

송전케이블 국내외 기술 동향

LS전선 김정년, 고경로, 박승기

DOI <http://dx.doi.org/10.18770/KEPCO.2016.02.03.361>



지난 8월 Cigre 2016 (CIGRE, International Council on Large Electric System, 국제대전력망협의회)이 프랑스 파리에서 개최되었습니다. Cigre는 1921년 창립된 비영리단체로 92개 회원국, 58개 National Committee가 활동 중이며 주로 전력회사와 전력기기 공급업체, 대학, 연구기관의 관련 전문가들이 참여하여 현재와 미래의 전력분야 기술 발전을 추구하는 세계 최대 산업체 중심의 기술 협의회입니다. Cigre는 매 짝수 년마다 프랑스 파리에서 GENERAL SESSION (정기총회 및 기술토론회)과 EXHIBITION(전시회)이 함께 개최됩니다.

본 칼럼에서는 Cigre 참가를 통해 본 미래송전 기술 및 운용 방향과 향후 국내 초고압·지중케이블 및 HVDC·해저케이블의 미래 송전케이블 기술동향에 대해서 고찰해 봅니다.

1. Biz. Model 변화 및 HVDC 기술 확대

1.1 송배전 분야 Biz. Model 변화

전 세계적으로 전력에너지 수요는 2050년까지 지속적으로 증가 추세이며, 이러한 전력 수요 증가는 대규모 전력계통 송전과 계통간 송전망 연계가 확대되어야 가능할 것으로 전망됩니다.

제품 중심 제조업에서 Digital 설비/Network기술/Software가 결합된 시스템 Biz. Model로 변화되고 있어 전력 송배전 분야에서 단순 전력기기 제조에서 디지털로 접목시킨 제품으로의 발전이 전망됩니다.

또한 슈퍼그리드라는 송전망 사업 분야의 하단인 배전망에서 마이크로 그리드, 미니그리드, 나노그리드 등이 IoT 기술 활용한 에너지 Biz. Model을 만들어 이를 종합적으로 제어 통제하는 디지털전력설비의 변화의 움직임을 ABB, Siemens, Schneider,

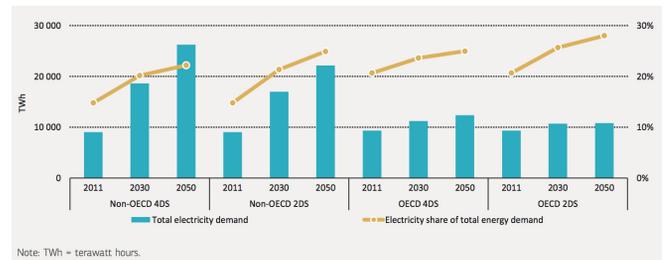


그림 1 Electricity demand and share of electricity
* Source: IEA, Energy Technology Perspective 2014

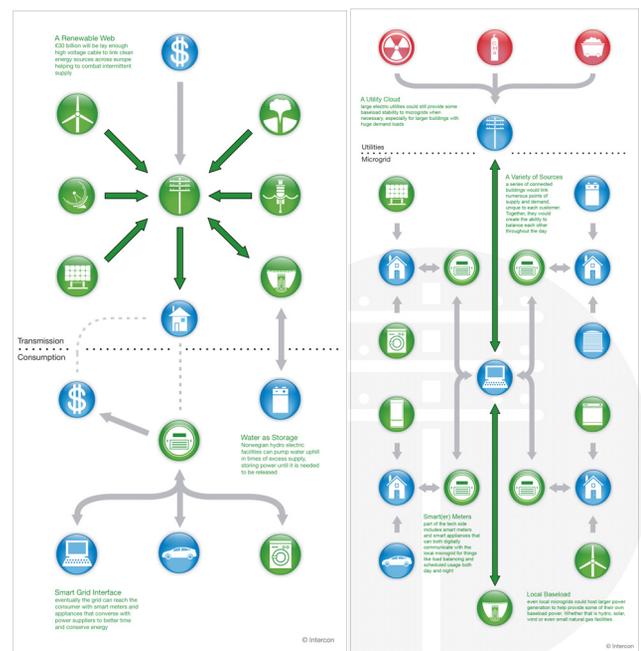


그림 2 Renewable Super Grid, Microgrid
* Source: INTERCON



그림 3 Speech of President Xi Jinping at the UN Development Summit, Sep. 2015.
The premiere of English edition of Global Energy Interconnection in N.Y, Sep.2016

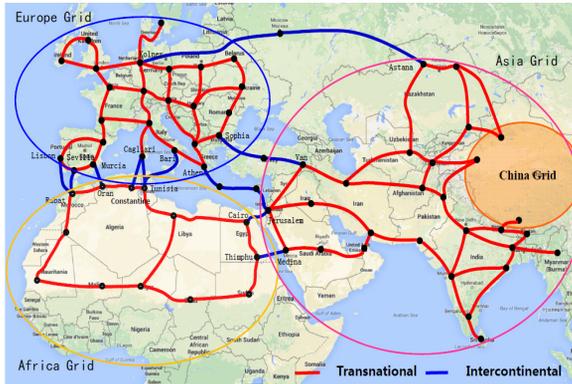


그림 4 Transcontinental Grid Interconnection of Asia, Europe, and Africa
* Source: SGCC, Outlook of Global Energy Interconnection

NR(중국) 등의 제품에서 새로운 움직임 감지할 수 있습니다.

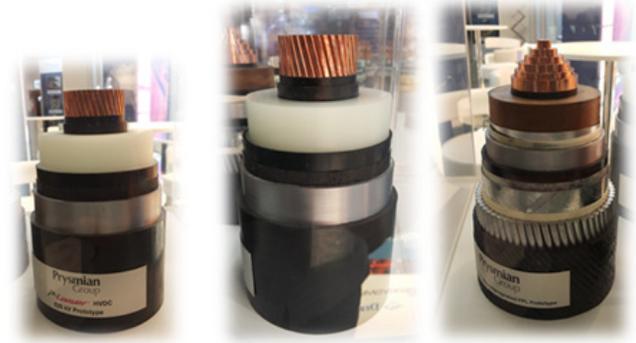
해저 초고압 분야는 유럽, 미주시장을 중심으로 '15년 기준 약 5조 규모의 시장이 향후 지속적으로 성장할 예정이며, 국가 간 장거리 송전 및 대용량 계통연계 수요 확대가 전망 되고, 이에 따라 DC 수요 또한 증가가 예상됩니다. 또한, 해저 분야에서는 케이블과 접속재의 제품 중심에서 포설, 전기공사, Supervisor 등의 전체 시스템을 제공하는 Turn-key 방식으로 Biz. Model이 변화하고 있으며 더불어 계통 연계 및 대형화에 따른 대용량, 초고압화가 전망됩니다.

1.2 HVDC분야에서 중국의 성장과 헤게모니 강화

과거부터 현재까지 HVDC 시장은 유럽중심으로 유럽업체가 주도하고 있고 상당기간 지속될 추세이나, 중국은 현재 기설치 및 신규 건설할 800 kV 및 1,000 kV HVDC 가공선로를 대상으로 다양한 전압 등급의 HVDC 송전 및 계통 운영기술에 대한 도전과 실험을 하고 있어 역동적으로 움직이고 있습니다.

시진핑 주석이 2015년 9월 UN에서 GEI (Global Energy Interconnection)을 발표하고 HVDC 송전망으로 전 세계를 연결하는 슈퍼그리드 추진을 선언했고, 국가가 주도가 되어 체계적으로 에너지 산업의 육성에 심혈을 기울이고 있습니다.

어떤 나라도 중국만한 HVDC Test Bed가 없고, 중국 스스로도



PP (525 kV) XLPE (600 kV) MI PPL (700 kV)

그림 5 케이블 종류별 HVDC 최고 전압케이블

HVDC 규격은 먼저 해보고 만드는 자가 만들면 된다는 것으로 생각하고 국가전망의 회사들이 주도가 되어 추진하고 있습니다. 여기에 중국 업체들인 NR, NARI(南瑞集团) 및 ZTT(中天科技)도 그 수행 주체 중의 하나가 되어가고 있습니다.

이와 관련하여 향후 국내 중전기 업체도 HVDC 전력기기 제품의 개발이 선행되고 가속화 되어야 하며, 전력회사(한전)와의 협력적 HVDC 사업 Model 을 만들어야 한다고 생각합니다.

2. 지중·해저 송전케이블 및 접속재 기술동향

2.1 AC/DC 케이블의 초고압화

XLPE 케이블은 1960년대 AC케이블에 도입되어 기존 지절연 케이블을 대체하여 1960년대 20 kV, 1977년 275 kV를 거쳐 1988년 500 kV로 지속적인 초고압화를 추진해왔습니다. 반면, DC XLPE 케이블은 1996년 최초로 80 kV 해저연계용으로 적용되어 2012년 320 kV가 해상풍력연계에 사용되었고, 2016년 현재 525 kV는 지중 육상구 간 연계용으로의 발전을 이룩해 왔으며 현재는 600 kV 제품까지 개발되었습니다.

반면 MI 케이블(Mass Impregnated Paper Cable)은 1880년 후반부터 적용되어 주로 DC분야에서 고압화를 추진해 왔으며 현재는 600 kV까지의 고압화 대용량화 (2,200 MW)를 달성해 왔고 700 kV 제품까지 개발되었습니다.

AC/DC 해저 케이블은 장거리 국가 간 전력망 연결 확대, 계통연계 및 해상풍력단지 대형화에 따라 태도체화, 초고압화가 전망되고 있습니다.

2.2 송전용량 극대화 기술

지중·해저 케이블에서 알루미늄 도체의 적용이 확대되고 최근에는 도체 사이즈가 3,500~4,000 mm² 까지 요구되고 있으며, 3,500 mm²의 경우 실제 프로젝트에 적용한 사례들이 출현하고 있다. 또한

그림 6 AL/Cu 太도체 케이블 (3,500 mm²)

구리 도체 또한 3,500 mm² 까지를 적용하고 있고 알루미늄 코어(Core)에 구리도체로 외부를 둘러싼 알루미늄-구리 복합도체 또한 적용되고 있는 추세에 있습니다. 알루미늄 도체 적용은 구리 가격의 변동에 따라 확대 적용 여부가 영향을 받게 되며 알루미늄 도체 접속 기술의 안정성 검증, Mechanical Shear Bolt의 개발 적용 및 열폭주(Thermal Runaway)현상에 대한 실증 자료들의 지속적인 보완이 필요한 상황입니다.

도체에서 표피효과(Skin effect)를 감소시켜 송전용량을 증대시키기 위해서 소선을 절연시켜 연선했던 도체를 적용한 소선절연 케이블이 초초고압·태도체 케이블을 중심으로 확대 적용되고 있습니다. 장점으로는 DC 도체 저항을 최적화함으로써 도체중량을 줄일 수 있으며, 표피효과(skin effect)의 감소로 AC 저항 계수를 향상시킬 수 있습니다. 이를 달성하기 위한 방법으로 소선(wire)을 동일한 방향으로 연선(same-direction stranding)시키고, 산화(oxidation)처리를 통해서 소선간의 절연을 유지할 수 있습니다.

2.3 친환경 전력케이블 기술

전력케이블의 절연체로 가장 일반적으로 사용되는 것이 XLPE(Cross-Linked Polyethylene, 가교 폴리에틸렌)입니다. XLPE는 1953년 미국의 제너럴 일렉트릭(General Electric)사에서 처음으로 케이블 절연체로 적용된 이후 뛰어난 전기적, 기계적 특성을 가졌지만, 제조과정 중 가교공정을 거쳐 열경화성(thermosetting)수지가 되므로 재활용이 어렵고 높은 처리비용이 필요하다는 문제를 가지고 있습니다. 최근 친환경과 재활용에 대한 사회적 인식이 증가와 관련법규가 강화로 XLPE를 대체할 수 있는 친환경케이블 개발이 가속화 되고 있습니다.

프리즈미안(Prysmian)이 개발 적용한 HPTE(High performance polypropylene thermoplastic elastomer) 절연의 경우 가교 부산물이 없고 화학적인 안정성, 절연특성의 우수성 등으로 AC케이블 뿐만 아니라 DC케이블에 최적인 재료로 평가받고 있으며, 현재 MV급, HV급을 거쳐 320 kV DC 시스템의 Type Test 및 PQ시험까지지를 완료하였으며, 지중 HVDC 송전급에 적용하기 위해 525 kV급까지 개발이 완료되었다고 보고되어지고 있습니다.

최근 논란의 중심에 있는 송전선로 전자파 저감기술은 일반인



그림 7 건식타입 종단접속함

을 대상으로 하고 있습니다. 미국, 스웨덴, 스위스, 스페인 등은 루프 저감기술을 실제 송전선로에 적용하고 있으며, 미국 SCE(Southern California Edison)는 1990년대부터 자기장 노출을 줄이기 위해 전력회사에서 송변전 설비 총 건설비의 4%를 투자해 15% 이상의 자기장을 줄일 수 있도록 유도하고 있다.

스웨덴은 1990년대 후반부터 신설 송배전선로 및 변전소 주변 전자파 양을 0.4 uT 이하로 유지하도록 요구되고 있습니다. 특히 스톡홀름시의 경우 전체 변전소의 20% 정도를 대상으로 저감 대책을 실시하고 있는 상황입니다.

전력케이블에서 전자파기준을 만족하기 위해 케이블 자체를 전자파 저감케이블로 설계·제작하는 방법과 엔지니어링 단계에서 저감시키는 방법으로 Compaction, Conductive Shielding, Magnetic Shielding, Passive loop 등의 방법을 적용하고 있습니다.

지중케이블 접속재에 있어서도 기존에 절연유를 충전하여 절연을 유지하는 습식 타입에서 절연유 충전 없는 Oil-free 제품으로 고분자절연 종단접속함이 출시되고 사용, 확대되고 있는 추세입니다.

2.4 Partial Undergrounding

민원 때문에 송전선로 건설지연이 장기화 되는 사례가 증가하고 있고, 건설된 발전원을 수요지까지 공급하는데 상당한 어려움을 겪고 있습니다. 송전선로 건설에 있어서 설비의 신뢰성, 경제성보다는 사회적 수용성이 더 중요하게 작용할 것으로 예상되며 가공송전선로 건설의 어려움으로 지중화 확대될 뿐만 아니라 가공송전선로 경과지 중 일부구간을 민원으로 인해 일부 지중화(Partial Undergrounding)시키는 구간이 지속 확대될 전망입니다. 이러한 미래의 가공-지중 복합선로의 수요를 대응하기 위해 전력케이블은 장조장화(Longer), 컴팩트화(Smaller), 경량화(Lighter)를 추진하는 방향으로 기술의 발전이 이루어 질 것으로 예상됩니다.

2.5 DC 해저케이블 기술

DC 기술은 AC/DC 전력 변환을 통한 경제성과 안정성을 구현하는 기술로 비동기 AC계통 연계가 가능하고, 60 km 이상 해저 전력연계 시 경제성을 가지며, 장거리 대용량 전송 시에도 경제적인

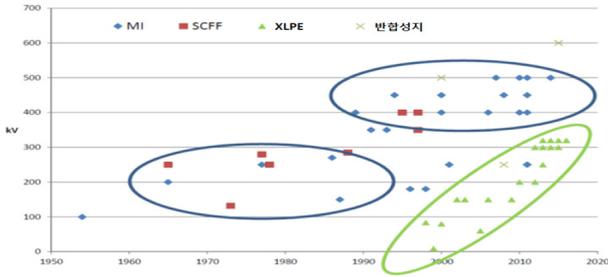


그림 8 Increase of HVDC cable voltage

* Source: Jicable-HVDC '13 - European Seminar on Materials for HVDC cables and accessories

장점을 가진 기술입니다. Shunt 리액터 설치 등 최적화하는 경우 AC 송전은 100 km 미만이 한계이나 DC는 100 km 이상의 송전이 가능합니다.

DC 변환소 (converter)는 크게 LCC형 (Line Commutated Converters) 과 VSC형 (Voltage Source Converters)로 구분되며, LCC형은 대용량 시스템 구성에 유리하고 VSC형은 멀티터미널 구성에 유리한 장점을 가집니다.

Converter는 과거 LCC형 (전류형) 용량 증대 기술개발 되었고 현재는 고전압 대용량 고신뢰화를 추구하여 신재생/국가 간 연계가 확대되는 VSC형 (전압형)으로 변화하고 있습니다.

DC 케이블은 전통적으로 MI 케이블을 사용해 왔고 700 kV급 까지 개발되었으며, 최근 HVDC XLPE 케이블이 600 kV급 까지 개발되었다. 2020년까지 DC 시장은 320 kV급은 XLPE 케이블이 대세이고, 500 kV급은 XLPE와 MI 케이블 (Mass Impregnated Paper Cable)이 혼재되어 있으나, XLPE 공급가능업체 증가에 따라 XLPE화가 전망되고, 600 kV급 이상에서는 MI 케이블 (Mass Impregnated Paper Cable)의 적용이 예상됩니다.

2.6 초전도케이블 기술

초전도케이블시스템 기술은 세계적으로 한국, 미국, 일본, 프랑스 4개국 정도 국가가 선도하고 있는 고부가가치의 미래 핵심 기술 분야로 전력 송전 분야 전반에 걸쳐 새로운 계통 연계 패러다임을 제시하고 있는 기술 중 하나로서 대용량 부하를 충족하기

위해 고효율로 안정적인 전력 공급을 할 수 있고, 나아가 전력 계통 간 대용량 송전 등에 핵심적 역할을 할 수 있는 차세대 송배전 기술이라고 할 수 있습니다. LS전선과 한전은 배전급 실증 사업과 더불어 송전급 DC 80 kV 500 MW급 및 AC 154 kV 600 MVA급 초전도케이블시스템의 개발과 실증을 위한 국책 R&D 사업을 2011년부터 시작하였으며, 2013년 3월 세계 최초로 송전급 DC초전도케이블시스템 개발에 이어 2016년 10월 세계 최장 송전급 AC초전도케이블시스템의 실계통 실증을 완료할 예정입니다.

초전도케이블시스템은 지중 매설이 어려운 도심에 별도의 토목 공사 없이 기존의 전력구나 관로를 활용하여 기존케이블을 대체함으로써 전력 공급량을 몇 배로 증가시킬 수 있으며, 중장기적인 측면에서 부지사용을 최소화하고, 낮은 운영 및 유지 보수비용으로 효율성을 높일 수 있다는 큰 기술적 진보를 이루고 있어 2020년경부터는 본격 상용화 사업 적용이 기대되고 있습니다.

3. 맺음말

전력에너지의 수요증가와 기술발전은 AC/DC의 고압화 (700~800 kV) 대용량화 (2.2 GW급)케이블 개발, 송전용량 극대화 기술 (도체사이즈 ~4,000 mm²) 및 친환경 전력케이블 기술을 요구하고 적용하는 추세에 있으며 또한 전력송배전분야에서의 디지털 제품 제품의 발전과 종합시스템을 제공하는 턴키방식의 Biz. Model 변화가 전망되고 있어 이에 대한 관련 기술·사업모델 개발 및 적용을 대비해야 할 것입니다.

References

- [1] 2014 에너지 이노베이션 로드맵 (총괄보고서), 2014, 산업통상자원부, 에너지기술평가원
- [2] 생활속 전자파, 저감기술로 해결, 2014년 9월 15일 월요일, 전기신문
- [3] Outlook of Global Energy Interconnection, SGCC
- [4] Energy Technology Perspective 2014 OECD/IEA; International Energy Agency) ICC 2011
- [5] Jicable-HVDC '13 - European Seminar on Materials for HVDC cables and accessories