



The Korean Institute of Electrical Engineers

Vol. 70, No. 3, MARCH 2021

03

전기의 세계

기획 시리즈 HVDC XLPE 케이블

자유 기고문 그린뉴딜 핵심 수소산업 조망



정확한 설계 완벽한 감리

JH 지화기술단

주식회사
J E E H W A

전 기

전기설계(전문 1종)
전기종합감리
전기안전점검

정보통신

정보통신설계
정보통신종합감리

소 방

소방설계
소방시설물감리

친환경연구

전략기술연구개발
친환경관리방안연구



CONTENTS

The Korean Institute of Electrical Engineers

전기계뉴스



우진기전, 대한전기학회에 전기사랑 장학금 기탁 | 6

한전 올해 총 2427건 3조9천억 공사 발주

한전, 2021년 공사용역발주계획 발표 | 6

울산 부유식 해상풍력 FDI 1억 6000만여 달러 투자 신고 | 7

동서발전, 발전 분야 '4차 산업혁명 기술 개발 협력' 나서

상생협력 얼라이언스 협약기업 27곳과 온라인 간담회 개최 | 7

기획시리즈 - HVDC XLPE 케이블

전압형(VSC) HVDC XLPE 케이블 기술 동향 | 8

HVDC 전류형 XLPE 케이블 개발 동향 | 17

HVDC 케이블과 그 접속재에서 이중계면의 해석을 위한 기초 | 23

자유기고문

그린뉴딜 핵심 수소산업 조망 | 28

학회 소식

학회일지 | 31

전기의 세계

Vol. 70, No. 3, March 2021

발행일 2021년 3월 1일
발행인 김철환
편집인 강승택
발행처 사단법인 대한전기학회
(06130) 서울특별시 강남구 테헤란로 7길 22
과학기술회관 (신관)901호
Tel 02-553-0151 Fax 02-566-9957
<http://www.kiee.or.kr>

학회 본부 임원

회장 김철환
차기회장 김재원
부회장 전영환 이병준 이개명 이중환 박형구
노대석 박도영 이준호 김호찬 김재문
협동부회장 김한수 박기주 심용식 안승원 이상권
이천구 장창익
감사 김종겸 이난숙
총무이사 박철원 이정호
재무이사 차준민 김태균
기획·정책이사 강지원 김기현 주성관
사업이사 김효진 손진근 안상필 허 진
편집이사 박종배 이항범 강승택
학술이사 김광호 김문겸 정상용 한기진 조현중
국제이사 장길수 류홍제 이교범 허 건
산학협동이사 김경호 양상배 오호진 신윤용 이준신
박건우 정호성 김석주
회원·교육이사 남기범 임용배 송화창 김래영 김길동
홍보이사 정형석 박정욱 한수희 박강서

부문의 회장

A부문 회장 노대석 B부문 회장 박도영
C부문 회장 이준호 D부문 회장 김호찬
E부문 회장 김재문

온라인

씨티은행 102-53163-258(대한전기학회)
국민은행 349401-04-009338(대한전기학회)
지로번호 7510483

편집·디자인 드림기획 031-705-3812
인쇄 드림기획 031-705-3812

표지 2 지화기술단 표지 3 산일전기

표지 4 LS ELECTRIC

내지 2 알앤비코리아 내지 3 알트소프트

내지 4 모젠코리아 내지 5 새롭프로텍(주)

Cover Story





알앤비코리아 RNB KOREA LTD

Tel) 031-722-1405
connector@rnbkorea.com
power@rnbkorea.com

당사는 1994년 설립 이후 국내 방산 및 전력, 전자부품을 외국의 제조회사와 독점계약에 의하여 국내 소개 및 판매 활동을 통해 공급해 왔으며 특히 인공위성, 방위산업, 철도 차량 등 고도의 신뢰성이 요구되는 Application에 HYPERTAC Connector를 전력 전자 part에 Dynex Power Semiconductor 등을 공급해온 (주)알앤비코리아는 모든 직원들이 보다 나은 Customer Service를 위해 Technical Support와 After Service를 제공하여 고객의 High Quality Product 공급을 위해 최선의 노력을 다 할 것입니다.

공급자와 수요자의 최대 만족을 위하여 상호간의 충족된 해결책을 위하여
"NEVERENDING ON CREATING" BUSINESS 창출이 당사의 목표입니다.

(주)알앤비코리아 대표이사 노 경 재

www.smithsconnectors.com

smiths interconnect
bringing technology to life

Traction High Power &
PCB · Medical Connector
High power
Connector



www.omnetics.com

OMNETICS
CONNECTOR CORPORATION
Micro, Nano, Strip & Circular
Connector



www.alfarconnectors.com

ALFA'R

High Voltage
High Current
Connectors
Modular
Power Contacts



www.dynexsemi.com

DYNEX

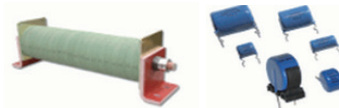
IGBT, SCR,
GTO, Diode



www.hvrapc.com

HVR
INTERNATIONAL

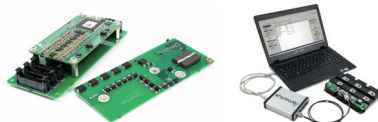
Ceramic Carbon
Resistors



www.amantys.com

amantys

Premium gate
driver for IGBT
Single & Parallel



www.cressall.com

CRESSALL

Resistors for
Neutral earthing,
Load bank and
Harmonic filter Resister



www.icar.com

ICAR

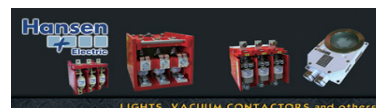
DC filter, snubber
and energy storage
capacitors



www.hansen-electric.cz

HANSEN
ELECTRIC

Vacuum Contactor
Transformer Enclosure

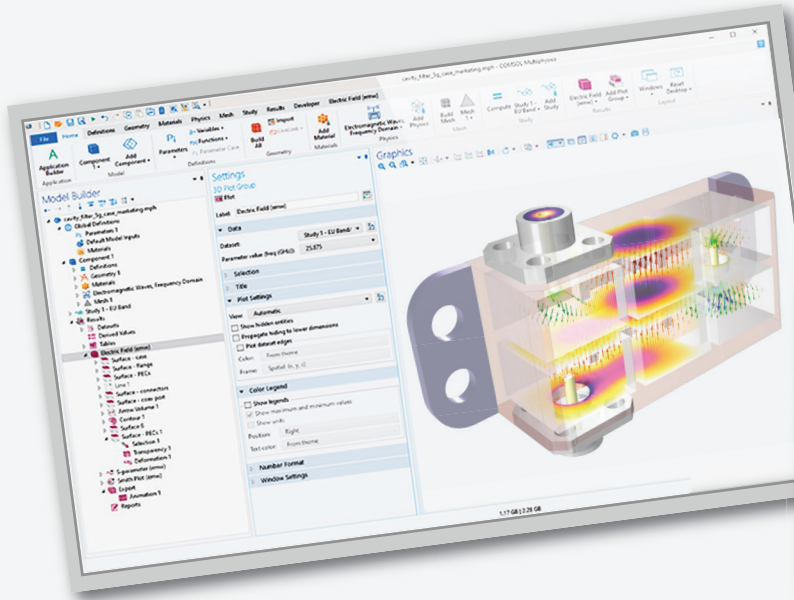


COMSOL Multiphysics 5.6 Now Available

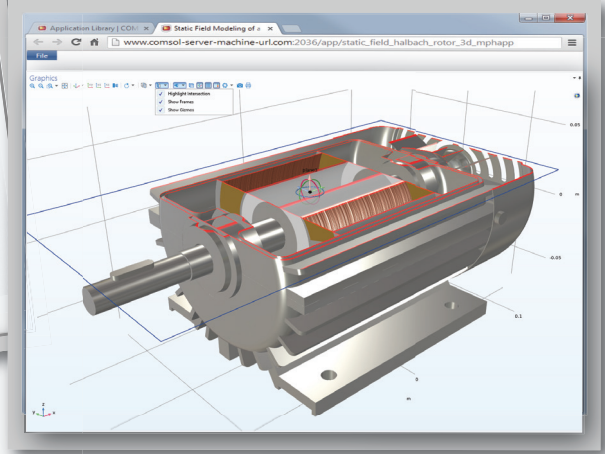
COMSOL Multiphysics 5.6버전에서 향상된 솔버 및 메모리 효율 그리고 네가지 새로운 모듈을 제공합니다.

[Fuel Cell & Electrolyzer Module, LiveLink for Simulink, Polymer Flow, Liquid & Gas Properties Module]

멀티코어와 클러스터 계산이 더욱 빠르고 메모리를 적게 사용하는 솔버를 제공하며, CAD 어셈블리 작업을 더욱 효율적으로 처리합니다.
솔버 기능이 크게 개선되어, 수백만 자유도를 지닌 커다란 모델을 해석하고자 하는 사용자들에게 도움이 됩니다.



5.6 버전의 모터 해석, 재질과 부하를 지정하는
☑ 모델 내부에 쉽게 접근할 수 있는 평면 클리핑 작업



ⓐ 온도 변화 및 열응력을 포함하여 밀리미터 파5G 대역에서 작동하는 캐스케이드 캐비티 필터의 다중 물리 모델입니다. 가시화는 새로운 기능인 부분 투명성을 보여 줍니다.

COMSOL MULTIPHYSICS® COMSOL COMPILER™ COMSOL SERVER™

Modeling and Simulation for Everyone

- ☉ 전자기, RF, Optics, 플라스마, 배터리, 연료전지, 열, 구조, 음향, MEMS, CFD, 화학반응, 지구물리해석 등을 위한 관련 모듈 제공
- ☉ 물리영역(해석모듈) 간 무제한 연성해석
- ☉ 손쉬운 수식 편집을 통한 유연성 있는 모델링 제공
- ☉ Large Simulation을 위한 Cluster Computing 및 Cloud Computing 지원
- ☉ 해석 비전문가가 사용할 수 있는 어플리케이션(앱)생성 및 배포

Product Suite

- › COMSOL Multiphysics®
- › COMSOL Compiler™
- › COMSOL Server™

Electromagnetics

- › AC/DC
- › RF
- › Wave Optics
- › Ray Optics
- › Plasma
- › Semiconductor

Fluid Flow & Heat Transfer

- › CFD
- › Mixer
- › Polymer Flow
- › Microfluidics
- › Porous Media Flow
- › Subsurface Flow
- › Pipe Flow
- › Molecular Flow
- › Metal Processing
- › Heat Transfer

Chemical

- › Chemical Reaction Engineering
- › Battery Design
- › Fuel Cell & Electrolyzer
- › Electrodeposition
- › Corrosion
- › Electrochemistry

Structural Mechanics & Acoustics Modules

- › Structural Mechanics
- › Nonlinear Structural Materials
- › Composite Materials
- › Geomechanics
- › Fatigue Module
- › Rotordynamics
- › Multibody Dynamics
- › MEMS
- › Acoustics

Multipurpose

- › Optimization
- › Material Library
- › Particle Tracing
- › Liquid & Gas Properties

Interfacing Products

- › LiveLink™ for MATLAB®
- › LiveLink™ for Simulink®
- › LiveLink™ for Excel®
- › CAD Import Module
- › Design Module
- › ECAD Import Module
- › LiveLink™ for SolidWorks®
- › LiveLink™ for Inventor®
- › LiveLink™ for AutoCAD®
- › LiveLink™ for Revit®
- › LiveLink™ for Creo™ Parametric
- › LiveLink™ for Pro/ENGINEER®
- › LiveLink™ for Solid Edge®
- › File Import for CATIA® V5

MGK 모젠 코리아

Mogen Korea

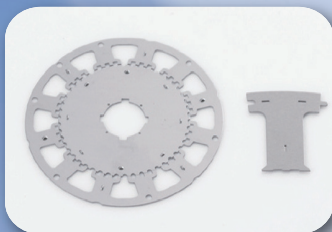
“전동기 및 발전기 시작품 제작 전문”

| 회사소개 |

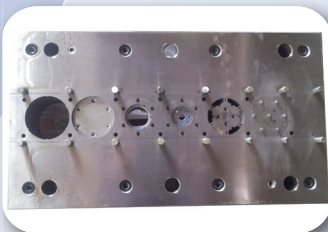
모젠코리아는 전동기 및 발전기, 특수모터, 시작품 제작 전문업체로서 코어 와이어컷, 금형제작, 타발, 권선 및 함침, 밸런싱, 기구가공, 다이나모시스템 등 모터 및 발전기 TOTAL SOLUTION을 제공하고 있습니다.

| 제작 및 테스트 |

■ 와이어컷



■ 간이금형(프로)



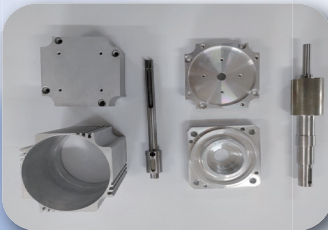
■ 권선 및 함침



■ 적층/배런싱



■ 기구가공



■ 다이나모시스템

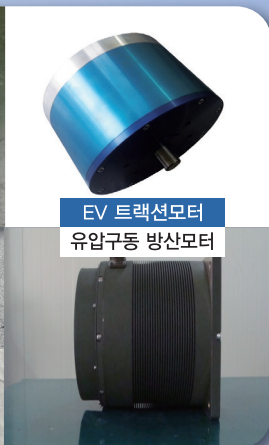


| 제품소개 |

■ 전동기

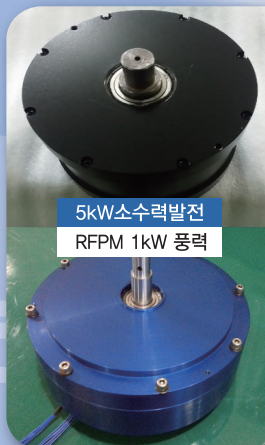


스마트 액츄에이터
철도차량용 트랙션모터

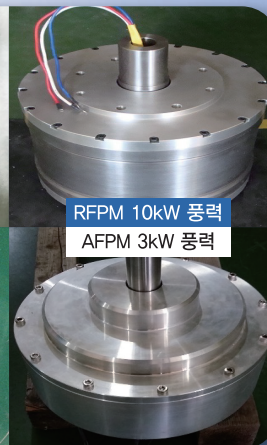


EV 트랙션모터
유압구동 방산모터

■ 발전기



5kW소수력발전
RFPM 1kW 풍력



RFPM 10kW 풍력
AFPM 3kW 풍력



전력계통 보호시스템 전문기업

새롬프로텍(주)

새롬프로텍(주)는 2009년 설립 후 세계적기업인 ABB의 SA(변전자동화)와 기술제휴하여, 전력계통 보호배전반을 전문으로 생산하고 있으며, 2010년 한전에 국내최초 IEC61850기반 보호배전반을 등록하여 한전의 최신 IED 보호시스템 구축에 크게 기여하였고, 345/154kV이상 계통보호 신뢰도 향상에 아주 우수한 제작사로 평가받고 있습니다.

2014년에 ABB로부터 AVP(Authorized Value Provider기술인증서)를 세계 5번째, 우리나라 첫번째로 부여 받았으며 2016년 ABB Best Promoter에 선정되었습니다.

신설 및 노후 설비의 대체용 발전, 송전, 변전, 배전뿐만 아니라, Reactor, Capacitor MicroSCADA, 고압수배전반, MCC반 등, 모든 전력설비의 보호시스템을 생산하며,

대표이사 : 이 정 택(李 晶 澤)

- 2008. 한국전력공사 정년퇴직
- 2009. 새롬프로텍(주) 설립
- 한전재직시 다년간 전력계통보호분야 종사

최근, 정부의 에너지 정책에 따라 많이 추진되고 있는 태양광, 풍력, 연료전지 등 신재생 발전소 건설 프로젝트에도 우수한 기술력과 차별화된 신속한 서비스로, 민수시장에서도 좋은 평가를 받고 있으며, 향후 진행되는 신재생 사업에도 원청사는 물론 엔지니어링사, EPC사까지 기술적 업무와 대관 업무를 적극 지원하겠으며, 항상 시장의 요구 사항에 귀 기울여 전기를 안전하게 사용할 수 있도록 보호배전반 전문기업으로서 더욱 분발하여 최고의 제품을 제작하도록 하겠습니다.



발전, 송전, 변전, 배전
보호배전반



고압 수·배전반
MCC반



신재생 발전설비 보호배전반
(태양광, 풍력, 연료전지 등)

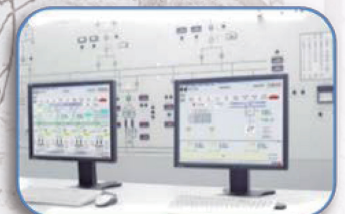
고용노동부 청년친화 강소기업

경기도 유망중소기업

경기도 우수벤처기업

KEPCO Trusted Partner

ABB Authorized Value Provider



MicroSCADA
시스템

경기도 양주시 광적면 화합로 217(덕도리 800-8)
TEL : 031-871-0041, FAX : 031-871-0048

전기계 뉴스



우진기전, 대한전기학회에 전기사랑 장학금 기탁



특수전력기기·엔지니어링 솔루션기업 우진기전(대표 장창익)이 대한전기학회(회장 김철환)에 전기사랑 장학금 1000만원을 기탁했다.

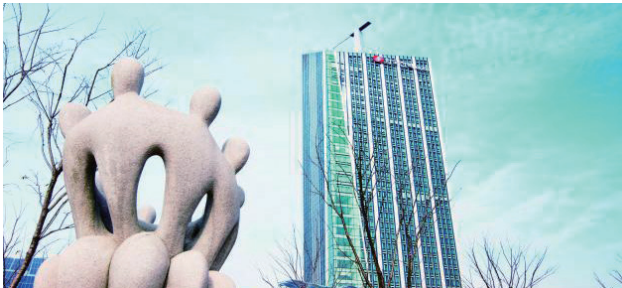
2월 19일 SC컨벤션센터에서 열린 장학금 기탁식에는 장창익 우진기전 대표와 김철환 대한전기학회 회장이 참석했다.

전기사랑 장학금은 전기산업계 후학양성을 위해 조성됐으며, 학업 성적이 우수하나 재정적 상황이 여의치 않은 전국 대학교 전기공학과 학생들을 대상으로 장학금을 선발해 지급될 예정이다.

장창익 우진기전 대표는 “기업이윤의 환원을 통해 미래를 이끌어 나갈 인재를 키우는 일에 보탬이 되고자 장학금을 기탁하게 됐다”며 “업계의 장학지원을 통해 육성된 인재들이 다시금 업계를 이끌어 나가는 동반성장이자 새로운 상생 패러다임이 이어져 나가길 희망한다”고 밝혔다.

김철환 대한전기학회 회장도 “올해 처음 도입된 전기사랑 장학금 제도에 적극적으로 참여한 우진기전에 감사드린다”며 “기탁한 뜻에 따라 소중히 마음이 전달될 수 있도록 최선을 다하겠다”고 말했다.

한전 올해 총 2427건 3조9천억 공사 발주 한전, 2021년 공사용역발주계획 발표



한전은 올해 총 2427건, 약 3조 9천억원의 공사를 발주할 계획이다.

한전은 지난 2월 25일 이같은 내용을 담은 2021년도 공사용역발주계획을 발표했다.

이에 따르면 한전 올해 공사발주 건수는 총 2427건이며 금액으로는 총 3조8980억9194만원 상당이다.

이 수치는 지난해 공사발주계획 금액 약 6조4천억원(2년마다 계약하는 배전단가공사금액 2조7천억 포함) 비해 대폭 줄었지만 격년제인 배전공사전문화사 공사금액을 제외하면 3조7천억원에서 2천억원이 소폭 늘어난 것이다.

지역별로는 경인건설본부가 122건에 총 8298억2823만원 상당으로 가장 많았으며 그 다음으로는 중부건설본부가 57건에 5492억9325만원 상당, 경기본부가 229건에 2684억4124만원 상당, 남부건설본부가 66건에 2351억7939만원 상당 순이었다.

도급공사비 300억원 이상 공사로는 ▲ICT운영처의 2021년도 DAS 통신장치 시설공사(본사 일괄 연간단가계약)(743억5930만원, 2월발주) ▲중부건설본부의 서산-성연 전력구공사(360억원, 2월 발주) ▲중부건설본부의 #3 HVDC 완도변환소 토건공사(394억3327만원, 3월발주) ▲중부건설본부의 154kV 화원-안좌 해저케이블 용량증대 건설사업(482억281만원, 4월발주) ▲경인건설본부의 154kV 광석분기 전력구공사(560억원, 7월발주) ▲경인건설본부의 154kV 통진-월곶 전력구공사(663억9855만원, 9월발주) ▲경인건설본부의 154kV 인천CC-중산 전력구공사(760억원, 11월발주) ▲경인건설본부의 서대문은평지사 복합사옥 신축공사(380억원, 11월발주) ▲경인건설본부의 서울 노원지역 전기공급시설 전력구공사(상계-노원)(420억4076만원, 12월발주) ▲경인건설본부의 서울 노원지역 전기공급시설 전력구공사(금오-상계)(320억4000만원, 12월발주) 등이 주목을 끌었다.

KIEE NEWS



울산 부유식 해상풍력 FDI 1억 6000만여 달러 투자 신고 2019년 민간투자자 5개사와 업무협약 통해 사업 추진 중 향후 외국인 직접투자 규모 지속적으로 늘어날 것 '기대'



울산시는 국내 최초로 추진하고 있는 '울산 부유식 해상풍력단지 조성사업'에 외국인직접투자(FDI)가 현재까지 1억 6,000만여 달러 신고됐다고 밝혔다.

'울산 부유식 해상풍력단지'는 울산 동해가스전 인근 앞바다에 오는 2025년까지 1GW 이상의 규모로 조성되며, 2030년에는 6GW까지 확대하는 것을 목표로 하고 있다.

울산시는 지난 2019년도에 Equinor, Shell-CoensHexicon,

GIG-TOTAL, CIP-SK E&S, KFWind 등 글로벌 해상풍력 민간투자자 5개사와 업무협약을 맺고 민간주도 부유식 해상풍력 단지를 조성해오고 있다.

현재까지의 외국인직접투자 진행 상황을 보면 2020년 9월 5,497만 5,000 달러, 12월 1억 65만 달러, 2021년 2월 24만 2,000달러 등 총 1억 6,000만여 달러 투자신고 했다.

이번 신고액은 국내 외국인투자기업 법인 설립과 초기 사업 준비금으로 활용되며 향후 사업단계별 추진에 따라 외국인직접투자(FDI) 투자 규모는 계속 늘어날 것으로 예상된다.

울산시 관계자는 "이번 외국인직접투자를 통하여 부유식 해상풍력 사업이 본격적인 탄력을 받을 것으로 기대한다"면서 "본격 사업 추진으로 신규 일자리 창출 등 지역경제 활성화와 함께 친환경 저탄소 에너지산업 육성에 기여하게 될 것"이라고 밝혔다. 동서발전 관계자는 "정보공개를 더욱 활성화해 공공서비스에 대한 국민 참여 확대와 공정하고 투명한 경영정보 제공에 최선을 다하고, 정보공개체계에 대한 지속적인 혁신을 선도해 나갈 것"이라고 말했다.

동서발전, 발전분야 '4차 산업혁명 기술 개발 협력' 나서 상생협력 얼라이언스 협약기업 27곳과 온라인 간담회 개최

동서발전이 4차 산업혁명 기술의 발전분야 접목에 앞장선다.

지난 2월 25일 한국동서발전(사장 박일준)은 디지털기술융합원에서 '4차 산업혁명 기술 상생협력 얼라이언스' 소속 협약기업과 온라인 간담회를 개최했다.

동서발전은 발전산업의 4차 산업혁명 기술 적용을 가속화하기 위해 우수한 실적의 중소벤처기업 27곳과 함께 '4차 산업혁명 기술 상생협력 얼라이언스 (I-4.0 Alliance)'를 구축한 바 있다.

이번 간담회는 코로나19로 인한 사회적 거리두기 조치에 따라 비대면 온라인으로 진행됐다. 이를 통해 4차 산업기술 개발과제 추진 현황과 올해 주요 업무 추진계획의 활성화 방안 등을 논의했다.

동서발전은 올해 기업 간 교류와 협력을 확대하기 위해 ▲안전 및 환경 관리 지능화 ▲발전운영 지능화 ▲I-4.0 신기술 확보, ▲인재양성 및 산업생태계 활성화 방안 등을 추진한다.



협약기업의 판로개척을 지원하기 위해 오는 9월 개최 예정인 '제22회 아시아 발전산업 컨퍼런스(Enlit Asia 2021)' 참여와 전시를 돕고, 12월에는 I-4.0 기술 세미나를 개최할 예정이라는 게 동서발전 측의 설명이다.

정필식 동서발전 디지털기술융합원장은 "4차 산업혁명 기술 개발을 위해선 내 외부 전문가 양성과 기술요소 간 융합이 중요하다"며 "협약기업과 함께 우수한 솔루션을 지속적으로 개발해 발전산업의 디지털화를 이뤄갈 것"이라고 말했다.

한편 동서발전은 지난해까지 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷 등 4차 산업혁명 기술을 활용한 93건 과제를 완료했다. 오는 2025년까지 누적 184건 이상의 과제를 완료할 예정이다.

전압형(VSC) HVDC XLPE 케이블 기술 동향

Technical Trend of VSC HVDC XLPE Cables

송재혁 책임연구원, 최석환 수석연구원, 홍동석 수석연구원, 김현주 상무 | 대한전선

JAEHYUK SONG, SEOKHWAN CHOI, DONGSUK HONG, HYUNJOO KIM | TAIHAN electric wire Co.



요 약

전 세계 전력에너지 수요는 기술 발전 및 도시화에 따라 2050년까지 지속적으로 증가 추세에 있으며, 이에 대한 방안으로 신재생 에너지 및 대륙 간 계통 연계의 확대가 필수적인 상황에서 AC에 비해 장거리 송전의 장점을 가지고 있는 HVDC 송전의 필요성 및 이에 따른 HVDC 프로젝트가 증가 추세에 있다. 최근 전압형 HVDC 시스템은 전력 변환 기술이 발전됨에 따라 전류형 HVDC 시스템과 비교하여 경제성 및 효율성이 개선되었으며, 다양한 조건에서 선택적으로 시스템을 사용하는 사례가 증가하고 있다. 따라서 본 고에서는 전압형(VSC) HVDC 케이블의 국내/외 개발 프로젝트 현황 및 기술 개발 동향에 대해 소개하고자 한다.

Abstract

The global power demand is continuous increasing due to development of technology and urbanization. As a solution to this, the need for HVDC transmission compared to AC, and HVDC projects are increasing accordingly in a situation where expansion of renewable energy and intercontinental grid connection is essential.

Recently, as the power conversion technology advances, the VSC(Voltage Source Converter) type HVDC system has improved economy and efficiency compared to the LCC(Line Commutated Converter) type HVDC system, and cases of selectively using the system under various conditions are increasing. Therefore, this paper introduces the current status of domestic/overseas development projects and technology development trends of VSC type HVDC cables.

1. 서 론

기술 발전의 고도화로 인해 전 세계적으로 전력수요가 급증함에 따라 대용량 전력수송을 위한 장거리 대전력 송전이 필요한 실정이며, 국가 간/지역 간 계통연계로 전기에 대한 수요가 최고조에 달할 때 효율적인 전력유통이 가능한 대규모 광역 전력망“Super Grid”가 주목 받고 있다. 보다 성공적인 “Super Grid” 구축을 위해서는 대륙 간 장거리 송전에 유리하고, 신재생에너지

의 상이한 계통연계, 선로 손실감소, 경과지 저감 등의 다양한 장점을 가지는 HVDC(High voltage Direct Current) 송전기술이 21세기 핵심 전력 송전기술로 주목 받고 있다. 아울러 선진 각국에서는 미래 송전선 건설방향으로 친환경적인 HVDC 기술을 선호하고 있으며, 전 세계적으로 독자적인 고부가가치 기술로 경제적 이익을 창출하고자 다양한 HVDC 케이블 시스템 개발 프로젝트가 계획 및 수행되고 있는 실정이다.

HVDC 케이블은 주 절연재료의 종류에 따라 크게 MI(Mass

Impregnated paper), XLPE(Corss-linked polyethylene), HPTE(High Performance Thermoplastic Elastomer)로 구분되며, 케이블의 허용온도 및 절연유 사용으로 인한 환경문제 및 유지보수로 인해 최근 XLPE 절연방식의 케이블을 중심으로 개발되고 있다. 이러한 HVDC 케이블은 변환소의 전력변환 방식에 따라 전류형(LCC : Line Commutated Converter)과 전압형(VSC : Voltage Source Converter)으로 구분할 수 있으며, 이번 기획시리즈에서는 전압형(VSC) HVDC 케이블의 국내/외 개발 프로젝트 현황 및 기술 개발 동향에 대해 소개하고자 한다.

2. 전압형 HVDC 프로젝트 현황

전압형 HVDC 케이블 시스템이 1997년 최초 시험 운전되고 1999년 상업 운전을 시작한 이후, 20년 동안 전 세계 총 39개의 전압형 HVDC 케이블 시스템이 운전 중에 있다. 해상 풍력 및 태양광을 포함한 재생 에너지와 국가 간 전력망 연계 사업이 지역 또는 대륙 단위에서 진행됨에 따라 HVDC 케이블의 수요는 지속적으로 증가 하고 있으며, 이러한 요구에 따라 유럽, 미주 및 아시아 등 전 세계적으로 HVDC 프로젝트가 운영, 설치 및 계획 중에 있다.

또한, 과거와 달리 HVDC 케이블은 장거리 송전 또는 해저 케이블과 같이 특수한 조건 또는 제한된 범위에서 HVAC 케이블을 대체하기보다 다양한 상황에서 사용되는 사례가 증가하고 있다. 특히 전압형 HVDC 케이블은 전력 변환 기술의 발전에 따라 경제성과 효율성이 개선되고 있으며, 재생 에너지 용량 증가에 따른 전력망 연계의 용이성과 안정적인 전력 공급의 필요성 등 다양한 장점 때문에 전압형 HVDC의 용량은 2014년 이후 수백 MW에서 약 1GW 용량으로 증가 추세에 있으며, 이러한 추세는 앞으로 지속될 것으로 예상된다.

2.1 유럽

유럽은 친환경에 대한 사회적인 요구가 증가됨에 따라 풍력 및 태양광과 같은 재생에너지원으로 에너지 전환 정책을 독일을 중심으로 시행 중에 있으며, 국가 간 전력 연계가 활발히 이루어지

고 있는 지역 중 하나이다. [그림 1]과 [표 1]에 최근 유럽과 아시아에서 계획 또는 진행 중에 있는 전압형 HVDC 프로젝트를 나타내었다[1]. 유럽 지역에서 진행되는 HVDC 프로젝트는 북해의 해상 풍력 단지에서 생산되는 전력을 육지의 변전소로 송전하거나, 국가 또는 지역 간 전력 계통을 연계하는 프로젝트가 대다수를 차지하고 있다.

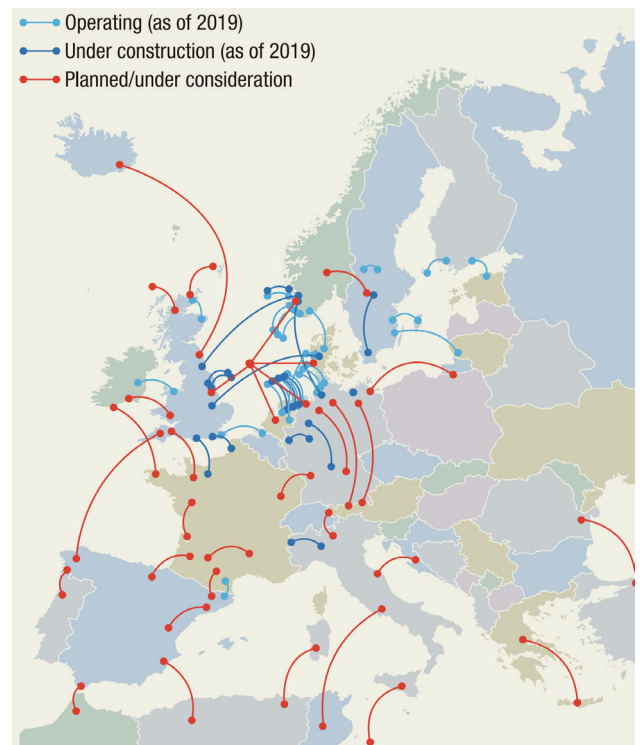


그림 1 유럽의 전압형 HVDC 프로젝트[1]

2021년 현재, 유럽 내 TSO (Transmission System Operator) 가 설치 및 계획하고 있는 프로젝트 중 다수의 프로젝트에서 전압형 HVDC 케이블 시스템을 적용하고 있다. 독일과 네덜란드의 대표적인 TSO인 TenneT社は 북해의 해상 풍력 단지와 육상 변전소를 연결하는 DolWin, BorWin 및 HelWin 프로젝트, 독일 내륙을 연결하는 SuedOstLink, SuedLink 프로젝트와 독일과 노르웨이를 연결하는 국가 간 전력 연계 프로젝트인 NordLink 프로젝트 등에서 전압형 HVDC 케이블을 사용하여 설치 및 운영하고 있다.

이 중 SuedOstLink와 SuedLink 프로젝트는 독일의 에너지 전환 정책 “Energiewende”의 핵심적인 부분으로 독일 북부와

북동부에서 생산된 풍력 에너지를 독일 남부 지역으로 송전하는 프로젝트이다. SuedLink 프로젝트는 NKT社와 Prysmian社의 525kV 전압형 HVDC 지중 케이블을 사용하여 4GW 용량을 송전하며, 노르웨이와 독일을 연결하는 NordLink 프로젝트와 연계하여 노르웨이에서 생산된 수력 에너지를 송전할 계획이다. SuedOstLink 프로젝트는 SuedLink 프로젝트와 동일하게 NKT社와 Prysmian社의 525kV 전압형 HVDC 지중 케이블을 적용하여 2025년 시운전이 계획 중에 있다. SuedLink와 SuedOstLink 프로젝트에 NKT사는 XLPE 절연, Prysmian사는 HPTE 절연을

사용하여 525kV 전압형 HVDC 케이블을 적용할 계획이다.

또한, 2010년 세계 최초로 해상 풍력 단지과 육상 변전소를 연계하는 최초의 전압형 HVDC 프로젝트인 BorWin1을 시작으로 9개의 전압형 HVDC 케이블 시스템을 적용하여 약 6.8GW 용량을 운영 중에 있으며, 2024년 까지 2개의 전압형 HVDC 프로젝트를 통해 1.8GW 용량 증가를 계획 중에 있다. 이 외 영국의 TSO인 National Grid社는 영국과 덴마크를 연결하는 Viking Link 프로젝트에서 전압형 HVDC 해저 케이블을 적용하는 등 다수의 프로젝트를 계획 중에 있다.

표 1 전압형 HVDC 프로젝트 현황

프로젝트명	설치 위치	운전년도	DC 전압(kV)	정격전력(MW)
BorWin1	북해	2010	380	400
NordBalt	스웨덴-리투아니아	2015	300	700
Skagerrak 4	노르웨이-덴마크	2015	500	700
BorWin2	북해	2015	300	800
DolWin1	북해	2015	320	800
HelWin1	북해	2015	250	576
HelWin2	북해	2015	320	690
SylWin1	북해	2015	320	864
DolWin2	북해	2016	320	900
Caithness - Moray Link	영국	2018	320	1200
DolWin3	북해	2018	320	900
The New Hokkaido-Honshu HVDC Link	일본	2019	250	300
COBRA Cable	덴마크-네덜란드	2019	320	700
Nemo Link	영국-벨기에	2019	400	1000
BorWin3	북해	2019	320	900
NORD Link	독일-노르웨이	2020	525	1400
IFA-2	프랑스-영국	2021	320	1000
Zhangbei DC Grid Project	중국	2021	500	1500
MSN Link	영국-노르웨이	2021	515	1400
ElecLink	프랑스-영국	2022	320	1000
NorthConnect	영국-노르웨이	2022	525	1400
Rudong Offshore Wind Connector	중국	2022	400	1100
Sheyang Offshore Wind Connector	중국	2022	250	1100
Viking Link	영국-덴마크	2023	525	1400
DolWin6	북해	2023	320	900
Dogger Bank A/B Interconnector	영국	2024	320	1200
DolWin5	북해	2024	320	900
FAB Link	프랑스-영국	2025	320	1400
SuedOstLink	독일	2025	525	2000
SuedLink	독일	2025	525	2000
Cheju #3	대한민국	2023	150	200

2.2 아시아

아시아 지역은 한국, 중국, 일본 및 러시아 등 동북아시아 지역을 중심으로 국가 간 전력 연계 프로젝트인 동북아 “Super Grid”에 HVDC 케이블 시스템을 적용할 계획이 있으며, 한국, 일본 및 대만 등은 에너지 전환 정책을 추진하기 위해 자국 내 근해에서 해상 풍력 단지 개발 진행 또는 계획 중에 있다.

중국은 2000년대 이후, HVDC 시스템 기술 도입과 더불어 기술 자립을 위하여 HVDC 기술개발을 추진하고 있으며, 자국 내 산업 발전과 도시화에 따른 전력 수요 급증으로 인해 발전단지와 수요지역을 연결하기 위한 HVDC 프로젝트가 국가 주도하에 진행 중에 있다.

Zhangbei DC Grid 프로젝트는 베이징 인접 3개의 지역에서 생산되는 재생에너지를 베이징으로 송전하는 프로젝트로 500kV 전압형 HVDC 케이블을 사용하여 4500MW 용량을 전송하는 프로젝트이다. 또한, 중국 동부 해안의 해상 풍력단지에서 발전된 재생에너지를 육상으로 송전하는 Rudong Offshore Wind Connector와 Sheyang Offshore Wind Connector등에서도 전압형 HVDC 케이블을 사용할 계획에 있다.

일본은 홋카이도-혼슈를 연결하는 HVDC 송전선로를 기존 전류형 HVDC 케이블이 적용된 선로 이외에 추가적으로 전압형 HVDC 케이블을 적용한 New Hokkaido-Honshu HVDC Link를 운전 중에 있다.

3. 기술개발동향

전압형 HVDC 케이블 시스템은 전력 변환 기술이 향상됨에 따라 빠르게 성장 중에 있다. 1990년대 후반 80kV급 전압형 HVDC XLPE 케이블 시스템의 개발과 상용화가 이루어짐에 따라 150kV 급으로 전압 등급이 향상되었다. 이후 200kV 및 320kV급 시스템이 지속적으로 설치 및 운전 중에 있으며, 현재 최고 525kV급 전압형 XLPE HVDC 시스템 운용을 계획 중에 있다. 또한, NKT社에서는 최고 640kV 전압형 XLPE HVDC 시스템 개발 완료 및 TB 496에 따라 시험 인증을 완료하였으며, 전송 용량은 현재 1GW 이상으로 기술 개발이 진행되고 있다.

3.1 케이블

전압형 HVDC 케이블 시스템의 수요는 신재생 및 국가 간 연계망이 확대에 따라 증가하고 있다. 전류형 HVDC XLPE 케이블은 극성반전으로 인한 공간전하 문제가 발생하기 때문에 나노 복합 소재를 활용하여 공간전하 문제를 해결하고 있다. 반면에 전압형 HVDC XLPE 케이블 시스템은 극성반전이 이루어지지 않기 때문에 이로 인한 공간전하 영향이 미미하다.

일반적으로 XLPE 절연 소재는 가교 공정에서 가교 부산물이 발생하며, 가교 부산물은 케이블의 절연 성능 저하 및 고장 발생의 원인이 된다. [그림 3]에서와 같이 XLPE의 가교 부산물은 PDP (Peroxide Decomposition Product)로써, α -Cumyl alcohol, Acetophenone, α -Methylstyrene, methane 및 water등이 부산물로 생성되고 이는 절연성능 및 공간전하 축적에 부정적인 영향을 미친다[2].

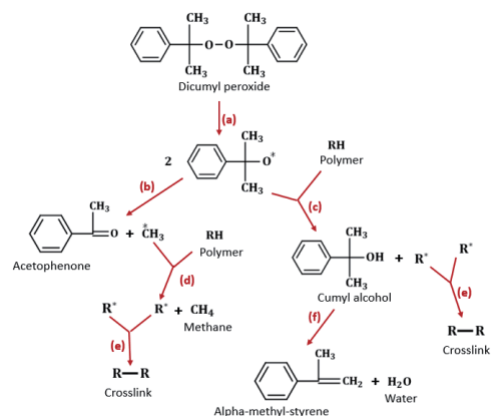
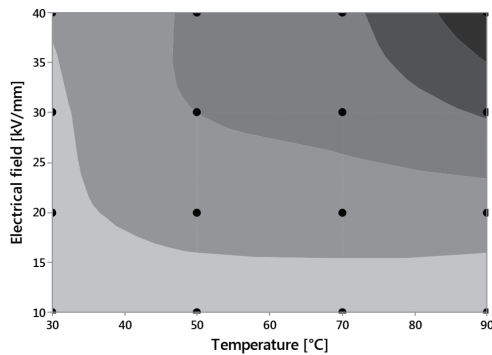


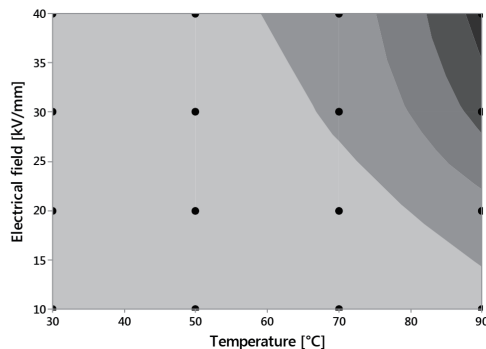
그림 3 DCP 가교 부산물 발생 메커니즘[3]

따라서 가교 시 발생된 잔사가스의 탈기(Degassing) 공정은 XLPE 절연에 필수적이다. [그림 4]는 1mm 평판 샘플에 대하여 탈기 시간에 따른 DC 전계의 변화를 나타낸다. [그림 4]에서와 같이 70℃에서 24h동안 탈기 작업을 수행 하였을 때 DC 전계가 안정됨을 확인 할 수 있다[4]. 이 외 케이블 열화 및 수명 향상을 위하여 첨가하는 산화 방지제, 전압 안정제 및 가교 촉진제와 같은 첨가제는 케이블의 절연 성능 저하의 원인이 될 수 있다. 이러한 영향을 개선하기 위해 전압형 HVDC XLPE 케이블은 DCP 가교제 또는 첨가제 저감 및 폴리머 개질을 통해 가교 효율을 향상하

는 방법을 적용하고 있다.



(a) 0h Degassing, 70°C

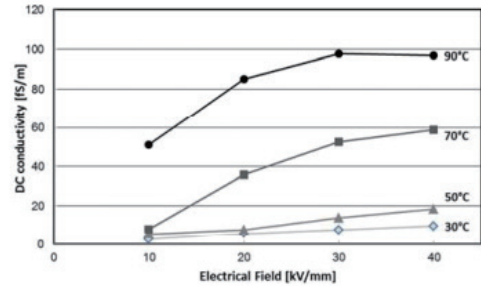


(b) 24h Degassing, 70°C

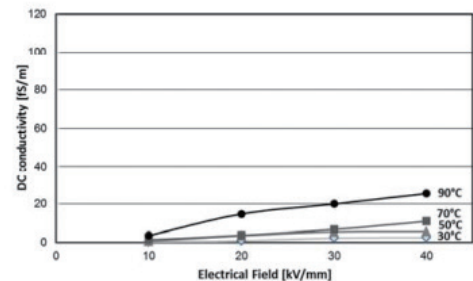
그림 4 Degassing 시간에 따른 DC 전계 변화 (Borealis) [4]

이와 같은 방법을 적용한 전압형 HVDC용 XLPE 절연 재료 연구 및 개발은 전 세계적으로 유럽의 Borealis社가 주도하고 있다. 이 외 북미의 Dow社와 국내 한화솔루션社도 전압형 HVDC XLPE 절연에 대한 연구 및 개발을 진행하고 있다. Borealis社에서는 최고 640kV급에 적용 가능한 전압형 XLPE 컴파운드 (LS-4258DCE)를 개발하였으며, 우수한 DC 절연내력, 스코치 현상 및 잔사가스 저감 등에서의 장점을 부각하여 발표하였다. [그림 5]는 525kV 전압형 XLPE HVDC 케이블의 PQ 시험에 적용한 Borealis社 XLPE 절연 자재의 DC 전도도를 나타낸다. [그림 5]에서 같이 Peroxide가 저감된 XLPE DC 전도도의 온도에 따른 편차가 기존 XLPE에 비해 감소한 것을 확인 할 수 있다[4]. Borealis社는 2014년 ABB社와 협력하여 525kV급 케이블 시스템에 대하여 CIGRE TB496에 따른 인증 시험을 완료하였으며, 2017년 NKT社와 640kV급 전압형 HVDC 케이블을 시험 인증 완료하였

다. 또한, NKT社에서는 Borealis社의 전압형 XLPE 컴파운드를 사용하여 독일 Tennet社의 SuedLink와 SuedOstLink HVDC 프로젝트에 525kV 전압형 XLPE HVDC 케이블을 적용할 예정이다.



(a) 기존 XLPE



(b) Peroxide 저감 XLPE

그림 5 기존/Peroxide 저감 XLPE의 온도에 따른 DC 전도도 (Borealis) [4]

전압형 HVDC 케이블 시장은 유럽 중심으로 이루어져 있기 때문에 Prysmian社, NKT社 및 Nexans社등 유럽 케이블 제조사가 연구 및 개발을 주도하고 있다. Prysmian社는 2019년 525kV HVDC XLPE 케이블에 대하여 PQ test를 완료하였으며, 600kV급 HVDC XLPE 케이블과 HVDC HPTE 케이블 개발하고 Type test를 완료하였다. NKT社는 2016년 ABB社의 초고압 케이블 사업을 인수하여 현재 최대 2600MW 용량의 525kV HVDC XLPE 케이블을 상용화하였으며, 세계 최초로 640kV HVDC XLPE 지중 케이블을 개발 완료하였다. Nexans社는 2016년 육상 및 해저에 적용 가능한 320kV급 전압형 HVDC XLPE 케이블 개발 및 시험 인증을 완료하였으며, 400kV 및 525kV 전압형 HVDC XLPE 케이블도 2019년 시험 인증을 완료하였다. 특이한 사례로 2019년 일본의 Sumitomo社는 National Grid社의 NEMO Link 프로젝트(영국-벨기에) 400kV 전압형 HVDC 시스템에 전류형 XLPE 케이블 설치 및 운영



(a) 525kV 전압형 HVDC, Prysmian [5]



(b) 525kV 전압형 HVDC, Nexans [6]



(c) 640kV 전압형 HVDC, NKT [7]



(d) 525kV 전압형 HVDC, ZTT

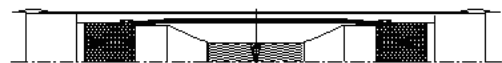
그림 6 전압형 XLPE HVDC 개발 현황[5~7]

실적을 보유하고 있으며, 250kV 전압형 HVDC XLPE 케이블을 일본 자국내 NEW Hokkaido-Honshu 프로젝트에서 운전 중이다. 이 외 중국의 ZTT社は 525kV 전압형 HVDC XLPE 케이블을 개발 완료하였다. [그림 6]에 유럽 및 아시아 케이블 제조사의 전압형 HVDC 개발 현황 및 시험 사진을 나타내었다[5~7].

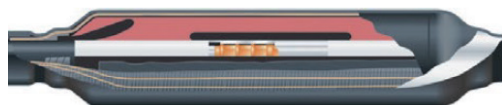
3.2 접속합

HVDC 케이블 시스템은 장조장일수록 그 효율성이 증가하므로 대전력 계통연계를 위한 국가 및 대륙간 장거리 송전에 활용된다. 하지만 케이블의 연속생산 및 운송의 한계 등으로 인해 케이블 간 접속이 반드시 필요하다. HVDC 케이블 접속합은 사용목적에 따라 단말 접속합(Termination Joint), 현장 접속합(Field Joint), 수리 접속합(Repair Joint), 공장 접속합(Factory Joint), 이중 접속합(Transition Joint)으로 구분할 수 있다. HVDC 전압형 XLPE 케이블 시스템에서는 단말 접속합으로 Slip-on Type의 기중중단접속합인 EB-A(End Box-Air)가, 현장 및 수리 접속합에는 PMJ(Pre-Molded

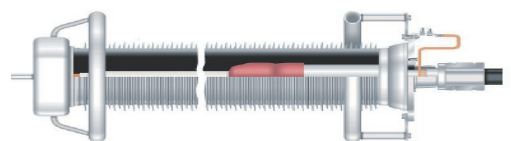
Joint) Type의 접속합이 주로 적용되고 있다. 또한 케이블의 장조장화를 위해 필수적인 공장접속합은 케이블과 동경의 구조적 특성을 가지는 접속합으로 TMJ(Tape Molded Joint) 및 EMJ(Extruded Molded Joint)가 적용되고 있으며, [그림 7]에 HVDC 전압형 XLPE에 적용되고 있는 접속합을 나타내었다[8].



(a) Factory Joint



(b) Pre-Molded Joint[8]

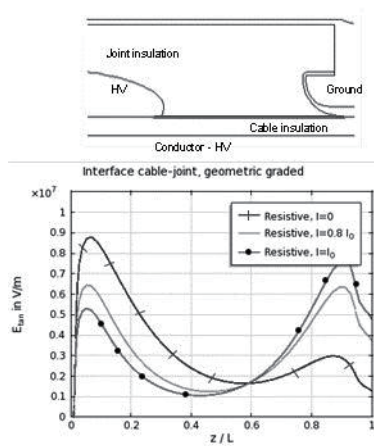


(c) End Box-Air(Slip-on type)[8]

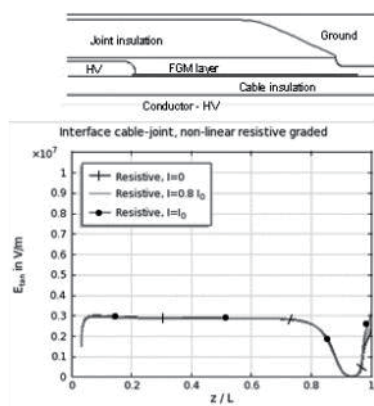
그림 7 HVDC 전압형 XLPE 적용 접속합

HVDC 전압형 XLPE 케이블 시스템의 접속함에 활용되는 재료는 크게 LSR(Liquid silicone rubber)과 EPDM(Ethylene Propylene Diene Monomer)이 사용되고 있다. 이 중 LSR은 소재 특성 상 HVDC 전압형 XLPE와의 이종계면에서의 도전을 차이 및 공간전하 축적 특성이 EPDM에 비해 높아 HVDC 전압형 XLPE의 접속함의 재료로 EPDM이 선호되고 있다. 최근에는 이러한 LSR의 소재 특성을 개선하기 위한 연구가 Momentive社 및 DOW社를 중심으로 진행 중에 있으며, 600kV급까지 적용 가능한 HVDC용 LSR 소재를 개발 중에 있다[9-10].

또한, 해외 HVDC 케이블 선진사를 중심으로 [그림 8]과 같이 전계에 따라 비선형 저항 특성을 가지는 물질인 FGM(Field Grading rubber Material) 층을 둬으로써 HVDC XLPE 케이블과 접속함의 이종계면에서 발생하는 DC 전계를 완화하는 기술을 적용하는 연구 및 제품을 개발하고 있다[11].



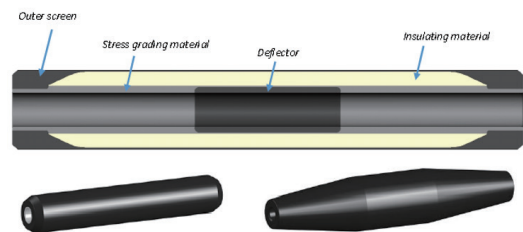
(a) FGM 적용 전 이종계면 전계



(b) FGM 적용 후 이종계면 전계

그림 8 FGM 적용 전/후 이종계면 전계(NKT)[11]

NKT社는 2017년 세계 최고의 640kV급 전압형 XLPE HVDC 케이블 시스템 인증시험을 완료하였으며, EPDM 소재의 접속함에 FGM 기술을 적용하였다. Prysmian社도 EPDM 소재의 접속함에 FGM 기술을 적용하여 600kV급 전압형 XLPE HVDC 케이블 시스템을 인증을 완료하였다. [그림 9]에 NKT社와 Prysmian社의 EPDM 소재, FGM 적용, PMJ type의 접속함 사진을 나타내었다[7],[12].



(a) NKT FGM 적용 접속함(640kV)[7]



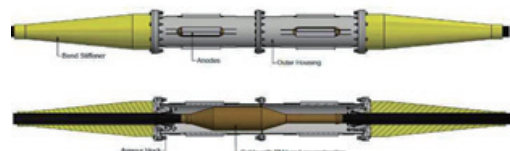
(b) Prysmian FGM 적용 접속함(525kV)[12]

그림 9 해외 선진사의 FGM 적용 접속함(EPDM 소재 적용)[7], [12]

이 외에도 Nexans社와 Sumitomo社도 525kV급 HVDC 전압형 XLPE 케이블 시스템에 EPDM 소재를 적용한 접속함을 적용하여 개발을 완료하였다. [그림 10]에 Nexans社의 525kV급 HVDC 전압형 XLPE 케이블 시스템에 적용한 EPDM 소재의 접속함 사진을 나타내었다[6].



(a) NKT FGM 적용 접속함(640kV)[7]



(b) Prysmian FGM 적용 접속함(525kV)[12]

그림 9 해외 선진사의 FGM 적용 접속함(EPDM 소재 적용)[7], [12]



(a) 500kV급 MI-PPLP Type test 선로



(b) 525kV급 전압형 XLPE 시험 선로

그림 11 대한전선 HVDC 케이블 시스템 시험 선로

대한전선은 이러한 전 세계적인 HVDC 케이블 시스템의 수요에 대응하기 위해 지속적이고 집중적인 개발인력과 설비투자 및 연구를 통해 HVDC 케이블 시스템을 개발하고 있다. 2017년에는 500kV급 HVDC MI-PPLP 케이블을 개발을 완료하였으며, 500kV급 전류형 및 525kV급 전압형 XLPE 케이블 시스템도 2021년 완료를 목표로 개발을 진행 중에 있다.

4. 결 론

HVDC 케이블 시장은 신재생 에너지 증가 및 국가 간 전력 연결망이 확대됨에 따라 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 현재 유럽을 중심으로 지속적으로 수요가 발생되고 있으며, 한국, 중국, 일본, 러시아의 계통망을 HVDC로 연결하는 동북아 슈퍼그리드 사업이 구체적으로 진행 중에 있어 아시아 지역에서의 HVDC 수요도 지속적으로 증가할 전망이다. 특히, 전력 변환 기술의 발전에 따라 전압형 HVDC 시스템의 단점으로 지적되었던 고전압 및 대용량 전력전송에 대한 한계가 해소되고 있어, 유럽이 중심이

되고 있는 전압형 HVDC 케이블 시스템에 대한 대형 프로젝트들이 계획되고 있다.

이러한 기술적, 경제적인 상황에 발맞추어서 국내에서도 전압형 HVDC 케이블에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 세계 시장의 수요에 적극적으로 대응해 나가는 것이 필요하다.

[참고문헌]

- [1] Global Rise of HVDC and Its Background, Hitachi Review, 2021
- [2] Espen H.Doedens, "Topographical Impact on Space Charge Injection, Accumulation and Breakdown in Polymeric HVDC Cable Interfaces", Ph.D Thesis, Chalmers university of technology, Sweden, 2020
- [3] H.Ghorbani, Characterization of conduction and polarization properties of HVDC cable XLPE insulation materials, Ph.D Thesis, KTH School, Sweden 2016
- [4] Villgot ENGLUND, "Key properties of next generation XLPE insulation material for HVDC cables, Jicable'15 B6-3, 2015

- [5] Prysmian group, "Qualification testing of P-Laser and XLPE cable systems successfully completed, Prysmiangroup.com, 07/01/2019
- [6] Nils-Bertil FRISK, "Qualification 400 and 525kV HVDC XLPE Cable systems including a multitude of accessory configurations", A9-3, Jicable, 2019
- [7] M JEROENSE "Fully qualified 640kV underground extruded DC cable system", B1-309, CIGRE Session 47, 2018
- [8] Dominik HARING, "Investigation and Qualification of 320kV HVDC cable systems for VSC and LCC applications", A9-1, Jicable, 2019
- [9] Rashid Hussain, "Development of a Liquid Silicone Rubber for the application in HVDC Cable Accessories" VDE Hochspannungstechnik, 09-11.11. 2020
- [10] Robert DRAKE, "Development of Novel liquid silicone rubber solutions for HVDC cable Accessories", B5-4, Jicable, 2019
- [11] M SALTZER, "A new voltage level for extruded DC cables", B1-301, CIGRE Session 46, 2016
- [12] A.BAREGGI, "Current and future applications of HPTE insulated cables systems", B1-307 CIGRE, 2018



HVDC 전류형 XLPE 케이블 개발 동향

Technical Trend of HVDC XLPE Cable for Line Commutated Converter System

남진호 수석연구원, 손시호 수석연구원, 남기준 이사, 김정년 상무 | LS전선

JINHO NAM, SIHO SON, GIJOON NAM, JUNGNYUN KIM | LS Cable & System



요약

본 기고에서는 전력 전송 방향 전환시 전류의 방향이 변하지 않고 극성반전이 발생하는 대용량 전력변환 시스템에 적용할 수 있는 HVDC용 XLPE 케이블 개발 동향을 소개하였다. 일본에서 공간전하 억제용 나노 재료를 적용한 XLPE 케이블은 500kV급 까지 개발되어 400V급까지 상용화하였고, 국내에서도 80kV, 250kV를 순차적으로 개발했으며, 2021년까지 대책과제를 통해 전류형 500kV급 케이블을 개발하여 향후 국내 500kV HVDC 송전 프로젝트에 적용할 계획이다.

Abstract

This article introduces the technical trend of HVDC XLPE cable for polarity reversible and higher power transformable Line Commutated Converter System. In Japan, for reducing space charge accumulation in XLPE cable, Nano-composite XLPE used DC 500kV cable was developed and 400kV cable was commercialized. In Korea DC 80kV and 250kV cable were also developed and now 500kV cable system is developing up to 2021 by government research support.

1. 서론

1930년대에 스웨덴과 독일에서 근대의 HVDC 송전 기술을 시작하였고, 초기 상업적 HVDC 운영은 1951년 구소련의 ± 100 kV 30MW와 1954년 스웨덴의 ± 100 kV, 20 MW 시스템이었다. 이 당시에는 고점도 절연유를 함침시킨 MI (Mass Impregnated) 케이블이 사용되었다 [1]. 1960년대부터 AC용 케이블에 널리 사용되던 XLPE (Cross-linked Polyethylene)는 상대적으로 높은 AC 절연과 파괴 강도와 열적 기계적 우수성과 포설 운영상의 장점이 있었으나 DC 송전용으로 사용하기에는 절연특성과 공간전하 특성 저하의 문제가 있었고 특히 공간전하는 케이블 절연체 내부에 전계의 왜곡을 가져왔다. 이를 해결하기 위해 재료업체와 케이블 업체

의 협업으로 DC용 재료 개선을 위한 연구가 1980년대부터 진행되었고, 나노 재료에 대한 적용이 이러한 공간전하 문제를 해결하는데 큰 역할을 담당하였다 [2-7].

전력을 송전하는데 있어서 사용하는 AC-DC 그리고 DC-AC 변환하는 설비는 두 가지 종류가 있다. 그 하나는 1970년대부터 사용되는 Thyristor를 적용하여 전류를 제어하는 방식의 변환기 (Line Commutated Converter : LCC)이고 다른 하나는 1990년대부터 전력반도체 소자를 적용하여 고전압을 제어하는 방식의 변환기 (Voltage Source Converter : VSC)이다. 이러한 변환기 방식에 따라 케이블에 요구되는 특성이 다르게 되며 이에 따라서 단순히 전류형 XLPE와 전압형 XLPE로 구분하여 설명하는 경우도 있으며 본 기고에서는 전류형 변환기에 적용하는 HVDC

XLPE 케이블의 기술 동향에 대해 설명하고자 한다.

2. 변환기 종류에 따른 특성과 전류형 XLPE에 요구되는 특성

변환기의 종류는 앞에서 언급한 바와 같이 전류형과 전압형 변환기로 구분되며 이에 따라 사용하는 제품의 요구 특성에 차이가 있다. GE (구 ALSTOM)에서 발표한 자료에 따르면 전류형 변환기를 적용할 때 케이블에 요구되는 가장 큰 특징은 극성반전에 견뎌야한다는 것이며 이를 표 1에 정리하였고 이를 위해 공간전하 축적이 적은 특별한 성능을 요구한다 [8].

표 2에는 HVDC 케이블 종류에 따른 절연재료의 차이와 특이 사항을 나타내었다. 특히 극성반전이 있는 전류형 변환기에 적용하는 케이블의 고체 절연체로서 XLPE에 요구되는 특징은 공간전하 축적이 적어야 한다는 것이다. 공간전하 축적의 원인과 재료의

전기전도도 영향에 대해서는 일반적으로 다음의 식1에 의존하는 것으로 알려져 있다.

$$\sigma = nq\mu$$

σ = Electrical Conductivity(전기전도도)

n = Concentration of Charge Carrier(전하농도)

q = Electron Charge(전자전하량)

μ = Charge Mobility(전하이동도)

즉, 수식에서 보듯이 전하의 농도를 낮추거나, 전하의 이동도를 낮추어야 한다. 일반적으로 전하의 농도는 XLPE에서는 가교부산물에 의해 영향을 받으므로 가교부산물의 농도를 낮추는 것이 필요하며, 전하의 이동도를 낮추기 위해서는 전하를 강하게 트랩할 수 있는 트랩의 농도를 높이거나 트랩의 깊이를 키우는 방법이 일반적으로 알려져 있다. 이러한 이론적 해석에 근거하여 DC 고

표 1 변환기에 따른 특성 및 요구사항 [8]

구분	LCC (전류형 변환기)	VSC (전압형 변환기)
명칭	Line Commutated Converter	Voltage Sourced Converter
기술	(Current Sourced Converter)	(Self Commutated Converter)
전력 전송	Thyristor Based	Transistor (IGBT, GTO etc.) Based
특징	High Power	Low Power
	전력 방향 따라 극성반전 전류방향 변화 없음	극성반전 없음전력방향 따라 전류 방향 변화
	강한 AC 시스템 요구	약한 AC 시스템으로 운영
	Black Start 불가능	Black Start 가능
	Harmonic Distortion 발생 (Filter 필요함)	약한 Harmonic Generation(Filter 불필요)
	Filter로 인한 넓은 설치 면적 요구	LCC의 50~60% 면적
	Low Station Loss	High Station Loss
	Lower Cost	10~15% higher Cost
	Higher Reliability	Lower Reliability (Component 의존성)
	More Mature Technology	Less Mature Technology
	덜 정밀한 보상전력 제어	세밀한 보상전력 제어
	극성 반전 가능한 케이블 (MI, 나노적용 XLPE 케이블 등)	극성반전 불가능 케이블 (상용 DC XLPE 케이블 적용)

표 2 HVDC 케이블 종류별 특성 [9]

구분	MI		OF	DC XLPE	
절연재료	Kraft Paper	Propylene Paper Laminate	Kraft Paper	VSC XLPE	LCC XLPE
변환기 형식	전류형/전압형 동시 활용 가능			전압형	전류형/전압형
공간전하 영향					
허용온도	50~55℃	80~85℃	80~85℃	70℃	90℃
장점	극성반전, HVDC 실적		극성반전	시공/유지보수 편의성	
단점	절연컴파운드 함침시간 필요		HVDC 실적	극성반전불가	소수업체

전계에서 나노 입자 주위에 깊은 트랩전위가 형성되어 전하의 주입을 억제함으로써 공간전하 축적이 적어짐을 설명한 좋은 예를 그림 1에 나타내었다 [10]. (a)는 LDPE에서 발생하는 공간전하 축적 거동을, (b)는 LDPE/MgO 복합재료의 공간전하 거동을 나타낸다. LDPE에서는 많은 양의 Packet-Like 전하 축적이 시발생하였고, 나노입자인 MgO가 포함된 LDPE/MgO 복합재료에서는 공간전하가 거의 축적되지 않음이 관찰되었다.

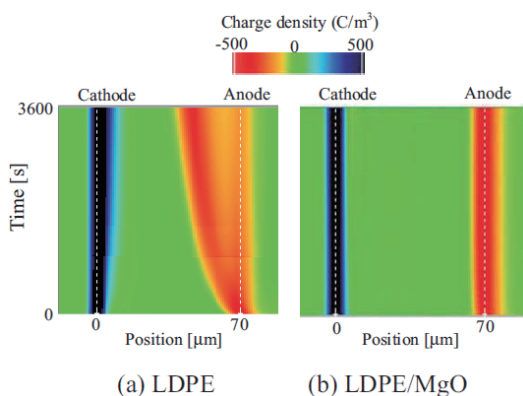


그림 1 250kV/mm 전계에서 LDPE와 LDPE/MgO의 공간전하 거동 [10]

3. 해외 전류형 XLPE 케이블 개발 동향

3.1 일본의 HVDC XLPE 케이블

일본은 1980년대에 DC 재료에 대한 기본 연구를 시작하였고, AC용 케이블을 적용하였을 때 극성반전시 절연과피가 발생하여 공간전하에 의한 취약성 개선에 대한 연구를 시작하였고 나노 유전체 기술을 적용하여 공간전하 저감효과를 나타내는 기술로 발전하였다. 주요 업체로는 히다치, 스미토모, 후루카와 등이 진행하였으며 제품에 대한 연구로서 1995년까지는 250kV급 케이블과 공장접속함 (Factory Joint : FJ)를 개발하였고, 2001년까지는 500kV급 케이블과 FJ를 선행 개발하였다. HVDC 관련 규격이 2003년 TB-219 (~250kV), 2012년 TB-496 (~500kV)로 진행에 따라 주로 전류형 케이블 시스템 방향으로 개발 진행하였다.

일본은 내부의 개발 경험이 많았지만 J-Power Systems (現 스미토모)는 2013년이 되어야 혼슈-홋카이도를 연결하는 250kV 전류형 케이블을 세계 최초로 포설하여 상업운전을 하고 있다.

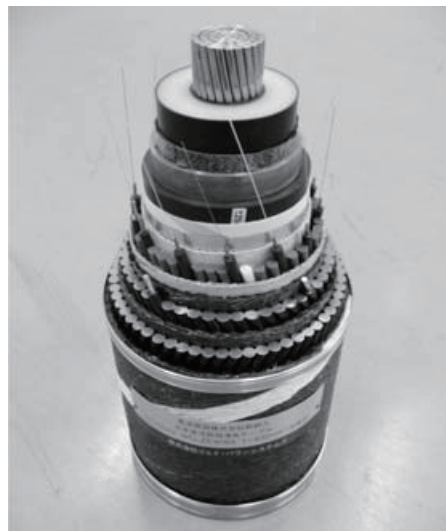


그림 2 혼슈-홋카이도 포설된 250kV 케이블 [11]

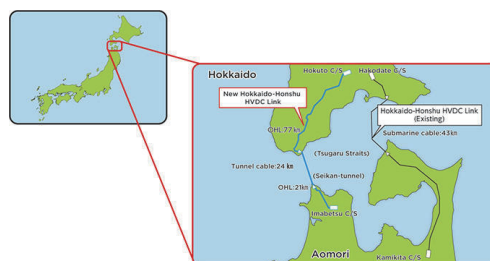


그림 3 일본 혼슈-홋카이도 HVDC 250kV 경로 [11]

이후 이 기술을 적용하여 벨기에와 영국 사이에 HVDC 400kV, 1000MW, 141.5km의 케이블을 2019년에 포설 완료하였고, 상업 운전을 하고 있다. 이 제품이 적용된 현장은 전압형 시스템이나 성능평가 관련 모든 시험을 전류형 90℃ 급 케이블 시스템으로 평가하면서 일본의 기술력을 자랑하기도 했다. 최근 본 기술을 활용하여 유럽에 500kV (2020년), 400kV급 (2021년)의 지중 HVDC 케이블에 대한 수주도 실적을 쌓아가고 있다.



그림 4 영국-벨기에 포설된 HVDC 400kV 케이블 [12]

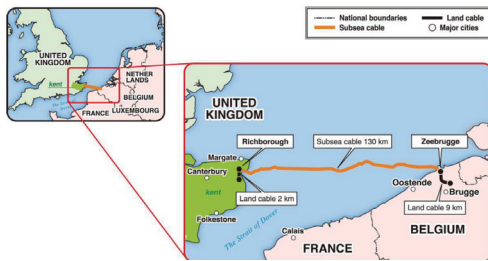


그림 5 영국-벨기에 포설된 HVDC 400kV 케이블 경로 [12]

3.2 중국의 HVDC XLPE 케이블

중국에서도 후발 주자로 HVDC 케이블 개발에 진입하였으나, 아시아 지역 뿐만 아니라 전세계적인 스마트 그리드화와 전력 전송 에너지 네트워크를 구상하면서 개발을 진행하고 있다 [13]. 특히 ZTT, Orient, Hentong 등이 해외 재료를 적용한 전압형 케이블을 개발하고 있으며, 중국 자체적으로 수많은 연구 인력과 정부/학계의 지원으로 여러 가지 DC 절연재료에 대한 연구를 통해 전류형/전압형 XLPE 케이블 개발도 진행하고 있다.

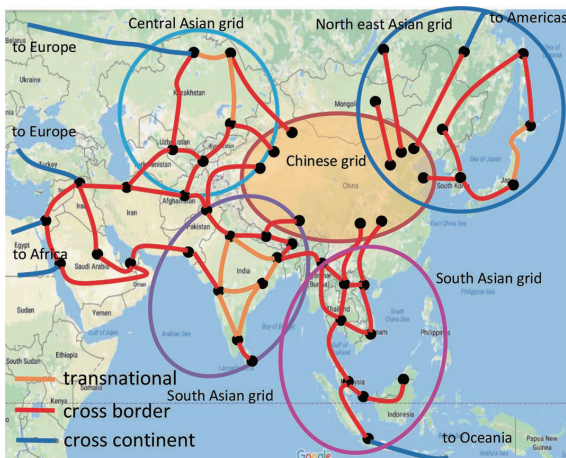


그림 6 아시아 지역의 장거리 계통연계 [13]

4. 국내 케이블 개발 동향

국내 LS전선, 대한전선, 일진전기는 HVDC 케이블 개발을 위한 연구에 매진하고 있으며 특히 LS전선은 2012년 80kV 전류형 XLPE 케이블을 개발하여 제주 실증단지에 적용하여 한국전력공사에서 시범운영하였다 [14].

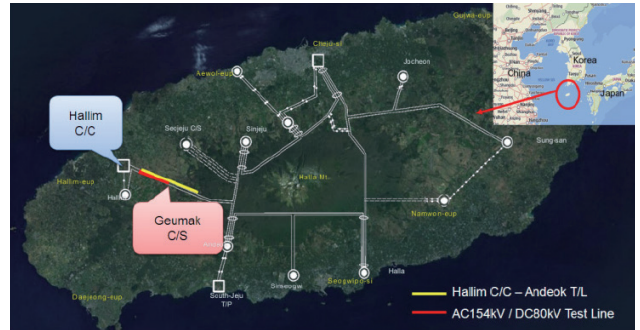


그림 7 80kV 제주 실증단지 [14]

2013년에는 250kV 전류형 XLPE 케이블을 국내 최초로 국내 여러 전문 기관들과 협력하는 국책과제로 개발했다. 이 케이블에 적용된 전류형 나노복합 DC XLPE 또한 국내 자체 개발한 것으로 국내 최초로 CIGRE(국제 대전력망 기술 협의회) 국제 기술 규격에 합격하여 KOLAS 공인인증을 획득하였다.

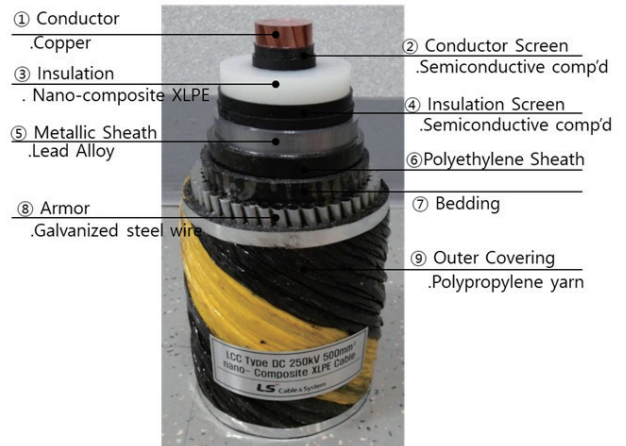


그림 8 전류형 250kV 케이블 (LS전선 개발) [15]

해외에서는 스마트 그리드에 의한 국가간 전력 전송으로 고전압, 고용량, 장거리 송전에 대한 요구는 지속적으로 발생하고 있으며, 국내에서도 서해안 풍력 단지나 동해안 발전 단지에서 발생하는 전력 전송의 요구가 예상되고 있어 전류형 HVDC 500kV 케이블 개발에 대한 요구가 증가하고 있다.

이에 따라 HVDC 연구를 지속한 산업계의 LS전선, LG화학, 디와이셀루션과 연구계인 한국전자기술원, 한국전기연구원, 한국전력 전력연구원과 학계에서는 대전대, 호서대, 호남대, 고려대,

가천대의 전문가 집단이 참여하여 “ $\pm 500\text{kV}$ HVDC XLPE 해저 케이블 개발 (육상 포함)” 과제를 한국에너지기술평가원이 전담 기관인 국책과제로서 2017년 5월부터 2021년 4월까지 진행하고 있다. 주요 기관 및 역할에 대해 그림 9에 나타내었으며, 본 과제에서 제조하여 평가중인 500kV 케이블 시료를 그림 10에 나타내었다. 현재 제품에 대한 평가를 한국전력 고창 전력시험센터에서 진행중이며 향후 국내 500kV HVDC 송전 프로젝트에 적용할 계획이다.

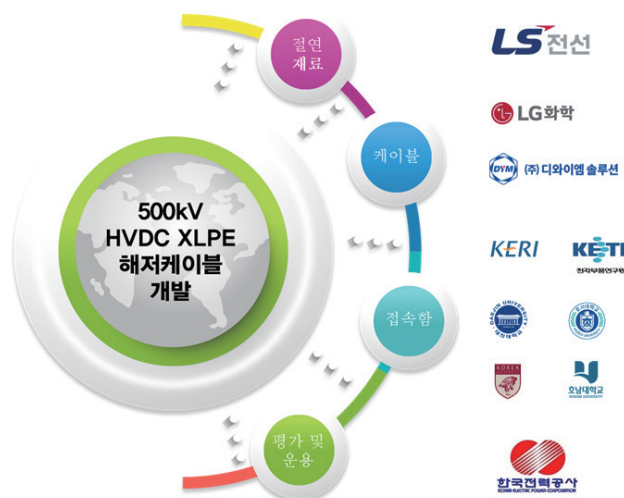


그림 9 HVDC 500kV 개발 국책과제 기관



그림 10 전류형 500kV 케이블

5. 결 론

19세기 전류의 전쟁 이후로 21세기에 들어서 HVDC에 대한 요구는 급격히 증가하고 있다. 변환기의 성능 발전과 함께 케이블의 기술 발전도 같이 진행되었으며, 1990년대 전력반도체 기술의 발전으로 HVDC XLPE 케이블을 더욱 발전하고 있다. DC XLPE 케이블의 개발은 전세계적으로 전류형과 전압형에 해당하는 절연 재료의 개발이 중심이 되어 진행되고 있으며 80kV급을 시작으로 현재 500kV급까지 완료되어 상용화를 압에 두고 있다. 최근에는 대용량에 대한 이슈로 70°C급으로 한계가 있는 DC XLPE 보다는 90°C급 DC XLPE에 대한 요구가 증가하고 있다. 또한 친환경 대응을 위해 비가교 케이블 개발에 대한 연구도 많이 진행되고 있으며 유럽에서는 상용화를 앞에 두고 있다.

기술 인력의 부족이 예상되는 국내의 현 시점에서 절연재료 기술, 케이블 기술, 접속함 기술, 시공 기술 등의 HVDC 케이블 분야 전반에 대한 저변을 확대하고 실제 개발 및 평가 기술의 유지 발전을 위해 관련 종사자들의 협업과 해외 전문가들과의 기술교류를 통해 국내 인력의 지속적 육성과 꾸준한 지원이 필요하다.

[참고문헌]

- [1] Hingorani, N.G., "High-voltage DC transmission: a power electronics workhorse". IEEE Spectrum. 33 (4), pp. 63-72, 1996
- [2] A. Usuki 외, "Synthesis of nylon 6-clay hybrid", J. Mater. Res. Vol. 8, No.5, pp. 1179-1184, 1993
- [3] T. Hanley 외, "A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables", IEEE EIM, Vol. 19, No. 1, pp. 13, 2003
- [4] M. Danikas 외, "Nanocomposites - A review of electrical treeing and breakdown" IEEE EIM, Vol.25, No.4. pp. 19-25, 2009
- [5] C. Green 외, "Nanodielectrics - How much do we really understand?", IEEE EIM, IEEE EIM, Vol. 24, No. 4, pp. 6-16, 2008
- [6] Y. Murakami 외, "DC conduction and electrical breakdown of MgO/LDPE nanocomposite", IEEE TDEI, Vol. 15, No. 1, pp. 33-39, 2008
- [7] T. Tanaka 외, "Dielectric properties of XLPE/SiO₂nanocompos-

- ites based on CIGRE WG D1.24 cooperative test results", IEEE TDEI, Vol.18, No.5, pp. 1482-1517, 2011
- [8] https://sari-energy.org/oldsite/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Training/ Presentations /Day_7/LCC_vs_VSC_AL-STOM.pdf
- [9] 신구용 외, "한국 HVDC 사업 및 연구개발 어떻게 추진되고 있는가? (II)", 대한전기학회 전기의 세계, Vol. 65, No. 6, pp. 28-32, 2016
- [10] "Space Charge Suppression Effect of Nano-size Filler Added in Polymeric Materials", Journal of Physics Conference Series Vol. 183, 012004, 2009
- [11] Y MURATA 외, "Development of High Voltage DC-XLPE Cable System", SEI TECHNICAL REVIEW, No. 76, pp. 55-62, 2013
- [12] <https://global-sei.com/company/press/2018/12/prs106.html>
- [13] "Polymeric insulation for high-voltage dc extruded cables - challenges and development directions", IEEE EIM Vol.34, No.6, 2018
- [14] Chae-Kyun Jung et. al, "Insulation Design and Reliability Evaluation of $\pm 80\text{kV}$ HVDC XLPE Cables J. Electr. Eng. Technol Vol. 9, No. 3, pp. 1002-1008, 2014
- [15] Jin-Ho Nam et al., "Development of XLPE Nano-Composite Used for HVDC $\pm 250\text{kV}$ Cable System Applicable to LCC and VSC "A 9.4, JiCables, 2015



HVDC 케이블과 그 접속재에서 이종계면의 해석을 위한 기초

A Fundamental for the Interpretation of Multi-layer Interfaces of HVDC Cables and its Joints

이준호 교수 | 호서대학교

Lee, June-Ho, Professor | Hoseo University



요약

* HVDC 송전은 계통간 연계를 통해 안정적인 전기에너지를 장거리로 공급할 수 있다는 장점으로 유럽을 비롯하여 세계적으로 다수 프로젝트가 진행 중이며 향후 매우 각광받는 분야가 될 것으로 예상된다. HVDC 송전의 수단인 케이블과 그 접속재는 구조적으로 서로 다른 절연체(유전체)가 층상을 이루며 이 유전체 사이에는 계면(interface)가 존재하는데 이 부분에 대한 전기적 실험과 특성분석을 하기 위해서는 계면에서 전하밀도와 전계의 시간적 변화에 대한 이해가 필수적이다. 본 원고에서는 이종계면의 해석을 위해 널리 사용되면서도, 정작 그에 대한 기초적 유도과정이 흔치 않은 Maxwell-Wagner(-Sillar) 모델에 대해 라플라스변환을 적용하여 상세히 유도하고, 몇 가지 예를 정리하였다.

Abstract

The HVDC (high voltage direct current) transmission has advantages by which the electric energy can stably be sent to the long distance so that many international projects are in progress such as the SUEZLINK in the EU and it is expected that the related engineering technologies would be paid more attention in the future.

The HVDC power cable which is the main equipment for the HVDC transmission has the structure of multi layering of different insulating(dielectric) materials and the interfaces are formed between the materials. It is very essential to understand the time-dependence charge density and electric field at the interface to perform the test and interpret the results properly.

In this paper, the Maxwell-Wagner(-Sillar) model, which is widely used to analyze the interfaces, is derived mathematically by utilizing the basic Laplace transform and some application cases are shown.

1. 서론

다음과 같은 2개의 유전체가 계면을 형성하고 있을 때, 계단형 전압(step function)을 인가할 경우 계면의 전하밀도의 시간에 따른 변화는 접속재 등과 같이 이종계면이 존재하는 경우 대상의 해석에 필수적인 정보를 가지고 있다. 통상 이러한 모델을 Maxwell-Wagner(-Sillar) 모델, 줄여서 MW모델이라고 한다.

본 원고에서는 MW모델에서 전하밀도 등의 변화과정을 초보자도 이해가 가능할 수 있게 유도과정을 상술하였다.

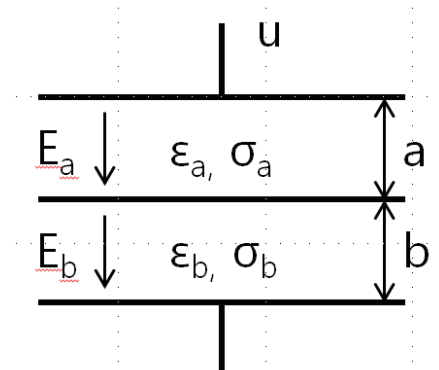


그림 1 Maxwell-Wagner모델로 표현되는 두 유전체의 배치와 계면. 이 경우 유전체는 손실성, 즉 도전율 σ 를 가지는 유전체라고 일반화한다.

여기서 인가전압 $U(t)$ 는 그림 2와 같은 계단함수(step function)이다.

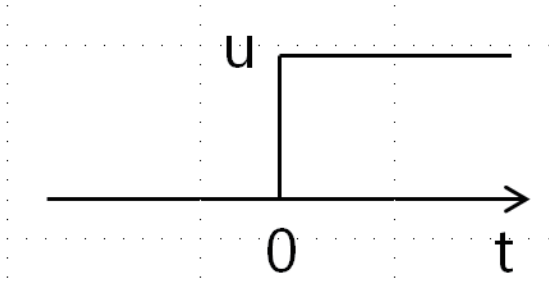


그림 2 계단형 함수형태의 인가전압

그리고 모든 해석은 전기자기학의 3가지 지배방정식으로부터 시작한다.

또한 유도과정에서 과도상태의 미분방정식의 해법은 여러 가지가 가능하나, 여기서는 라플라스변환(Laplace transform)을 사용한다.

전자기적 지배방정식(Electromagnetic Governing Eq.s)

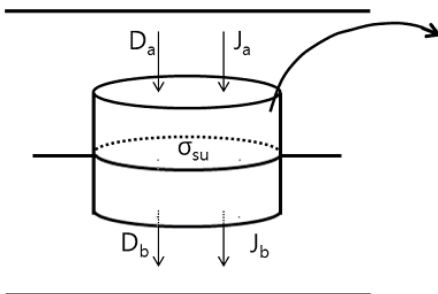
$$\begin{cases} \text{Gauss' law : } \rho = \nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot (\epsilon E) & \text{--- ①} \\ \Omega's \text{ law : } \vec{J} = \sigma \vec{E} & \text{--- ②} \\ \text{Continuity law : } \nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} & \text{--- ③} \end{cases}$$

2. 수학적 유도과정

필요한 수학 : Laplace Transform(L.T.)

①, ② → ③ 대입

$$\nabla \cdot (\sigma \vec{E}) + \frac{d}{dt} [\nabla \cdot (\epsilon \vec{E})] = 0 \quad \text{..... ④}$$



Gaussian surface에 Gauss' law 적용

$$\sigma_{su} = D_b + (-D_a) \quad \text{..... ⑤}$$

계면에 대한 전류밀도의 합을 다음과 같이 계산하면,

$$\begin{aligned} J_b + (-J_a) &= -\frac{\partial \sigma_{su}}{\partial t} \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} (D_b - D_a) - \quad \text{..... ⑥} \end{aligned}$$

여기서, σ_{su} : 계면에서 표면전하밀도 (surface charge density at interface) [$\frac{C}{m^2}$]

식⑥을 변형

$$(\sigma_b E_b - \sigma_a E_a) + \frac{d}{dt} (\epsilon_b E_b - \epsilon_a E_a) = 0 \quad \text{..... ⑦}$$

두 전극 사이의 전압 U 는 인가전압이고, 각 유전체의 전위차를 합한 값이므로

$$U = aE_a + bE_b \quad \text{..... ⑧}$$

⑧ → ⑦ 대입하여 E_a 에 대해 전개하면

$$(\epsilon_a b + \epsilon_b a) \frac{dE_a}{dt} + (\sigma_{ab} + \sigma_{ba}) E_a = \sigma_b U + \epsilon_b \frac{dU}{dt} \quad \text{..... ⑨}$$

여기서

$$\begin{cases} \epsilon = \epsilon_a b + \epsilon_b a \\ \sigma = \sigma_a b + \sigma_b a \end{cases}$$

라 하면 식⑨는

$$\epsilon \frac{dE_a}{dt} + \sigma E_a = \epsilon_b \frac{dU}{dt} + \sigma_b U \quad \text{..... ⑩}$$

⑩은 $E_a(t)$ 에 대한 1계 비제차 미방(1st-order Nonhomogeneous D.E.)이고, L.T.(Laplace transform)를 적용하여 풀이를 한다. 특히 L.T.의 다음 특성을 이용

$$\begin{cases} \frac{df(t)}{dt} \xleftrightarrow{\mathcal{L}} sF(s) - f(0^-) \\ u(t) \xleftrightarrow{\mathcal{L}} \frac{1}{s} \\ \delta(t) \xleftrightarrow{\mathcal{L}} 1 \end{cases}$$

⑩을 변경하면

$$\frac{dE_a}{dt} + \frac{\sigma}{\epsilon} E_a = \frac{\sigma_b}{\epsilon} U + \frac{\epsilon_b}{\epsilon} \frac{dU}{dt} \dots\dots\dots (11)$$

⑪에 L.T.적용

$$sE_a(s) - E_a(t=0^-) + \frac{\sigma}{\epsilon} E_a(s) = \frac{\sigma_b}{\epsilon} \frac{U}{s} + \frac{\epsilon_b}{\epsilon} [s \cdot \frac{U}{s} - U(t=0^-)]$$

초기조건에서 $E_a(t=0^-) = 0$, $U(t=0^-) = 0$

따라서,

$$(s + \frac{\sigma}{\epsilon}) E_a(s) = \frac{\sigma_b}{\epsilon} \frac{1}{s} + \frac{\epsilon_b}{\epsilon} \dots\dots\dots (12)$$

$$E_a(s) = \frac{\frac{1}{\epsilon} (\frac{\sigma_b}{s} + \epsilon_b)}{s + \frac{\sigma}{\epsilon}} \cdot U$$

$$= \frac{U (\sigma_b + s\epsilon_b)}{\epsilon s(s + \frac{\sigma}{\epsilon})} = U \cdot \frac{\epsilon_b (s + \frac{\sigma_b}{\epsilon_b})}{s(s + \frac{\sigma}{\epsilon})}$$

$$= U \cdot \frac{\epsilon_b}{\epsilon} \left[\frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s + \frac{\sigma}{\epsilon}} \right] \dots\dots\dots (13)$$

여기서,

$$\begin{cases} A_1 = \frac{\epsilon\sigma_b}{\sigma\epsilon_b} \\ A_2 = \frac{\sigma\epsilon_b - \sigma_b\epsilon}{\sigma\epsilon_b} \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

$$\therefore E_a(t) = \mathcal{L}^{-1}(E_a(s))$$

$$= U \cdot \frac{\epsilon_b}{\epsilon} \left[\underbrace{A_1 u(t)}_{\text{정상상태항 (steady)}} + \underbrace{A_2 e^{-\frac{\sigma}{\epsilon} t}}_{\text{과도상태항 (transient)}} \right] \dots\dots\dots (15)$$

⑭ → ⑮ 대입 후 정리

$$E_a(t) = U \left[\frac{\sigma_b}{\sigma} u(t) + \left(\frac{\sigma\epsilon_b - \sigma_b\epsilon}{\sigma\epsilon} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \dots\dots\dots (16)$$

여기서,

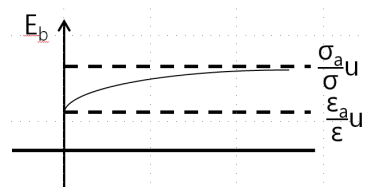
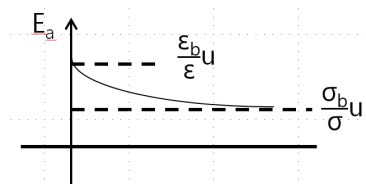
$$\tau = \frac{\epsilon}{\sigma} = \frac{\epsilon_1 b + \epsilon_2 a}{\sigma_1 b + \sigma_2 a}$$

이고, 이때 τ 는 등가회로 전체의 시정수를 의미함.

$U = aE_a + bE_b$ 의 관계에서 $E_b(t)$ 계산하면

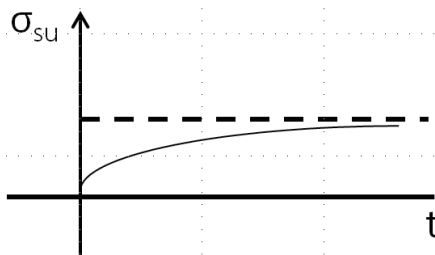
$$E_b(t) = \frac{a}{b} U \left[\left(\frac{\sigma - \sigma_b a}{a\sigma} \right) u(t) + \left(\frac{\sigma_b \epsilon - \sigma \epsilon b}{\sigma \epsilon} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \dots\dots\dots (17)$$

$$\begin{cases} E_a(0) = \frac{\epsilon_b}{\epsilon} U = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_a b + \epsilon_b a} U \\ E_a(\infty) = \frac{\sigma_b}{\sigma} U = \frac{\sigma_b}{\sigma_a b + \sigma_b a} U \\ E_b(0) = \frac{\epsilon_a}{\epsilon} U = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_a b + \epsilon_b a} U \\ E_b(\infty) = \frac{\sigma_a}{\sigma} U = \frac{\sigma_a}{\sigma_a b + \sigma_b a} U \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$



σ_{su} : surface charge density at the interface

$$\begin{aligned}
 \sigma_{su} &= D_b - D_a = \epsilon_b E_b - \epsilon_a E_a \\
 &= \epsilon_b \left(\frac{U}{b} - \frac{a}{b} E_a \right) - \epsilon_a E_a \\
 &= \frac{\epsilon_b}{b} U - \left(\frac{\epsilon_a b + \epsilon_b a}{b} \right) E_a \\
 &= \frac{\epsilon_b}{b} U - \frac{\epsilon}{b} E_a = \frac{1}{b} [\epsilon_b U - \epsilon E_a] \\
 &= \frac{1}{b} \left\{ \epsilon_b U - \epsilon U \left[\frac{\sigma_b}{\sigma} + \left(\frac{\sigma \epsilon_b - \sigma_b \epsilon}{\sigma \epsilon} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \right\} \\
 &= U \left\{ \frac{\epsilon_b}{b} - \frac{\epsilon}{b} \left[\frac{\sigma_b}{\sigma} + \left(\frac{\sigma \epsilon_b - \sigma_b \epsilon}{\sigma \epsilon} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \right\} \\
 &= U \left\{ \frac{\epsilon_b}{b} - \frac{\epsilon \sigma_b}{b \sigma} - \frac{\epsilon}{b} \left(\frac{\sigma \epsilon_b - \sigma_b \epsilon}{\sigma \epsilon} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right\} \\
 &= U \left\{ \left(\frac{\epsilon_b \sigma - \epsilon \sigma_b}{b \sigma} \right) - \left(\frac{\epsilon_b \sigma - \epsilon \sigma_b}{b \sigma} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right\} \\
 &= \left(\frac{\epsilon_b \sigma - \epsilon \sigma_b}{b \sigma} \right) U \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right\} \\
 &= \left(\frac{\sigma_a \epsilon_b - \sigma_b \epsilon_a}{\sigma} \right) U \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right\} \\
 &= \sigma_{su}^{\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \dots\dots\dots (19)
 \end{aligned}$$



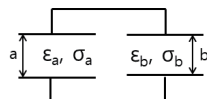
$$\sigma_{su}^{\infty} = \frac{\sigma_a \epsilon_b - \sigma_b \epsilon_a}{\sigma} \cdot U$$

↓

$$\frac{\sigma_{\text{고전압}} \epsilon_{\text{절지}} - \sigma_{\text{절지}} \epsilon_{\text{고전압}}}{\sigma_{\text{고전압}} b_{\text{절지}} - \sigma_{\text{절지}} a_{\text{고전압}}} \cdot U$$

시정수(Time Constant) : τ

$$\tau = \frac{\epsilon}{\sigma} = \frac{\epsilon_a b + \epsilon_b a}{\sigma_a b + \sigma_b a} \Rightarrow \text{등가회로}$$



3. 몇가지 응용예

조건은 다음과 같다고 가정

- (1) 두 재료의 ϵ 값은 비슷 $\Rightarrow \epsilon_a = \epsilon_b = \epsilon_s$
- (2) σ_a, σ_b 는 상당한 차이 $\Rightarrow \sigma_a > 10\sigma_b \simeq \sigma_s$
- (3) 두 층의 두께는 동일하다고 가정 $\Rightarrow a = b$

이 경우

$$\tau = \frac{\epsilon_s b + \epsilon_s b}{\sigma_a b + \sigma_b b} \doteq \frac{2\epsilon_s b}{(\sigma_a + \sigma_b)b} = \frac{2\epsilon_s}{\sigma_s} \dots\dots\dots (20)$$

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \rightarrow$ ②에 대입

$$\tau = 2\epsilon_0 \epsilon_r \frac{1}{\sigma_s} = 2 \cdot (8.85 \times 10^{-12}) \epsilon_r \cdot \frac{1}{\sigma_s} \left[\frac{As}{Vm} \Omega m \right] \dots\dots\dots (21)$$

여기에 $\epsilon_r=3$ 을 대입 (대부분의 절연체가 해당)

$$\tau = 5 \times 10^{-11} \frac{1}{\sigma_s} (\text{sec}) \dots\dots\dots (22)$$

τ 는 도전율이 큰 재료의 resistivity($\frac{1}{\sigma_s} = \rho_s$)에 선형적으로 비례

위 관계는 절연성이 큰 재료(more isolating layer)의 두께 b가 두꺼울 경우 더 잘 들어맞음(b>a의 경우)

$$\therefore \frac{\sigma_b}{\text{절연성}} \ll \frac{\sigma_a}{\text{most conductive}}$$

b가 얇은 경우, 즉 b<a의 경우는

수정이 필요

그러나 통상 σ_a 는 σ_b 에 비해 수십배 큰 경우가

대부분이므로 ② 관계는 유효한 경우가 많음

만약 절연유과 고분자가 다층을 이루는 경우에 대해 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} oil : \rho_s &= 2 \cdot 10^{11} \sim 2 \cdot 10^{13} (\Omega m) \rightarrow \tau = 10 \sim 10^3 (\text{sec}) \\ polymer : \rho_s &= 10^{15} (\Omega m) \rightarrow \tau = 10 (\text{hr}) \end{aligned}$$

The surface charge density σ_{su}

$$\sigma_{su}^{\infty} = \frac{\sigma_a \epsilon_b - \sigma_b \epsilon_a}{\sigma_a b + \sigma_b a} \cdot U$$

① 두 재료의 σ 과 ϵ 가 비례관계이면, 즉 $\frac{\sigma_a}{\sigma_b} = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_b}$

$$\sigma_{su}^{\infty} = 0$$

② $\sigma_a > 10\sigma_b$, $a = b$ 인 경우

$$\sigma_{su}^{\infty} = \frac{\sigma_a (\epsilon_b - \frac{\sigma_b}{\sigma_a} \epsilon_a)}{\sigma_a (b + \frac{\sigma_b}{\sigma_a} a)} U \doteq \frac{\sigma_a \epsilon_b}{\sigma_a b} U = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r b}{b} U \dots \textcircled{23}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} (\frac{A \cdot s}{V \cdot m}), U \simeq \text{수 } kV, b \simeq \text{수 } mm$$

일 경우, 식 ②의 최댓값은

$$\begin{aligned} \sigma_{su}^{\infty} &= \frac{8.85 \cdot 10^{-12} U (kV) \epsilon_r b}{b (mm)} \dots \textcircled{24} \\ &= \frac{8.85 U \epsilon_r b}{b} \times 10^{-12} \times 10^{+6} \\ &\doteq \frac{10 U}{b} \epsilon_r b (\frac{\mu C}{m^2}) \end{aligned}$$

즉, $\sigma_a > 10\sigma_b$ 의 조건에서는 최대 σ_{su}^{∞} 는

→ 재료의 σ 에는 독립적

→ 둘 중 절연성이 더 좋은 재료의 $\epsilon_r b$ 에 의해 증가됨

4. 결 론

이 글에서 소개한 Maxwell-Wagner(-Sillar)모델은 HVDC 계면해석에 가장 널리 사용되면서도, 저자가 연구를 수행하면서 그 유도과정을 상세히 설명한 문헌을 찾지 못하여 부족하지만 기초적인 전기회로의 과도상태문제로 모델링하고 라플라스변환을 적용하여 최종적인 시간변화에 따른 관계식을 유도하였다. 그리고 참고문헌에 나와 있는 예제들을 몇 가지 소개하였다. M. Zahn 교수의 저서에는 미분방정식을 해석적으로 풀이하였으며, F. H. Kreuger 교수의 저서에서는 유도과정이 매우 간략하게 나와 있어 중간과정이 상세히 설명되지 않은 부분을 보완했다고 보면 될 것이다. 그리고 D. J. Griffiths의 저서에서는 명확히 Maxwell-Wagner 모델에 대해서 별도의 내용으로 서술하지는 않고 있지만 서로 다른 유전체의 접합에 대해 기초가 되는 내용들을 잘 다루고 있다고 생각된다. 일본 전기학회가 발간한 유전체현상론이라는 책 역시 참고하기 좋은 내용들이 기술되어 있어 참고문헌에 넣었다.

[참고문헌]

- [1] Markus Zahn, Electromagnetic Field Theory: A Problem Solving Approach, Wiley, 1979.
- [2] Kreuger, F. H., Industrial High DC Voltage, Delft University Press, 1995.
- [3] David J. Griffiths. Introduction to Electrodynamics, 4th Ed., Pearson, 2013.
- [4] 犬石嘉雄 외 3인, 誘電體現象論, 電氣學會(日本), 2012.

그린뉴딜 핵심 수소산업 조망

유희덕 국장 | 전기신문

정부가 수소중심의 에너지 정책의 천명한 것은 지난 2019년 1월이다. 수소차·연료전지를 양대 축으로 '세계 최고수준의 수소경제 선도국가로 도약'을 비전으로 했다. 지난달 4일에는 세계 최초로 제정된 수소법(수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률)이 본격 시행에 들어갔다. 수소법은 지원정책부터 기반조성, 안전관리까지 수소경제 전분야를 망라하고 있다. 특히 산업부 장관 요청 시 주요 공공부지에는 특별한 사유가 없는 한 수소충전소나 연료전지를 설치해야 해 앞으로 인프라 구축에 탄력이 붙을 것으로 전망된다.

수소법은 2020년 2월 4일 세계 최초로 제정돼 1년 동안 하위법령 마련, 입법예고, 규제심사, 국무회의 심의의결을 거치면서 만들어 졌다. 정부가 수소경제에 대한 전폭적인 지원을 아끼지 않으면서 초창기 이지만 세계시장에서 우리나라는 단연 두각을 나타내고 있다. 국내 수소산업은 주요 분야에서 세계 1위 경쟁력을 유지하고 있다.

지난해 세계 수소차 판매량에서 현대차는 6025대로 전체의 82%를 차지했으며 일본 토요타 1064대, 혼다 218대보다 월등히 많았다. 지난 1년간 국내 수소충전소는 34개에서 70개로 36개 증가해 일본 24개(112→136), 독일 7개(84→91), 미국 1개 감소(70→69, 연구용 폐기)보다 많았다. 연료전지는 지난해 누적 발전량 기준으로 국내

600MW를 기록해 미국 482MW, 일본 313MW를 앞섰다.

정부는 2040년까지 수소차 620만대(내수 290만대·수출 330만대)를 생산할 계획이다. 수소 승용차는 2022년까지 핵심부품(막전극접합체, 기체확산층) 국산화율 100%를 달성할 계획이다. 2025년까지 연간 10만대 상업 양산체계를 구축해 수소차 가격을 내연기관 차량 수준까지 인하는 게 목표다. 보급은 2019년 1800대(내수 712대)에서 2022년 8만1000대(내수 6만5000대), 2040년 620만대(내수 290만대)까지 확대한다.

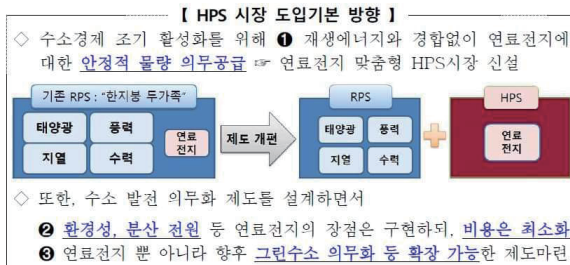
전력·열 등 에너지 분야 역시 야심 찬 보급 목표를 설정했다. 2040년까지 발전용 연료전지는 설비용량 15GW, 가정·건물용은 2.1GW 등 17.1GW를 공급할 계획이다.

발전용 연료전지 확대를 위해 연료전지 전용 LNG 요금제를 신설했다.

또 신재생 공급인증서(REC) 가중치도 당분간 유지해 투자 불확실성을 낮추기로 했다. 2025년까지 발전단가를 중소형 LNG 발전만큼 인하하기로 했다. 발전용 연료전지는 2019년 307.6MW에서 2022년 1.5GW(내수 1GW)까지 늘릴 계획이다. 2040년 15GW(내수 8GW) 공급이 목표다. 가정·건물용 연료전지도 2.1GW(94만 가구)를 공급할 예정이다. 공공·민간 신축건물을 대상으로 연료전지 설치 의무화를 검토하고 있다.

수소연료 활성화 위해 수소발전 의무화제도 (HPS:Hydrogen Energy Portfolio Standard) 도입

태양광, 풍력 등이 모두 포함된 기존의 신재생에너지 공급 의무화(RPS) 제도에서 수소발전(연료전지)만 분리해 별도의 의무 공급시장을 조성하는 것은 RPS 제도에서 재생에너지와 수소연료전지간 경쟁을 없애고, 재생에너지 보급을 확대하는 데 도움이 될 것이다. RPS 내에서 수소연료전지 비중은 13%다.



수소발전 의무화제도 표

REC 가중치는 2.0을 부여하고 있다. 이 물량이 RPS에서 제외돼 별도 물량으로 분리될 경우 빈자리 만큼 재생에너지가 차지할 경우 현재 물량이 넘쳐 REC가격 폭락으로 인해 수익을 내지 못하는 태양광 등 재생에너지는 숨통이 트이게 된다.

또 HPS를 통해 그린뉴딜의 핵심자원인 수소연료전지를 포함해 수소 산업을 육성할 수 있다면, 앞으로 에너지전환 과정에서 재생에너지와 더불어 핵심자원이 될 수소분야 기술과 산업을 리드할 수 있게 된다.

HPS가 본격시작 될 2022년부터 한국전력은 구매하는 전체 전력 중 일정 비율을 의무적으로 연료전지로 생산한 전력으로 구매해야 한다. RPS 처럼 의무사업자 지위를 발전사업자에게 줄 것인지 전기 판매회사인 한전에게 부여할 것인지도 결정해야 한다.

수소경제 활성화와 재생에너지 보급 확대를 위해 HPS제도를 도입한 것에 대해서는 대체적으로 긍정적인 반응이다.

수소연료전지 발전 그린수소로 발전 시켜야

수소경제에서 사용하는 수소연료전지 발전은 크게 3종류로 나뉜다. 천연가스 등 화석연료에서 탄소를 배출하며 만들어진 그레이 수소, 배출된 탄소를 포집 제거한 블루수소, 재생에너지로 탄소 배출 없이 생산한 그린 수소가 있다. 현재에 국내에서 사용하는 대부분 수소연료전지는 LNG를 개질((고온·고압의 수증기로 분해)해 사용한다. 에너지경제연구원 분석에 따르면 LNG개질수소는 1GW당 CO2 443만톤을 배출해 동일한 발전량을 기준으로 LNG발전 배출량(254만톤)의 2배에 가까운 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다.



연료전지 발전소 노을 그린에너지 전경

그린뉴딜의 방향이 탄소중립인 만큼 그린수소가 필수적이지만 아직 우리나라의 그린수소 기술 개발은 걸음마 수준이다. 현재 제주 풍력발전과 연계한 500kW 수전해 시스템의 기술개발 및 실증이 진행 중이며 올해부터 2022년까지 출력 제한 풍력과 연계한 3MW 수준의 연구가 진행된다. 2030년까지 재생에너지 연계 100MW급 수전해 시스템을 개발하는 것이 최종 목표이다. 이 계획대로라면 2030년까지 사용하는 수소는 화석연료에서 추출한 그레이 수소가 대부분이

다. 수소연료전지 발전이 그린뉴딜을 이끌 핵심 사업으로 성장하기 위해선 수소산업 전주기에 걸친 원천기술 개발이 필요하다.

수소연료전지 확대 계통 유연성 확보가 관건

2040년 8GW의 발전설비를 목표로 하고 있는 수소연료전지가 전력계통에 연결돼 전력을 생산할 경우 발생할 수 있는 부작용도 고려해야한다. 계통 전문가들은 HPS 도입을 통해 연료전지 발전량을 늘릴 경우 계통운영에 심각한 문제를 일으킬 수 있다고 우려한다. 전력수요의 변환에 즉각적으로 발전량을 늘리거나 줄이지 못하는 연료전지의 경직성 때문이다. 정부는 2030년 전체 발전량의 20%를 재생에너지로 발전하겠다고 했지만, 20%의 발전량은 봄, 가을 경부하기간에는 전체 발전량의 60% 이상이 될 수 있다. 일례로 제주도는 현재 재생에너지 발전설비가 전체의 34%가량 되며 평균 14%의 발전량을 보이고 있지만, 경부하기간인 봄철 주말에는 전체 발전량의 60%를 넘는 적도 있다.

이런 상황이 육지에서 발생할 경우 경직성 전원인 원전과 연료전지는 출력을 줄이지 못하기 때문에 결국 재생에너지 출력제어(Curtailment)를 할 수밖에 없는 상황이 발생한다. 이런 이유로 인해 재생에너지 확대를 주장하는 정치권 및 환경단체는 HPS 제도 도입이 재생에너지 확대를 막을 수 있다며 반대의 목소리도 있다.

재생에너지 출력제한을 하지 않을 경우 원전, 연료전지의 발전을 멈춰야 하는데 이때 발생하는 손실 비용도 고려해야 한다.

미국 바이든 취임후 수소경제 관심 높아져

미국이 바이든 대통령 취임 후 파리기후협약에 복귀하면

서 관심이 높아진 것이 수소시장이다. 수소는 에너지를 만들어 낼 때 이산화탄소 등 온실가스를 발생시키지 않고 석탄이나 배터리보다 에너지 효율이 높아 미래 에너지원으로서 잠재력이 크다.

유럽연합(EU)은 '수소 로드맵'을 통해 2050년까지 수소경제를 1400억유로(190조원) 시장으로 육성하고, 최대4700억유로(648조원)를 투자할 계획이다. 일본과 중국도 각각 '수소 연료전지 로드맵'과 '연료전지 자동차 발전 로드맵'을 발표하는 등 수소사회의 전환을 이미 시작했다.

이와 함께 수소 분야에서 각광받고 있는 기업들도 속속 나타나고 있다. 특히 그린수소, 연료전지 기술의 발전과 함께 각국 정부의 이산화탄소 규제가 강화되면서 트럭과 버스 등 상용차 분야에서 수소차로의 전환이 가속화될 것으로 예상된다. 모빌리티기업 뿐만 아니라 가스, 유통업체 등도 수소차 생산 대열에 참여하고 있는 모양새다.

프랑스의 자동차그룹 르노(Renault)는 유럽 내 연료전지 기반 중 소형 상용차 시장 30% 점유를 목표로 이르면 올해 하반기부터 중 소형 상용차 양산에 들어간다. 독일의 산업용 가스 제조업체인 린데 아게(Linde AG)는 연료전지 기반 Class 6·8 중형트럭 생산을 준비 중이다. 또 아마존, 홈디포와 같은 유통공룡은 자사의 물류단지 내 작업용 지게차를 수소차로 전환해 자산가동률을 최대 높이고 있다.

학회 소식

2021년도 제1차 평의원회

일 시 2021년 2월 19일(금) 18:00~19:00

장 소 한국과학기술회관 12층 “아나이스홀” 및 화상회의(WebEX)

참석자 김철환 회장 외 120명

주요 회의 내용

1. 성원보고 (박철원 총무이사)
 - 재직 평의원 : 277명
 - 출석 평의원 : 121명 (참석 33명, 화상회의 25명, 위임 63명)
2. 개회 및 학회장 인사 (김철환 회장)
3. 의결사항
 - (1) 제1호 의안 : 2020년 사업실적
 - 박철원 총무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
 - (2) 제2호 의안 : 2020년 수지결산
 - 차준민 재무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
4. 기타사항
 - (1) 2021년 본부 상벌심의위원회 위원 2명 추천
 - 박철원 총무이사의 제안 설명을 듣고 김철환 회장에게 일임 함.
5. 폐 회



2021년도 제2차 이사회

일 시 2021년 2월 19일(금) 16:30~17:50

장 소 한국과학기술회관 12층 “아나이스홀”

참석자 김철환, 김재언, 전영환, 이병준, 이개명, 이종환, 노대석, 박도영, 김한수, 박기주, 심용식, 안승원, 장창익, 강승택, 김경호, 김광호, 김길동, 김문겸, 김석주, 김효진, 박강서, 박건우, 박철원, 손진근, 신윤용, 오호진, 이교범, 이정호, 이준신, 정형석, 정호성, 주성관, 차준민, 허 건, 김종겸(감사), 이난숙(감사) (이상 36명)

주요 회의 내용

1. 신입회원 승인 : 원안대로 승인 함
 - 총 25명 [정회원 12명, 준회원(석사) 2명, 준회원(학부) 2명, 다수년 7명, 제휴회원 2명]
 - 박철원 총무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
2. 2020년 사업실적 및 수지결산 승인
 - 박철원 총무이사과 차준민 재무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
3. 2021년 본부 윤리위원회 위원 인준
 - 박철원 총무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
4. 학회지 “전기의 세계” 영문 명칭 및 구독 확대 방안의 건
 - 강승택 편집이사의 제안 설명을 듣고 아래와 같이 결정하고 승인 함.
 - ① 학회지 명칭 : KIEE Magazine
 - ② 학회지 구독 확대 : PDF 파일로 변환하여 전체 회원에게 이메일로 발송



학회 소식

회원님의 원고를 기다립니다.

우리 학회 잡지인 『전기의 세계』는 회원 모두가 만들어가는 잡지입니다.

원칙적으로 회원 누구나 자유롭게 기고할 수 있는 열린 저자 체제로 운영하고 있습니다.

다만 원고 모집의 어려움으로 담당 편집위원을 연간 계획과 같이 지정하여 원고를 모으고 있을 뿐입니다.

특히, 다음 칼럼에 대한 원고를 널리 모집하며 채택된 원고는 소정의 원고료도 드리고 있습니다.

회원소리 : 전기계, 전기학회에 대한 제언이나 느낀 점을 포함한 임의 내용으로 분량은 A4기준 4면 내외입니다.

회원/회원사 동정 : 회원이나 회원사의 동정을 공지하는 난이므로 동정이나 새소식을 보내주세요.

건강/취미 이야기 : 건강이나 취미에 관련된 내용으로 분량은 A4기준 3면 내외입니다.

- 문의처 : 대한전기학회 사무국 이상필
- 전화 02-553-0151
- E-mail elecproc@kiee.or.kr



학 회 일 지

2021.1.20~2.19

1.21(목)

본부 제1차 학회지 편집위원회 (화상회의)

1.22(금)

제1차 학회지 편집위원회 (학회 회의실)
E부문 제1차 이사회 (한국교통대학교+화상회의)
B부문 제1차 이사회 (학회회의실+화상회의)

1.29(금)

C부문 제1차 이사회 (학회회의실+화상회의)
제1차 정보화위원회 (학회회의실)
산업전기위원회 제1차 운영위원회(학회회의실+화상회의)

2.1(월)

회지 『전기의 세계』 70권 2호(2월호) 발간
전기학회 국문논문지 70권 2호(2월호) 발간

2.4(목)

제1차 연구조사위원회 (학회 회의실)

2.5(금)

제1차 기획정책위원회 (학회회의실+화상회의)
제1차 국문편집위원회 (학회회의실+화상회의)
D부문 제1차 이사회 (학회회의실+화상회의)

2.19(금)

본부 제2차 이사회 (과총 아나이스홀)
제1차 평의위원회 (과총 아나이스홀+화상회의)
제1차 부문화협력위원회 (학회 회의실)
제1차 재무위원회 (학회 회의실)
제2차 전력산업정책협의회 (학회 회의실)
우진기전 장학금 기금 기탁식 (과총 아나이스홀)

편집위원

강승택(편집위원장, 인천대)

배진용(동신대)

정채균(한전 전력연구원)

이기범(경북테크노파크)

김홍준(경북대)

이재석(전북대)

이상문(경북대)

김재희(한국기술교육대)

심재웅(인제대)

임동국(울산대)

김원희(중앙대)

유희덕(전기신문)

최준호(전남대)

윤광석(서강대)

임용배(한국전기연구원)

김용학(한전 전력연구원)

유현용(고려대)

안준호(전기산업연구원)



고효율 저소음 변압기 한발 앞선 기술로 미래도약.

“지식경영과 기술개발로 고객 만족도를 극대화 시키고,
최상의 품질과 기술로 세계적인 기업으로
산일전기의 신뢰도를 쌓아 가겠습니다.”

Transformers

- 유입변압기
- 몰드변압기
- 건식변압기
- 특수변압기 (인버터·로용 등)

Reactor

- 인버터용리액터
- 모터기동용리액터
- 콘덴서직렬리액터
- 공심 및 특수리액터

Soft Starters

- Soft Starters (HV/LV)

Sensors

- 근접센서
- 빔센서
- 초음파센서
- 화이버센서



DC 1500V

신재생에너지 발전시스템 보호를 위한
세계 최고수준의 차단용량을 확보했습니다

Susol DC 1500VDC MCCB/DSU/MCS

UL489(MCCB, MCS)/UL489B(MCCB, MCS)
IEC60947-2(MCCB)/IEC60947-3(DSU)

- 65kA(UL), 50kA(IEC) 차단용량 확보
- UL/IEC Dual 규격인증 취득
- Compact Size 구현



LS ELECTRIC