위한 기초자료로 활용될 수 있어 의의가 있다.

주제어: 스트레스 그레이딩 테이프, 열적 열화, 전기전도도, 비선형 전도, 고정자 코일

Keywords: Stress Grading Tape, Thermal Aging, Electrical Conductivity, Nonlinear Conduction, Stator Coil

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과임.(2026-RISE-11-014-01)

초고압케이블 접속함 에폭시 마이크로콤포지트의 전기트리특성 연구

Study on Electrical Tree Characteristics of Epoxy Microcomposites for Extar-High Voltage Cable Joints

박재준[1]*,강민규[1], 김미르[1], 김재현[1], 최민기[1], 이세인[2], 전완수[3], 권태광[4], 나상호[5]

[1]*중부대학교 고양캠버스 전기전자공학과, [2]한국EDC기술㈜, [3]에스원, [4]타키온스, [5]한국폴리텍1대학

1. 연구 배경·문제 제기

초고압 케이블 접속함의 절연 성능은 전력 설비의 안정성과 수명을 결정짓는 핵심 요소이며, 전기 트리(Electrical Tree)는 치명적인 절연 파괴를 야기하는 주된 요인이다. 본 연구에서는 마이크로 실리카 충전제 혼입이 절연 수명 향상에 미치는 메커니즘을 규명하고자 하였다.이를 위해 순수 에폭시 수지와 65 wt% 마이크로 실리카 복합재의 전기 트리 거동을 비교 분석하였다.

2. 에폭시 트리 샘플 제조과정 및 시료구조

2.1 Sample Preparation

이를 위해 샘플제조는 두 종류의 샘플이 제조되었다. 하나는 MCF-200C가 충진되지 않은 원형에폭시로서 그림 1의 제조공정의 블록도를 나타내었다.

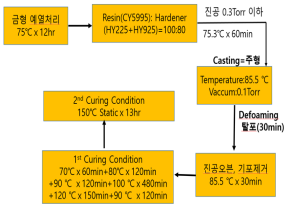


그림 1. Solid Epoxy CY5995/ HY225+HY925 Composites 제조 공정 (원형 에폭시:단일시스템)

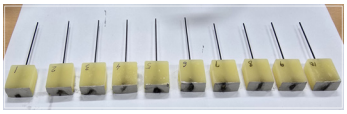


그림 2. Resin(CY5995)/ Hardener (HY225+HY925) Composites

다른 하나는 그림 3에서 보여진 바처럼 MCF-200C를 65wt% 충진시킨 콤포지트를 제조하였다.

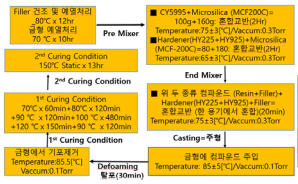


그림 3. Solid Epoxy CY5995 /HY225+HY925/MCF-200C _65wt% Composites 제조공정 (마이크로콤포지트)

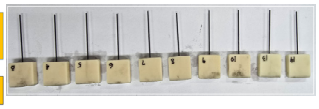
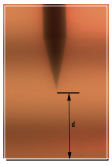
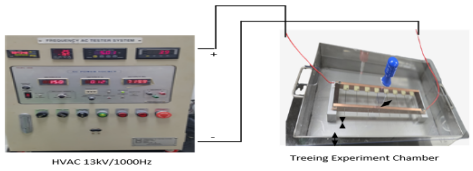


그림 4. Resin(CY5995)/Hardener (HY225+HY925)/ MCF200C_ 65wt% Composites

2.2 원형에폭시 및 Epoxy/Microsilica_65wt% 콤포지트 전기적 트리 실험 전극 및 절연파괴 시스템



(a) 트리샘플



(b) 원형 및 마이크로실리카_65wt% 콤포지트 전기적트리 열화 및 수명평가 시스템

그림 5. 전기 트리 열화 및 절연파괴실험 시스템

표 1. 전기 트리 시험용 시편 규격 및 전극 사양

항목	사양	비고
시편 재료 ①	CY5995 /HY225+ HY925 (순수 에폭시)	기본체
시편 재료 ②	CY5995 /HY225+ HY925/MCF-200C 65wt%	복합체
시편 크기 (트리 관측용)	20 × 20 × 3 mm	초기 7mm → 3mm 조정
시편 크기 (HVAC 파괴시험)	25 × 25 × 7 mm (절연 거리 4 mm)	IEC 60243 준용
침 전극 재질	텅스텐 (Ogura Jewelry Co., 일본)	
침 전극 직경	1 mm	
침 전극 길이	60 mm	
침 전극 선단 곡률반경	5 μm	고전계 집중 포인트
침 전극 선단 각도	30°	
접지 전극 형태	도전성 실버페이스트 코팅 평판형	
침-접지 전극 절연 거리	4.0 mm	전체 시편 공통

그림 5의 트리 실험 전극 및 시스템 구성도에 나타난 바와 같이, 순수 에폭시 및 65 wt% 마이크로 실리카 복합재 샘플은 원형(Bulk) 상태에서 높은 불투명도로 인해 광학 현미경을 통한 트리 관찰이 제한적이었다. 그런 이유로 원래 트리샘플의 초기 크기는 25 × 25 × 7 mm로서 몰드형 시편을 3 mm 이하의 두께로 정밀 연마(Polishing)함으로써 가시성을 확보하여 대략적인 트리 형상을 관찰할 수 있었다.이러한 광학적 한계를 보완하고 보다 정밀한 분석을 수행하기 위해, 최근에는 X-선 단층촬영(X-Ray CT)을 활용하여 트리의 진전 거동을 3차원적으로 시각화하고 측정하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

3. 결과 및 검토고찰

3.1 트리샘플의 장시간 HVAC 트리열화 및 수명평가

(1) 순수에폭시 수지(CY5995/HY225+HY925)

전기 트리 절연파괴 특성은 절연물의 장기 신뢰성을 평가하기 위한 핵심 지표로서, 트리 구조의 개시 및 진전 형태, 그리고 최종 파괴 전압 수준은 재료의 미세구조, 계면 물성, 전계 분포에 따라 큰 차이를 보인다.



(a) 191HR 14min (b) 191HR 14min

그림 6. 순수 에폭시수지 샘플에 13kV/1000Hz 인가전압 시간에 따른 10개 측정 샘플 중 191Hr14min 후 2개샘플 트리진전

순수 에폭시 수지(그림 6)는 침 선단에서 대향 전 극을 향해 매우 좁고 직선적인 가지형 (Branch- type) 트리가 지배적으로 발달하며 빠르게 관통 파괴에 도달하였다.

(2) 마이크로콤포지트 (CY5995/HY225+HY925/ MCF-200C_65wt%)

그림 7에서는 마이크로실리카_65wt% 콤포지트 트리샘플 9개를 전극에 삽입하여 HVAC 13kV/ 1000Hz 전원을 인가하여 파괴에 이르는 시간(수명)을 평가하였다.

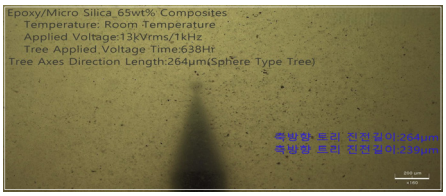


그림 7. 에폭시/마이크로실리카 콤포지트_65wt%의 638시간 후 톱으로 잘라 현미경으로 확인한 트리진전 영상 (구상트리)

마이크로 실리카 65 wt% 복합재료(그림 7)는 조밀 한 구상 트리(Spherical tree) 형태로 전이되어 진전 경로가 측방향으로 분산되었다.

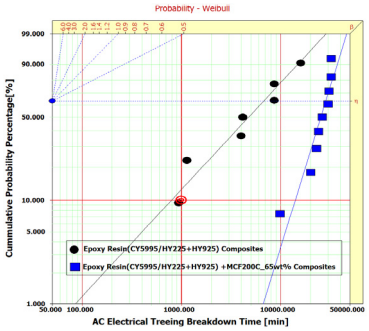


그림 8. 순수 에폭시 및 마이크로 복합체(MCF-200C 65wt%)의 장시간 교류 트리 절연 파괴 수명 와이불 플롯

표 2. 순수 에폭시 및 마이크로 복합체의 장시간 교류 트리 파괴 수명 와이불 파라미터

시편 계열	재료 구성	Scale Parameter α (h)	Shape Parameter β	수명 개선율 (%)
순수 에폭시	CY5995/HY225+HY925	178.6	3.84	기준 (100%)
마이크로 복합체	CY5995/HY225+HY925/MCF-200C 65wt%	934.8	4.82	+423% ↑

※ 시험 조건 및 측정샘플: AC 13kV/1000Hz, 상온(25°C). 실험은 순수원형에폭시 트래샘플은 7개, 마이크로콤포지트_65wt% 트리샘플은 9개의 샘플의 수명을 평가

4. 결론·의의

실험 결과, 순수 에폭시에서는 전극 대향 평판을 향해 고속으로 진전하는 전형적인 수지상(Branch-type) 트리가 관찰된 반면, 마이크로 실리카_65wt% 콤포지트에서는 방전 채널이 실리카 입자 주위로 우회·분기되면서 조밀한 구상(sphere-type)으로 전이되었다. 이로 인해 동일 전압 인가 조건에서 전체 절연파괴에 도달하는 시간이 423%로 비약적으로 연장되었다.

참고문헌

[1] J. J. Park, "A Study on AC Insulation Breakdown Characteristics of Epoxy/Micro silica/Micro alumina Mixed Composite for Eco-friendly Ultra-High Voltage GIS Spacer," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 71, no. 10, pp. 1525-1532, Oct. 2022.

[2] Park Jae-Jun 저, The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.62 No.11 (2013)

[3]. P. Preetha and M. J. Thomas, "Thermal degradation and glass transition temperature of epoxy nanocomposites," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no. 5, pp. 1531-1537, Oct. 2011.

[4].K. Kudo, "Dielectric properties of epoxy/silica micro- and nanocomposites," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, no. 6, pp. 1201-1207, Dec. 2005.

[5]. T. Tanaka, "Dielectric nanocomposites with address to dielectric properties: Interface perspective," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, no. 5, pp. 914-926, Oct. 2005.

주제어: 1. 전기트리 2. 에폭시 복합재료 3. 마이크로 실리카 4. 절연 수명

Keywords: 1. Electrical tree 2. Epoxy composite materials 3. Isolated life 4. Insulation life

Kapton 절연 REBCO 선재의 절연구조와 진공 조건에 따른 턴간 절연파괴 특성

Turn-to-Turn Dielectric Breakdown Characteristics of Kapton-Insulated REBCO Wires According to Insulation Structure and Vacuum Conditions

고기원[1], 구본혁[1], 김예찬[1], 반인후[1], 이제희[1], 장찬혁[1], 강형구[1*]

[1]국립한국교통대학교 전기공학과

(*교신저자: kang@ut.ac.kr)

전도냉각형 REBCO 코일은 진공 환경에서 운전되므로 턴간 절연파괴 특성의 파악이 필요하다. 본 연구에서는 진공도, Kapton 필름 두께 및 너비에 따른 턴간 특성 절연파괴전압의 변화를 규명하고자 하였다. Kapton 필름 절연 REBCO 선재 턴간 샘플에 상온에서 교류 전압을 인가하였으며, 조건별 6회 측정값에 2-파라미터 Weibull 분포를 적용하여 누적 파괴확률 63.2%에 해당하는 특성 절연파괴전압을 산출하였다. 진공도 비교를 제외한 실험은 0.1 Torr에서 수행하였다.

진공도를 0.1 Torr에서 10^{-5} Torr로 향상시킨 경우 특성 절연파괴전압은 0.47 kV에서 4.07 kV로 약 766% 증가하였다. Kapton 필름 두께를 12.5 μm에서 25 μm로 증가시킨 경우 0.40 kV에서 0.47 kV로 약 18%, Kapton 필름 너비를 7 mm에서 30 mm로 확대한 경우 0.47 kV에서 0.90 kV로 약 91% 증가하였다.

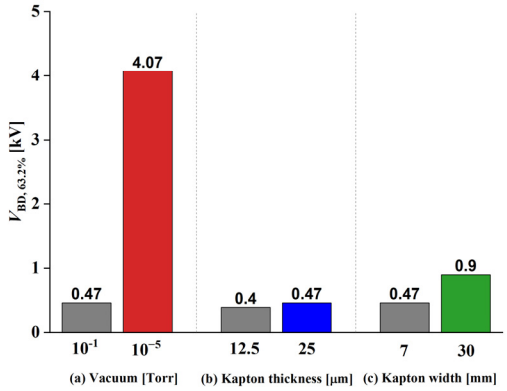


그림 1. 진공도, Kapton 필름 두께 및 너비에 따른 턴간 특성 절연파괴전압 (Weibull 분포, 누적 파괴확률 63.2%) 비교

특성 절연파괴전압 향상 효과는 고진공 확보, Kapton 필름 너비 확대, Kapton 필름 두께 증가 순으로 컸다. 이 결과는 전도냉각형 Kapton 필름 절연 REBCO 코일의 턴간 절연설계 시 진공도와 Kapton 필름 치수 선정의 정량적 근거로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: Kapton 필름 절연, REBCO 선재, 턴간 절연파괴, 진공도, Weibull 분포

Keywords: Kapton film insulation, REBCO wire, turn-to-turn breakdown, vacuum level, Weibull distribution

[감사의 글]

이 논문은 2025년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계 (RISE) (2025-RISE-11-004-05)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2026-25542125).

AI를 활용한 다각 구조 철탑의 설계 최적화에 관한 연구

A Study on AI-Assisted Design Optimization of Polygonal Tower

심다보[1], 오준암[1]
[1]한국전력공사 전력연구원

기존 4각 철탑의 경관 및 주민 수용성 문제에 대응하기 위해 관형지지물이 도입되었으나, 산악지에서는 부재의 분할 운반과 현장 접합에 따른 중량 증가 및 시공상의 제약이 발생한다. 본 연구에서는 관형지지물의 슬림한 외형과 운반·조립 여건을 고려하여, 다각 구조 철탑의 설계 최적화를 위한 형상별 특성과 설계 적용성을 분석하고자 하였다.

이를 위해 구조해석에 기반한 설계 검토와 AI를 활용한 자연어 기반 3차원 모델링 및 접합성 분석을 연계하였다. 그림 1과 같이 6각·8각·10각·12각 구조와 정사각 골조 3개로 구성한 12각 대안을 대상으로 접합 구성, 부재 배치 및 간섭 가능성을 비교하였다.

8각 구조의 평면상 90° 접합 구성은 십자형 주주재의 직교 형상에 부합한다. 정사각 골조 3개로 구성한 12각 대안도 직교 접합이 가능하지만, 검토한 배치에서는 수평재 일부의 이격이 필요하다. 이러한 조건을 고려하여 두 정사각 골조를 상대적으로 45° 회전시켜 배치한 8각 구조를 최적화 형상으로 선정하였다. AI를 활용하여 구현한 선정안의 3차원 모델은 그림 2와 같다. 이 결과는 구조적 요구조건과 제작·조립 여건을 함께 고려한 관형지지물 대체용 다각 구조 철탑의 설계에 활용될 것으로 기대된다.

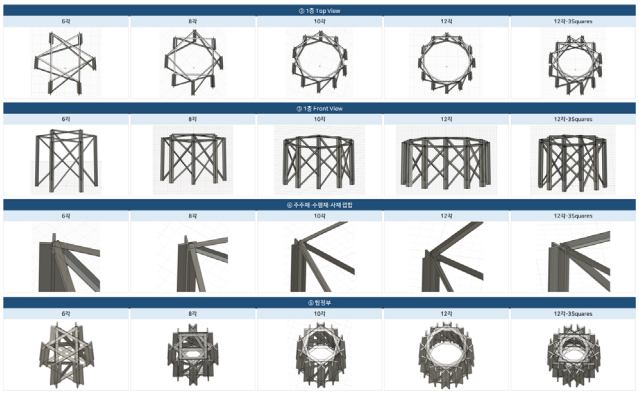
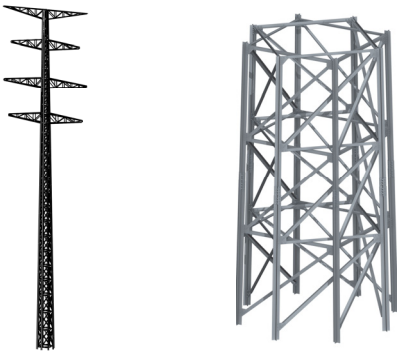


그림 1. 다각 구조 철탑의 형상 별 특성 비교



(a) (b)

그림 2. AI를 활용한 다각(8각) 철탑의 3차원 모델: (a) 전체 형상, (b) 부분 골조

주제어: 다각 구조 철탑, AI 활용 설계, 설계 최적화

Keywords: Polygonal tower, AI-assisted design, Design optimization

[감사의 글]
본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 관형지지물 대체용 다각 구조 철탑 설계기술 개발 연구과제의 지원으로 수행되었습니다.

온도에 따른 절연유 함침 프레스보드의 DC 도전율 특성 분석

Analysis of DC Conductivity Characteristics of Oil-Impregnated Pressboard at Different Temperatures

이재민[1], 유찬열[1], 배영준[1], 고원희[2], 박상훈[3], 이방욱[1*]
[1]한양대학교 전자공학과, [2]HD현대일렉트릭, [3]일진전기
(*교신저자: bangwook@hanyang.ac.kr)

HVDC 변압기의 DC 정상상태 전계 분포는 절연재료의 도전율에 영향을 받으며, 도전율은 온도에 따라 변화하므로 운전 온도에 따른 특성 평가가 필요하다. 실제 변압기 절연에는 다양한 두께의 프레스보드가 적용되므로 두께에 따른 도전율 특성을 파악할 필요가 있다. 기존 연구에서는 특정 두께의 프레스보드를 대상으로 도전율 특성이 주로 분석되어 왔다. 본 연구에서는 1, 2, 3mm 절연유 함침 프레스보드의 온도에 따른 DC 도전율 특성과 두께별 차이를 분석하고자 하였다.

실험에는 60mm × 60mm 크기의 프레스보드를 사용하였다. 시편을 12시간 이상 건조한 후 절연유에 담근 상태에서 40분간 진공 함침하고 대기압 상태에서 60분 이상 유지하였다. 각 시편에 DC 1kV를 인가하여 20, 40, 60, 80℃에서 두께 및 온도 조건별로 5회 측정하였다.

측정 결과, 모든 두께에서 온도 증가에 따라 도전율이 증가하였으며 두께에 따라 증가 양상에 차이가 나타났다. 표준편차는 60℃에서 80℃로 온도가 상승함에 따라 1mm에서 5.22에서 48.81 p.u., 2mm에서 53.73에서 383.05 p.u., 3mm에서 37.38에서 149.04 p.u.로 변화하였다. 이러한 차이는 동일 프레스보드 판재 내 시편 채취 위치에 따른 전기적 특성 차이, 내부 구조 및 함침 상태의 불균일성, 온도 상승에 따른 전하 운반자의 이동도 증가가 복합적으로 작용한 것으로 사료된다.

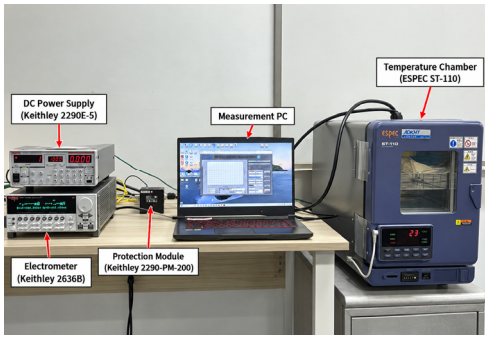


그림 1. DC 도전율 측정 시스템

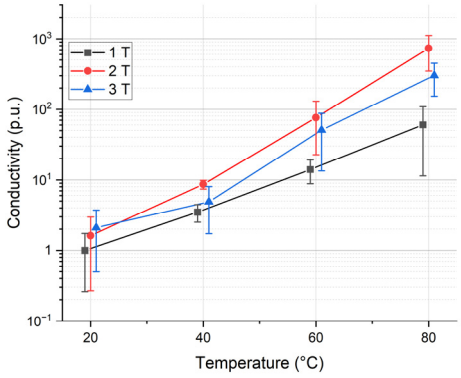


그림 2. 두께 및 온도에 따른 DC 도전율(p.u.)

주제어: 절연유 함침 프레스보드, DC 도전율, HVDC 컨버터 변압기

Keywords: Oil-impregenated pressboard, DC conductivity, HVDC converter transformer

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 HD현대일렉트릭과 일진전기의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다. (RS-2025-25460496, RS-2025-25462762)

관로 구간 타회선 고장에 따른 케이블 온도 특성 분석

Thermal Characteristics of Cable in a Duct by a Fault

나진용, 김동규, 임종필, 김민주, 정채균
한국전력공사 전력연구원
(skepd123@gmail.com)

다회선 관로에서는 케이블이 근접 배치되어 회선 간 열적 상호작용이 발생한다. 따라서 한 회선의 고장전류에 따른 순간적인 발열이 인접 정상 회선의 도체 온도에 미치는 영향을 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 154 kV XLPE 케이블로 구성된 4회선 관로를 대상으로, 단시간 고장 발생 전후와 고장전류 차단 후의 도체 온도 변화 특성을 분석하였다. 그림 1은 관로 해석 모델을 나타낸다. 관로의 폭과 높이는 각각 1,340 mm 및 900 mm이며 총 12개 케이블(4회선)을 4열 3단으로 등간격 배치하였다. 해석에는 토양 열저항률 0.9 K·m/W와 외부온도 25℃를 적용하였으며, XLPE 케이블의 최대 연속 운전 온도를 기준으로 산정한 연속허용전류를 운전 조건으로 설정하였다. 먼저 정상 운전 상태의 온도 분포를 산정한 후 4번 회선의 A, B, C상에 50 kA의 고장전류를 0.083 s 동안 인가하여 과도 온도 변화를 분석하였다. 그림 2는 고장 전 관로 구간의 온도 분포를 나타낸다. 고장 전 도체 온도는 82.30~90.17℃로, 3C와 4C에서 가장 높은 온도가 나타났다. 그림 3은 시간에 따른 4번 회선의 도체 온도 변화를 나타낸다. 고장 후 4A, 4B, 4C의 도체 온도는 각각 83.61℃, 87.77℃, 91.10℃로 상승하였다. 고장 전 대비 상승량은 각각 0.39℃, 0.40℃ 및 0.93℃이며 온도 변화율은 약 0.47%, 0.46%, 1.03%이다. 차단 후에는 온도가 점차 감소하며 고장 전 온도에 도달까지 239 s가 소요된다. 표 1은 각 회선 케이블 도체의 고장 전후 온도를 나타낸다. 4번 회선의 고장에 따른 1, 2번 회선의 도체 온도 변화는 없었으나 3C는 90.17℃에서 90.71℃로 0.54℃ 상승하였다. 결론적으로 본 연구에서 4번 회선의 단시간 고장이 인접 정상 회선의 도체 온도에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다

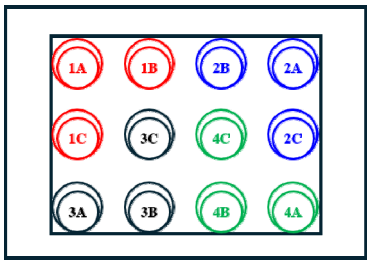


그림 1. 관로 모델

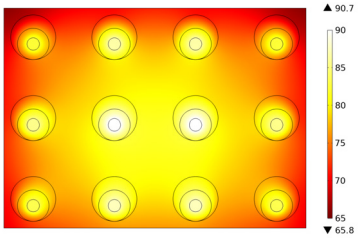


그림 2. 관로 구간 온도 분포

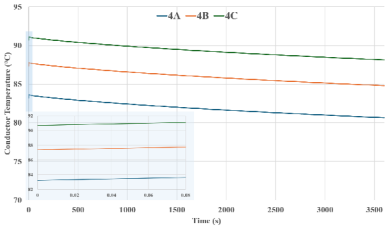


그림 3. 4A-B-C 도체온도 변화

케이블 회선		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
도체온도 (℃)	전	82.30	86.62	85.53	82.30	86.62	85.53	83.22	87.37	90.17	83.22	87.37	90.17
	후	82.30	86.62	85.53	82.30	86.62	85.53	83.22	87.37	90.71	83.61	87.77	91.10
변화율 (%)											+0.47	+0.46	+1.03

주제어: 관로, 케이블, 고장, 온도

Keywords: Duct, cable, failure, temperature

임펄스 환경에 따른 변압기 내부 전계 분포 특성에 대한 연구

Electric Field Distribution Characteristics Inside a Transformer Under Impulse Conditions

양재희[1], 권오민[1], 김명진[1*]
*충북대학교 전기공학부
(*교신저자: mckim@cbnu.ac.kr)

전력용 변압기는 전력계통을 구성하는 주요 설비의 하나로, 전력계통의 신뢰도에 끼치는 영향이 크다. 변압기의 운영 기간 중에는 다양한 형태의 과도상태에 노출될 수 있으며, 과도상태 동안 발생하는 다양한 가혹 조건에서도 변압기의 건선성이 요구된다. 전력계통의 스위칭 동작과 지락 고장 등의 원인으로 인하여 변압기는 과도 과전압 스트레스 (Transient Overvoltage Stress)에 노출될 수 있으며, 특별히 뇌임펄스에 노출된 변압기의 경우에는 정상 운전과 상이한 과도 전계 분포를 경험하는 것으로 알려져 있다. 이를 고려하여, 본 연구에서는 임펄스를 경험할 경우, 변압기의 각종 절연이 경험하게 되는 전기적 스트레스에 대한 분석을 시뮬레이션 기반으로 분석하였다.

임펄스가 변압기에 인가될 경우에는 권선 인덕턴스가 개방 회로로 작용하여 전압 분포가 그림 1과 같은 기생 정전용량 네트워크에 의해 결정된다. 이때, 전계 집중은 주절연 영역보다 종절연 영역에서 지배적으로 나타나는 경향이 있으며, 그 양상은 권선 구조 및 배치에 따라 달라진다. 또한, 이러한 전계 분포는 직렬 정전용량(Cs)과 대지 정전용량(Cg)간의 비율에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 해당 비율에 따라 선단 권선부에 전압이 집중되는 경향이 강해지며, 이로 인해 턴간/층간 절연부의 전계 부담이 증가할 수 있다.

이와 같은 기본적인 특성을 고려하여 본 연구에서는 등가회로 및 Ansys Maxwell을 활용한 유한요소해석 (Finnite Element Analysis: FEA)를 이용하여 뇌임펄스가 인가된 경우의 전계분포특성을 분석하였다. 또한, 변압기의 다양한 특성 변화에 따라 해당 전계분포특성이 어떻게 변동되는지에 대한 연구를 수행하였다.

주제어: 변압기, 임펄스, 분포정수, 전계불평등

Keywords: Transformer, Impulse, Distributed Constant, Non-uniform electric field

[감사의 글]
본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의하여 수행된 기초연구사업임. (RS-2026-25602302)

DC 코로나 개시전압 판정에 미치는 방전 반복률 및 임계값 설정의 영향 분석

Analysis of the Effects of Discharge Repetition Rate Criteria and Detection Threshold Settings on the Determination of DC Corona Inception Voltage

이제희[1], 구본혁[1], 김예찬[1], 장찬혁[1], 반인후[1], 고기원[1], 김용주[2], 강형구[1*]
[1]국립한국교통대학교 전기공학과, [2]O&M Korea
(*교신저자: kang@ut.ac.kr)

DC에서는 개시전압 부근의 부분방전 반복률이 낮아 부분방전 개시전압 (PDIV)이 판정 기준에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 판정 기준에 따른 DC 코로나 PDIV의 변화를 분석하였다.

CIGRE TB-849의 침-평판 전극계 (팁 반경 0.2 mm, 갭 10 mm)의 침 전극에 정극성 DC 6.3~6.5 kV를 0.1 kV 간격으로 인가하고, HFCT와 MTFA-50으로 전압별 5분간 PD를 측정하였다. 동일 신호에 배경잡음 최댓값 (47 mV)의 2·3·5배를 검출 임계값으로 적용하였다. 측정 시작부터 1분씩 나눈 5개 구간 중 하나 이상 (단일 구간) 또는 모두 (5분 지속)에서 PD가 검출된 최저 전압을 PDIV로 판정하였다.

6.3 kV와 6.4 kV에서는 5개 구간 중 2개에서, 6.5 kV에서는 모든 구간에서 PD가 검출되었다. PDIV는 단일 구간 기준 6.3 kV, 5분 지속 기준 6.5 kV로 0.2 kV 차이를 보였다. 이러한 판정 결과는 세 검출 임계값에서 동일하게 나타났다.

해당 결과는 DC 코로나 PDIV 판정 시 방전의 검출 여부뿐 아니라 관측 구간별 검출 지속성을 고려할 필요가 있음을 보여준다. 이는 DC 코로나 PDIV 판정 기준의 수립과 측정 결과의 재현성 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

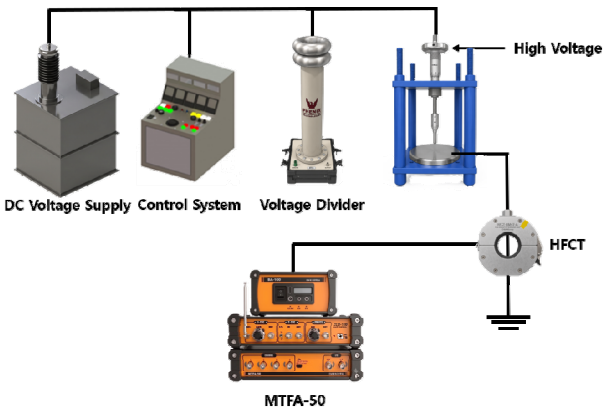


그림 1. DC PD 측정시스템 구성

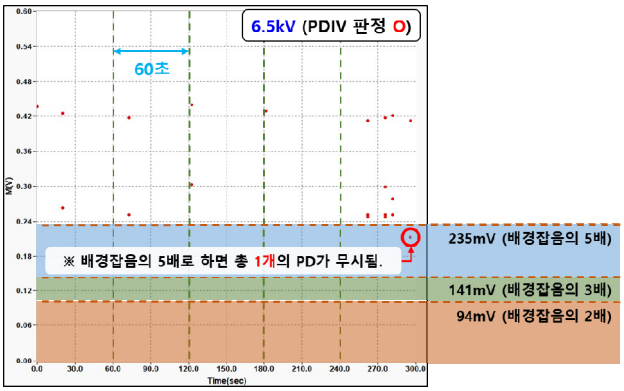


그림 2. 검출 임계값이 PDIV 판정에 미치는 영향

주제어: DC 코로나, 검출 임계값, 판정 기준, 부분방전 개시전압, PD 반복률

Keywords: DC corona, detection threshold, determination criterion, partial discharge inception voltage, PD repetition rate

[감사의 글]
본 연구는 HD현대일렉트릭의 지원과 2026년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20222480001596)

전하 트랩의 국소화 특성 분석을 위한 유효 퍼텐셜 모델링 연구

Effective Potential Modeling for the Analysis of Charge-Trap Localization Characteristics

황재은, 박혜리*
동아대학교 전기공학과
(*교신저자: bakery@donga.ac.kr)

전하 트랩에 포획된 전자의 전자상태와 공간적 국소화는 절연재료 내부의 전하 이동 및 트랩 간 상호작용을 이해하는 데 중요한 요소이다. 인접한 두 트랩 사이의 전자 파동함수 중첩과 외부 전계에 의한 퍼텐셜 비대칭은 전자의 공간적 분포를 변화시킬 수 있다. 본 연구에서는 1차원 유효 퍼텐셜 모델을 이용하여 단일 및 이중 전하 트랩에서의 전자 국소화 특성을 분석하였다. COMSOL Multiphisics에서 PDE 모듈을 통해 시간독립 Schrödinger 방정식을 구현하고, 깊이 1 eV, 폭 1 nm의 퍼텐셜 우물을 구성하였다.

단일 트랩의 파동함수 감쇠로부터 산출한 국소화 길이 ξ_{loc}는 0.2169 nm로 나타났다. 이중 트랩에서는 트랩 간 거리 d가 증가함에 따라 최저 상태의 두 에너지 준위 사이의 에너지 분할 $\triangle E$가 지수적으로 감소하였으며,

$$\triangle E(d) = \triangle E_{\mathrm{ref}} \exp\left(-\frac{d}{\xi_{\triangle E}}\right) \tag{1}$$

이를 식 (1)의 형태로 근사하여 얻은 특성 감쇠 길이 $\xi_{\triangle \mathrm{E}}$는 0.2170 nm였다. ξ_{loc}와 $\xi_{\triangle \mathrm{E}}$의 유사성은 단일 트랩의 파동함수 감쇠와 이중 트랩 간 결합의 거리 의존성이 동일한 공간적 감쇠 특성과 연관될 수 있음을 보여준다. 그림 1에서 $\triangle E$의 지수적 감소와 $\ln(\triangle E)$의 선형 관계가 제시되어 있다.

또한 외부 전계에 따른 전자상태의 좌·우 국소화 변화를 정량화하기 위해, 수치적으로 계산된 파동함수의 왼쪽 트랩과 오른쪽 트랩의 점유확률 P_{L}과 P_{R}로부터 유효 퍼텐셜 모델의 국소화 비대칭도 A_{EP}를 정의하였다. 이를 왼쪽과 오른쪽의 국소 상태만을 고려한 two-state 근사모델에서 얻은 비대칭도 A_{TS}와 비교하였다. 전계에 의한 두 트랩 사이의 에너지 차이를 $eE_{\mathrm{ext}}D_{\mathrm{cc}}$, 외부 전계가 없을 때의 에너지 분할을 $\triangle E_0$라 하면 전계-결합비는

$$\eta = \frac{eE_{\mathrm{ext}}D_{\mathrm{cc}}}{\triangle E_0} \tag{2}$$

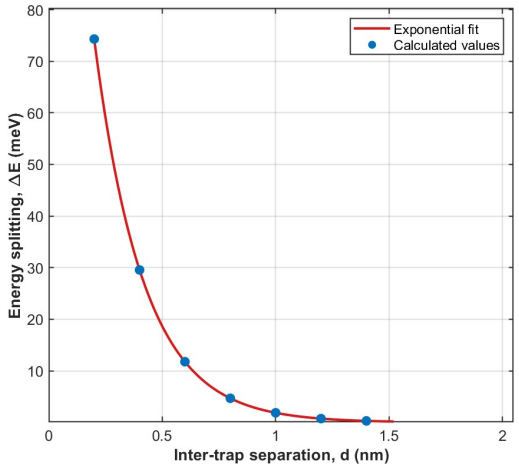
식 (2)로 정의된다. 그림 2에서는 A_{EP}와 A_{TS}는 η의 증가에 따라 0에서 증가하여 서로 유사한 경향을 나타냈다. 이를 통해 설정한 이중 트랩 모델에서 전자의 국소화 비대칭이 외부 전계에 의한 에너지 비대칭과 트랩 간 결합의 상대적 크기로 설명될 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 유효 퍼텐셜 모델은 인접 트랩의 파동함수 중첩, 에너지 분할 및 외부 전계에 따른 전자 국소화 변화를 정량적으로 해석하기 위한 기초 모델로 활용될 수 있으며, 향후 절연재료의 물성을 반영한 다중 트랩 및 전하 수송 모델 구축을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

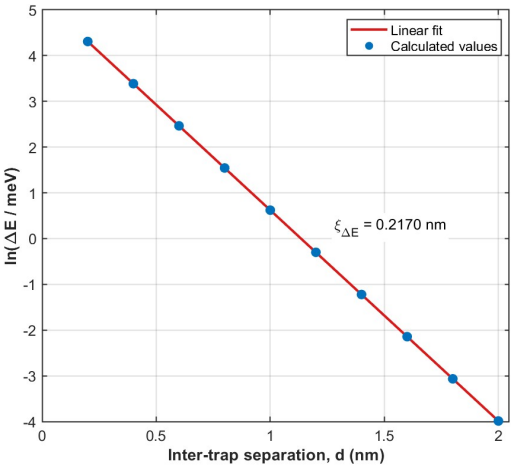
[표 1] 유효 퍼텐셜 모델의 주요 파라미터

Category	Symbol	Value	Physical quantity
Potential geometry	V_0	1.0 eV	Potential-well depth

	L_w	1.0 nm	Trap width
	d	1.0 nm	Inter-trap separation
	D_{cc}	2.0 nm	Center-to-center distance
Electronic state	m^*	9.109×10^{-31} kg	Effective mass (set to the electron rest mass)
	ξ_{loc}	0.2169 nm	Localization length
External control	ε	-0.10 ~ 0.10	Applied strain parameter
	E_{ext}	0 ~ 1 kV/mm	External electric field
Inter-trap coupling	$\triangle E_0$	1.862 meV	Zero-field energy splitting
	t	0.931 meV	Tunnel coupling
	$\xi_{\triangle E}$	0.2170 nm	Energy-splitting decay length

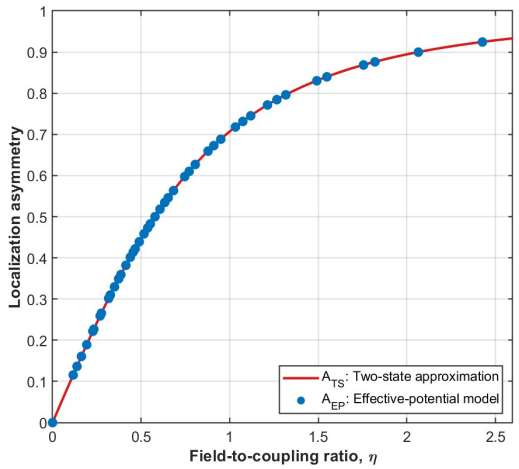


(a) 트랩 간 거리 d에 따른 에너지 분할 $\triangle E$의 변화



(b) $\ln(\triangle E/\mathrm{meV})$와 트랩간 거리 d의 선형 관계

[그림 1] 트랩 간 거리에 따른 에너지 분할 특성



[그림 2] 전계-결합비에 따른 전자상태의 국소화 비대칭

주제어: 전하 트랩, 국소화, 유효 퍼텐셜, 전자상태

Keywords: Charge trap, Localization, Effective potential, Electronic state

[감사의 글]
본 과제(결과물)는 교육부와 부산광역시의 재원으로 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 연구결과입니다. (2026-ANCHOR-02-003)

HVDC 변환용 변압기 진단시스템 개발

Development of a Condition Monitoring and Diagnostic System for HVDC Converter Transformers

정민경[1], 이종건[1], 구재홍[1], 주형준[1]
[1]전력연구원

HVDC 변환용 변압기는 교류 계통과 직류 변환설비가 연계되는 핵심 전력설비로서, 운전 중 전기적 스트레스, 열적 영향 및 기계적 진동이 복합적으로 발생한다. 이러한 복합 열화 요인으로 인해 발생하는 고장은 계통 운영 안정성에 영향을 미칠 수 있으므로, 다양한 이상상태를 조기에 검출하고 원인을 분석할 수 있는 통합 진단기술 확보가 필요하다.

본 연구에서는 HVDC 변환용 변압기의 주요 고장모드에 대응하기 위한 다중 센서 기반 진단시스템을 개발하고, 모의시험을 통해 진단 성능을 규명하고자 하였다.

개발된 진단시스템은 부분방전 검출을 위한 HFCT 및 UHF 센서, 이상진동 감시를 위한 3축 진동센서, 부싱 이상상태 검출을 위한 열화상 및 자외선 기반 진단 기능으로 구성하였다. 부분방전 진단 성능 검증을 위해 계통 과도해석 결과를 기반으로 Y-Y 상부, Y-Y 하부 및 Y-Δ 조건의 변환용 변압기 전압 환경을 구현하였으며, 코로나, 플로팅 및 보이드 등 8종의 모의결함을 적용하였다. 또한 이상진동 검증은 정격전류 대비 60%, 80%, 100% 운전조건에서 정상 및 이상상태를 반복 인가하여 판정 성능을 평가하였으며, 부싱 열폭주 검증은 120℃ 이상의 고온 상태를 모의하여 거리별 인식 성능을 확인하였다.

부분방전 검증 결과 HFCT 센서는 100%의 진단율을 확보하였으며, UHF 다이폴, 스파이럴 및 외장형 센서는 각각 97.78%, 99.07%, 96.76%의 검출률을 나타내어 목표 성능인 90% 이상을 만족하였다. 이상진동 검증에서는 모의 이상상태 90회에 대해 90회를 모두 판정하여 100%의 판정률을 확인하였으며, 정상상태를 포함한 전체 120회 시험에서도 100%의 상태판정 성능을 나타냈다. 또한 부싱 열폭주 검증에서는 1 m부터 50 m까지 7개 거리 조건에서 총 21회의 시험을 수행한 결과 모든 조건에서 고온상태를 인식하여 100%의 경보 발생 성능을 확보하였다. 추가적으로 UHF 부분방전 센서의 감도 평가 결과, 413~770 MHz 주파수 대역에서 S11 값이 -19.59~-28.5 dB로 측정되어 기준값인 -15 dB 이하를 만족하였다.

본 연구에서 개발한 HVDC 변환용 변압기 진단시스템은 전기적·기계적·열적 이상상태를 통합적으로 감시하고 판정할 수 있는 기술로서, 향후 HVDC 설비의 예방진단 및 상태기반 유지보수 체계 구축에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: HVDC 변환용 변압기, 진단시스템, 부분방전, 이상진동, 열화상 진단

Keywords: HVDC Converter Transformer, Diagnostic System, Partial Discharge, Abnormal Vibration, Thermal Imaging

[감사의 글]
본 과제는 한국전력공사 전력연구원에서 수행하는 과제명(R23TA16) 관련입니다..

VLF tanδ 판정기준의 발전과 개정

Evolution and Revision of VLF tanδ Diagnostic Criteria

천미소, 김가현, 서예슬, 김수정, 임장섭*
국립목포해양대학교
(*교신저자: janylim@mmu.ac.kr)

국내 22.9 kV 지중 배전케이블 설비는 1970년대 이후 지속적으로 확충되어 왔으나, 초기 설치된 케이블들의 설계 수명이 도래함에 따라 절연 열화 조기 진단 및 상태 평가의 중요성이 대두되고 있다. 특히 수트리(Water tree)는 중전압(MV) 케이블의 대표적인 열화 원인이며, 이를 진단하기 위해 초저주파(Very Low Frequency, VLF) tanδ 시험이 널리 활용되고 있다. 이에 본 연구에서는 국내외 VLF tanδ 시험의 상태 판정 기준 변천사와 발전 동향을 비교·분석하였다.

전 세계적인 가이드라인인 IEEE Std 400.2 기준은 6~10번 반복 측정된 tanδ의 평균(TD), 전압 증분에 따른 TD값의 편차(DTD) 및 시간안정성(TDTS)을 중심으로 케이블 상태를 평가하며, 2001년 제정 이후 2013년을 거쳐 최신 2024년 기준으로 개정되며 진단 적용 범위와 세부 판정 기준이 고도화되었다. 한편, 국내에서는 KEPCO의 현장 측정 데이터를 기반으로 복수의 진단 인자(TD, DTD, Skirt, STDEV 등)를 활용하는 UCD(Unified Condition Diagnosis) Matrix 및 MMU Index R 개념이 선행 연구를 통해 제안된 바 있다. 특히 MMU Index R은 각 진단 인자를 0~1 범위로 정규화하여 열화 상태를 종합적으로 평가하는 지수형 판정 기법으로, 개별 진단 인자의 독립적 임계값 평가에 의존하던 기존 방식의 한계를 보완하였다. 나아가 2024년에 새롭게 제안된 KEPCO Index는 특정 조건에서 Skirt 인자의 도출이 불가능해지는 기존의 한계를 보완하고자 TD, DTD, 시간적 변화량 및 표준편차를 종합적으로 반영하여 개발되었다.

본 연구에서는 IEEE 및 국내 진단 기준들의 평가인자, 판정 기준의 세분화 및 지수 산출방법을 비교하고, MMU Index R과 KEPCO Index의 구조적 차이를 검토하였다. 그 결과 VLF tanδ 판정기준은 전압안정성과 시간안정성 인자의 상관관계를 반영하는 종합적 상태평가 방식으로 발전하고 있음을 확인하였다. 이는 국내 지중배전케이블의 절연열화 진단 및 상태기반 유지보수 기준을 정립하기 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

주제어: 초저주파 유전손실정접, 지중배전케이블, 상태평가

Keywords: VLF tanδ, Underground Distribution Cable, Condition Assessment Index

[감사의 글]
이 논문은 2026년 교육부 재원으로 국립목포해양대학교 국립대학육성사업의 지원을 받아 수행되었음.

포스터 발표 2

전력설비 자산관리 II

(PS2 093~101)

좌장 : 박태식 교수(목포대학교)



Wasserstein 거리를 활용한 TDR 기반 케이블 상태 모니터링

TDR-Based Cable Condition Monitoring Using Wasserstein Distance

김윤겸[1], 권구영[2*]

[1]국립공주대학교 정보통신공학과, [2*]국립공주대학교 스마트정보기술공학과

(*교신저자: gykwon@kongju.ac.kr)

케이블의 상태 변화는 임피던스 불연속에 따른 반사신호의 변화로 나타나며, 이는 시간영역 반사파 계측법(TDR)으로 측정할 수 있다. 그러나 반사신호의 크기는 종단 부하와 측정 잡음의 영향을 받으므로, 다양한 운전 조건에서 케이블 상태 변화를 정량적으로 나타낼 수 있는 상태 지표가 필요하다. 본 연구에서는 반사신호 에너지의 거리축상 분포 변화를 이용한 TDR 기반 케이블 상태 모니터링 방법을 제안한다.

인가신호 구간을 제외한 TDR 반사신호를 제곱하여 거리별 에너지로 변환하고, 전체 에너지의 합으로 나누어 합이 1인 확률분포를 구성하였다. 이는 반사신호의 절대 크기 영향을 배제하고 에너지가 거리축상 어디에 분포하는지만 비교하기 위함이며, 정상 기준 분포는 종단 부하별로 잡음이 없는 정상신호 1개로 구성하였다. 이후 정상 기준신호와 측정신호의 누적분포 차이에 대한 절댓값을 거리축에 따라 적분하여 1-Wasserstein 거리를 상태 지표로 산출하였다. 이 값은 정상 분포를 측정 분포로 옮길 때 이동하는 에너지 비율과 이동 거리의 곱으로 해석된다. 종단 부하에 따른 정상 신호의 Wasserstein 거리 편차를 보정하기 위해 부하별 중앙값과 중앙값 절대편차(MAD)로 거리를 표준화하고, 전체 정상 신호에 대한 표준화 거리의 99번째 백분위수를 판정 임계값으로 설정하였다.

Keysight社 ADS에서 길이 35 m의 RG-58 동축케이블을 모의하고, 종단 부하 6개 조건(10~1000 Ω)과 고장 위치 6개 조건(5~30 m)을 구성하였다. 고장 저항은 10 Ω, 50 Ω, 200 Ω으로 제한하였으며, 각 조건에 SNR 25~40 dB(5 dB 간격)의 잡음을 5회씩 부가하였다. 정상 120개와 고장 2,160개로 구성된 총 2,280개 신호를 평가한 결과, 24개 종단 부하-SNR 조건에서 평균 AUROC 0.9687을 얻었다. 전체 종단 부하와 SNR 조건을 합친 통합 평가에서는 F1-score 0.9089, 재현율 0.8338 및 특이도 0.9833을 나타냈다.

고장 발생 시 케이블 종단에 집중된 반사신호 에너지 일부가 고장 위치 부근으로 이동하며 정상 분포와의 Wasserstein 거리가 증가하였다. 이를 통해 반사신호의 절대 크기 대신 반사신호 에너지의 공간적 분포 변화를 이용한 저저항 고장 상태 모니터링 가능성을 확인하였다. 향후 실제 케이블 측정 환경에서 종단 조건과 잡음 변화에 대한 추가 검증이 필요하다.

주제어: 시간영역 반사파 계측법, 케이블 상태 모니터링, Wasserstein 거리, 고장 검출

Keywords: Time-domain reflectometry, Cable condition monitoring, Wasserstein distance, Fault detection

[감사의 글]

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임 (No. RS-2026-25543600).

케이블 전파 모델을 활용한 S-파라미터 기반 고장 위치 및 반사계수 추정 기법

S-Parameter-Based Estimation of Cable Fault Location and Reflection Coefficient Using a Propagation Model

정형준[1], 권구영[2*]
[1]국립공주대학교 정보통신공학과, [2*]국립공주대학교 스마트정보기술공학과
(*교신저자: gykwon@kongju.ac.kr)

케이블의 국부 임피던스 변화에 따른 반사 응답에는 고장 위치와 정도뿐 아니라 전파 손실과 종단 조건의 영향이 포함된다. 따라서 입력단의 반사 응답으로 고장을 정량화하려면 케이블의 전파 특성을 고려한 해석이 필요하다. 본 연구에서는 손실을 고려한 ABCD 전파 모델의 응답과 입력단 복소 S_{11}의 정합을 통해 단일 저항 고장의 위치와 국부 반사계수를 추정하는 기법을 제안하고, 시뮬레이션으로 적용 가능성을 평가하였다.

Keysight社 ADS의 COAX_MDS 모델을 이용하여 길이 20 m의 RG-58 동축케이블을 구성하였다. 중심도체 반지름은 0.45 mm, 외부 도체 내·외반지름은 각각 1.475 mm, 1.8 mm, 상대유전율은 2.262, 손실탄젠트는 0.0042, 도전율은 5.8×10^{7} S/m로 설정하였다. 기준임피던스와 종단 부하는 모두 50 Ω이며, 1~200 MHz 대역의 복소 S_{11}을 0.1 MHz 간격으로 취득하였다. 전파 모델은 도체와 유전체 손실을 반영하고, 고장 전·후 선로와 고장부의 ABCD 행렬을 종속 연결하여 입력 응답을 계산하였다. 고장 형태별로 위치 199개(0.1~19.9 m, 0.1 m 간격)와 저항 25개(0.5~200 Ω, 로그 간격)를 조합한 4,975개 후보를 생성하고, 후보 응답 오차의 국소 최소점 중 오차가 작은 최대 5개를 초기값으로 선정하였다. Nelder–Mead 최적화로 복소 S_{11} 차이의 평균제곱오차를 최소화하여 위치와 저항을 추정하고, 추정 저항과 특성임피던스로 국부 반사계수를 산출하였다.

성능 평가는 위치 4.56 m, 10.35 m, 15.75 m와 저항 10 Ω, 40 Ω, 100 Ω을 조합한 직렬 고장 9개 및 병렬 고장 9개 조건에서 수행하였다. 시험 위치는 초기 후보 격자점과 겹치지 않도록 격자 사이에 두었다. 18개 조건의 위치 RMSE는 3.059 cm, 최대 절대 위치오차는 4.342 cm, 저항 RMSE는 0.246 Ω이었다. 설정 저항 기준 반사계수 RMSE는 8.332×10^{-4}, 복소 S_{11} 재현 RMSE는 1.001×10^{-2}였다.

본 연구에서는 전파 손실을 반영한 모델과 입력단 복소 S_{11}의 정합으로 고장 위치와 정도를 함께 추정할 수 있음을 시뮬레이션 조건에서 확인하였다. 다만 케이블 물성, 종단 조건 및 고장 형태가 알려진 경우를 가정하였으며, 반사계수 평가에는 모델 기반 기준값을 사용하였다. 향후 물성 불확실성의 영향을 분석하고 실제 케이블 측정을 통해 적용 범위와 신뢰성을 검증할 필요가 있다.

주제어: 케이블 고장 진단, S-파라미터, 전파 모델, 고장 위치, 반사계수

Keywords: Cable fault diagnosis, S-parameters, Propagation model, Fault location, Reflection coefficient

[감사의 글]
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임
(No. RS-2026-25543600).

냉동기 단기 정지 및 재가동에 따른 냉동창고의 전기·열 응답 특성 분석

Analysis of Electrical and Thermal Response Characteristics of a Cold Storage Warehouse during Short-Term Refrigeration System Shutdown and Restart

최성은, 서상욱, 유찬종, 장경훈*
한국건설생활환경시험연구원

정온물류창고의 냉동설비는 작업 중 출입문 개방과 운전 정지·재가동이 반복되며, 이에 따라 전기적 과도응답과 내부 온도변화가 발생한다. 본 연구에서는 실제 운전조건에서 냉동기의 단기 정지 및 재가동에 따른 전기·열 응답 특성을 분석하였다.

시험은 외기 33 ℃ 및 상대습도 87 %RH 조건의 실제 정온물류창고에서 수행하였다. 출입문은 11시 8분부터 11시 52분까지 개방하였고, 냉동기는 11시 8분부터 30분간 정지 후 재가동하였다. 시험 중 전력·전류·역률, 위치별 공기온도 및 고기류 제품의 품온을 측정하였다.

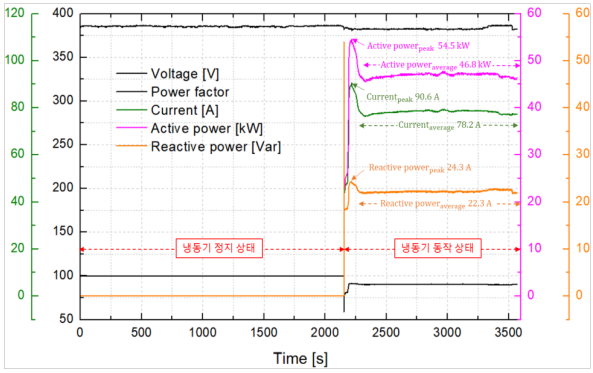


그림 1. Door 개폐 시 냉동기 작동에 따른 전력량

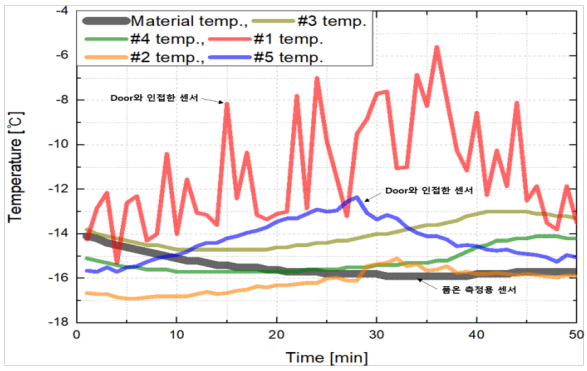


그림 2. Door 개폐 시 냉동기 동작에 따른 온도 변화

냉동기 재가동 시 순간 피크전력은 평균값보다 16.4 %, 피크전류는 13.6 % 증가하였다. 역률은 순간 50 %까지 감소한 뒤 평균 90.4 %를 나타냈다. 출입문과 가장 가까운 #1 센서는 개방 35분 시점에 -5.4 ℃의 피크값을 보였으며, #1 및 #5 센서는 개방 중 온도가 점진적으로 상승하였다. 반면 입구에서 먼 센서는 온도가 감소하는 경향을 보였고, 제품 품온은 출입문 개폐에 따른 변화가 나타나지 않았다.

따라서 냉동기의 30분 정지 후 재가동 시 전력·전류 피크와 일시적인 역률 저하가 발생했으나 제품 품온 변화는 확인되지 않았다. 본 결과는 냉동창고의 정지·재가동 조건과 전기·온도 응답을 고려한 운전관리 기준 마련을 위한 현장자료로 활용될 수 있다.

주제어: 냉동창고, 냉동기, 단기 정지, 재가동, 전기 열·응답

Keywords: Cold storage warehouse, Refrigeration system, Short-term shutdown, Restart, Electrical and thermal response

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 산업통상부 및 한국산업기술기획평가원 연구비 지원으로 수행되었음. (RS-2026-25563747, AI 기반 전력설비 화재 예방 스파크 사전 감지 센서 시스템)

실시간 건전도 평가를 위한 IGBT 모의시험 모델링에 관한 연구

A Study on IGBT Simulation Modeling for Real-Time Health Assessment

오정식[1], 김태훈[1], 박재덕[1], 박태식[1*]
[1]국립목포대학교 전기공학과
(*교신저자: Tspark@mnu.ac.kr)

[배경] 전력변환장치의 핵심 소자인 IGBT는 반복적인 전기·열적 스트레스에 의해 점진적으로 열화되지만, 실제 설비에서 장기간의 열화·고장 데이터를 충분히 확보하기에는 시간적·비용적 제약이 크다. 따라서 제한된 운영데이터를 보완하고 실시간 건전도 평가기법을 검토하기 위해서는 주요 열화모드에 따른 전기·열적 특성 변화를 재현할 수 있는 모의시험 모델이 필요하다.

[목적] 본 연구에서는 IGBT의 주요 열화모드에 따른 전기적·열적 진단변수의 변화를 재현할 수 있는 Simulink/Simscape 기반 모의시험 모델을 구축하고, 이를 통해 실시간 건전도 평가를 위한 진단특성 변화를 구현하고자 한다.

[방법 및 조건] 모의시험 모델은 MATLAB/Simulink 및 Simscape를 이용하여 FF50R12RT4 IGBT를 대상으로 구성하였으며, FF50R12RT4의 데이터시트를 기반으로 $V_{DC} = 600\,V$, $I_C = 50A$, $V_{GE} = 15\,V$ 및 $V_{CE(sat)} = 1.85\,V$의 기준 운전조건을 설정하였다. 열화 특성은 Hefei University of Technology에서 공개한 열화 데이터의 $V_{CE(sat)}$ 및 $V_{GE(th)}$ 변화추세를 각각 4차 다항식으로 회귀분석하여, 접속부와 게이트의 열화계수 K_{con}과 K_{gate}를 산출하여 모델에 적용하였다. 또한, 접합 온도는 데이터시트의 $R_{thJC} = 0.53\,K/W$와 4항 열 임피던스 모델을 이용하여 산정하였다. 표 1은 문헌 조사를 통해 정리한 IGBT의 FMEA에 따른 열화 및 고장 데이터 목록이다.

표 1 FMEA에 따른 IGBT 열화 및 고장 진단 데이터 목록

파라미터	주요 원인	진단 데이터
본드와이어 균열/Lift-off	전력 사이클링, 접합온도 변화, 재료 간 열 평창계수 차이	$V_{CE(on)}$, T_J, $V_{\geq}$
솔더층 피로/분리	열 사이클링, 고온 운전	T_C, T_J, R_{th}
게이트 산화막 열화	높은 전계, 고온, 장시간 게이트 스트레스	$V_{GE(th)}$, I_{GES}
개방 고장	본드와이어 단선, 내부 접속부 파괴	V_{CE}, I_C
단락 고장	칩 파괴, 과전압·과전류, 절연파괴	V_{CE}, I_C

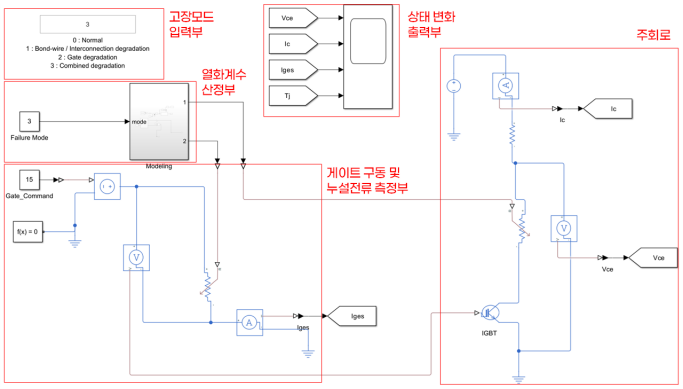
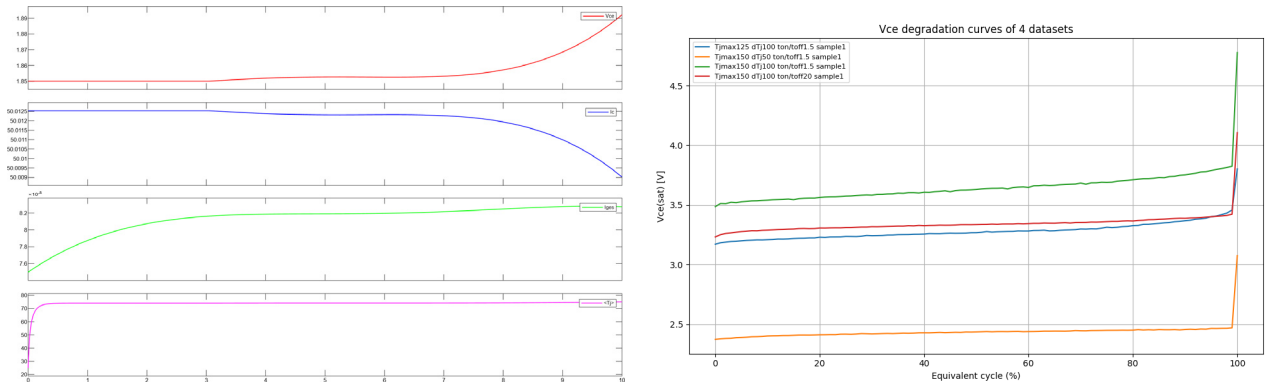


그림 1 IGBT 모의시험 모델링

[주요 결과] 모의시험 결과, 정상상태에서 V_{CE}는 약 $1.85\,V$, I_C는 약 $50A$, I_{GES}는 약 $75nA$로 나타났으며, FF50R12RT4 데이터시트의 기준 운전특성과 유사하게 재현되었다. 복합 열화모드에서는 등가 열화 시간 10초 동안 V_{CE}가 약 $1.85\,V$에서 $1.89\,V$로 약 2.2% 증가하였고, I_{GES}는 약 $75nA$에서 $83nA$로 약 10.7% 증가하였다. 이에 따라 I_C는 약 $50.013A$에서 $50.009A$로 소폭 감소하였으며, 접합온도 T_j는 약 $74℃$ 수준에서 열화 진행에 따라 점진적으로 증가하였다. 또한, V_{CE}는 초기 완만한 변화 이후 후반부에서 증가폭이 커지는 비선형 열화 경향을 나타내어 적용된 4차 다항식 기반 열화 모델의 특성을 확인하였다.



(a) (b)

그림 2. IGBT 열화 모의시험 결과 및 비교 : (a) 모의시험 결과 (b) gEOL 열화 데이터

모델의 열화경향 비교를 위해 gEOL 연구에서 공개한 IGBT power-cycling 실험데이터를 활용하였다. 해당 데이터는 서로 다른 조건에서 측정된 $V_{CE(sat)}$와 cycle 정보를 포함하며, 각 시험의 cycle을 정규화하여 비교하였다. 비교 결과, 시험조건에 따라 $V_{CE(sat)}$의 절대값과 증가폭에는 차이가 있으나, 모든 시험에서 열화 초기·중기에는 완만한 증가를 보이고 수명 말기에는 증가율이 급격히 증가하는 공통적인 비선형 경향을 확인하였다.

[결론] 본 연구에서는 FF50R12RT4 IGBT의 데이터시트와 열화 실험데이터를 기반으로 주요 열화모드에 따른 파라미터 변화를 재현할 수 있는 Simulink/Simscape 기반 모의시험 모델을 구축하였다. 또한 외부 power-cycling 실험데이터와의 비교를 통해 $V_{CE(sat)}$가 열화 초기에는 완만하게 증가하고 수명 말기에는 증가율이 커지는 비선형 경향을 유사하게 재현함을 확인하였다. 이를 통해 제안 모델은 실제 운영데이터 확보가 어려운 IGBT의 열화특성 분석과 향후 실시간 건전도 평가 알고리즘 검증을 위한 모의시험 환경으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: 자산관리, 건전도 평가, IGBT

Keywords: Asset Management, Health Assessment, IGBT

[감사의 글]

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 전남광주통합특별시의 재원으로 전라남도앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커) 특성화지방대학(글로컬대학) 30의 결과입니다.(2026-ANCHOR-14-001)

본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단-이공학학술연구기반구축(R&D)사업(대학중점연구소_글로컬랩)의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 결과입니다. (RS-2025-25398164)

DGA 기반 절연유 유종·고장유형 분류와 자산관리 적용 가능성

Gas Generation Characteristics and DGA Interpretation in Ester-Filled Transforemrs: Implications for Asset Management

김아름[1], 전태현[1], 곽병섭[1], 김은영[1], 박현주[1*]

[1]한전 전력연구원

(*교신저자: hjpark123@kepco.co.kr)

변압기 절연유가 광유에서 최근 친환경성과 난연성을 갖춘 에스테르계 절연유로 점차 전환되고 있으나, 현행 DGA 표준은 전통적인 광유 기반으로 널리 통용되고 있어, 이를 에스테르유에 그대로 적용할 경우 오진단으로 이어질 수 있다. 또한 다양한 유종이 변압기 자산 포트폴리오에 사용됨에 따라 이를 고려한 위험평가 체계의 필요성이 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 DGA 데이터를 활용하여 절연유 종류 및 내부 고장유형을 분류할 수 있는지 기본적인 타당성을 평가하고 규명하고자 하였다.

이를 위해 실험실 규모에서 열화·방전 시험을 통해 확보한 463개 DGA 데이터(합성 에스테르 291개, 천연 에스테르 115개, 광유 57개)를 대상으로 주요 가연성 가스 농도, 로그변환값, 전통적 DGA 비율(Duval 등) 등을 입력변수로 구성하였다. 이후, 절연유 종류(3종) 및 합성 에스테르 고장유형(방전·열적 열화 2종) 분류를 위해 로지스틱 회귀(LR)와 랜덤 포레스트(RF)를 학습하였으며, RandomOverSampler와 홀드아웃(0.2)·5-fold 교차검증을 병행 적용하여 최종적으로 모델간 기초 성능을 비교하였다.

최적모델로 선정된 RF는 절연유 종류 분류에서 홀드아웃 가중 F1 0.948(5-fold CV 평균 0.919±0.032), 고장유형 분류에서 홀드아웃 F1 1.000(5-fold CV 평균 0.978±0.019)을 기록하였다. 입력 변수들의 기여도 분석 결과 절연유 종류 분류는 CH_4·C_2H_6 계열 탄화수소 조성비가, 고장유형 분류는 C_2H_4 관련 Duval 비율 및 CO/CO_2 지표가 상위 변수로 나타나 유종과 결함 분류에 영향을 미치는 주 요인이 서로 상이함을 확인하였다.

이 결과는 절연유 종류별 특화 고장예측 및 상태감시 체계 구축을 위한 기초 단계로서 의의가 있으며, 유종이 혼재된 변압기 자산 포트폴리오의 위험평가와 교체계획 수립, 대규모 자산군 단위의 상태감시 체계로 확장될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 현장 운영 데이터를 통한 일반화 검증을 수행하고 모델 고도화를 진행할 계획이다.

주제어: 용존가스 분석, 합성 에스테르, 머신러닝, 상태감시, 자산관리

Keywords: Dissolved Gas Analysis, Synthetic Ester, Machine Learning, Condition Monitoring, Asset Managment

배전용 대용량 신규 피복 가공전선 운전용량 실증 평가

Field Demonstration and Evaluation of the Ampacity of a New Large-Capacity Covered Conductor for Distribution Systems

성재경[1], 정종만[1], 박창열[1]
[1]한국전력공사 전력연구원

AI 확산에 따른 분산 전원 및 대용량 부하 증가로 인한 배전선로의 운전용량 증대 필요성이 대두되고 있으며, 특히 대용량 선로의 용량 증대 방안이 시급한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 신규 개발 중인 배전용 PP절연 피복 가공전선을 대상으로 기존 운전용량 대비 20% 상향된 수준의 전류용량에 대한 실증평가를 수행하였으며, 외부 환경조건 및 접속 개소를 고려한 대용량 배전선로의 최대 허용 운전용량을 검증하고자 하였다.

신규 전선의 운전용량 실증을 위하여 한전 고창전력시험센터 내 대용량 가공 배전선로를 구성하였으며, IEC 61597 표준 기반 피복 가공전선의 전류용량평가 기준으로 산출된 열적 최대허용전류의 약 89 % (비상시 운전용량) 수준인 AC 650 A 전류를 상시 인가하여 약 26일간 실증하였다. 또한, 실증 기간 중 기상 정보 취득을 위하여 일사량계, 온도계 및 풍속계를 전주 상단부에 설치하여 대기 환경 정보를 실시간으로 계측하였으며, 열전대를 통한 전선 및 슬리브 접속 개소의 도체 표면 온도를 상시 계측하였다.

본 실증에 인가된 전류는 신규 전선의 피복 절연층을 고려한 IEC 61597 표준에 따라 산출되었으며, 주요 환경 및 전선 조건은 외기 온도 40 ℃, 일사량 1,000 W/m^2, 풍속 0.5 m/s, 전선 도체저항 0.115 Ω/km, 절연체 허용온도 120 ℃, 흡수율 0.9, 방사율 0.9를 적용하였다. 실증 기간 중 계측된 환경 정보는 최대 온도 35.42 ℃, 최대 일사량 1,455 W/m^2, 최대 풍속 7.15 m/sec 로 계측되었으며, 신규 전선 및 접속 개소의 도체 표면 온도는 슬리브 및 절연커버 취부 조건에 따라 최저 22.7 ℃ ~ 최대 108.1 ℃ 수준으로 측정되었다.

실증을 통해 계측된 환경 정보는 전선의 열적 허용용량 측면에서 IEC 표준에서의 기준값보다 가혹한 수준으로 평가되며, 현재 운전용량 대비 약 20% 상향된 전류에서의 전선 및 접속 슬리브 도체 표면 온도가 120℃ 미만인 점을 고려했을 때, 신규 개발 전선의 열적 허용용량은 한국전력공사에서 추진 중인 20% 상향된 운전용량을 만족하는 것으로 판단되며, 향후 배전 실선로 시범사용 및 본격 사용 적용을 기대한다.

주제어: 배전용 가공전선, IEC 61597, 배전선로 운전용량

Keywords: Overhead Distribution Conductor, IEC 61597, Distribution Line Ampacity

[감사의 글]
이 논문은 한국전력공사 전력연구원 연구과제의 지원으로 수행되었음. (No.R24DA02)

전력설비 투자가치 기반 투자계획 최적화 기법별 성능 분석

Performance Analysis of Optimization Methods for Investment Value-Based Investment Planning of Power Equipment

안병현[1], 황재상[1], 이홍석[1], 최우성[1*]
[1]한전 전력연구원
(*교신저자:zest-woosung@kepco.co.kr)

전력설비는 산업화 시기에 설치된 다수의 설비가 노후화되고 있으나 전력수요 증가, 계통 대전환 등으로 투자재원 확보에 어려움이 가중되고 있다. 이에 따라, 자산관리 기술을 활용한 비용 효율적 투자방안에 관한 관심이 증대하고 있으며, 본 연구에서는 투자가치 기반 전력설비 투자계획을 수립하였으며 최적화 기법별 성능을 분석하였다.

이번 연구에서는 APM 평가 결과 잔여 수명이 낮은 6만 대의 주상변압기를 대상으로 3개년 교체계획을 수립하였다. 연간 교체물량은 10%, 연간 예산은 물가 상승률을 고려해 3개년 합을 1p.u.로 0.30, 0.34, 0.36, 연간 고장 리스크는 현재 총량의 90% 이내로 제한하고, 기존 우선순위, Greedy, GA, MILP를 비교하였다.

표 1은 최적화 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 기존방식(성능기반 우선순위)을 1p.u로 설정하였을 때 Grredy 방식은 투자가치가 0.14%, SAIDI 저감량이 1.28% 낮았다. GA와 MILP 방식은 투자가치를 약 5%, SAIDI 저감량을 약 1.4% 개선하였으며, 두 방식의 투자가치 차이는 0.0015% 이내였다. 다만 MILP는 GA보다 약 2.4배의 계산시간이 소요되었다.

MILP는 설비 수, 제약조건, 데이터 다양성에 따라 계산시간이 급격히 증가할 수 있으므로 대규모 문제에서는 GA가 유리할 가능성이 있다. 다만 본 결과는 단일 조건이므로 추후 다양한 설비와 제약조건으로 검증할 예정이다.

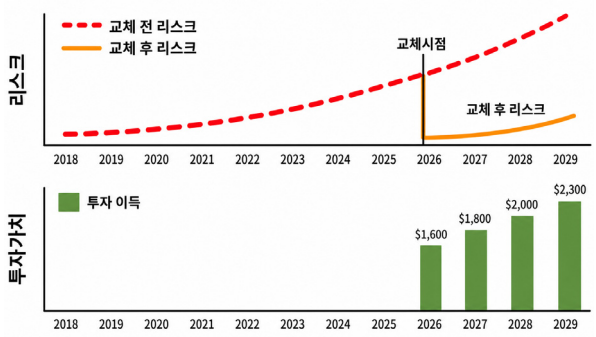


그림 1. 전력설비 투자가치 개념

구분	투자가치	투자비용	SAIDI 저감량	계산시간 [초]
성능기반 우선순위	1.00	1.00	1.00	0.16
Greedy	0.99 (▽0.14%)	1.00 (-)	0.99 (▽1.28%)	0.22
GA	1.05 (△4.97%)	1.00 (△0.01%)	1.05 (△1.35%)	58.97
MILP	1.05 (△4.97%)	1.00 (-)	1.05 (△1.40%)	138.66

표 1. 시뮬레이션 결과 비교

주제어: 투자가치, 자산투자계획, 최적화, 유전 알고리즘, 혼합 정수 선형 계획법

Keywords: Investment Value, Asset Investment Planning, Optimization, Genetic Algorithm, Mixed Integer Linear Programming

열적 등가 연령을 반영한 CNAIM 기반 몰드변압기의 건전도 평가

CNAIM-Based Health Assessment of Cast Resin Transformers Considering Thermal Equivalent Age

구본혁[1], 김예찬[1], 이제희[1], 장찬혁[1], 반인후[1], 고기원[1], 강형구[1*]
[1]국립한국교통대학교 전기공학과
(*교신저자: kang@ut.ac.kr)

몰드변압기는 권선을 에폭시 수지로 주형한 건식변압기로, 공기 냉각 방식으로 인해 부하 및 주위 온도 변화에 따른 권선 열점 온도의 변동이 크며, 이에 따른 열적 열화가 운전 이력에 따라 누적된다. 영국 배전사업자의 CNAIM(Common Network Asset Indices Methodology)은 정상 기대수명(Normal Expected Life, NEL)을 위치계수(Location Factor, LF)와 부하계수(Duty Factor, DF)로 보정한 기대수명과 운전연령을 기반으로 초기 건전도 점수를 산정한다. 그러나 DF는 설치 계통의 부하 수준을 대표하는 단일 계수이므로, 시간별 부하 변화와 온도 이력에 따른 열적 수명 소모를 반영하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 몰드변압기의 실제 열점 온도 이력을 반영하기 위해 열적 등가 연령(Thermal equivalent age, Age_{eq})을 운전연령 대신 적용하여 CNAIM 초기 건전도 점수 산정 방식을 개선하고자 하였다.

E사의 B종 몰드변압기를 대상으로 KS C IEC 60076-12의 열 노화 모델을 적용하여 시간별 열점온도에 따른 노화율을 산정하고, 예상 운전조건에서의 기준 노화율 대비 실제 누적 열화량을 등가 연령으로 변환하였다. 이후 산정된 Age_{eq}를 기존 운전연령 대신 CNAIM 초기 건전도 점수 계산에 적용하였다.

운전연령 15년의 가정 운전이력 4종에 적용한 결과, 평균 부하율 0.5를 적용하여 DF를 산정한 조건에서는 Age_{eq}가 운전연령과 동일하게 산정되어 기존 CNAIM 평가 결과와 일치하였다. 반면 평균 부하율이 감소한 0.45 조건에서는 Age_{eq}가 6.1년으로 감소하여 건전도 점수가 개선되었으며, 부하율이 매년 증가한 조건과 일간 부하 변동이 커진 설비는 각각 23.2년, 23.6년으로 증가하여 열적 열화가 크게 반영되었다.

제안 방법은 기존 CNAIM의 Health Score-PoF 평가 체계를 유지하면서 실제 운전 열이력을 반영할 수 있으므로, 동일 운전연령을 가진 몰드변압기의 차등 평가와 정밀 점검 대상 선정 및 교체 우선순위 결정에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: 아레니우스 수명 모델, 몰드변압기, CNAIM, 건전도 점수, 열적 등가 연령

Keywords: Arrhenius life model, Cast-resin transformer, CNAIM, Health score, Thermal equivalent age

[감사의 글]
본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술진흥원(KIAT) (과제번호 : RS-2026-25500724)과 2026년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20222480001596)

UHF 부분방전 센서 감도 시험을 위한 유효높이 적용 방안

Application of Effective Height for Sensitivity Testing of UHF Partial Discharge Sensors

최원[1*], 석복렬[1], 조종호[2]
[1]대림대학교 전기공학과, [2]SMND
(*교신저자: wonchoi@daelim.ac.kr)

가스절연개폐장치(GIS)와 전력용 변압기 등 변전설비의 절연 진단에는 UHF 부분방전(PD) 센서가 널리 활용되며, 센서의 감도는 진단 신뢰성을 좌우한다. 그러나 기존 시험법은 감도를 상대적·정성적으로만 확인하여 센서 간 절대 비교와 재현성 확보가 어렵다.

종래에는 규격(IEC 60270, 한전 GS-6110 등)에 따라 일정 거리에서 기준 방전전하량의 검출 여부와 출력 레벨로 합·부를 판정하거나, 벡터 회로망 분석기(VNA)로 반사손실 S11만 확인하는 방식으로 시험하였다. 이러한 방식은 설치 거리·기준신호·현장 환경에 따라 결과가 달라지고 절대 감도를 정량화하지 못해, 서로 다른 센서나 기기 간 비교가 곤란하다.

본 연구에서는 기존 UHF 부분방전 센서 감도 시험법의 한계를 분석하고, 유효높이(Effective Height)를 적용한 정량 시험법의 효용을 규명하고자 하였다. GTEM Cell 기반 UHF Calibration System을 구성하여 균일 전자기장 환경을 형성하고, 상용 UHF 센서를 대상으로 대상 대역에서 입사 전계 E[V/m] 대비 출력전압 Vo[mV]를 측정하여 유효높이 He = Vo/E [mm]를 산출하였다. 동일 센서에 대해 종래의 방전전하량 기반 합·부 시험과 S11 측정을 병행하여 두 방법을 비교하였다.

그 결과, 종래 시험에서 모두 "적합"으로 판정된 상용 센서들이 유효높이 기준으로는 서로 구별되는 값을 나타내어, 기존 시험법이 구분하지 못한 감도 차이를 정량적으로 식별할 수 있음을 확인하였다. 또한 유효높이의 주파수 응답은 반복 측정에서 재현성 있게 확인되었으며, 반사손실(S11)이 양호하여도 유효높이가 낮은 사례가 존재하여 정합 특성만으로는 감도를 판단하기 어려움을 확인하였다.

유효높이 기반 시험법은 기존 센서의 감도를 정량적·재현성 있게 평가하여 센서 간 객관적 비교를 가능하게 하므로, 향후 UHF 부분방전 센서의 감도 검증 및 표준 시험 절차로 유효높이 방법을 적용하는 것이 효과적이다.

주제어: 부분방전, UHF 센서, 유효높이, 감도 시험법, GTEM Cell

Keywords: Partial Discharge, UHF Sensor, Effective Height, GTEM Cell

[감사의 글]
해당 사항 없음

포스터 발표 2

광전자 및 전자파

(PS2 102~113)

좌장 : 박형준 책임(한국전자통신연구원)



전이금속이 도핑된 광섬유 코어의 광-열 변환 특성을 이용한 감쇠 계수 제어형 마이크로히터

Attenuation-Controlled Microheaters Utilizing Photothermal Conversion in Transition-Metal-Doped Fiber Cores

김연관, 박유빈, 김보현, 안태정*
조선대학교 광기술공학과
(*교신저자: taejung.ahn@chosun.ac.kr)

광통신·광센서용 소자를 하나의 광섬유 위에 집적하려면 국소적으로 열을 발생시키는 구조가 필요하지만 지금까지의 광섬유 마이크로히터는 대부분 별도의 광열 코팅층을 입혀야 했고 표준 단일모드 광섬유(SMF)에 바로 접속하기가 까다로웠다. 본 연구에서는 알루미노실리케이트 코어에 Co^{2+}, Fe^{2+}/Fe^{3+} 이온을 공동 도핑한 금속 도핑 광섬유(MDF)가 1480 nm에서 갖는 흡수 특성을 이용해 코팅 없이 감쇠계수만으로 발열 온도와 발열 구간의 길이를 조절할 수 있는지 규명하고자 하였다. MDF는 MCVD 공정으로 형성한 다공성 실리카층에 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 전구체 용액을 함침시켜 제작했으며, 감쇠계수가 9.45, 12.58, 32.43 dB/cm인 세 종류를 각각 10 mm 길이로 잘라 SMF에 직접 융착했다. 1480 nm DFB 레이저 다이오드로 빛을 입사시켜 적외선 열화상 카메라(FLIR A700, 측정 온도 범위 0~650 ℃로 설정)로 표면 온도를 5회 반복 측정했고, 광섬유 브래그 격자(FBG)로 별도 검증했으며, Beer-Lambert 분포열원과 원통핀 모델을 결합해 예측식을 세웠다. 367 mW 인가 시 세 시료의 최대 표면온도는 각각 166 ℃, 268 ℃, 478 ℃로 감쇠계수가 클수록 높아졌고, 반치폭(FWHM) 기준 발열구간 길이는 10.6 mm에서 2.8 mm로 줄었다. 한 개 시료의 데이터로 보정한 모델만으로 나머지 두 시료의 최대온도를 5~21% 오차 안에서 맞혔고, FBG로 측정한 값과는 18 ℃ 이내로 일치했으며, 아크릴레이트 재코팅 층을 실제로 탄화시켜 발열 성능을 육안으로도 확인했다. 감쇠계수 하나로 온도와 발열 위치를 함께 설계할 수 있다는 뜻이며, 코팅 공정 없이 SMF에 바로 융착하여 쓸 수 있는 초소형 히터로 가스센서, PCR 시료 가열, 웨어러블 열소자 등에 적용할 수 있다. 특히 전기 배선 없이 구동되고 EMI에 영향받지 않는 특성상 향후 GIS용 SF_6 분해가스 능동형 센서, 전력기기 능동 열진단, 변압기유 상태 모니터링 등 전력·전기 분야로도 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 전이금속 도핑 광섬유, 광-열 변환, 마이크로히터

Keywords: Transition-metal-doped optical fiber, Photothermal conversion, Microheater

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 정부(산업통상지원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원(No. RS-00411221, 2026년 산업혁신인재성장지원사업)과, 2026년도 한국전자통신연구원(ETRI) 연구운영지원사업(No. 26ZK1100, 호남권 지역산업 기반 ICT 융합기술 고도화 지원사업)의 지원을 받아 수행된 연구임

수직 전극 기반 다채널 Lock-in amplifier를 이용한 금속 위치 식별 시스템

Discrimination of Metal Position Using a Multi Channel Lock-in Amplifier Based on Vertical Electrodes

박기쁨, 안주희, 한나연, 심성민, 김정무*

전북대학교 전자공학부

(*교신저자: jungmukim@jbnu.ac.kr)

본 연구는 수직 전극 구조를 적용한 6채널 디지털 Lock-in amplifier 기반 금속 위치 식별 시스템을 제안한다(Fig.1). 제안 시스템은 300 × 150 mm² 영역에 센싱 전극과 여기 전극을 수직으로 배치하고, 여기 전극에 10 kHz, 20 Vpp 교류 신호를 인가한다. 금속 물체는 전극 간 전기장을 왜곡하여 임피던스를 변화시키며, 물체의 위치에 따라 각 센싱 전극에서의 신호 변화량이 달라진다. 위치 추정은 두 단계로 이루어지며, 채널별 변화량 패턴을 기준 위치 후보들과 비교하여 가장 유사한 후보를 선택하고, 해당 영역과 인접한 위치 후보 간 변화량 비율로 좌표를 보간한다. 반지름 27.5 mm(높이 30 mm)의 알루미늄 원통형 도체를 15개 지점에서 측정한 결과, 위치 오차(측정 좌표와 기준 좌표 간 유클리드 거리)는 평균 8.39 mm, 최대 13 mm였다(Fig.2). 본 연구는 수직 전극 구조와 6채널 디지털 Lock-in amplifier를 결합하여, 센싱 영역 전반에서 평균 8.39 mm(최대 13 mm)의 위치 오차로 금속 물체의 위치를 추정하였다. 향후 자동화 공정의 이물질 검출 및 로봇 위치 인식 센서로 응용될 수 있다.

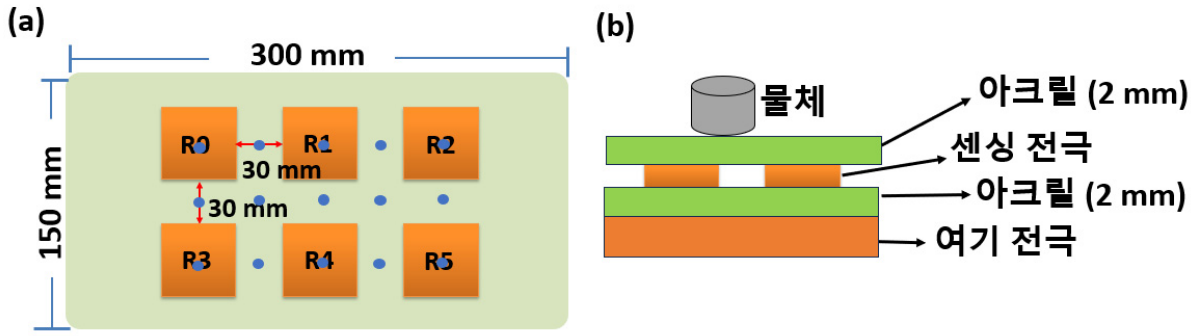


Fig.1. (a) 수직 전극 구조 평면도 및 측정 포인트(파란색 점), (b) 수직 전극 구조 단면도

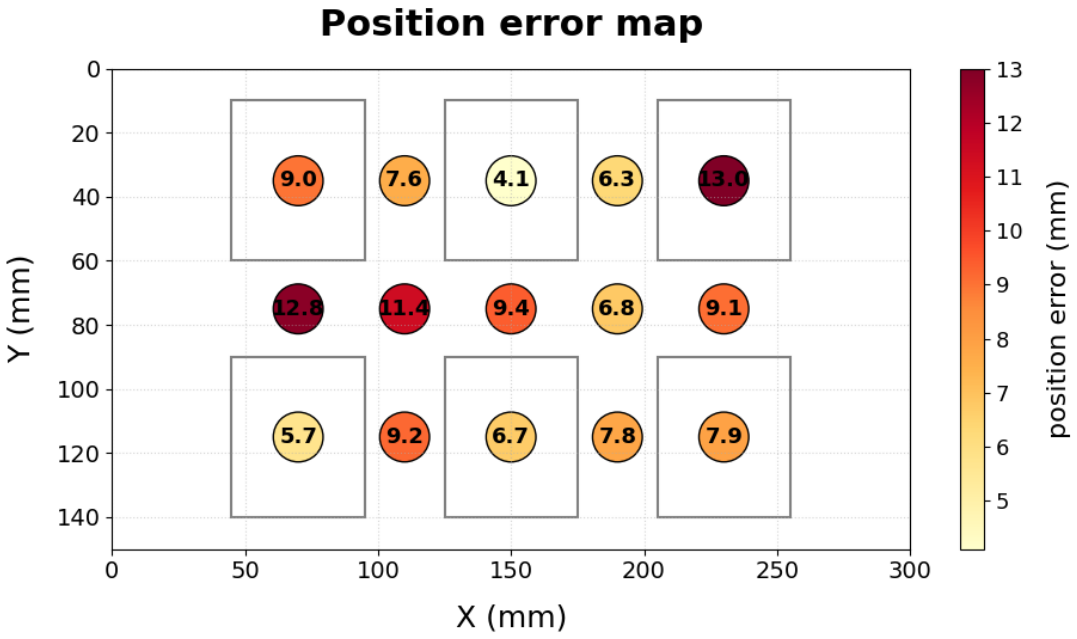


Fig.2. 위치 오차 결과 그래프

주제어: 임피던스, 락인앰플리파이어, 전기장

Keywords: Impedance, Lock-in amplifier, Electric field

[감사의 글]
이 논문은 과학기술정보통신부의 지원을 받아 한국연구재단(NRF)의 연구비 지원으로 수행됨. (RS-2025-02303659)

임피던스 변화를 이용한 수위 레벨 센서

Water Level Sensor Using Impedance Variation

한나연, 안주희, 박기쁨, 심성민, 김정무*
[1]전북대학교 전자공학과
(*교신저자: jungmukim@jbnu.ac.kr)

비접촉식 수위 측정 기술은 유체 취급이 필요한 산업 및 로봇 공학 분야에서 그 중요성이 커지고 있다. 본 연구에서는 전극이 부착된 컵의 재질과 내부 수위에 따른 임피던스 변화를 분석하여, 이를 로봇 팔에 부착 가능한 촉각 및 수위 레벨 센서로 활용할 수 있는 가능성을 규명하고자 하였다. PLA 및 유리 재질의 컵 외부에 전극을 부착하고, 1 Vpp 인가 전압 하에서 주파수 대역을 변화 시켜가며, 전극 간 capacitance 차이를 Transimpedance amplifier와 Lock-in amplifier를 이용해 전압 신호의 크기를 측정하였다. PLA 컵은 컵의 Impedance가 우세해 기울기가 선형성을 유지하며 평균 13.3 mV/MHz(0 ml)에서 44.0 mV/MHz(60 ml)로 3.3배 증가하였다. 유리컵은 40 ml부터 컵의 Impedacne보다 물의 Conductance가 지배적으로 작용해 3-5 MHz 기울기가 1-3 MHz 대비 92% 이상 감소하였다. 본 연구 결과는 향후 로봇 팔이 다양한 재질의 컵을 인식하고 내용물 양에 맞춰 알맞은 힘으로 물건을 다루게 해주는 Tactile sensor로 활용될 수 있을 것이다.

(a)

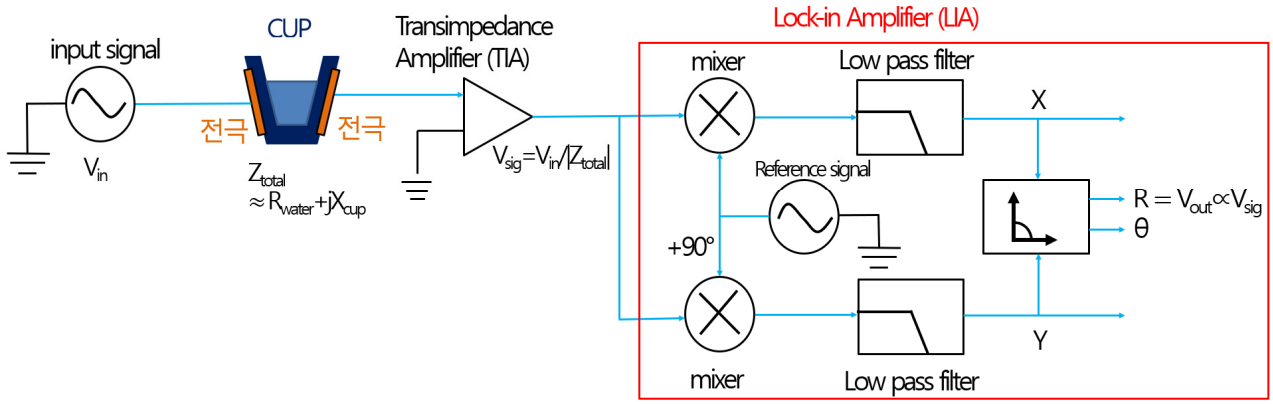


Fig 1. (a) 실험 다이어그램

(b)

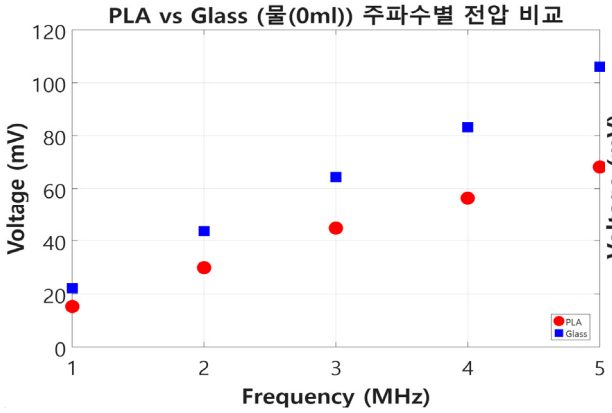


Fig 2. (b) 컵 내부 물이 0 ml 일 때 주파수별 전압

(c)

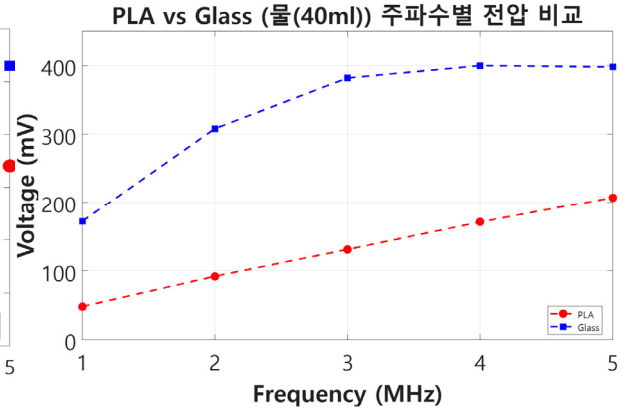


Fig 3. (c) 컵 내부 물이 40 ml 일 때 주파수별 전압

주제어: 비접촉식 수위 센서, 임피던스, 재질 인식, 촉각 센서, 주파수 응답

Keywords: Non-contact liquid level sensor, Impedance, Material recognition, Frequency response

[감사의 글]

본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 한국연구재단(NRF)의 연구비 지원(RS-2025-02303659)으로 수행되었다.

편광 제어형 필터의 스펙트럼 응답 모델링 및 조정 메커니즘 해석

Spectral Response Modeling and Tuning Mechanism Analysis of a Polarization-Controlled Filter

박소연[1], 함상우[1], 이용욱[1,2,*]
[1]국립부경대학교 4차산업융합바이오닉스공학과, [2]국립부경대학교 전기공학전공
(*교신저자: yongwook@pknu.ac.kr)

광통신 및 광 네트워크 시스템에서는 원하는 파장 성분을 선택적으로 분별하고 불필요한 광 신호를 제거하기 위하여 출력 스펙트럼의 형태와 파장을 정밀하게 조정할 수 있는 광섬유 필터가 요구된다. 본 연구에서는 편광 제어형 광섬유 필터에서 지정된 투과 스펙트럼(specified transmission spectrum: 이하 STS)의 형성 원리를 모델링하고, 편광 조절에 따른 스펙트럼 응답의 조정 메커니즘을 규명하고자 하였다. 제안된 필터는 4단자 편광 빔 분배기, 길이 7.12 m의 편광 유지 광섬유(polarization-maintaining fiber: 이하 PMF) 2개, 사분 파장판(quarter-wave plate: 이하 QWP) 4개 및 이분 파장판 1개로 구성하였다. PMF의 복굴절은 4.166×10^{-4}로 설정하였으며, 각 광학 소자를 Jones 행렬로 수식화하여 전체 전달 행렬과 투과도 함수를 도출하였다. 또한 QWP의 방위각을 조절하면서 출력 스펙트럼을 계산하고, 제작된 필터의 투과 스펙트럼을 분해능 0.02 nm의 광 스펙트럼 분석기로 측정하였다. QWP 방위각 조합을 변화시킨 결과, STS의 중심 파장은 1548.0003 nm에서 1548.6893 nm까지 약 0.1 nm 간격으로 연속적으로 이동하였으며, 약 0.8 nm의 채널 간격을 유지하였다. 또한 위상 변화와 중심 파장 변화 사이의 선형 회귀 분석에서 R^2을 얻어 편광 조절에 따른 파장 응답이 0.99911의 높은 선형성을 갖는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 QWP의 방위각 조절을 통해 STS의 형태와 파장을 정밀하게 제어할 수 있음을 의미하며, 다양한 스펙트럼 응답이 요구되는 광통신 시스템의 파장 선택 소자에 활용될 수 있다.

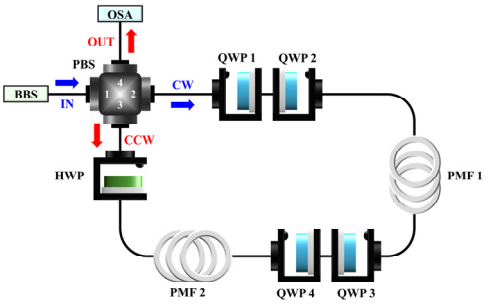


그림 1. 제작한 필터의 모식도

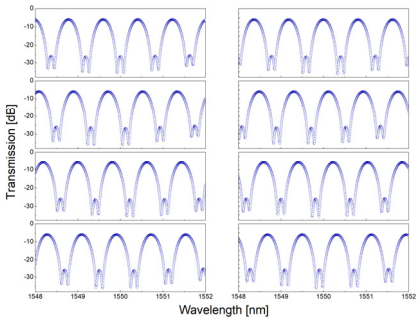


그림 2. 측정된 투과 스펙트럼

주제어: 광섬유 필터, 다파장 스펙트럼, 파장판

Keywords: Optical fiber filter, Multiwavelength filter, Wave plate

[감사의 글]
본 결과물은 교육부와 부산광역시의 재원으로 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 연구결과입니다. (2026-앵커-02-001-036)

다중 모드 광섬유에 새겨진 나선형 장주기 광섬유 격자를 기반으로 한 변형률, 온도 동시 측정

Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Based on a Helical Long-Period Fiber Grating Inscribed in Multi-Mode Fiber

함상우[1], 박소연[1], 이용욱[1,2,*]

[1]국립부경대학교 4차산업융합바이오닉스공학과, [2]국립부경대학교 전기공학전공

(*교신저자: yongwook@pknu.ac.kr)

광섬유 센서는 전자기 간섭에 강하고 소형·경량이라는 장점으로 구조물 건전성 모니터링에 활용되고 있으나, 장주기 광섬유 격자(LPFG)의 공진 딥은 변형률과 온도에 동시에 반응하므로 두 물리량 간 교차 민감도가 측정 신뢰성을 저하시키는 문제가 있다. 본 연구에서는 다중 모드 광섬유(MMF)에 새겨진 나선형 LPFG(H-LPFG)의 두 공진 딥이 갖는 민감도 차이를 이용하여 변형률과 온도를 동시에 분리 측정할 수 있는지를 규명하고자 하였다. 센서는 SMF-MMF-SMF 구조로 접속한 MMF 구간에 360°의 비틀림을 인가한 후, CO_2 레이저(PWM 4.5%, 주사 속도 32 mm/s)로 주기 384 μm, 20주기(격자 길이 약 4.3 cm)의 격자를 새겨 제작하였다. 변형률은 0-2000 με 범위에서 222.2 με 간격으로, 온도는 40-100 °C 범위에서 5 °C 간격으로 인가하였으며, 광 스펙트럼 분석기로 투과 스펙트럼을 측정하였다. 제작된 센서의 투과 스펙트럼에는 1465 nm와 1560 nm 대역에 두 공진 딥(Dip A, Dip B)이 형성되었다. 변형률 민감도는 Dip A에서 −1.32 pm/με, Dip B에서 −1.78 pm/με(R^2 = 0.998)로 측정되었으며, 온도 민감도는 Dip A에서 26.64 pm/°C, Dip B에서 41.11 pm/°C(R^2 = 0.977)로 측정되었다. 두 딥의 민감도로 구성한 2×2 민감도 행렬의 행렬식이 D = -6.846으로 0이 아님을 확인하여, 역행렬 연산을 통해 변형률과 온도를 독립적으로 복조할 수 있음을 검증하였다. 제안된 H-LPFG 센서는 단일 격자만으로 교차 민감도 문제를 해결할 수 있어 스마트 구조물의 변형률 계측 및 산업 현장 모니터링에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

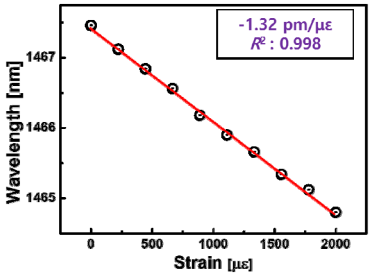


그림 1. 제작한 필터의 모식도

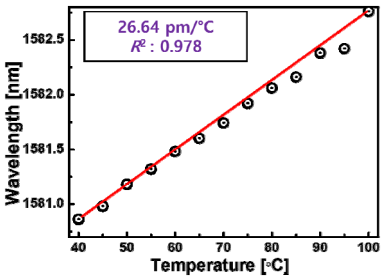


그림 2. 측정된 투과 스펙트럼

주제어: 광섬유 센서, 다중모드 광섬유, 장주기 광섬유 격자

Keywords: Optical fiber sensor, Multi-mode fiber, Long-period fiber grating

본 결과물은 교육부와 부산광역시의 재원으로 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 연구결과입니다. (2026-앵커-02-001-036)

전력계통 통신 인프라 적용을 위한 기상환경 모델을 활용한 자유공간 광통신 링크 특성 연구

Study on Free-Space Optical Communication (FSOC) Link Characteristics using Weather Models for Power System Communication Infrastructure Applications

조민재, 안정현, 박시웅*
전북대학교 전자공학부
(*교신저자: swp@jbnu.ac.kr)

산악지형이나 도서지역에 위치한 전력설비는 통신 경로의 구축 및 유지관리가 용이하지 않으며, 자연재해 발생 시 기존 유선 통신 경로의 가용성이 저하될 가능성이 있다. 따라서 전력설비 간 통신의 연속성을 확보하기 위해서는 기존 유선망을 보완할 수 있는 독립적인 무선 전송 경로와 함께, 실제 운용 환경의 변화에 따른 링크 성능을 사전에 예측할 수 있는 분석 체계가 필요하다. 본 연구에서는 전력설비 간 보조 통신 경로로 활용 가능한 자유공간 광통신(FSOC, Free-Space Optical Communication)을 대상으로, 강우 및 안개 환경에서의 채널 변화를 실측 자료에 기반하여 모델링하고 기상 조건에 따른 링크 운용 특성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

기상 조건에 따른 광 채널 특성을 반영하기 위하여, 정밀한 기상 조건 재현이 가능한 국내 시험 환경에서 사전에 확보된 광전송 측정 자료를 활용하였다. 강우 강도와 안개에 따른 가시거리 변화를 주요 환경 변수로 설정하고, 각 조건에서 관측된 광 신호 감쇠 특성을 기반으로 기상 의존형 채널 모델을 구성하였다. 이후 해당 모델을 양방향 FSOC 링크 시뮬레이션에 적용하여 환경 변수의 변화에 따른 수신 신호 수준과 데이터 링크 성능을 분석하고, 기상 조건별 통신 가능 영역의 변화를 평가하였다.

분석 결과, 강우량 증가와 가시거리 감소에 따라 광 채널의 손실이 증가하였으며, 강우와 안개는 서로 상이한 형태의 링크 성능 변화를 나타내는 것으로 분석되었다. 또한 기상 조건이 악화됨에 따라 수신 신호 여유도가 감소하고 안정적인 데이터 전송이 가능한 운용 영역이 변화하는 것을 확인하였다. 이러한 분석을 통해 기상 상태와 광 채널 손실 및 링크 성능 간의 관계를 정리하고, 환경 조건별 FSOC 운용 범위를 설정하기 위한 기초 특성을 도출하였다.

본 연구는 기존 실측 자료를 활용하여 전력설비용 FSOC 링크의 기상 의존적 채널 특성을 모델화하고, 이를 기반으로 다양한 기상 조건에서의 통신 성능을 사전에 평가할 수 있는 시뮬레이션 분석 방법을 제시한다. 도출된 결과는 향후 산악 및 도서지역의 전력설비 통신 경로 설계, 송·변전 설비의 원격 감시망 구성 및 재난 발생 시 임시 통신 링크의 운용 조건을 결정하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

주제어: 자유공간 광통신, 전력계통 통신, 기상 조건, 스마트그리드, 링크 분석

Keywords: Free-Space Optical Communication, Power System Communication, Weather Condition, Smart Grid, Link Analysis

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 교육부 및 전북특별자치도의 재원으로 전북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (2026-RISE-13-JBU)

전력설비 통신망의 강우 환경 대응을 위한 자유공간 광통신 빔 발산 특성 연구

A Study on Beam Divergence Characteristics of Free-Space Optical Communication for Power System Communication Networks under Rain Conditions

안정현, 조민재, 박시웅*
전북대학교 전자공학부
(*교신저자: swp@jbnu.ac.kr)

전력계통의 안정적인 운용을 위해서는 송·변전 설비 간 고속·고신뢰 통신 인프라의 확보가 중요하다. 그러나 산악 및 도서 지역과 같이 통신 인프라 구축과 유지보수가 제한적인 환경에서는 집중호우를 비롯한 악천후로 인해 기존 유선 통신망의 안정성이 저하될 가능성이 있다. 본 연구에서는 전력 통신망의 생존성과 운용 신뢰성을 향상시키기 위한 대안으로 자유공간 광통신(FSOC, Free Space Optical Communication) 기술을 고려하고, 강우에 따른 광 신호 감쇠 환경에서 적응형 빔 발산각(Beam Divergence Angle) 제어를 위한 기초 특성을 분석하였다.

이를 위해 서로 다른 파장 채널을 이용하는 FSOC 시스템을 구축하고, 송신부에 모터라이즈드 파이버 스테이지(Motorized Fiber Stage)를 적용하여 빔 발산 특성을 가변적으로 조절할 수 있도록 구성하였다. 국내 정밀 통제형 기상 시뮬레이션 시설에서 사전에 취득한 강우 환경별 광 감쇠 측정 데이터를 기반으로 강우 강도에 따른 광 채널 감쇠 모델을 구성하였다. 구축된 채널 모델을 이용하여 다양한 강우 조건에서 빔 발산각을 단계적으로 변화시키면서 수신 신호 특성과 링크 성능의 변화를 분석하였다. 이를 통해 강우 감쇠 수준, 빔 발산각 및 수신 신호 성능 간의 관계를 분석하고, 강화학습 기반 적응형 빔 제어에 활용할 수 있는 상태-제어-성능 매핑 데이터를 구성하였다.

분석 결과, 동일한 강우 환경에서도 빔 발산각 설정에 따라 수신 신호 및 링크 성능이 상이하게 나타났으며, 강우 감쇠 수준에 따라 적절한 빔 발산 조건이 변화하는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 채널 상태에 따른 빔 발산각의 제어 범위와 운용 조건을 정의하고, 해당 결과가 강화학습 기반 빔 발산각 제어를 위한 사전 데이터 및 제어 정책 설계에 활용할 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 실측 기반 강우 채널 모델과 빔 발산각 변화에 따른 광 링크 응답 특성을 연계하여 악천후 환경에서 적응형 FSOC 제어를 위한 기초 데이터를 구축하였다는 데 의의가 있다. 향후 본 연구에서 구축한 데이터를 기반으로 실시간 채널 상태에 대응하는 강화학습 기반 빔 제어 정책을 설계 및 고도화하고, 전력 통신망 환경에서의 운용 안정성을 검증할 예정이다.

주제어: 자유공간 광통신, 전력계통 통신, 빔 발산각 최적화, 강우 감쇠, 강화학습 제어

Keywords: Free-Space Optical Communication, Power System Communication, Beam Divergence Optimization, Rain-induced Attenuation, Reinforcement Learning Control

[감사의 글]
이 논문은 2026년도 교육부 및 전북특별자치도의 재원으로 전북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (2026-RISE-13-JBU)

GIS 기반 전력설비 측정개소 선정에 관한 기초 연구

A Basic Study on the Selection of Measurement Sites for Power Facilities Using GIS

홍지수[1], 최경섭[1], 안호성[1*]
[1]한국전력공사

전력설비 주변의 전기환경 특성을 분석하고 송·배전 복합환경 조건의 예측 모델을 개발하기 위해서는 다양한 설비조건을 고려한 측정 데이터의 확보가 필요하다. 이에 앞서 측정 목적에 부합하는 대상을 선정하는 과정이 필수적으로 요구된다. 기존의 지도 플랫폼 기반 위성 자료를 활용한 방법은 설비의 위치만을 확인할 수 있지만, 타 전력설비 여부를 알아보기 어려워 주변 환경조건을 직접 확인해야 하는 번거로움이 있었다. 더불어 측정 목적에 부합하는 다수의 후보지를 파악하고, 후보지와 전력설비 간의 위치 관계 및 거리를 일괄적으로 파악하는 데 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 GIS를 기반으로 송전선로와 도로의 위치 및 방향 관계를 활용하여 목적에 부합하는 전기환경 측정 대상을 선정하는 방법을 제시하고 그 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

송전선로와 도로 등 서로 다른 공간정보의 위치를 동일한 기준에서 비교하고 정확한 거리를 산출하기 위해 전체 데이터의 좌표계를 통일하였다. 이후 GIS에 송전선로와 도로 공간정보를 구축하고 도로와 송전선로의 진행 방향을 비교하여 두 선형이 수직에 가까운 도로를 선별하였다. 선별된 측정 대상 주변의 송·배전설비의 공간 정보를 중첩하고, 측정 대상과 각 설비 간 이격거리를 정량적으로 산출하여 개소별 전력설비의 설치 현황을 확인하였다. 그 결과 측정 목적에 부합하는 약 3000개의 측정 대상을 선정하였다. 선정된 대상은 송전선로의 전압 수준과 설비 형태를 기준으로 분류하였다. 또한 송전선로의 회선 수 및 배전설비의 형태 및 개수 등 설비 현황에 따라 세분화하였다. 이를 통해 GIS를 활용하여 측정 목적에 부합하는 대상을 동일한 기준으로 선정하고 각 후보지의 주변 설비 현황과 공간적 특성을 사전에 파악할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제시된 방법은 향후 송·배전 복합환경의 다양한 설비 조건을 고려한 실측 DB 구축을 위해 측정 대상을 추가로 선정하는 데 필요한 기초 자료로 활용할 예정이다.

주제어: GIS, 전력설비, 데이터베이스

Keywords: GIS, Power Facilities, Database

전동기 상태판정을 위한 교류전류 구간분할 최적화 알고리즘 개발

Development of an Optimal AC Current Segmentation Algorithm for Motor Condition Assessment

박건희, 선종호, 윤영우*
한국전기연구원
(*교신저자: ywyoun@keri.re.kr)

전동기의 절연 및 전기적 상태를 평가하기 위한 방법 중 하나로 시험전압에 따른 교류전류의 변화를 분석하는 방법이 활용될 수 있다. 정상 상태에서는 전압과 전류가 선형적인 관계를 나타내지만, 이상 상태에서는 일정 전압 이상에서 전류 증가율이 변화할 수 있어 전압-전류 특성의 구간을 합리적으로 구분하는 것이 중요하다. 특히 정격전압에서의 전류 변화량 ΔI를 산출하기 위해서는 선형 구간과 전류 증가 구간의 객관적인 분리가 필요하다. 기존에는 이러한 구간을 시각적 또는 경험적으로 선정하는 경우가 있어 분석자의 판단에 따라 결과가 달라질 수 있다.

본 연구에서는 전압-전류 측정 데이터의 구간 분할을 정량화하고 ΔI 산출의 신뢰성을 향상하기 위한 최적화 알고리즘을 개발하였다. 제안 알고리즘은 모든 가능한 분할 지점에 대해 두 구간의 선형회귀를 수행하고 각 구간에서 발생하는 오차제곱합(SSE)의 합이 최소가 되는 지점을 최적 분할 위치로 선정한다. 이후 각 구간의 회귀식으로부터 교점 P_i를 계산하고, 첫 번째 구간의 회귀식을 외삽한 전류와 두 번째 구간에서 예측된 전류의 차이를 이용하여 ΔI를 산출하였다.

가상 데이터에 적용한 결과, 명확한 두 개의 선형 특성을 갖는 데이터에서는 최소 SSE가 0으로 계산되었으며 각 구간의 결정계수 R^2는 1으로 나타났다. 첫 번째 가상 데이터에서는 P_i가 5.093kV에서 검출되었으며 정격전압 6.6 kV에서 ΔI는 19.56%로 계산되었다. 두 번째 가상 데이터에서는 P_i가 4.4kV, ΔI가 1.39%로 산출되었다. 이를 통해 제안 알고리즘은 전압-전류 특성의 변화 구간을 정량적으로 선정하고 전동기 상태판정에 사용되는 ΔI를 일관된 기준으로 산출하는 데 활용될 수 있음을 확인하였다.

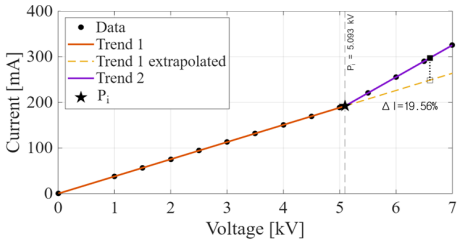


그림 1. 가상 데이터 1의 알고리즘 적용 결과

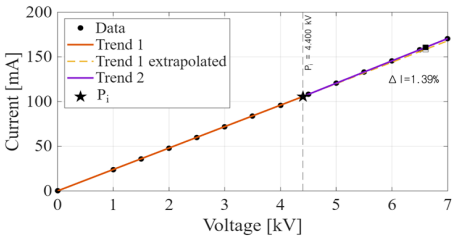


그림 2. 가상 데이터 2의 알고리즘 적용 결과

주제어: 전동기, 상태판정, 교류전류 진단, 선형회귀

Keywords: Motor, Condition Assessment, AC Current Diagnosis, Linear Regression

[감사의 글]
본 연구는 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임 (과제번호: 20225500000120)

등가회로 시뮬레이션을 이용한 부싱 누설전류 측정용 변류기의 부하저항별 위상오차 분석

Analysis of Burden-Dependent Phase Error of a Current Transformer for Bushing Leakage Current Measurement Using Equivalent Circuit Simulation

박건희, 선종호, 윤영우*
한국전기연구원
(*교신저자: ywyoun@keri.re.kr)

변압기 부싱의 누설전류를 CT로 측정할 경우, mA 수준의 전류에서 나타나는 CT 코어의 비이상적인 여자특성과 2차측 부하조건에 의해 위상오차가 발생할 수 있으며, 이는 위상 기반 절연진단(tanδ)의 정확도에 직접적인 영향을 미친다. 특히 부하저항 변화에 따른 CT 출력 위상 변화의 원인을 정량적으로 설명하기 위해서는, 여자 분기와 2차 권선 임피던스를 포함한 등가회로 기반의 해석이 필요하다.

본 연구에서는 CT의 여자분기와 부하저항이 위상오차 형성에 미치는 영향을 등가회로 시뮬레이션을 통해 규명하고자 하였다. CT는 이상적인 변압기, 여자 인덕턴스(L_m), 철손저항(R_c), 2차측 부하저항(R_L)으로 모델링하였으며, 측정된 전압, 전류의 페이저로부터 여자전류를 자화전류와 철손전류 성분으로 분리하여 모델 파라미터를 산출하였다. 해석 조건은 입력전류 0.5~100 mA, R_L=100Ω 및 1000Ω으로 설정하였고, 정상상태의 마지막 5주기를 이용하여 shunt 저항의 기준신호와 CT 출력 사이의 위상차를 비교하였다.

시뮬레이션 결과, 제안한 등가회로 모델과 실측값 사이의 위상 잔차는 R_L=100Ω에서 대부분 0.01˚ 이하였으며, R_L=1,000Ω에서는 대부분 0.03˚ 이하, 최대 0.076˚로 나타났다. 모델 검증에 사용된 조건에서 실측 CT 위상오차의 최대 절댓값은 R_L=100Ω에서 1.54˚, R_L=1,000Ω에서 9.23˚로 나타났다. 부하저항이 증가함에 따라 CT 2차측 전압이 증가하고 부하전류, 철손전류 및 자화전류의 분배가 변화하면서 CT 출력의 위상오차가 증가하는 경향을 확인하였다. 따라서 부싱 누설전류 측정용 CT의 위상오차는 부하저항에 따른 여자조건 변화로 설명할 수 있으며, 제안한 등가회로 모델은 CT 측정회로의 부하조건 선정과 위상오차 해석을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

주제어: 변압기 부싱, 누설전류, 변류기, 위상오차, 부하저항

Keywords: Transformer Bushing, Leakage Current, Current Transformer, Phase Error, Burden Resistance

[감사의 글]
본 연구는 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임 (과제번호: RS-2024-00427008)

임피던스 측정을 이용한 컨베이어 벨트 위 물체 식별 시스템

Object Classification System on a Conveyor Belt Using Impedance Measurement

안주희, 한나연, 박기쁨, 심성민, 김정무*
전북대학교 전자공학부
(*교신저자: jungmukim@jbun.ac.kr)

비접촉·비파괴 판별 기술은 세포 분류부터 인라인 검사까지 요구된다. 본 연구에서는 평면 3전극 임피던스 구조로 이동 물체의 재질과 크기를 동시에 판별하고자 하였다.

25, 30 mm 호일공·유리공 4종을 전극 폭·간격 3 cm인 평면 3전극 구조(Fig.1)에 통과시키며 1 MHz, 10 Vpeak를 인가하고, 두 센싱전극 전류를 TIA로 변환해 락인 증폭기에서 차동 복조하여 12-bit ADC로 직교 성분을 취득하였다. Q3D Extractor 2022 R1 정전 해석 결과 시료가 두 전극을 차례로 지나며 극성이 반대인 이중 피크가 나타났다(Fig.2). 판정은 직교 성분의 peak-to-peak를 임계값과 비교하되 두 피크 크기의 비대칭도가 0.10 이상이면 보류하고, 마진이 좁은 구간은 동상 성분도 적용하였다.

정전용량 변화 해석값은 크기 및 유전율이 클수록 증가해 시료 4종이 구분되었고, ADC 실측 환산치와 평균 6.2% 오차로 일치하였다(표1). 110회 측정 중 오분류는 없었으며, 보류 3회를 뺀 107회를 분류해 97.3% 정확도를 얻었다.

평면 3전극 임피던스만으로 재질과 크기를 동시에 판별할 수 있으며, 불투명 용기 전수 검사에 활용 가능하다.

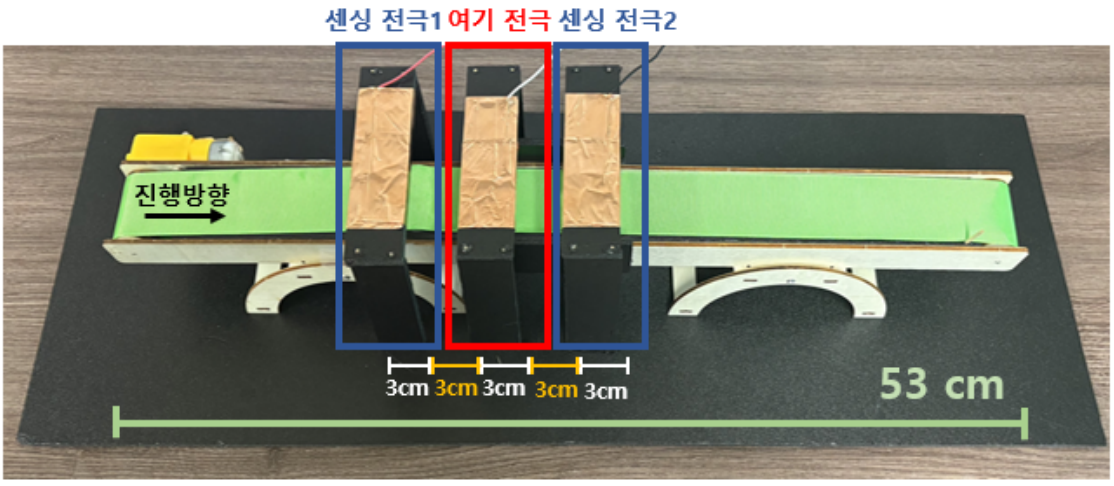


Fig.1 평면 3전극 실험 셋업

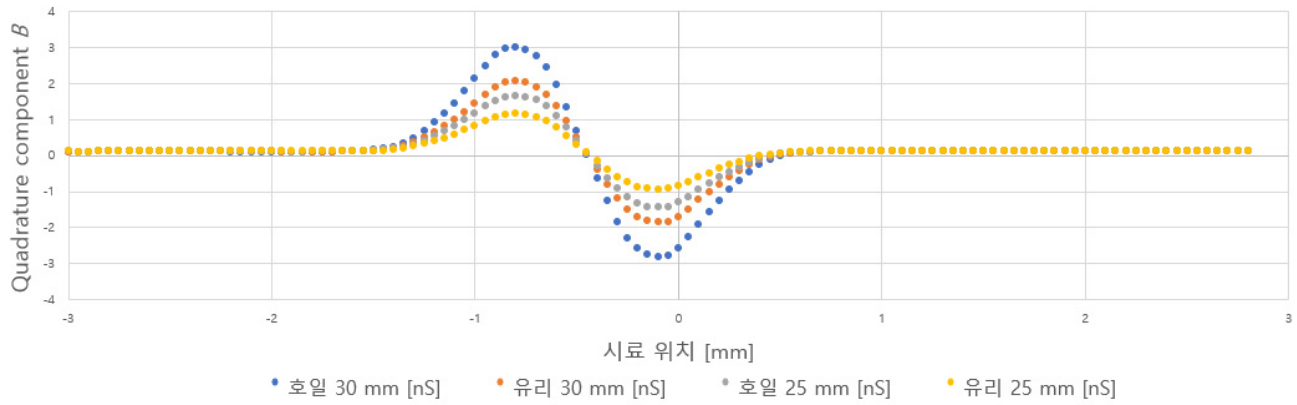


Fig.2 시료별 직교 성분 응답 [Q3D 해석]

시료	해석 ΔC [fF]	실측 환산 ΔC [fF]	오차
호일 30mm	92.5	99.3	−6.9%
유리 30mm	62.5	65.2	−4.2%
호일 25mm	49.5	45.5	+8.8%
유리 25mm	33.6	35.3	−4.7%

표1. 해석 및 실측 정전용량 변화 비교

주제어: 임피던스 센싱, 비접촉 검사, 평면 전극, 재질 판별, 락인 증폭기

Keywords: Impedance sensing, Non-contact inspection, Planar electrode, Material classification, In-line inspection

[감사의 글]
본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 한국연구재단(NRF)의 연구비 지원(RS-2025-02303659)으로 수행되었다.

고전압 모니터링을 위한 $LiNbO_3$의 전기-광 효과 기반 전압센서

Voltage Sensor Based electro-optic effect of $LiNbO_3$ for High-Voltage Monitoring of Power Equipment

황형용[1*], 이주영[1], 정찬우[1]
[1]한국광기술원 양자연구센터
(*교신저자: hwang@kopti.re.kr)

전력계통 고전압 설비를 안정적으로 운용하려면 실시간 전압 모니터링이 필수적이다. 그러나 기존 분압기 및 변성기 기반 측정 방식은 부피가 크고 절연 확보가 어려우며 전자기 간섭(EMI)에 취약하다는 한계가 있다.

본 연구에서는 $LiNbO_3$ 결정의 포켈스(Pockels) 효과를 이용한 광전압센서를 개발하고, 고전압 교류 환경에서의 측정 특성을 규명하고자 하였다. 센서는 편광자, 1/4 파장판, $LiNbO_3$ 결정(40 × 5 × 5 mm), 검광자를 일렬로 배치한 횡방향 변조 구조로 구성하였다. 1550 nm 레이저 광을 단일모드 광섬유로 입사시키고, 출력광은 다중모드 광섬유를 통해 광검출기로 전달하였으며, 광검출기 출력은 IEC 61850 프로토콜을 지원하는 자체 개발 DAQ 보드로 측정하였다. 1/4 파장판으로 π/2의 광학 바이어스를 부여하여 별도의 DC 바이어스 없이 동작하도록 하였으며, 전극판에 60 Hz 교류 전압을 0~30 kV 범위에서 5 kV 간격으로 인가하였다. 측정 결과, 전압 미인가 시에는 광검출기 출력에 변조 성분이 나타나지 않았으며, 전압 인가 시 인가 주파수와 동일한 주기(약 16.7 ms)의 정현파 출력이 관측되었다. 출력 신호의 첨두간 진폭은 인가 전압에 비례하여 증가하였으며, 0~30 kV 범위에서 선형 회귀 결정계수(R^2)는 0.991로 우수한 선형성을 나타냈다. 또한 센서는 광학 부품만으로 구성된 전기적으로 절연된 수동 소자이므로, 고전압 인가 환경에서도 구조적으로 EMI의 영향을 받지 않는다.

본 연구 결과는 소형·절연형 광전압 센서가 변전소 및 송배전 설비의 고전압 실시간 모니터링과 과도 전압 진단에 활용될 수 있음을 보여준다.

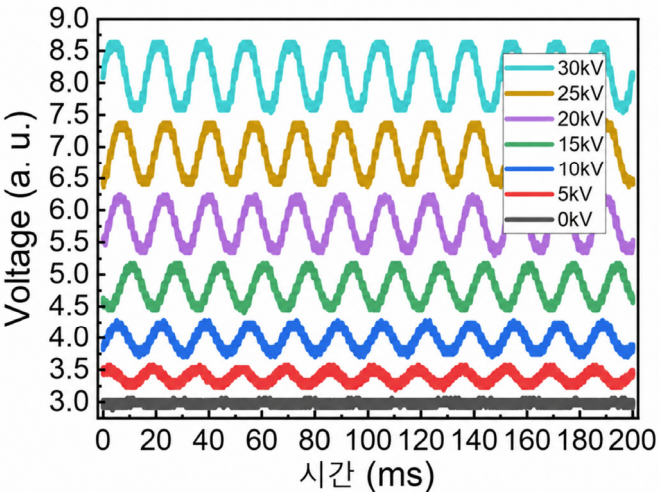


그림 1. 인가 전압(0~30 kV)에 따른 광전압 센서의 시간 영역 출력 파형

주제어: 광전압센서, 니오브산리튬, 전자기 간섭, 고전압

Keywords: Optical-Voltage Sensor, $LiNbO_3$, EMI, High Voltage

[감사의 글]
본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 (No. RS-2024-00411374) 및 정보통신기획평가원(No. RS-2025-25464697)의 지원을 받아 수행된 연구임