

Tecnología **XLPERFORMANCE** de cables de Alta Tensión

Björn Dellby, Gösta Bergman, Johan Karlstrand, Johannes Kaumanns

La liberalización de los mercados de suministro de energía eléctrica y la creciente concienciación medioambiental están creando nuevos e interesantes mercados para soluciones de transmisión de energía basadas en la tecnología de cables extruidos. Asimismo, los avances que se producen en todos los campos están extendiendo el uso de sistemas de cables aislados XLPE (polietileno reticulado) de hasta 500 kV. Hoy en día, las soluciones de sistemas de cables son competitivas frente a las líneas eléctricas aéreas y los nuevos métodos de fabricación hacen posible suministrar cables submarinos con juntas flexibles y fibras ópticas integradas de una longitud desconocida hasta ahora. El creciente desarrollo de los sistemas de aislamiento extruido contribuye también al éxito de las últimas innovaciones de ABB tales como HVDC Light, Powerformer™, Dryformer™ y Windformer™.



1 Cable XLPE de 400 kV con aislamiento de 28 mm de espesor

Los sistemas de cables de Alta Tensión para 220 kV o más se han convertido en parte fundamental de la más moderna infraestructura de transmisión de energía, lo que conlleva, sin embargo, una especial responsabilidad por parte de los suministradores para garantizar que los sistemas proporcionen la máxima fiabilidad y, dados los grandes esfuerzos que han de soportar los sistemas a tales tensiones, que los cables y accesorios estén debidamente coordinados.

Los sistemas de cables de 400-500 kV

El IEC (Comité Electrotécnico Internacional) subraya la importancia de la fiabilidad y coordinación de los cables y accesorios recomendando que se demuestre el rendimiento del llamado *sistema total*, que consta de cable, juntas y extremos. En el borrador CEI 62067 se describe detalladamente el exhaustivo programa de ensayos, que incluye pruebas de 'precalificación'.

La compañía ABB está calificada desde 1995 como suministradora de sistemas de cables de 400 kV; actualmente está realizando los test de calificación para sistemas de 500 kV.

Calidad, materiales y fabricación

Las fábricas de cables de Alta Tensión de ABB y de los accesorios para los mismos cuentan con la certificación ISO 9001 y 14001; en consecuencia todos los proveedores de materiales esenciales han de contar con la correspondiente certifica-

ción. En el caso del material principal de aislamiento para cables EHV, para Tensión Extraalta, se aplica una serie de medidas especiales contenidas en el Acuerdo de Garantía de Calidad con el suministrador, que las realiza en sus propias instalaciones. Se trata de las medidas siguientes:

- Selección de la resina base según un sistema de control en línea de la limpieza
- Filtración ultrafina de la resina base
- Estricto control de limpieza de los componentes XLPE e intermedios
- Estricta especificación de limpieza, que incluye impurezas a partir de 50 μm
- Procedimientos mejorados de 'sala limpia' y un manual especial de Tensión Extraalta (EHV)
- Formación específica de los operarios

Como complemento a estas medidas, en las instalaciones del suministrador se aplican métodos mejorados para la manipulación de materiales en fábricas de cables y se adoptan diversas medidas para optimizar el proceso de fabricación.

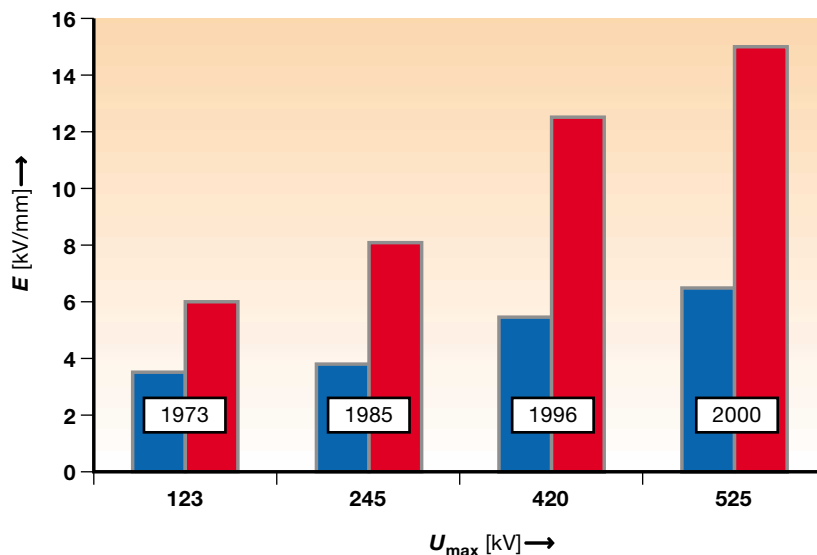
El alma del cable XLPE (polietileno reticulado) se produce en una línea de fabricación de curado en seco. El sistema de aislamiento de cables, incluidas las capas conductoras, se fabrica por extrusión en un proceso único que utiliza un cabezal transversal de extrusión 'triplex' situado, lo mismo que las tres extrusionadoras independientes para los materiales conductores y de aislamiento, en una sala limpia.

La limpieza no es el único criterio controlado durante la extrusión. También se supervisan:

- Las uniones, para asegurar una estrecha y uniforme unión entre las capas conductoras y de aislamiento.
- La homogeneidad del aislamiento (esfuerzos internos mínimos).

2 Esfuerzos de diseño de los cables XLPE y año de comercialización de los mismos

Azul	<i>Semiconductor externo</i>
Rojo	<i>Semiconductor interno</i>
<i>E</i>	<i>Rigidez dieléctrica</i>
<i>U_{max}</i>	<i>Tensión</i>



En la base del compromiso global de ABB con la fiabilidad están el modelado digital de los procesos de fabricación y los nuevos entornos de aplicación. Esto comprende diversas áreas, como la viscoelasticidad no lineal en la mecánica de sólidos, la difusión de grandes moléculas en polímeros semicristalinos y la mecánica no newtoniana de fluidos.

Diseño de cables

La figura 1 muestra el cable de 400 kV que fue utilizado en los ensayos de calificación. El conductor de cobre del cable, con una sección de 1.600 mm², está dividido en 5 segmentos para reducir las pérdidas por efectos superficiales. Para secciones superiores a 1.000 mm² ABB utiliza conductores segmentados (Milliken) formados por cables trenzados. Cuando se trata de secciones menores los conductores se compactan lo más posible para obtener un superficie más redondeada y uniforme.

El blindaje metálico consta de hilos de cobre embebidos en papel crêpe para reducir el impacto térmico y mecánico que se transfiere al aislamiento. El número de hilos y la sección total dependen de los requisitos de cortocircuito de la red. La impermeabilidad longitudinal al agua se logra rellenando los espacios entre los hilos de blindaje con una carga expansiva.

La protección externa contra la corrosión y los impactos externos la proporciona una cubierta rígida, laminada y extruida de HDPE (polietileno de alta densidad). Una hoja de aluminio adherida a la cara interior de la cubierta evita que el agua pase al interior del cable.

El resultado es un cable delgado y ligero, que tiene diversas ventajas: es posible enrollar una longitud mayor de cable en cualquier tipo de tambor, se evitan las altas pérdidas por corrientes de Foucault en la cubierta de cable y se optimiza la capacidad de conducción de la electricidad.

Otras opciones posibles para la sobrecubierta son las siguientes:

- Una capa conductora extruida para las mediciones de la cubierta externa.
- Una capa extruida retardadora de la combustión, que proporciona seguridad adicional en entornos peligrosos.

El diseño del cable también proporciona como opción el control espacial de la temperatura por medio de fibras ópticas, contenidas en un tubo de acero inoxidable, de diámetro semejante al de los conductores de la pantalla y que se integra en la misma. Este control de la temperatura permite optimizar la carga del cable.

Espesor del aislamiento

Como se observa en 2, los esfuerzos de cálculo

en los cables de Alta Tensión XLPE aumentan con el rango de tensión. Ya hace diez años podía esperarse que un cable de Alta Tensión XLPE proporcionara varios cientos de horas de funcionamiento bajo un esfuerzo de conducción de 50 kV/mm [1]. Pocos años después, la experiencia con campos eléctricos comenzó a indicar que, dado que el exponente n de vida útil aumenta al disminuir el esfuerzo eléctrico, era razonable esperar un esfuerzo umbral no muy inferior a 50 kV/mm 3. Simultáneamente se han realizado avances en la fabricación y manipulación, en la calidad de los materiales y en la tecnología de cables de Alta Tensión XLPE.

Esta experiencia, así como los ensayos en los cables XLPE de ABB, han mostrado que pueden utilizarse habitualmente esfuerzos de ensayo de hasta 40 kV/mm. El uso de esfuerzos mayores,

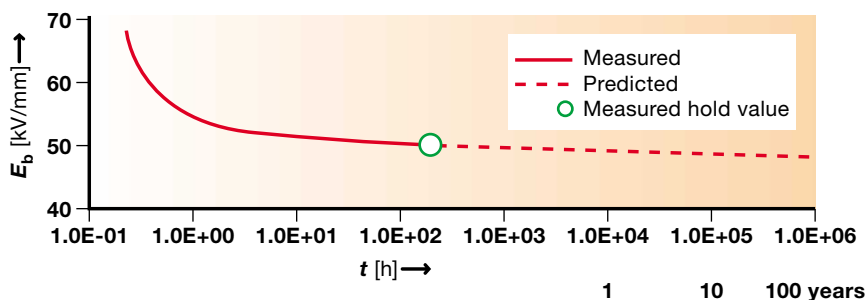
aunque posiblemente mejoraría la eficacia de los ensayos, tiene un efecto despreciable sobre la vida útil. Así, puede concluirse que, en un futuro próximo, los esfuerzos de diseño aplicados a los cables de Alta Tensión XLPE podrían superar los 15 kV/mm.

Accesorios para los cables

A principios de los años 90, ABB desarrolló una unión prefabricada para cables de Alta Tensión: se trata de un sistema totalmente seco, sin sustancias gaseosas ni líquidas, que no necesita mantenimiento. Los componentes eléctricos principales, por tanto, pueden ser sometidos a ensayos en fábrica, lo que acelera el montaje in situ y reduce los riesgos para el personal 4.

La unión está formada por un cuerpo de aislamiento de resina epoxi con un electrodo integrado para el control de campo. El 'sellado de Alta Tensión' del cable al cuerpo de junta se logra con conos de tracción fabricados con elastómero, que disponen de un deflector para el control integrado de los esfuerzos. Los conos son pretensados por medio de un dispositivo metálico de resortes. Así se garantiza una distribución homogénea de la presión en todas las uniones eléctricas, sea cual sea la dilatación térmica del cable o de los propios conos de tracción. El comportamiento de la junta ha sido comprobado mediante cálculos realizados en el centro de

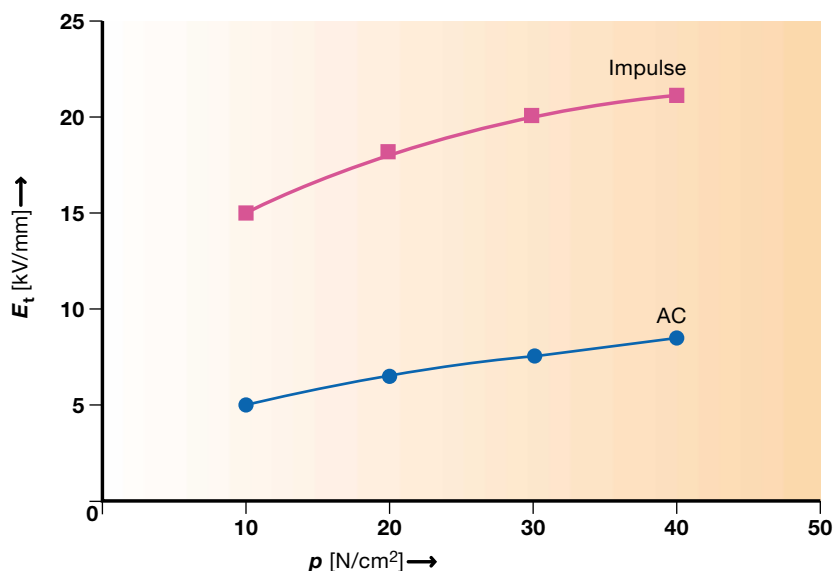
3 Curva de vida útil efectiva de los cables XLPE de ABB; rigidez dieléctrica (E) a lo largo del tiempo (t)



4 Esta junta prefabricada de cable EHV, desarrollada por ABB, no contiene materiales gaseosos ni líquidos y no precisa mantenimiento.



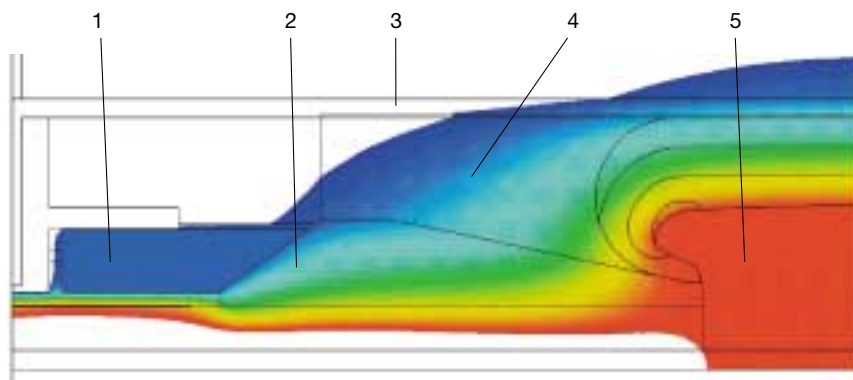
5 Rigidez dieléctrica (tangencial, E_t) de la unión de elastómero y epóxido como función de la presión entre uniones (P)



6 Distribución de la temperatura en el interior de la junta del cable, a la intemperie, calculada con el método de elementos finitos

T_{ambiente} (sala limpia): 25°C; temperatura del cable 95°C; rojo 65°C; azul 40°C

- 1 Dispositivo de presión
- 2 Cono de presión, de elastómero
- 3 Caja de la junta
- 4 Cuerpo de la junta
- 5 Electrodo central



investigaciones ABB Corporate Research según el método de los elementos finitos. Para que las uniones eléctricas puedan soportar los altos esfuerzos eléctricos es necesario que estén sometidas a una determinada presión **5**.

Para determinar los criterios adecuados para un diseño eléctrico fiable se concibió una configuración experimental capaz de producir un campo eléctrico casi puramente tangencial, con el que también se estudiaron las uniones eléctricas, y se realizaron otras investigaciones sobre la distribución de temperaturas en el interior del cuerpo de la unión **6**. Esta dispone también de un sensor capacitivo de descarga parcial (PD) para las funciones de control y para las mediciones PD in situ después de la instalación.

El cuerpo de la unión tiene una cubierta de aislamiento que permite satisfacer los requisitos de CIGRE, contenidos en Electra 128, según los cuales la unión ha de soportar impulsos de tensión de 125 kV entre sus dos secciones y de 63 kV a tierra. Esto hace posible la unión cruzada de la pantalla del cable, lo que reduce las corrientes de pantalla inducidas y las pérdidas en el sistema de cables de corriente alterna.

El sistema completo de cable, que comprende la junta, los extremos exteriores y las uniones GIS, satisfizo plenamente los requisitos del ensayo de calificación.

Ensayos de cables de 400 kV y 500 kV

Cuando se trata de cables de Tensión Media es habitual pensar en términos de componentes. Estos han de ser ensamblados aunque procedan de diferentes suministradores y el sistema en conjunto ha de funcionar adecuadamente, de acuerdo con los esfuerzos eléctricos admisibles fijados CEI 60502.

Los accesorios y cables de Alta Tensión y de Tensión Extraalta, por otra parte, se diseñan como sistemas. Para los cables con estos niveles de tensión no se dispone de normas de diseño sino únicamente de los requisitos de ensayo contenidos en CEI 60840 y del borrador CEI 62067.

Calificación según el borrador CEI 62067

El procedimiento de calificación de los sistemas de Alta Tensión y de Tensión Extraalta es una combinación de ensayos normales y ensayos de precalificación. En estos últimos se somete el sistema de cables a esfuerzos próximos a los reales, no solo a esfuerzos de tensión eléctrica sino también a esfuerzos termomecánicos propios del funcionamiento. El efecto de envejecimiento se consigue aumentando a un año la duración de los ensayos, en contraste con los ensayos normales, que duran 20 días. Los esfuerzos termomecánicos se reproducen realizando ciclos de carga completa y utilizando cables de mayor longitud que en los ensayos habituales. Además los cables se tienden de forma análoga a como lo estarán en la aplicación real.

Al sistema completo de cable –un cable de 100 m con todos sus accesorios– se le aplica una tensión de $1,7 u_0$ ¹⁾ durante un año. Durante este período el sistema experimenta al menos 180 ciclos de carga a temperaturas de 90–95°C. Finalmente, las muestras de cable son sometidas a un ensayo de descarga de rayo.

¹⁾ u_0 = tensión entre cada conductor y pantalla o cubierta para la cual se han diseñado los cables y accesorios, para valores nominales de la potencia eficaz y de la frecuencia.



7 El primer sistema europeo de cable XLPE de 400 kV, montado en Altbach (Alemania)

Ensayos de rutina y ensayos in situ

A diferencia de los ensayos de tipo y los ensayos de precalificación, los ensayos de rutina e in situ se realizan en componentes que entrarán en funcionamiento después de los ensayos. Las solicitudes aplicadas en los ensayos, por lo tanto, no deben causar daños en los componentes. El borrador CEI 62067 hace referencia a un umbral posible de 30 kV/mm, si bien define un período de ensayo más prolongado para compensar la menor tensión aplicada en el ensayo (la tensión mínima en los ensayos de rutina es de $1,5 u_0$ y la duración máxima 10 horas). En los sistemas de aislamiento (para los cuales los límites umbral no constituyen ningún problema), el suministrador puede aumentar la tensión del ensayo y disminuir la duración del mismo a 30 minutos.

El borrador CEI 62067 recomienda realizar un ensayo de corriente continua en la cubierta y/o de

corriente alterna en el aislamiento principal una vez instalados los cables y accesorios. Si solo se realiza el ensayo de la cubierta, las medidas de garantía de calidad durante la instalación de los accesorios pueden sustituirse por el ensayo de aislamiento.

Las mediciones de descarga parcial (PD) pueden realizarse durante el ensayo de tensión de corriente alterna pero, dado que los cables son sometidos a ensayos de rutina en fábrica, dichas mediciones pueden limitarse a los accesorios instalados in situ. Los modernos accesorios para cables cuentan con sensores integrados que permiten hacer mediciones de descarga parcial con la sensibilidad necesaria y pueden conectarse a un sistema de monitorización para obtener más informaciones sobre el funcionamiento de dichos accesorios. Cada uno de los sensores transmite su señal, por medio de una fibra óptica y un dispositivo especial de acoplamiento, a una unidad de proceso para su visualización y diagnóstico.



8 Sistema de cable de 400 kV en un túnel de 6,3 km que atraviesa el centro de Berlín

Este sistema de monitorización está ya funcionando en un sistema de cables XLPE de 400 kV instalado en Alemania.

Proyectos de cables XLPE de 400 kV y 500 kV

El primer pedido comercial para el suministro e instalación de un sistema de cables XLPE de 400 kV en Europa lo recibió ABB en 1993 de la empresa alemana Neckarwerke. El cable debía conectar el transformador principal con las instalaciones de conmutación de Alta Tensión, aisladas con gas, situadas en una nueva unidad de generación de la central térmica de Altbach-Deidizau. El cable, diseñado para ser estanco al agua longitudinal y radialmente, está formado por un conductor de aluminio de 800 mm², pantalla de cobre de 150 mm² y recubrimiento laminado hecho con cinta de aluminio y polietileno de alta densidad.

Se emplearon conexiones de intemperie en el lado del transformador y uniones GIS para conexión con el aparellaje de conmutación. El circuito, con una longitud de cable de 380 metros, se instaló en un canal con bandejas independientes para cada uno de los cables de núcleo único. La puesta en servicio tuvo lugar en agosto de 1996 **7**.

También durante ese mismo año, 1996, ABB recibió un encargo de la compañía eléctrica pública Bewag para el suministro e instalación de un sistema de cables XLPE de 400 kV en un túnel de 6,3 km de longitud que atraviesa el subsuelo de Berlín. El túnel, ventilado, tiene un diámetro de 3 metros **8** y discurre a una profundidad de entre 25 y 35 metros. El sistema de cable, con un conductor segmentado de cobre de 1.600 mm² de sección, está dimensionado para 1.100 MVA como parte de un enlace diagonal de transmisión entre las redes del este y del oeste de la ciudad.

El cable está instalado con las tres fases superpuestas, unas sobre otras, sobre soportes especiales a distancias de 7,2 metros y un espaciador a prueba de cortocircuitos en el centro de cada tramo. El trecho total del cable se dividió en nueve secciones de unos 730 metros de longitud cada una. Las terminaciones GIS se instalaron en las dos subestaciones y se utilizó la nueva junta ABB para interconectar los distintos tramos de cable. El cable empleado consta de tres secciones principales de unión cruzada, divididas a su vez en tres subsecciones menores.

Durante los preparativos para poner en servicio el circuito se realizaron ensayos con corriente alterna de 400 kV (1,73 u₀) y se hicieron mediciones de descarga en todos los accesorios.

El sistema entró en servicio en diciembre de 1998.

A finales de 1998 la compañía eléctrica pública Bewag firmó con ABB un segundo contrato, también sobre cables XLPE de 400 kV, destinados a un túnel subterráneo de 5,4 m de longitud. El cable, que completa el enlace diagonal entre las redes de transmisión del este y del oeste de Berlín, fue entregado al cliente en julio de 2000.

En mayo de 1999 ABB recibió su primer pedido de cable XLPE de 500 kV para un proyecto de dos circuitos de cable de casi 400 metros de longitud que se instalarán en una central hidroeléctrica de China. Los cables conectarán los transformadores de la central con el interruptor de Alta Tensión, aislado con gas, que se encuentra en la superficie. Aproximadamente 150 metros de cable estarán tendidos en un canal vertical. La entrega del cable se realizará una vez concluidos los ensayos de precalificación. Las instalaciones entrarán en funcionamiento en 2001.

Nuevos proyectos de cables submarinos

En 1998, ABB consiguió la adjudicación del proyecto Channel Islands Electricity Grid, que aumentará el suministro de energía de Francia a Jersey y, por primera vez, conectará Guernsey a

la red de electricidad de la Europa continental. La parte submarina de este proyecto se concluyó en julio de 2000.

Los principales componentes entregados para este proyecto son los siguientes:

- Cables submarinos para cubrir los trechos Francia-Jersey y Jersey-Guernsey (70 km. aproximadamente)
- Cables subterráneos en Jersey y Guernsey
- Subestaciones GIS
- Nuevos transformadores y reactancias

El sistema funciona con una tensión de 90 kV. Aunque al principio se escogieron cables submarinos llenos de fluido, la decisión definitiva recayó sobre los cables XLPE por su superioridad técnica y medioambiental.

Los dos cables submarinos tienen básicamente el mismo diseño, esto es, cubierta de plomo independiente y aislamiento XLPE de triple extrusión. Cada uno de ellos tiene un cable óptico con 24 fibras integradas en su interior para la comunicación del sistema y la desconexión interna. Los cables tienen doble armadura, es decir, una capa interna de tracción y un blindaje externo denominado 'blindaje de roca', para protegerlos contra los daños que podrían causar las corrientes de las mareas y las actividades pesqueras.

Los cables tienen un diámetro aproximado de 250 mm y un peso en el aire de unos 85 kg/m.

Los dos cables fueron entregados por la fábrica de una sola pieza, de modo que no se necesitaron uniones in situ. Esto fue posible gracias a una nueva máquina de disposición vertical que permite fabricar cables con la longitud que se desee.

El proyecto comprende también cables submarinos armados de fibra óptica, separados, que fueron dispuestos paralelamente a los cables eléctricos.

Dados los riesgos que suponen las actividades pesqueras, los cables del tramo Jersey-Guernsey y los cables de fibra óptica del tramo Jersey-Francia fueron dispuestos bajo el lecho marino para darles mayor protección.

Otro proyecto de cable submarino, adjudicado recientemente a ABB, es el Ma Wan and Kap Shui Mun Cable, destinado a atravesar un canal en Hong Kong. Dado el intenso tráfico de este canal se decidió renunciar a la instalación convencional propia de los sistemas de 132 kV y 11 kV, que probablemente habría perturbado las actividades pesqueras aun cuando se hubieran aplicado las técnicas más avanzadas. El problema ha sido resuelto con una perforación bajo el lecho marino y tendiendo conductos en los que se alojarán los cables, lo cual favorece además la realización de mejoras en el futuro.

Se instalarán sistemas independientes de control del funcionamiento del enlace por cable, que será completado a principios de 2002.

El nuevo cable en el contexto de las últimas innovaciones de ABB

Algunas de las más recientes innovaciones de ABB en el campo de la Transmisión y Distribución incorporan la tecnología avanzada de cables de Alta Tensión: el concepto HVDC Light, que se comercializó en 1997, el alternador Powerformer™, lanzado en 1998; Dryformer™, un transformador de energía de tipo seco en el mercado desde 1999; y, finalmente, Windformer™, un nuevo generador eólico diseñado para producir energía a distancia de la costa y en la costa misma y transmitirla a la red eléctrica.

Powerformer™, Dryformer™, Windformer™

El éxito comercial de Powerformer™ [2], Dryformer™ [3] y Windformer™ [4] se basa en

buena parte en el aislamiento XLPE, reducido en sus dimensiones aunque capaz de garantizar los altos niveles de tensión requeridos. La puesta a tierra y la protección de los cables en el interior de las máquinas permiten prescindir del blindaje y de la cubierta exterior, contribuyendo así a que los cables sean de menor diámetro y a que las máquinas, por lo tanto, sean más pequeñas.

El cable utilizado en estas innovaciones fue desarrollado según criterios específicos, entre otros el bajo nivel de pérdidas y la capacidad de funcionamiento en un campo magnético externo. El diseño, que tuvo muy en cuenta las altas tensiones, buscaba obtener una construcción compacta y de sección completamente circular.

HVDC Light

Los cables HVDC, de corriente continua de Alta Tensión, se emplean para conducir gran cantidad de energía eléctrica a grandes distancias, principalmente bajo el agua. Esta tecnología de cables se basa en los sistemas de aislamiento con papel impregnado con aceite de alta viscosidad.

Aunque estos cables tienen muchas ventajas técnicas, su proceso de fabricación es lento y el producto final es sensible a las cargas mecánicas. Por eso la industria lleva mucho tiempo buscando un cable HVDC extruido del mismo tipo que se utiliza en los sistemas de corriente alterna.

Los principales problemas durante el desarrollo de este tipo de cable residían en los movimientos de cargas espaciales en el material. El intenso campo de corriente continua hace que las cargas espaciales se muevan y se acumulen, apareciendo esfuerzos concentrados que pueden llegar a provocar un fallo eléctrico. Además de estas buenas propiedades de carga espacial es necesario que los materiales tengan gran resistividad y sean resistentes a los fallos eléctricos (rigidez dieléctrica).

También se han creado nuevos tipos de accesorios para corriente continua. El desarrollo, centrado en los fenómenos de interacción con grandes sollicitaciones entre los materiales, ha conseguido diseñar uniones de tipo cinta, así como uniones prefabricadas adaptadas a la conducción eléctrica con cables extruidos de corriente continua. También nuevas son las terminaciones poliméricas prefabricadas, que cuentan con un control de resistencia al campo eléctrico de corriente continua.

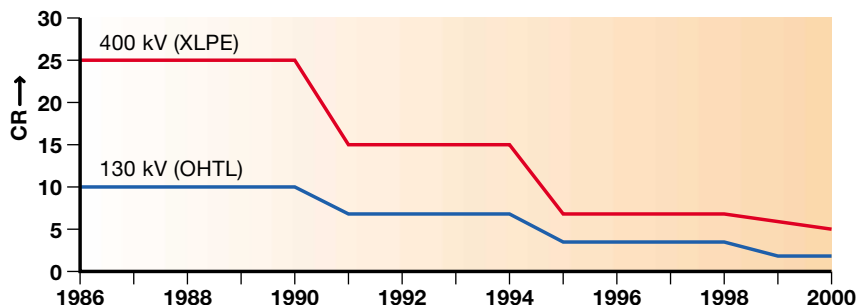
Con HVDC Light [5], ABB ha lanzado al mercado un sistema de cable extruido, junto con los nuevos convertidores basados en transistores, que hace que la conducción HVDC sea competitiva incluso en rangos bajos de energía. El primer sistema comercial, un enlace diseñado para 50 MW, ha sido instalado en la isla sueca de Gotland para transmitir a la ciudad de Visby [6] la energía procedente de una planta eólica. El proyecto más reciente es el sistema Directlink, de 180 MVA y 80 kV, que transmite la energía entre los estados australianos de New South Wales y Queensland.

Mientras HVDC Light hace viable la transmisión HDVC para enlaces de bajo rango de energía, los sistemas de cable extruido pueden utilizarse, por supuesto, en rangos más altos. Actualmente ABB ofrece sistemas de cables de 150 kV para HVDC Light.

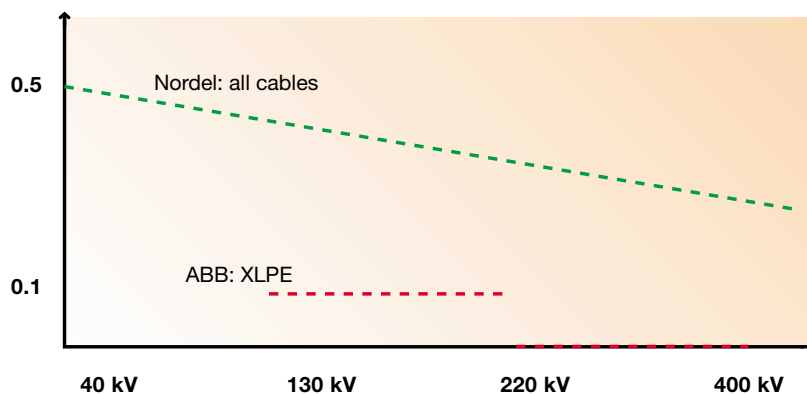
Entre las aplicaciones previstas para HVDC Light se encuentran las siguientes:

- Alimentación de cargas aisladas
- Conexión asíncrona a la red
- Transmisión de la energía procedente de pequeñas unidades generadoras (por ejemplo de las plantas eólicas)
- Redes de corriente continua
- Instalaciones HVDC en aguas profundas, situadas lejos de los puntos de interconexión

9 Comparación de costes: sistemas de cables XLPE y líneas eléctricas aéreas (OHTL)



10 La tasa de fallos en el funcionamiento de los cables instalados continúa disminuyendo



Liberalización, cambio de las reglas de juego

La liberalización de los mercados de la electricidad ha provocado un cambio en las normas que regían la generación, transmisión y distribución, tanto para las compañías de servicio público como para los suministradores. Casi de repente el cliente ha pasado a ser el centro de atención y, por tanto, los mercados se han visto obligados a prestar más atención a la opinión pública, que muy probablemente exigirá que la estructura T&D sea menos 'visible'.

Todas las partes que actúan en este nuevo mercado tienen como objetivo reducir los costes y, al mismo tiempo, garantizar una gran fiabilidad de los sistemas de transmisión y distribución.

Este nuevo escenario se caracteriza por la construcción de nuevas interconexiones por cable y por la aplicación de márgenes operacionales más precisos, que permitan obtener el máximo beneficio técnico y económico de la red eléctrica. Se construirán redes más 'inteligentes', probablemente en cooperación con las compañías de redes de fibra óptica.

Las compañías eléctricas, que también están subcontratando actividades secundarias, se están convirtiendo en proveedores de electricidad más que en técnicos o administradores. Las obras llave en mano y las soluciones de sistemas eléctricos ganarán en atractivo para los nuevos clientes objetivo.

Los sistemas de cables extruidos tienen un papel fundamental en este nuevo escenario de

competitividad, especialmente cuando se trata de sustituir las líneas eléctricas aéreas por cables subterráneos.

Los costes de los sistemas de cables XLPE han disminuido durante la última década y muy probablemente bajarán todavía más. Paralelamente a esta reducción de costes el rendimiento de los cables XLPE ha aumentado de forma espectacular. Hoy es posible afirmar que los sistemas de cables XLPE pueden competir con las líneas eléctricas aéreas –en lo técnico, en lo medioambiental, en lo comercial– especialmente en el rango de tensión de 12–170 kV **9**.

Aislamiento extruido, rendimiento y mejoras

La tasa de fallos de funcionamiento de los cables XLPE instalados ha disminuido año tras año. En la figura **10** se comparan las tasas de fallos aportadas por Nordel, una sociedad creada para el intercambio de información entre los miembros del mercado nórdico de electricidad, y los datos proporcionados por ABB. En las estadísticas de Nordel constan las tasas de todos los tipos de cables, mientras que los datos de ABB se refieren únicamente a los cables XLPE > 100 kV.

Continuará la clara tendencia actual hacia la reducción del espesor de los aislamientos, que permite obtener cables de menor diámetro **11** y aprovechar sus numerosas ventajas, como son la mayor longitud de las piezas suministradas, el menor número de juntas, la mayor facilidad de montaje y la menor contracción o dilatación térmicas del aislamiento.

La experiencia acumulada durante el desarrollo de los sistemas de cables XLPE de Tensión Extra-alta, los progresos realizados en los materiales y procesos y el excelente historial de servicio de XLPE apuntan en su conjunto a la posibilidad de que el aislamiento de los futuros cables XLPE para

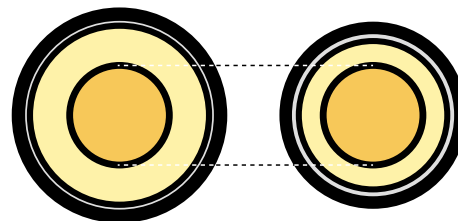
132 kV se reduzca a 10–12 mm. Esto modificará la competencia entre la transmisión de electricidad por sistemas de cables XLPE y por líneas aéreas, ya que la relación de costes entre ambos sistemas será 1:1 para el nuevo rango de distribución eléctrica de 50–170 kV. (Conviene señalar que la relación de costes durante toda la vida útil puede alcanzar valores de entre 1:1 y 1:1,5 para tensiones de 50 a 245 kV).

Los cables subterráneos frente a las líneas eléctricas aéreas

Existen, evidentemente, muchos parámetros operacionales, de seguridad, medioambientales y económicos que diferencian los sistemas de cables XLPE y las líneas aéreas. Para el nuevo tipo de distribución en el rango de 50–170 kV por medio de sistemas de cables XLPE son evidentes las ventajas en cuanto a fiabilidad, respeto al medio ambiente y a los costes. Dada su mayor sección transversal, los cables tienen normalmente menos pérdidas por MVA que las líneas aéreas de rango semejante. En la tabla se resumen las ventajas de los sistemas de cables XLPE.

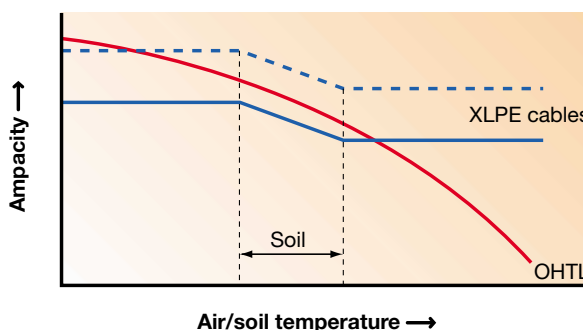
Las características de las líneas eléctricas aéreas están determinadas en gran parte por las

11 Cable XLPE estándar (izquierda) y la nueva generación de cables finos XLPE



grandes cargas invernales, que exigen numerosos equipos de calentamiento eléctrico. Durante los días más cálidos del verano, las líneas aéreas transmiten un 50% menos de electricidad que en invierno, de modo que perderán parte de su atractivo cuando haya que estabilizar los perfiles de carga. En aquellos casos en que se cuenta con numerosos equipos de aire acondicionado, por ejemplo, las ventajas de los cables XLPE subterráneos los convierten claramente en la ‘primera opción’ **12**.

Las líneas de transmisión subterráneas también tienen más capacidad de sobrecarga durante periodos inferiores a 60–90 minutos dada la elevada masa térmica del subsuelo circundante.



12 Valores de las líneas eléctricas aéreas (OHTL) comparados con los del cable XLPE. La línea discontinua indica que podría transmitirse más potencia si se tuviera en cuenta el perfil del ciclo de carga diario.

Tabla: Ventajas de las líneas de transmisión subterráneas

Medioambientales	Seguridad de la red	Ventajas económicas	Funcionamiento
Ausencia de impacto visual	Insensibilidad al viento, nieve, hielo, niebla, etc.	Menor mantenimiento	Mayor fiabilidad, menos fallos
Campos electromagnéticos bajos o inexistentes	Imposibilidad de robos	Inversión mínima en la travesía de lagos o ríos	Normalmente menores pérdidas/MVA
Alto nivel de seguridad para el personal, bajo riesgo de descarga disruptiva o contorneamiento en el aire		Utilización mínima de terreno	Mayor capacidad de sobrecargas de corta duración
mejores condiciones de trabajo		Sin efectos sobre el valor de terrenos o edificios	

Además existen otros factores a favor de la instalación de sistemas de cables XLPE de Tensión Extraalta:

- El sector de contratistas de ingeniería civil también ha reorganizando sus procedimientos y ha reducido sus costes.
- Actualmente están en marcha diversos programas de infraestructuras de fibras de banda ancha.
- La instalación de fibras ópticas junto a los cables eléctricos ya se ha establecido como práctica común.

La infraestructura eléctrica del mañana, aquí y ahora

Los sistemas de cables extruidos ya están disponibles como solución completa, suministrada ‘para toda la vida’. Se trata de soluciones ‘llave en mano’, tanto en el sentido comercial como en el sentido técnico. Ya pueden tomarse en consideración a la hora de solicitar los permisos

para la aplicación, de proceder al desmantelamiento de las líneas aéreas y al suministro e instalación de sistemas de cables y en el momento de eliminar el antiguo sistema según criterios medioambientales.

Las soluciones completas de cables pueden considerarse también como una inteligente combinación de equipos de monitorización, convertidores, dispositivos de distribución de carga, dispositivos en serie y/o de compensación en paralelo. También se dispone de soluciones para la financiación: el sistema leasing y un nuevo tipo de garantía de disponibilidad podrían eliminar determinadas incertidumbres de tipo comercial.

En conjunto, estos apuntes de lo que nos trae el futuro encajan con la idea de unos nuevos mercados centrados en la clientela. Las soluciones con cables extruidos aislados están destinadas a cumplir una función clave en este mercado en evolución, satisfaciendo no solo los requisitos de

las actuales redes de transmisión y distribución de electricidad sino también las exigencias que nos planteará el futuro.

Autores

Dr. Björn Dellby
 ABB Transmission and Distribution Management
 ABB Power Systems
 SE-721 64 Västerås/Suecia
 bjorn.dellby@se.abb.com

Gösta Bergmann
Johan P. Karlstrand
 ABB High Voltage Cables
 PO box 546
 SE-371 23 Karlskrona/Suecia
 gosta.bergmann@se.abb.com
 johan.p.karlstrand@se.abb.com

Dr. Johannes Kaumanns
 ABB Energiekabel GmbH
 Rhenaniastrasse 12–30
 DE-68199 Mannheim/Alemania
 johannes.kaumanns@de.abb.com

Bibliografía

[1] **K.B. Mueller, U. Tretow, B. Dellby, C. Hjalmarsson:** XLPE cable and technologies for operating voltages of 245 kV and above. IEEE/PES, T&D Conference, New Orleans, 1989.
 [2] **M. Leijon:** Powerformer™, una máquina rotativa radicalmente nueva. Revista ABB 2/98, 21–26.
 [3] **T. Andersson et al:** Dryformer™, nuevo transformador de potencia, sin aceite y con bajo impacto medioambiental. Revista ABB 3/00, 59–64.
 [4] **M. Dahlgren et al:** Windformer™, energía eólica a gran escala. Revista ABB 3/00, 31–37.
 [5] **K. Eriksson:** Transporte CCAT Light basado en convertidores con circuito intermedio de tensión. Revista ABB 1/98, 4–9.
 [6] **M Byggeth et al:** The development of an extruded HVDC cable system and its first application in the Gotland HVDC Light project. JICABLE 1999.