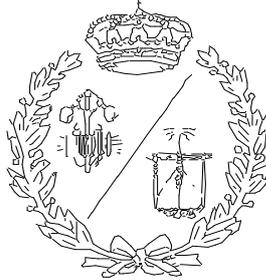


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR
CORRIENTE CONTINUA
(Direct Current Energy Transmission)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Ignacio Rodríguez Freire

Septiembre - 2016

TÍTULO	Transporte de Energía Eléctrica por Corriente Continua		
AUTOR	Ignacio Rodríguez Freire		
DIRECTOR	José Carlos Lavandero González		
TITULACIÓN	<i>Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales</i>	FECHA	

PALABRAS CLAVE

Línea, transmisión, tensión, corriente, HVDC, HVAC, armónicos, potencia, distancia, energía.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cada día la población mundial crece, los países subdesarrollados progresan y es indispensable satisfacer nuestras necesidades y mejorar nuestra calidad de vida porque hemos evolucionado y modificado nuestras costumbres. Por todo ello es imprescindible el avance del sistema eléctrico mundial y las interconexiones entre los distintos países y continentes, para garantizar que todas las personas del planeta tengan acceso a un servicio eléctrico de calidad.

DESCRIPCION DEL PROYECTO

La solución que presenta este estudio al planteamiento del problema es la transmisión de energía eléctrica basada en corriente continua en elevadas tensiones, HVDC (siendo sus siglas en inglés "High Voltage Direct Current"), centrándose en: su contexto histórico, el funcionamiento genérico, las diferencias, ventajas e inconvenientes entre los sistemas HVDC y HVAC, sus configuraciones, su tipo de conexiones, sus componentes, su tecnología, tanto LCC o tradicional como la VSC, el problema que generan los armónicos y sus posibles soluciones, la normativa a aplicar, y los proyectos más destacados y emblemáticos a lo largo del mundo.

CONCLUSIONES / PRESUPUESTO

En general, el transporte eléctrico se realiza en HVAC, pero la mejora de la electrónica de potencia consigue que cada vez sea más rentable tanto económica, técnica como medioambientalmente la ejecución de nuevos proyectos en HVDC, ya hay ejecutados o en construcción alrededor de 170 proyectos.

- La longitud crítica en líneas aéreas es de 600 km y en líneas subterráneas y submarinas de 40 km.
- Se pueden conectar sistemas asíncronos.
- Se puede invertir el flujo de energía.

Hay que tener en cuenta la calidad de la onda y trabajar bajo unos ciertos límites, que dictan las normas UNE y las normas IEEE y, cabe

destacar, para la relación de proyectos basados en líneas eléctrica el Real Decreto 223/2008, por el que se aprueba el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09.

Finalmente, las líneas con sistemas HVDC aumentan la transmisión de energía eléctrica y mejoran la interconexión entre distintos países, asegurando el transporte de energía eléctrica, la calidad del mismo y disminuyendo la dependencia de los países que basan sus recursos en fuentes no renovables.

BIBLIOGRAFÍA

Normativa

- Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITCLAT 01 a 09.
- AENOR. 2015. UNE-IEC/TR 61000-3-6 IN. *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3: Límites. Sección 6: Evaluación de los límites de emisión para las cargas perturbadoras conectadas a las redes de media y y alta tensión*. Publicación básica CEM (IEC/TR 61000-3-6:1996). Madrid: AENOR.
- AENOR. 2010. UNE-EN 61642.2010. *Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos. Empleo de filtros y de condensadores a instalar en paralelo*. Madrid: AENOR.
- AENOR. 2006. UNE-EN 50160:2015. *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. Madrid: AENOR.

- Internacional Standard. 2015. IEC 61000-4-30:2015 *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro.*

- Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2014. IEEE Std 519 – 2014. *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.*

Libros

- ARRILLAGA GARMENDIA, Jesús, EGUILUZ MORÁN, Luis Ignacio. *Armónicos en sistemas de potencia.* Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, D.L. 1994. 373 p. ISBN 84-8102-085-0.

- ARRILLAGA, Jos. *High Voltage Direct Current Transmission.* Stevenage, UK : The Institution of Electrical Engineers, cop. 1998. 299 p. ISBN 0-85296-941-4.

- ARRILLAGA, J; NEVILLE, R. *Power system harmonics.* 2ª ed. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2003. 399 p. ISBN 0-470-85129-5.

- BARRERO GONZÁLEZ, Fermín. 2004. *Sistema de energía eléctrica.* Madrid: Thompson. 368p. 84-9732-283-5.

- PÉREZ ABRIL, Ignacio. *Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos.* Ingeniería energética. 2012, vol. 33, núm. 2. ISSN 1815-5901.

- RAS OLIVA, Enrique. *Teoría de líneas eléctricas de potencia, de comunicación, para transmisión en continua, Vol. I: Regímenes senoidales: Aplicaciones.* Barcelona: Universidad Politécnica, 1975, E.T.S. Ingenieros Industriales: Marcombo. 412p. (Textos monográficos de electrotecnia). ISBN 84-600-5892-1.

- RAS OLIVA, Enrique. *Teoría de líneas eléctricas de potencia, de comunicación, para transmisión en continua, Vol. II: Regímenes no senoidales. Aplicaciones.* Barcelona: Universidad Politécnica, 1975, E.T.S.

Ingenieros Industriales: Marcombo. 412p. (Textos monográficos de electrotecnia). ISBN 84-600-6681-9.

- RASHID, Muhammad Harunur. 2004. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. 3ª edición. México: Pearson Educación. 904p. 970-26-0532-6.

Artículos

- ABB. "El interruptor HVDC híbrido de ABB". ABB review 2|13. N° 2 (2013), Páginas 8 a 14.

- ABB. "60 años de HVDC". ABB review 2|14. N° 2 (2014), Páginas 33 a 41.

- FERNÁNDEZ BEITES, L. 2012. *Introducción a los enlaces de corriente continua de alta tensión*. Apuntes. Universidad Politécnica de Madrid.

- IGNASI FRAU, J, GUTIÉRREZ, J. 2006. *Transporte de energía eléctrica en corriente continua: HVDC*. Artículo. Endesa Distribución.

- RUDERVALL, R, JOHANSSON, J. 2003. *Interconexión de sistemas eléctricos con HVDC*. SEMINARIO INTERNACIONAL DE INTERCONEXIONES REGIONALES, CIGRÉ. ABB.

Sitios WEB

- ABB [En línea] <http://new.abb.com/systems/hvdc>
- Abengoa [En línea] <http://www.abengoa.es/web/es/index3.html>
- Alstom [En línea] <http://www.gegridsolutions.com/alstomenergy/grid/microsites/grid/products-and-services/hvdc/index.html>
- Naciones Unidas [En línea] <http://www.un.org/es/index.html>
- Red Eléctrica Española [En línea] <http://www.ree.es/es/>
- Siemens [En línea] <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/hvdc/>

Resumen

El ser humano ha evolucionado de manera progresiva en la historia y con la necesidad de mejorar su calidad de vida ha ido descubriendo e inventando miles de inventos. El problema surge cuando dichos inventos se alimentan de electricidad, esto sumado al crecimiento de la población provoca un déficit de la energía y para cubrir la demanda eléctrica es obligatorio mejorar el sistema eléctrico mundial. El sistema eléctrico se divide en: generación, transporte y distribución. Hay dos formas de transportar electricidad: corriente alterna (AC) y corriente continua (DC), el estudio de la corriente continua en altas tensiones (HVDC) se ha hecho un hueco en el mercado debido:

- Al transporte de potencia en líneas aéreas de largas distancias.
- La transmisión de potencia en ambientes marinos o subterráneos, indistintamente de la distancia.
- Interconexión de sistemas eléctricos de AC asíncronos.
- Estabilización de líneas en AC.

Los sistemas HVDC tienen diversas configuraciones y conexiones, en función de los objetivos del proyecto, por ejemplo, una configuración punto a punto que se aplica en la interconexión de dos subestaciones en la que no es admisible la tecnología HVAC.

Los componentes de un sistema HVAC y HVDC son similares: transformadores de conversión, filtros, líneas de transporte, sólo se diferencia en las estaciones de conversión necesarias para rectificar e invertir la tensión.

En los últimos años la tecnología ha evolucionado rápidamente, sobre todo la electrónica de potencia, debida a esta evolución los sistemas HVDC presentan dos tecnologías:

- LCC o Line Commutated Converters se basa en un rectificador de 6 pulsos controlado mediante tiristores.
- VSC o Voltage Source Converters se basa en convertidores IGBTs que pueden realizar las conmutaciones necesarias para conseguir la rectificación o la inversión. Cada compañía ha desarrollado su propia tecnología, por ejemplo, ABB con HVDC – Light o Siemens con HVDC Plus.

El principal problema en los sistemas HVDC son los armónicos que se forman porque ocasionan serios problemas en la red eléctrica aumentando los costes económicos del proyecto. La compañía eléctrica tiene que asegurar la calidad y eficiencia del suministro eléctrico, en base a unos límites descritos en las distintas normas, por ejemplo, el Estado sacó en el año 2008 el Real Decreto 223/2008 por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09.

Finalmente, los proyectos más emblemáticos de la tecnología HVDC en el mundo proporcionan una idea de la cantidad de aplicaciones que hay, como la interconexión entre la Península Ibérica y las islas Baleares se conoce como proyecto Rómulo y es la primera interconexión submarina de transporte en DC que existe en España o el proyecto Río Madeira que conecta una distancia de 2375 km de longitud, entre las centrales hidroeléctricas en el río Madeira, en la cuenca del Amazonas, al noroeste

de Brasil, hasta, cerca de Sao Paulo en el sureste de Brasil donde hay una creciente demanda de energía.

Summary

Humans have evolved progressively in history, and due to the need to improve their quality of life, have been discovering and creating thousands of inventions. The problem originates when these inventions are powered by electricity, this added to population growth causes a deficit of energy and to meet electricity demand is required to improve the global electrical system. The electrical system is divided into: generation, transmission and distribution. There are two ways to transport electricity: alternating current (AC) and direct current (DC), the study of high voltage direct current (HVDC) has appeared on the market because:

- Transport power over long distances overhead lines.
- The power transmission in marine or underground environments, regardless of distance.
- Interconnection asynchronous AC electrical systems.
- Stabilization AC lines.

HVDC systems have different configurations and connections, depending on the project objectives, such as a point-to-point

configuration applied in the interconnection of two substations where it is not admissible HVAC technology.

The components of an HVAC and HVDC system are similar: conversion transformers, filters, transmission lines, only difference in conversion stations necessary to rectify and invert voltage.

In recent years the technology has evolved rapidly, especially power electronics, due to this evolution of HVDC systems have two technologies:

- Line Commutated Converters or LCC is based on a 6-pulse rectifier controlled by thyristors.
- VSC or Voltage Source Converters based on IGBTs converters that can perform the necessary switching operations for rectification or investment. Each company has developed its own technology, for example ABB HVDC - Light or Siemens HVDC Plus.

The main problem in HVDC systems is that the harmonics that are formed cause serious problems in the electricity network by increasing the economic costs of the project. The power company has to ensure the quality and efficiency of electricity supply, based on limits described in the various standards, such as the state took in 2008 by Real Decreto 223/2008 Regulation on technical conditions approved and security guarantees in high voltage power lines and their complementary technical instructions ITC-LAT 01-09.

Finally, the most emblematic projects of HVDC technology in the world provide an idea of the number of applications available, such as the interconnection between the Iberian Peninsula and the Balearic islands known as Romulus project and is the first submarine interconnection of transport in DC that exists in Spain or the Rio Madeira project that connects a distance of 2375 km in length, between the hydroelectric plants on the Madeira river in the Amazon basin, northwest of Brazil, until, near Sao Paulo in southeastern Brazil where there is growing demand for energy.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	1
1.2. OBJETIVO DEL ESTUDIO	6
2. CONTEXTO HISTÓRICO	7
2.1. LA ELECTRICIDAD	7
2.2. EL TRANSPORTE DE LA ELECTRICIDAD	8
3. FUNCIONAMIENTO DE LA TECNOLOGÍA HVDC	12
3.1. COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS HVDC Y HVAC	14
3.1.1. Consideraciones técnicas.....	15
3.1.1.1. Estabilidad	16
3.1.1.2. Asincronismo	17
3.1.1.3. Compensación de líneas	17
3.1.1.4. Control del flujo de potencia	17
3.1.1.5. Corrientes de cortocircuito.....	17
3.1.2. Consideraciones económicas.....	18
3.1.3. Consideraciones medioambientales.....	21
3.2. CONFIGURACIONES DEL SISTEMA HVDC	23
3.2.1. Punto a punto	23
3.2.2. Back to back	23
3.2.3. Multiterminal.....	24
3.2.4. Unitaria	25
3.3. CLASIFICACIÓN DE LAS CONEXIONES HVDC	25
3.3.1. Monopolar	25

3.3.2.	Bipolar.....	26
3.3.3.	Homopolar.....	27
4.	COMPONENTES DE LA TECNOLOGÍA HVDC.....	29
4.1.	TRANSFORMADORES DE CONVERSIÓN	29
4.2.	CONVERTIDOR (RECTIFICADORES E INVERSORES).....	31
4.3.	FILTROS	32
4.3.1.	Filtros de AC.....	33
4.3.2.	Filtros de DC.....	34
4.3.3.	Batería de condensadores	34
4.4.	REACTANCIA DE SUAVIZADO	35
4.5.	LÍNEAS DE TRANSPORTE	36
4.5.1.	Tipo de cable.....	37
4.5.1.1.	Líneas Aéreas.....	37
4.5.1.2.	Líneas Subterráneas y Submarinas	37
4.6.	INTERRUPTORES.....	41
5.	TECNOLOGÍA HVDC	42
5.1.	LCC (LINE COMMUTATED CONVERTERS)	42
5.1.1.	Componentes de HVDC – LCC.....	44
5.1.1.1.	Convertidor.....	44
5.1.1.2.	Transformador.....	44
5.1.1.3.	Filtro de AC	44
5.1.1.4.	Filtro DC.....	45
5.1.1.5.	Bobina de choque.....	45
5.1.1.6.	Condensadores en paralelo	45
5.1.1.7.	Cable.....	46
5.2.	VSC (VOLTAGE SOURCE CONVERTERS)	46
5.2.1.	Componentes de HVDC - VSC	47
5.2.1.1.	Convertidor.....	47
5.2.1.2.	Transformador.....	48
5.2.1.3.	Reactancia de fase	48
5.2.1.4.	Filtros de AC.....	49
5.2.1.5.	Condensadores de DC	49
5.2.1.6.	Cables de DC.....	49
5.2.2.	ABB con HVDC – Light.....	49
5.2.3.	Siemens con HVDC Plus (Power Link Universal System).....	50
5.2.4.	Alstom con HVDC MaxSine	51
6.	ARMÓNICOS	52
6.1.	ORDEN, FRECUENCIA Y SECUENCIA DE LOS ARMÓNICOS	53
6.1.1.	El 3º y el 5º armónico.	54
6.2.	ANÁLISIS DE FOURIER.....	56
6.3.	FUENTES DE ARMÓNICOS.....	59
6.4.	EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS.....	60
6.4.1.	Resonancia.....	60
6.4.2.	Sobrecargas en equipos.....	60

6.4.3.	Perturbaciones	61
6.4.4.	Pérdidas	61
6.5.	IMPACTO ECONÓMICO DE LOS ARMÓNICOS	62
6.6.	NORMATIVA APLICABLE	63
6.6.1.	Normas de compatibilidad para redes de distribución	63
6.6.2.	Normas de las emisiones de armónicos por parte de los equipos	64
6.6.3.	Normas para empleo de filtros.....	65
6.7.	INDICADORES Y LÍMITES.....	67
6.7.1.	Índices para armónicos de tensión	67
6.7.2.	Índices para armónicos de corriente	68
6.7.3.	Límites	68
6.8.	MEDICIÓN Y ANÁLISIS	74
6.9.	SOLUCIONES	77
6.9.1.	Filtrado de Armónicos	80
6.9.1.1.	Filtros Pasivos	80
6.9.1.2.	Filtros Activos	83
6.9.1.3.	Filtros Híbridos	85
7.	PROYECTOS DE HVDC POR EL MUNDO	87
7.1.	GOTLAND – SUECIA	88
7.2.	JINPING – SUNAN, CHINA	89
7.3.	RIO MADEIRA, BRASIL	90
7.4.	NORNED, EUROPA.....	91
7.5.	MURRAYLINK, AUSTRALIA.....	92
7.6.	ESPAÑA.....	93
7.6.1.	Interconexión subterránea España – Francia	93
7.6.2.	Interconexión Península – Baleares.....	96
8.	NORMATIVA APLICABLE	99
8.1.	OBJETO Y APLICACIÓN	104
8.2.	CATEGORÍAS DE LAS LÍNEAS SEGÚN TENSIÓN NOMINAL.	105
8.3.	COMPATIBILIDAD CON OTRAS INSTALACIONES.	106
8.4.	EQUIVALENCIA DE REQUISITOS.	106
8.5.	NORMAS DE OBLIGADO CUMPLIMIENTO.	107
8.6.	ACCIDENTES.....	108
8.7.	EQUIPOS Y MATERIALES.....	108
8.8.	PROYECTO DE LAS LÍNEAS.....	109
8.9.	INTERRUPCIÓN Y ALTERACIÓN DEL SERVICIO.....	109
8.10.	DOCUMENTACIÓN, PUESTA EN SERVICIO, MANTENIMIENTO, VERIFICACIONES PERIÓDICAS E INSPECCIONES.....	109
8.11.	ÍNDICE DE INSTRUCCIONES TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS.....	110
9.	CONCLUSIONES	112
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	115
10.1.	NORMATIVA	115
10.2.	LIBROS	116
10.3.	ARTÍCULOS	117
10.4.	SITIOS WEB	117

--0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0--

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		página
1.	Crecimiento de la población mundial, 1750-2050	2
2.	Estimaciones de la demanda energética mundial	3
3.	Evolución del consumo de energía y de la población mundial	5
4.	Uno Lamm, padre de la transmisión HVDC	9
5.	Esquema básico de transmisión HVDC	13
6.	Transmisión de potencia con un sistema HVAC	15
7.	Torres de transmisión a la misma tensión y potencia transmitida ...	18
8.	Efecto pelicular. En la parte superior en DC, en la inferior en AC ...	20
9.	Costo vs Distancia en HVAC y HVDC para la misma potencia	21
10.	Configuración back to back	23
11.	Configuración multiterminal en paralelo	24
12.	Enlace Monopolar	25
13.	Enlace Bipolar	27
14.	Enlace Homopolar	28
15.	Esquema de los componentes de un sistema bipolar HVDC	30
16.	Transformador Siemens	31
17.	Conexiones del transformador en Y-Y y Y- Δ seguido de rectificador de doce pulsos	32
18.	Smoothing Reactor de aire de Siemens	35

19. Cable MI	38
20. Cable OF	39
21. Cable XLPE trifásico y monofásico	39
22. Cable PPLP	40
23. Cable extruido VSC	41
24. Tecnología HVDC-LCC	42
25. Tecnología HVDC-VSC	47
26. Convertidor VSC de 3 niveles	48
27. Señal fundamental, tercer y quinto armónico	55
28. Señal distorsionada y su descomposición en: señal fundamental, tercer y quinto armónico	55
29. Descomposición de onda distorsionada	56
30. Tipos de filtros para las instalaciones de alta tensión	66
31. FLUKE 43B-Analizador de calidad de energía / analizador de armónicas. Incluye modo multímetro y osciloscopio	77
32. Cargas no lineales colocadas lo más aguas arriba posible	78
33. Cargas lineales juntas y lo más aisladas posible de las cargas sensibles	79
34. Cargas no lineales con alimentación independiente	79
35. Transformador en conexión Dyd para aislar la propagación de los armónicos 5º y 7º en la red aguas arriba	80
36. Funcionamiento de un filtro pasivo	81
37. Filtro paso banda	82
38. Filtro de (a) 2º orden, (b) filtro tipo C y (c) 3er orden	83
39. Funcionamiento de un filtro activo	84
40. Funcionamiento de un filtro híbrido	85
41. Propuesta de utilización de filtros activos, pasivos o híbridos según el $\cos \varphi$ y el orden de los armónicos a mitigar	86
42. Enlace ejecutados por ABB en el mundo	88
43. Central hidroeléctrica de Jinping en China	89
44. El enlace Rio Madeira atraviesa todo Brasil	90
45. Enlace submarino más largo del mundo	91
46. Enlace subterráneo más largo del mundo	92
47. Capacidad de interconexión España-Francia	94
48. Rajoy y Valls en el acto de inauguración la línea de interconexión entre España y Francia	94

49. Ciudades que interconecta la línea subterránea	95
50. Esquema de la interconexión España - Francia	96
51. Cables y barco usados en la interconexión	97
52. Esquema eléctrico del proyecto Rómulo	98
53. Potencia vs Distancia en AC y DC	113

--0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0--

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	página
1. Parámetros de los armónicos más usuales	54
2. Armónicos de las ondas más comunes	58
3. Límites de los armónicos de intensidad	70
4. Límites de la Tensión de Distorsión	70
5. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general de 120 V a 69 kV	71
6. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general de 69 kV a 161 kV	72
7. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general de >161 kV	72
8. Factores recomendados para los aumentos de límites de corriente armónica	73
9. Niveles de compatibilidad recomendados para las tensiones armónicas (en % de la tensión nominal) en baja tensión (LV), media tensión (MV) y alta tensión (HV). THD: 8% en redes LV/MV, 3% en redes HV	74

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

A lo largo de la historia los seres humanos han ido evolucionando y modificando nuestros hábitos y costumbres para tratar de satisfacer nuestras necesidades y mejorar nuestra calidad de vida, desde el hallazgo del fuego hasta la invención del ordenador, pasando por hitos tan importantes como el descubrimiento de América o la Revolución Industrial. Todo ello acarrea una demanda energética que se ha encaminado a límites insospechados. Según las proyecciones efectuadas a principios del actual siglo XXI, la demanda mundial de energía se incrementará a un ritmo cercano al 1,8% anual. El impacto del crecimiento tanto económico y del desarrollo demográfico, con una media anual del 3,1% y 1%, como se observa en la figura 1, respectivamente, se verá compensado por una reducción anual de la intensidad energética del 1,2%, como consecuencia del efecto combinado de los cambios estructurales en la economía, el incremento de la tarifa de la energía y los progresos tecnológicos.

Los países industrializados experimentarán una ralentización de la progresión de su propia demanda energética, que pasará a situarse a un nivel cercano al 0,4% anual en la UE. A la inversa, en los países en vías de desarrollo se intensificará la demanda energética muy vertiginosamente. Se espera que cerca del primer tercio del milenio, alrededor de 2030, más de la mitad de la energía mundial demandada tenga como origen los países en vías de desarrollo que actualmente representan entorno a dos quintas partes del total de la energía demandada.

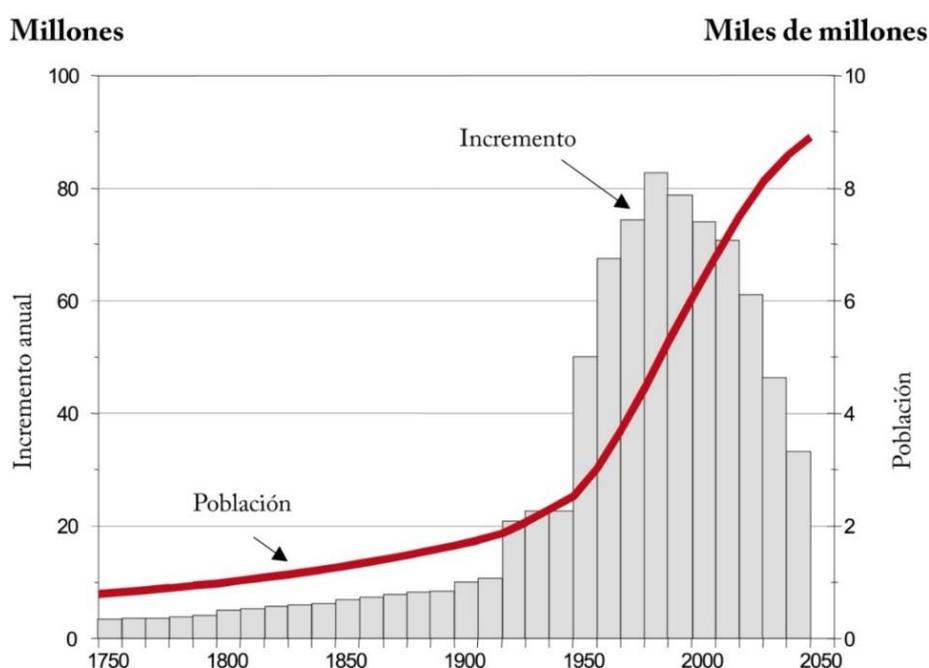


Figura 1. Crecimiento de la población mundial, 1750-2050.
Fuente: United Nations (1999).

La demanda final de energía crecerá a un ritmo similar al del incremento del consumo interior bruto. En la medida en que se prevé un crecimiento similar para todos los sectores, se espera que su participación en la demanda final seguirá siendo constante, por lo general, a nivel mundial (cerca del 35% corresponderá a la industria, 25% al transporte y 40% al consumo residencial y al sector terciario). Los modelos de demanda de energía por sectores varían en función de las regiones. En los

países desarrollados la demanda del sector de los servicios registra el crecimiento más rápido, mientras que en los países en vías de desarrollo todos los sectores experimentan un crecimiento anual sostenido de entre 2% y 3%.

Se mantendrá en todas las regiones la introducción de la electricidad, que pasará a representar cerca de una cuarta parte de la demanda final de energía. El carbón descenderá en los países industrializados y la biomasa se irá reduciendo gradualmente en los países en vías de desarrollo. El petróleo seguirá siendo el combustible por excelencia en el año 2030, oscilando entre el 40% y el 50% dependiendo de las zonas.

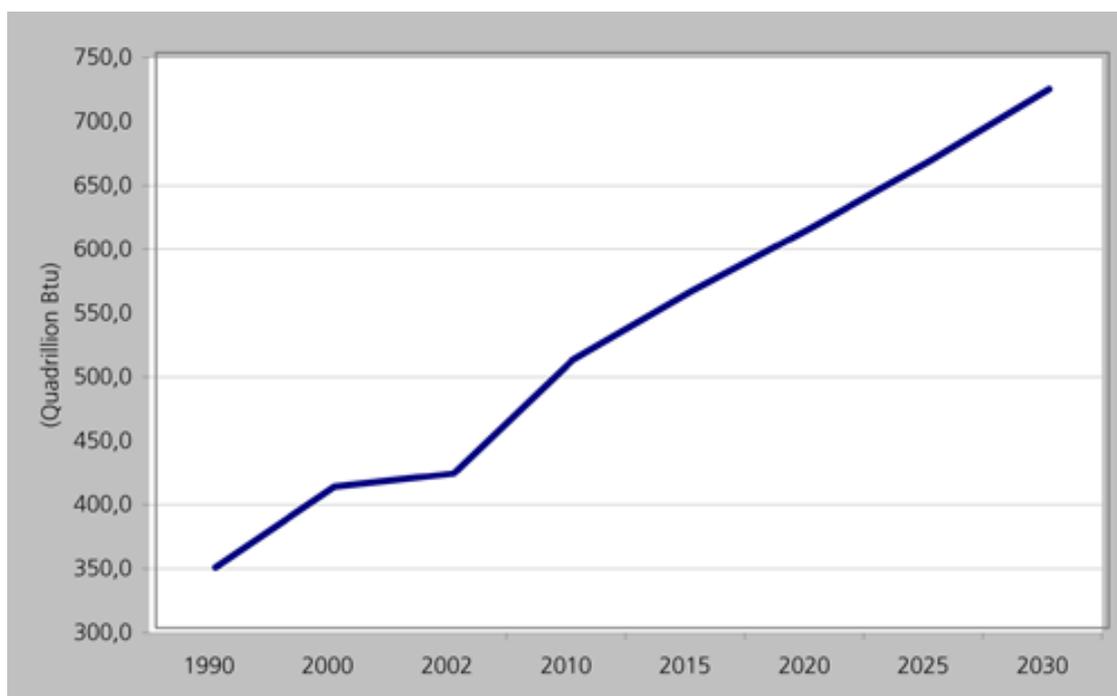


Figura 2. Estimaciones de la demanda energética mundial.

Aumentará constantemente la producción de electricidad a un ritmo medio del 3% anual como se muestra en la figura 2. En el año 2030, más de la mitad de la producción procederá de las tecnologías surgidas a partir

de finales del siglo XX, como son las tecnologías avanzadas del carbón, las turbinas de gas de ciclo combinado y las energías renovables.

La utilización del gas para la generación de electricidad experimentará un incremento constante en las tres regiones productoras más importantes (CEI, Oriente Medio y América Latina), mientras que el uso del carbón para ese fin disminuirá en todas las regiones, salvo en América del Norte, donde se estabilizará, y en Asia, donde aumentará perceptiblemente. El desarrollo de la energía nuclear no mantendrá el mismo ritmo que la producción de electricidad total, por lo que su cuota de mercado se reducirá al 10% en 2030. Las energías renovables representaran el 4% de la producción (frente al 2% en 2000), principalmente a causa de una rápida progresión en la producción de electricidad eólica.

La alta cantidad de medios de generación proporcionan una gran competitividad en los precios de coste de las unidades energéticas producidas. Resulta conveniente la realización de transportes económicos, lo que provoca una mejora en las interconexiones mundiales.

Hay grandes reservas energéticas mundiales, como en Canadá, Brasil o Siberia, cuyos bajos precios de generación justifican enormes transportes.

Las interconexiones entre los continentes pueden contar con la ventaja de compensar la curva de carga no coincidente por la diversidad horaria, por ejemplo en Estados Unidos, donde la diferencia es de 3 horas entre el este y el oeste, la estación del año o en zonas climáticamente distintas estando en el mismo continente, como por ejemplo en Noruega, que hará falta más calefacción que en España.

Todo esto viene corroborado por Ailleret cuando dice: "Progresión de los consumos, concentración de potencias unitarias, carrera hacia el mar, son, pues, factores que mantendrán la expansión de las grandes redes eléctricas".

En conclusión, como la demanda anual crece a un ritmo irrefrenable se requiere que de manera proporcional se amplifique la energía generada, para lo que se tienen tres opciones:

- Construir más centrales de generación, tales como hidroeléctricas o eólicas.
- Mejorar cualquier fracción del ciclo de la energía eléctrica, por ejemplo, agrandar la potencia de las centrales eléctricas; véase el proyecto de ampliación de la central hidroeléctrica de bombeo de Aguayo (Cantabria, España), o bien, aumentar la eficiencia de los transformadores.
- Un mix de las anteriores.

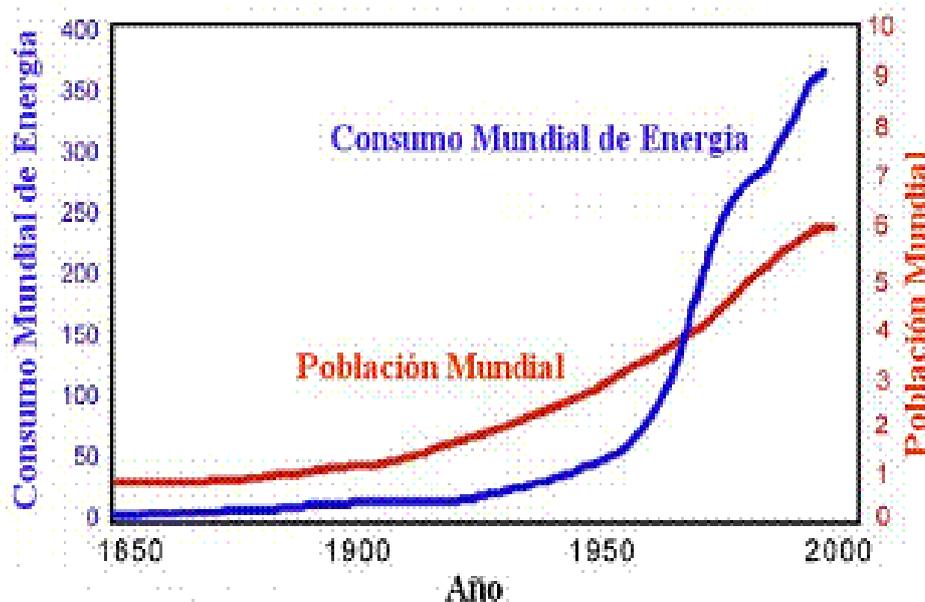


Figura 3. Evolución del consumo de energía y aumento de la población mundial.

En la figura 3 se detalla que hasta aproximadamente el año 1950 las curvas de población y energía consumida mantuvieron un crecimiento similar, y el mayor consumo de energía se debía principalmente a la mayor población. En cambio, en las últimas décadas del siglo XX el consumo energético aumenta más rápido que la población mundial.

1.2. OBJETIVO DEL ESTUDIO

Este trabajo se centra en la mejora del sistema eléctrico, concretamente en el transporte de la electricidad, elaborando un estudio del transporte en corriente continua en alta tensión, HVDC (siendo sus siglas en inglés "high voltage direct current"), y demostrando que en multitud de proyectos este tipo de transporte es más viable tanto ambientalmente como económicamente y técnicamente.

En concreto, se realiza el estudio de la transmisión de energía eléctrica en alta tensión de corriente continua, detallando sus características, sus configuraciones, clasificaciones, componentes, los problemas que pueden surgir con los armónicos, los proyectos más emblemáticos a lo largo del mundo y, finalmente, las conclusiones del estudio.

2. CONTEXTO HISTÓRICO

2.1. LA ELECTRICIDAD

La palabra electricidad, procede del latín *electrum* y del griego ἤλεκτρον (*élektron*, 'ámbar'), se define como el fenómeno físico producido por el movimiento y la interacción entre cargas eléctricas positivas y negativas de los cuerpos. Comúnmente se habla de electricidad para referirse a que la corriente eléctrica es una forma energía con aplicaciones tan importantes como iluminación, computación o climatización.

Siglos antes del nacimiento de Cristo, Tales de Mileto descubrió que la magnetita tenía la propiedad de atraer ciertos metales y observó que si frotaba el hierro contra la magnetita, éste adquiría las propiedades magnéticas del mineral: el hierro se imantaba. Pero no ha sido hasta hace unos pocos siglos -XVIII, XIX y XX-, cuando se produjeron los grandes descubrimientos de la historia de la electricidad, primordialmente Ampere, Ohm, Faraday o Maxwell, todos ellos con sus significativas contribuciones en forma de leyes físicas, aunque los que más han contribuido al transporte de electricidad son:

- Thomas A. Edison, inventó la lámpara de cristal de vacío en el año 1879 y, en el año, 1881 se presentó en la Primera Exposición de Electricidad de París como una instalación completa de iluminación eléctrica de corriente continua (DC) que fue inmediatamente adoptada tanto por Europa como por América. En el año 1882, se realizó el tendido de una línea de 2 kV de DC de 50 km entre Miesbach y Munich (Alemania).

- Nikola Tesla, fue un inventor e ingeniero de origen croata, conocido por, en 1888, diseñar y trabajar con el primer sistema de generación y transmisión de corriente alterna (AC) así como el primer motor eléctrico de corriente alterna.

El empleo de la corriente continua se vio desplazado ante el sistema de corriente alterna desarrollado por el ingeniero Nikola Tesla.

2.2. EL TRANSPORTE DE LA ELECTRICIDAD

August Uno Lamm (1904-1989), cuya fotografía se muestra en la figura 4, fue un ingeniero e inventor sueco que está considerado como el padre de la transmisión de energía eléctrica corriente continua de alta tensión, High Voltage Direct Current (HVDC).

En 1929, como gerente del proyecto, él y su equipo desarrollan una válvula de arco de mercurio de alta tensión, que supuso el paso esencial para el crecimiento de la tecnología de DC en altas tensiones.

En el año 1930 se instalaron plantas de investigación en USA y Suecia, donde el Dr. Uno Lamm se convirtió en el máximo responsable de la investigación y del desarrollo de esta tecnología.

Los sistemas AC con los DC se fueron alternando, pero la creciente demanda y la lejanía entre los centros de generación de energía y los consumidores hicieron necesaria la transmisión a largas distancias y bajas

pérdidas en el transporte, siendo la HVDC visto como una solución para estos desafíos.

Se necesitaba una tecnología fiable y económica para la conversión y rectificación de la energía, lo que llevó, durante décadas, al desarrollo de la válvula de vapor de mercurio, allanando el camino de la transmisión de HVDC.



Figura 4. Uno Lamm, padre de la transmisión HVDC.

El primer sistema HVDC se completó en 1954 con la interconexión de la isla de Gotland con Suecia a través de un cable submarino de 98 km de longitud, a una tensión de 100 kV y transportaba 200 A (20 MW). Unos años después con la evolución de la tecnología, se empezaron, en el año 1967, a utilizar tiristores en la transmisión en HVDC, siendo Gotland el primer enlace en aplicar esta tecnología.

En 1970 en USA se puso en servicio el primer enlace de gran longitud, el "Pacific Intertie" que conectaba la región de Pacific Northwest con Los Ángeles con un total de 1362 km y una potencia de 1400 MW a ± 400 kV. Estas instalaciones utilizaban válvulas de mercurio.

De 1972 data la primera conexión asíncrona en “Bel River” conectando Quebec y New Brunswick con una potencia de 320 MW y ± 160 kV. Esta instalación supuso un hito muy importante dado que se produjo la sustitución de las válvulas de mercurio por tiristores.

Hasta el año 2000 la tecnología de los enlaces HVDC utilizaba exclusivamente convertidores conmutados por red (LCC–Line Commutated Converters) con tiristores. A partir de esta fecha el desarrollo de los dispositivos electrónicos de conmutación de alta potencia (IGTB, GTO, etc.) permitió el nacimiento de una nueva tecnología, el HVDC con convertidores auto conmutados (VSC–Voltage Source Converters). Actualmente conviven ambas tecnologías.

Tras pasar la barrera de los 60 años del primer enlace HVDC, la capacidad instalada en el mundo asciende a cerca de 200.000 MW, y cada año se produce un incremento de la potencia instalada, por ejemplo, en 2004, había una potencia instalada de algo más de 70.000 MW.

Los mayores proyectos realizados hasta la fecha son:

- **Mayor capacidad de transmisión** (Jinping-Sunan, China): **7200 MW**, ± 800 kV, 2090 km, año 2013.
- **Enlace más largo del mundo** (Rio Madeira, Brasil): 6300 MW, ± 600 kV, **2375 km**, año 2013.
- **El cable submarino de mayor longitud** (NorNed, Europa): 700 MW, ± 450 kV, **580 km**, año 2008, profundidad de 1485 metros.
- **El cable submarino tendido a mayor profundidad** (Cerdeña–Península Apenina, Italia), 1.000 MW, ± 500 kV, 435 km, año 2011, **profundidad de 1640 metros**.
- **Primera carga en alta mar** (plataforma petrolífera Troll, Noruega): 2 x 42 MW, ± 60 kV, 70 km, **año 2002**.
- **Primer sistema multiterminal** (Québec–Nueva Inglaterra, Canadá): 2.000 MW, ± 450 kV, 1480 km, **año 1992**.

- **El cable subterráneo de mayor longitud** (Murrayling, Australia): 220 MW, ± 150 kV, **180 km**, año 2002.

- **En España existen dos enlaces de HVDC:**

- Interconexión subterránea España-Francia, 2800 MW, ± 320 kV, 64,5 km de longitud, año 2015.
- Interconexión submarina Península-Baleares, 400 MW, ± 250 kV, 237 km de longitud, año 2012.

3. FUNCIONAMIENTO DE LA TECNOLOGÍA HVDC

La corriente continua ("CC" en terminología española y "DC" en terminología inglesa), es la intensidad que atraviesa el conductor, circula en una dirección, frente a la corriente alterna ("CA" en terminología castellana y "AC" en terminología inglesa) que circula por el conductor durante un tiempo en un sentido y después en sentido opuesto, volviéndose a repetir el mismo proceso de forma periódica (senoidal).

La alta tensión en corriente continua ("HVDC" en inglés, High Voltage Direct Current) se denomina a la que se refiere a la generación y transporte de energía eléctrica y que cada vez se está extendiendo más por el mundo.

La descripción más elemental de un sistema de transmisión HVDC es la siguiente:

Comienza el proceso de generación de energía en una central eléctrica, la energía en AC que se ha producido se ajusta mediante un transformador, ésta alimenta al convertidor que opera como rectificador. En la salida del rectificador la energía es ya en DC, independientemente de la frecuencia y fase de la red de AC. Esta energía se transmite por los cables o la red de DC, submarina, subterránea o aérea, hasta otro

convertidor que opera como inversor, y permite a la energía fluir de nuevo por la red de AC del receptor, en la figura 5 se muestra un esquema básico del proceso.

Hoy en día, la transmisión masiva de energía eléctrica se efectúa en AC debido a la sencillez de transformar el módulo de la tensión y el inconveniente en procesar la energía de DC al rectificar las tensiones generadas por las fuentes de AC. Las restricciones medioambientales juegan un fundamental papel en el desarrollo de estos sistemas eléctricos de potencia: en las regiones rurales o para salvar grandes distancias sin obstáculos, suelen emplearse tendidos aéreos; entretanto para zonas urbanas y emplazamientos en las cuales la legislación medioambiental lo requiere, son adecuados los cables de alimentación subterráneos.

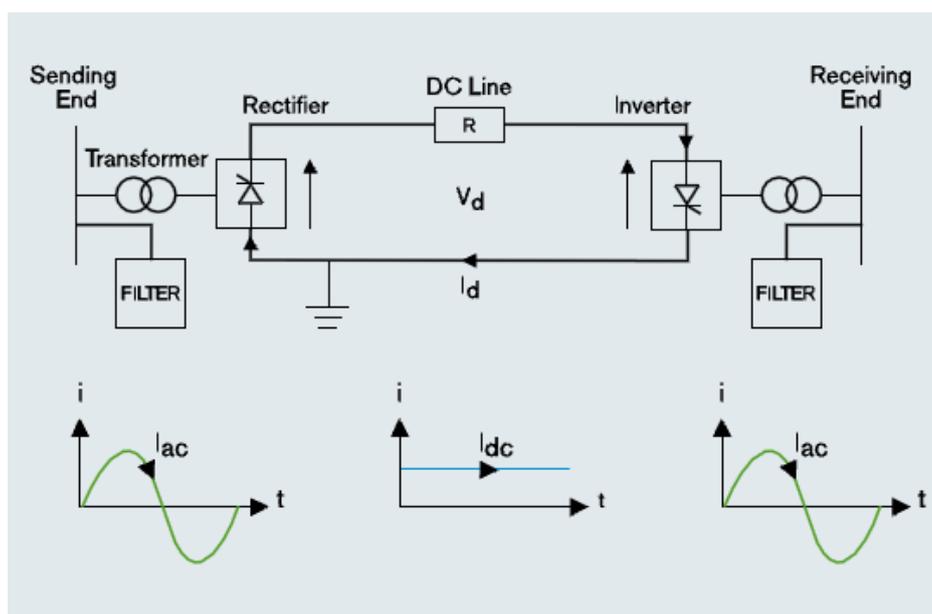


Figura 5. Esquema básico de transmisión HVDC.

La transmisión de corriente continua de alta tensión HVDC requiere de varios elementos, entre ellos, sistemas de rectificadores e inversores, que posibiliten la conexión de estas redes con redes de AC de distintas frecuencias o que posibiliten el asincronismo (tensiones desfasadas). Los

sistemas HVDC con frecuencia se emplean en aplicaciones donde la transmisión en HVAC ("High Voltage Alternating Current") no es técnica, medioambiental o económicamente viable:

- Transporte de potencia en líneas de distancias amplias como el proyecto INELFE para la interconexión eléctrica subterránea a través de los Pirineos entre España y Francia.

- Particularmente, la transmisión de potencia en ambientes marinos o subterráneos, indistintamente de la distancia, como el proyecto RÓMULO, para la interconexión submarina entre la Península Ibérica y Baleares.

- Interconexión de sistemas eléctricos de AC asíncronos.
- Estabilización de líneas en AC.

3.1. COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS HVDC Y HVAC

La transmisión de la energía eléctrica cada vez está cubriendo mayores distancias debido a que la generación con fuentes renovables como la producida en centrales hidroeléctricas, los parques eólicos y los campos fotovoltaicos están limitadas por la localización geográfica y no dejan otra alternativa.

Esta situación ha promovido el desarrollo de las líneas de transmisión en HVDC, permitiendo el desarrollo y la mejora de la eficiencia de las líneas de transmisión que puedan ser instaladas en ambientes especiales. La transmisión se puede hacer de muchas formas, ya sea subterránea, submarina o aérea; en todos estos casos se busca el mínimo daño a la naturaleza y lograr llegar a lugares mucho más remotos.

Actualmente, en el mercado existen tres proveedores primordiales en lo que respecta a sistemas de transmisión de HVDC, los cuales son: ABB,

con HVDC Light basada en la modulación PWM, Siemens, con HVDC Plus que está basada en convertidores multinivel y Alstom con su tecnología HVDC MaxSine.

Desde la aparición del sistema de transmisión HVDC en el ámbito comercial hasta el día de hoy se han ejecutado muchos proyectos a nivel mundial, detallándose en el capítulo 7 los más representativos que se han ejecutado a lo largo del mundo.

Por tanto, a la hora de plantear un proyecto hay que hacer una buena elección entre las dos tecnologías disponibles para sistemas de transmisión teniendo en cuenta los siguientes aspectos: impacto medioambiental, costo del proyecto y aspecto técnico.

3.1.1. Consideraciones técnicas

A la hora de comparar, unas de los aspectos más importantes es el técnico debido a los problemas que pueden surgir en el proceso y por tanto las dificultades que pueden aparecer, en la figura 6 se presenta un esquema básico del proceso de transmisión de potencia en un sistema HVAC.

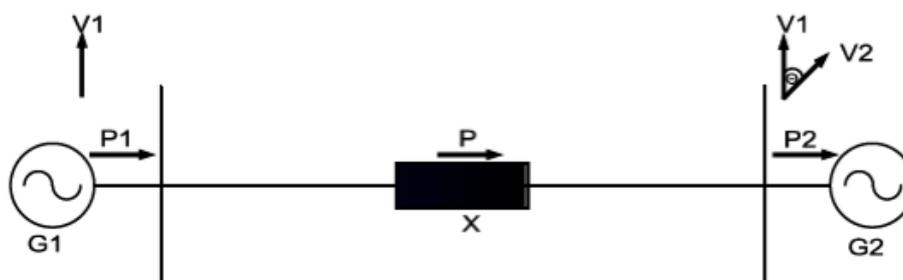


Figura 6. Transmisión de potencia con un sistema HVAC.

3.1.1.1. Estabilidad

La estabilidad de un sistema de energía eléctrica interconectado se define como la capacidad del conjunto de volver al estado de funcionamiento normal tras estar sometido a algún tipo de perturbación.

La potencia activa que se transmite en AC se formula, según:

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \sin \theta \quad (1)$$

donde:

- Las magnitudes U_1, U_2 , son las tensiones en cada lado de la interconexión.
- El ángulo θ es el desfase entre dichas tensiones.
- Y X , la reactancia de la línea.

Al ángulo θ le perjudica la transferencia de la potencia de los sistemas conectados. Si se altera θ lo hace la potencia, con lo cual puede haber sobrecargas de tensión en la línea y haber desplazamientos no deseados de la potencia.

La máxima transferencia de potencia se produce cuando θ es igual a 90° , siendo $P_{m\acute{a}x}$ el límite de estabilidad del sistema y el máximo límite donde la potencia es estable,

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \quad (2)$$

Mayoritariamente, las reactancias en los sistemas de transmisión a larga distancia residen en los transformadores, las máquinas y las líneas regionales o rurales.

De la ecuación general de potencia activa que se transfiere en AC hay que considerar también el parámetro X de la línea que obedece la siguiente expresión:

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (3)$$

La reactancia de la línea es directamente proporcional a la longitud de la línea, con lo cual, en un sistema HVAC la capacidad de potencia a transmitir está limitada, a mayor distancia a cubrir, menor potencia.

En las líneas de transmisión HVDC no encuentra este problema con la reactancia y los límites de estabilidad son superados porque la potencia no está afectada por la distancia, es decir:

$$P = U \cdot I \quad (4)$$

3.1.1.2. Asincronismo

Los sistemas de transmisión HVDC permiten la conexión entre dos sistemas de AC, asíncronos o redes distintas, véase en Japón donde en la zona norte y este de la isla se opera a una frecuencia de 50 Hz y en la zona sur y oeste del país a una frecuencia de 60 Hz, esto permite interconectar sistemas de diferentes frecuencias y no transfiere la inestabilidad de un sistema a otro.

3.1.1.3. Compensación de líneas

En las líneas aéreas de muy larga longitud se hace necesario otorgar a la propia línea potencia reactiva para contrarrestar el exceso de energía que va a demandar y, por ello, debemos instalar subestaciones. Y para compensar la energía reactiva se utilizan baterías de condensadores, que en el caso de líneas submarinas por su alta capacidad las distancias no pueden ser grandes.

3.1.1.4. Control del flujo de potencia

Los sistemas HVDC permiten el control rápido, preciso y de forma segura del flujo de potencia activa entregada a un sistema porque las estaciones convertidores pueden controlarse de manera precisa gracias a la electrónica de potencia.

3.1.1.5. Corrientes de cortocircuito

En AC pueden aparecer problemas de elevadas corrientes de cortocircuito en las redes malladas cercanas a la capacidad de la

aparamenta instalada. Esto se puede resolver con la tecnología HVDC porque no es necesaria la potencia reactiva que es la que contribuye al aumento de la potencia de cortocircuito en el nudo de conexión.

La sensibilidad de la transmisión de AC al balance de potencia, el no poder controlar el flujo de carga sobre las líneas y los límites de estabilidad a las que se ve sujeta debido a que el ángulo de fase puede variar con la distancia y limitar la transferencia de potencia son tres de los factores técnicos fundamentales que hacen al sistema HVDC lucir más atractivo.

3.1.2. Consideraciones económicas

De manera resumida, un sistema de transporte HVDC requiere un convertidor AC-DC, una línea de transporte y otro convertidor DC-AC, y es aquí, en los costos de las instalaciones, donde están las variables más importantes a la hora de comparar y escoger entre una u otra tecnología.

En el análisis, debe tenerse en cuenta el costo total del proyecto que conlleva los costes directos de la instalación (filtros, líneas, transformadores y estaciones convertidor) y los costes indirectos (pérdidas capitalizadas de la línea).



Franja de servidumbre para el caso 500 KV HVAC y ± 500 HVDC para transportar 3000 MW

Figura 7. Torres de transmisión a la misma tensión y potencia transmitida.

Los costes directos son mayores en una instalación HVDC:

- Para la misma cantidad de potencia, en las líneas de transporte DC constan únicamente de dos conductores, luego requiere menor número de cadenas de suspensión y el corredor de paso más estrecho, frente a las líneas AC que constan de tres conductores, es decir, un 33% menos en HVDC que en HVAC.

- Se emplean torres más reducidas y más compactas, menor número de aisladores en el transporte de HVDC como se muestra en la figura 7.

- Es necesaria y obligatoriamente la conversión a DC, porque la energía eléctrica se produce generalmente en AC (máquina síncrona), en las estaciones convertidores y éstas tienen precios significativamente elevados que determinan que no sea rentable un proyecto en HVDC frente a otro en HVAC; hasta que las pérdidas de éste último se vuelven lo suficientemente considerables como para que al sumarlas en el proyecto de HVAC salga más caro que si se ejecutara el proyecto en HVDC; técnicamente depende de una distancia a tener en cuenta.

Los costes indirectos se dan por las pérdidas en la línea que son superiores en AC que para DC, en función de la longitud de la línea, existe una longitud que se denomina "longitud crítica", en la cual a partir de ésta, es más conveniente emplear el sistema HVDC porque ya es más rentable que el sistema HVAC. En gran parte esto se debe a que en las líneas de DC no existen pérdidas por reactancia como sí las posee las líneas de transmisión en AC. Debido a todo esto las pérdidas capitalizadas en la línea de HVAC son:

- Para las líneas aéreas la longitud crítica puede variar un rango entre 400 y 700 km. El costo total de la línea a partir de esta longitud crítica en DC es menor que en AC.

- La longitud crítica, si el proyecto se realiza por cable subterráneo o especialmente en conexiones submarinas, disminuye bastante en comparación con las líneas aéreas. En este caso, las pérdidas en AC son mayores que en DC a partir de 40 km, por las corrientes inductivas extremas de la línea que originan elevadas pérdidas o incluso llevan a los cables a su límite térmico.

- Como sólo hay dos cables en DC habrá un 33% menos de pérdidas por resistencia de los conductores en HVDC.

- El efecto pelicular en DC es inexistente sólo se produce en AC. Este fenómeno provoca que la densidad de corriente se concentre en la superficie exterior, ver figura 8, lo que origina el aumento de la resistencia del conductor y haya más pérdidas en la línea, conforme aumenta la frecuencia. En DC la densidad de corriente es similar en todo el conductor.

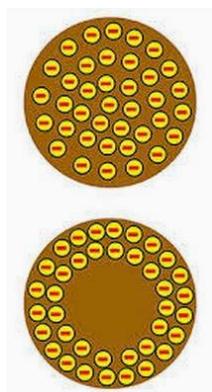


Figura 8. Efecto pelicular. En la parte superior en DC, en la inferior en AC.

En la figura 9, se puede observar que el costo de las estaciones de conversión y del HVDC es elevado, pero este se ve compensado por las bajas pérdidas que se dan en dicho sistema.

Genéricamente, hay unas pérdidas en el transporte de alrededor del 3% por cada 1000 km, más un 1% en la conversión AC/DC e inversión DC/AC.

En general, los costes directos en los sistemas HVDC van a ser más alto debido al costo inicial de las instalaciones, preferentemente, estaciones convertidores, pero esto se compensa con los menores costes en las líneas de transmisión y las pérdidas capitalizadas en la tecnología HVDC, sobre todo en proyectos donde las pérdidas son considerables y la distancia sea larga.

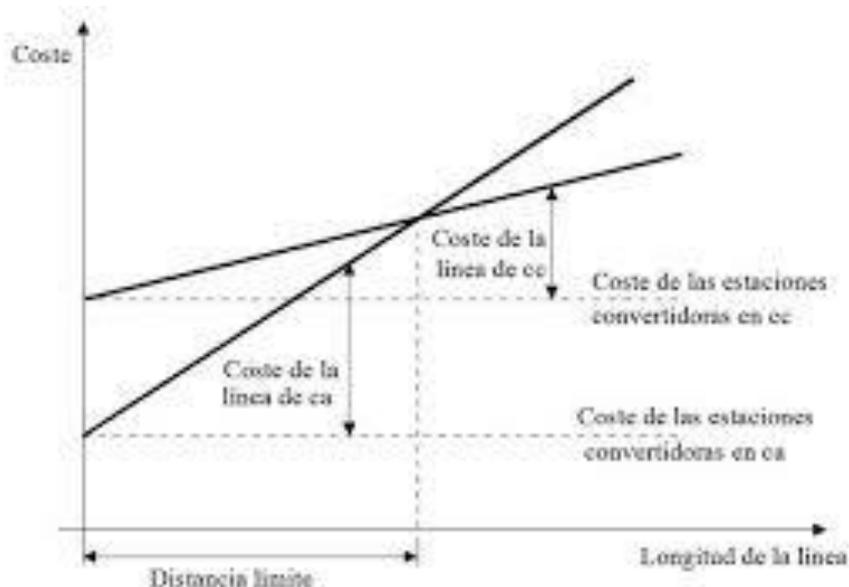


Figura 9. Costo vs Distancia en HVAC y HVDC para la misma potencia.

3.1.3. Consideraciones medioambientales

Los principales efectos medioambientales al instalar un sistema de transmisión HVDC que han de tenerse en cuenta, se relacionan con el campo electromagnético, el efecto corona e iónico que producen ruido audible, generación de ozono e interferencias radiofónicas y el impacto visual. El campo eléctrico ubicado en los alrededores de las líneas HVDC, es creado generalmente por las cargas eléctricas en los conductores y, en

el caso de las líneas aéreas de HVDC, por las cargas del aire ionizado que rodea al conductor. La ionización del aire que se produce en HVDC ocasiona nubes que se desplazan como consecuencia del viento y estar en contacto con el ser humano, plantas y animales sin producirles efectos nocivos porque es de magnitud similar al campo eléctrico bajo nubes de tormenta.

- Al utilizar menor número de conductores, (generalmente dos conductores), se requiere de una menor resistencia mecánica en las torres, por tanto, torres más esbeltas y menor necesidad de franja de servidumbre en los sistemas HVDC, que implica menos terreno ocupado por las líneas y disminución de impacto visual.

- El campo magnético alrededor de las líneas de transmisión es casi igual al que produce la Tierra de manera natural, cerca del 40 microteslas, por esta razón no es preocupante.

- Aparece el efecto corona por la ionización del aire alrededor del conductor por culpa de los altos niveles de tensión en la línea, que puede provocar generación de ozono (similar al que se produce en los procesos naturales), interferencias de radio frecuencia y ruido audible. Estos efectos pueden ser reducidos con el uso adecuado de filtros.

- Los sistemas HVDC produce menor efecto corona que las líneas de HVAC luego genera menor ozono y no se emplearan tantas medidas como en HVAC para reducir dicho efecto. Los sistemas HVDC producen 10 ppb por encima de la concentración natural de ozono en el aire limpio.

Estos argumentos señalan que la tecnología HVDC respeta más el medio ambiente que la HVAC.

Estos argumentos ayudan a entender que el transporte en HVDC es más compatible, a menudo, con el medio ambiente que el sistema HVAC, aunadas al auge de los costos de los combustibles fósiles en los últimos años, ha provocado que la industria del servicio eléctrico tenga un

desarrollo muy sustancial en el número de sistemas de HVDC que se están proyectando.

3.2. CONFIGURACIONES DEL SISTEMA HVDC

La tecnología HVDC proporciona diversos servicios en función de las posibilidades y objetivos del proyecto.

3.2.1. Punto a punto

Configuración más frecuente de todas las posibles de HVDC y se aplica en la interconexión de dos subestaciones que no es admisible la tecnología HVAC. Regularmente, sus principales aplicaciones son: conexiones submarinas (parques offshore, plantas petrolíferas, etc.) y para enlazar regiones insulares (cargas aisladas) con continentes. Una de las estaciones ejercerá de rectificador y la otra estación de inversor conforme quien suministre o quien reciba la energía.

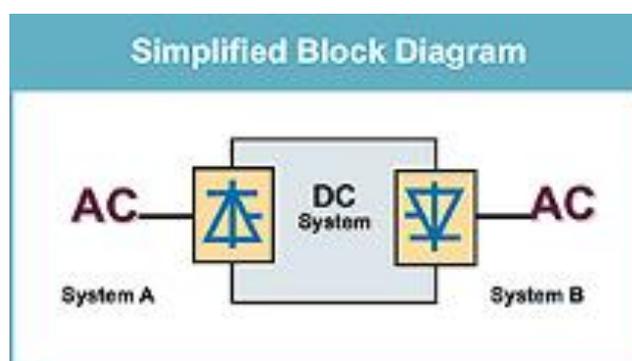


Figura 10. Configuración back to back.

3.2.2. Back to back

Esta configuración, mostrada en la figura 10, se utiliza en la conexión de dos sistemas asíncronos o síncronas para estabilizar las redes donde la conexión se realiza en la misma subestación y no es necesaria una línea

de transmisión porque los equipos inversores y rectificadores están localizados en la misma instalación.

3.2.3. Multiterminal

Esta configuración se considera cuando se conectan tres o más subestaciones a un sistema HVDC. Existen tres tipos de configuraciones multiterminales:

- **Paralela:** las subestaciones están conectadas a la misma tensión. Se usan cuando todas las subestaciones superan el 10% de la potencia total de las estaciones rectificadoras se puede ver su esquema en la figura 11.

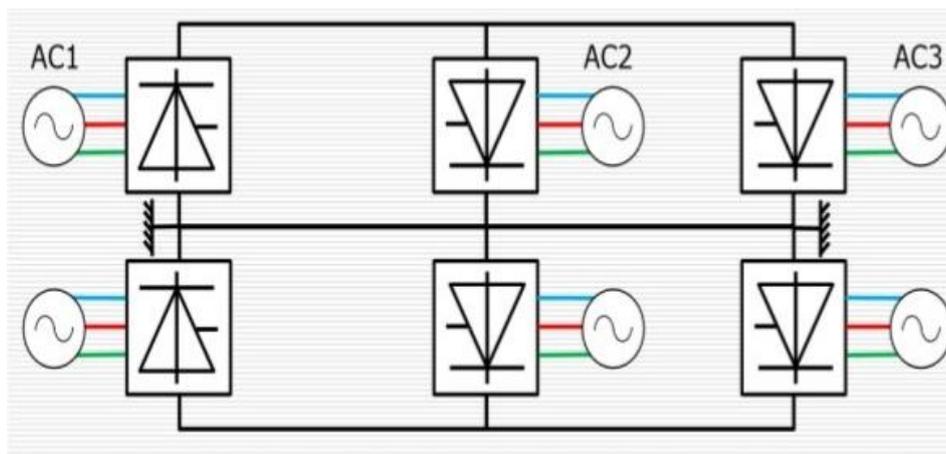


Figura 11. Configuración multiterminal en paralelo.

- **Serie:** las subestaciones están conectadas en serie y cada una a una distinta tensión. En este caso, cada subestación en serie no puede consumir más del 10% de la potencia total de las estaciones rectificadoras, con el problema de que si una consume más afectaría al nivel de tensión que llega a las otras subestaciones.

- **Mixta:** permite la combinación de conectar las subestaciones tanto en serie como en paralelo.

3.2.4. Unitaria

Esta configuración se emplea cuando la transmisión DC se lanza desde el punto de generación de energía. Da igual la frecuencia ya que el inversor al final de la línea entrega a la red a la frecuencia necesaria. Se utiliza principalmente en centrales eólicas o hidroeléctricas.

3.3. CLASIFICACIÓN DE LAS CONEXIONES HVDC

Los sistemas HVDC posibilitan una variedad de conexiones para utilizar según las aplicaciones del proyecto que se esté planificando.

3.3.1. Monopolar

Este tipo de enlace consta de dos estaciones de conversión únicamente unidas por un cable para transmitir la energía eléctrica, generalmente el cable tiene polaridad negativa porque el efecto corona es menor comparado a usar polaridad positiva, como se puede ver en la figura 12 . El retorno se realiza conectando las estaciones de conversión, a tierra o mar (si es un proyecto submarino) mediante electrodos que hacen la función de ánodo y cátodo, o según la característica del proyecto el retorno puede ser con un conductor metálico si existen problemas medioambientales, preocupación por la corrosión en los electrodos o trabas por las interferencias debidas a los armónicos.

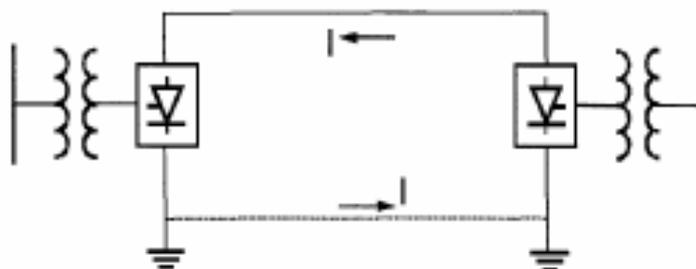


Figura 12. Enlace Monopolar.

- Se aplica cuando los sistemas conectar están separados por distancias muy grandes o con sistemas donde la conexión del cable de retorno supone un ahorro cuantioso y/o en sistemas submarinos, ya que el mar efectúa la función de retorno o cuando en un enlace bipolar no se puede utilizar una de las fases.

- Este sistema ronda una potencia máxima de 1500 MW y es el más sencillo y económico de todos los sistemas.

3.3.2. Bipolar

Este tipo de enlace conecta las estaciones de conversión por dos conductores, se puede apreciar en la figura 13, uno de corriente positiva y otro de corriente negativa, las tensiones son simétricas respecto a tierra, es decir, este enlace está formado por dos sistemas monopoles independientes que ejercen las veces de polo positivo y negativo.

Principalmente se utiliza cuando un único polo no cumple la demanda de potencia o lo que es lo mismo, que se supere la capacidad de un enlace monopolar.

Además, los enlaces bipolares otorgan más fiabilidad al sistema, ya que en caso de fallo o avería de una de las líneas puede seguir transportando a más 50% de la potencia total en función de los criterios de explotación.

Dentro del enlace bipolar, en función de cómo se coloque la puesta a tierra, con un cable de retorno conectado entre ellos o mediante electrodos, se presentan diversas variantes:

- Bipolar con retorno por tierra, la más común en el enlace bipolar, dota de flexibilidad a la línea cuando hay una avería o un fallo. Como transfieren el mismo valor de potencia cada uno el sistema está equilibrado. Los fallos de este enlace pueden dar lugar a un enlace monopolar con retorno metálico o sin retorno metálico

- Bipolar con retorno metálico, siendo similar al anterior salvo que el retorno se hace por medio de un conductor, como gran diferencia, y se utiliza en distancias de transmisión cortas.

- Bipolar sin retorno, tiene un menor coste inicial que cualquiera de los otros dos, su principal característica es que no va a trabajar si hay fallo en uno de los dos conductores pero sí si lo que falla es el algún convertidor.

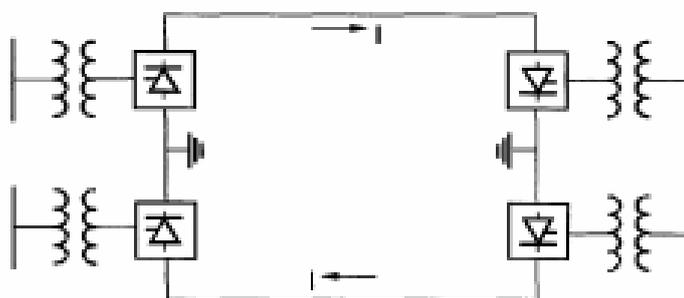


Figura 13. Enlace Bipolar.

3.3.3. Homopolar

Este tipo de enlace consta de dos conductores con la misma polaridad negativa, por el hecho de ser las pérdidas en el efecto corona inferiores que si la polaridad fuese positiva, por lo tanto la corriente que circula por el retorno es el doble de la que circula por uno de los conductores. El retorno se realiza a través del terreno, puede ser mediante electrodos o un conductor metálico o por tierra, según aspectos técnicos o medioambientales, en la figura 14 se ilustra el enlace homopolar.

Pese a ser más barata que los otros enlaces tienen la desventaja de que como al corriente que circula por el retorno es alta, el coste del cable es mayor por sus dimensiones.

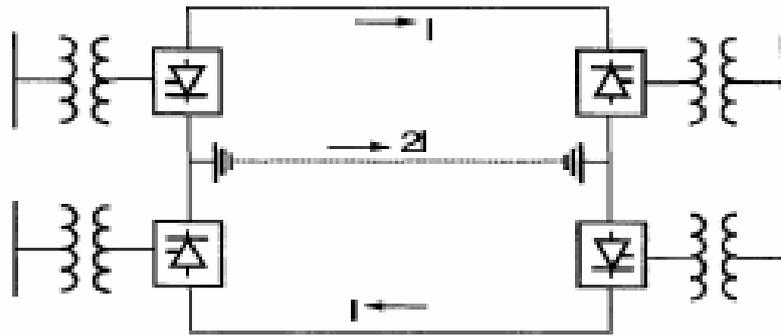


Figura 14. Enlace Homopolar.

4. COMPONENTES DE LA TECNOLOGÍA HVDC

En esencia, la transmisión en AC es similar a DC, por la salvedad de los rectificadores e inversores, como se detalla en la figura 15, que propicia la necesidad de más filtros para los armónicos, por tanto, los principales elementos para realizar este doble proceso son:

- Rectificadores (convertidores AC/DC) e inversores (convertidores DC/AC).
- Transformadores de conversión.
- Filtros de AC y de DC y baterías de condensadores.
- Líneas de transporte.

4.1. TRANSFORMADORES DE CONVERSIÓN

El objetivo que tienen los transformadores de conversión es adaptar la tensión alterna que llega a la entrada de los rectificadores para que al realizar la operación haya la tensión en continua requerida. Por otra parte, también proporciona el aislamiento necesario entre la red y los rectificadores. Habitualmente, se instalan dos grupos de transformadores

(convertidores de 12 pulsos) desfasados 30 o 50 grados eléctricos conectados uno de los transformadores en estrella / estrella y el otro en estrella / triángulo, para reducir las interacciones armónicas. Los transformadores, tanto en el recepción y envío de extremo están equipadas con control de cambiador de tomas, en la figura 16 se muestra un transformador de la compañía Siemens.

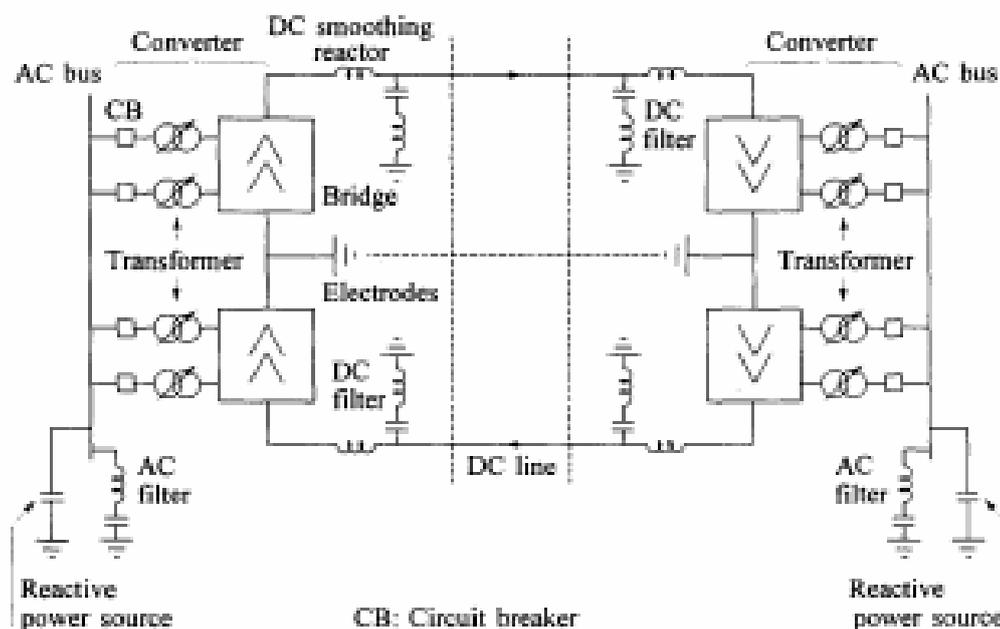


Figura 15. Esquema de los componentes de un sistema bipolar HVDC.



Figura 16. Transformador Siemens.

Estos transformadores se diseñan para adecuarse al enorme contenido de armónicos generados por los convertidores sin llegar a sobrecalentarse. Por otra parte, su diseño debe soportar la premagnetización continua del núcleo, el calentamiento debido a los armónicos y el ruido. Se diferencia de los transformadores HVAC en el aspecto debido a la altura y longitud de los contactos, necesarios para alcanzar las torres de válvulas que suelen estar suspendidas del techo, por ello, el depósito de aceite se encuentra a una altura considerable. Y otro aspecto distinto es que el montaje de la ventilación y el radiador, están en el lado opuesto a los contactos para facilitar el cambio del transformador.

4.2. CONVERTIDOR (RECTIFICADORES E INVERSORES)

Los convertidores son dispositivos de electrónica de potencia que realizan la rectificación AC / DC y la inversión DC / AC. Los dispositivos electrónicos básicos que forman los convertidores modernos son los tiristores. Los puentes de válvulas constan de válvulas de alta tensión

conectados en una disposición de seis o doce pulsos, un ejemplo de un rectificador de doce pulsos se especifica en la figura 17. Las señales de disparo de la válvula se generan en el control del convertidor en la planta potencial y se transmiten a cada tiristor en la válvula.

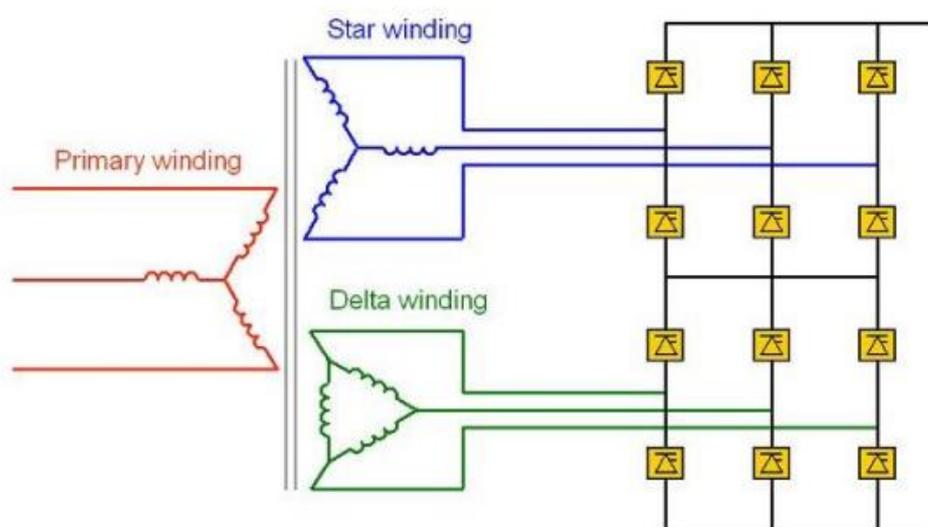


Figura 17. Conexiones del transformador en YY y Y Δ seguido de rectificador de doce pulsos.

4.3. FILTROS

Los convertidores generan un alto contenido de armónicos, debido a ello, es necesaria la instalación de filtros tanto en el lado de AC como en el de DC. Existen varios problemas asociados a los armónicos:

- Interferencia telefónica.
- Sobretensiones por la resonancia.
- Pérdidas de potencia y calentamiento de las máquinas y capacitores conectados al sistema.

Los filtros sirven para dos propósitos en los sistemas HVDC:

-
- Reducen las tensiones e intensidades armónicas en el sistema de alimentación AC.
 - Proporcionan la potencia reactiva necesaria para el sistema HVDC.

4.3.1. Filtros de AC

Los filtros de AC que se colocan entre la entrada o salida de cada convertidor y el sistema AC, cumplen dos funciones:

- Se encargan de absorber los armónicos que pueden introducirse a la red, generados por los convertidores. Esto previene de que formas de onda y armónicos indeseados acaben filtrándose a la red de AC. Además previene de interferencias telefónicas generadas por las líneas aéreas.
- Proporcionan una parte de la potencia reactiva necesaria para el proceso de conversión.

El orden de los armónicos depende del tipo de convertidor, por ejemplo, los rectificadores de 12 pulsos generan armónicos de orden $12n \pm 1$, siendo n el orden del armónico. Estas son las condiciones normales de funcionamiento ideal, pero en condiciones anormales de funcionamiento de la estación, como en asimetrías u otros defectos de señal, se producen armónicos no característicos como los de 3er orden que también deben filtrarse.

Estos filtros pueden ser de primer, segundo o tercer orden, con frecuencias de resonancia entre 3 y 24 Hz. Los filtros pasivos pueden ser complementados con filtros activos, controlados electrónicamente, que llegan a eliminar hasta armónicos de orden 50 si es necesario.

Estos filtros deben cumplir una serie de requisitos:

- Tasa de distorsión armónica de tensión, cociente entre el valor eficaz de la componente armónica y el valor eficaz de la componente fundamental de la tensión.

$$HD_k = \frac{U_k}{U_1} \leq 1\% \quad (5)$$

- Tasa de distorsión armónica total de tensión, cociente entre el valor eficaz del conjunto de las componentes armónicas y el valor eficaz de la componente fundamental de la tensión.

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{50} HD_k^2} \leq 1\% \quad (6)$$

- Factor de influencia telefónica, que representa el nivel de interferencia de los distintos armónicos producidos sobre la red telefónica.

Principalmente, se conectan los filtros en paralelo, porque en serie pueden ser recorridos por la intensidad nominal, con las pérdidas que ello acarrea y teniendo que estar preparados para soportar las sobreintensidades y las sobretensiones sobre la red, con lo cual todos los elementos del filtro deberían tener el aislamiento nominal, lo que encarece mucho los elementos. Por ello las conexiones en paralelo de los filtros son más fiables.

4.3.2. Filtros de DC

Los filtros de DC tienen por objetivo reducir el componente AC de la señal continua que se desea obtener. Básicamente, son filtros para filtrar armónicas de varios órdenes. La configuración de los filtros DC es muy semejante a la de los filtros AC. Durante su diseño se tiene en cuenta las interferencias sobre líneas telefónicas cercanas. Se conectan en paralelo con la línea DC.

4.3.3. Batería de condensadores

Se colocan en paralelo en el lado de AC del para compensar el exceso de energía reactiva para mantener el nivel de tensión en el convertidor. Estos se conectan o desconectan automáticamente mediante interruptores y pueden hacer las veces de filtros de armónicos. Todos los bancos de condensadores tienen la misma función en una instalación, compensar el factor de potencia y controlar la energía reactiva.

La diferencia, en los proyectos de la tecnología HVDC, es la necesaria utilización del rectificador como del inversor, esto va a hacer que la compensación de potencia reactiva esté relacionada con el proceso de conversión, es decir, los ángulos de disparo y extinción.

4.4. REACTANCIA DE SUAVIZADO

La reactancia de suavizado o smoothing reactor, mostrada en la figura 18, se la coloca en serie con cada polo en el lado DC del convertidor, se encarga de:

- Atenuar el rizado a la salida del convertidor, eliminando los armónicos de alta frecuencia.
- Limitar la corriente de cortocircuito.
- Prevenir fallos de conmutación en los inversores.
- Eliminar la resonancia en el lado de DC.
- Reducir las interferencias telefónicas.



Figura 18. Smoothing Reactor de aire de Siemens.

4.5. LÍNEAS DE TRANSPORTE

Los cables de transmisión de DC se fabrican de un polímero especial de poco peso, muy flexible y unas condiciones mecánicas especiales. Estos cables tienen las mismas características, independientemente de la tipología, pero sí del entorno, como cables submarinos. En el caso de configuración back-to-back no se conectan cables de DC al no ser necesaria la transmisión en distancia.

Realmente, si comparamos los cables empleados en los sistemas HVAC y los sistemas HVDC las diferencias en cuanto construcción son mínimas. Donde realmente es notable la diferencia es en los fenómenos que pueden afectar a los conductores dependiendo si trabajan en AC o DC.

- La capacidad parásita de los conductores aparece en las líneas de AC cuando se alcanza la intensidad nominal a los 50km con 400 kV y a los 80 km con 220 kV. En cambio, en DC este problema no existe en el funcionamiento normal de la instalación. Únicamente, aparece cuando la línea es puesta en marcha o es desconectada. A pesar de que no influya directamente existe un problema, y es que a esta capacidad le añadimos el smoothing reactor de los sistemas HVDC, se forma una estructura RLC en serie, donde si hay armónicos que no se han filtrado, podría entrar en resonancia. Por este motivo la frecuencia de resonancia no debe coincidir con la frecuencia de red ni con el segundo armónico.

- El efecto pelicular, en AC provoca que la densidad de corriente se concentre en la superficie exterior, esto causa que aumente la resistencia del conductor y haya más pérdidas en la línea, aumenta con la frecuencia, este efecto tiene importancia y hay que tenerlo en cuenta. En DC no aparece, siendo más específicos, puede aparecer en los casos en los que se filtren corrientes armónicas o en el caso de periodos transitorios que oscilen.

- Pérdidas dieléctricas y el envejecimiento de los aislantes y los materiales dieléctricos se produce en los sistemas HVAC por el continuo cambio de polaridad al que están sometidos estos materiales. Por lo tanto, en los sistemas HVDC no es patente y además permite aumentar los campos eléctricos con el mismo aislante para el caso de DC.

- Fuerte dependencia con la temperatura, en los cables de los sistemas HVDC con respecto a los materiales aislantes.

4.5.1. Tipo de cable

4.5.1.1. Líneas Aéreas

Las líneas aéreas de un sistema HVDC presentan una serie de ventajas frente a las de transporte HVAC. Una de ellas es el tamaño de las torres. El número de líneas de un sistema HVDC es menor de 2 líneas frente a de un sistema HVAC que es de 3 líneas, si bien la distancia entre líneas debida a la tensión es superior en los sistemas HVDC por $\sqrt{3}$. Esta diferencia en la distancia entre líneas se debe a que AC depende de la tensión entre las fases y DC a la tensión entre fase y tierra. El resultado son unas torres de menor tamaño y menor necesidad de servidumbre.

Es en los aisladores donde las líneas de DC presentan problemas, ya que acumulan una mayor cantidad de residuos en su superficie por el sentido unidireccional de la intensidad.

4.5.1.2. Líneas Subterráneas y Submarinas

Las líneas subterráneas y submarinas tienen diferentes tecnologías, actualmente los cables soportan unas capacidades de hasta 800 MW y 500 kV, aunque algunas tecnologías son comunes a las de AC.

Cable de papel impregnado (MI Mass Impregnated): es el tipo de cable más empleado en transmisiones de HVDC. Se fabrica con un conductor central de cobre laminado, alrededor se recubre por capas de papel impregnado en aceite y resinas formando un componente aislante de alta viscosidad. Después, el cable es cubierto por unas capas de

polietileno extruido y acero galvanizado que lo protege de la corrosión y contra las deformaciones mecánicas durante su funcionamiento. También, suele reforzarse con una capa de plomo para mantener aislado el medio ambiente de los componentes aislantes del papel impregnado, se muestra en la figura 19.



Figura 19. Cable MI.

Este cable es el único que se ha instalado a una profundidad de 1000 m en el enlace Italia – Grecia, 500 MW a 400 kV. Y, este cable, puede soportar una tensión de 500 kV y potencia de 800 MW, aunque su capacidad está limitada por la temperatura que puede alcanzar el conductor pero no tiene límite alguno por su longitud.

Cable refrigerado por aceite (OF Oil Filled): pese a ser un tipo de cable igual que el MI, el OF Oil Filled emplea un papel impregnado de menor densidad y un aceite de baja viscosidad. Además, el cable está recorrido por un conductor longitudinal en el eje del conductor donde circula un aceite refrigerante. Este conducto de refrigeración puede alcanzar una longitud de 100 km de longitud por lo costoso que es bombear el líquido refrigerante y el posible riesgo de fugas, de profundidad no tiene límite alguno, se presenta en la figura 19.



Figura 20. Cable OF.

Cable de polietileno reticulado o XLPE (Cross - Linked Polyethylene): el conductor de este cable está constituido por hilos de cobre aislado a base de capas de polietileno reticulado. Este material permite una temperatura de trabajo de 90 °C y de hasta 250 °C de cortocircuito, en la figura 21 se detalla el cable XLPE trifásico y monofásico. El cable se emplea en conexiones HVDC con generación o consumos de altamar, porque puede trabajar a tensiones de 300 kV y secciones de hasta 3.000mm².



Figura 21. Cable XLPE trifásico y monofásico.

Cable PPLP (Polypropylene Laminated Paper): este cable emplea un aislamiento formado por capas de papel y propileno laminado con objeto de disminuir las pérdidas dieléctricas. Como tiene un comportamiento térmico superior al papel impregnado que resulta una mayor capacidad de transporte, se utiliza en HVDC, se muestra el cable PPLP en la figura 22.



Figura 22. Cable PPLP.

Extruido para VSC: debido al desarrollo de la tecnología VSC y para superar las limitaciones de los cables extruidos se crean cables plásticos que combinan un bajo peso y potencias elevadas con una gran capacidad para trabajar a grandes tensiones en DC, se presenta en la figura 23.

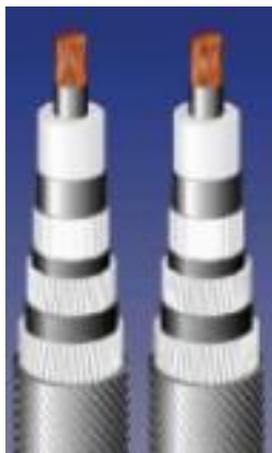


Figura 23. Cable extruido VSC.

4.6. INTERRUPTORES

Los interruptores posibilitan a los rectificadores e inversores operen en sus distintas formas para que el sistema funcione. Se fabrican con atmósfera SF₆ y se conectan en paralelo con filtros encargados de absorber los transitorios creados en la apertura y cierre de los interruptores. Existen diferentes tipos de interruptores:

- HSNBS (High – Speed Neutral Bus Switch).
- HSGS (High – Speed Ground Switch).
- MRTB (Metallic Return Transfer Breaker).
- GRTS (Ground Return Transfer Switch).

5. TECNOLOGÍA HVDC

A lo largo de los últimos años se ha mejorado y progresado en el ámbito de las tecnologías, en el caso de la transmisión HVDC, los cables y, principalmente, la electrónica de potencia. A continuación se presentan las principales tecnologías dominantes en la actualidad.

5.1. LCC (LINE COMMUTATED CONVERTERS)

LCC es la tecnología tradicional de los sistemas HVDC. La primera aplicación comercial fue hecha entre Gotland y la península de Suecia en el año 1954. Primordialmente, la tecnología LCC, convertidor conmutado por línea, se fundamenta en que emplean convertidores de potencia, válvulas, basadas en tiristores, en la figura 24 se expone el esquema de la tecnología LCC.

La configuración suele ser con un rectificador de 6 pulsos controlado mediante tiristores que son dispositivos semicontrolados que solo permiten controlar el momento de disparo, el apagado se realiza con el paso por cero de la tensión.

Empiezan a conducir cuando la tensión ánodo - cátodo es positiva y este tipo de semiconductores tienen como inconveniente que solo permiten controlar el encendido, no su corte, por lo cual es posible únicamente controlar la potencia activa y no la reactiva. Por tanto, se necesita disponer de compensadores estáticos (SVC) o de bancos de condensadores para suministrar la reactiva demandada por la estación en líneas muy largas.

La intensidad debe circular siempre en un mismo sentido a través de los tiristores, lo que implica que para cambiar el sentido del flujo de potencia, la polaridad de la tensión en el lado de continua de los convertidores debe cambiar.

Estos sistemas, dado que los tiristores pueden soportar grandes intensidades y tensiones, tienen una capacidad de transmisión de potencia 1.200 MW con una tensión de ± 500 kV, aunque Siemens con su tecnología UHVDC ha logrado alcanzar ± 800 kV y una capacidad de transmisión de potencia 1.600 MW.

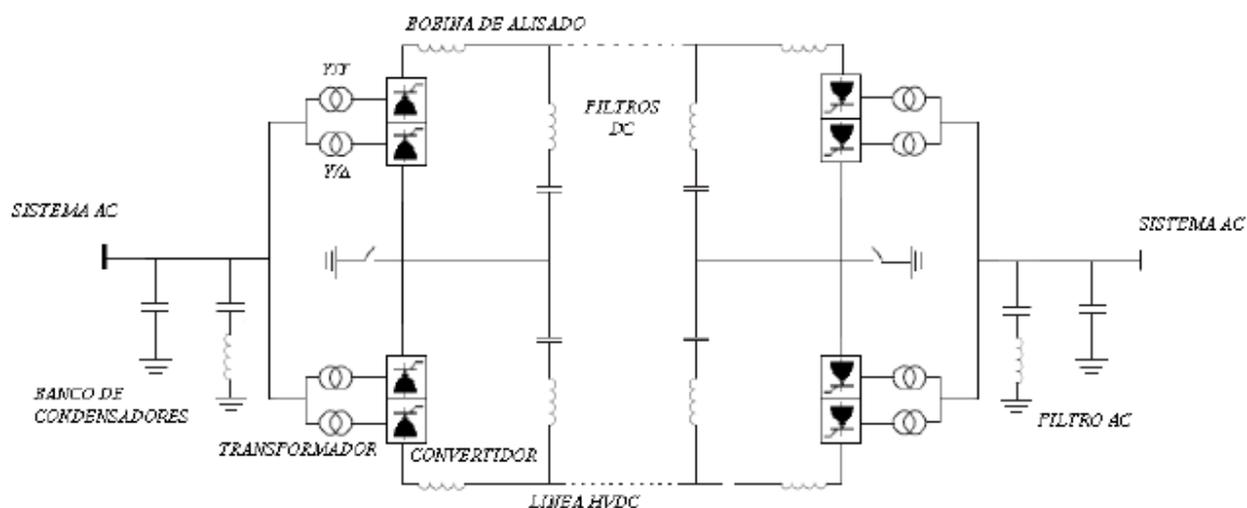


Figura 24. Tecnología HVDC - LCC.

5.1.1. Componentes de HVDC – LCC

5.1.1.1. Convertidor

Los convertidores son tiristores que pueden trabajar a altas intensidades y tensiones, pueden actuar tanto como rectificadores como inversores. Los tiristores por su característica de poder trabajar a altas tensiones e intensidades pueden ser controlados con más facilidad

El convertidor hace uno años era de seis pulsos (rectificador trifásico en puente) que genera armónicos de orden $6n \pm 1$ en el lado de alterna y de orden $6n$ en el de continua. Aunque a medida que han pasado los años y la tecnología ha evolucionado el convertidor cambia a doce pulsos. La conexión sería de doce válvulas repartidas en dos convertidores de seis pulsos con lo que el rizado de la onda de la zona de continua es inferior. Se generan armónicos del orden $12n \pm 1$ en el lado de alterna y del orden $12n$ en el lado de continua, con lo que se reduce la tasa de distorsión armónica y se estabiliza la onda de salida si se compara con el rectificador de seis pulsos.

5.1.1.2. Transformador

El objetivo de los transformadores es adecuar el nivel de la tensión alterna, en la entrada del rectificador para que éste dé un valor concreto de tensión en su salida en la zona de DC y en la salida del inversor para la zona que haga falta de la zona de AC.

Son muy utilizados los convertidores de doce pulsos con transformadores en estrella/estrella y estrella/triángulo porque eliminan los armónicos de corriente 5° y 7° del lado de AC y el 6° armónico de DC y ocurre por el desfase producido por los transformadores en las corrientes. Generalmente los convertidores de doce pulsos la configuración de los transformadores es: los dos primarios en estrella y los secundarios uno en estrella y otro en triángulo. En el caso de conexión bipolar un convertidor con transformador estrella-triángulo y otro con transformador estrella-estrella.

5.1.1.3. Filtro de AC

Los filtros de AC se colocan antes de los transformadores de los rectificadores y posterior a los transformadores de los inversores, así se eliminan los armónicos de corriente producidos por el inversor. Para amortiguar el efecto de los armónicos en el lado de alterna se emplean filtros sintonizados (con los armónicos 11^o y 13^o) y filtros pasa-altos que ofrecen un camino de baja impedancia a las corrientes armónicas. El número de filtros que se necesitan en los sistemas LCC son superiores que en los sistemas VSC, porque los convertidores consumen potencia reactiva y estos filtros también cumplen la función de generar dicha potencia.

5.1.1.4. Filtro DC

Los filtros de DC se colocan en la línea de DC y sirven para reducir el rizado de la tensión DC porque producen interferencias en las telecomunicaciones cercanas. Al igual que en el lado de CA se emplean filtros sintonizados con un determinado número de armónicos, así como filtros pasa-bajos

Cuando se emplea la configuración "back-to-back" o la conexión es una línea subterránea, estos armónicos quedan apantallados y es posible prescindir de estos filtros.

5.1.1.5. Bobina de choque

Al principio y fin de la línea de DC se coloca una reactancia de suavizado, se la conoce como smoothing reactor y es una reactancia inductiva. Tiene como objetivo: prevenir la resonancia y reducir las corrientes armónicas.

5.1.1.6. Condensadores en paralelo

En transmisiones HVDC - LCC, se consume energía reactiva de aproximadamente el 60% de la energía activa que se está transmitiendo. Los condensadores en paralelo que se instalan en el lado de AC del convertidor, suministran la energía reactiva necesaria para mantener el nivel de tensión en el convertidor. Estos se conectan o desconectan

automáticamente mediante interruptores y pueden hacer las veces de filtros de armónicos.

5.1.1.7. Cable

Los cables en DC utilizados tienen las mismas características, solo difieren en si son utilizados como cables aéreos o submarinos. En el caso de configuración "back-to-back" no se conectan cables de DC al no ser necesaria la transmisión en distancia.

5.2. VSC (VOLTAGE SOURCE CONVERTERS)

VSC es la reciente tecnología en los sistemas HVDC. La primera aplicación comercial ha sido diseñada en Gotland en el año 1954, pero no ha sido hasta el año 2010 cuando Siemens la lanzó al mercado.

Esta tecnología se basa en los convertidores VSC que están formados por IGBTs con modulación PWM. Una característica importante es el gran control de la potencia reactiva que se transmite, ya que esto es imposible en otras configuraciones, en la figura 25 se presenta el esquema de la tecnología VSC.

Los convertidores son autoconmutados y no requieren de tensión alterna, es decir, se puede controlar tanto en encendido como el apagado del dispositivo sin ayuda de una fuente de tensión adicional.

Pese a no llegar al nivel de desarrollo que muestra la tecnología HVDC - LCC en lo referido a niveles de tensión o capacidad de transmisión de potencia, sí presenta una serie de cualidades destacadas que lo hacen especialmente atractivo para el transporte eléctrico, como son:

- Al no necesitar potencia reactiva ni tensión alterna permite alimentar redes pasivas.
- Generación o consumo de energía reactiva.
- Sistemas de transmisión HVDC subterráneos o submarinos.

- Suministro de parques eólicos offshore.
- Alimentación eléctrica de núcleos urbanos y sistemas multiterminal.

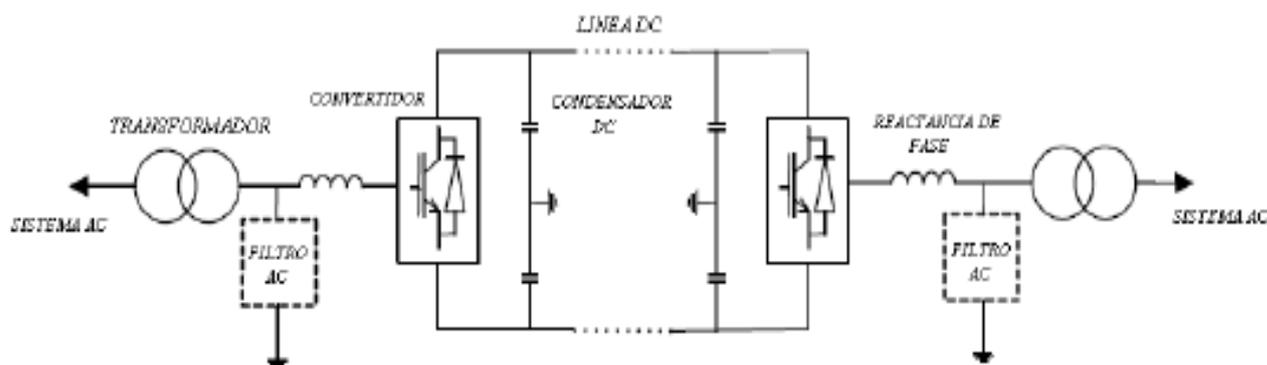


Figura 25. Tecnología HVDC-VSC.

5.2.1. Componentes de HVDC - VSC

5.2.1.1. Convertidor

El principio de funcionamiento de un convertidor VSC está basado en dispositivos semiconductores controlados, con la capacidad turn-on y turn-off. De entre los dispositivos semiconductores desarrollados, existe: el GTO (Gate Turn-Off Thyristor), el IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) que se considera una evolución del GTO y el IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Actualmente éste es el dispositivo que ha dado los mejores resultados en aplicaciones en sistemas eléctricos, y en el que se basa la tecnología HVDC - VSC.

Los convertidores, como el de la figura 26, usados en la tecnología VSC están formados por IGBTs que pueden realizar las conmutaciones necesarias para conseguir la rectificación o la inversión. La máxima potencia que puede transmitir este tipo de convertidores depende del rango máximo de trabajo de los IGBTs. También se pueden emplear

varios niveles de IGBTs para alcanzar la tensión de transporte necesaria, el número de IGBTs depende de la tensión objetivo.

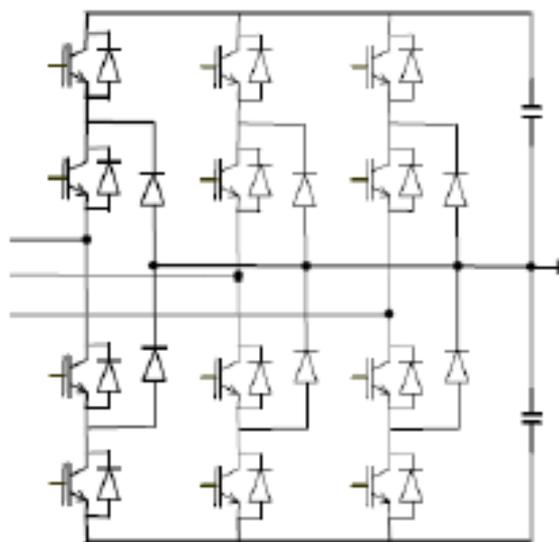


Figura 26. Convertidor VSC de 3 niveles.

Para obtener la tensión en DC necesaria para una línea en HVDC, como el rango de operación de los IGBTs es limitado, se puede colocar varios IGBTs en serie hasta alcanzarla. Para colocar varios IGBTs en serie deben conmutar simultáneamente. Esto se traduce en una mayor dificultad de control en el diseño y mayores costes, puesto que los IGBTs son muy caros.

5.2.1.2. Transformador

El objetivo de los transformadores es adecuar el nivel de la tensión para el correcto funcionamiento de los convertidores, por tanto se deben colocar, en la entrada del rectificador para que éste dé un valor concreto de tensión en su salida en la zona de DC y en la salida del para su transporte y/o distribución en los valores óptimos de tensión.

5.2.1.3. Reactancia de fase

Las reactancias de fase tienen la función de controlar la potencia activa y reactiva mediante la corriente que circula por ellas y también eliminan los armónicos de corriente de alta frecuencia causados por las operaciones de los IGBTs. Por lo tanto se colocara una en cada fase a la entrada del rectificador y a la salida del inversor.

5.2.1.4. Filtros de AC

Los armónicos producidos por las conmutaciones de los IGBTs pueden causar un mal funcionamiento del sistema eléctrico e influir en equipos de radio y telecomunicación. Para disminuir la magnitud de estos armónicos se colocan filtros de AC. En los sistemas VSC no es necesario componentes para compensar la energía reactiva dado que funciona mediante PWM y este sistema puede controlar la energía activa y reactiva. Por lo tanto se colocaran 6 filtros, dos en cada fase, antes y después de la etapa DC.

5.2.1.5. Condensadores de DC

Estos condensadores se colocan para minimizar el rizado de la tensión de CC y amortiguar la potencia en los transitorios. Se colocan dos condensadores, uno en cada polo, y su dimensión depende de la tensión que hay en cada polo del sistema.

5.2.1.6. Cables de DC

Los cables de transmisión de la corriente continua están hechos de un polímero especial que se utiliza por su poco peso, flexibilidad y por sus condiciones mecánicas.

5.2.2. ABB con HVDC – Light

La compañía ABB ha desarrollado una tecnología que llama, HVDC – Light, que aumenta la fiabilidad de las redes de energía, y aumenta el rango de transmisión de potencia. Es rápido de instalar y ofrece una alternativa a los sistemas convencionales de transmisión. Algunas aplicaciones:

- Conexión de los parques eólicos de las redes eléctricas.
- Enlaces eléctricas subterráneas.
- Proporcionar fuentes de alimentación de la costa en las islas y plataformas de petróleo y gas en alta mar.
- Conexión de las redes asíncronas.
- Ciudad de alimentación central.

Los comienzos de su desarrollo se remontan a 1997. Esta tecnología está basada en IGBT's de dos niveles. La onda fundamental de tensión es generada por un PWM, pudiéndose controlar la magnitud de onda y fase de la onda libremente dentro de unos márgenes, lo que permite el control de potencia activa y reactiva. Desde el punto de vista de la red se comporta como un generador síncrono con inercia capaz de controlar la potencia activa y reactiva casi instantáneamente. Actualmente, la tecnología llega ahora a 1200 MW y ± 500 kV.

Asociado al concepto HVDC Light de convertidores están los cables poliméricos HVDC Light Cables de aislamiento seco extruido para transmisión a alta tensión en DC. Estos cables constituyen líneas DC de un bipolo de corrientes antiparalelas, lo que elimina el campo electromagnético. Esta tecnología está especialmente indicada para transmisión de energía eléctrica a instalaciones offshore a distancias de la costa de 50 a 100 km. Dado que los filtros requeridos en la tecnología HVDC - Light son de pequeño tamaño y que no se requieren compensadores síncronos, las dimensiones de las estaciones convertidoras son reducidas respecto a las estaciones con tecnología tradicional.

5.2.3. Siemens con HVDC Plus (Power Link Universal System)

La compañía Siemens ha basado su tecnología HVDC – VSC, llamada HVD Plus, en un convertidor multinivel que es capaz de conmutar la DC

independientemente de la tensión del lado de alterna, no estando conmutados por la red, y por tanto aplicable la tecnología de modulación por anchura de pulso (PWM). El tamaño requerido para una estación convertidora utilizando esta tecnología sería un 20% menor que con la HVDC convencional. Se puede operar en redes de CA con muy bajos niveles de cortocircuito o con cargas pasivas, es robusto con respecto a los fallos de red de CA y sirve como cortafuegos para limitar la propagación de perturbaciones del sistema. Es ideal para la conexión de las plataformas marinas remotas y parques eólicos a la red eléctrica principal, así como para el suministro de energía a las grandes ciudades.

5.2.4. Alstom con HVDC MaxSine

La compañía Alstom ha desarrollado una tecnología llamada HVDC – MaxSine, y es la solución para:

- Los parques eólicos marinos donde los altos costos de la plataforma exigen una gran aérea y una distancia a la costa sea superior a 40 km.
- Transmisión de cable subterráneo, cuando son prohibidas las líneas aéreas.
- Débiles redes de AC no pueden aceptar un convertidor LCC sin equipo adicional significativo, como un STATCOM o compensadores síncronos.
- Casos en los que los niveles de armónicos existentes en la red de AC son altos y sin carga adicional, por ejemplo, de una estación de LCC.

6. ARMÓNICOS

Hay dos variables que definen el suministro de la energía eléctrica como son la tensión y la intensidad.

La compañía eléctrica es la que se encarga de suministrar la potencia contratada por el usuario, y que ésta llegue en buenas condiciones, en España la tensión debe ser de 400 V y a una frecuencia de 50 Hz.

El Estado y la compañía han de asegurar la calidad y la eficiencia del suministro, para ello la compañía está encargada de generar y transportar la máxima potencia activa posible, compensando la energía reactiva y la energía de distorsión que provocan los armónicos.

Los armónicos son un fenómeno que generan serios problemas en la red eléctrica, básicamente son distorsiones de las ondas sinusoidales que generan costes técnicos y económicos muy importantes.

La frecuencia de la onda periódica se denomina frecuencia fundamental y los armónicos son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

6.1. ORDEN, FRECUENCIA Y SECUENCIA DE LOS ARMÓNICOS

En España la frecuencia fundamental es de 50 Hz, el número de orden determina el número de veces que a frecuencia de ese armónico es mayor que la fundamental.

La frecuencia se traduce como el resultado de multiplicar el nº de orden de armónico por la frecuencia fundamental.

$$3^{\text{a}} \text{ armónico } 3 \times 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz}$$

$$5^{\text{a}} \text{ armónico } 5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$$

...

$$n \text{ armónico } n \times 50 \text{ Hz} = n \cdot 50 \text{ Hz}$$

Los armónicos de orden par se deben a la asimetría en la señal eléctrica, y los de orden impar se encuentran en las redes eléctricas de industria, edificios, etc...

La secuencia tanto positiva como negativa de los armónicos no determina un comportamiento de éstos en la red eléctrica, son igual de perjudiciales ambas secuencias. Por ejemplo, en las baterías de condensadores, para la corrección del factor de potencia, resulta más perjudicial la secuencia negativa y el 5º armónico. Otro ejemplo serían los de secuencia cero, donde al ser su frecuencia múltiplo eléctrico de la fundamental, se desplazan por el neutro, haciendo que por éste circule la misma o más intensidad que por las fases con el consiguiente calentamiento del mismo, de ahí la necesidad de igualar la sección del neutro a las fases, en la tabla 1 se muestran los parámetros de los armónicos más usuales.

Tabla 1. Parámetros de los armónicos más usuales.

ORDEN	FRECUENCIA	SECUENCIA
1	50	+
2	100	-
3	150	0
4	200	+
5	250	-
6	300	0
...
n	50*n	...

6.1.1. El 3º y el 5º armónico.

El 3º armónico tiene la particularidad de que su frecuencia es múltiplo eléctrico de la frecuencia fundamental, y tiene secuencia cero, por lo que en el sistema trifásico de cuatro hilos (debido al neutro) entra en anillo con las tres fases desplazándose por el neutro, e igual ocurre con todos los armónicos múltiplos de tres, como se muestra en la figura 27.

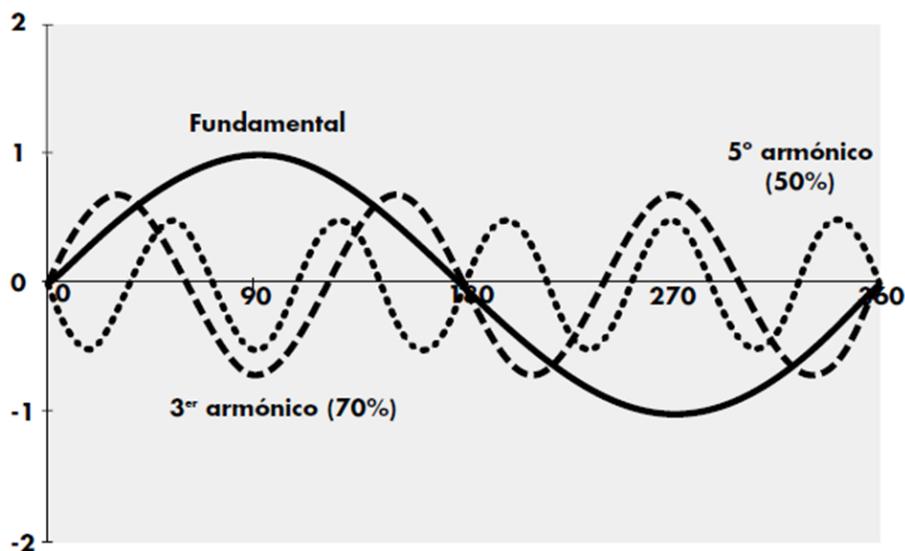


Figura 27. Señal fundamental, tercer y quinto armónico.

El 5º armónico no es múltiplo eléctrico de la fundamental por lo que se desplaza por las tres fases y es el primer armónico que afecta a los condensadores y al sistema trifásico, como el 7º, 11º armónico, etc..., en la figura 28 se especifica la descomposición de una señal distorsionada y la propia señal distorsionada.

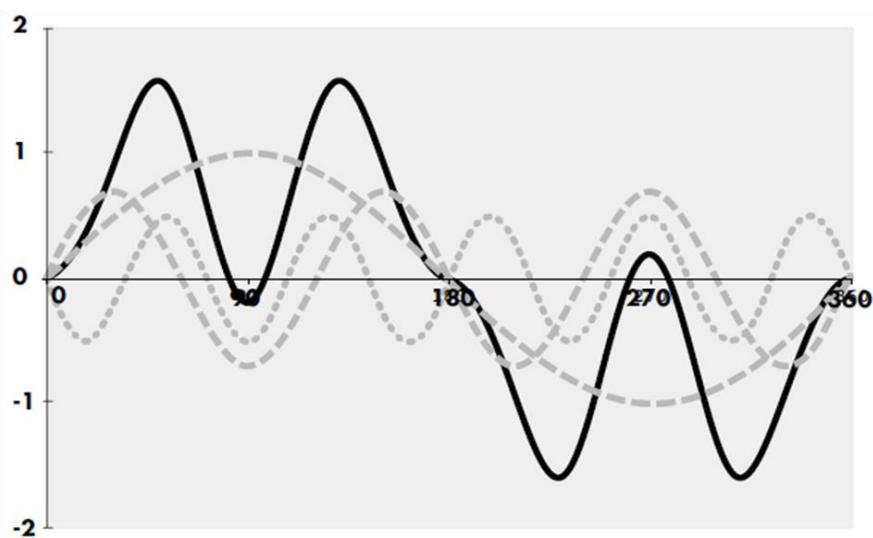


Figura 28. Señal distorsionada y su descomposición en: señal fundamental, tercer y quinto armónico.

6.2. ANÁLISIS DE FOURIER

Hace poco más de 200 años un matemático francés llamado Jean-Baptiste Joseph Fourier desarrolló una herramienta matemática para resolver la ecuación del calor. Determinó que toda forma de onda periódica no sinusoidal se puede descomponer como la suma de las infinitas ondas sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, esta descomposición se puede observar en la figura 29.

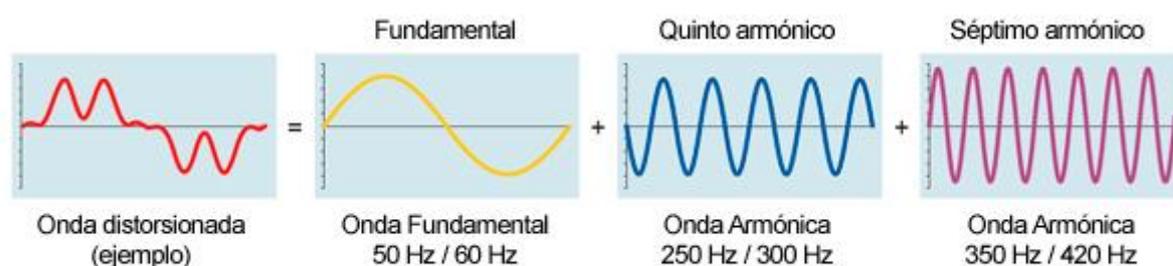


Figura 29. Descomposición de onda distorsionada.

Se han de cumplir las siguientes condiciones:

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

Una función $f(x)$ con periodo 2π se puede escribir en series de Fourier de acuerdo a:

$$Y = f(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cdot \text{sen}(nx) + B_n \cdot \text{cos}(nx)] \quad (7)$$

En donde y siendo $n=1, 2, 3, 4\dots$

$$A_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot dx \quad (8)$$

$$A_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \text{sen}(nx) \cdot dx \quad (9)$$

$$B_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \text{cos}(nx) \cdot dx \quad (10)$$

$$[A_n \cdot \text{sen}(nx) + B_n \cdot \text{cos}(nx)] = R_n \cdot \text{sen}(nx + \vartheta_n) + R_n \cdot \text{cos}(nx + \vartheta_n) \quad (11)$$

$$R_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (12)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{B_n}{A_n} \quad (13)$$

Tabla 2. Armónicos de las ondas más comunes.

CLASE DE ONDA	DESCOMPOSICIÓN ARMÓNICA
Onda seno	$Y=a \text{ sen } \theta$
Rectificación de media onda	$Y=a/\pi+0.5\text{sen } \theta-(2/1.3)\text{cos}2\theta-(2/3.5\pi)\text{cos}4\theta\dots$
Rectificación de onda completa	$Y=2a/\pi+(2/1.3)\text{cos } 2\theta-(2/3.5\pi)\text{cos } 4\theta-(2/5.7)\text{cos } 6\theta\dots\dots$
Rectificación de M fases	$Y=(am/\pi)\text{sen } \pi\theta/m+(2/(m^2-1))\text{cos } m\theta-(2/(4m^2-1))\text{cos } 2\theta+(2/(9m^2-1))\text{cos } 3m\theta\dots\dots$
Onda triangular	$Y=8a/\pi^2 [\text{sen } \theta-(1/9)\text{sen } 3\theta+(1/25)\text{sen } 5\theta+(1/49)\text{sen } 7\theta\dots$
Onda rectangular	$Y=4a/\pi [\text{sen } \theta-(1/3)\text{sen } 3\theta+(1/5)\text{sen } 5\theta+(1/7)\text{sen } 7\theta\dots$
Onda de tres niveles	$Y=3.4641^a/\pi [\text{cos } \theta-(1/5)\text{cos } 5\theta+(1/7)\text{cos } 7\theta+(1/11)\text{sen } 11\theta\dots$

Los armónicos más frecuentes, que se muestran en la tabla 2, en las redes de distribución trifásicas suelen ser los armónicos impares: tercero, quinto... y su amplitud decrece, normalmente, a medida que crece la frecuencia. A partir del armónico del orden 50º, los armónicos son insignificantes y las mediciones ya no aportan nada nuevo, por lo que con medir hasta el armónico de orden 30º ya es suficiente. Aunque, habitualmente, basta con estudiar los armónicos hasta el del orden 13º. Conociendo las características de los generadores de armónicos, se puede decir que se pueden reducir los armónicos a valores insignificantes pero la eliminación total es casi imposible.

Los armónicos pares sólo se crean cuando se produce una asimetría en la señal, la cual es debida a la componente continua.

6.3. FUENTES DE ARMÓNICOS

Una carga lineal no produce corriente distorsionada cuando se conecta una tensión sinusoidal, cuando la carga contiene elementos no lineales el circuito puede absorber la corriente en impulsos bruscos, en lugar de hacerlo con suavidad como lo hacen los elementos lineales, dichos impulsos crean una corriente de onda distorsionada que contiene armónicos. Los dispositivos y sistemas que crean armónicos suelen estar en todos los sectores, desde el industrial, el comercial y el residencial. Algunas fuentes de armónicos son:

- Los hornos de arco se consideran generadores de armónicos de tensión, apareciendo típicamente todos los armónicos aunque predominando los armónicos impares con valores típicos con respecto a la fundamental.
- Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas que requieren corriente de tercer armónico para excitar el hierro.
- Controladores de velocidad ajustables usados en ventiladores, bombas y controladores de procesos.
- Fuentes controladas para equipos electrónicos.
- Rectificadores basados en diodos o tiristores para equipos de soldadura, cargadores de baterías, etc.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva.
- Estaciones en DC de transmisión en alto voltaje.
- Convertidores de AC a DC (inversores).

6.4. EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

El principal problema de los armónicos reside en que reducen la calidad de la energía eléctrica. Esto puede producir una serie de efectos negativos.

6.4.1. Resonancia

El uso simultáneo de dispositivos capacitivos e inductivos en las redes de distribución ocasiona resonancia paralela o en serie, es decir, se traduce en valores de impedancia muy altos o muy bajos, respectivamente. Las variaciones en la impedancia modifican la corriente y la tensión en la red de distribución.

6.4.2. Sobrecargas en equipos

- Sobrecargas en la redes de distribución debido al aumento en la intensidad en rms, por ejemplo, en una fuente trifásica equilibrada, el conductor neutro debe sobredimensionarse porque la corriente en el conductor neutro presenta un valor rms superior al valor rms de la corriente en una fase mediante un factor $\sqrt{3}$.

- Sobrecargas en los conductores neutros debido al aumento acumulativo en los armónicos de tercer orden creados por cargas monofásicas.

- Sobrecargas, vibración y envejecimiento prematuro de generadores, transformadores y motores, así como aumento del ruido del transformador.

- Sobrecargas y envejecimiento prematuro de los condensadores utilizados en la corrección del factor de potencia. Según la norma, la corriente rms que circula por los condensadores no debe superar 1,3 veces la corriente nominal

- Sobrecargas en Sistema de Alimentación sin Interrupción (SAI). Un SAI dimensionado teniendo en cuenta exclusivamente la corriente rms

puede que no sea capaz de suministrar la corriente de pico necesaria y puede sobrecargarse.

6.4.3. Perturbaciones

- Distorsión de la tensión de alimentación que puede perturbar las cargas sensibles.

- Dispositivos de regulación (temperatura).
- Hardware informático.
- Dispositivos de control y de supervisión (relés de protección).

- Perturbaciones en las redes de comunicación y en las líneas telefónicas. El nivel de distorsión depende de la distancia que recorren en paralelo los cables de potencia y de control, la distancia entre los cables y la frecuencia de los armónicos.

6.4.4. Pérdidas

- Una tensión de alimentación no sinusoidal origina un aumento de las pérdidas de hasta un 20%.

- Las corrientes armónicas producen un aumento de las pérdidas por efecto Joule en los conductores por donde circulan, y un aumento de la temperatura en cables, dispositivos, transformadores, etc.

- Las tensiones armónicas aplicadas a los condensadores producen la circulación de intensidades proporcional a la frecuencia de los armónicos. Estas intensidades producen pérdidas adicionales.

- Las corrientes armónicas que circulan en los transformadores producen un aumento de pérdidas en el cobre debido al efecto Joule y a las corrientes de Foucault. Las tensiones armónicas son responsables de las pérdidas en el hierro debidas a la histéresis. En los transformadores de distribución, en los que los niveles de distorsión están limitados, las pérdidas aumentan entre el 10 y el 15%.

6.5. IMPACTO ECONÓMICO DE LOS ARMÓNICOS

Los armónicos han empezado a ser un problema a medida que se ha avanzado en la electrónica de potencia, ha hecho que este fenómeno sea más grave en todos los sectores de la actividad económica, sobre todo en las empresas o industrias donde es necesario los equipos que producen armónicos. Por tanto las consecuencias económicas más importantes son:

- Si no se sobredimensionan los equipos (alto costo), habrá un rápido envejecimiento del equipo que se tendrá que sustituir con más asiduidad, por ejemplo, los conductores deben dimensionarse teniendo en cuenta la circulación de intensidades armónicas. Además, debido al efecto pelicular, la resistencia de estos conductores aumenta con la frecuencia. Para evitar pérdidas excesivas debido al efecto Joule, es necesario sobredimensionar los conductores.

- Los armónicos producen pérdidas energéticas por el efecto Joule en los equipos y los conductores.

- Debido a las sobrecargas en la red de distribución y la presencia de intensidades armónicas acabará siendo necesaria aumenta el nivel de potencia contratada y por consiguiente, los costes aumentan. Y lo que es más, las empresas de servicios cada vez seguirán más la tendencia de cobrar a los clientes por las principales fuentes de armónicos.

- La deformación de las ondas de corriente produce disparos imprevistos en los interruptores que pueden detener la producción, lo que conlleva a grandes pérdidas de tiempo y de coste para volver a poner en funcionamiento la instalación.

- Cuando el nivel de distorsión en la tensión de alimentación se aproxima al 10%, la duración de la vida útil del equipo se reduce considerablemente. La reducción se ha estimado en:

- 32,5% para máquinas monofásicas.
- 18% para máquinas trifásicas.

- 5% para transformadores.

6.6. NORMATIVA APLICABLE

La presencia de armónicos en las instalaciones está sujeta a distintas normativas y reglamentos. Hay una serie de normativas a nivel tanto internacional como estatal, pero principalmente la división se hace de acorde a:

6.6.1. Normas de compatibilidad para redes de distribución

La Norma IEC 61000-4-30.2015 "*Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro*". define los métodos de medida y la interpretación de los resultados, de los parámetros que definen la calidad de suministro de las redes de energía eléctrica con una frecuencia fundamental de 50 Hz o 60 Hz. Estos métodos permiten obtener resultados fiables, repetibles y comparables, independientemente de los instrumentos utilizados y de sus condiciones ambientales. Además define con claridad la precisión, el ancho de banda y el conjunto de parámetros mínimos.

Los parámetros que cubren esta norma se limitan a los fenómenos conducidos en una red de energía eléctrica: frecuencia, amplitud de la tensión de alimentación, el flicker, los huecos de tensión y las sobretensiones, las interrupciones de tensión, las tensiones transitorias, el desequilibrio de tensión, los armónicos e interarmónicos de tensión, las señales de transmisión por la red las variaciones rápidas de tensión y las mediciones de corriente.

Para cada parámetro a medir, se establecen dos clases de requerimientos en la medida:

- Clase A: Es el requerimiento de medida más exigente y se clasifica como tal cuando cumple con la totalidad de la norma.
- Clase B: El nivel de exigencia en la medida es menor y se clasifica como tal cuando no la cumple en su o lo cumple bajo otros criterios.

6.6.2. Normas de las emisiones de armónicos por parte de los equipos

La Norma IEEE Std 519 – 2014 IEEE "*Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*" expone que la limitación de las tasas armónicas y la distorsión de corriente que los usuarios pueden inyectar en un PAC (punto de acomplamiento común) y las distorsiones que pueden/deben existir en cualquier punto de la red.

Los niveles de perturbaciones de la tensión han de estar según unos límites bajo responsabilidad del usuario y de la compañía eléctrica. Por tanto, esta norma establece límites para los niveles de distorsión de corriente que puede ser inyectada por parte de los usuarios (ver en apartado de límites).

Hay una norma, UNE-IEC/TR 61000-3-6:2006 "*Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3: Límites. Sección 6: Evaluación de los límites de emisión para las cargas perturbadoras conectadas a las redes de media y y alta tensión. Publicación básica CEM (IEC/TR 61000-3-6:1996)*", que determina los requisitos a cumplir en las conexiones de las cargas perturbadoras de gran potencia (produciendo armónicos y/o interarmónicos) en la red en general. El objetivo principal es proporcionar indicaciones sobre las prácticas de ingeniería que aseguren una calidad de servicio adecuada a todos los usuarios de una misma red.

El procedimiento aconsejado en este documento que responde necesariamente a ciertas hipótesis simplificadoras, no garantiza que este procedimiento facilite siempre la solución óptima a todos los problemas de armónicos. La aplicación total o parcial de los procedimientos de

evaluación recomendados se debería practicar con flexibilidad y revisar por un ingeniero.

La decisión final relativa a la conexión de las instalaciones, incluyendo las cargas perturbadoras, es siempre competencia del distribuidor.

Los problemas ligados a los armónicos corresponden a dos categorías principales:

- Las corrientes armónicas se inyectan en la red de alimentación por convertidores y otras fuentes de armónicos. Tanto las corrientes armónicas como las tensiones resultantes se consideran como un fenómeno conducido. El objetivo de este informe es limitar las tensiones armónicas efectivas en la red de alimentación a niveles (de compatibilidad) que no se traducir en efectos nocivos para los equipos sensibles. Las tensiones armónicas resultan de las corrientes armónicas y de las impedancias; esto implica limitar las corrientes armónicas insertadas en la red.

- Las corrientes armónicas entre 50 Hz y 5 kHz pueden inducir interferencias en los sistemas de comunicación. Este fenómeno está más marcado por los armónicos de orden elevado debido a un acoplamiento más importante entre los circuitos y también por la más fuerte sensibilidad de los circuitos de comunicación en la banda de las frecuencias audibles.

Es importante saber que se llama carga a la instalación completa del usuario y que el sistema de tensiones es el siguiente:

- Baja tensión (BT) $U_n \leq 1\text{kV}$
- Media tensión (MT) $1\text{kV} < U_n \leq 35\text{ kV}$
- Alta tensión (AT) $35\text{ kV} < U_n \leq 230\text{ kV}$
- Muy alta tensión (MAT) $U_n > 230\text{kV}$

6.6.3. Normas para empleo de filtros

UNE-EN 61642.2010 "Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos. Empleo de filtros y de condensadores a instalar en paralelo".

Esta norma internacional da las indicaciones para la utilización de filtros pasivos de armónicos de AC y de condensadores a instalar en paralelo destinados a la limitación de los armónicos y a la corrección del factor de potencia en instalaciones eléctricas industriales de alta tensión. Se refiere a armónicos de orden entre 1 y 25.

El dimensionado de estos componentes debe estar basado en las peores condiciones de servicio. En el diseño del equipo de filtrado se debe de tener en cuenta las corrientes armónicas generadas por las cargas así como cualquier corriente o tensión armónica que exista en la red.

A continuación en la figura 30 se muestran los filtros utilizados en instalaciones de alta tensión:

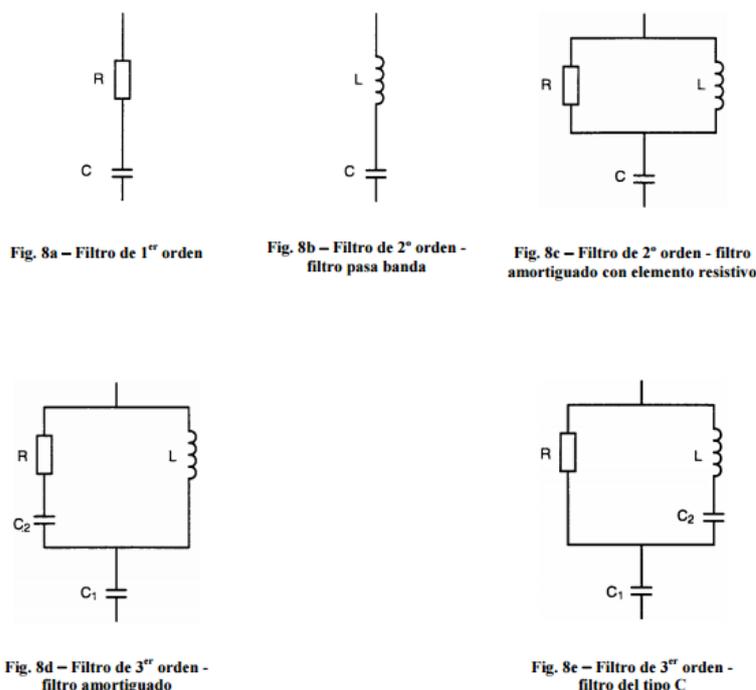


Figura 30. Tipos de filtros para las instalaciones de alta tensión.

6.7. INDICADORES Y LÍMITES

Para analizar los efectos que se producen por los armónicos se utilizan frecuentemente una serie de indicadores que cuantifican y evalúan la distorsión en la forma de onda de tensión y de intensidad, es decir, el nivel de contaminación armónica de las ondas. Para el análisis los índices son equiparados con valores límites dados por las normas o los valores máximos que pueden llegar a soportar los equipos.

Partiendo de las definiciones básicas:

- La potencia activa, P , de una señal, incluye armónicos, es la suma de las potencias activas resultantes de las corrientes y tensiones del mismo orden.

- La potencia reactiva, Q , se define exclusivamente en términos de la fundamental, es decir $Q = U \times I \times \sin \theta$.

- El factor de potencia, PF , es la relación entre la potencia activa P y la potencia aparente S , $PF = P / S$. Una indicación inicial de que existen cantidades significativas de armónicos es un factor de potencia medido PF diferente (inferior) al $\cos \theta$ medido.

- El factor de cresta es la relación entre el valor de la tensión o corriente de pico y su valor rms. Para una señal senoidal, el factor de cresta es igual a raíz de dos y puede ser superior o inferior a raíz de dos.

6.7.1. Índices para armónicos de tensión

El índice de distorsión armónica individual de tensión se define como el porcentaje de armónicos de rango h con respecto al fundamental:

$$U_h(\%) = \frac{U_i}{U_n} \cdot 100 \quad (14)$$

U_h -> Distorsión armónica individual de tensión.

U_i -> Tensión de cada armónico.

U_n -> Tensión nominal del alimentador.

El índice de distorsión armónica total de tensión se define como:

$$THD_v = \frac{1}{U_n} \cdot \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2} \quad (15)$$

6.7.2. Índices para armónicos de corriente

Para corriente se tienen dos tipos de índices, los de distorsión armónica individual y los de distorsión armónica total.

El índice de distorsión armónica individual se define mediante la siguiente ecuación:

$$i_h(\%) = \frac{i_i}{i_n} \cdot 100 \quad (16)$$

i_h -> Distorsión armónica individual de corriente.

i_i -> Corriente de cada armónico.

i_n -> Corriente nominal del alimentador.

Los índices de distorsión armónica total se definen como:

Tasa de Distorsión Total Armónica, Total Harmonic Distortion (*THD*), y es un indicador ampliamente utilizado en la definición del nivel de contenido armónico en señales senoidales.

$$THD_i = \frac{1}{i_n} \cdot \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} i_i^2} \quad (17)$$

Distorsión Demandada Total, Total Demand Distorsion (*TDD*), distorsión de corriente armónica en % de la máxima corriente de carga demandada.

$$TDD = \frac{1}{i_d} \cdot \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} i_i^2} \quad (18)$$

6.7.3. Límites

El índice de distorsión armónica total de tensión, THD_v , tiene una serie umbrales y fenómenos correspondientes en la instalación, se indican los límites de los armónicos en las tablas 3 y 4:

- THD_v por debajo del 5%: situación normal, sin riesgos de funcionamiento incorrecto.
- Del 5% al 8%: contaminación armónica importante, puede producirse algún fallo en el funcionamiento.
- Superior al 8%: contaminación armónica importante, se producen fallos en el funcionamiento. Es necesario un análisis profundo y la instalación de dispositivos de atenuación.

El índice de distorsión armónica total de corriente, THD_i , tiene una serie umbrales y fenómenos correspondientes en la instalación:

- THD_i por debajo del 10%: situación normal, sin riesgos de funcionamiento incorrecto.
- Del 10% al 50%: contaminación armónica importante con riesgo de aumento de temperatura y la necesidad consiguiente de sobredimensionar cables y fuentes, aumento de coste.
- Superior al 50%: contaminación armónica importante, se producen fallos en el funcionamiento. Es necesario un análisis profundo y la instalación de dispositivos de atenuación.

Tabla 3. Límites de los armónicos de intensidad.

Armónicos Impares		Armónicos Pares	
Orden del Armónico (n)	Intensidad Armónica admisible (A)	Orden del Armónico (n)	Intensidad Armónica admisible (A)
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,4	$9 \leq n \leq 40$	$0,23 \cdot 8/n$
11	0,33		
13	0,21		
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \cdot 15/n$		

Tabla 4. Límites de la Tensión de Distorsión.

Tensión del Bus en el PAC	Tasa armónica individual (%)	THD (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5%	8%
$1 \text{ kV} \leq V \leq 69 \text{ kV}$	3%	5%
$69 \text{ kV} \leq V \leq 161 \text{ kV}$	1.5%	2.5%
$V > 161 \text{ kV}$	1%	1.5%

NOTA: En los sistemas de alta tensión pueden tener THD en un 2,0 % THD cuando la causa sea un enlace HVDC puesto que se atenuará la distorsión en los puntos de consumo.

También en la Norma IEEE Std 519 - 2014 IEEE "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems" hay una serie de tablas para los sistemas de distribución en

función de la tensión que son las siguientes, en las tablas 5, 6 y 7 se observan los límites de armónicos de corriente para distintas tensiones, pero vamos a definir primero:

- I_L = máxima intensidad de carga demandada en el PAC.
- I_{CC} = máxima intensidad de cortocircuito en el PAC.
- TDD = Distorsión total demandada en % de la demanda máxima.
- Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares.
- Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor I_{CC}/I_L .

Tabla 5. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general de 120 V a 69 kV.

Máxima distorsión de corriente armónica en porcentaje I_L						
Orden armónico individual (armónicos impares)						
I_{CC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 < 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 < 100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100 < 1000	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Tabla 6. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general de 69 kV a 161 kV.

Máxima distorsión de corriente armónica en porcentaje I_L						
Orden armónico individual (armónicos impares)						
I_{CC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	<i>TDD</i>
< 20	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
50 < 100	5	2.25	2	0.75	0.35	6
100 < 1000	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10

Tabla 7. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general de >161 kV.

Máxima distorsión de corriente armónica en porcentaje I_L						
Orden armónico individual (armónicos impares)						
I_{CC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	<i>TDD</i>
< 25	1	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
25 < 50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
> 50	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

A la hora de aumentar los límites de corriente armónica se recomienda que los valores dados en las anteriores tablas se incrementen, con la tabla 8, con un factor multiplicador cuando son tomadas por un usuario para reducir los armónicos de orden inferior. Los multiplicadores indicados en la segunda columna de la siguiente tabla son aplicables cuando se

toman medidas para reducir las órdenes de armónicos que figuran en la primera columna.

Tabla 8. Factores recomendados para los aumentos de límites de corriente armónica.

Límites de los órdenes de los armónicos para un 25% del valor de las anteriores tablas	Factor
5, 7	1.4
5, 7, 11 ,13	1.7
5, 7, 11 ,13, 17, 19	2
5, 7, 11 ,13, 17, 19, 23, 25	2.2

El suministrador es responsable en el que en la acometida el THD se encuentre dentro de los límites establecidos y los usuarios deben de asegurar en el que en la acometida la generación de armónicas en corriente se ubique dentro de los límites establecidos, tanto para componentes armónicas individuales como para la TDD.

En la norma EN-50160 viene la siguiente tabla 9 donde se expresa en porcentaje de la tensión fundamental los máximos valores de las tensiones de armónicos individuales en los puntos de consumo.

Tabla 9. Niveles de compatibilidad recomendados para las tensiones armónicas (en % de la tensión nominal) en baja tensión (LV), media tensión (MV) y alta tensión (HV). THD: 8% en redes LV/MV, 3% en redes HV.

Armónicos impares						Armónicos pares		
No múltiplo de 3			Múltiplo de 3					
Orden h	Tensión armónica		Orden h	Tensión armónica		Orden h	Tensión armónica	
	LV/MV	HV		LV/MV	HV		LV/MV	HV
5	6%	2%	3	5%	2%	2	2%	1,5%
7	5%	2%	9	1,5%	1%	4	1%	1%
11	3,5%	1,5%	15	0,3%	0,3%	6	0,5%	0,5%
13	3%	1,5%	21	0,2%	0,2%	8	0,5%	0,2%
17	2%	1%	> 21	0,2%	0,2%	10	0,5%	0,2%
19	1,5%	1%				12	0,2%	0,2%
23	1,5%	0,7%				> 12	0,2%	0,2%
25	1,5%	0,7%						
> 25	$0,2+12,5/n$ %	$0,1+2,5/n$ %						

6.8. MEDICIÓN Y ANÁLISIS

Suele ser bastante difícil predecir problemas de armónicos sin realizar unas cuantas mediciones porque el flujo y las respuestas del sistema pueden variar sustancialmente de un sistema a otro con pequeñas desviaciones tales como tolerancias de los equipos, desbalances, etc.

La medida de armónicos se elabora con equipos que analizan la señal y realizan un espectro de los distintos órdenes de armónicos.

Las siguientes son algunas razones que muestran la importancia de las mediciones:

- Conocer los valores existentes de armónicos y compararlos con los límites recomendados y umbrales máximos.
- Identificar los equipos que generan armónicos (cargas no lineales).
- Diagnosticar y arreglar las situaciones en las que la actuación de los equipos sea inaceptable para la subestación alimentadora o del usuario.
- Realizar mediciones para la verificación de los estudios por simulación que incluyan flujo de carga armónica.

Muchos problemas de armónicos pueden ser resueltos simplemente reubicando equipos, instalando filtros, o limitando algunos pasos de la compensación del factor de potencia. Sin embargo, antes de llegar a una solución viable se deben identificar plenamente las distorsiones armónicas y sus fuentes, lo cual puede hacerse con base en modelos de flujo de armónicos o midiendo directamente en la instalación.

Se deben escoger los sitios donde se encuentren las cargas generadoras de armónicos o se tengan instalados elementos pasivos tales como condensadores que puedan estar haciendo una función de sumidero para los armónicos generados en otros sitios. El conocimiento de estas características facilita la determinación de los sitios donde se deben efectuar medidas, el tipo de medidas que debe hacerse y los resultados que se esperan.

Entre los métodos tradicionales de medida y visualización se incluyen:

- Osciloscopios: visualizan la intensidad o la tensión y con ello se obtiene una indicación inicial de la distorsión que afecta a una señal. Cuando la forma de la onda no es senoidal, indica la presencia de armónicos. Se pueden observar picos de tensión y de intensidad. Permiten conocer de forma rápida si en el punto de medida hay ruidos, armónicos, sobretensiones, etc., pero es necesario tener en cuenta que

este método no ofrece una valoración exacta de los componentes armónicos.

- Analizadores de espectro: están formados por filtros pasabanda acoplados a un voltímetro de valor eficaz. Algunos de ellos son:

- Analizadores de distorsión: Estos instrumentos indican directamente la distorsión armónica total (THD).

- Analizadores de espectro: estos instrumentos muestran la distribución de potencia de una señal en función de la frecuencia. Un seguro rango de frecuencias es explorado, y todos los componentes, armónicos, e interarmónicos de la señal analizada son mostrados. Estos espectros son la visualización de la serie de Fourier de la señal, la cual descompone la señal en la suma de varias señales distintas.

- Analizadores armónicos o analizadores de ondas: estos instrumentos miden la amplitud (y en más unidades complejas, el ángulo de fase) de una función periódica. Estos instrumentos proporcionan el espectro lineal de la señal observada. La salida puede ser registrada, o puede ser monitoreada por medidores analógicos o digitales.

- Registradores: pueden reunir en algunos casos las características de osciloscopios y analizadores de espectro, además, tienen la capacidad de almacenar los datos tomados.

Los microprocesadores en los analizadores digitales:

- Calculan los valores de los indicadores armónicos (factor de potencia, factor de cresta, potencia de distorsión, THD).

- Tiene diferentes funciones complementarias (correcciones, detección estadística, gestión de medida, visualización, comunicación, etc.).

- En los analizadores multicanal, ofrecen prácticamente en tiempo real la descomposición espectral simultánea de las intensidades y tensiones.

Actualmente se dispone de analizadores de armónicos muy sofisticados equipados con software y hardware que permiten una fácil adquisición de datos y un confiable análisis matemático de la información.

El uso de osciloscopios digitales, como el de la figura 31, con memoria permite también obtener la información necesaria para los estudios, aunque el software de análisis debe utilizarse por aparte.



Figura 31. FLUKE 43B - Analizador de calidad de energía / analizador de armónicas. Incluye modo multímetro y osciloscopio.

6.9. SOLUCIONES

Existen diferentes soluciones para disminuir y limitar los armónicos en las redes de distribución, primero habrá que analizar los armónicos que aparecen en la red lo recomendable es elaborar simulaciones que permitan conocer la realidad de los fenómenos y estudiar las mejoras a introducir tales como filtros, etc. Los pasos de un análisis de armónicos en la red son:

- Identificación y definición del problema.
- Medición de los armónicos en la instalación.
- Diagnóstico preliminar estableciendo las posibles causas o motivos.

- Establecimiento de modelo del sistema del usuario.
- Rodaje del modelo con las posibles soluciones.

Una vez conocido el problema se aplican las soluciones más adecuadas, aunque en muchos casos hay que probar distintas soluciones para limitar la propagación de los armónicos se pueden realizar acciones como las siguientes tales como las siguientes:

- **Instalación de las cargas no lineales aguas arriba,** conseguimos disminuir el efecto que causan las cargas sensibles, se indica en la figura 32.

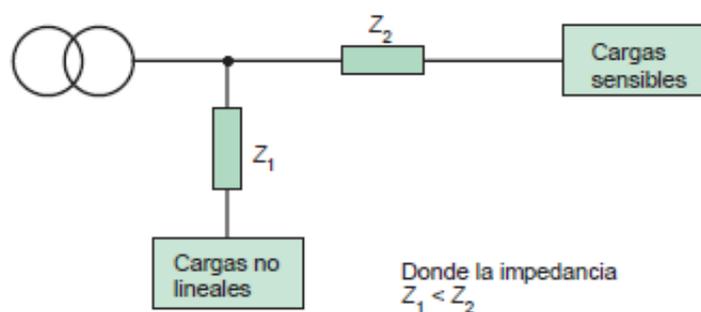


Figura 32. Cargas no lineales colocadas lo más aguas arriba posible.

- **Agrupación de las cargas no lineales,** separar las cargas no lineales y asociar las lineales por otro, se presenta en la figura 33.

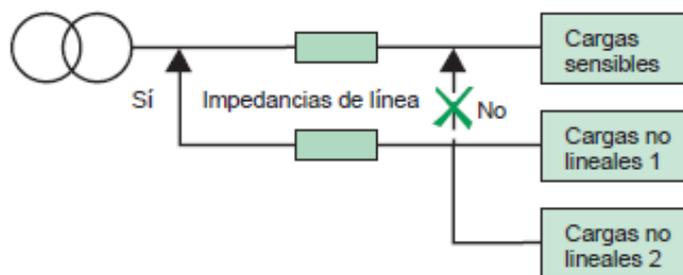


Figura 33. Las cargas lineales juntas y lo más aisladas posible de las cargas sensibles.

- **Creación de fuentes separadas**, alimentar las cargas no lineales desde una fuente independiente de las demás cargas, supone un mayor gasto económico, se muestra en la figura 34.

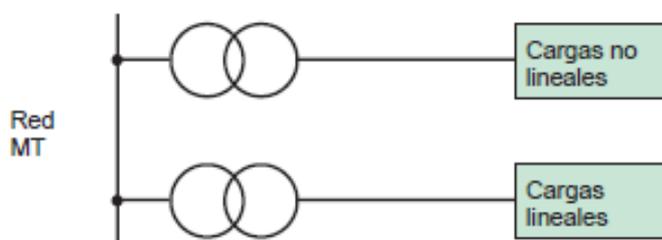


Figura 34. Cargas no lineales con alimentación independiente.

- **Transformadores con conexiones especiales**, algunos tipos de conexiones entre el primario y el secundario de los transformadores pueden eliminar armónicos, se detalla en la figura 35.:

- La conexión de doble secundario Dyd elimina los armónicos de rangos 5^o y 7^o.
- La conexión Dy elimina el 3^o armónico.
- La conexión DZ 5 elimina el 5^o armónico.

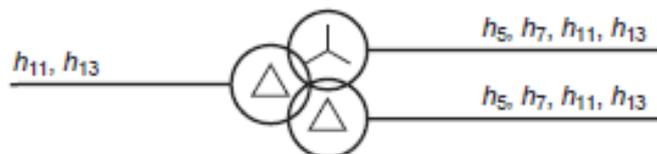


Figura 35. Transformador en conexión Dyd para aislar la propagación de los armónicos 5º y 7º en la red aguas arriba.

- **Sobredimensionamiento de la instalación**, dos opciones posibles:

- Al aumentar la potencia de la fuente generadora provoca menos distorsión con lo cual mayor calidad de la tensión.
- Los cables de mayor tensión, disminuyen las pérdidas por efecto Joule y se disminuyen los armónicos.

- **Instalación de inductancias**, cuando se alimentan a variadores de velocidad se puede atenuar la corriente instalando inductancias, aumentar la impedancia del circuito de alimentación y limitar la circulación de armónicos.

6.9.1. Filtrado de Armónicos

Por no ser suficiente lo explicado anteriormente o por resultar muy costoso, se adoptan otras soluciones para reducir los niveles de distorsión armónica a los niveles permitidos por la normativa, existen tres tipos de filtros.

6.9.1.1. Filtros Pasivos

Los filtros pasivos están compuestos por bobinas, condensadores y resistencias, como el que se muestra en la figura 36. Se instalan en paralelo con la carga no lineal para que así puedan absorber los armónicos y que no circulen por la red de distribución. Se ajustan al rango de armónicos que se desea eliminar y se suelen utilizar ramificaciones de filtros en paralelo para una eliminación más global.

Basan su funcionamiento en obligar a las corrientes armónicas un camino de menor impedancia que la red exterior, actuando como sumideros de las mismas.

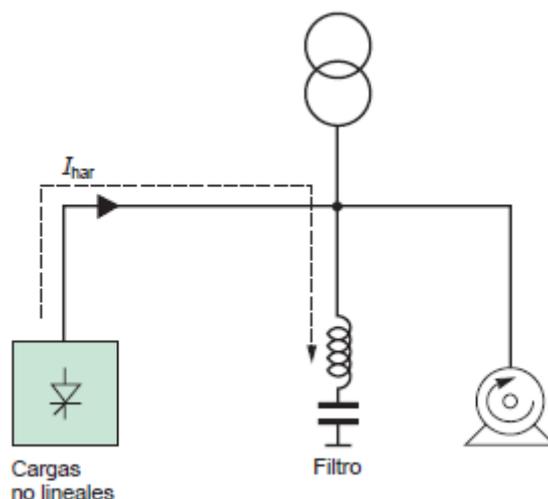


Figura 36. Funcionamiento de un filtro pasivo.

Las virtudes de los filtros pasivos son: su bajo coste, su reducción de las tensiones armónicas de la tensión de alimentación y su corrección del factor de potencia, pero tienen una serie de defectos:

- No compensan todo el rango de armónicos, solamente son válidos para un orden armónico determinado.
- La resonancia serie entre el filtro y la impedancia de la fuente puede causar amplificaciones de las tensiones armónicas.
- El filtro pasivo puede provocar una resonancia paralela con la red de suministro, con amplificación de las corrientes armónicas.
- Los filtros pasivos, por su componente resistiva, tienen un consumo de componente fundamental, lo que provoca armónicos de tensión.

- El número de secciones del filtro será tanto más elevado cuanto mayor sea el número de armónicos a eliminar, lo que supone aumentar los problemas anteriormente mencionados.

- El filtro de absorción (el utilizado a nivel industrial), se adapta a una configuración concreta de red y estado de las cargas. Por lo tanto, no pueden eliminarse ni añadirse cargas a un grupo compensado de esta forma.

Las aplicaciones típicas son: instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA, instalaciones que requieren la corrección del factor de potencia, instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles, instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

A su vez se puede hacer una clasificación de los filtros pasivos:

- Los filtros pasa banda, como se observa en la figura 37, dejan pasar un determinado rango de frecuencias de una señal sin atenuar, está compuesto por un circuito serie RLC. Estos filtros se utilizan para eliminar armónicos de orden bajo. Se conecta en paralelo con la carga no lineal y consigue atrapar la componente armónica con frecuencia igual a la frecuencia de sintonía.



Figura 37. Filtro paso banda.

- Los filtros paso bajo permiten el paso de las frecuencias más bajas y atenúan las más altas. El filtro requiere de dos terminales de entrada, dos de salida y entre un cuadripolo.

- Los filtros paso alto (HPF) son un tipo de filtro pasivo cuya respuesta en frecuencia se atenúan las componentes de baja frecuencia. Los más empleados son los de 2º, 3er orden y el filtro tipo C., éste tiene como mayor ventaja que una considerable reducción de las pérdidas, debido a que C2 y L están sintonizados en serie a la frecuencia fundamental y R en cortocircuito, ejemplo de los filtros en la figura 38.

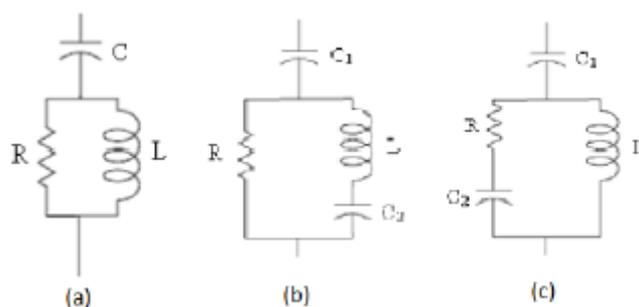


Figura 38. Filtro de (a) 2º orden, (b) filtro tipo C y (c) 3er orden.

6.9.1.2. Filtros Activos

Los filtros activos están compuestos elementos pasivos asociados con otros activos de electrónica de potencia como pueden ser los amplificadores operacionales que se muestra en la figura 39. Estos sistemas, se instalan en paralelo con la carga no lineal y el sistema eléctrico, compensan la corriente de los armónicos o la tensión de la carga. Basan su funcionamiento en inyectar intensidades a la red con un valor y una frecuencia determinada que cancelan los armónicos de intensidad que están presentes en la red. Esta corriente es igual a la diferencia entre la corriente de carga y la intensidad fundamental, de manera que la resultante será una corriente senoidal igual a la intensidad fundamental de la fuente. Que su funcionamiento sea el correcto depende

fundamentalmente del dimensionamiento del filtro y de una coordinación eficaz entre el cálculo de la corriente de referencia y el control de la corriente del filtro.

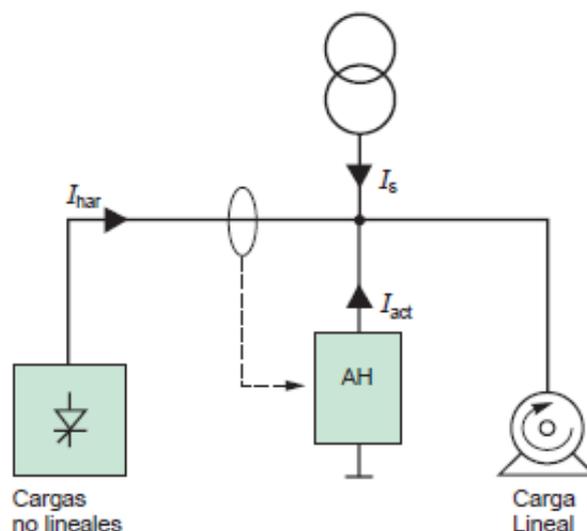


Figura 39. Funcionamiento de un filtro activo.

Las virtudes de los filtros pasivos son: filtrar un amplio rango de frecuencias, se adaptan a cualquier tipo de carga, pueden presentar ganancia en toda o parte de la señal de salida respecto a la señal de entrada, su principal inconveniente es que al asociarse con elementos activos como los amplificadores operacionales que necesitan una alimentación externa para su funcionamiento.

Las aplicaciones típicas son instalaciones comerciales con una serie de cargas no lineales que representan menos de 200 kVA, instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

A su vez se puede hacer una clasificación de los filtros activos, que son similares en nombre y función que los pasivos:

- Los filtros pasa banda permiten escoger la banda de frecuencia que se desea dejar pasar, la cual está limitada por una frecuencia mínima y una frecuencia máxima.

- Los filtros paso bajo están compuestos por un amplificador operacional de ganancia unitaria más un circuito RC, para asegurar la ganancia unitaria el valor de R y de Rf debe ser igual.

- Los filtros paso alto son un tipo de filtros que emiten una señal mientras su frecuencia esté por debajo de una determinada frecuencia, cuando la supere permite el paso de la señal de entrada.

6.9.1.3. Filtros Híbridos

Los filtros híbridos son una combinación de filtros pasivos y activos que forman un único sistema para constituir un filtro híbrido. Esta nueva solución de filtrado ofrece las ventajas de los dos tipos de filtros y abarca una amplia gama de niveles de potencia y rendimiento, se observa un filtro híbrido en la figura 40.

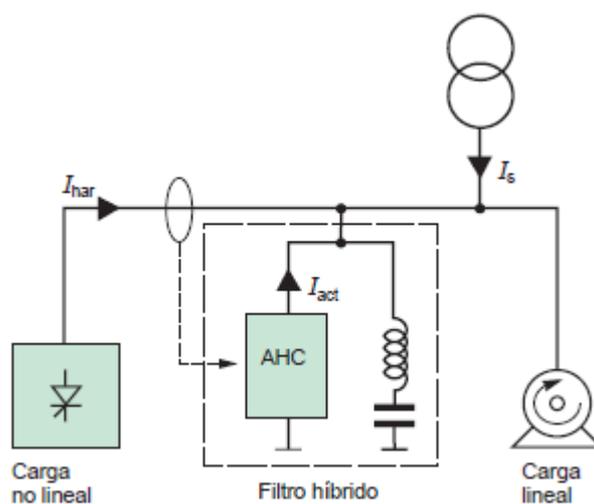


Figura 40. Funcionamiento de un filtro híbrido.

Las aplicaciones típicas son: instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA, instalaciones que requieren corrección del factor de potencia, instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles, instalaciones en las que la distorsión de corriente debe

reducirse para evitar sobrecargas, instalaciones en las que deben cumplirse límites estrictos de emisiones de armónicas.

La empresa Schneider Electric expone en sus soluciones que cuando el $\cos \theta$ es inferior a 0,85-0,9, la solución preferible es pasiva o híbrida y cuando el $\cos \theta$ es mayor la solución debe ser activa.

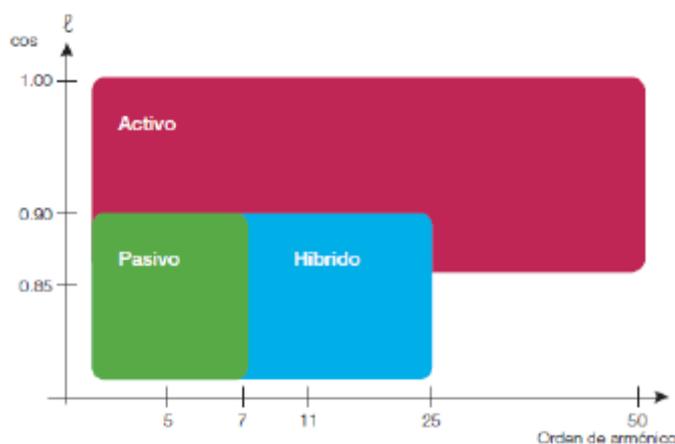


Figura 41. Propuesta de utilización de filtros activos, pasivos o híbridos según el $\cos \phi$ y el orden de los armónicos a mitigar.

La clasificación de los filtros híbridos es semejante a la de los filtros activos y pasivos, y sus características también, en la anterior figura 41 se presenta una propuesta de utilización de los tres filtros explicados en los anteriores apartados.

7. PROYECTOS DE HVDC POR EL MUNDO

Actualmente, hay alrededor de 170 proyectos HVDC en construcción o en funcionamiento a lo largo del mundo, con una potencia de transmisión total de alrededor de 200.000 MW.

En la siguiente figura 42 se citan y se muestran algunos de los proyectos que la compañía ABB ha ejecutado en todo el mundo.

ABB has more than half of the 145 HVDC projects The track record of a global leader

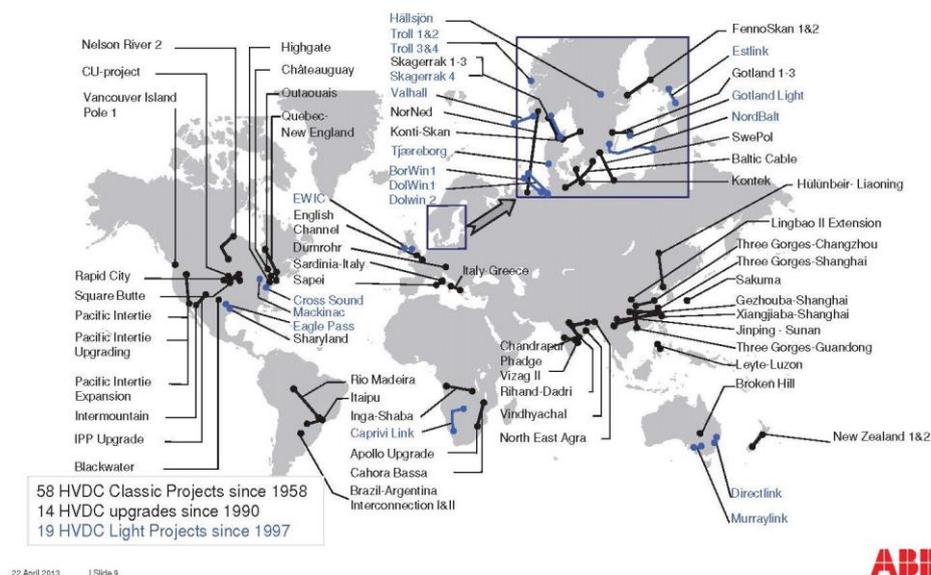


Figura 42. Enlaces ejecutados por ABB en el mundo.

7.1. GOTLAND – SUECIA

El primer enlace comercial de HVDC en el mundo data del año 1954 y fue la conexión entre la isla de Gotland y la costa oeste de Suecia en la península Escandinava, el cable era submarino y medía 96 km de longitud, conectando Ygne y Västervik. Los convertidores eran válvulas de arco de mercurio, y las características del enlace eran que tenía una potencia de transmisión de 20 MW y ± 100 kV de tensión. En el año 1970 se añadieron tiristores al enlace, poniéndoles en serie con las válvulas de arco de mercurio, y se incrementó la tensión hasta los ± 150 kV y la potencia de transmisión hasta los 30 MW.

En el año 1983 se colocó un nuevo cable de tensión nominal ± 150 kV y 130 MW de capacidad de transmisión, que junto con el cable ya existente

cubrían las necesidades energéticas de Gotland, cerrando en la isla los combustibles fósiles de los cuáles dependían.

La demanda siguió en aumento y la fuerte preocupación por la seguridad del suministro impulsó en 1985 construir otro enlace en Gotland de HVDC, que puede formar un enlace bipolar con el construido en el año 1983 o trabajar de manera independiente. La capacidad de transmisión total es de 260 MW.

7.2. JINPING – SUNAN, CHINA

Hace unos pocos años, en el año 2013, ABB diseñó, construyó y suministro el equipo necesario para poner en marcha la línea de transmisión más potente del mundo en China de una capacidad de transmisión de 7.200 MW.



Figura 43. Central hidroeléctrica de Jinping en China.

La tensión máxima que soporta es de ± 800 kV, que se denomina UHVDC (“Ultra High Voltage Direct Current”, en sus siglas en inglés). Principalmente ABB suministró los transformadores, las válvulas y

sistemas de control para las estaciones convertidor. Alcanza un máximo de 5 kA de corriente continua.

La longitud del cable es de 2090 km desde una estación de generación hidroeléctrica en Jinping que se ve en la figura 43 en el centro oeste de China, hasta la costa este del país altamente industrializada en Sunan.

7.3. RIO MADEIRA, BRASIL

Este enlace es el más largo del mundo, cubre una distancia de 2375 km de longitud, entre las centrales hidroeléctricas en el río Madeira, en la cuenca del Amazonas, al noroeste de Brasil, hasta, cerca de Sao Paulo en el sureste de Brasil donde hay una creciente demanda de energía en la figura 44 se muestra lo que atraviesa este enlace.



Figura 44. El enlace Rio Madeira atraviesa todo Brasil.

Se adjudicó a ABB por el Grupo Abengoa y en el año 2013 comenzó a funcionar. ABB proporciona dos estaciones convertidores de potencia total

3150 MW cada una y una estación back to back de 800 MW. Las dos primeras se sitúan en los extremos de la línea de transmisión, y la tercera unidad que transmite la potencia a la red de AC en el noroeste de Brasil. Esta instalación incluye condensador conmutado de convertidor (CCC), en lugar de los convertidores convencionales para cargas eléctricas locales, proporcionando continua e incluso el control de tensión y potencia en las redes eléctricas débiles en el noroeste de Brasil.

7.4. NORNED, EUROPA

En el año 2008 se inauguró el proyecto NorNEd, un enlace de HVDC que conecta Feda en Noruega y Eemshaven en los Países Bajos a través del mar del Norte, con una capacidad de transmisión de 700 MW y ± 450 kV.

El proyecto NorNed es el cable submarino más largo hasta la fecha alcanzando una longitud de 580 km, se muestra el proyecto en la figura 45.



Figura 45. Enlace submarino más largo del mundo.

ABB fue el encargado de las dos estaciones convertidor y la mayor parte del trayecto cable. La interconexión ha dado lugar a comercializar la electricidad entre los dos países y a elevar la fiabilidad y seguridad del suministro eléctrico de ambos países, gracias a la rapidez y flexibilidad del control del flujo de potencia, que también otorga una disminución de las emisiones de CO_2 y mejor utilización de las plantas de energía y desarrollo de la energía renovable eólica.

7.5. MURRAYLINK, AUSTRALIA

Este proyecto data del año 2002, y destacar por ser el sistema de transmisión de potencia subterráneo más largo del mundo con tecnología VSC, se conecta a través de Red Cliffs en y Berri, ambas en la zona sur de Australia. El enlace lo diseñó y ejecutó ABB, con su tecnología HVDC Light que comprende cables de alta resistencia enterrados en el suelo, se detalla la conexión en la figura 46.



Figura 46. Enlace subterráneo más largo del mundo.

La interconexión permite controlar y comercializar la electricidad entre las regiones de Riverland y Sunraysia, y satisfacer las necesidades de 200.000 hogares.

La capacidad de transmisión es de 220 MW, con una tensión de ± 150 kV y la longitud del cable subterráneo es de 180 km.

El proyecto Murraylink ganó varios premios estatales y nacionales australianos, tanto para la excelencia ambiental y la ingeniería.

7.6. ESPAÑA

En los últimos años en España se está llevando a cabo una mejora de la red eléctrica, no sin ello, con una gran dificultad técnica y singularidad, dos proyectos ayudan a avanzar, dando estabilidad, fiabilidad y calidad al suministro, todo ello de la mano de Red Eléctrica Española ("REE" son sus siglas).

7.6.1. Interconexión subterránea España – Francia

El 27 de junio del año 2008 Red eléctrica Española y Réseau de Transport d'Électricité firmaron un acuerdo para constituir la sociedad Inelfe, con el objetivo de aumentar el volumen de intercambio de energía eléctrica entre la Península Ibérica y Europa, encargándose de ejecutar la construcción de una nueva línea eléctrica que uniera España y Francia por el este de los Pirineos, duplicando la capacidad de transmisión con Francia hasta los 2.800 MW, en la figura 47 aparece una gráfica de la capacidad de transmisión entre España y Francia, con lo que se da más solidez al conjunta de la red eléctrica europea y, por tanto, mejora su resistencia ante posibles riesgos e incidentes. Garantiza el suministro eléctrico necesario, asegurando el funcionamiento del tren de alta velocidad en el lado español e incorporando un mayor volumen de energías renovables en la red, especialmente de la eólica procedente de España, más baratas y sin emisiones de CO_2 .

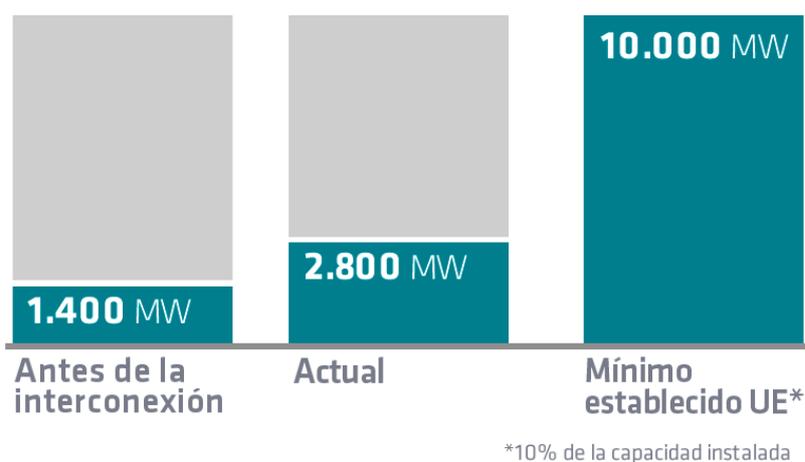


Figura 47. Capacidad de interconexión España - Francia.



Figura 48. Rajoy y Valls en el acto de inauguración la línea de interconexión entre España y Francia.

La línea tiene una longitud de 64,5 km (31 km en España y 33,5 km en Francia) entre los municipios de Figueres y Perpignan. El trazado de la interconexión va soterrado en zanja atravesando la autopista AP-7, menos el túnel de 8,5 km que atraviesa el macizo de la Albera, y el trazado prosigue paralelo a la línea ferroviaria de alta velocidad. La tensión nominal es de ± 320 kV y la tecnología de las estaciones de

conversión para transformar de AC a DC y viceversa es VSC que agiliza la inversión del sentido de la corriente y la recuperación del funcionamiento después de un corte de suministro. En la figura 48 se presenta el acto inauguración de la línea al que acudieron los presidentes de Francia y España y en la figura 49 los pueblos que atraviesa dicho proyecto.



Figura 49. Ciudades que interconecta la línea subterránea.

La ejecución de este proyecto es reciente y data de febrero del año 2015, contando con un presupuesto de 700 millones de euros, la Unión Europea financia un tercio del total en el marco del programa EEPR ("European Energy Program for Recovery"), se indica en la figura 50 en esquema de la interconexión.

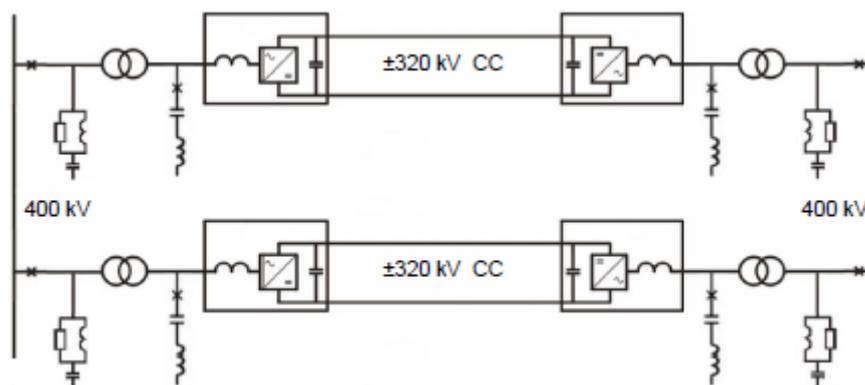


Figura 50. Esquema de la interconexión España - Francia.

7.6.2. Interconexión Península – Baleares

El enlace entre la Península Ibérica y las islas Baleares se conoce como proyecto Rómulo y es la primera interconexión submarina de transporte en DC que existe en España, se muestra en la figura 51 la profundidad y longitud del enlace y su esquema eléctrico en la figura 52.

Este proyecto es fundamental para asegurar y mejorar la fiabilidad del suministro eléctrico balear. Este proyecto permitirá además su integración en el mercado eléctrico ibérico, estableciendo así un mercado de generación competitivo en las islas.

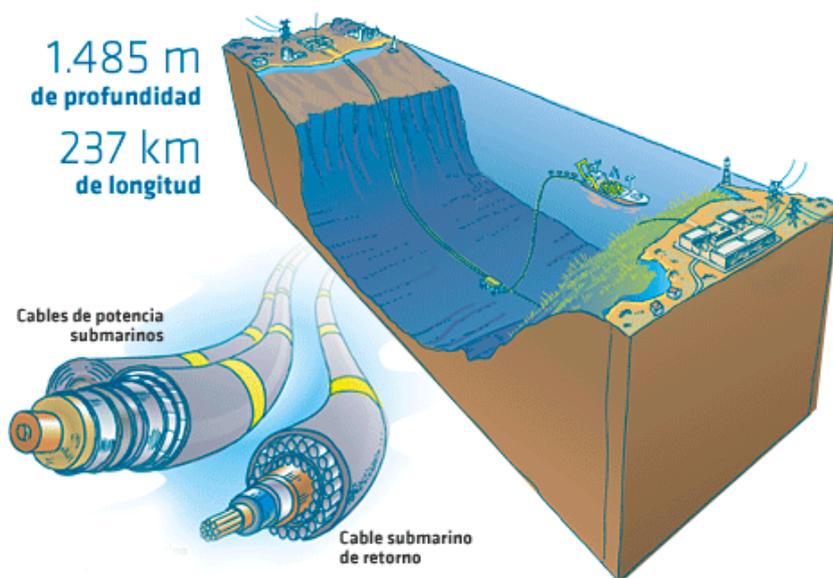


Figura 51. Cables y barco usados en la interconexión.

La puesta en servicio de la instalación se produjo en agosto de 2012. Durante su primer año de funcionamiento, el enlace ha ofrecido una aportación media de casi el 30 % del consumo global del sistema balear, llegando en momentos puntuales al 40%. El enlace ha alcanzado con creces los objetivos inicialmente previstos en cuanto a la calidad y seguridad de suministro y reducción de costes para el sistema. Desde el punto de vista medioambiental, el balance de este primer año ha supuesto una reducción de emisiones procedentes de generación eléctrica de 285.000 toneladas de CO_2 .

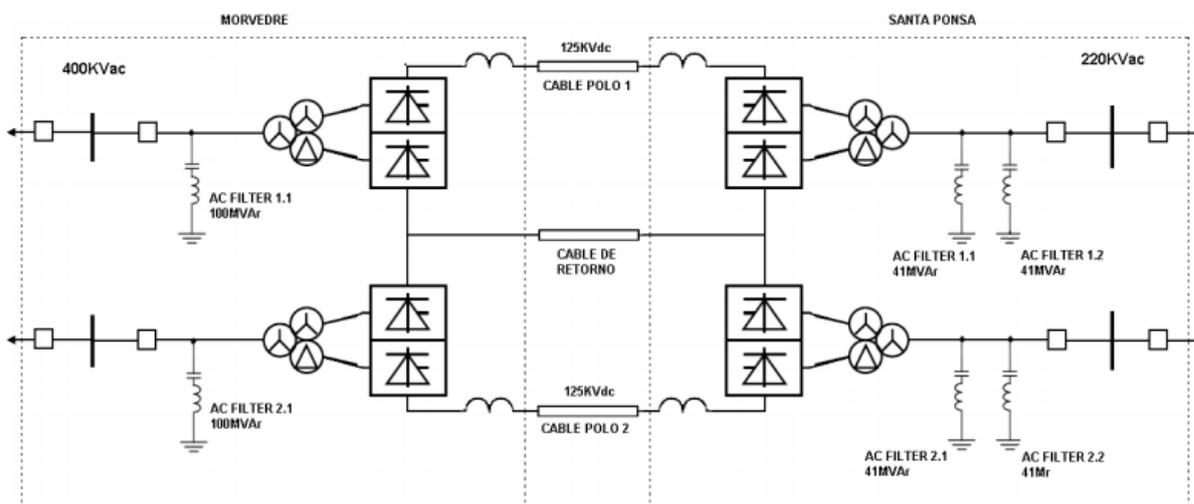


Figura 52. Esquema eléctrico del proyecto Rómulo.

Las características técnicas del proyecto presentan una conexión submarina de alta tensión de ± 250 kV, compuesta por tres cables (uno de retorno) de 237 km de longitud a una profundidad de 1485 m, actualmente, esta profundidad solo es superada por el enlace entre Cerdeña y la Italia peninsular, con 1.600 metros. El tendido lo han realizado los dos únicos barcos especializados en estas tareas: el noruego Skagerrak y el italiano Giulio Verne. Así mismo se hizo necesaria la construcción de dos estaciones de conversión: Morvedre de tensión ± 400 kV, en Sagunto la provincia de Valencia, y Santa Ponsa de tensión ± 220 kV, en Calviá en la isla de Mallorca. También se han instalado cables de fibra óptica, junto a los cables eléctricos, para garantizar las comunicaciones en ambos extremos. La capacidad de transmisión del enlace bipolar es de 400 MW con cable de retorno. Es decir, es una interconexión compuesta por dos cables de potencia más un tercer cable de retorno para aumentar la disponibilidad del suministro eléctrico.

8. NORMATIVA APLICABLE

El Real Decreto 223/2008, del 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09.

Este decreto regula y actualiza las condiciones técnicas, garantías de seguridad e instrucciones técnicas de cualquier tipo de línea eléctrica de alta tensión.

El propio marco técnico ha variado considerablemente, con la introducción de nuevos materiales, técnicas, procedimientos y necesidades sociales.

Mucho mayor aún ha sido la variación experimentada en el ordenamiento jurídico, como consecuencia, de la promulgación de la Constitución Española y de la adhesión de España a la Comunidad Europea, lo que ha significado, en cuanto al tratamiento administrativo, por ejemplo, el traspaso de funciones desde la Administración General del Estado a las comunidades autónomas cuando se trata de instalaciones ubicadas exclusivamente en sus

respectivos territorios, y la necesidad de coordinación en los demás casos, o la necesidad de cumplir la liberalización económica que, como en otros campos, se ha materializado de manera espectacular en el ámbito energético en general y el sector eléctrico en particular, obligando a adaptar todos los procedimientos y agentes intervinientes.

Dos leyes básicas se aplican a las instalaciones contempladas en el reglamento que ahora se aprueba: con carácter sectorial, la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, y con carácter horizontal, pero especialmente en materia de seguridad, la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria.

Así, por ejemplo, el artículo 3 de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, confiere a la Administración General del Estado la competencia para establecer los requisitos mínimos de calidad y seguridad que han de regir el suministro de energía eléctrica, así como la de autorizar las instalaciones eléctricas cuando su aprovechamiento afecte a más de una comunidad autónoma o el transporte o distribución salga del ámbito territorial de una de ellas.

Por lo demás, el artículo 51.1 de dicha Ley 54/1997, de 27 de noviembre, se remite a lo previsto en la citada Ley 21/1992, de 16 de julio, respecto de las normas técnicas de seguridad y calidad industriales que hayan de cumplir las instalaciones de producción, transporte y distribución de energía eléctrica, las destinadas a su recepción por los usuarios, los equipos de consumo, así como los elementos técnicos y materiales para las instalaciones eléctricas.

El mismo artículo 51, en su apartado 3, indica, igualmente, que sin perjuicio de las restantes autorizaciones reguladas por la Ley, a los efectos considerados en este artículo, la construcción, ampliación o modificación de instalaciones eléctricas requerirá autorización administrativa, según disponga la reglamentación correspondiente.

Otros aspectos a destacar de la referida Ley del Sector Eléctrico son que su título IX se refiere a expropiación y servidumbres y, por último, que incorpora un régimen sancionador que cubre infracciones también en el ámbito del reglamento que ahora se aprueba.

Por su parte, la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria, dedica su título III a la seguridad y calidad industriales y, más concretamente, el capítulo I de dicho título a la seguridad industrial, definiéndola y determinando sus objetivos.

El artículo 12 de la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria, se refiere, específicamente, a los reglamentos de seguridad, los cuales deberán establecer los requisitos de seguridad de las instalaciones, los procedimientos de conformidad con las mismas, las responsabilidades de los titulares y las condiciones de equipamiento, medios y capacidad técnica que deben reunir los agentes intervinientes en las distintas fases en relación con las instalaciones, así como la posibilidad de su control mediante inspecciones periódicas.

De acuerdo con el apartado 5 del citado artículo 12, los reglamentos de seguridad de ámbito estatal se aprobarán por el Gobierno de la Nación, sin perjuicio de que las comunidades autónomas puedan introducir requisitos adicionales sobre las mismas materias, cuando se trate de instalaciones radicadas en su territorio.

En su artículo 15, la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria, define las características y requisitos que deben reunir los organismos de control, como entidades encargadas de llevar a cabo las inspecciones reglamentarias.

Además, en su título V, esta misma norma legal recoge el régimen de infracciones y sanciones en materia de industria y, en particular, sobre cuestiones relacionadas con la seguridad de las instalaciones.

De acuerdo con este marco legal, mediante el presente real decreto se aprueba un conjunto normativo que, en línea con otros vigentes en materia de seguridad industrial, adopta la forma de un reglamento que contiene las disposiciones técnicas y administrativas generales, así como unas instrucciones técnicas complementarias (denominadas ITC-LAT) que desarrollan y concretan las previsiones del primero para materias específicas.

El reglamento que se aprueba establece que sus prescripciones y las de las instrucciones técnicas complementarias deben tener la consideración de mínimos, de acuerdo con el estado de la técnica, pero admite ejecuciones distintas de las previstas siempre que ofrezcan niveles de seguridad que puedan considerarse, al menos, equivalentes.

Se declaran de obligado cumplimiento una serie de normas relativas, especialmente, al diseño de materiales y equipos. Dado que dichas normas proceden en su mayor parte de las normas europeas EN e internacionales IEC, se consigue rápidamente disponer de soluciones técnicas en sintonía con lo aplicado en los países más avanzados y que reflejan un alto grado de consenso en el sector.

Para facilitar su puesta al día, en el texto de las instrucciones únicamente se citan las normas por sus números de referencia, sin el año de edición. En una instrucción a tal propósito se recoge toda la lista de las normas, esta vez con el año de edición, a fin de que, cuando aparezcan nuevas versiones, se puedan hacer los respectivos cambios en dicha lista, quedando automáticamente actualizadas en el texto dispositivo, sin necesidad de otra intervención. En ese momento también se pueden establecer los plazos para la transición entre las versiones, de tal manera que los fabricantes y distribuidores de material eléctrico puedan dar salida, en un tiempo razonable, a los productos fabricados de acuerdo con la versión de la norma anulada.

No obstante, una vez más, el reglamento resulta flexible en su exigencia, ya que permite la utilización de otros materiales y equipos que no se ajusten a dichas normas pero que confieran una seguridad equivalente, con expreso reconocimiento de aquellos que se comercialicen legalmente en los Estados del Espacio Económico Europeo y en cualquier otro con el cual exista un acuerdo al efecto.

Se presupondrá la conformidad de los equipos y materiales con las normas y especificaciones técnicas aplicables cuando éstos dispongan de marcas o certificados de conformidad emitidos por un organismo cualificado, independiente y acreditado para tal fin, según los procedimientos establecidos en el Real Decreto 2200/1995, de 28 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Infraestructura para la Calidad y la Seguridad Industrial.

Las empresas de transporte y distribución de energía eléctrica se responsabilizarán de la ejecución, mantenimiento y verificación de las líneas de su propiedad.

Para la ejecución de las líneas eléctricas de alta tensión que no sean propiedad de empresas de transporte y distribución de energía eléctrica, se introducen las figuras de instalador y empresa instaladora autorizada, que hasta ahora no habían sido reguladas, estableciendo 2 categorías, según se pretenda ejecutar líneas aéreas y subterráneas con tensión nominal hasta 30 kV o de más de 30 kV. Se exige que el titular contrate el mantenimiento de la línea, a fin de garantizar el debido estado de conservación y funcionamiento de la misma. Complementariamente, se prevé la inspección periódica de las instalaciones, cada tres años, como mínimo, por organismos de control.

Todo ello, con independencia de la necesidad de un proyecto previo y dirección de obra por titulado competente.

Finalmente, se encarga al centro directivo competente en materia de seguridad industrial del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, la elaboración de una guía, como ayuda a los distintos agentes afectados, para la mejor comprensión de las prescripciones reglamentarias.

Esta regulación tiene carácter de normativa básica y recoge previsiones de carácter exclusiva y marcadamente técnico, por lo que la Ley no resulta un instrumento idóneo para su establecimiento y se encuentra justificada su aprobación mediante Real Decreto.

Este real decreto constituye una norma reglamentaria sobre seguridad industrial en instalaciones energéticas que, de acuerdo con lo establecido en la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria, y Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, se dicta al amparo de lo dispuesto en las reglas 13.^a y 25.^a del artículo 149.1 de la Constitución Española, que atribuyen al Estado las competencias exclusivas sobre bases y coordinación de la planificación general de la actividad económica y sobre bases del régimen minero y energético, respectivamente.

En la fase de proyecto, este real decreto ha sido sometido al trámite de audiencia que prescribe la Ley 50/1997, de 27 de noviembre, del Gobierno, y ha sido sometido al procedimiento de información de normas y reglamentaciones técnicas y de reglamentos relativos a la sociedad de la información, regulado por Real Decreto 1337/1999, de 31 de julio, a los efectos de dar cumplimiento a lo dispuesto en la Directiva 98/34/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de junio, modificada por la Directiva 98/48/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 julio.

8.1. OBJETO Y APLICACIÓN

El Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión tiene por objeto:

- Proteger a las personas y la integridad y funcionalidad de los bienes que pueden resultar afectados por las mismas.
- Regularización del suministro de energía eléctrica.
- Normalización del material eléctrico.
- Facilitar en los proyectos el posible aumento de cargas en el futuro.

• Se considerará que las instalaciones realizadas de conformidad con las prescripciones de este reglamento proporcionan las condiciones de seguridad

• Las prescripciones establecidas en el presente reglamento tendrán la condición de mínimos obligatorios

Este reglamento se aplica en líneas eléctricas de alta tensión a 50 Hz de frecuencia. Aquellas líneas en las que se prevea utilizar otros sistemas de transporte, como corriente continua, deberán ser objeto de una justificación especial por parte del proyectista, el cual deberá adaptar las prescripciones y principios básicos de este reglamento a las peculiaridades del sistema propuesto.

8.2. CATEGORÍAS DE LAS LÍNEAS SEGÚN TENSIÓN NOMINAL.

Las líneas eléctricas se clasificarán atendiendo a su tensión nominal en las categorías siguientes:

- Categoría especial: Las de tensión nominal igual o superior a 220 kV y las de tensión inferior que formen parte de la red de transporte conforme a lo establecido en el artículo 5 del Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte,

distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.

- Primera categoría: Las de tensión nominal inferior a 220 kV y superior a 66 kV.
- Segunda categoría: Las de tensión nominal igual o inferior a 66 kV y superior a 30 kV.
- Tercera categoría: Las de tensión nominal igual o inferior a 30 kV y superior a 1 kV.

Si en la línea existen circuitos o elementos en los que se utilicen distintas tensiones, el conjunto de la línea se considerará, a efectos administrativos, al valor de la mayor tensión nominal.

8.3. COMPATIBILIDAD CON OTRAS INSTALACIONES.

Las líneas eléctricas de alta tensión deben estar dotadas de los elementos necesarios para que su explotación e incidencias no produzcan perturbaciones anormales en el funcionamiento de otras instalaciones.

Los sobredimensionamientos y modificaciones impuestos a otras instalaciones, como consecuencia de cambios realizados en líneas o redes eléctricas de alta tensión, serán costeados por el propietario de estas líneas o redes, quien podrá reclamar al causante último de la modificación.

8.4. EQUIVALENCIA DE REQUISITOS.

Sin perjuicio de lo establecido en el artículo 13, a los efectos de este reglamento, y para la comercialización de productos provenientes de los Estados miembros de la Unión Europea, de Turquía, del Espacio

Económico Europeo, o de otros Estados con los cuales existan los correspondientes acuerdos, que estén sometidos a las reglamentaciones nacionales de seguridad industrial, la Administración pública competente deberá aceptar la validez de los certificados y marcas de conformidad a normas y las actas o protocolos de evaluación de la conformidad oficialmente reconocidos en dichos Estados, siempre que se reconozca, por la mencionada Administración, que los agentes que los realizan ofrecen garantías técnicas, profesionales y de independencia e imparcialidad equivalentes a las exigidas por la legislación española y que las disposiciones legales vigentes del Estado, que sirven de base para evaluar la conformidad, comportan un nivel de seguridad equivalente al exigido por las correspondientes disposiciones españolas.

8.5. NORMAS DE OBLIGADO CUMPLIMIENTO.

- Las ITCs establecen el cumplimiento obligatorio de normas UNE u otras reconocidas internacionalmente, de manera total o parcial, a fin de facilitar la adaptación al estado de la técnica en cada momento.

- Cuando una o varias normas varíen su año de edición, o se editen modificaciones posteriores a las mismas, deberán ser objeto de actualización en el listado de normas, mediante resolución del órgano directivo competente en materia de seguridad industrial del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, en la que deberá hacerse constar la fecha a partir de la cual la utilización de la antigua edición de la norma dejará de serlo, a efectos reglamentarios.

A falta de resolución expresa, se entenderá que también cumple las condiciones reglamentarias la edición de la norma posterior a la que figure en el listado de normas, siempre que la misma no modifique criterios básicos y se limite a actualizar ensayos o incremente la seguridad intrínseca del material correspondiente.

8.6. ACCIDENTES.

Para efectos estadísticos y con objeto de determinar las posibles causas, como para disponer las eventuales correcciones en la reglamentación, se debe poseer de los datos sistematizados de los accidentes más significativos. Para ello, cuando se produzca un accidente o una anomalía en el funcionamiento, imputable a la línea, que ocasione víctimas, daños a terceros o situaciones objetivas de riesgo potencial, el propietario de la línea deberá redactar un informe que recoja los aspectos esenciales del mismo. En un tiempo no superior a tres meses, deberán remitir a los órganos competentes del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y de las comunidades autónomas, copia de todos los informes realizados.

8.7. EQUIPOS Y MATERIALES.

Se incluirán junto con los equipos y materiales las indicaciones necesarias para su correcta instalación y uso, debiendo marcarse con la información que determine la norma de aplicación que se establece en la correspondiente ITC, con las siguientes indicaciones mínimas:

- Razón social y dirección completa del fabricante y, en su caso, de su representante legal o del responsable de la comercialización.
- Marca y modelo, si procede.
- Tensión e intensidad asignada, si procede.

La Administración pública competente verificará en sus campañas de inspección de mercado el cumplimiento de las exigencias técnicas de los materiales y equipos sujetos a este reglamento.

8.8. PROYECTO DE LAS LÍNEAS.

Será obligatoria la presentación de proyecto suscrito por un técnico titulado competente, para la realización de toda clase de líneas de alta tensión.

El contenido mínimo de los proyectos y anteproyectos, se determinará en la correspondiente ITC, y se ha de facilitar a la Administración los datos adicionales que considere necesarios.

8.9. INTERRUPCIÓN Y ALTERACIÓN DEL SERVICIO.

En los casos o circunstancias en los que se observe peligro para las personas o cosas se deberá interrumpir el funcionamiento de las líneas.

La interrupción del funcionamiento de las líneas de transporte y distribución de energía eléctrica será decidida por el operador del sistema y gestor de la red de transporte o por el gestor de la red de distribución conforme los procedimientos de operación vigentes.

8.10. DOCUMENTACIÓN, PUESTA EN SERVICIO, MANTENIMIENTO, VERIFICACIONES PERIÓDICAS E INSPECCIONES.

Las empresas de transporte y distribución de energía eléctrica se responsabilizarán de la ejecución de las líneas de su propiedad o el técnico contratado por un privado.

La construcción, ampliación, modificación y explotación de las líneas eléctricas de alta tensión propiedad de empresas de transporte y distribución de energía eléctrica se condicionará a la autorización administrativa.

Las empresas de transporte y distribución de energía eléctrica se responsabilizarán de la ejecución de las líneas de su propiedad.

Las líneas eléctricas propiedad de empresas de transporte y distribución de energía eléctrica deberán disponer de la siguiente documentación:

- Proyecto que defina las características de la instalación, según determina la ITC-LAT 09, elaborado previamente a la ejecución.

- Certificado final de obra, según modelo establecido por la Administración, emitido por técnico titulado competente una vez finalizadas las obras

- La verificación periódica de las líneas se realizará, al menos, cada tres años. La empresa titular conservará el acta de la verificación a disposición de los órganos competentes de la Administración. En la ITC-LAT 05 se detalla el proceso para las verificaciones e inspecciones periódicas.

Las líneas eléctricas de alta tensión que no sean propiedad de empresas de transporte y distribución de energía eléctrica se ejecutarán por empresas instaladoras que reúnan los requisitos y condiciones establecidos en la ITC-LAT 03.

8.11. ÍNDICE DE INSTRUCCIONES TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS

ITC-LAT 01. TERMINOLOGÍA

ITC-LAT 02. NORMAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

ITC-LAT 03. INSTALADORES AUTORIZADOS Y EMPRESAS INSTALADORAS AUTORIZADAS PARA LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

ITC-LAT 04. DOCUMENTACIÓN Y PUESTA EN SERVICIO DE LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

- ITC-LAT 05. VERIFICACIÓN E INSPECCIONES
- ITC-LAT 06. LÍNEAS SUBTERRÁNEAS CON CABLES AISLADOS
- ITC-LAT 07. LÍNEAS AÉREAS CON CONDUCTORES DESNUDOS
- ITC-LAT 08. LÍNEAS AÉREAS CON CABLES UNIPOLARES REUNIDOS
EN HAZ O CON CONDUCTORES RECUBIERTOS
- ITC-LAT 09. ANTEPROYECTOS Y PROYECTOS

9. CONCLUSIONES

En este estudio se presenta una descripción general del transporte de energía en corriente continua, centrándose, en la tecnología HVDC, se tratan, su situación en la historia, el funcionamiento genérico, las diferencias entre HVDC y HVAC, las configuraciones, las conexiones, los componentes, la tecnología, tanto LCC o tradicional como la VSC el problema con los armónicos y sus posibles soluciones, la normativa a aplicar, y los proyectos más estacados y emblemáticos a lo largo del mundo.

A día de hoy la mayoría del transporte eléctrico se ejecuta en HVAC, pero la mejora y el desarrollo de la electrónica de potencia consigue que cada vez sea más rentable tanto económica, técnica como medioambientalmente la ejecución de nuevos proyectos en HVDC.

- Menor impacto medioambiental tanto por los efectos electromagnéticos de las líneas.

- En las líneas aéreas a partir de los 600-800 km, y en el caso de líneas subterráneas o submarinas a partir de 40 km, resulta más rentable ejecutar el proyecto basándose en sistemas HVDC debido a que las pérdidas son menores, como se observa en la figura 53, hay un ahorro

en las líneas y la capacidad de transmitir potencia es mayor que los sistemas HVAC. Aunque cada vez que evolucione la transmisión en HVDC, sobre todo, los rectificadores e inversores, va a ser menor esta distancia.

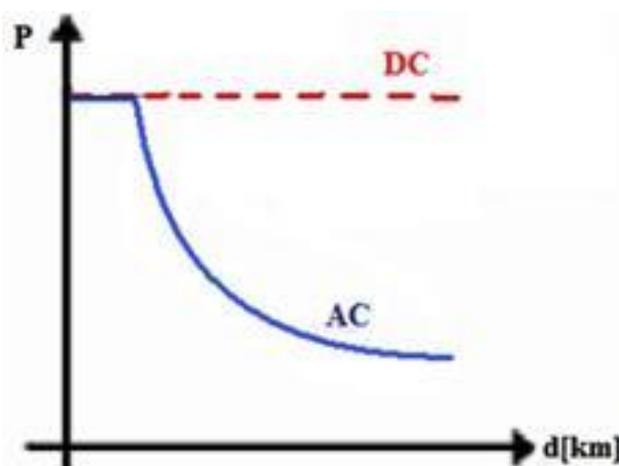


Figura 53. Potencia vs Distancia en AC y DC.

- Se pueden conectar sistemas asíncronos, no se contribuye a la corriente de cortocircuito de las redes conectadas y se puede invertir el flujo de energía.

A pesar de esto, existen ciertas limitaciones, como:

- No se pueden emplear transformadores en DC.
- Se necesitan estaciones que tienen un coste elevado.
- Se necesitan equipos de filtrado de armónicos debidos a los procesos de rectificación e inversión.

Previamente, se han mostrado los criterios más importantes a la hora de escoger entre un sistema HVAC y uno HVDC. Si se elige la tecnología HVDC habrá una serie de factores a tener en cuenta dentro del propio desarrollo de la tecnología.

- Por prestaciones y coste específico (€/kW) al tecnología VSC es mejor que la tecnología HVDC – LCC.

- Las válvulas de la tecnología HVDC – VSC se utilizan dispositivos autoconmutados, prescindiendo de la necesidad de emplear fuentes de tensión alterna para la conmutación de apagado.

- En la tecnología HVDC – VSC, se puede controlar independientemente la potencia activa y la reactiva.

- La tecnología HVDC – LCC tiene mayores niveles de potencia y de tensión por lo que tiene más amplio campo de aplicación que la tecnología HVDC – VSC.

Principalmente se emplea la tecnología HVDC - VSC en instalaciones en las que la distancia es menor y que requieren transmitir menos potencia, como por ejemplo en parques eólicos offshore.

10. BIBLIOGRAFÍA

10.1. NORMATIVA

- Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITCLAT 01 a 09.

- AENOR. 2015. UNE-IEC/TR 61000-3-6 IN. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3: Límites. Sección 6: Evaluación de los límites de emisión para las cargas perturbadoras conectadas a las redes de media y y alta tensión. Publicación básica CEM (IEC/TR 61000-3-6:1996). Madrid: AENOR.

- AENOR. 2010. UNE-EN 61642.2010. Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos. Empleo de filtros y de condensadores a instalar en paralelo. Madrid: AENOR.

- AENOR. 2006. UNE-EN 50160:2015. Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución. Madrid: AENOR.

- Internacional Standard. 2015. IEC 61000-4-30:2015 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro.

- Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2014. IEEE Std 519 – 2014 IEEE. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.

10.2. LIBROS

ARRILLAGA GARMENDIA, Jesús, EGUILUZ MORÁN, Luis Ignacio. *Armónicos en sistemas de potencia*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, D.L. 1994. 373 p. ISBN 84-8102-085-0.

ARRILLAGA, Jos. *High Voltage Direct Current Transmission*. Stevenage, UK : The Institution of Electrical Engineers, cop. 1998. 299 p. ISBN 0-85296-941-4.

- ARRILLAGA, J; NEVILLE, R. *Power system harmonics*. 2ª ed. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2003. 399 p. ISBN 0-470-85129-5.

- BARRERO GONZÁLEZ, Fermín. 2004. *Sistema de energía eléctrica*. Madrid: Thompson. 368p. 84-9732-283-5.

- PÉREZ ABRIL, Ignacio. *Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos*. Ingeniería energética. 2012, vol. 33, núm. 2. ISSN 1815-5901.

- RAS OLIVA, Enrique. *Teoría de líneas eléctricas de potencia, de comunicación, para transmisión en continua, Vol. I: Regímenes senoidales: Aplicaciones*. Barcelona: Universidad Politécnica, 1975, E.T.S. Ingenieros Industriales: Marcombo. 412p. (Textos monográficos de electrotecnia). ISBN 84-600-5892-1.

- RAS OLIVA, Enrique. *Teoría de líneas eléctricas de potencia, de comunicación, para transmisión en continua, Vol. II: Regímenes no*

senoidales. Aplicaciones. Barcelona: Universidad Politécnica, 1975, E.T.S. Ingenieros Industriales: Marcombo. 412p. (Textos monográficos de electrotecnia). ISBN 84-600-6681-9.

- RASHID, Muhammad Harunur. 2004. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones.* 3ª edición. México: Pearson Educación. 904p. 970-26-0532-6

10.3. ARTÍCULOS

- ABB. "El interruptor HVDC híbrido de ABB". ABB review 2|13. Nº 2 (2013), Páginas 8 a 14.

- ABB. "60 años de HVDC". ABB review 2|14. Nº 2 (2014), Páginas 33 a 41.

- FERNÁNDEZ BEITES, L. 2012. *Introducción a los enlaces de corriente continua de alta tensión.* Apuntes. Universidad Politécnica de Madrid.

- IGNASI FRAU, J, GUTIÉRREZ, J. 2006. *Transporte de energía eléctrica en corriente continua: HVDC.* Artículo. Endesa Distribución.

- RUDERVALL, R, JOHANSSON, J. 2003. *Interconexión de sistemas eléctricos con HVDC.* SEMINARIO INTERNACIONAL DE INTERCONEXIONES REGIONALES, CIGRÉ. ABB.

10.4. SITIOS WEB

- ABB [En línea] <http://new.abb.com/systems/hvdc>

- Abengoa [En línea] <http://www.abengoa.es/web/es/index3.html>

- Alstom [En línea] <http://www.gegridsolutions.com/alstomenergy/grid/microsites/grid/products-and-services/hvdc/index.html>

- Naciones Unidas [En línea] <http://www.un.org/es/index.html>
- Red Eléctrica Española [En línea] <http://www.ree.es/es/>
- Siemens [En línea] <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/hvdc/>