

국내 초고압 전력케이블 기술개발 현황

김 영*, 성경규*

(*대한전선(주) 시스템엔지니어링팀)

1. 서론

국내에서는 초고압 전력케이블은 유입(Oil-filled, OF) 지절연 전력케이블과 가교 폴리에틸렌(Cross-linked PE, XLPE) 절연 전력케이블의 두 종류가 적용되고 있다. 국내의 초고압 전력케이블은 154kV OF 전력케이블이 1971년에 해외 업체에 의해 국내 최초로 당인리~용산 변전소간의 지중송전선로에 설치된 이후 많은 발전을 이루었다. 1978년에는 154kV OF 전력케이블이 국내업체에 의해 최초로 개발되어 1980년에 개봉~오류 변전소간에 설치됨으로써 본격적인 초고압 지중송전의 시대가 열렸다. 또한 1983년에는 154kV XLPE 전력케이블이 국내에서도 개발됨에 따라 전력케이블의 적용에 대한 선택의 폭이 넓어졌다. 한편 국내 경제의 성장과 더불어 대도시 전력 수요의 급증으로 인해 345kV급 지중송전이 불가피하게 되었고 1989년에는 345kV OF 전력케이블은 국내 최초로 개발되었다. 345kV OF 전력케이블은 1993년에 삼천포 화력발전소의 구내 선로에서 국내 최초로 설치된 이후 1997년에 비금~성동 변전소간(약 17km) 및 양주~당인리 변전소간(약 8km)의 지중송전선로에, 1998년에 북부산~남부산 변전소간(약 22km)의 지중송전선로에 설치되었다.

한편, OF 전력케이블 절연두께의 저감은 1990년에 반합성지(Polypropylene laminated paper, PPLP)를 절연지로 사용

한 345kV OF 전력케이블이 개발됨으로서 실현되었다. PPLP 절연지는 종래의 절연지에 비해 유전 손실이 적고 파괴전계강도가 높아 절연재료로서 효용성이 높다. XLPE 전력케이블은 그 제조공정과 제조기술의 지속적 발전으로 인해 케이블의 절연 성능이 크게 향상되었고, 이에 따라 154kV XLPE 전력케이블은 절연두께가 23mm에서 17mm로 저감하는 것이 가능하게 되었다. 이런 제조공정 및 제조기술의 발전에 기인한 XLPE의 절연 저감은 345kV급 전력케이블의 적용을 가능하게 하였다.

2. 국내 초고압 OF 전력케이블 기술개발 현황

2.1 초고압 OF 전력케이블의 개발 현황

초고압 OF 전력케이블은 수 십년간에 걸쳐 그 신뢰성과 경제성이 입증된 전력케이블이다. 세계적으로 OF 전력케이블이 200kV급 이하에서는 XLPE 전력케이블에 그 자리를 양보하고 있으나 200kV급 이상에서는 치열한 경쟁을 하고 있으며 500kV급 이상에서는 아직도 확고한 자리를 잡고 있다. 국내 OF 전력케이블에 대한 전압등급의 상승은 1989년에 개발된 345kV OF 전력케이블을 마지막으로 그 진행을 멈추고 있지만 해외 시장을 목적으로 500kV급 OF 전력케이블에 대한 개발이 진행중에 있다.

2.2 초고압 OF 전력케이블용 접속함의 개발 현황

OF 전력케이블의 접속함은 전력케이블의 절연체와 동일한 절연지로 보강절연체를 현장에서 형성하는 방식으로서 접속위치에 따라 종단 접속함과 중간 접속함으로 나뉘어진다. 국내에서 접속함의 개발은 전력케이블의 개발보다는 뒤진 1988년에 국내 최초로 154kV급 접속함이 개발되었고, 1998년에 한국전력공사의 지원아래 345kV급 접속함이 개발되었다.

표 1. 한국전력공사의 송전설비 현황(1998)

구분	선로공장(C-km)			비고
	가공선로	지중선로	총공장	
765kV	54	-	54	
345kV	6,398	93	6,491	
154kV	14,766	1,055	15,821	
66kV	2,307	12	2,319	
HDVC	30	202	232	
총공장	23,555	1,362	24,917	

2.3 초고압 OF 전력케이블의 절연두께 저감

1989년에 개발된 345kV OF 전력케이블은 탈이온 수세처리한 절연지에 합성유(Alkylbenzene계)를 함침한후 절연유의 압력을 대기압력 이상으로 유지한 구조의 절연체를 가지고 있다. 1990년에 이 절연지를 PPLP로 대신한 OF 전력케이블이 개발되었다. PPLP는 절연지/Polypropylene/절연지의 구조를 갖는 반합성지로서 기존의 절연지와 비교하여 전계강도는 20% 정도 향상되고 유전체 손실은 60% 정도 감소한다([그림 1]과 [그림 2] 참조).

표 2. 기존 지절연 케이블과 반합성지절연 케이블의 주요 비교

항목	단위	기존 케이블	반합성지 케이블	비고
절연 두께	mm	23.4	19.5	
유전율	-	3.5	2.8	
tanδ	%	Max. 0.34	Max. 0.14	*인가전압: 334kV
케이블 외경	mm	Max. 140	Max. 133	*도체: 2000mm ²

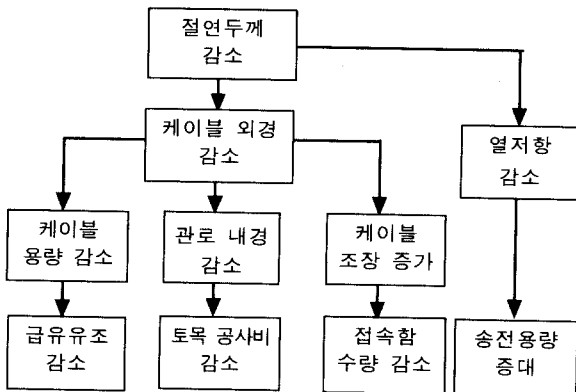


그림 1. 전계강도의 증가에 따른 경제적 효과

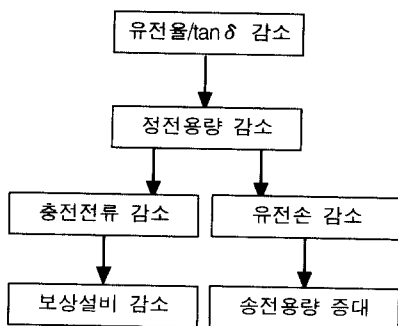


그림 2. 유전율 및 tanδ의 감소에 따른 경제적 효과

3. 국내 초고압 XLPE 전력케이블 기술개발 현황

3.1 초고압 XLPE 전력케이블의 개발 현황

초고압 XLPE 전력케이블은 1983년에 국내 최초로 154kV

XLPE 전력케이블이 개발된 이후 그 적용의 확대 및 전압 등급의 상승을 지속적으로 경험하고 있다. 국내 초고압 전력케이블의 최대 수요처인 한국전력공사는 1990년대 후반부터 신설 154kV 지중송전선로에 대하여 XLPE 케이블의 적용을 의무화함으로써 XLPE 전력케이블의 적용은 더욱 가속화되었다. 345kV XLPE 전력케이블의 개발이 마무리 단계에 있어 최종 실증시험만을 남겨두고 있다. 또한 해외 시장의 공략을 위하여 230kV XLPE 전력케이블이 개발되어 1998년에 국제시험기관에 의해 형식시험이 완료되었으며, 400kV급 XLPE 전력케이블의 개발도 활발히 진행되고 있다.

3.2 초고압 XLPE 전력케이블용 접속함의 개발 현황

XLPE 전력케이블의 접속함은 접속 위치에 따라 중단 접속함과 중간 접속함으로 나누어지고, 중간접속함은 보강절연체를 형성하는 방식에 따라 몰드형 접속함(Tape-molded Joint, TMJ)과 조립형 접속함(Prefabricated Joint, PJ)으로 나누어진다. TMJ는 케이블의 절연체와 동일한 재질로 보강절연체를 현장에서 형성하는 방식으로서 1988년에 국내 최초로 154kV급으로 개발된 이후 현재까지 국내에서 적용되고 있다. PJ는 1994년에 한국전력공사의 지원아래 154kV급에서 국내 최초로 개발되었지만 높은 가격 등의 단점으로 인해 널리 적용되지는 않았다. 그러나 PJ는 접속함의 전압 등급이 상승함에 따라 그 장점들이 부각되어 1998년에는 230kV급에서 개발되었고 345kV XLPE 전력케이블용 접속함으로 적용될 전망이다.

표 3. 154kV급 TMJ와 PJ 접속함의 주요 비교

항목	TMJ	PJ	비고
절연성능	비교 우수	비교 열등	*모두 규격 이상
접속기간	21일/3상	약7일/3상	
작업속련도	높음	보통	
품질관리	현장	공장	
접속함 가격	저가	고가	

3.3 초고압 XLPE 전력케이블의 절연두께 저감

초고압 XLPE 전력케이블이 1983년에 국내 최초로 개발된 이후 XLPE 전력케이블의 제조공정 및 제조기술은 많은 진보가 이루어졌다. XLPE의 절연공정은 압출공정과 가교공정으로 구성되며 이들을 동일 공정에서 연속적으로 행하는 연속가교(Continuous Vulcanizing)방식이 적용된다. 압출공정에서 Polyethylene과 가교제가 혼합되어 도체에 압출되고 가교공정에서 케이블 코어는 고온, 고압의 조건에서 가교되어 냉각된다. 가열방식에 따라 수증기 가교(Steam Curing) 방식과 건식 가교(Dry Curing)방식으로 나누어진다. 수증기 가교방식은 XLPE 전력케이블에서의 수트리(Water-tree)의 문제를 야기시켜 현재 초고압에서는 적용되지 않고 있다. 또한 냉각방식으로서 수 냉각(Water Cooling)방식을 적용

하게 되면 여전히 수트리의 문제점이 남아 있게 된다. 때문에 가열과 냉각 모두를 건조상태에서 이루어지는 완전건식 가교(Completely dry curing and cooling, CDCC)방식이 도입되었다. 현재 국내에서 초고압 XLPE 전력케이블은 CDCC 방식에 의해 제조되고 있다. 이러한 제조공정 및 제조기술의 발전은 XLPE의 전계강도를 향상시켜 154kV XLPE 전력케이블의 절연 두께를 23mm에서 17mm로 저감하는 것을 가능케 하였다.

표 4. 기존 및 저감 절연체의 두께 산출을 위한 설계강도

항목	단위	기존 절연체	저감 절연체	비고
임펄스 설계강도	kV/mm	50	75	
교류 설계강도	kV/mm	20	35	

4. 초고압 전력케이블의 감시시스템 기술개발 현황

4.1 급유시스템에 대한 새로운 누유검지시스템

OF 전력케이블의 유압을 대기압력이상으로 유지함으로써 수분의 침투를 막고 절연성능이 크게 향상된다. 여기서 절연유의 압력을 감시함으로써 OF 전력케이블의 누유 여부가 파악될 수 있다. 현재 일반적인 누유검지는 급유시스템내 유압 및 유량의 상한과 하한을 경보점으로 설정하고 충분한 여유유량을 두어 복구시간을 벌여주는 방식이다. 그러나 이 방식은 다량의 유량이 누출된 후 경보가 발하는 단점이 있어 절연유의 손실 및 환경적인 문제를 가지고 있다. 이를 해결하기 위하여 압력유조내에 유량센서를 두어 유량변화를 지속적으로 감시하여 누유 여부를 감지하는 새로운 방식이 도입되게 되었다. 이 새로운 방식의 기본 개념은 동일한 선로에 설치된 전력케이블은 부하변동에 따라 동일한 유량변화를 나타내므로 3상간의 유량을 비교하면 누유 여부를 판정하는 것이 가능하다는 것이다. 현재 이 시스템은 345kV OF 전력케이블의 급유 계통에 설치되어 운영되고 있다.

표 5. 급유시스템에 따른 누유 판정 방식

급유시스템	상별 개별 급유				삼상 일괄 급유			
	1회선		다회선		1회선		다회선	
	단일 구간	복수 구간	단일 구간	복수 구간	단일 구간	복수 구간	단일 구간	복수 구간
상간유량 비교방식	◎	◎	◎	◎				
연간유형 비교방식	○				◎	○	○	
회선간 비교방식			○				◎	○
구간간 비교방식		○		○		◎		◎

◎ 주판정 ○ 보조판정

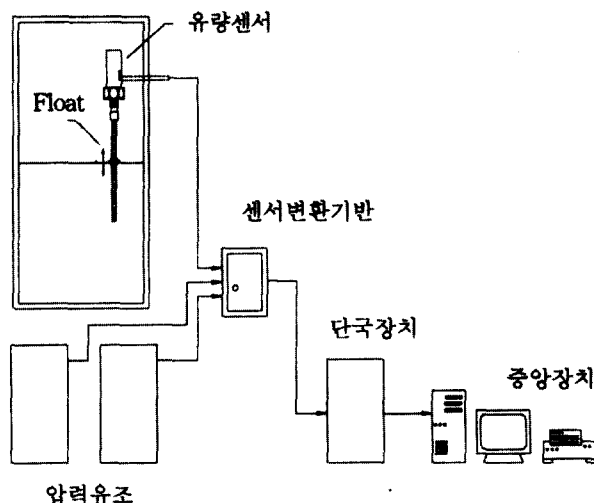


그림 3. 누유검지시스템의 구성요소

4.2 전력케이블의 온도감시시스템

분포온도센서(Distributed Temperature Sensor, DTS)는 광케이블을 온도센서로 이용한 기술로서 세계적으로 전력케이블의 온도 측정에 적용되고 있다. 기본 원리는 광케이블에 광펄스를 주입하면 진파하는 광은 필연적으로 산란을 하게 된다. 그 산란광 중에 후방으로 진행되는 두 산란광 즉 Stoke Scattering Light와 Anti-Stoke Scattering Light는 지나가는 부분의 온도에 의해 그 세기가 변화하는 특성을 갖고 있다. 이 두 산란광을 검출하여 두 광의 세기를 비교하면 그 지나간 부분의 온도를 산출할 수 있다. 또한 측정 부분의 위치는 광펄스의 주입시간과 산란광의 검출시간의 차이를 측정하여 광섬유 시험기(Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)에 의해 측정될 수 있다.

온도와 위치는 다음의 식들을 이용하여 산출된다.

$$\frac{I_{as}}{I_s} \propto \exp\left(-\frac{hc\nu}{kT}\right)$$

- las : Anti-Stoke 산란광의 세기
- ls : Stoke 산란광의 세기
- T : 절대온도 (K)
- h : 플랑크 상수 (J.s)
- c : 광속 (m/s)
- ν : Raman Shift (m-1)
- k : 볼츠만 상수 (J/K)

$$L = \frac{c}{n} \cdot \frac{t}{2}$$

- L : 거리 (m)
- c : 광속 (m/s)
- t : 경과 시간 (s)
- n : 광섬유의 굴절율

4.3 전력구 종합감시시스템

대도시의 전력수요가 급증함에 따라 송전용량을 충족하기 위하여 다수의 회선을 수용할 수 있는 전력구가 증가하고 있다. 전력구에서 사고 발생시 대형사고로 파급될 우려가 있어 이에 대한 특별한 감시가 요구된다. 국내의 전력구 감시시스템은 1998년에 345kV 미급~성동 지중송전선로의 건설과 함께 최초로 설치되어 운영되고 있다. [표 5]는 전력구 종합감시시스템의 감시 항목과 그 방법을 보여주고 있다.

표 6. 전력구 종합감시시스템의 감시 항목과 방법

항목		방법
전력케이블 감시	지락, 단락사고	· 분포온도 측정장치(DTS)
	케이블 화재	· 분포온도 측정장치(DTS)
	누유	· 유량 센서에 의한 누유 검지
	케이블 온도	· 분포온도 측정장치(DTS)
출입자 감시		· 근접센서에 의한 방호문 출입자 감시 · 적외선 센서에 의한 출입자 감시 · ITV에 의한 영상 감시
전력구 환경 감시	산소 농도	· 산소 센서
	유해 가스	· CO, CH ₄ 가스 센서
	전력구 화재	· 분포온도 측정장치(DTS) · 정온식 화재 검지선
	침수	· 수위 센서
부대설비 감시/제어	배수 설비	· 배수 설비와의 I/F
	환기 설비	· 환기 설비와의 I/F
	냉각 설비	· 냉각 설비와의 I/F
	조명 설비	· 조명 설비와의 I/F
통화 장치	전력소와 전력구내 작업자간의 통화	· LCX를 통한 무선통화 · 음성통화장치

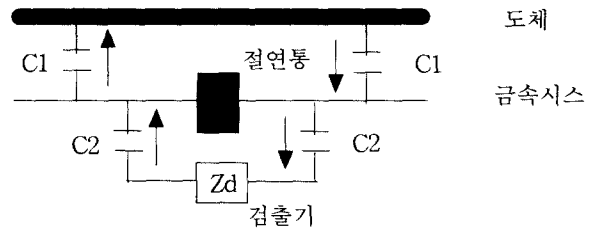
5. 초고압 전력케이블관련 기술개발의 향후 전망

5.1 케이블 코아 이동량 감시시스템

케이블의 코아와 금속시스는 서로서로 고정되어 있지 않아 어떤 원인에 의해 케이블의 코아가 이동하여도 금속시스는 그대로 있게 된다. 이러한 코아의 이동은 접속함에 기계적인 스트레스를 줄 수가 있어 이에 대한 감시의 필요성이 대두되고 있다. 이 문제에 해결하기 위하여 케이블 코아 이동량 감시시스템이 해외에서 개발되어 적용되고 있다. 이 시스템은 접속함의 보강절연체 즉 코아위에 강력한 소형 자석을 두고 접속함의 외함에 홀효과(Hall Effect)를 이용한 장치를 두어 이 장치에 센서로부터 코아의 이동량을 측정하는 시스템이다. 국내에서도 케이블 코아의 이동으로 인한 문제에 대한 관심이 고조되고 있어 현재 이 시스템을 적극적으로 검토하고 있다.

5.2 접속함의 부분방전측정

전력케이블은 그 신뢰성을 확인하기 위하여 출하전에 각종 전기적 시험을 받게 되지만, 접속함은 이러한 전기적 시험을 받지 않고 현장에서 조립된다. 따라서, 현장에서 접속함의 건전성을 증명하기 위하여 포설후 절연체 내전압시험 중에 부분방전의 발생여부를 감시하는 측정방법이 해외에서는 이미 제시되어 적용되고 있다. 이 측정방법의 원리는 절연접속함의 절연통을 사이에 두고 양단에 금속호일(Metal Foil) 전극을 설치하고 부분방전에 의한 전류가 흘러 검출기에 전압이 발생하고 이로부터 방전량을 검출하는 것이다.



C1 : 도체/금속시스의 정전용량
C2 : 금속시스/호일전극의 정전용량
Zd : 검출 임피던스

그림 4. 절연접속함의 부분방전 측정원리

6. 결 론

국내 초고압 전력케이블의 개발은 송전전압의 승격, 새로운 절연재료에 대한 연구개발 그리고 제조공정 및 제조기술의 개발을 통하여 진행되고 있다. 현재 국내 지중송전선로의 최고 전압인 345kV급까지 전력케이블의 개발이 완료되었다. 또한 국내 제조능력은 500kV급 전력케이블을 생산할 수 있는 설비가 도입되었으며, 해외 시장을 대비하여 400kV급 전력케이블의 개발이 활발히 진행되고 있다. 국내에서 절연두개의 저감은 OF 전력케이블의 경우에는 보통절연지에서 반합성지로, XLPE 전력케이블의 경우에는 제조공정의 개선과 제조기술의 개발을 통하여 이루어졌다. 국내에서도 새로운 절연재로서 SF6 Gas를 이용한 GIL(Gas-insulated Line)에 대한 연구가 최근부터 진행되고 있다.

한편, 이미 설치된 지중송전선로와 신규 지중송전선로에 대한 감시 및 제어를 위한 시스템의 적용이 급속히 증가하고 있다. OF 전력케이블의 경우 절연유의 누유는 전력케이블에 심각한 결과를 야기시킬 수 있어 보다 빠르게 누유를 검지하는 것은 상당히 큰 의미가 있다. 유량센서를 도입한 새로운 개념의 누유검지시스템은 설치비용에 비해 그 효과는 상당히 크다. 분포온도 측정장치(DTS)는 상당히 오래전에 확립되었지만 국내에서의 적용은 최근에서야 이루어졌다. 전력케이블의 온도 측정은 감시기능외에도 전력케이블



의 송전용량 증대에 활용될 수 있어 송전설비의 이용효율이 향상될 수 있다. 전력구의 종합감시시스템은 여러 가지 사고요인을 미연에 방지할 수 있어 전력의 공급신뢰도에 크게 기여할 것이다. 또한 감시시스템의 효과가 확인됨에 따라 새로운 감시시스템에 대한 연구도 활발히 진행될 전망이다.

참고문헌

- [1] 韓國電氣百年史, 한국전력공사, p1152~1156, 1989
- [2] 2000년 전기연감, 대한전기협회, p116~120, 1999
- [3] 345kV 알루미늄피 유입케이블 및 부속재 구매규격, 한국전력공사, 1995
- [4] 권병일 외2, "초고압 케이블의 송전감시시스템 소개 및 기술동향", 대한전기학회 '97 하계학술대회, p1791~1793, 1997
- [5] 홍진영 외3, "지중송전선로 감시기술의 국내 적용과 전망", 2000년 전력케이블 연구회 심포지엄, p119~127, 2000
- [6] Tadashi Nishio 외 9, "OF 케이블線路給油系統 早期異常檢知시스템", 住友電氣, 제147호, p31~35, 1995

- [7] Toshihiro Miyazaki 외3, "Partial Discharge Measurement System for Field Testing of XLPE cable", SEI Electric Technical Review, No 39, 1995

저 자 소개



김 영(金 瑛)

1961년 4월 5일생. 1983년 중앙대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 대한전선(주) 입사. 1986년~현재 대한전선(주) 시스템 엔지니어링팀 팀장.



성정규(成正圭)

1968년 7월 7일생. 1993년 동국대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 대한전선(주) 입사. 1993년~현재 대한전선(주) 시스템 엔지니어링팀 대리.