

400kV 반합성지 전력케이블 시스템 개발

김중수 손시호 연복희 이인호 조한수 정봉래
LS 전선

Development of 400kV Oil-filled power cable system with KPK®

J. S. Kim S. H. Son B. K. Youn I. H. Lee H. S. Cho B. L. Jeong
LS Cable Ltd.

Abstract - 반합성지 절연 전력케이블 시스템은 유전체 손실을 줄이고 절연두께 저감할 수 있으며 경제성면에서도 유리하다는 장점 때문에 많은 사용검토가 이루어져 왔다. 본 논문은 최근 LS전선이 국내 최초로 개발한 400kV급 초고압 반합성지 전력케이블의 반합성지 설계, 케이블 및 접속함 개발, 그리고 인증 Type Test 및 장시간 실증시험등 주요 개발과정을 기술하였다. OF 전력케이블의 오랜 경험과 다양한 연구결과를 바탕으로 반합성지 전력케이블 시스템을 단기 내에 개발하여 전력 케이블 및 접속함에 대하여 국제공인기관인 KEMA로부터 IEC 60141-1에 따른 인증서를 획득하였고, 장시간 실증시험에 성공적으로 완료함으로써 반합성지 절연 전력케이블 시스템 전체의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

위하여 전체 절연지에서 폴리머의 비율을 나타내는 폴리머 비율, 사용되는 크라프트지의 종류 및 조합 구성을 자체적으로 개발하여 당사 고유의 이름 KPK®로 국내, 외에 상표등록하였다.

2.1.1 PP 비율 선정

반합성지의 전체 두께에서 PP 필름의 비율은 반합성지의 증광과 두께로 표현할 수 있는데 이를 유전율 및 손실각(tanδ)과의 관계에 표현하며 개발 목표인 손실계수를 달성하기 위해서 0.5 ~ 0.6범위의 폴리머 비율을 갖는 반합성지를 선정하였다. 그리고 반합성지 절연지는 3종의 두께로 개발하여 케이블의 제조시 내측에는 전기적 절연강도가 높은 얇은 절연지를, 외층에는 기계적 강도가 높은 두꺼운 절연지를 사용토록하였다.

1. 서 론

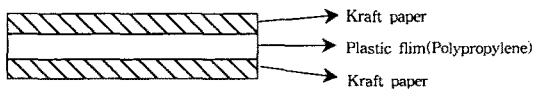
최근 급속한 경제성장으로 대도시의 전력 수요가 급격하게 증가 하기 때문에 송전압이 점차 초고압화되면서 지중 케이블에 대한 관련 기술이 급속도로 발전되고 있다. 아울러 에너지의 효율적 사용 관점이 부각되어 지중 송전케이블에서 나타나는 전력손실 중 송전전압의 계급에 비례하는 유전체 손실에 대한 고려가 이루어져 왔다. 따라서, 절연체의 유전특성을 개선하여 송전용량을 향상시키고, 절연내력을 높여 케이블 외경을 저감시키는 요구에 따라 우수한 유전특성 및 절연내력을 갖는 폴리머 절연층과 기계적특성 및 절연유와의 적합성이 우수한 크라프트지의 장점을 혼합시킨 반합성지가 개발되어 사용되고 있다[1-3]. 반합성지는 <그림 1>에 나타낸 바와 같이 양쪽의 크라프트 절연지 사이에 폴리머 절연층을 압출하여 제조한 절연지로서 기존의 일반 크라프트 절연재료에 비하여 손실계수 ($\epsilon \times \tan\delta$)가 약 50% 미만의 수준이며, 절연내력은 상용주파 및 충격전압에 대해 약 120% 이상의 특성을 나타내고 있다[4,5]. 이와 같은 특성으로 케이블의 유전체 손실을 감소하고, 절연두께를 줄여서 케이블을 포함한 전력 시스템의 compact화를 실현할 수 있다. 아직 국내에서는 반합성지에 대한 기본적인 특성검토 및 케이블에의 적용이 실용화되지 않아 관련기술이 매우 미미한 실정이다. 본 논문에서는 LS 전선이 최근 국내 최초로 개발한 반합성지 400kV급 전력케이블 및 접속함 개발과정을 소개하고 이와 관련된 요소기술에 대해 소개하고자 한다.

2.1.2 KPK® 특성 평가

위와 같이 설계된 절연지를 제작하여 유전특성 및 절연내력 뿐만 아니라 케이블 제작시 요구되는 각종 특성을 평가하였다. 유전특성은 유전율과 손실각(tanδ)을 온도별로 측정하였고, 절연내력은 케이블 상의 지권형태를 고려해 중앙에 유극(hole)이 있는 3층 구조의 샘플을 대상으로 AC 절연내력 및 충격절연강도를 평가하였다. 또한 모델케이블을 제작하여 적절한 지권패턴에 따른 절연강도의 변화를 살펴보았다. 100℃에서 유전손실계수는 2.5 x 0.1%미만의 결과를 얻었으며, AC 절연파괴강도는 100kV/mm, 충격절연강도는 160kV/mm를 나타내었다. 이는 기존의 일반 크라프트 절연지에 비해 유전손실계수와 절연내력이 크게 향상되었음을 알 수 있었다. 시료와 모델 케이블의 전기적 평가를 통하여 유침절연지의 파괴는 약점부인 유극에서 발생하고, 그 절연파괴 강도는 유극 두께가 증가할수록 저하되며, 유극에 가해지는 전계는 절연지와 절연유의 비유전율 차이가 작을수록 완화되기 때문에 비유전율이 작은 폴리머를 사용한 반합성지는 이점에서 유리하다는 사실을 확인하였다.

2.1.3 팽윤과 박리

여러 가지 종류의 반합성지에 사용되는 폴리올레핀계 폴리머는 모두 절연유에 팽윤 및 용해현상을 일으킨다. 특히, 팽윤현상은 절연층 원주방향으로의 내부압력을 증대시켜 케이블 굴곡성을 저하시키며, 케이블이 굴곡되었을 때 절연층이 좌굴될 수 있다. 따라서, 반합성지는 팽윤에 의한 두께 증가율이 어느 정도 이하가 되도록 조절되어야 한다. 반합성지의 크라프트지와 폴리머 층과의 접합은 폴리머가 크라프트지의 섬유사이에 침투하여 이루어진다. 이때 두 재질이 서로 분리되지 않게 하기 위한 박리강도는 케이블 제조시나 포설 및 운전시에 서로 분리되지 않을 정도의 것이 필요하다. 본 개발에서는 폴리머 층의 압출시, 크라프트 절연지의 표면을 코로나 방전 처리를 하여 종이 섬유가 폴리머층에 박혀 접착력을 유지하는 anchoreffect를 효과적으로 사용하였다.



<그림 1> Polypropylene laminated paper의 구조

2. 본 론

400kV급 반합성지 절연 케이블 및 접속함에 요구되는 전기적 특성상수를 <표 1>에 나타내었다. 공칭전압은 400kV이지만 뇌충격전압 및 개폐임펄스 전압이 각각 1550kV 및 1175kV로 임펄스전압 측면에서는 500kV급에 해당한다.

<표 1> 400kV 케이블 시스템 운전 조건

구 분	요 구 특 성
System voltage	400kV
Lightning Impulse voltage level	± 1550kVp / 10 shots
Switching impulse voltage level	± 1175kVp / 10 shots
Transmission capacity per circuit	1000MVA
Short circuit current rating	80kA for 1sec.
System frequency	50Hz

2.1 반합성지 설계 및 평가

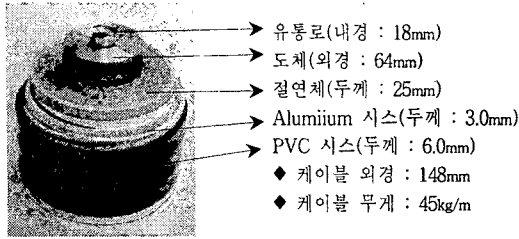
반합성지의 유전특성은 포설하고자하는 전력시스템의 요구성능에 따라 허용전류 및 송전손실 등을 고려하여 결정하여야 한다. 본 개발목표는 ϵ 과 $\tan\delta$ 의 곱을 나타내는 손실계수가 2.7 x 0.1 %를 만족하는 PP 라미네이트 절연지(polypropylene laminated paper)로 선정하였다. 위 성능을 만족하기

2.2 케이블 개발

400kV급 반합성지 케이블 설계는 송전용량을 고려하여 도체를 2500mm²로 하였으며, 케이블의 절연층 구조를 도체 쪽부터 크라프트 절연층을 두고 주 절연재료로 반합성지층, 그 다음에 다시 크라프트 층을 두는 3층 절연구조로 설계하였다. 이는 반합성지 절연재료의 특성상 임펄스의 극성에 따라 나타나는 충격절연파괴강도의 차이인 polarity effect를 감소시킬뿐 아니라, 도체 직상부에서의 전계완화 효과를 부여하기 위한것이다. 또한, 외층 크라프트 절연층은 급속시스템 작업 및 접속함 단말작업시 발생할 수 밖에 없는 고온으로부터 반합성지 절연층을 보호하고자 한 것이다. 반합성지 절연 케이블의 절연설계는 각 절연층에서의 전기적 스트레스가 설계기준에 만족하는지의 여부를 산정하여 설계하였다. <그림 2>에 반합성지 절연 400kV급 2500mm² OF 케이블의 구조를 나타내었다.

한편, 반합성지 케이블 제조시 주의해야 할 사항으로 반합성지의 지권시 지권장력설정이 있다. 반합성지가 고유의 팽윤특성을 가지고 있기 때문에 초기 t_0 의 두께를 가지는 반합성지가 적절한 장력으로 케이블 도체에 지권되어 건조가 되면 종이 있던 수분이 증발하면서 종이 부분만의 두께 감소로 t_1 으로 된다. 이후, 절연유에 케이블 절연층이 함침되면 PP층이 팽윤되어 반합성지는 t_2 라는 두께로 증가하게 되며, 이는 초기시료의 두께로 회복되는 것이 원칙이다($t_2 = t_0$). 이를 위해서 케이블은 사용되는 반합성지의 장시간 함침 후 팽윤특성을 고찰하여 종래의 크라프트 절연지에 비해 낮은 지권장력으로 설정하여 절연유에 함침된 후에 발생하는 방사방향의 기계적

하중을 고려하여 최적의 지면장력을 설정하였다.



〈그림 2〉 400kV 반합성지 절연 케이블 구조

2.3. 접속함 개발

반합성지 절연 케이블에 사용되는 접속함은 직선 케이블 접속용 절연접속함(IJB), 양측의 급유계통을 분리하도록 하는 유지 접속함(SIJB), 그리고 지중 케이블을 GIS 차단기와 연결하기 위한 가스중 중단 접속함(EB-G) 등 3종이 개발되었다. 접속함의 전기적 성능 유지를 위해 절연능력 확보를 중점적으로 설계하였으며, 기존 크라프트 절연지보다 절연특성이 우수한 KPK[®] 절연지를 보강 절연층에 사용함으로써 보강 절연층 두께를 줄여 전체적인 외경을 축소시키고 낮은 열저항성을 갖도록 하였다. 종래의 일반 크라프트 절연지를 사용하는 접속함의 보강 절연층 외경, 전계 완화 슬로프(slope), 펜슬링부의 설계 및 내부 절연거리 설계시 사용하는 관통방향 및 연면방향의 전위경도를 근거로 하여 시편 및 모델 케이블 평가를 통해 얻은 결과를 바탕으로 KPK[®]의 상용주파전압 및 충격전압 설계기준을 마련하였으며, 이를 기준으로 보강 절연층의 구조를 설계하였다. 반합성지 절연 접속함의 전기적 설계시 중요한 점은 각 조립부품의 이종계면에서 발생하는 전기적 스트레스를 형상변경을 통하여 최적으로 설계해야 한다는 점이다. 이를 위해서 각 중요부위의 전기적 설계기준을 정하고 전계 해석을 반복하여 최적의 형상 설계를 실시하였다. 또한, 발열부분을 없애고 전체적인 접속함 중량감소를 위하여 유지 유니트 바깥쪽 보강유침지에 반합성지를 사용하였으며, 유압차이로 인한 응력에 견디도록 설계하였다. 또한 케이블 쉬스층 끝단에서 전계완화를 위해 스트레스 릴리프 콘에 보강유침지 및 벨마우스 구조를 채용하여 조립의 용이성을 도모하였다. 케이블간의 직선접속을 위한 중간 직선접속함에서는 케이블간의 도체접속을 위한 슬리브를 케이블 도체와 동경이 유사한 준동경 슬리브를 사용함으로써 절연 보강층에서의 전기적 스트레스를 완화하였다. 가스중 중단 접속함의 설계에서는 IEC 60859에 따른 PIC 타입 예폭시 에 관을 설계하였다. 가스중중단 접속함 역시 미리 설정한 절연설계기준에 따라 표면누설거리 및 보강유침지를 설계하였으며, 전계해석 및 열응력분포해석을 통하여 전기적 스트레스 및 열팽창 계수 차이로 나타날 수 있는 문제들을 검증하였다. 이러한 결과를 토대로 샘플을 제작하여 냉열반복시험을 실시하였으며, 형상변경 및 금형에서의 생산공정을 정립하여 실사용 중에 나타날 수 있는 문제점을 검증하여 해결하였다.

2.4 평가

개발된 반합성지 절연 케이블 및 접속함을 설계시 목표로 설정한 성능을 만족시키는지를 확인하기 위해 관련 규격에 따른 Type test를 실시하였고, 또 실제 케이블 및 접속함의 포설조건에서 장시간에서의 시스템의 신뢰성 확인 하기 위해 장시간 실증 시험을 실시하였다.

2.4.1 Type test

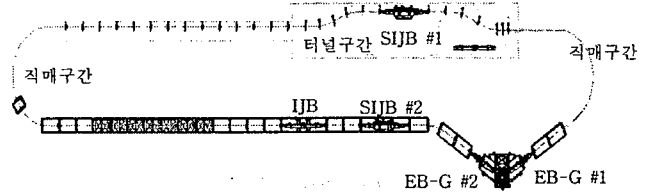
Type Test시 test loop는 반합성지 절연 케이블에, EB-G, SIJB, IJB를 옥외에 조립하여 구성 하였고,관련규격에 정의된 Type test의 요구 성능은 <표 2>에 나타난것과 같으며, 시험결과는 모든 요구 조건에 만족하는 결과를 얻게 되었다.

〈표 2〉 Type test 요구 성능

시험 항목	요구 성능
Bending test	25 x (도체 외경+케이블 외경), 3 cycles
High voltage test	AC 396kV/15min.
Loading cycle test	- Loading cycle : 20cycles (8 h on/16 h off) - Conductor temperature : 95 ~ 100 °C - Test voltage : 293kV No breakdown and no progressive increase in tan δ
Dielectric loss angle / temperature test	Max. 0.14% at ambient temperature, 40°C, 60°C and 95°C (Test voltage : 231 kV)
Dielectric security test	500kV/24hr
Switching impulse test	±1170 kV/10 shots (at, 95 °C)
Lightning impulse test	±1550 kV/10 shots (at, 95 °C)
AC voltage test	AC 396kV/15 min.

2.4.2 Long-term test

Long-term test는 실제 포설조건을 모의하여 120m의 케이블을 직매, 터널등에 포설하고, test loop는 <그림 3>에 따라 구성하였다.



〈그림 3〉 Long-term test loop

Test loop의 온도 제어와 모니터링을 하기 위해 케이블 및 접속함의 표면에 12개의 열전대를 설치하였다. 시험기간은 150일로 하고 매 3주 마다 tan δ를 측정하여 일정 주기마다 유전체 손실의 변화를 관찰하였다. 또한 PD 모니터링 시스템을 적용하여 test loop의 PD도 관찰 할 수 있게 하였다. 일정 주기마다 절연유의 DGA(Dissolved Gas Analysis)시험으로 절연유의 노화 여부와 절연유에 녹아있는 가스의 발생량을 추이를 관찰하였다.

〈표 3〉 Long-term test program

시험 항목	요구 성능
Voltage test	- Test voltage : 1.7Uo(400kV) - Loading cycle : 110cycles(8h on/16h off) - No loading cycle : 40cycles(No off) - Conductor temperature : 95 ~ 100°C ▶ No Breakdown
Dielectric loss angle	- Test voltage : 1.5Uo(116kV), 1.0Uo(231kV), 1.33Uo(307kV), 1.7Uo(400kV) - Conductor temperature : 95 ~ 100°C and at ambient temperature ▶ No progressive increase in tan δ
Lightning impulse test	- ±1550 kV/10 shots - Conductor temperature : 95 ~ 100°C ▶ No Breakdown
AC voltage test	AC 396kV/15 min. ▶ No Breakdown

No loading cycle 40cycles을 총 150일의 전압시험기간 중간에 연속 고온 상태로 유지시켜 test loop를 더욱 가혹하게 운전한 결과, 절연파괴가 일어나지 않았으며 tan δ값의 증가하는 추세도 없었다. 또한 절연유 DGA분석에서 오 C₂H₂ gas는 검출되지 않았으며 PD 모니터링에서도 PD발생은 없었다.

3. 결 론

본 논문에서는 최근 LS전선이 국내 최초로 개발한 400kV 반합성지 절연 전력케이블 및 접속함 개발과정을 소개하였고, 이와 관련된 요소기술에 대해 기술하였다. 본 개발과정에서 반합성지의 설계로부터 각종 특성상수를 측정하고, 케이블 및 접속함 설계에 반영하여 최종적으로 전력분야 최고의 국제공인 기관인 KEMA로부터 국제규격인 IEC 60141-1 및 AEIC CS2-97에 따른 Type test 인증을 획득하여 싱가포르에서 400kV 지중송전 시스템 건설 프로젝트를 국내 최초로 수주하게 되었다, 그리고, 실 포설을 모의한 Long-term test를 성공적으로 완료함에 따라 초고압 제품의 독자기술을 확립하게 되고 케이블 및 접속함에 대한 장기 신뢰성을 확인 할 수 있었다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] G. Babder et al., "Development of 500kV AC cable employing laminar insulation of other than conventional cellulosic paper", EPRI Report E L-1518, 1980
- [2] R.R Butin et al, "A study of electrical insulation characteristics of oil impregnated polypropylene paper", IEEE Trans. Elec.Insu., Vol.EI-7, pp162-169, 1972
- [3] K. Kojima et al., "Development of special insulating paper for EHV power", IEEE Winter Meeting, 1968
- [4] Arkell et al., "Development of Polypropylene/paper laminate oil filled cable for UHV systems", CIGRE, paper 21-04, 1980
- [5] B. Gregory et al., "The choice of cable type for application at EHV system voltage, Power cable and accessories 10 ~ 500kV", pp64, 1993
- [6] 한국전력공사 송변전건설처, 지중송전 케이블 시스템, pp. 103-112. 2002
- [7] R. Hata et al., Development of 800kV PPLP-insulated oil-filled cable and its accessories, IEE of Japan Power & Energy '93, 1993
- [8] K. Saitoh, Y. Kawakami, M. Murata, "The effect of the polypropylene film on the impulse breakdown strength of the laminated oil-impregnated papers", Conference Record of 1992 IEEE ISEI, 1992