



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL DE FI DE GRAU

**Grau en Enginyeria Elèctrica**

**CARACTERITZACIÓ I ESTUDI D'ENLLAÇOS HVDC**



**Memòria i Annex**

**Autor:** Joan Almirall i Lloret

**Director:** Juan José Mesas García

**Codirector:** Luis Sainz Sopera

**Convocatòria:** Juny de 2021



## Resum

El present document es presenta com: caracterització i estudi sobre la tecnologia d'enllaços HVDC, d'acord al seu títol.

Primerament s'estudien els enllaços d'una manera genèrica a través d'una introducció històrica que mostra tant l'evolució de les tecnologies que envolten l'energia elèctrica, com la història d'aquestes enllaços en particular. També, es procedeix a introduir dins un marc teòric els conceptes més tècnics en referència als enllaços HVDC (com les aplicacions, el funcionament o les diferents tecnologies existents). És conclou aquest apartat plantejant una esquematització genèrica per a enllaços HVDC-VSC.

Seguidament, es procedeix a caracteritzar tres enllaços HVDC-VSC reals i en funcionament a partir d'una base de dades de la forma més extensa i precisa possible, donant valors numèrics a cada element que conforma l'enllaç.

Finalment, per tal de demostrar la utilitat de la prèvia caracterització, es realitza un estudi d'estabilitat d'un enllaç HVDC amb dades provinents d'un article per a poder extreure'n unes conclusions.

Aquest projecte pot ser utilitzat en un futur com a base per comprendre els enllaços HVDC.

## Resumen

El presente documento se presenta como: caracterización y estudio sobre la tecnología de enlaces HVDC, de acuerdo con su título.

Primeramente, se estudian los enlaces de una manera genérica a través de una introducción histórica que muestra tanto la evolución de las tecnologías que rodean la energía eléctrica, como la historia de estos enlaces en particular. También, se procede a introducir dentro de un marco teórico los conceptos más técnicos en referencia a los enlaces HVDC (como las aplicaciones, el funcionamiento o las diferentes tecnologías existentes). Se concluye este apartado planteando una esquematización genérica para enlaces HVDC-VSC.

Seguidamente, se procede a caracterizar tres enlaces HVDC-VSC reales y en funcionamiento a partir de una base de datos de la manera más extensa y precisa posible, dando valores numéricos a cada elemento que forma el enlace.

Finalmente, para demostrar la utilidad de la previa caracterización, se realiza un estudio de estabilidad de un enlace HVDC con datos procedentes de un artículo para poder extraer unas conclusiones.

Este proyecto puede ser usado en un futuro como base para comprender los enlaces HVDC.

## **Abstract**

This paper is presented as a characterization and study of HVDC link technology, according to its title.

Firstly, the links are studied in a generic way through a historical introduction that shows both the evolution of the technologies surrounding electric energy and the history of these links. It also proceeds to introduce within a theoretical framework the more technical concepts related to HVDC links (such as applications, operation, types, or the different existing technologies). This section concludes with a generic schematization for HVDC-VSC links.

Then, we proceed to characterize three HVDC-VSC links which are real and currently on use form a database as extensively and accurately as possible, giving numerical values to each link element.

Finally, to demonstrate the usefulness of the previous characterization, a study of the stability of a HVDC link with data obtained from a paper is carried out in order to draw some conclusions.

This project can be used in the future as a base for understanding HVDC links.



## **Agraïments**

Agraeixo infinitament el suport rebut pel meu tutor Dr. Juan José Mesas Garcia, qui s'ha encarregat de pavimentar el camí que jo mateix he hagut de recórrer. També agrair el suport rebut per part dels meus amics i familiars els quals mai han deixat de creure en mi.

A tots vosaltres, moltes gràcies.





## Glossari

SEP → Sistema Elèctric de Potència.

ENTSO-E → Xarxa Europea de Gestors de Xarxes de Transport d'Electricitat. Prové de les seves sigles en anglès European Network of Transmission System Operators for Electricity.

REE → Red Eléctrica de España o simplement Red Eléctrica. (*Nom propi de companyia*)

DC → Corrent Continu. Prové de les seves sigles en anglès Direct Current.

AC → Corrent Altern. Prové de les seves sigles en anglès Alternating Current.

IEEE → Institut d'Enginyers Elèctrics i Electrònics. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

RD → Reial Decret.

ABB → Asea Brown Boveri. (*Nom propi de companyia*)

LV → Baixa Tensió. Prové de les seves sigles en anglès Low Voltage.

MV → Mitja Tensió. Prové de les seves sigles en anglès Medium Voltage.

HV → Alta Tensió. Prové de les seves sigles en anglès High Voltage.

UHV → Molt Alta Tensió. Prové de les seves sigles en anglès Ultra-High Voltage.

HVDC → Corrent Continu d'Alt Voltatge. Prové de les seves sigles en anglès High-Voltage Direct Current.

HVAC → Corrent Altern d'Alt Voltatge. Prové de les seves sigles en anglès High-Voltage Alternating Current.

UHVDC → Corrent Continu de Molt Alt Voltatge. Prové de les seves sigles en anglès Ultra-High-Voltage Direct Current.

NC → Codi de xarxa. Prové de les seves sigles en anglès Network Code.

UE → Unió Europea.

EEUU → Estats Units.

URSS → Unió de Repúbliques Socialistes Soviètiques (Unió Soviètica).

UPC → Universitat Politècnica de Catalunya.

TFG → Treball de Fi de Grau.

CSC → Convertidor de Font de Corrent. Prové de les seves sigles en anglès Current Source Converter.

CCC → Convertidor Commutat per Condensadors. Prové de les seves sigles en anglès Capacitor Commutated Converter.

LCC → Convertidor Commutat per Línia. Prové de les seves sigles en anglès Line Commutated Converter.

VSC → Convertidor de Font de Tensió. Prové de les seves sigles en anglès Voltage Source Converter.

IGBT → Transistor bipolar de porta aïllada. Prové de les seves sigles en anglès Insulated Gate Bipolar Transistor.

GTO → Tiristor desactivat per comporta. Prové de les seves sigles en anglès Gate Turn-Off Thyristor.

FACTS → Sistemes Flexibles de Transport en Corrent Alterna. Prové de les seves sigles en anglès Flexible Alternating Current Transmission Systems.

IEA → Agència Internacional de l'Energia. Prové de les seves sigles en anglès International Energy Agency.

OMIE → Operador del Mercado Ibérico de Energía.

THD → Distorsió Harmònica Total. Prové de les seves sigles en anglès Total Harmonic Distortion.

OHL → Línia aèria. Prové de les seves sigles en anglès Overhead Line.

RMS → Arrel del Valor Quadràtic Mitjà (Valor Eficax). Prové de les seves sigles en anglès Root Mean Square.

PWM → Modulació per Amplada de Polsos. Prové de les seves sigles en anglès Pulse-Width Modulation.

MMC → Convertidor Modular de Diversos Nivells. Prové de les seves sigles en anglès Modular Multi-Level Converter.

HSNBS → Interruptor de Bus Neutre d'Alta Velocitat. Prové de les seves sigles en anglès High – Speed Neutral Bus Switch.

HSGS → Interruptor de Terra d'Alta Velocitat. Prové de les seves sigles en anglès High – Speed Ground Switch.

MRTB → Interruptor de Transferència de Retorn Metà·lic. Prové de les seves sigles en anglès Metallic Return Transfer Braker.

GRTS → Interruptor de Transferència de Retorn a Terra. Prové de les seves sigles en anglès Ground Return Transfer Switch.

SAPP → Pool d'Energia del sud d'Àfrica. Prové de les seves sigles en anglès Southern African Power Pool.

CLI → Caprivi Link Interconnection.

INELFE → Interconnexió Elèctrica França-Espanya.

RTE → Xarxa de transport d'electricitat. Prové de les seves sigles en francès Réseau de Transport d'Électricité.

EEPR → Programa Energètic Europeu per a la Recuperació. Prové de les seves sigles en anglès European Energy Programme for Recovery.

EWIC → East-West Interconnection.

IEA → Agència Internacional d'Energia. Prové de les seves sigles en anglès International Energy Agency.

CO<sub>2</sub> → Diòxid de carboni.

GHG → Gas d'Efecte Hivernacle. Prové de les seves sigles en anglès Greenhouse Gas.

USD → Dòlar dels Estats Units. Prové de les seves sigles en anglès United State Dollar.

EUR → Euro

SO → Sistema Operatiu.

CNMC → Comissió Nacional dels Mercats i la Competència.

LTI → Sistema continu i invariant en el temps. Prové de les seves sigles en Anglès Linear Time-Invariant System.

KCL → Llei de Corrents de Kirchhoff. Prové de les seves sigles en Kirchhoff's Current Law.

KVL → Llei de Voltatge de Kirchhoff. Prové de les seves sigles en Kirchhoff's Voltage Law.

SISO → Entrada Única i Sortida Única. Prové de les seves sigles en Single-Input Single-Output.

f.d.p → Factor de Potència

P → Potència activa

Q → Potència reactiva

S → Potència aparent

C → Coulomb

V → Volt

ms → Mil·lisegon

A → Ampere

km → Quilòmetre

Hz → Hertz

$\mu\text{m}$  → Micròmetre

Gt → Gigatonelada

\$ → Dollar

€ → Euro

kW → Quilowatts

Mvar → Megavoltampere reactiu

h → hora

*Nota:* Els termes que puguin resultar confusos o apareguin per primera vegada i siguin molt concrets es comentaran a peu de pàgina per contextualitzar i facilitar comprensió del mateix text.



## Sumari

<b>RESUM</b>	<b>3</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>5</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>7</b>
<b>GLOSSARI</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>17</b>
1.1. Context	22
1.2. Motivació	25
1.3. Objectius	26
1.4. Abast	26
<b>2. DESCRIPCIÓ DELS ENLLAÇOS HVDC</b>	<b>29</b>
2.1. Introducció històrica als sistemes HVDC	29
2.2. Funcionament del transport HVDC	33
2.3. Comparativa HVDC i HVAC	44
2.3.1. Consideracions tècniques	45
2.3.2. Consideracions econòmiques	50
2.3.3. Consideracions mediambientals	53
2.4. Classificació d'enllaços HVDC	54
2.4.1. Segons la tecnologia	54
2.4.2. Segons el tipus de configuració	58
2.4.3. Segons la connexió de l'enllaç	60
2.5. Components de la tecnologia d'enllaços HVDC-VSC	63
2.5.1. Transformadors de conversió	63
2.5.2. Convertidors estàtics	64
2.5.3. Filtres	71
2.5.4. Línies de transport en DC	73
2.5.5. Interruptors	75
2.6. Informació necessària per caracteritzar enllaços HVDC	76
<b>3. CARACTERITZACIÓ D'ALGUNS ENLLAÇOS HVDC EXISTENTS ARREU DEL MÓN</b>	<b>79</b>
3.1. Caprivi Link	81
3.1.1. Informació general	81
3.1.2. Informació tècnica	84

3.2.	Interconnexió Elèctrica Espanya - França (Baixàs – Santa Llogaia).....	87
3.2.1.	Informació general.....	87
3.2.2.	Informació tècnica.....	90
3.3.	East-West Interconnection (EWIC).....	94
3.3.1.	Informació general.....	94
3.3.2.	Informació tècnica.....	97
<b>4.</b>	<b>ESTUDI D’ESTABILITAT ASSOCIAT A UN ENLLAÇ HVDC _____</b>	<b>99</b>
4.1.	Càlculs previs a l’estudi.....	99
4.2.	Simulació mitjançant MATLAB.....	109
<b>5.</b>	<b>ANÀLISI DE L’IMPACTE AMBIENTAL _____</b>	<b>121</b>
	<b>PRESSUPOST _____</b>	<b>123</b>
	<b>CONCLUSIONS _____</b>	<b>125</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA _____</b>	<b>127</b>
	<b>ANNEX _____</b>	<b>133</b>



# 1. Introducció

L'Institut d'Estudis Catalans en la segona versió del seu diccionari de la llengua catalana, defineix investigar com:

*v. tr. [LC] Cercar de descobrir o conèixer (alguna cosa) indagant i examinant atentament tot vestigi, tot indici, etc. Investigar les causes d'un fenomen.*

D'aquesta manera el present treball pretén investigar conceptes relacionats amb l'Enginyeria, concretament es veu emmarcat dins la branca de l'Enginyeria Elèctrica que estudia els Sistemes Elèctrics de Potència (*Electric Power Systems*<sup>1</sup>), altrament, fruit de la proximitat i relació de conceptes bàsics també es tractaran temes de l'àmbit de l'Electrònica de Potència (*Power Electronics*<sup>2</sup>).

Com a treball previ a la redacció del projecte, s'ha dut a terme una recerca d'informació relacionada amb l'objecte d'estudi d'aquest Treball de Fi de Grau per tal de poder comprendre tant els conceptes generals com els específics, els quals es desenvoluparan amb profunditat al llarg del present document. Tota la informació que s'ha emprat en aquest projecte ha estat obtinguda a través de diferents recursos en línia, així com llibres i articles, tal com és reflexa amb claredat a la bibliografia. Altrament, per al desenvolupament del marc pràctic s'utilitzà una base de dades desenvolupada mitjançant *MATLAB*<sup>3</sup> per *Cristina Garcia Aguilar* en el seu TFG "*Descripción y estudio de los enlaces HVDC en los sistemas eléctricos*" de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona a la UPC [17].

Per poder fer front a l'estudi realitzat s'introdueix una sèrie de conceptes bàsics relacionats amb l'energia elèctrica, on interessen tres aspectes fonamentals: la generació, el transport i la distribució. Aquests tres processos estan ordenats estrictament per l'ordre que segueix l'energia elèctrica des de que es genera, fins que es consumeix.

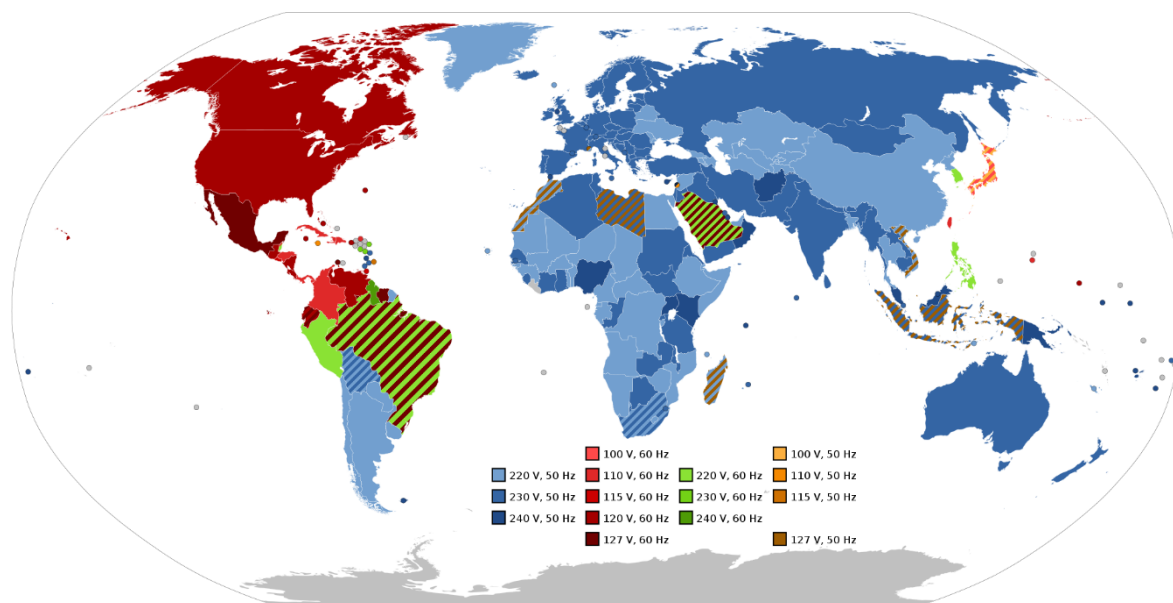
---

<sup>1</sup> Matèria encarregada d'estudiar els components elèctrics necessaris per subministrar, transferir i finalment consumir l'energia elèctrica.

<sup>2</sup> L'electrònica de potència implica l'estudi d'equips electrònics que usen semiconductors així com transistors o díodes amb la finalitat de controlar i convertir voltatges significativament elevats.

<sup>3</sup> MATLAB és un programari d'anàlisi numèrica, un llenguatge de programació i un entorn de computació numèrica creat per la companyia MathWorks.

Degut a la impossibilitat en l'actualitat d'emmagatzemar energia elèctrica d'una manera suficientment eficient en grans quantitats, l'energia es consumida pràcticament en el mateix instant en que és generada; per a que això sigui possible s'ha establert un sistema que permet transportar l'energia a través de llargues distàncies, des d'un punt de generació fins un punt de consum, regulant el procés en temps real. Aquest sistema és denominat Sistema Elèctric de Potència. Els valors de tensió del SEP espanyol són 400, 220, 132, 66, 20, 0,4 i 0,23 kV i la xarxa es caracteritza per treballar a una freqüència de 50 Hz i formar part de l'ENTSO-E.



**Figura 1.1:** Sistemes Elèctrics de Potència arreu del món (Voltatge i Freqüència).

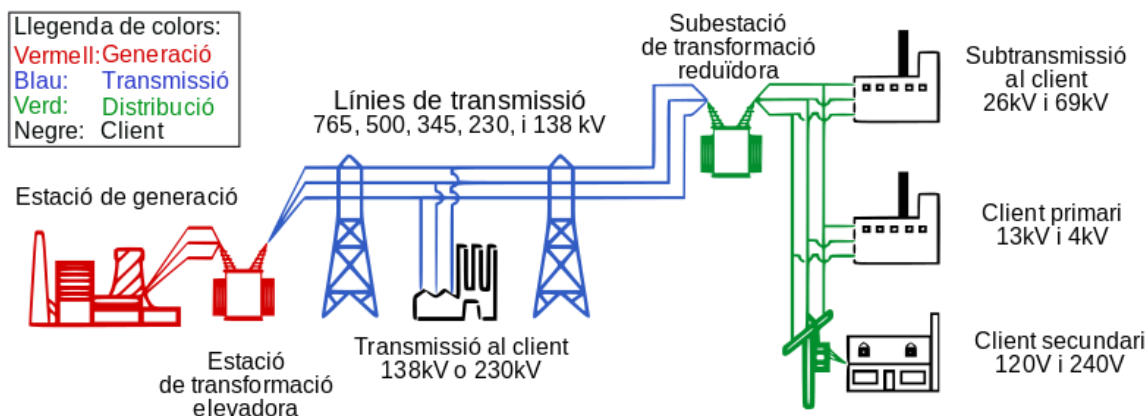
La generació consisteix en la creació d'electricitat mitjançant la transformació d'altres tipus d'energia (cinètica, química, tèrmica,...) aquest procés es duu a terme en les centrals elèctriques les quals poden usar com a font recursos renovables com podria ser una central eòlica o recursos no renovables com podria ser una central de *cicle combinat*<sup>1</sup>.

Seguidament, l'energia elèctrica ha de ser transportada des del punt de generació fins al punt de distribució; per a fer-ho generalment s'utilitzen estacions de transformació que eleven la tensió fins arribar a la tensió de transport. El transport d'energia elèctrica es duu a terme a tensions elevades, operant a AT, ja que a major tensió però igual potència el corrent disminueix

<sup>1</sup> Es denomina cicle combinat a aquell procés on existeixen dos cicles termodinàmics en un mateix sistema, un dels quals té com a fluid de treball el vapor d'aigua i l'altre un gas producte d'una combustió. Els combustibles més utilitzats per les centrals tèrmiques de cicle combinat són el gas natural, el petroli i el carbó.

i per tant les pèrdues per *Efecte Joule*<sup>1</sup> són menors. D'aquesta forma la tensió es va reduint a mesura que l'energia es va repartint per abastir els consumidors a través del sistema

Posteriorment, una nova estació de transformació la redueix per adequar-la a la tensió de distribució que generalment serà MV o LV, és en aquest punt on l'energia elèctrica és consumida pels usuaris.



**Figura 1.2:** Diagrama de la xarxa elèctrica Nord-Americana.

La Llei 17/2007 va ratificar la condició de Red Eléctrica de España (REE) com a gestor de transport i li va atribuir la funció de transportista únic amb règim d'exclusivitat a Espanya. L'any 2010 Red Eléctrica adquirí els actius de Balears i Canàries, culminant així aquest procés fet que va suposar la consolidació definitiva del model de transportista únic i operador del sistema. Com a gestor del SEP espanyol, REE es responsable de desenvolupar i ampliar la xarxa si es necessari, així com de realitzar-ne el corresponent manteniment, gestionar el flux energètic amb els sistemes extrapeninsulars i garantir l'accés de tercers a la xarxa de transport amb igualtat de condicions.

<sup>1</sup> És conegut com a Efecte Joule el fenomen irreversible per al qual si en un conductor hi circula un corrent elèctric, part de l'energia es transforma en calor.

La principal associació d'enginyers a nivell mundial dedicada a la normalització i al desenvolupament d'àrees tècniques defineix en el *IEEE std. 141 de 1993* la gran majoria de conceptes relacionats els sistemes elèctrics. En aquest mateix document també s'hi recullen els valors de tensió nominal per als diferents nivells de tensió establerts, així doncs: es defineix com a valors de Baixa Tensió (LV) voltatges inferiors a 1.000V, mitja tensió (MV) voltatges igual o superiors a 1.000 V i inferiors a 100.000V i Alta Tensió (HV) valors de voltatge d'entre 100.000V i 230.000V a partir d'aquest valor, es considera Extra-High Voltatge i Ultra-High Voltage.

La legislació espanyola considera baixa tensió (LV) d'acord al *RD 842/2002* les tensions inferiors a 1.000 V per a corrent alterna i 1.500 V per a corrent continua. Mentre que pel que fa a Mitja i Alta Tensió (MV i HV), la tensió nominal es divideix en 4 categories d'acord al *RD 223/2008* i si en la línia existeixen circuits o elements en els quals s'utilitzin diferents tensions, el conjunt de la línia es considerarà del valor de la major tensió nominal.

- a) Categoria Especial: la tensió nominal és igual o superior a 220 kV. La xarxa de transport d'electricitat (normalment a grans distàncies) es troba normalment en l'alta tensió de Categoria Especial.
- b) Primera categoria: la tensió nominal és inferior a 220 kV i superior a 66 kV. La xarxa de transport i part del sistema de distribució d'energia elèctrica a espanya, se sol trobar en aquesta categoria.
- c) Segona categoria: la tensió nominal és igual o inferior a 66 kV i superior a 30 kV. En aquesta categoria s'hi sol trobar únicament part del sistema de distribució d'energia elèctrica.
- d) Tercera categoria: la tensió nominal és igual o inferior a 30 kV i superior a 1 kV. Aquesta categoria és l'anomenada Mitja Tensió (MT), formen part d'aquesta categoria grans consumidors com hospitals, aeroports o determinades indústries.

El corrent continu (DC) circula contínuament en un sol sentit, com és en el cas d'una bateria o una pila. Els primers circuits elèctrics que es van comercialitzar als EEUU eren en DC, però el fet que el corrent continu no sigui fàcilment convertible a voltatges superiors o inferiors, va fer que personatges com *Nikola Tesla (1856-1943)*<sup>1</sup> lluitessin per estandarditzar el corrent altern (AC); el qual es presentava com un corrent que canviava el sentit del corrent cada cert nombre de temps i permetia ser convertit a diferents voltatges més fàcilment usant uns aparells coneguts com a transformadors.

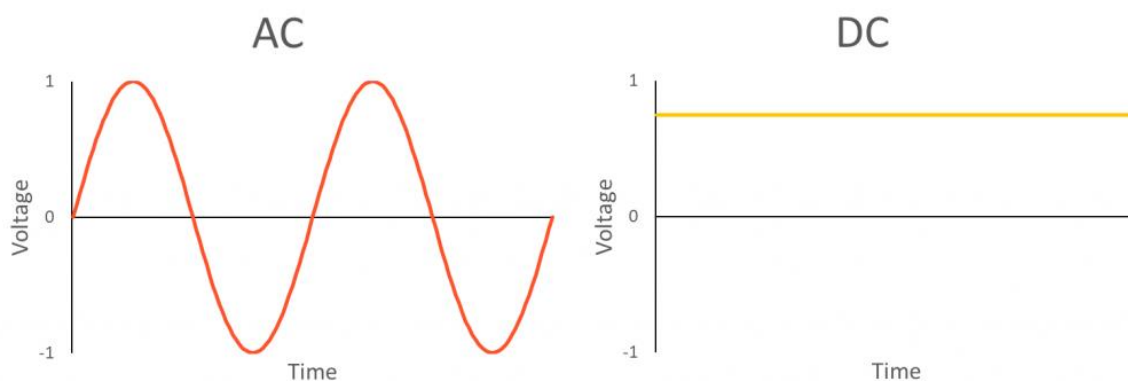


Figura 1.3: Voltatge AC vs. DC en el temps.

Aquesta rivalitat entre tecnologies esdevingué *the war of the currents*<sup>2</sup> viscuda des de l'inici de la dècada de 1880 i que s'allargà fins pràcticament l'inici del s.XX, tot i que en l'actualitat la rivalitat sorgida anys enrere ha quedat sent pal·liada, el debat tècnic sobre quina tecnologia és més convenient segueix present i depèn de cada situació en particular.

Així doncs aquest treball pretén ser un estudi sobre enllaços HVDC, una tecnologia capaç de transportar grans quantitats d'energia a grans distàncies i amb unes pèrdues relativament petites. Aquests enllaços es presenten com a substituïts dels tradicionals enllaços HVAC i s'emmarquen dins els equips de transport d'energia elèctrica ja que fan de pont entre la generació elèctrica i la distribució; malgrat la tendència alcista pel que fa a la construcció i disseny de nous projectes d'enllaços HVDC, en l'actualitat els enllaços en AC tenen molta més presència arreu del món degut a la facilitat i senzillesa d'implementació i execució d'aquestes sistemes.

<sup>1</sup> Enginyer elèctric i inventor nascut a l'actual Sèrbia a qui en els últims anys se li atribueixen varis invents durant la primera meitat del s.XIX. com el motor elèctric asíncron o la radio.

<sup>2</sup> Sèrie d'esdeveniments relacionats amb la rivalitat sorgida entre *Thomas Alva Edison (1847-1931)* i *George Westinghouse (1846-1914)* al defensar i proposar sistemes basats en DC i AC respectivament.

## 1.1. Context

El mot electricitat prové del grec [*élektron*], el significat del qual és ambre. Això es deu al fet que *Tales de Milet* (c. 624 aC – c. 547 aC)<sup>1</sup> experimentà, sense tenir coneixement explícit, que aquest material podia adquirir una càrrega elèctrica al ser friccionat amb un altre material com la llana; a aquest fenomen se'l coneix com a efecte triboelèctric.

Malgrat els importants avenços científics en camps com l'astronomia, la física o la biologia durant el s.XVII, període conegut com a Revolució Científica, no fou fins al s.XVIII durant la Revolució industrial, quan molts científics aportaren noves idees en relació a l'estudi de l'electricitat. En aquesta època van aparèixer personatges com *William Watson*, *Benjamin Franklin*, *Charles de Coulomb* o *Alessandro Volta*; cadascú aporta noves idees mitjançant experimentació empírica recollida en la documentació de l'època, però no va ser fins un segle després amb l'aparició de nous protagonistes com *André-Marie Ampère*, *Georg Simon Ohm*, *Joseph Henry*, *Johann Carl Gauss*, *Michael Faraday*, *Heinrich Friedrich Lenz* o *Gustav Robert Kirchhoff* entre molts d'altres, els quals definirien el concepte i la física que descriu l'electró i el comportament amb el seu entorn, així com també les bases de l'electromagnetisme i les primeres aplicacions tecnològiques que obririen un immens ventall de possibilitats.

Tots aquests avenços, van permetre a famosos enginyers i inventors, alguns d'ells ja esmentats amb anterioritat, plasmar els coneixements teòrics en aparells totalment servibles per a la població, fet que esdevingué en l'inici de la Segona Revolució industrial. Encara avui en dia prevalen molts d'aquests invents tals com: la radio, la bugia o fins i tot el motor elèctric.

Així doncs, actualment entenem l'electricitat com una sèries de processos físics relacionats amb el moviment de càrrega elèctrica, la unitat bàsica de la qual és el Coulomb aquest aproximadament, equival a  $6,24 \times 10^{18}$  càrregues elementals<sup>2</sup>. És doncs, el moviment d'aquests electrons l'encarregat de crear el que actualment es coneix com a corrent elèctric, el qual pot ser en AC o DC; segons la interacció dels *camp elèctrics*<sup>3</sup> del seu voltant.

---

<sup>1</sup> Fou un filòsof de l'època clàssica considerat com un dels Set Savis de Grècia.

<sup>2</sup> S'entén per càrrega elemental el mòdul de la càrrega elèctrica d'un electró.

<sup>3</sup> El camp elèctric és el camp generat per un objecte carregat elèctricament, aquest camp genera una força que actua sobre d'altres objectes també carregats elèctricament.

La primera central elèctrica va ser fundada per *Edison Illuminating Company* al 1882, després que Edison aconseguís la patent de la bombeta incandescent (1879), fet que li va permetre vendre l'electricitat que generava als compradors de les seves bombetes. Aquesta central començà subministrant electricitat a 80 clients però tant sols en dos anys augmentà aquest nombre fins als 500 consumidors i és creu que alimentava aproximadament unes 10.000 bombetes.

Les primeres centrals d'Edison funcionaven amb corrent continu, el que impedia transportar l'energia a llargues distàncies. Fou Tesla qui apostà pel corrent altern i juntament amb Westinghouse, van construir al 1895 la central hidroelèctrica “Adams Power Plant Transformer House (Figura 1.4)” de la Cascada del Niàgara, transportant l'electricitat fins a la ciutat de Buffalo aproximadament a uns 40Km de distància del punt de generació.



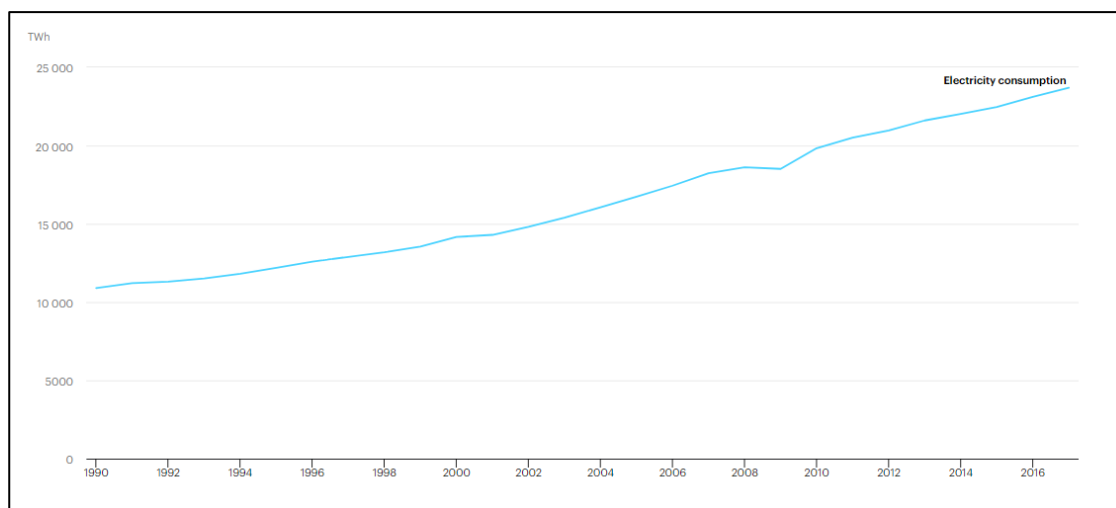
**Figura 1.4:** Adams Power Plant Transformer House, 1941.

Dos nous projectes finalitzats l'any 1898 són l'exemple perfecte per a descriure la rivalitat de corrents, per una banda la central hidroelèctrica Decew Falls a Ontario fou la primera en generar electricitat d'alt voltatge per a ser transportada a gran distància i per altra banda, la central elèctrica de Rheinfelden a Alemanya fou la primera en utilitzar corrent alterna *trifàsica*<sup>1</sup> a 50Hz, l'estàndard en la majoria de països del món.

---

<sup>1</sup> Un sistema trifàsic és un sistema de producció, distribució i/o consum d'energia elèctrica format per tres corrents alternes monofàsiques d'igual freqüència i amplitud.

Si es compara la vida que porten les persones avui en dia amb les de fa 1.000, 500 o inclús 50 anys, es pot afirmar que actualment (a nivell general, i emfatitzant occident) es gaudeix d'una qualitat de vida superior, aquest fet, sumat a l'augment de població a nivell mundial, ha desembocat en un significatiu augment del consum d'energia elèctrica a nivell mundial com es pot observar a continuació:



**Figura 1.5:** Electricitat consumida (TWh) per any.

El planeta Terra es veu sotmès a una situació pràcticament límit degut a l'abús sistemàtic per part de l'ésser humà pel que fa a l'extracció incontrolada tant de recursos naturals com pel que fa a les emissions de partícules contaminants i d'efecte hivernacle. És per aquest motiu que els científics d'arreu del món, s'han abocat a buscar solucions per aquesta problemàtica; és aquí on entren en joc les energies renovables. Aquestes tecnologies juntament amb altres molt més ambicioses com per exemple la *fusió nuclear*<sup>1</sup>, permetran a la humanitat continuar progressant com espècie i deixar de dependre dels recursos naturals amb data de caducitat, el somni de l'energia neta i inesgotable està en mans de científics i investigadors.

<sup>1</sup> La fusió nuclear consisteix en una reacció en la qual dos nuclis atòmics es converteixen en un nucli més pesat. Per exemple dos isòtops deuteri es converteixen en un àtom d'heli. Aquest tipus de processos són coneguts per emetre una gran quantitat d'energia. El projecte més ambiciós relacionat amb aquesta tecnologia es l'ITER, aquest projecte pretén construir un reactor experimental a França amb previsió d'entrar en funcionament l'any 2025.



## 1.2. Motivació

La principal motivació per a la realització d'aquest treball és l'estudi de tecnologies relativament poc comunes o fins i tot desconegudes com és el cas dels enllaços HVDC. Els enllaços HVDC són una tecnologia de transport amb capacitat per a transmetre grans quantitats d'energia elèctrica, els quals degut a les seves característiques són freqüentment usats per al transport marítim d'electricitat.

El potencial d'aquesta tècnica recau en el fet que al igual que els *béns complementaris*<sup>1</sup> són capaços de cobrir una necessitat de manera conjunta però per separat no generen la mateixa utilitat; els Enllaços HVDC i la generació en *parc eòlics offshore*<sup>2</sup> es nodreixen mútuament. En els últims anys, la consciència social o col·lectiva juntament amb altres fets com l'aposta de grans empreses, la liberalització del mercat energètic i una legislació menys intrusiva en referència a l'autoconsum han fet que *l'energia verda*<sup>3</sup> hagi captat una gran part del mercat de generació d'electricitat; cosa que ha impulsat la creació i projecció de nous parcs eòlics i/o fotovoltaics.

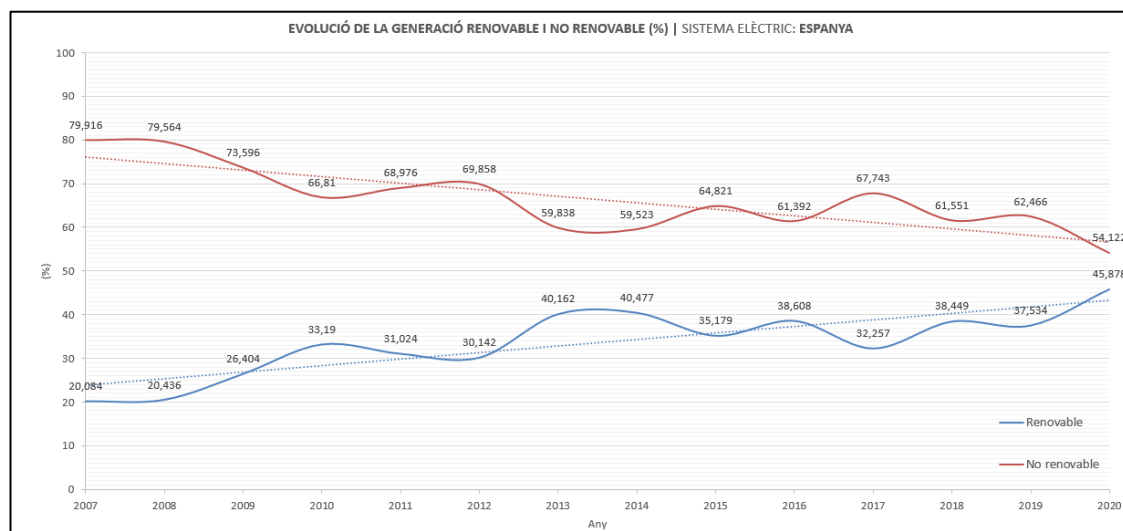


Figura 1.6: Generació elèctrica renovable vs. no renovable (%) per any a Espanya.

<sup>1</sup> Terme emprat en l'economia per a descriure un bé o servei que s'ha d'usar conjuntament amb un altre per a tal de satisfer les necessitats d'un client. Un clar exemple seria la gasolina i els cotxes. La proporció d'aquests béns no és necessàriament de 1:1, sinó que dependrà de cada cas.

<sup>2</sup> Conjunt d'aerogeneradors degudament instal·lats en zones marines amb la finalitat de generar energia elèctrica.

<sup>3</sup> Expressió usada com a sinònim d'energia renovable.

A més a més, l'ús d'aquesta tecnologia no és intrínsecament millor que altres tecnologies com son els enllaços HVAC, així doncs, també es compararan altres alternatives per comprovar i determinar en quins casos quina és la tecnologia més adequada.

Fruit de la combinació d'aquests motius obtenim el motor que empeny aquest projecte el qual pretén estudiar la tecnologia de transport d'energia elèctrica en corrent continu i desenvolupar un aplicatiu mitjançant MATLAB a partir de la prèvia caracterització d'aquests enllaços el qual permeti estudiar algun fenomen associat al funcionament dels esmentats enllaços quan formen part dels sistemes elèctrics de potència.

### **1.3. Objectius**

El principal objectiu d'aquest projecte és realitzar un estudi sobre els enllaços d'alt voltatge en corrent continu i analitzar el seu funcionament a partir d'enllaços que es poden trobar arreu del món. Per a aconseguir-ho, es necessari investigar sobre la tecnologia d'enllaços HVDC per tal de determinar diferents aspectes com la seva viabilitat, la seva utilitat o els seus avantatges respecte d'altres tecnologies mitjançant un estudi purament teòric. Un cop realitzat aquest recull d'informació es procedeix a realitzar la caracterització de diversos enllaços HVDC que es poden trobar arreu del món. Finalment, a partir d'una d'aquestes caracteritzacions, es procedeix a realitzar un estudi que mitjançant un model programat amb MATLAB permeti extreure resultats concloents en relació a algun fenomen associat al funcionament d'un enllaç HVDC en concret.

### **1.4. Abast**

Aquest projecte es desenvolupa dins el marc teòric estudiat en el grau en enginyeria elèctrica, és per això que l'abast d'aquest projecte no sobrepassa els límits establerts pel nivell dels estudis en aquesta formació. Es pretén analitzar enllaços HVDC mitjançant el següent procediment:

Primerament, s'establirà quina informació es necessita conèixer dels enllaços HVDC per posteriorment procedir a la seva caracterització, definint tots els aspectes que es consideren rellevants d'aquesta tecnologia. Seguidament, es procedirà a caracteritzar alguns dels enllaços HVDC existents arreu del món. En tercer lloc, es farà un estudi d'un dels fenòmens associats al funcionament dels esmentats enllaços.

Per últim i per a concloure el treball, s'extraurà un seguit de conclusions que realment seran el resum i agrupament de totes les conclusions que s'hauran anat extraient al llarg del desenvolupament del projecte.



## 2. Descripció dels enllaços HVDC

### 2.1. Introducció històrica als sistemes HVDC

Els sistemes AC i DC han gaudit tant de defensors com de detractors indistintament al llarg del temps, tot i que les primeres xarxes de distribució elèctrica funcionessin en corrent continu, la tecnologia de l'època promogué la utilització del corrent altern com a estàndard pel que fa a les xarxes de distribució arreu del món. Les millores i el perfeccionament de les *màquines elèctriques*<sup>1</sup> reafirmaren encara més el fet que el transport en DC fos totalment anecdòtic però la creixent demanda juntament amb la llunyania entre centres de generació i consumidors provocà l'aparició de problemes amb l'*energia reactiva*<sup>2</sup> dels sistemes. Això, forçà la necessitat d'apostar de nou pels sistemes HVDC, essent aquests una solució a les altes pèrdues en transmissions en llargues distàncies, els quals seguirien en desenvolupament de manera paral·lela durant força temps.

La primera transmissió elèctrica en corrent continu d'alta tensió fou *la transmissió Miesbach-Munic* l'any 1882, aquesta recorria un total de 57 km. El sistema tenia inici al poble de Miesbach, al peu dels Alps on una màquina de vapor activava una *màquina de Gramme*<sup>3</sup> que subministrava corrent continu que era transmès per una línia telegràfica fins a un motor situat al Palau de Vidre de Munic, el qual movia aigua en un circuit tancat i creava un salt d'aigua.

El principal inconvenient per a la transmissió d'energia en corrent continu fou l'incapacitat de disposar d'una tecnologia capaç de convertir AC-DC i DC-AC de manera fiable i econòmicament viable. *August Uno Lamm (1904 – 1989)*, fou un enginyer suec, el qual a dia d'avui és considerat el pare de la transmissió d'energia elèctrica d'alta tensió en corrent continu ja que entre l'any 1929 i 1930 desenvolupà una *vàlvula d'arc de mercuri*<sup>4</sup> d'alt voltatge fet que

---

<sup>1</sup> S'entén per màquina elèctrica un dispositiu capaç de transformar qualsevol forma d'energia en energia elèctrica o viceversa, també aquelles màquines amb capacitat per a transformar l'electricitat de forma convenient. Són considerades màquines elèctriques els generadors, els motors elèctrics i els transformadors.

<sup>2</sup> L'energia reactiva és un tipus d'energia no aprofitable que apareix en els sistemes degut a la presència de camps elèctrics i magnètics provocats per capacitàncies i inductàncies respectivament.

<sup>3</sup> La màquina de Gramme, fou un generador d'energia elèctrica amb capacitat per generar un flux constant de corrent continu.

<sup>4</sup> La vàlvula d'arc de mercuri és un tipus de rectificador elèctric que converteix el corrent AC en DC.

obriria les portes als sistemes HVDC posant punt i final a la problemàtica existent fins al moment.

L'any 1941 es firmà el primer contracte comercial per a la construcció d'un enllaç HVDC de 60 MW de potència a Alemanya. Aquest sistema havia de transportar 150 A amb una tensió de 200 kV. L'enllaç va estar preparat per a funcionar l'any 1945, però fou desmantellat abans de la seva posada en funcionament. A partir de la Segona Guerra Mundial, amb l'increment de les necessitats energètiques, augmentà l'interès per aquest tipus d'enllaços, realment útils per a llargues distàncies, principalment a la Unió Soviètica i Suècia. Així doncs, els primer sistemes moderns de transmissió d'energia en HVDC van ser la interconnexió entre Moscou i Kashira<sup>1</sup> a l'antiga URSS l'any 1951 i la interconnexió de l'illa de Gotland<sup>2</sup> amb Suècia l'any 1954 a través d'un cable submarí de 98km, amb una tensió de 100kV y 200A.



Figura 2.1: Mapa de la Interconnexió HVDC entre Suècia i l'illa de Gotland.

Al llarg dels anys, el desenvolupament dels *dispositius electrònics d'estat sòlid*<sup>3</sup> i *semiconductors*<sup>4</sup> han propiciat, juntament amb la revolució electrònica de finals del s.XX la

<sup>1</sup> Kashira és un poble rus, situat a 115km de la capital i a la vora del riu Oká.

<sup>2</sup> Gotland és una illa Sueca que es troba al mar Bàltic.

<sup>3</sup> Dispositius electrònics construïts totalment de materials sòlids per a tal de distingir-los tant d'elements mòbils (interruptors o relés) com de dispositius predecessors dissenyats a partir de vàlvules de buit.

<sup>4</sup> Element que es comporta com a conductor o com a dielèctric depenent de determinades característiques que el condicionen, com pot ser el camp elèctric o magnètic, la pressió o la temperatura entre d'altres.

conseqüent millora als enllaços HVDC, convertint l'arc de mercuri en una tecnologia totalment obsoleta. Així doncs, en la següent taula es pot observar com en les últimes dècades ha augmentat significativament tant el voltatge com la potència de treball relativa als enllaços HVDC.

Valve type	Year	Voltage (kV)	Power (MW)
Mercury arc	1954	100	20
Mercury arc	1968	533	1,440
Thyristor	1970	50	10
Thyristor	1977	250	500
Thyristor	1978	500	560
Thyristor	1979	400	1,000
Thyristor	1985	500	2,000
Thyristor	1987	600	3,150
Thyristor	2003	500	3,000
Thyristor	2010	800	6,400
Thyristor	2013	800	7,200
Thyristor	2014	1,100	10,000

**Figura 2.2:** Evolució de la potència i voltatge en HVDC-Clàssic.

L'aparició dels Transistors IGBT a principis de la dècada del 1980 i la seva ràpida evolució van donar pas a una nova tecnologia per a les estacions de conversió basada en el Convertidor de Font de Tensió (VSC), tot i que la implementació d'aquesta tecnologia necessita d'estacions de conversió amb components completament nous que durant un temps van frenar la seva utilització. També fou a finals del s.XX quan els Convertidors Commutatats per Condensadors (CCC) van ser introduïts al mercat, introduint solucions a sistemes i es poden trobar operant comercialment des de 1999. Previ a aquests desenvolupaments, la tecnologia dels enllaços HVDC utilitzava exclusivament convertidors commutatats per tiristors (LCC), motiu pel qual, quan es parla de HVDC clàssic, es fa referència a aquesta tecnologia en concret.

Les diferents tecnologies anomenades en aquesta pàgina (VSC, CCC i LCC) es veuran descrites en el punt 2.3. *Classificació d'enllaços HVDC.*

Fins ara, la majoria de línies de transmissió elèctrica HVDC amb potències superiors a 2.000 MW, han estat dissenyades per a treballar a una tensió entre 500 i 600 kV. A mesura que la demanda ha augmentat, aquests nivells han deixat de ser suficients com és en el cas de les noves estacions hidroelèctriques xineses, on s'ha d'enviar entre 5.000 i 8.000 MW a una distància de 2.000 km. Les principals empreses del sector van demostrar que tenint en compte la inversió, les pèrdues i les limitacions tècniques el corrent continu a tensió ultra alta (UHVDC) de 800 kV era la millor opció.

La multinacional ABB desenvolupà una tecnologia anomenada *HVDC-Light* (evolució de la tecnologia VSC) que permet millorar l'estabilitat i el control de l'energia reactiva en cada extrem de la xarxa. A més a més, pot operar a molt baixa potència de curtcircuit conservant permanentment la capacitat d'arrancar sense energia externa, permetent la utilització de cables específics per aquesta tecnologia en concret.



**Figura 2.3 i 2.4:** Mass-impregnated HVDC cables i Extruded polymer HVDC cables respectivament.

Els cables submarins amb massa impregnada s'utilitzen des de 1895. ABB ha lliurat més de 1.700km d'aquests cables arreu del món. Un exemple destacable és l'enllaç de 580 km de cable de 700MW / 450kV entre Noruega i els Països Baixos.

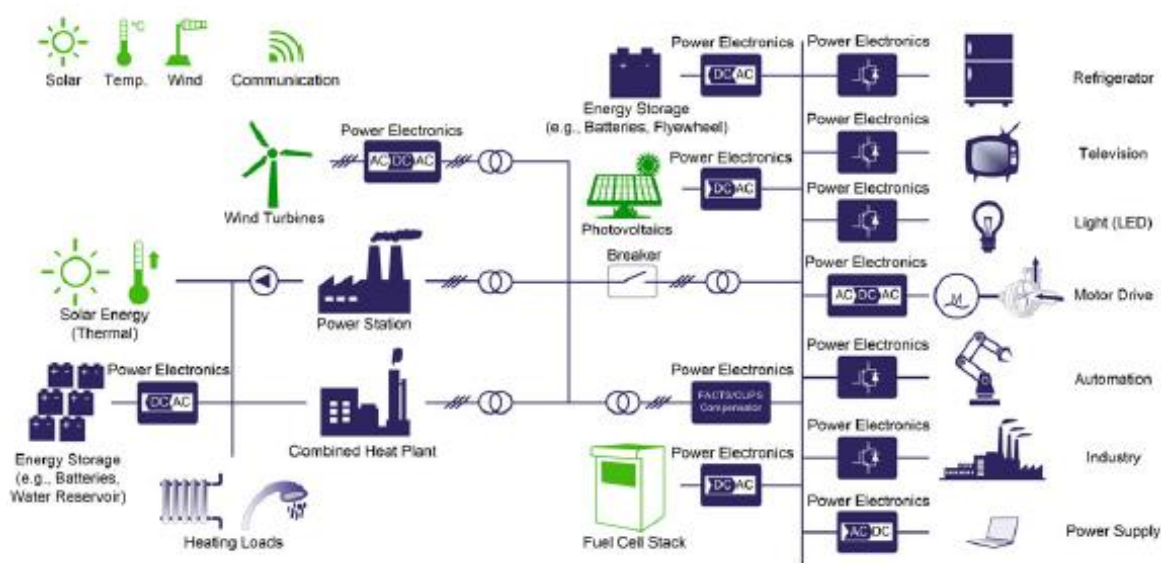
Els cables de polímer extruït (*HVDC-Light*) tenen un aïllament de polímer de polietilè reticulat extruït. Els cables DC extruïts són una part important del concepte *HVDC-Light* ja que, la seva resistència i la flexibilitat els fan aptes per a l'ús submarí.



## 2.2. Funcionament del transport HVDC

En aquest punt s'ha tingut en compte un sistema HVDC idealitzat com a sistema de transport entre dos sistemes de corrent altern, no obstant per entendre el seu funcionament, la informació és contextualitzada.

Degut a les diferències físiques que existeixen entre el corrent altern i el continu, es necessari l'ús de dispositius que transformin degudament el corrent elèctric per tal d'adequar-lo al requerit, aquestes dispositius son coneguts com convertidors estàtics de potència.



**Figura 2.5:** El rol de l'Electrònica de Potència en la generació, transmissió, distribució i consum d'electricitat.

D'entre les tecnologies que donen suport al creixement dels sistemes de transport en corrent continu, en resum, de l'energia neta, de la millora de l'eficiència energètica i del desenvolupament i millora de sistemes de transmissió l'electrònica de potència ha estat la principal variable. Ha proporcionat una conversió eficient i un control flexible de l'energia elèctrica en els darrers anys, els convertidors d'electrònica de potència fan possible la connexió de generadors d'energia renovable als sistemes de potència heretats, tal i com es mostra en la figura anterior.

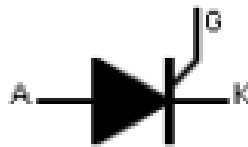
Els principals components electrònics que donen sentit a l'electrònica de potència relacionada amb els enllaços de corrent continu en alt voltatge són molts, d'entre ells podem destacar:

El díode es un component no controlat que permet la circulació de corrent entre els seus terminals en un determinat sentit, mentre que bloqueja en el sentit contrari.



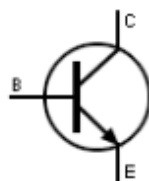
**Figura 2.6:** Simbologia d'un díode.

Els tiristors són una família d'elements electrònics semicontrolats que consten de tres terminals, l'ànode, el càtode i la porta. Son commutadors biestables, és a dir permeten o bloquegen el pas del corrent depenent de l'excitació que s'injecti a través de la porta. Els tiristors GTO són tiristors que com a particularitat permeten tant encendre's com també apagar-se a través d'un impuls de corrent negativa en el terminal de la porta.



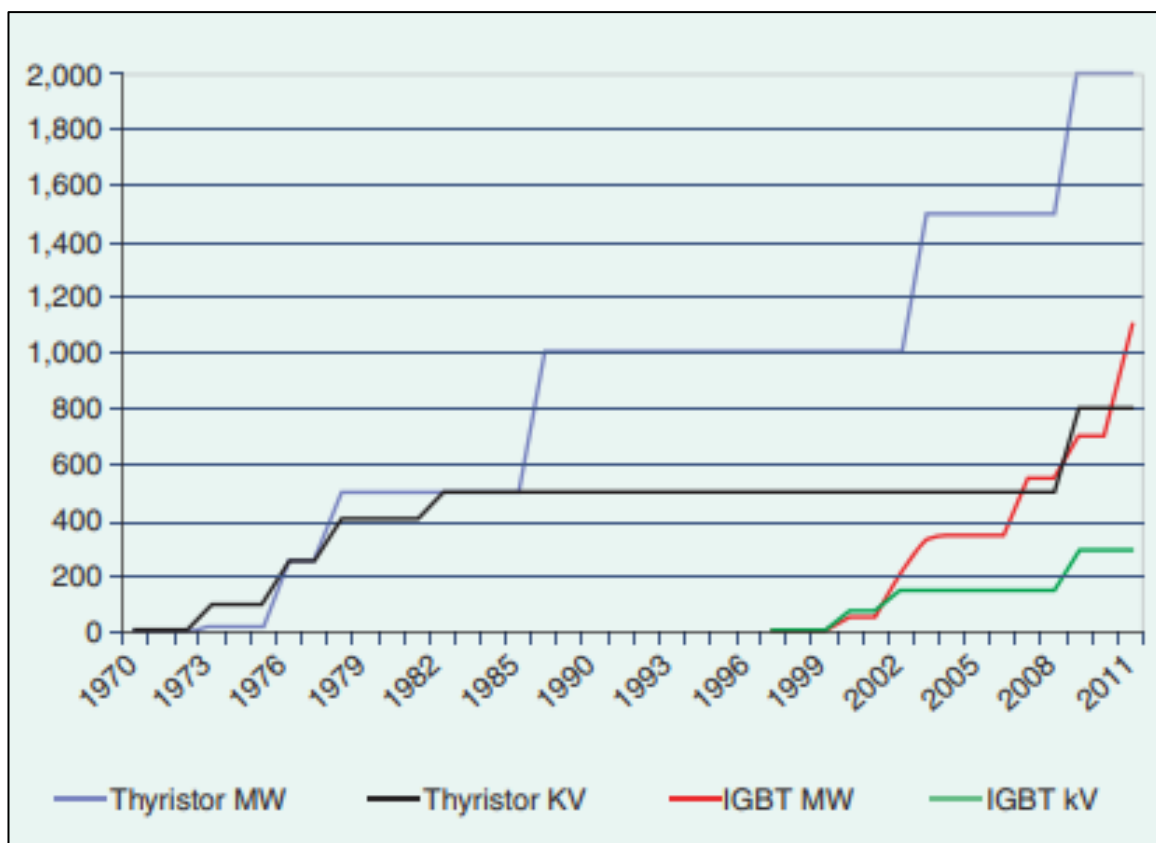
**Figura 2.7:** Simbologia d'un tiristor.

El transistor és un element controlat amb tres terminals diferenciats l'emissor, el col·lector i la base. El transistor de porta aïllada (IGBT) s'utilitza normalment com un interruptor per a controlar altes potències, per a la seva encesa simplement es necessita una tensió positiva d'entrada superior a una tensió que normalment ronda els 15V; aquest temps d'encesa sol ser inferior al ms.



**Figura 2.8:** Simbologia d'un transistor.

Gràcies al desenvolupament de l'electrònica de potència, en els últims anys han aparegut nous dispositius ampliant el ventall de possibilitats que aquest camp pot comprendre. Les característiques de cadascun d'aquestes components dependrà única i exclusivament de la tecnologia implementada en la construcció de l'enllaç HVDC en qüestió. En la següent figura es mostra l'evolució al llarg dels anys dels tiristors i dels transistors IGBT:



**Figura 2.9:** Desenvolupament dels Tiristors i Transistors IGBT al llarg dels anys.

Mitjançant els elements anteriorment exposats es poden dissenyar elements més complexes, els quals permeten la conversió de la forma d'ona del corrent, arribant a canviar així la seva naturalesa, característica indispensable per al correcte funcionament dels enllaços HVDC.

Els convertidors AC-DC, també coneguts com a rectificadors, transformen el corrent altern ja sigui monofàsic o trifàsic en corrent continu. Aquests convertidors són realment comuns, ja que, la majoria d'elements electrònics connectats a la xarxa en disposen per a tal de poder alimentar-se, poden ser controlats o no controlats i amb commutació natural o forçada.

A continuació podem observar un rectificador trifàsic de 6 polsos, no controlat i amb commutació natural:

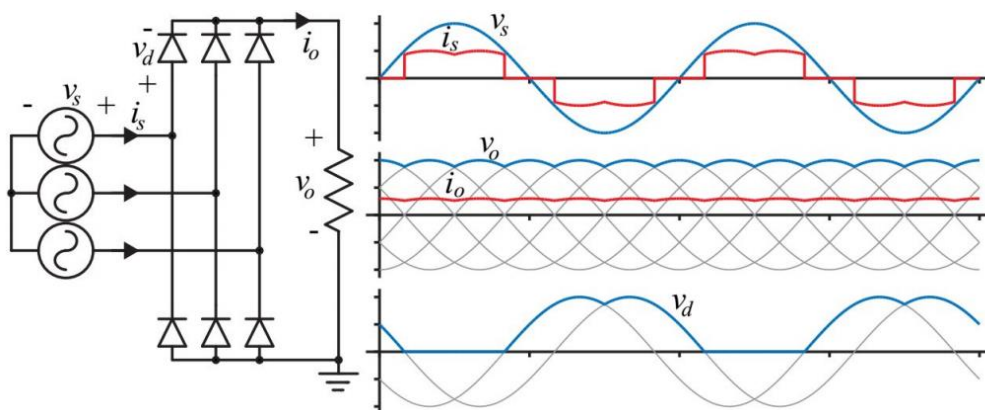


Figura 2.10: Comportament d'un rectificador trifàsic de 6 polsos.

Els convertidors DC-AC, anomenats inversors, transformen el corrent continu en corrent altern, podent controlar tant la freqüència com el valor de la tensió de sortida. S'usen en accionaments de màquines elèctriques per a tal d'adequar el corrent al de la xarxa, són generalment de commutació forçada i poden ser monofàsics o polifàsics.

A continuació podem observar un inversor monofàsic de mig pont a partir del qual es pot obtenir una senyal quadràtica.

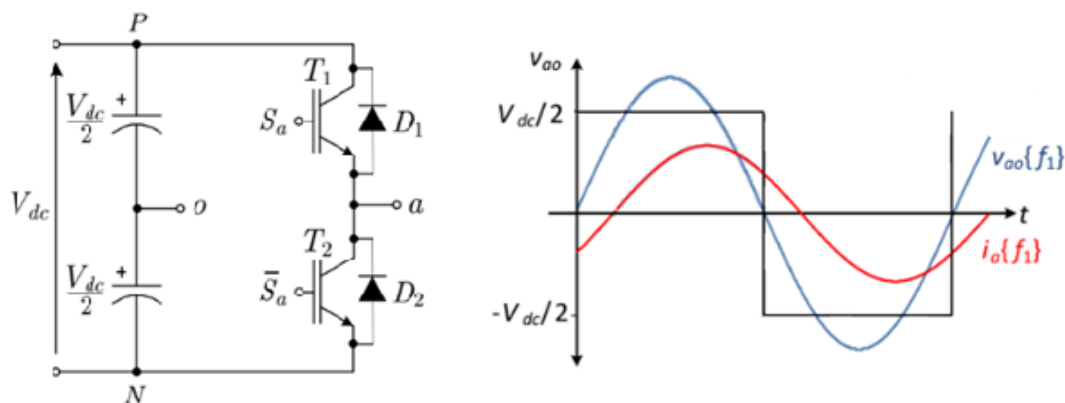


Figura 2.11: Comportament d'un inversor monofàsic de mig pont.

A més a més, també es poden dissenyar components DC-DC els principals convertidors són el convertidor elevador boost i el convertidor reductor buck. Aquests permeten augmentar i disminuir la tensió en corrent continu respectivament; tenint una eficiència pròxima al 90%.

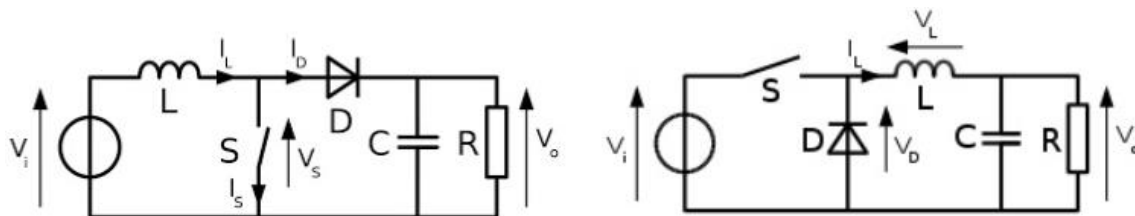


Figura 2.12 i 2.13: Esquema bàsic d'un elevador boost i d'un reductor buck respectivament.

Un problema que sorgeix a l'implementar convertidors estàtics de potència (rectificadors i inversors, per exemple) en els nostres sistemes és l'aparició de *corrents harmòniques*<sup>1</sup>, aquests són un del principals factor a l'hora d'exercir influència sobre la qualitat d'una xarxa elèctrica. A continuació es mostra l'exemple d'una càrrega lineal en comparació amb una de no lineal:

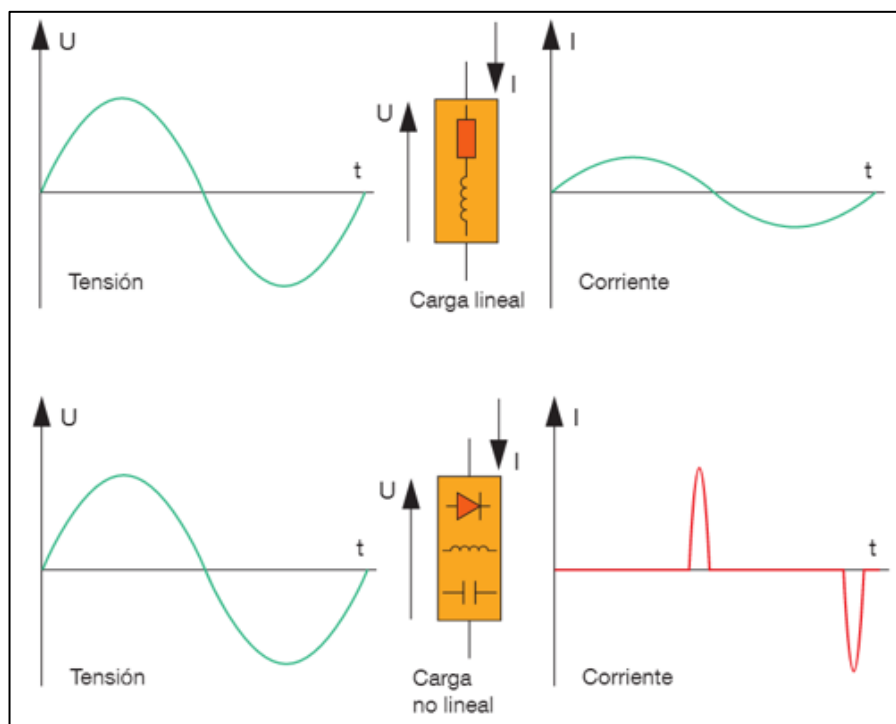


Figura 2.14: Aparició de corrents harmònics a l'aplicar tensió a una càrrega no lineal.

<sup>1</sup> Els corrents harmònics o simplement harmònics, provoquen distorsions en la forma d'ona d'una senyal. El matemàtic *Jean-Baptiste Fourier* (1768 – 1830) va demostrar que es pot descompondre aquesta senyal com a suma de corrents amb freqüència múltiple a la freqüència fonamental.

Així doncs, s'anomena circuit no lineal tot aquell circuit compost d'una o més càrregues no lineals, les quals aporten distorsió a la senyal<sup>1</sup> resultant.

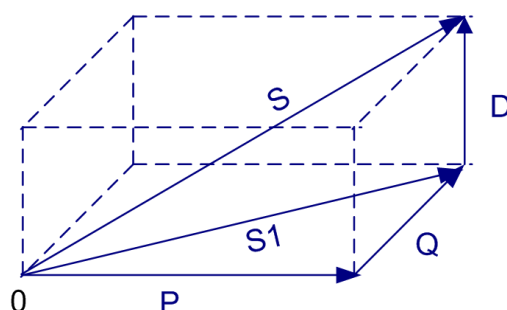
En circuits no lineal la forma d'ona no es perfectament sinusoidal degut a que les càrregues no lineals creen corrents harmòniques que poden ser representades mitjançant la distorsió harmònica total (THD).

$$THD = \frac{\sum \text{Potència del harmònics}}{\text{Potència de la freqüència fonamental}} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{P_0} \quad (1)$$

Aquestes distorsions solen mesurar-se mitjançant analitzadors de xarxes i s'expressen amb tant per cent.

És per això que els enllaços HVDC així com molts altres sistemes disposen de filtres per evitar minimitzar aquests harmònics ja que aquests poden provocar sobrecàrrega dels conductors, sobreescalfament dels transformadors i sobrecàrrega dels condensadors encarregats de corregir el *factor de potència*<sup>2</sup> del sistema.

En aquest cas concret de circuits no lineals, la potència aparent (S), que normalment està composta únicament per la potència activa (P) i reactiva (Q), estarà composta per una tercera component de distorsió (D). Resultant el següent triangle de potències:



**Figura 2.15:** Representació de les components que formen la potència reactiva per a tensions alternes no sinusoidals.

<sup>1</sup> Ens referim a senyal com a una magnitud física portadora d'informació, pot ser analògica o digital.

<sup>2</sup> El f.d.p. és la relació entre la potència activa P y la potència aparent S.

En aquest cas el factor de potència serà:

$$f. d. p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (2)$$

On

$P$  és la potència activa.

$Q$  és la potència reactiva.

$D$  és la component de distorsió.

És a dir, donat un sistema no lineal, el factor de potència serà menor a un sistema lineal degut a la component  $D$  referent als harmònics. Això provocarà problemes com per exemple, que per una determinada potència activa ( $P$ ) i un determinat voltatge ( $V$ ), la demanda de corrent ( $I$ ) sigui superior; derivant en la necessitat d'utilitzar cables de major secció.

A més a més, es necessari utilitzar un transformador per adequar la tensió de la xarxa als nivells necessaris per al correcte funcionament del sistema, per aquest fet s'utilitzen transformadors els quals proporcionen *aïllament galvànic*<sup>1</sup> el qual separa físicament el circuit elèctric en dos. Afegint, també que per una determinada potència, si s'eleva la tensió la intensitat resultant disminueix, el que es tradueix com a reducció de pèrdues associades a la resistència elèctrica del cable.

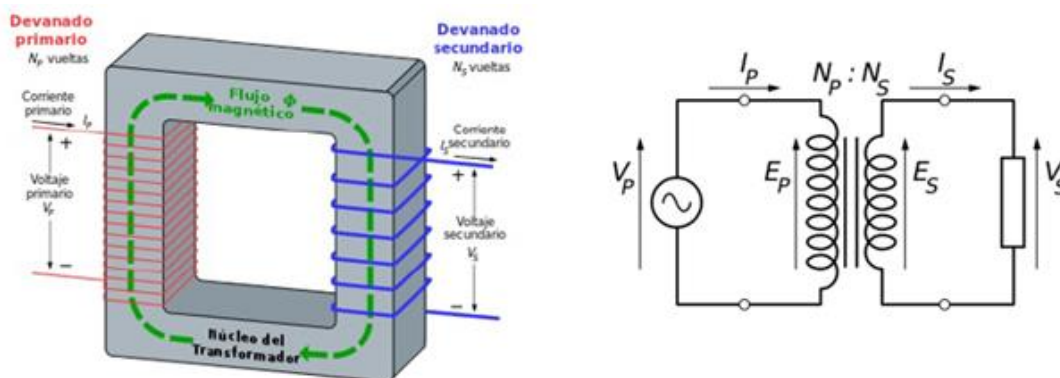


Figura 2.16 i 17: Representació gràfica d'un transformador i esquema ideal respectivament.

<sup>1</sup> En equips de potencia es refereix al fet que el circuit de sortida es troba elèctrica i física aïllat del circuit d'entrada; és a dir, no existeix un pas de corrent entre els dos circuits.

Amb la finalitat de simplificar l'anàlisi en aquest apartat de caràcter introductori, es considera un transformador monofàsic ideal, tal que:

- No existeixen pèrdues, de manera que la potència d'entrada es igual a la de sortida
- No hi ha caiguda de tensió interna, es a dir la tensió del primari serà proporcional a la del secundari.

D'aquesta manera es poden definir les equacions, on  $S_p$  i  $S_s$  son la potència aparent en el terminal primari i secundari respectivament. A més, per simple aplicació de la *Llei d'Ohm*<sup>1</sup> es poden deduir les expressions fonamentals d'un transformador ideal:

$$S_p = S_s \quad (3)$$

$$\frac{N_p}{N_s} = a \quad (4)$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = a \quad (5)$$

On:

$V_p$  i  $V_s$  són el voltatge en el terminal primari i secundari respectivament.

$I_p$  i  $I_s$  són la intensitat que circula pel primari i secundari respectivament.

$N_p$  i  $N_s$  són el nombre d'espises del debanat primari i secundari respectivament.

$a$  és la relació de transformació.

Els sistemes HVDC utilitzen corrent continu per a la transmissió massiva d'energia elèctrica, a diferència dels casos més comuns que encara avui en dia utilitzen sistemes de corrent altern. Se sap que per a *grans distàncies de transmissió*<sup>2</sup>, els sistemes HVDC poden ser menys costosos i

<sup>1</sup> Aquesta llei estableix que el corrent que travessa un circuit elèctric és directament proporcional a la diferència de potencial que hi ha entre els seus extrems i inversament proporcional a la resistència del circuit.

<sup>2</sup> Es considera com a distància lliardar d'inflexió, 800km per a línies aèries i 50km per a línies submarines, s'aprofundeix més en aquestes aspecte en el punt 2.4 *Comparativa HVDC i HCVAC*.



tenir menys pèrdues que els sistemes en corrent altern. Per a sistemes submarins, la tecnologia HVDC permet evitar el gran corrent necessari per a carregar i descarregar la capacitat del cable cada cicle.

Per altra banda, per a distàncies menors, l'alt preu dels sistemes en corrent continu, necessita ser justificat en contraposada amb els sistemes en corrent altern que son de base més econòmics, malgrat això, els enllaços en corrent continu ofereixen beneficis tals com que permeten la interconnexió entre sistemes de corrent altern no sincronitzats, també permet la transferència d'energia entre xarxes que no treballen a la mateixa freqüència, com el cas més freqüent 50 Hz i 60 Hz. Així doncs, els sistemes HVDC milloren l'estabilitat i l'economia de les xarxes, al permetre l'intercanvi bidireccional d'energia entre xarxes.

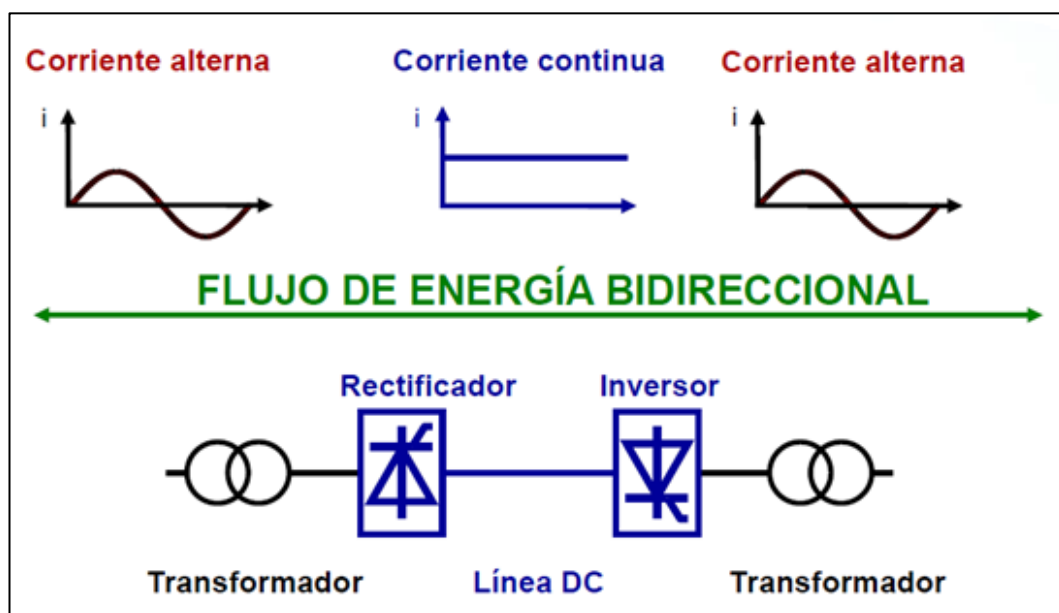


Figura 2.18: Representació esquemàtica d'un enllaç HVDC.

D'acord a les característiques explicades, les principals aplicacions per als enllaços HVDC són la implementació de línies aèries de gran recorregut on s'ha de transportar grans potències, degut a l'energia reactiva que la pròpia línia AC genera per *efecte Ferranti*<sup>1</sup>. Línies de transport d'energia en cable aïllat, ja que *l'efecte capacitiu*<sup>2</sup> del cable es major que en línies aèries, per

<sup>1</sup> Es coneix com a Efecte Ferranti l'increment de voltatge que apareix en una línia en corrent altern de gran recorregut (>200km) quan esta desconnectada de la càrrega o aquesta es molt petita.

<sup>2</sup> Es parla d'Efecte Capacitiu quan els conductor d'una línia exerceixen com a plaques d'un condensador mentre que el material que els separa (normalment aire) exerceix com a dielèctric; "convertint" aquesta línia en un condensador a gran escala.

tant en longituds molt inferiors obliga a usar interconnexions en corrent continu; l'exemple típic és en línies submarines on el valor límit característic que obliga al transport en continua està al voltant dels 50km. Les anomenades connexions back to back, que s'usen per a interconnexions entre dos sistemes de diferent freqüència o que requereixen un flux de potència precís.

Els enllaços HVDC també son la solució ideal per incrementar la potència instal·lada sense augmentar la corrent de curtcircuit del node, això es preveu com a recurs per alimentar grans centres de consum. Aquest fet ha desembocat en que la seva implementació a la xarxa Europea ja sigui una realitat, tot i ser un àrea relativament nova, la Unió Europea ja ha regulat aquesta tecnologia. Actualment, s'utilitzen per enllaçar parc eòlics marins amb terra ferma, diferents àrees síncrones o connectar països a llargues distàncies, com és el cas de NordNet (*Figura 2.19*), que uneix Noruega i els Països Baixos mitjançant un enllaç submarí HVDC de 580 km de longitud, formant la interconnexió més llarga d'Europa.

El *Codi de Xarxa sobre connexions HVDC (NC HVDC)*<sup>1</sup> especifica els requisits per a les connexions de corrent continu de llarga distància, està legislat pel Reglament UE 2016/1447 de la Comissió de 26 d'agost de 2016.



**Figura 2.19:** NordNet. Enllaç submarí entre Noruega i els Països Baixos.

De la xarxa elèctrica europea adjuntada a continuació se'n pot extreure que la immensa majoria de sistemes en DC són mitjançant interconnexions submarines i es concentren entre el mar bàltic i el mar del nord.

<sup>1</sup> Un codi de xarxa (Grid code o Network code) és una especificació tècnica que defineix els paràmetres que ha de complir una instal·lació connectada a una determinada xarxa elèctrica pública per tal de garantir un correcte funcionament, segur i econòmic.

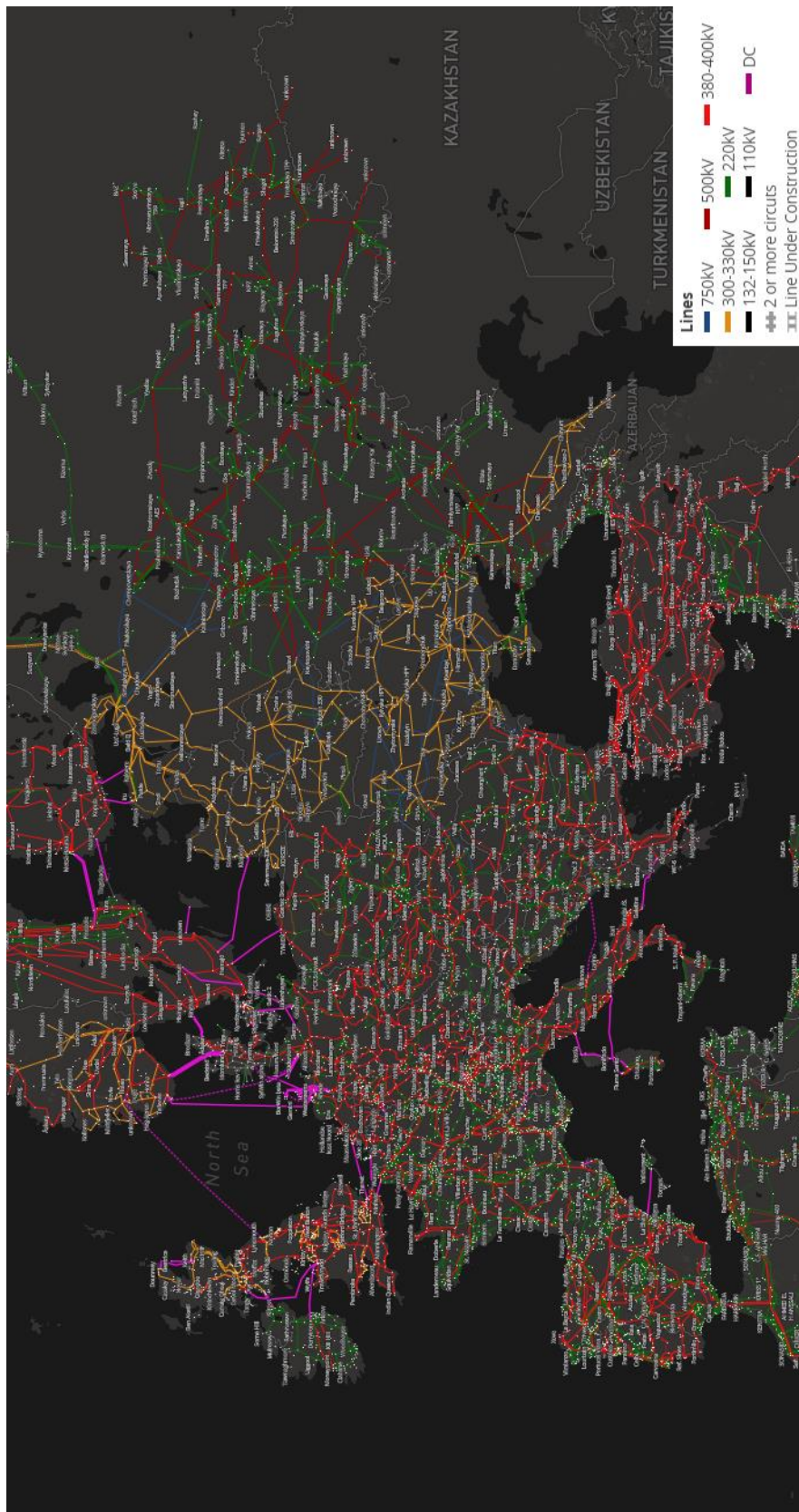


Figura 2.20: Xarxa Europea Interconnectada.

## 2.3. Comparativa HVDC i HVAC

Els principals avantatges dels enllaços HVDC respecte dels HVAC són:

- Millora en l'estabilitat.
- Permet compensar línies, no hi ha energia reactiva.
- Menors corrents de curtcircuit.
- Permet la interconnexió asíncrona.
- Major control electrònic i de flux de potència.
- Menors pèrdues per transport.
- No produeix l'Efecte Skin.
- Menor probabilitat de produir Efecte Corona.

Per altra banda, els principals desavantatges de la tecnologia HVDC respecte la tecnologia en HVAC són:

- Pèrdues per commutació.
- Alt cost d'establiment.
- Inviàble per a distàncies curtes i/o baixos nivells de potència.
- Tecnologia HVAC més madura.

A continuació, es desenvolupa aquest punt segons les consideracions tècniques, econòmiques i mediambientals respectivament.

### 2.3.1. Consideracions tècniques

**Estabilitat:** És considera que un sistema es estable quan al sotmetre'l a algun tipus de pertorbació, el sistema és capaç de tornar al seu estat de funcionament habitual. La transferència de potència en una xarxa alterna depèn en part de la diferència d'angles entre ambdós nodes. La màxima capacitat de transferència de potència està limitada per l'estabilitat transitòria<sup>1</sup> del sistema.

$$P = \frac{U_1 U_2}{X_L} \sin \delta \quad (6)$$

$$\delta = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (7)$$

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (8)$$

On:

$U_1$  i  $U_2$  són les tensions en cada node del circuit respectivament.

$X_L$  és la reactància de la línia.

$\delta$  és el desfasament entre  $U_1$  i  $U_2$ .

$f$  és la freqüència de la xarxa.

$L$  és la inductància del circuit.

Essent la reactància directament proporcional a la longitud de la línia, a major longitud menor potència transferida.

En canvi, en un sistema HVDC, l'estabilitat no depèn de la longitud de la línia tal que:

$$P = P_{max} = U \cdot I \quad (9)$$

---

<sup>1</sup> L'estabilitat transitòria es la capacitat del sistema elèctric per a mantenir el sincronisme quan es sotmès a una forta pertorbació.

**Compensació de línies:** En línies aèries de corrent altern de gran longitud és necessari compensar la potència reactiva del sistema per augmentar la capacitat de transferència de potència de la línia per aconseguir-ho, s'utilitzen bateries de condensadors. La relació entre la potència activa i aparent coneguda com a factor de potència (f.d.p), una millora del factor de potència (que s'aproximi a un valor de 1) influeix directament en la reducció de la secció requerida dels conductors, menors pèrdues per Efecte Joule i menors caigudes de tensió en la xarxa. En sistemes de transmissió HVDC aquesta compensació no es necessària ja que els propis convertidors AC-DC i DC-AC del sistema s'encarreguen de controlar la potència reactiva en tant que en sistemes de corrent continu no apareix aquesta potència.

**Corrents de curtcircuit:** Les xarxes en corrent altern poden presentar elevats corrents de curtcircuit, en ocasions pròxims a la capacitat de l'aparamenta<sup>1</sup> de control i seguretat. Per a resoldre aquest fet, es poden l'implementar sistemes HVDC, ja que d'acord al punt anterior, al no transferir potència reactiva, no es contribueix a l'augment de la potència de curtcircuit en el node de connexió.

**Interconnexió asíncrona:** Un enllaç HVDC al ser un sistema en corrent continu és una connexió asíncrona entre dos sistemes de corrent altern, tal i com s'observa en la figura. Els enllaços HVDC permeten interconnectar dos sistemes de freqüències diferents cosa que mitjançant un enllaç HVAC no seria possible. A més a més, les xarxes HVDC no transmeten perturbacions ni oscil·lacions entre sistemes.

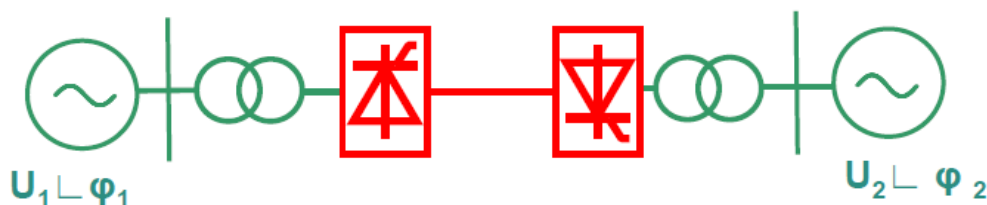


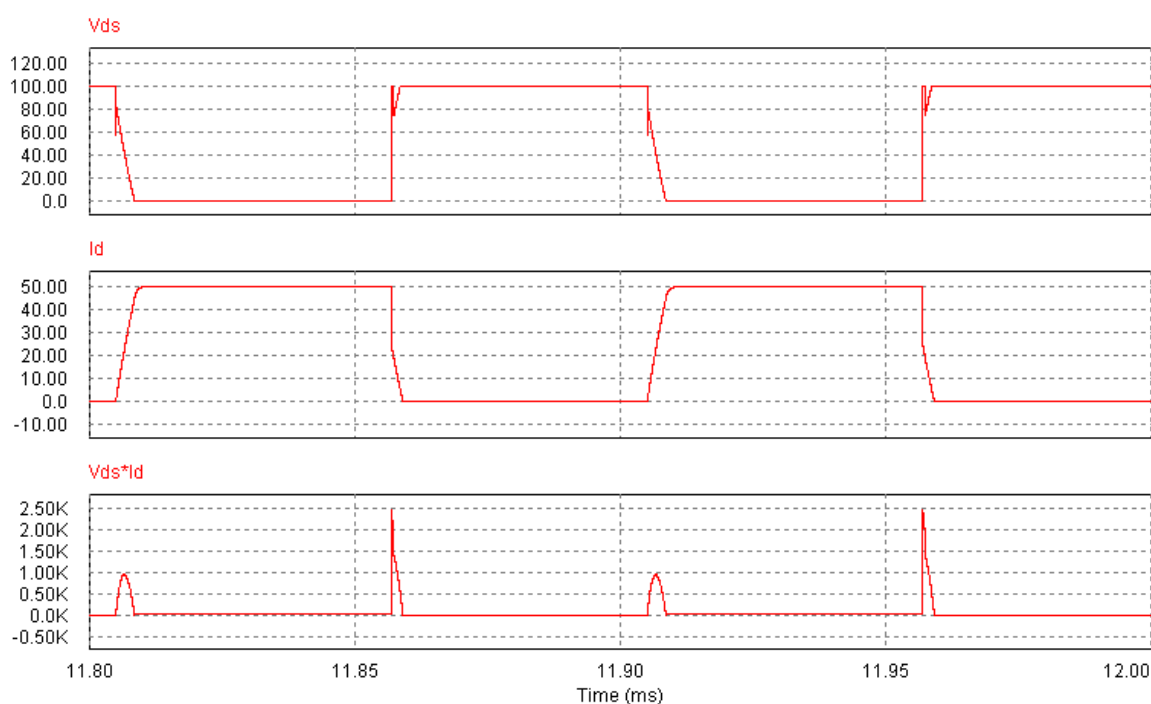
Figura 2.21: Esquema d'un enllaç HVDC amb interconnexió asíncrona.

**Control del flux de potència:** Gràcies a l'electrònica de potència present en un enllaç HVDC, aquest es capaç de mantenir el flux de potència especificat amb independència de les oscil·lacions electromecàniques que presenti la xarxa d'una manera ràpida i precisa.

<sup>1</sup> Conjunt dels aparells de connexió i la seva combinació amb altres de comandament, mesura, protecció i regulació associats.

La gran majoria de consideracions tècniques desemboquen en aspectes econòmics, com poden ser l'eficiència o les pèrdues elèctriques les quals malgrat tenir naturalesa econòmica, parteixen d'una base tècnica.

**Pèrdues per commutació:** Apareixen principalment en sistemes HVDC VSC, degut a la necessitat de sistemes de conversió els quals generen pèrdues al commutar entre dos estats, l'avaluació de la potència dissipada durant aquests processos és difícil donat que depèn tant de les característiques pròpies de l'interruptor com del circuit extern al mateix. Per aquest motiu se solen emprar simuladors per a tal d'obtenir un valor aproximat d'aquestes pèrdues. En canvi, aquestes pèrdues son inexistents en sistemes HVAC a no ser que disposin de *cicloconvertidors*<sup>1</sup>.



**Figura 2.22:** Simulació de pèrdues per commutació en un transistor MOSFET.

En aquesta simulació mitjançant *PSIM*<sup>2</sup> es pot observar com el valor de la potència dissipada ( $V_{ds} \cdot I_d$ ) en un transistor tipus MOSFET no ideal, adquireix valors puntuals de fins a 2.500 W.

<sup>1</sup> Convertidors estàtics els quals permeten una conversió AC-AC tant en amplitud com en freqüència sense haver de passar per DC.

<sup>2</sup> PSIM és un software de simulació de circuits electrònics dissenyat per utilitzar-se en electrònica de potencia i simuladors d'accionaments de motors elèctrics.

**Pèrdues per transport:** Venen determinades principalment per la resistència dels conductors i el corrent que hi circula, essent-ne l'Efecte Joule causant. El material pel qual circula el corrent ofereix una resistència al seu pas, provocant una dissipació d'energia en forma de calor. Es considerat que les pèrdues per resistència dels conductors són un 33% menors en sistemes HVDC respecte els seus homònims en corrent altern.

$$P = R \cdot I^2 \quad (10)$$

On:

$P$  és la potència que es dissipada tèrmicament.

$R$  és la resistència del cable.

$I$  és el corrent que circula.

Els conductors, tant en AC com en DC, presenta una part inductiva i una part capacitiva; en especial, en enllaços submarins la part capacitiva té molta importància ja que provoca l'aparició d'un corrent reactiu, el qual no transmet potència activa i provoca pèrdues. En cables DC, a diferència dels AC, aquests corrents reactius només afecten en el transitori.

**L'Efecte Skin o Pel·licular:** Es coneix com la tendència dels electrons a desplaçar-se a la capa externa del conductor pel qual circulen degut a l'autoinducció del mateix, donant lloc a un augment de la resistència en el nucli del conductor i a la disminució de la intensitat admissible per un determinat augment de temperatura. Aquest efecte es inexistente en línies de corrent continu, d'acord a la següent figura es pot observar de manera esquematitzada la secció transversal per a la que hi circula el corrent en conductor amb àrea circular; per a un sistema DC, un sistema AC a baixa freqüència i un sistema AC d'alta freqüència respectivament.



**Figura 2.23:** Efecte skin, (d'esquerra a dreta) decreixement de la secció per la que circulen electrons amb l'augment de la freqüència.



Per quantificar-lo, primer s'ha de tenir en compte la densitat de corrent ( $J$ ), la fórmula de la qual és:

$$J = J_s \cdot e^{-d/\delta} \quad (11)$$

On:

$J_s$  és la densitat del corrent en la superfície.

$\delta$  és la profunditat superficial.

$d$  és la distancia des de la superfície.

La densitat de corrent decau exponencialment des de el radi exterior d'una manera que es pot quantificar en termes d'un paràmetre anomenat profunditat superficial ( $\delta$ ):

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (12)$$

On:

$\rho$  és la resistència específica.

$\omega$  és la freqüència angular.

$\mu$  és la permeabilitat magnètica.

En la taula es mostra l'efecte de la freqüència en la profunditat superficial d'un conductor de coure:

Frecuencia	Profundidad superficial, $\delta$
50 Hz	9,38 mm
60 Hz	8,57 mm
1 kHz	2,10 mm
5 kHz	0,94 mm
10 kHz	0,66 mm
100 kHz	0,21 mm
500 kHz	0,094 mm
1 MHz	0,066 mm
10 MHz	0,021 mm
100 MHz	6,6 $\mu\text{m}$
1 GHz	2,1 $\mu\text{m}$
10 GHz	0,7 $\mu\text{m}$
100 GHz	0,2 $\mu\text{m}$

**Figura 2.24:** Profunditat superficial (mm) en funció de la freqüència en un conductor de Cu.

En general, considerarem que un enllaç HVDC presentarà menys pèrdues que el seu equivalent en HVAC en igualtat de condicions.

### 2.3.2. Consideracions econòmiques

Tant en els enllaços HVDC com en els HVAC, el cost econòmic depèn de factors tals com la capacitat de transmissió del sistema, el medi de transport de la línia, les condicions de l'entorn o requeriments de seguretat o reglamentaris, a més de la tecnologia emprada per a la implementació del sistema. És per aquest motiu que es difícil donar un preu determinat per al disseny d'un enllaç ja sigui HVDC o HVAC indistintament.

Del cost total d'una instal·lació HVDC, la majoria es destina als centres de conversió on s'hi troben els convertidors estàtics de potència, imposant la gran diferència entre enllaços HVDC i HVAC en quan al cost relatiu d'aquests.

Pel que fa a la resta de costos externs a la construcció física de les línies i enllaços, com poden ser costos administratius, d'enginyeria o disseny, afecten de manera significativament similar en ambdues tecnologies.

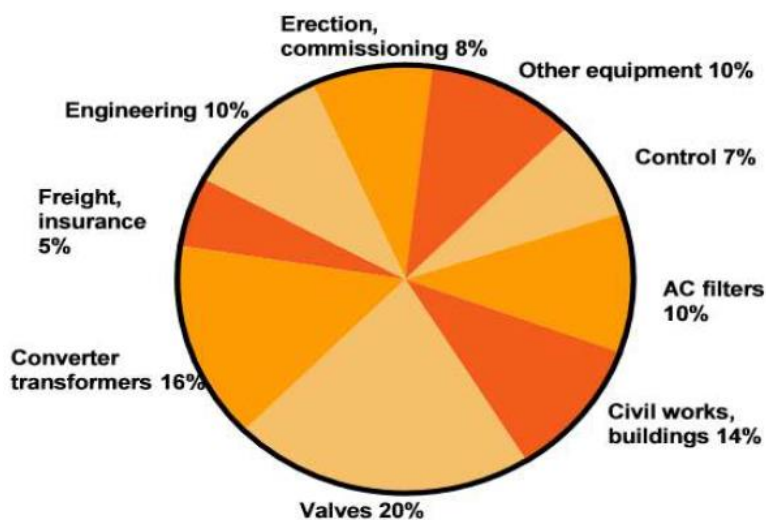


Figura 2.25: Cost estructural d'un sistema HVDC.

Els sistemes de transmissió en DC requereixen únicament 2 conductors, mentre que els sistemes AC en necessiten 3, per tant això ja suposo un estalvi directe aproximad del 33% en el cost del material que forma el cable. Per aquest motiu les línies DC disposen de torres més reduïdes i compactes en comparació a les de les línies AC. Així doncs, al ser línies estructuralment menors en quan a la grandària el cost per servitud de pas es veu reduït en comparació línies HVAC.

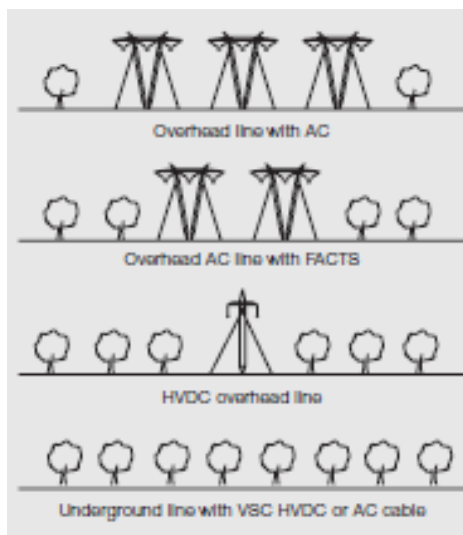
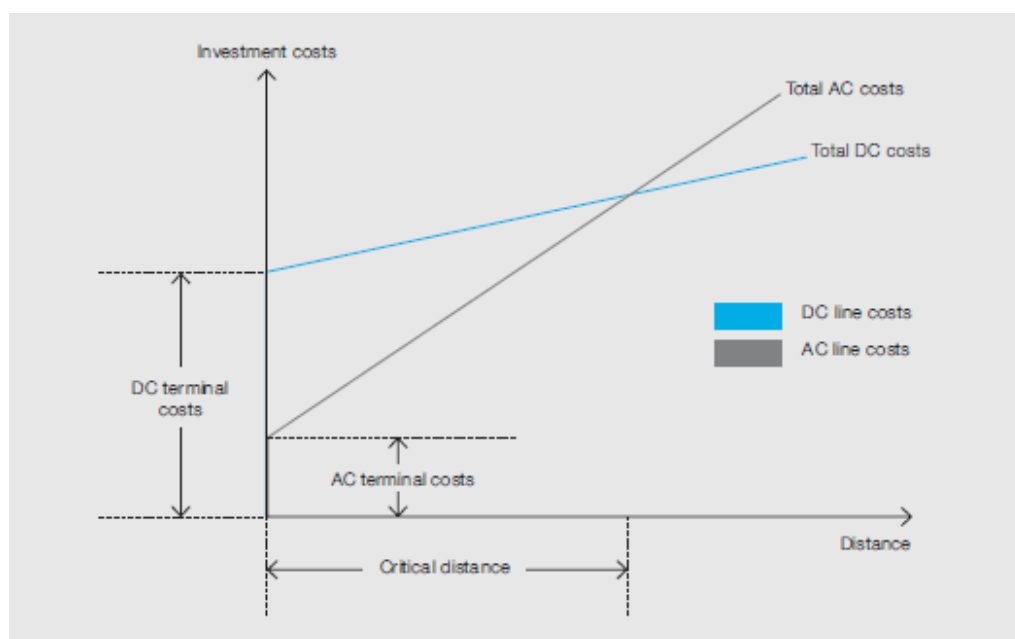


Figura 2.26: Representació de l'espai ocupat per diferents tipus de tecnologies.

Com a línia general, per a distàncies curtes és més rentable el sistema HVAC ja que la inversió inicial és molt menor. En canvi, per a distàncies suficientment grans, surt més a compte la implementació de sistemes HVDC ja que els elevats costos inicials (centres de conversió) es veuen compensats per les poques pèrdues que aquesta tecnologia té respecte la variant AC i per la reducció de costos de les línies al només haver de disposar de 2 conductors.

Existeix un punt d'equilibri, on per una determinada longitud, els costos de producció requerits per les dues tecnologies seran equivalents. Aquesta distància s'anomena longitud crítica i és mostra en la figura següent (corba cost-distància); per a distàncies inferiors a la longitud crítica, serà econòmicament més viable un enllaç HVAC i per a distàncies superiors serà més rentable un projecte HVDC.



**Figura 2.26:** Distància crítica. Costos d'inversió per distància.

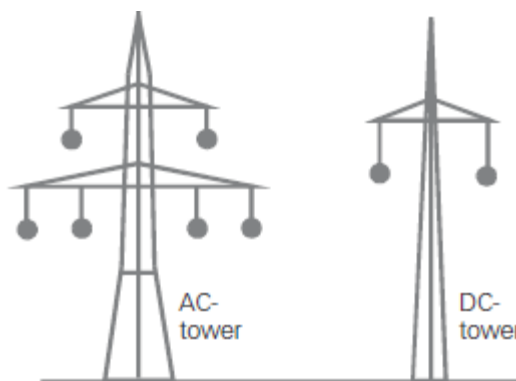
A finals del segle passat la corba cost-distància establida com a longitud crítica (a partir de la qual un enllaç HVDC era rentable respecte un HVAC) 800 km per a línies aèries i 40km per a línies submarines aproximadament. Segons ABB, en l'actualitat aquest punt s'estableix entre els 400 i els 700 km per a línies aèries segons les característiques del sistema.

Finalment, els preus tant dels sistemes en AC com en DC han variat molt, fins i tot per a un determinat de nivell de transferència d'energia, el que mostra que a més a més dels criteris que han estat mostrats anteriorment, les condicions del mercat en el moment de l'execució del projecte i la ubicació d'aquest són factors crítics i transcendents, que poden arribar a eclipsar les consideracions més tècniques entre un sistema AC o DC.

### 2.3.3. Consideracions mediambientals

El primer punt a tenir en compte en relació les consideracions mediambientals, és que els enllaços HVDC són considerats respectuosos amb el medi ambient perquè milloren l'eficiència de la transmissió d'energia elèctrica en centrals elèctriques ja existents d'acord amb els punts anteriors.

La cobertura terrestre i el cost del dret de pas associat per una línia de transmissió aèria HVDC no es tant alt com el d'una línia en AC. Aquest fet redueix l'impacte visual reduint la contaminació visual associada a un paisatge determinat. A continuació es mostra una comparació entre una línia aèria estàndard en DC i AC amb capacitat per a transportar 1000MW.



**Figura 2.27:** Torre elèctrica AC vs. torre elèctrica DC per a transport de línies aèries.

S'ha de tenir en compte que degut a l'aparició de l'Efecte Corona, l'aire que rodeja els conductors pot estar suficientment carregat elèctricament com per ionitzar-se provocant l'aparició d'ozó i òxids de nitrogen, els quals provocaran petites descàrregues en forma de guspires formant un halo lluminós que pot acabar provocant interferències electromagnètiques. Malgrat això, aquest efecte es manifesta més en sistemes HVAC que en HVDC.

També, existeixen algunes qüestions ambientals que s'han de tenir en compte en relació els enllaços HVDC i fruit de la necessitat d'usar centrals de conversió amb aquest tipus de tecnologia. Les més destacables són la generació de soroll, el fort impacte visual de les centrals, la compatibilitat electromagnètica i la necessitat d'implementar la via de retorn terrestre o marítima en sistemes monopolars.

En general, es considera que un sistema HVDC es altament compatible amb qualsevol entorn i pot integrar-se en ell sense comprometre els problemes ambientals importants de l'actualitat.

## 2.4. Classificació d'enllaços HVDC

Es realitza una classificació dels enllaços HVDC en funció de la tecnologia utilitzada, de la configuració i de la connexió de l'enllaç:

### 2.4.1. Segons la tecnologia

A continuació, es detallen les principals tecnologies emprades en els sistemes HVDC:

La tecnologia LCC (*Convertidor Commutat per Línia*) és la tecnologia més antiga i tradicionalment també coneguda com a *HVDC Clàssica*, ha estat la més emprada en sistemes HVDC i es considera un CSC (*Convertidor de font de corrent*) degut al fet que el sentit del corrent no pot variar. La seva configuració sol constar d'un rectificador de 6 polsos controlat mitjançant tiristors, ja que abans de l'evolució de l'electrònica de potència aquests, eren els únics dispositius capaços de controlar les quantitats de potència que es volia transmetre. Degut a l'ús de tiristors, els quals tan sols permeten controlar la conducció però no el bloqueig, la qual cosa provoca que es pugui controlar la potència activa però no la reactiva; és necessari dotar els sistemes de compensadors estàtics o de bancs de condensadors per subministrar la potència reactiva demandada per l'estació en línies molt llargues. Els enllaços HVDC LCC generen harmònics que requereixen de filtrat, és per això, juntament amb el fet d'haver de disposar de sistemes de compensació, aquesta tecnologia requereix de força espai degut al considerable volum d'aquests sistemes.

Aquests sistemes poden suportar grans intensitats i/o tensions, arribant a valors de 1.200MW de potència transmesa a una tensió  $\pm 500$  kV.

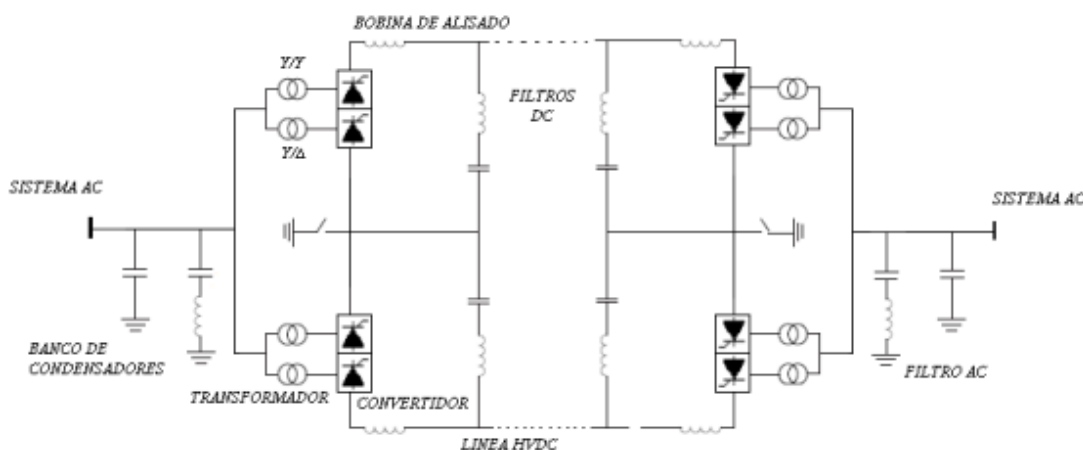


Figura 2.28: Esquema d'un enllaç HVDC amb tecnologia LCC.

La tecnologia VSC (*Convertidor de font de tensió*) és una tecnologia més moderna en comparació la LCC, es basa en convertidors estàtics formats per transistors GTO o IGBT amb modulació *PWM*<sup>1</sup>. Això permet controlar la quantitat de potència reactiva que es transmesa. Aquests convertidors són autocommutats i no requereixen de tensió alterna, es a dir poden controlar tant l'encesa com l'apagat del dispositiu sense ajuda d'una font de tensió addicional.

En configuracions monopolars s'ha arribat a aconseguir tensions de  $\pm 300$  kV, transportant 300 MW (com és el cas de Caprivi Link, Namíbia).

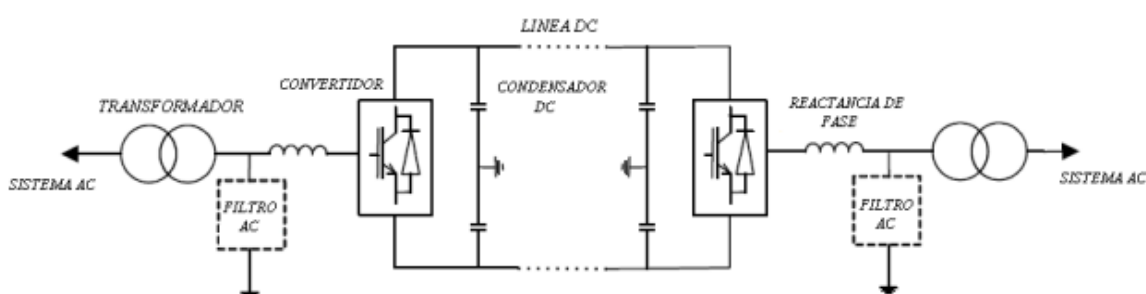


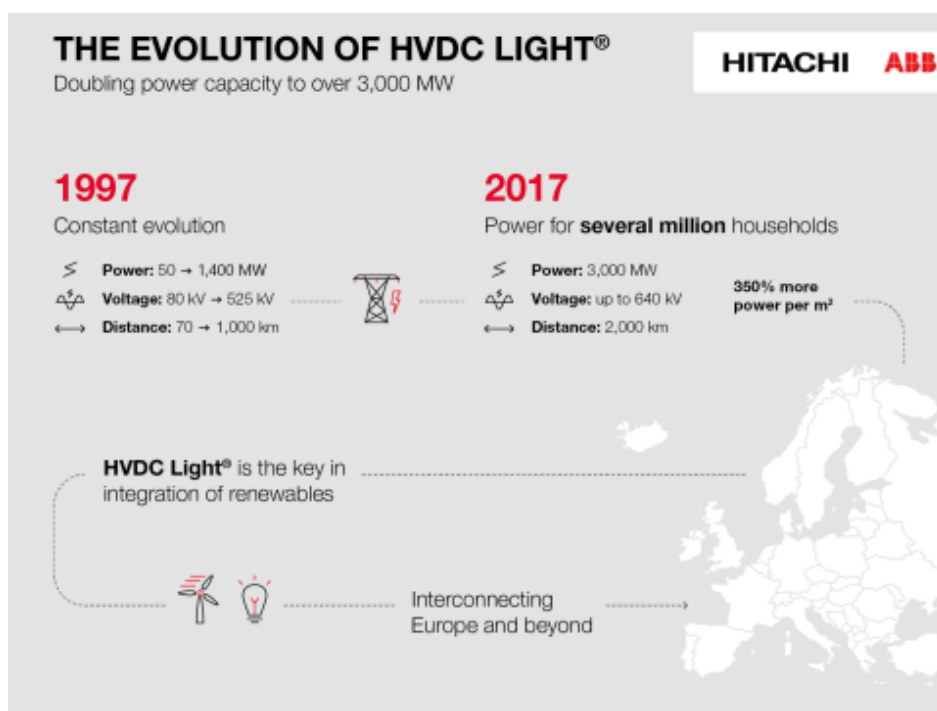
Figura 2.29: Esquema d'un enllaç HVDC amb tecnologia VSC.

En els últims anys, la companyia ABB ha desenvolupat una tecnologia anomenada *HVDC-Light* basada en la tecnologia VSC. Permet augmentar la fiabilitat de les xarxes i augmenta el rang de transmissió de potència. És relativament ràpida d'instal·lar i ofereix una alternativa als sistemes convencionals de transmissió. Els començaments del seu desenvolupament es remunten al 1997.

Aquesta tecnologia està basada en transistors IGBT de dos nivells, l'ona fonamental de tensió és generada per un PWM (a l'igual que en sistemes VSC), podent-se controlar la magnitud d'ona i fase de l'ona lliurement dins d'uns marges, el que permet el control de potència activa i reactiva. Des del punt de vista de la xarxa es comporta com un generador síncron capaç de controlar la potència activa i reactiva gairebé instantàniament.

<sup>1</sup> La modulació per amplitud de polsos (PWM) és una tècnica de modulació que utilitza una ona de polsos rectangulars, l'amplitud de la qual es modulada amb el senyal d'entrada.

També s'han desenvolupat cables específics per aquesta tecnologia, són cables *polimèrics*<sup>1</sup> d'aïllament sec extruït per a transmissió a alta tensió en DC. Aquest cable constitueix línies DC d'un bipol de corrents antiparal·leles, el que elimina el camp electromagnètic. Aquesta tecnologia està especialment indicada per a transmissió d'energia elèctrica a instal·lacions offshore a distàncies de la costa de 50 a 100 km. Atès que els filtres requerits en la tecnologia HVDC - Light són de mida petita i que no es requereixen compensadors síncrons, les dimensions de les estacions convertidores són reduïdes respecte a les estacions amb tecnologia tradicional.



**Figura 2.30:** Evolució de la tecnologia HVDC-Light d'ABB al llarg dels anys (1997-2017).

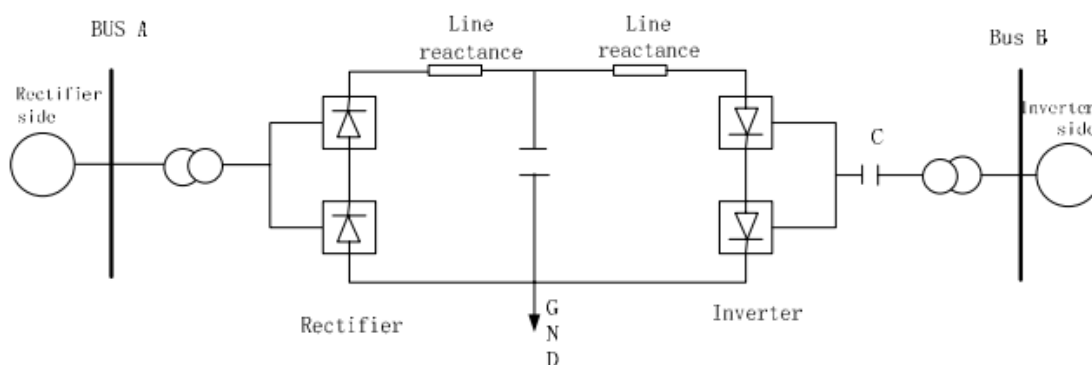
En l'actualitat aquesta tecnologia es capaç de transportar 3.000 MW a  $\pm 640$  kV a distàncies de fins a 2.000 km, segons la pròpia ABB; energia suficient per alimentar diversos milions de llars.

<sup>1</sup> Un polímer es un material compost per macromolècules formades per la unió mitjançant enllaços covalents entre unitats simples anomenades monòmers.



A finals del s.XX, als anys noranta, juntament amb el desenvolupament de l'electrònica de potència, sorgeix una altra tecnologia molt menys emprada anomenada CCC (Convertidor Commutat per Condensador). Aquesta tecnologia combina la tècnica de compensació en sèrie amb la tècnica clàssica de convertidor commutat de línia. La compensació en sèrie integrada proporciona un mitjà senzill de compensar la demanda de potencia reactiva del convertidor sense canviar els filtres, permetent utilitzar convertidors més grans en ubicacions de xarxa relativament més dèbils.

El projecte HVDC Rapid City als EEUU utilitza convertidors commutats per condensadors i consta de dos blocs paral·lels CCC de 100 MW consecutius alimentats de una única línia de 230 kV a banda i banda. Aquesta mateixa tecnologia es usada entre el Brasil i l'Argentina en la interconnexió de nom Garabi de 4 x 550 MW.



**Figura 2.31:** Esquema d'un enllaç HVDC amb tecnologia CCC.

### 2.4.2. Segons el tipus de configuració

Els enllaços HVDC poden adoptar diferents configuracions en funció de l'objectiu requerit, es detallen a continuació:

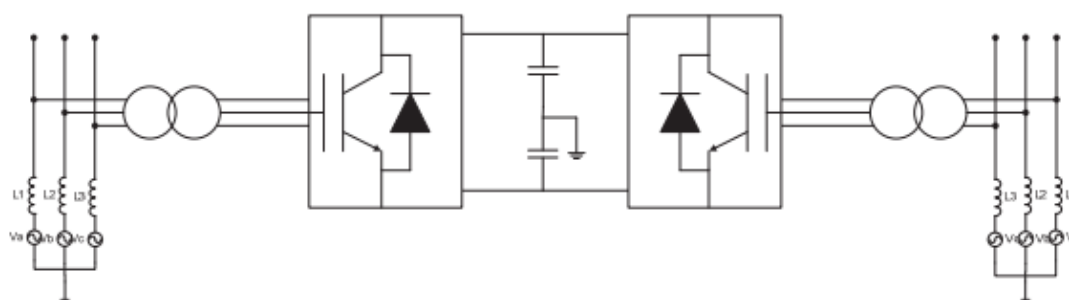
#### Punt a punt

És la configuració habitual en sistemes HVDC, es utilitza per connectar subestacions quan la connexió HVAC no es possible, ja perquè és la única solució tècnicament viable o perquè no resulta rentable econòmicament.

En aquesta configuració cada estació funciona com a rectificador/inversor depenent del sentit del flux energètic poden adoptar la connexió monopolar o bipolar. Es usa també, per a connectar càrregues mitjançant enllaços submarins com sistemes insulars o parcs eòlics offshore.

#### Back to back

És la configuració que sol emprar-se quan es requereixen tensions baixes, principalment per a interconnectar xarxes asíncrones o síncrones amb diferent estratègia de regulació de freqüència, per a l'estabilització de xarxes o per a l'aïllament de perturbacions o distorsions produïdes per una càrrega. És considerat un cas especial de la connexió monopolar i no requereix connexió entre equips convertidors pel simple fet d'estar molt pròxims, normalment en la mateixa instal·lació



**Figura 2.32:** Esquema d'un enllaç HVDC amb configuració back to back.

## Multiterminal

Una configuració multiterminal en un sistema HVDC es caracteritza per connectar més de dos estacions de conversió a la xarxa (sempre que no es trobin situades geogràficament en el mateix lloc).

Aquesta configuració pot presentar-se de tres maneres:

- Un sistema **multiterminal en paral·lel**. Quan les estacions estan connectades a la mateixa tensió.
- Un sistema **multiterminal en sèrie**. Quan les estacions es connecten a diferents tensions.
- Un sistema **multiterminal mixt**. Quan es tracta d'una solució intermèdia entre les dues variants anteriors.

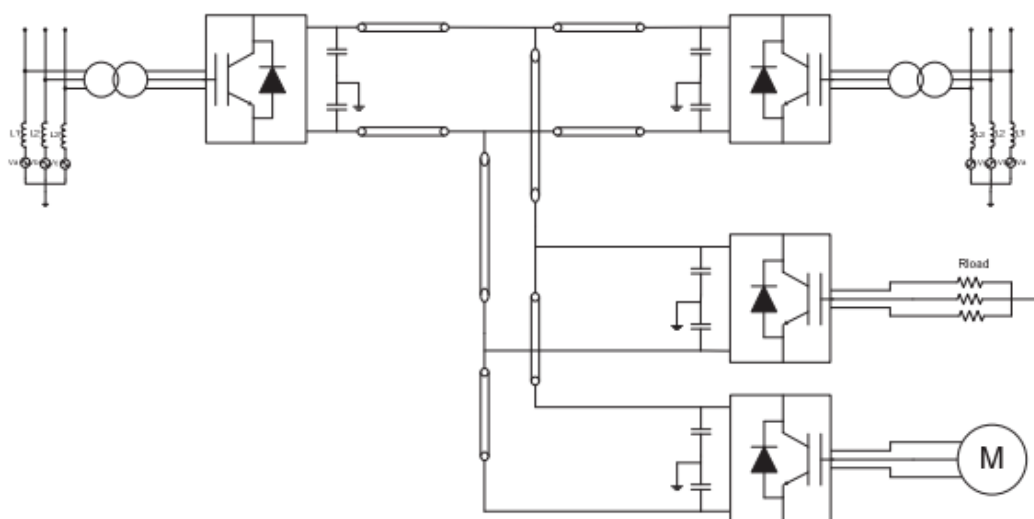


Figura 2.33: Esquema d'un enllaç HVDC amb configuració multiterminal.

## Unitària

Es considera que l'energia elèctrica es genera en DC, ja que el generador i el rectificador estan acoblats directament en el punt de generació d'electricitat. Aquesta configuració s'usa principalment en centrals hidroelèctriques o eòliques, aconseguint energia en cada moment a freqüència no necessàriament igual a la freqüència de xarxa.

### 2.4.3. Segons la connexió de l'enllaç

Depenent de la connexió de l'enllaç, els sistemes HVDC poden ser:

#### Monopolar

És la connexió més simple i econòmica, les estacions de conversió estan unides en corrent continua a través d'un únic conductor generalment de *polaritat*<sup>1</sup> negativa i amb retorn per terra o mar mitjançant *elèctrodes*<sup>2</sup> connectats a les estacions de conversió, que fan la funció d'ànode i càtode.

Aquest sistema s'utilitza quan els sistemes a connectar estan separats per grans distàncies i on la instal·lació de retorn per elèctrodes pot suposar un estalvi considerable. També és usat en sistemes submarins, on el mar realitza les funcions de retorn, oferint menors pèrdues que un conductor metàl·lic.

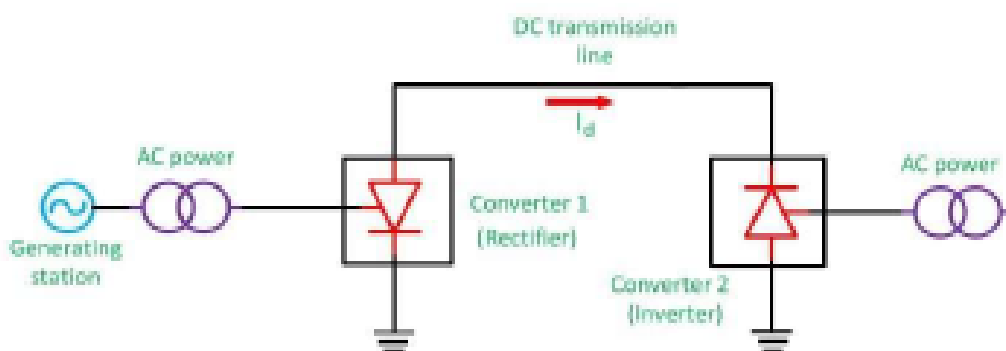


Figura 2.34: Esquema d'un enllaç HVDC amb connexió monopolar.

Aquesta connexió presenta alguns inconvenients ja que en utilitza elèctrodes com a camí de retorn, pot provocar fenòmens de corrosió en instal·lacions properes, és per això que usualment es presenta aquesta tecnologia amb un retorn mitjançant conductor prenent el nom de **enllaç monopolar amb retorn metàl·lic**.

<sup>1</sup> La polaritat representa el potencial elèctric el final d'un circuit. Connectar dispositius electrònics gairebé sempre requereixen una correcta polaritat aquesta pot ser positiva (+) o negativa (-).

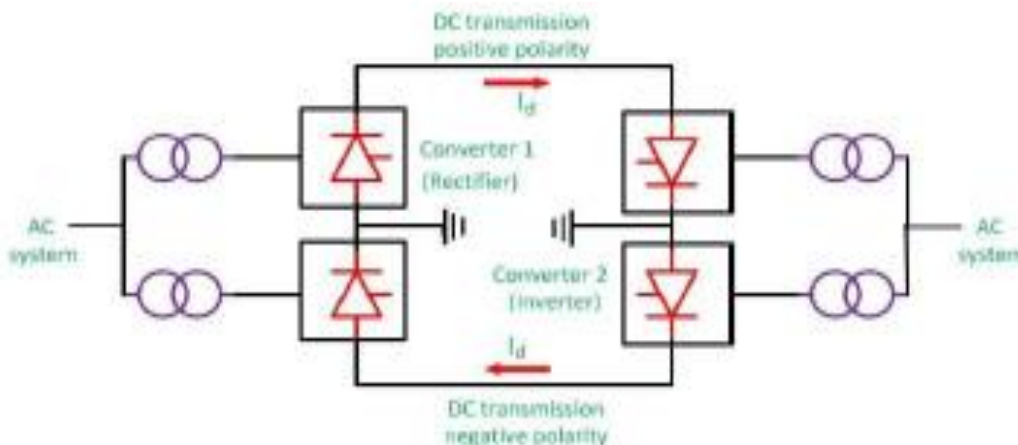
<sup>2</sup> S'anomena elèctrode un conductor elèctric que s'utilitza per a fer contacte amb una part no metàl·lica d'un circuit, establint un pas de corrent al tancar el circuit.

## Bipolar

La connexió d'enllaç bipolar utilitza dos conductors amb tensions simètriques respecte terra, un de polaritat positiva i l'altre de polaritat negativa, cada terminal te dos convertidors d'igual tensió connectats en sèrie entre si pel costat de contínua. A més a més, la connexió consta d'estacions de transformació en cada extrem, els punts mitjos de les quals estan interconnectats al punt neutre (unió entre convertidors), en condicions normals no apareixen corrents a terra.

Aquesta configuració s'utilitza quan la capacitat de transmissió d'un enllaç monopolar, es veu superat, existint així la necessitat de transportar més energia.

Si es produeix una averia en alguna de les connexions, provocant que aquesta deixi de funcionar, l'enllaç podrà funcionar com a enllaç monopolar mitjançant l'ús d'interruptors *bypass*<sup>1</sup> en paral·lel, permetent que la meitat de la instal·lació segueixi funcionant i millorant així, la continuïtat del servei; sempre i quant l'error es trobi en les estacions de conversió i no en les línies HVDC.



**Figura 2.35:** Esquema d'un enllaç HVDC amb connexió bipolar.

En funció de la pertorbació que aparegui en el sistema, existeix una sèrie de variants d'acord a com s'opera el sistema en qüestió, ja sigui degut a un possible manteniment o a una averia, quan succeeix un problema en un dels dos pols en un enllaç bipolar amb retorn per terra, el corrent del pol en qüestió es assimila pel retorn, per tal de poder aïllar el pol problemàtic.

<sup>1</sup> Interruptor que se sol situar en paral·lel per a tal d'oferir un pas alternatiu a un circuit elèctric.

En l'hipotètic cas que la falla ocorri únicament en les estacions de conversió, el corrent pot ser commutat des del retorn per terra a un retorn metàl·lic que aporta la línia que ha partit l'error en la seva estació.

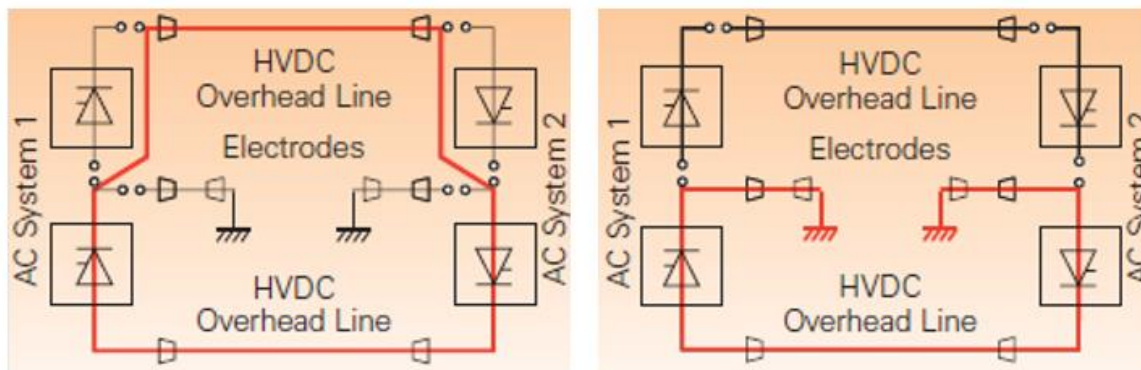


Figura 2.36 i 2.37: Funcionament monopolar d'un enllaç bipolar degut a una falla en el sistema.

Si existeixen restriccions (normalment mediambientals) per a l'ús d'elèctrodes, o si la distància de transmissió es relativament curta, se sol emprar una línia amb retorn metàl·lic. A l'igual que amb els enllaços monopolars, es pot connectar un **enllaç bipolar amb retorn metàl·lic** si en un enllaç bipolar s'uneixen els punts neutres (unió entre convertidors) mitjançant cable.

### Homopolar

L'enllaç amb connexió homopolar disposa de dos o més conductors de la mateixa polaritat, normalment negativa (les pèrdues per efecte són inferiors) per tant el corrent que circula pel retorn es el doble de la que circula per cada un dels conductors. El retorn se sol realitzar a través d'elèctrodes o per terra.

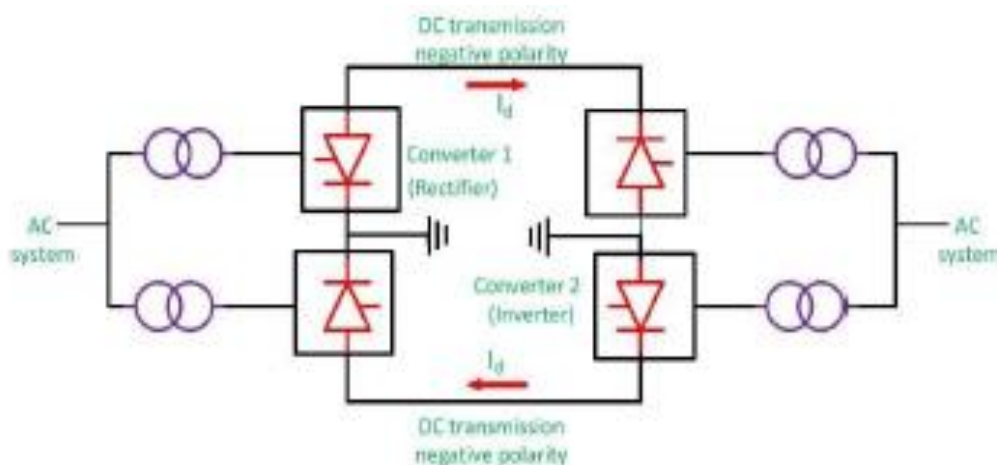


Figura 2.38: Esquema d'un enllaç HVDC amb connexió homopolar.

## 2.5. Components de la tecnologia d'enllaços HVDC-VSC

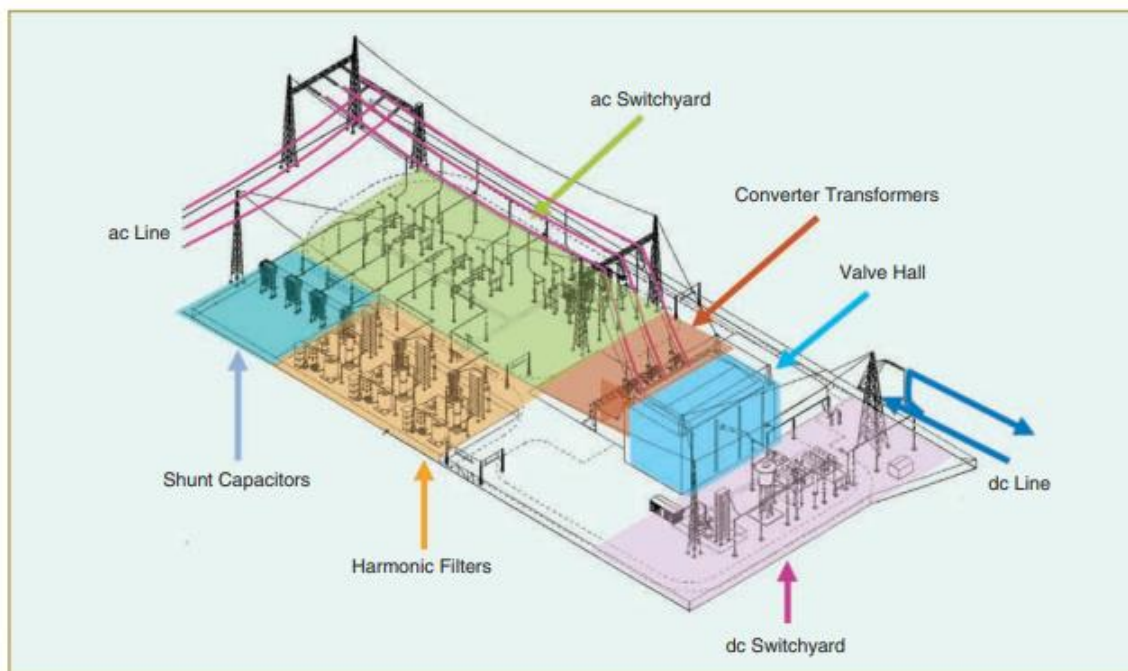


Figura 2.39: Estació de conversió d'un enllaç HVDC.

### 2.5.1. Transformadors de conversió

Els transformadors permeten adaptar la tensió alterna que arriba a l'entrada dels rectificadors per a que aquests puguin rectificar la tensió adequada i així obtenir la tensió contínua requerida; aquesta no es la seva única funció ja que aquests dispositius també proporcionen aïllament galvànic entre la xarxa i els rectificadors.

Habitualment, s'instal·len dos grups de transformadors desfasats  $30^\circ$  on un dels transformadors es troba amb connexió estrella/estrella i l'altre estrella/triangle per a tal de reduir les interaccions harmòniques.

Aquests dispositius són dissenyats per tal de suportar l'existència de notables corrents harmòniques sense que això alteri el seu funcionament i els sobreescalfi. A més a més, els transformadors han de suportar la *premagnetització del nucli*<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> La premagnetització del nucli apareix quan s'aplica energia per primer cop al primari del transformador i pot provocar l'aparició d'altres corrents les quals s'estabilitzen amb el pas del temps.

### 2.5.2. Convertidors estàtics

Quasi tots els convertidors HVDC són intrínsecament bidireccionals; podent convertir de AC a DC (rectificar) o de DC a AC (invertir). Un sistema HVDC complet sempre inclou com a mínim un convertidor que funciona com a rectificador i almenys un que funciona com a inversor. Alguns sistemes HVDC aprofiten al màxim aquesta propietat bidireccional (per exemple, aquells dissenyats per al comerç transfronterer d'energia, com ara l'enllaç HVDC multicanal entre Anglaterra i França anomenat ElecLink).

Tant els tiristors com les vàlvules d'arc de mercuri només es poden activar (no desactivar) mitjançant una acció de control i per tant, s'ha de confiar en el sistema extern AC per efectuar el procés d'apagat. Aquest únic grau de llibertat, limita la utilitat de l'enllaç en alguns casos concrets, ja que el sistema de corrent alter al qual està connectat l'enllaç ha d'estar format sempre per màquines síncrones per tal de proporcionar el temps per a la tensió de commutació. Així doncs, un enllaç HVDC format per tiristors o vàlvules d'arc de mercuri, no pot alimentar energia en un sistema passiu, el que no és un problema per subministrar energia addicional a una xarxa que ja està activa.

Amb altres tipus de dispositius semiconductors com el transistor bipolar de porta aïllada (IGBT), es pot controlar el temps d'activació i apagat, cosa que proporciona un segon grau de llibertat. Com a resultat, els IGBT es poden utilitzar per fabricar convertidors autocommutats més propers a un gran inversor en funcionament. En aquests convertidors, la polaritat de la tensió de DC sol ser fixa i la tensió de DC, al ser suavitzada per una gran capacitat, es pot considerar constant. Per aquest motiu, un convertidor HVDC que utilitza IGBT se sol denominar VSC. La controlabilitat addicional proporciona molts avantatges, sobretot la possibilitat d'encendre i apagar els transistors IGBT moltes vegades per cicle per tal de millorar el rendiment harmònic, i el fet que (en ser commutat automàticament) el convertidor ja no depèn de màquines síncrones en la xarxa AC. Els sistemes HVDC basats en convertidors de font de tensió (VSC) solen utilitzar la connexió de sis polsos perquè el convertidor produeix molta menys distorsió harmònica que un LCC equivalent. Això simplifica la construcció del transformador del convertidor. No obstant això, hi ha diverses configuracions pels enllaços HVDC-VSC.



## Two-level converter

Des del primer enllaç HVDC-VSC instal·lat fins a aproximadament el 2012, la majoria d'aquests sistemes HVDC construïts es basaven en el convertidor de dos nivells. El convertidor de dos nivells és el tipus més simple de convertidor de font de tensió trifàsic (veure figura 2.40) i es pot considerar com un pont de sis polsos en què els tiristors han estat substituïts per IGBT amb díodes paral·lels inversos i els reactors de suavització de DC han estat substituïts per condensadors de suavitzat de DC.

S'anomenen així perquè la tensió a la sortida de corrent altern de cada fase es commuta entre dos nivells de tensió, que corresponen als potencials elèctrics dels terminals DC positius i negatius.

Quan s'activa la part superior de les dues vàlvules d'una fase, el terminal de sortida AC es connecta al terminal DC positiu, donant lloc a una tensió de sortida de  $+1/2 U_d$  respecte al potencial del punt mig del convertidor. Per contra, quan s'activa la vàlvula inferior en una fase, el terminal de sortida AC es connecta al terminal DC negatiu, donant lloc a una tensió de sortida de  $-1/2 U_d$ . Les dues vàlvules corresponents a una fase no s'han d'engegar mai simultàniament, ja que això provocaria una descàrrega incontrolada del condensador de corrent continu, cosa que podria provocar danys greus a l'equip convertidor.

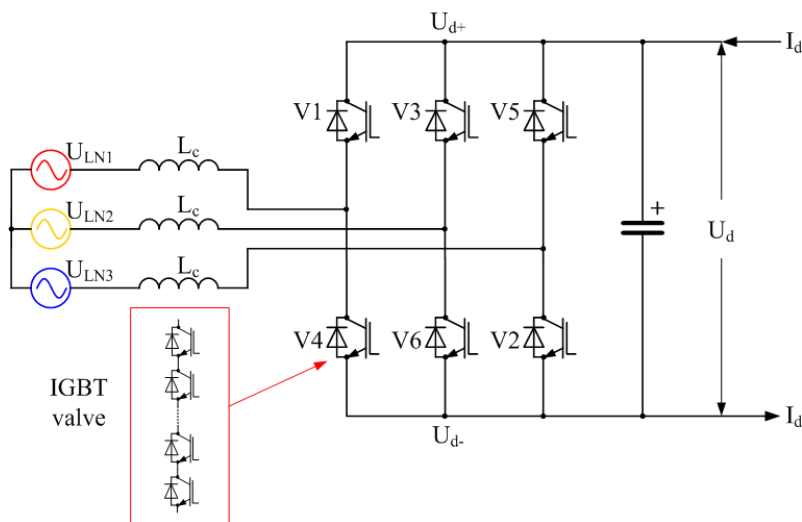
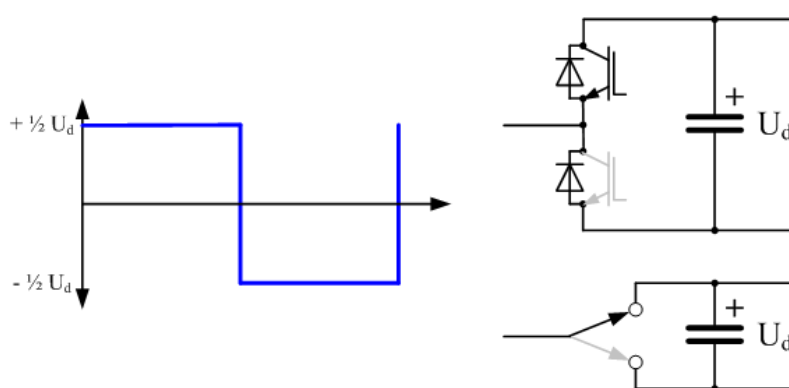


Figura 2.40: Convertidor de font de tensió HVDC trifàsic de dos nivells.

La forma d'ona que pot produir un convertidor de dos nivells és una ona quadrada; això produeix nivells inacceptables de distorsió harmònica, de manera que sempre s'utilitza alguna forma de modulació d'amplada de pols (PWM) per millorar la distorsió harmònica del convertidor. Com a resultat del PWM, els IGBT s'encenen i s'apaguen moltes vegades (normalment 20) en cada cicle de xarxa. Això es tradueix en pèrdues de commutació elevades en els IGBT i redueix l'eficiència general de la transmissió.

Una estació convertidora d'un enllaç HVDC-LCC típica té pèrdues de potència al voltant del 0,7% a plena càrrega (per extrem, excloent la línia i el cable HVDC), mentre que amb convertidors de font de tensió de dos nivells la xifra equivalent és del 2-3% per extrem.

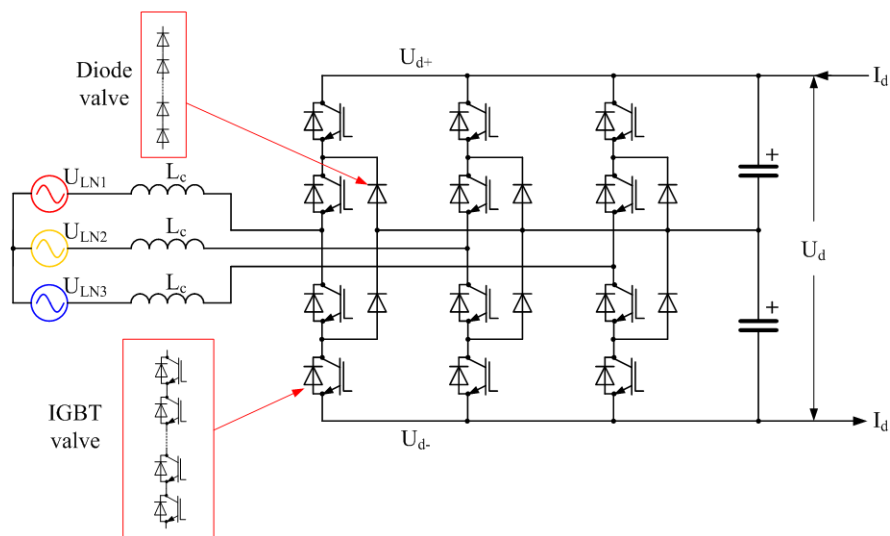


**Figura 2.41:** Principi de funcionament d'un convertidor de dos nivells, representació monofàsica.

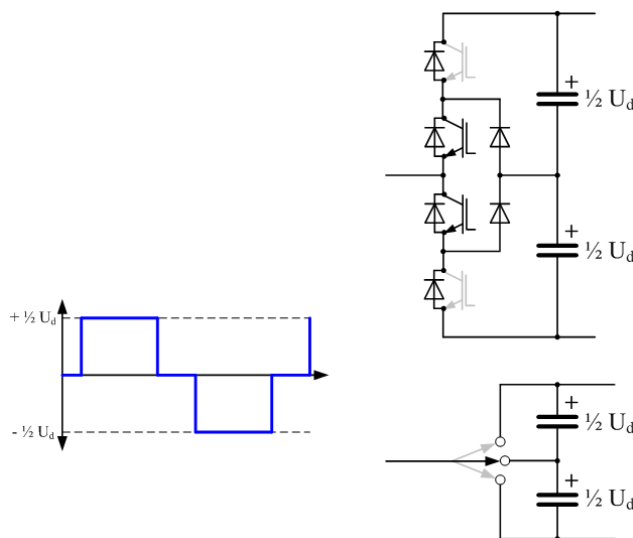
### Three-level converter

En un intent de millorar el baix rendiment harmònic del convertidor de dos nivells, alguns sistemes HVDC s'han construït amb convertidors de tres nivells. Els convertidors de tres nivells poden sintetitzar tres (en lloc de només dos) nivells de voltatge al terminal AC de cada fase, és a dir  $+1/2 U_d$ , 0 i  $-1/2 U_d$ .

Un tipus comú de convertidor de tres nivells és el díode-clamped converter (o convertidor tancat amb díode), on cada fase conté quatre transistors IGBT, cadascun dels quals és la meitat de la tensió de línia a línia de DC (veure *Figures 2.42 i 2.43*).



**Figura 2.42:** Convertidor de font de tensió HVDC trifàsic de tres nivells (díode-clamped).

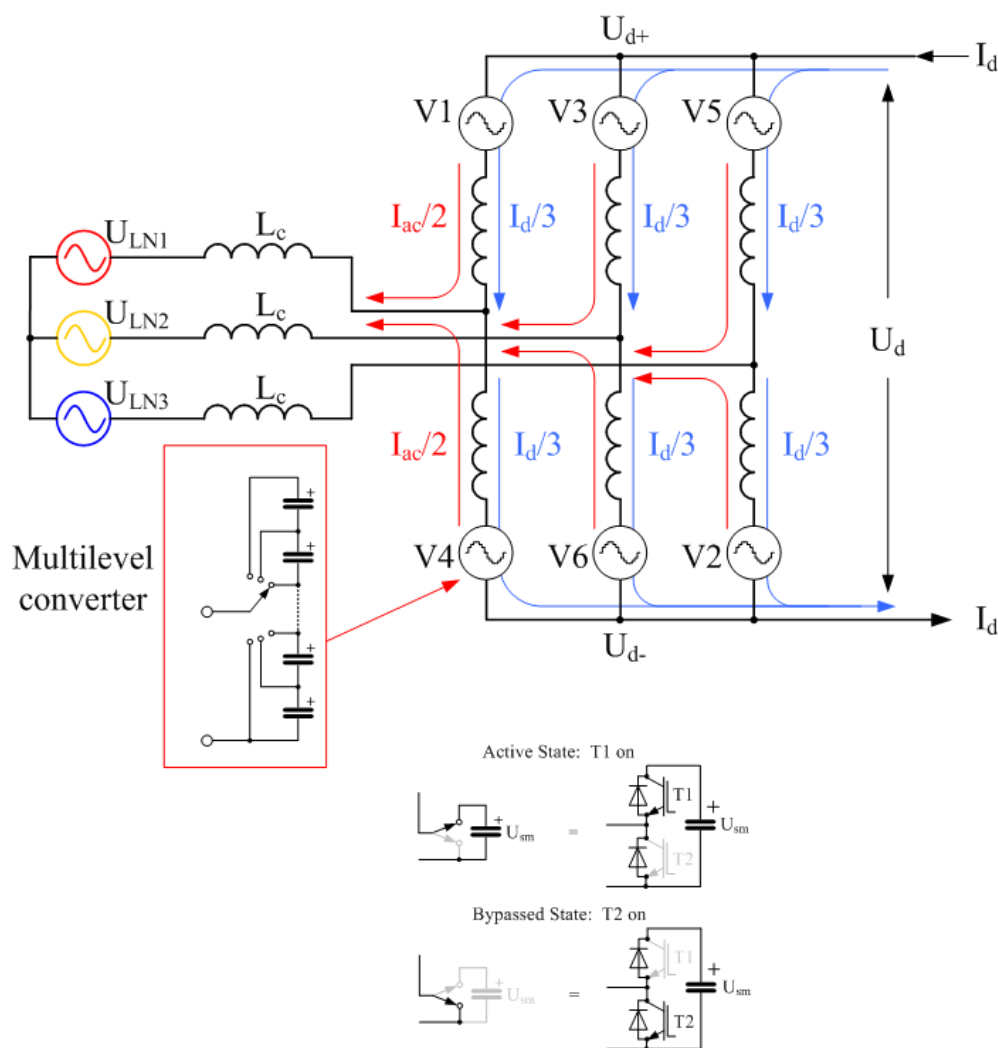


**Figura 2.43:** Principi de funcionament del convertidor de tres nivells, tancat amb díode, representació monofàsica.

En una reformulació del convertidor tancat amb díode, els díodes són substituïts per vàlvules IGBT, cosa que proporciona un control addicional. Aquests convertidors van ser utilitzats al projecte *Murraylink* a Austràlia i a l'enllaç *Cross Sound Cable* als Estats Units i s'anomenen active neutral-point clamped converters. Tanmateix, la modesta millora de rendiment va tenir un preu força considerable incrementant també la complexitat, i el disseny va resultar difícil d'escalar fins a tensions de corrent continu superiors als  $\pm 150$  kV utilitzats en aquests dos projectes.

## Modular Multi-Level Converter (MMC)

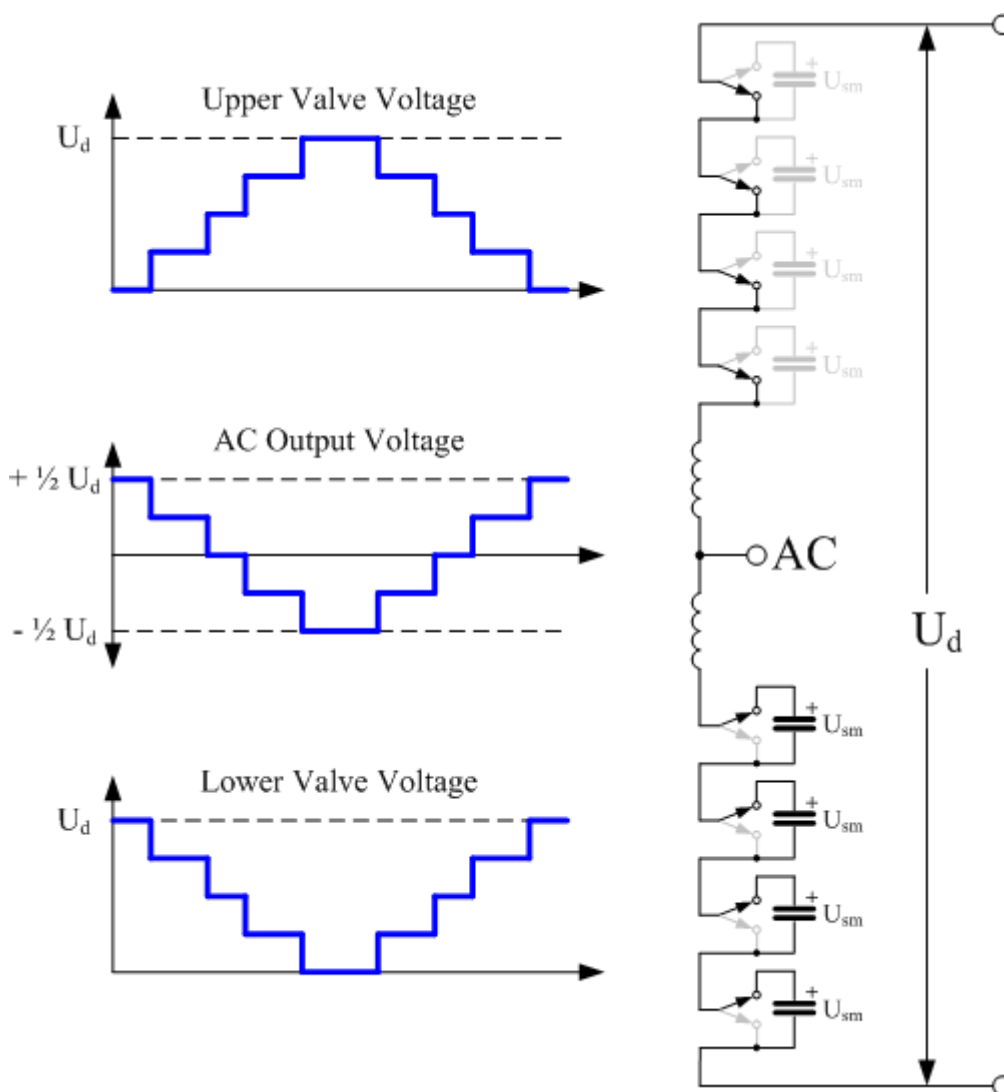
El convertidor modular multinivell (MMC), proposat originalment pel *professor Marquardt*<sup>1</sup>, ha fet pràctic realitzar convertidors amb potències de fins a 1000 MW. Utilitzat per primera vegada en el projecte *Trans Bay Cable* a San Francisco (California – EEUU) el convertidor modular de diversos nivells (MMC) s'està convertint en el tipus de convertidor de font de tensió més comuna per a HVDC. L'esquema del qual es pot veure a continuació en la *figura 2.44*.



**Figura 2.44:** Convertidor modular de diversos nivells (MMC) HVDC trifàsic.

<sup>1</sup> El Dr. Rainer Marquardt va rebre el Dipl.-Ing. (M.Sc.) i Dr.-Ing. llicenciats (doctorat) el 1978 i el 1982, respectivament, tant en comunicació electrònica com en electrònica de potència, per la Universitat de Hannover, on va treballar fins a l'octubre de 1983 com a investigador a l'Institut d'Electrònica de Potència és conegut per ser pioner en el concepte de convertidor modular multinivell (MMC), que ha revolucionat les capacitats de la tecnologia de conversió de potència

Un MMC consta de sis vàlvules, cadascuna connectant un terminal AC a un terminal DC. En la forma més comuna del circuit, la variant de mig pont, cada submòdul conté dos IGBT connectats en sèrie a través del condensador, amb la connexió de punt mitjà i un dels dos terminals del condensador que apareixen com a connexions externes. Per tant, cada submòdul actua com un convertidor independent de dos nivells que genera una tensió de 0 o  $U_{sm}$  (on  $U_{sm}$  és la tensió del condensador del submòdul). Amb un nombre adequat de submòduls connectats en sèrie, la vàlvula pot sintetitzar una forma d'ona de tensió escalonada que s'aproxima molt a una ona sinusoidal amb nivells de distorsió harmònica molt baixos.



**Figura 2.45:** Principi de funcionament del convertidor modular de diversos nivells (MMC) HVDC, representació monofàsica.

El MMC es diferencia d'altres tipus de convertidors perquè el corrent circula contínuament a les sis vàlvules del convertidor al llarg del cicle de freqüència de xarxa. Com a resultat, conceptes com "on" i "off" no tenen sentit en les vàlvules d'aquest tipus de convertidors. El

corrent continu es divideix en les tres fases i el corrent altern es divideix a la vàlvula superior i inferior de cada fase. Per tant, el corrent de cada vàlvula està relacionat amb el corrent continu  $I_d$  i el corrent altern  $I_{ac}$  de la següent manera:

$$I_v = \frac{I_{dc}}{3} + \frac{I_{ac}}{2} \quad (13)$$

On:

$I_v$  és la intensitat que circula per la vàlvula.

$I_{dc}$  és la intensitat de corrent directe.

$I_{ac}$  és la intensitat de corrent alterna.

Un MMC típic per a una aplicació HVDC conté uns 300 submòduls connectats en sèrie a cada vàlvula. En conseqüència, el rendiment harmònic és excel·lent i en algunes ocasions no calen filtres. Un altre avantatge del MMC és que no és necessari PWM, amb el resultat que les pèrdues de potència són molt inferiors a les del convertidor de dos nivells, al voltant de l'1% per extrem.

El MMC té dos desavantatges principals. En primer lloc, el control és molt més complex que el d'un convertidor de 2 nivells. Equilibrar les tensions de cadascun dels condensadors del submòdul és un repte important i requereix una potència de càlcul considerable i comunicacions d'alta velocitat entre la unitat de control central i la vàlvula. En segon lloc, els mateixos condensadors del submòdul són grans i voluminosos. Un MMC és considerablement més gran que un convertidor de dos nivells equivalent, tot i que es pot compensar amb l'estalvi d'espai, ja que no requereix filtres.

### 2.5.3. Filtres

**Filtres AC:** Aquests filtres s'encarreguen d'absorbir els harmònics generats pels convertidors estàtics que poden introduir-se a la xarxa, prevenint que formes d'ona i harmònics indesitjats acabin entrant a la xarxa elèctrica.

Aquests filtres han de complir les següents condicions:

- El quocient entre el valor eficaç de la component harmònica i el *valor eficaç*<sup>1</sup> de la component fonamental de la tensió, conegut com a distorsió harmònica de tensió, ha de ser inferior a l'1%.

$$HD_{U_k}(\%) = \frac{U_k}{U_1} \cdot 100 \quad (14)$$

$$HD_{U_k} \leq 1\%$$

On:

$HD_{U_k}$  és la distorsió harmònica de tensió en tant per cent.

$U_k$  és el valor eficaç de la component harmònica.

$U_1$  és el valor eficaç de la component fonamental de la tensió.

- La distorsió harmònica total (THD) inferior a l'1%.

A més a més, aquests dispositius proporcionen una part de la potencia reactiva necessària per al procés de conversió i prevenen de les possibles interferències telefòniques que les línies puguin generar.

L'ordre dels harmònics depèn directament del tipus de convertidor, per exemple en condicions normals, els rectificadors de 12 polsos generaran harmònics d'ordre  $12n + 1$ , essent  $n$  l'ordre de l'harmònic. Els filtres passius poden ser complementats amb filtres actius controlats electrònicament capaços d'eliminar harmònics d'ordre 50.

---

<sup>1</sup> És denomina valor eficaç o RMS a l'arrel del valor quadràtic mitjà d'una magnitud. És el valor de tensió o corrent alterna que produeix el mateix efecte de dissipació calorífica que els seu equivalent de tensió o corrent en DC sobre una determinada resistència. Per tant, el seu significat físic ens permet crear un paral·lelisme entre qualsevol tipus de corrent AC amb la seva homònima en DC.

Les bateries de condensadors son filtres que es col·loquen en paral·lel al costat d'alterna, amb la finalitat de compensar l'excés d'energia reactiva per al manteniment de tensió en el convertidor. Són connectats i desconnectats automàticament mitjançant interruptors, per compensar el factor de potència i controlar l'energia reactiva.

En els sistemes HVDC, la necessitat d'utilitzar rectificadors i inversors, pot provocar que la compensació de potencia reactiva sigui necessària degut al procés de conversió.

**Filtres DC:** Aquests filtres tenen com a objectiu reduir el component altern que es pot trobar en un senyal suposadament continu, en tant que aquest mai es perfecte i és connecten en paral·lel a la línia DC. Bàsicament son filtres per a filtrar harmònics de varis ordres, la seva configuració és molt similar a la dels filtres AC.

Les reactàncies de suavitzat o *smoothing reactors*, es col·loquen en sèrie a cada pol del costat DC del convertidor i s'encarreguen de:

- Atenuar l'arissada de sortida del convertidor, eliminant harmònics d'alta freqüència.
- Limitar el corrent de curtcircuit.
- Preveure possibles falles de commutació en els components dels convertidors.
- Eliminar ressonàncies en el costat DC.
- Reduir les interferències telefòniques.



#### 2.5.4. Línies de transport en DC

Les línies de transmissió de corrent continua poden formar part d'un enllaç HVDC. Com exemple de disseny d'una línia de transmissió d'aquest tipus, en la *figura 2.46* podem veure una torre bipolar existent per a l'enllaç de 300kV entre Tailàndia i Malàisia.



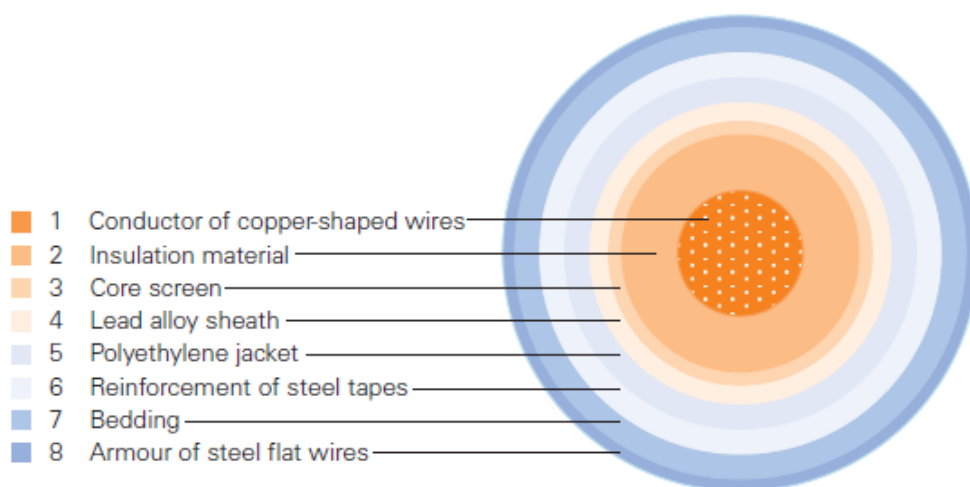
**Figura 2.46:** Línia de transport HVDC entre Tailàndia i Malàisia.

Una de les principals aplicacions de la tecnologia HVDC són sistemes de transmissió que creuen el mar. Quan apareix aquest problema, la tecnologia HVDC sol ser la solució preferida per a superar distàncies superiors a 70 km i capacitats de transmissió de l'ordre de milers de MW. Per a la transmissió submarina, es necessita un cable especial adequat per al corrent i la tensió contínua, així doncs, existeixen diferents tipus de cables per a sistemes HVDC submarins:

1) Mass-Impregnated Cable. Aquest tipus de cable s'utilitza en la majoria de les aplicacions HVDC. Consta de diferents capes, tal com es mostra a la *figura 2.47*. El conductor està construït amb capes de segments de coure trenats al voltant d'una vareta circular central. El conductor està cobert per papers impregnats d'oli i resina. Les capes interiors són de papers de carboni, mentre que la capa exterior està formada per teixits de coure. El cable impregnat es revesteix de plom per mantenir l'entorn exterior allunyat de l'aïllament. La següent capa és la protecció anticorrosió que consisteix en polietilè extruït. Al voltant de la capa de polietilè s'apliquen

cintes d'acer galvanitzat per evitar que el cable es deformi permanentment durant la càrrega del cable. Sobre les cintes d'acer s'aplica una corda de polipropilè seguida d'una armadura de filferro d'acer galvanitzat.

La tecnologia està disponible per a tensions de fins a 500 kV i una capacitat de transmissió de fins a 800 MW en un cable amb profunditats d'instal·lació de fins a 1000 m sota el nivell del mar i longituds de transmissió gairebé il·limitades. La capacitat dels cables impregnats de massa està limitada per la temperatura del conductor, que dóna lloc a baixes capacitats de sobrecàrrega.



**Figura 2.47:** Esquema de capes del Mass-Impregnated Cable.

2) Oil-Filled Cable. En comparació amb els Mass-Impregnated Cable, el conductor està aïllat amb paper impregnat d'un oli de baixa viscositat i incorpora un conducte longitudinal que permet el flux d'oli al llarg del cable. Els Oil-Filled Cable són adequats tant per a tensions tant de AC com de DC amb tensions de DC de fins a 600 kV. A causa del flux d'oli requerit al llarg del cable, les longituds de la línia de transmissió estan limitades a <100 km i el risc de fuites d'oli al medi ambient sempre ha d'estar present i més tenint en compte que aquest tipus de cable funcionen molt bé per a transport de línies submarines.

3) XLPE: Per superar els desavantatges dels tipus de cable esmentats anteriorment, els proveïdors de cables van dur a terme una àmplia recerca durant anys, el resultat és el cable XLPE que pren el nom del material aïllant. El conductor és de coure i està segmentat i aïllat per capes de XLPE extruït. Aquest material aïllant, és adequat per a una temperatura del conductor de 90°C i una temperatura de curtcircuit de fins a 250°C. Tot i que la principal aplicació per als cables XLPE és la instal·lació terrestre i la indústria offshore, s'està desenvolupant XLPE amb material d'aïllament extruït per a sistemes HVDC amb capacitats de transmissió més baixes.

### 2.5.5. Interruptors

Els interruptors possibiliten als rectificadors i inversors operar en les seves distintes formes per a tal que el sistema funcioni correctament. Es connecten en paral·lel amb filtres encarregats d'absorbir els transitoris creats en l'obertura o tancament d'interruptors. Existeixen diferents tipus d'interruptors:

- HSNBS (High – Speed Neutral Bus Switch).

El HSNBS ha de commutar una part del corrent continu cap a l'elèctrode de terra en cas que es produeixin falles a terra en el neutre de la instal·lació.

- HSGS (High – Speed Ground Switch).

El HSGS es necessari per connectar el neutre de l'estació a la xarxa de terra de l'estació si el camí de l'elèctrode a terra queda aïllat.

- MRTB (Metallic Return Transfer Breaker).

En el MRTB, si s'ha de bloquejar un pol d'un sistema bipolar, el funcionament monopolar del segon pol es realitza automàticament, però amb retorn de corrent a través de terra (veure *figura 2.37*). Es possible un mode alternatiu d'operació monopolar si la línia del pol bloquejat pot utilitzar-se com a retorn del corrent (veure *figura 2.36*).

El MRTB es necessari per a la transferència de terra a retorn metàl·lic sense interrupció del flux d'energia.

- GRTS (Ground Return Transfer Switch).

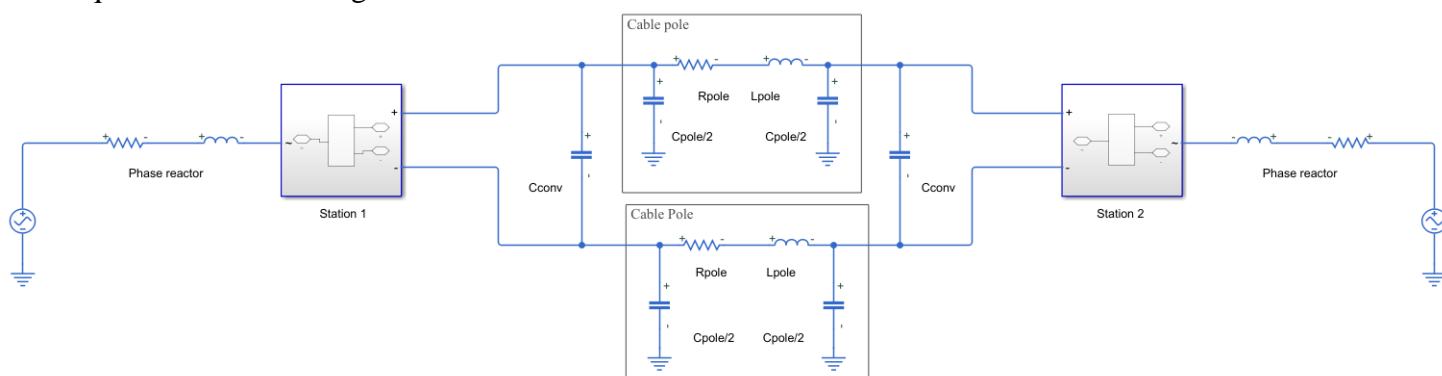
El GRTS es necessari per a la transferència del retorn metàl·lic al funcionament bipolar a través del retorn a terra, també sense interrupció del flux d'energia.

## 2.6. Informació necessària per caracteritzar enllaços HVDC

Considerant que en el marc d'aquest TFG es durà a terme l'estudi d'alguns fenòmens associats al funcionament dels enllaços HVDC, tot seguit s'enumeraran algunes dades necessàries per realitzar la caracterització dels esmentats enllaços prèvia a qualsevol estudi.

1. Capacitat de transmissió de potència (MW).
2. Voltatge AC (kV).
3. Voltatge DC (kV).
4. Longitud total línies (km).
5. Longitud línies submarines (km).
6. Longitud línies aèries (km).
7. Longitud línies subterrànies (km).

Tenint en compte que l'enllaç VSC-HVDC de configuració punt a punt és el més comú de tots, en aquest projecte es caracteritzaran enllaços d'aquest tipus, l'esquema elèctric genèric dels quals es mostra tot seguit:

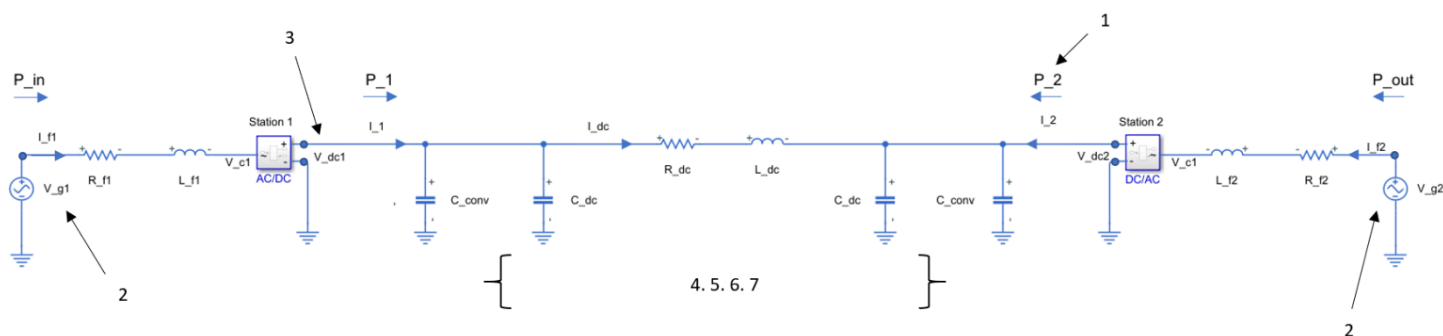


**Figura 2.48:** Model VSC-HVDC amb dos terminals. Sistema amb enllaç de transmissió de corrent DC detallat.

El sistema es una connexió monopolar simètrica formada per dos estacions VSC juntament amb els components dels costats AC i DC. Cada estació és connectada a una xarxa AC, representada normalment per una font de tensió en sèrie amb la impedància de curtcircuit de la xarxa, a través d'un transformador elevador i una reactància de fase. Suposant, com es duu a terme en tots els anàlisis que precedeixen, que la xarxa AC és infinitament forta amb una impedància de curtcircuit nul·la i que el transformador té una inductància de dispersió baixa, ambdues son

substituídes per una única font de tensió a la que s'hi connecta la reactància de fase (amb inductància  $L_f$  i resistència  $R_f$ ). Els terminals DC de cada estació es connecten a un condensador DC amb capacitança  $C_{conv}$ . Cada cable de DC es modela com a un model Pi.

Aquest esquema elèctric genèric associat als enllaços VSC-HVDC de configuració punt a punt es pot reduir a un esquema elèctric equivalent simplificat més compacte, el qual es presenta a continuació:



**Figura 2.49:** Model VSC-HVDC amb dos terminals. Sistema amb enllaç de transmissió de corrent DC compactat.

Donades les característiques físiques de la configuració monopolar simètrica i considerant condicions d'equilibri, el model de la *Figura 2.48* pot equiparar-se al model asimètric de la *Figura 2.49*. Els valors de l'enllaç es descriuen com:  $R_{dc} = 2 \cdot R_{pole}$ ,  $L_{dc} = 2 \cdot L_{pole}$  and  $C_{dc} = \frac{C_{pole}}{4}$ .

En la configuració típica d'un enllaç VSC-HVDC de dos terminals, si la potència es transmet de l'estació 1 a l'estació 2, llavors l'estació 1 és una estació controlada per tensió contínua i l'estació 2 està controlada per potència activa.



### 3. Caracterització d'alguns enllaços HVDC existents arreu del món

Un cop coneguts els paràmetres que defineixen els enllaços HVDC, en aquest apartat es procedeix a caracteritzar tres enllaços per a tal de simular diferents fenòmens elèctrics. La modelització mitjançant software ens permet obtenir un circuit equivalent de l'enllaç on es tenen en compte tots els seus elements i ens permet la simulació del seu comportament elèctric.

Primerament s'executa el programa i és mostra una imatge d'una línia de transmissió juntament amb una finestra (veure *figura 3.1*) on s'ha d'escriure el país on està ubicat el projecte en qüestió que volem estudiar.

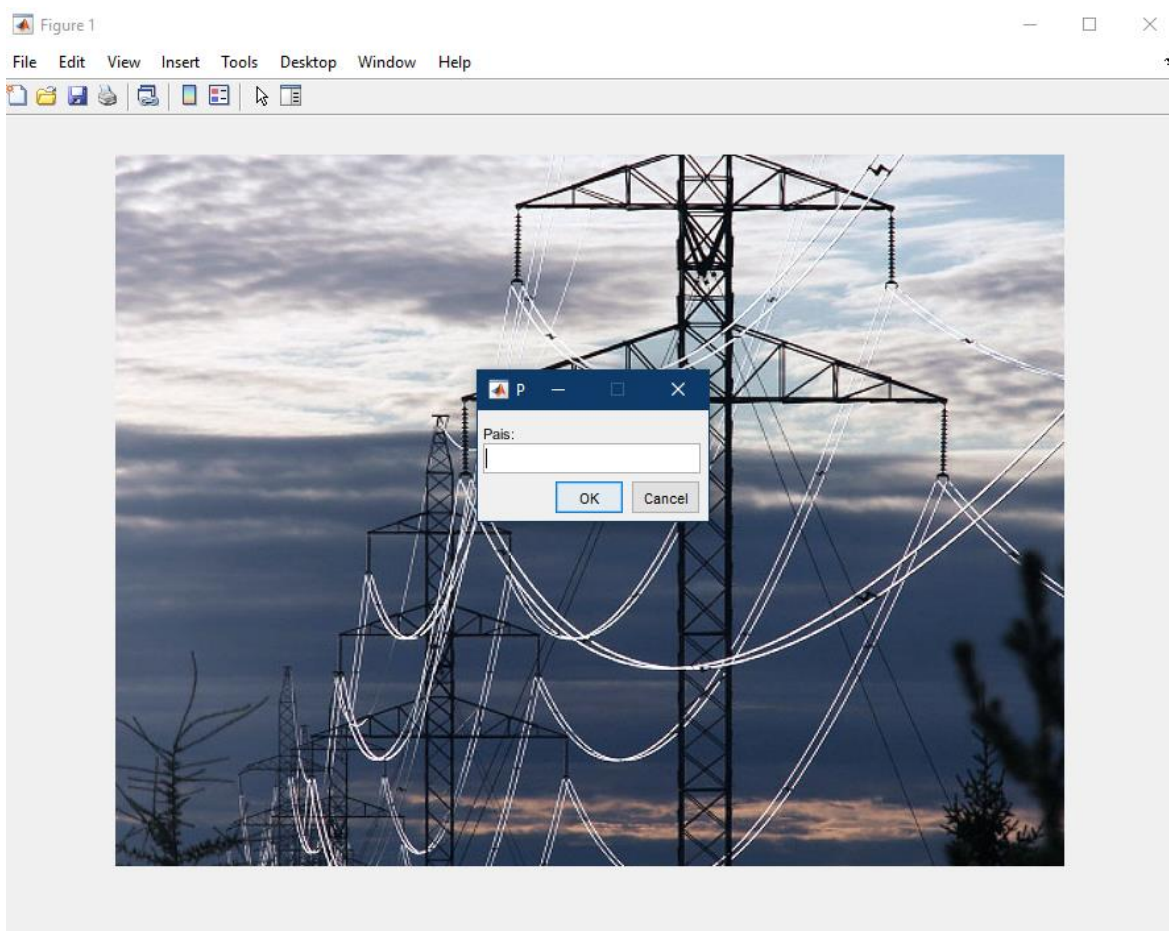
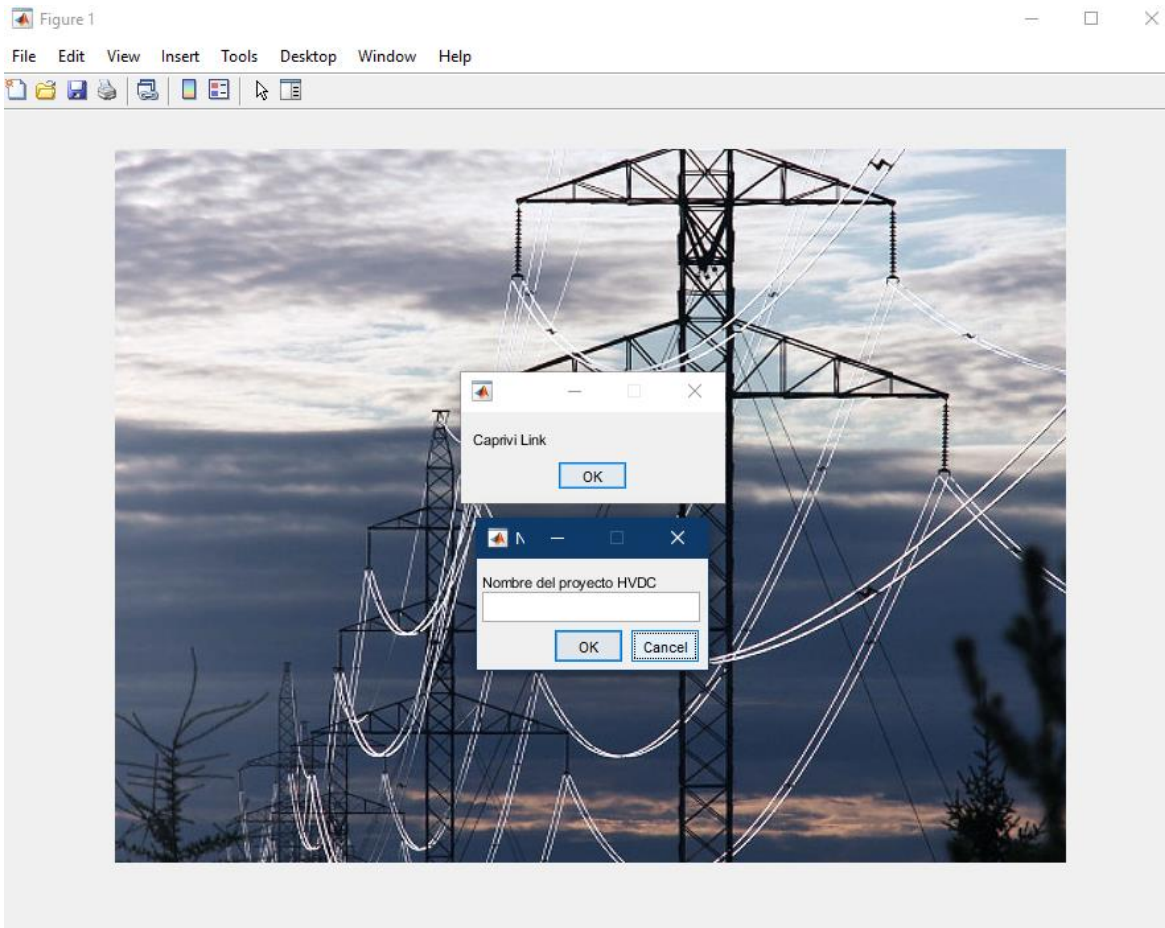


Figura 3.1: Iniciació del programa.

A l'introduir el país (en el nostre cas "Namíbia") el programa recorre la matriu i busca tots els projectes que tinguin al menys una estació en aquest país. Si existeix algun projecte al país, apareix una altra finestra amb el llistat de tots els projectes.



**Figura 3.2:** Llistat de projectes en un país (cas concret de Namíbia).

Si introduïm a la segona finestra el nom d'un dels projectes que han aparegut, apareixerà tota la informació tècnica del projecte en qüestió (veure *figura 3.7*). Cal tenir en compte que si no s'escriu el nom del projecte exactament igual al de la llista, el programa no ens donarà la informació i apareixerà un missatge d'error.



## 3.1. Caprivi Link

### 3.1.1. Informació general

Moltes de les Xarxes Elèctriques Africanes abasten grans distàncies i sovint estan formades per xarxes AC relativament febles<sup>1</sup>. La tecnologia HVDC amb convertidor commutat de línia (LCC) s'ha utilitzat durant molts anys per a la transferència massiva d'energia per a llargues distàncies en aquest continent. L'enllaç HVDC-LCC anomenat *Cahora Bassa* entre Bassa (Moçambic) i Apollo (Sud-àfrica) va ser construït a la dècada de 1970 i té capacitat per transferir 1920 MW. Malgrat l'extens ús d'aquesta tecnologia durant el s. XX i inicis del s. XXI, els enllaços HVDC-VSC cada cop està agafant més presència arreu del món, també a l'Àfrica, per tal de fer sistemes energètics més robusts. El primer enllaç a utilitzar la tecnologia VSC al continent africà és la *Interconnexió Caprivi Link* a Namíbia.

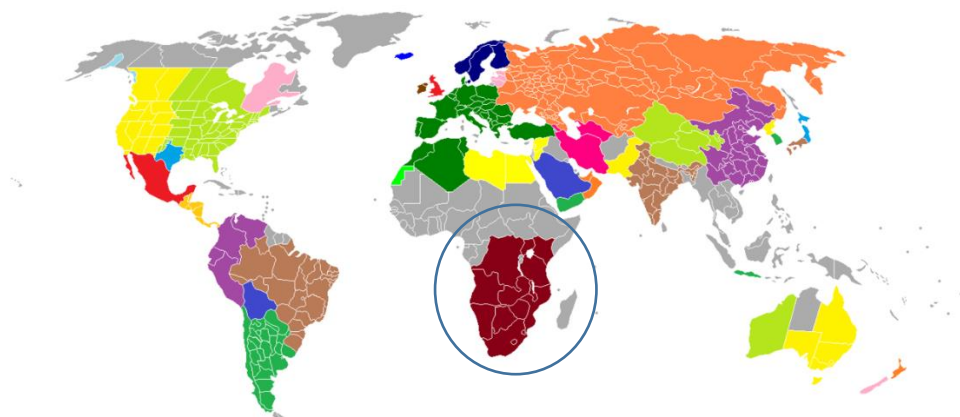
El novembre de 2010, ABB va posar en servei la interconnexió Caprivi Link HVDC de 350 kV i 300 MW basada en la tecnologia VSC i requerit per l'empresa elèctrica nacional de Namíbia, NamPower. El projecte estableix un nou punt de referència ampliant el voltatge per a la tecnologia HVDC Light a 350 kV, i fou la primera vegada que s'implementà la tecnologia per a la transmissió aèria de llarga distància.

Aquest enllaç proporciona una connexió asíncrona entre les xarxes elèctriques AC de Namíbia i Zàmbia i és una important interconnexió regional al pool d'energia del sud d'Àfrica (*SAPP*<sup>2</sup>). Aquest sistema energètic representa una xarxa AC interconnectada i únicament conté tres sistemes HVDC. La generació més gran situada al sud d'Àfrica es compon principalment de centrals tèrmiques, mentre que la zona central (Zimbabwe i Zàmbia) conté una gran proporció de centrals hidroelèctriques. El corredor occidental (Namíbia) només té una petita central hidràulica i una altra de tèrmica. L'enllaç Caprivi forma una interconnexió regional molt important al pool energètic proporcionant una interconnexió centre-oest veure *Figura 3.3*.

---

<sup>1</sup> Es considera que una xarxa elèctrica feble quan el voltatge i la freqüència son inestables i/o el subministrament energètic és propens a interrupcions.

<sup>2</sup> És una cooperació creada l'any 1995 amb l'objectiu de crear una xarxa elèctrica comuna i un mercat comú d'electricitat entre les companyies elèctriques nacionals del sud d'Àfrica. Alguns dels països membres són: Angola, Botswana, Zàmbia i Namíbia entre d'altres.



**Figura 3.3:** Imatge del SAPP.

La primera fase del projecte comprèn una línia de transmissió HVDC de 951 km a  $\pm 350$ kV, estacions de conversió monopolar de 300 MW i extensions de subestació AC associades a la subestació de Zambezi i la subestació Gerus. Aquesta primera fase també va incloure la construcció d'elèctrodes de terra amb un cost total del projecte 400 milions de dòlars americans.

La segona fase consisteix a actualitzar les estacions convertidores de les subestacions de Zambezi i Gerus a un esquema bipolar de 600 MW i una línia de transmissió de 285 km a 400kV AC des de Gerus fins a la subestació Auas (veure *figura 3.4*). També està previst un nou enfortiment de la xarxa a Zàmbia i una línia de 330 kV AC a través de Botswana fins a Zimbabwe. Com ja s'ha comentat, en aquests països les xarxes de corrent altern connectades a les estacions convertidores HVDC són extremadament febles amb nivells de falla de l'ordre de la potència nominal dels convertidors. La tecnologia VSC-HVDC proporciona certs avantatges respecte a la tecnologia LCC-HVDC en connectar xarxes AC relativament febles.



**Figura 3.4:** Zambezi (lila), Gerus (blau) i Auas (vermell) destacats al mapa.

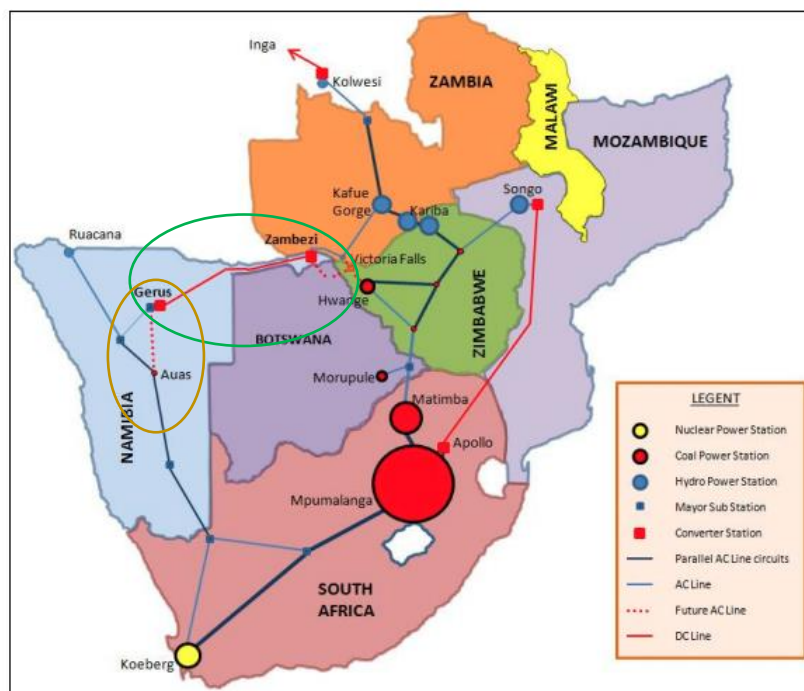


Figura 3.5: Imatge del SAPP amb la Interconnexió HVDC Caprivi Link, primera fase en verd i segona fase en marró.

Finalment aquest projecte també jugarà un paper clau en la integració de generacions d'energia renovable i neta, com l'eòlica i la solar. Això es podria fer mitjançant HVDC multi-terminal, on es connectaran sistemes fotovoltaics de gran escala o parcs eòlics al bus DC de l'enllaç Caprivi mitjançant els seus respectius convertidors.

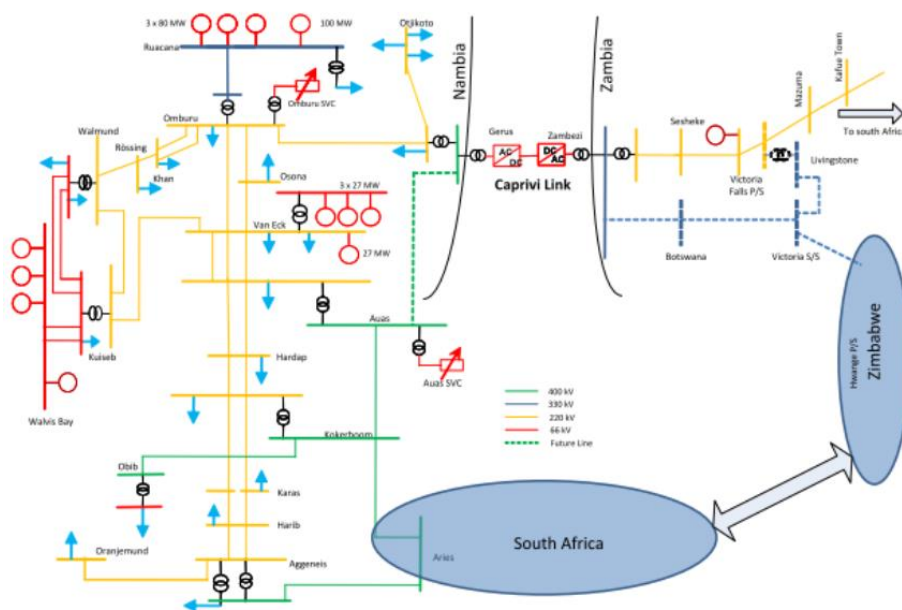


Figura 3.6: Imatge del SAPP amb la Interconnexió HVDC Caprivi Link destacada.

La tecnologia HVDC-VSC ha demostrat millorar l'estabilitat i ajudar a prevenir apagades quan s'interconnecten dues xarxes AC extremadament febles. Proporciona un suport de tensió molt robust quan es produeixen situacions de col·lapse de tensió inherents a causa de la seva capacitat alhora que proporciona un suport de freqüència per a sistemes aïllats.

### 3.1.2. Informació tècnica

Les figures 3.5 i 3.6 mostren la ubicació geogràfica i un diagrama de línies de la interconnexió Caprivi, respectivament. Aquest enllaç connecta la xarxa elèctrica de Namíbia i la veïna Zàmbia amb 950 km de línia aèria que funciona a 350 kV de corrent continu.

Aquest projecte uneix la subestació de 400 kV de corrent altern de Gerus i la subestació de 330 kV de corrent altern de Zambezi. La construcció de l'enllaç consta de dues fases la primera fase de l'enllaç, que és un esquema monopolar de 300 MW dissenyat tant per a la tornada a terra com per al retorn metàl·lic, completat i posat en marxa el 2010. La segona fase consistirà a convertir el sistema monopolar de 300 MW en un sistema bipolar de 600 MW en un futur pròxim tal com s'ha comentat en l'apartat anterior.

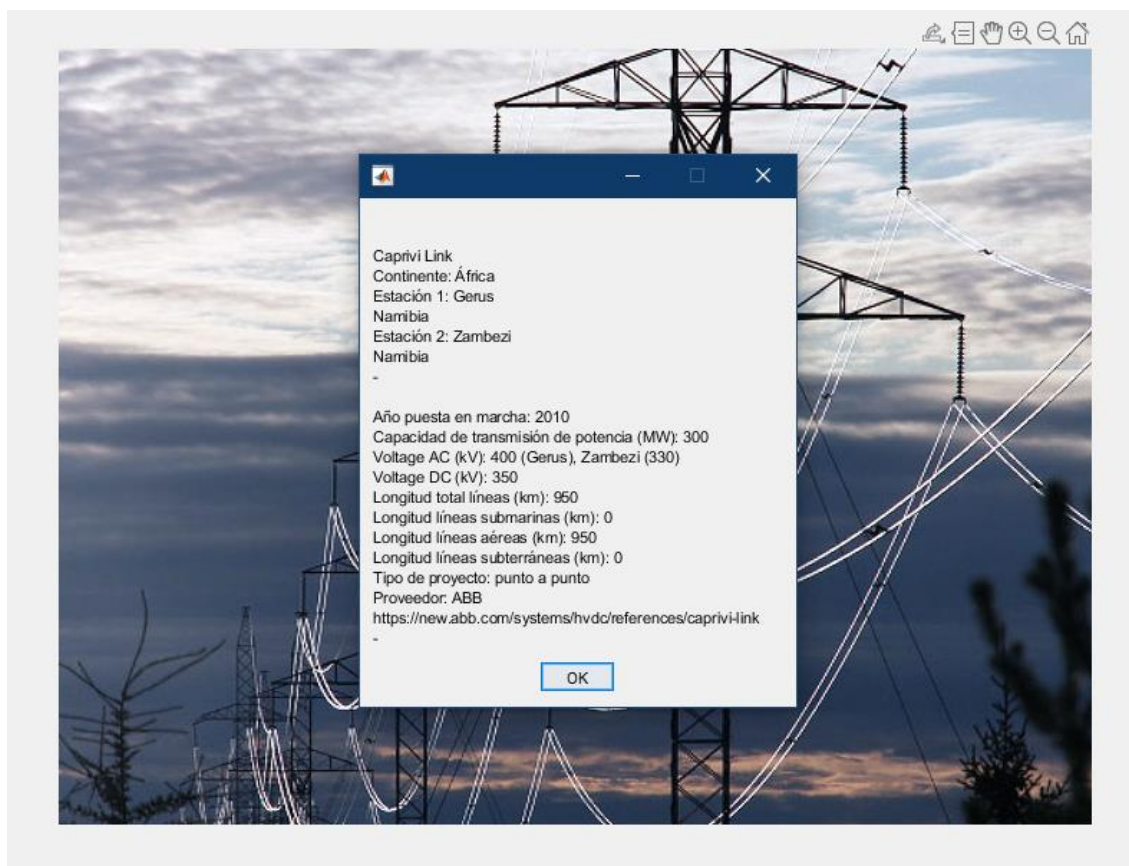


Figura 3.7: Informació tècnica del projecte “Caprivi Link”.

Com que CLI és una connexió aèria monopolar que està preparada per a una futura extensió bipolar, la tecnologia VSC implementada és una mica diferent de la resta de connexions. La sortida de les estacions convertidores és una tensió DC a terra, és a dir, 350kV, mentre que tots els esquemes VSC anteriors, excepte l'enllaç Valhall, han produït una tensió DC de doble polaritat, com ara  $\pm 150\text{kV}$ . La figura 3.8 mostra un esquema simplificat d'una línia VSC monopolar (com és el cas de la primera fase del CLI). Un futur sistema bipolar s'obté afegint un altre bloc convertidor o pol per estació.

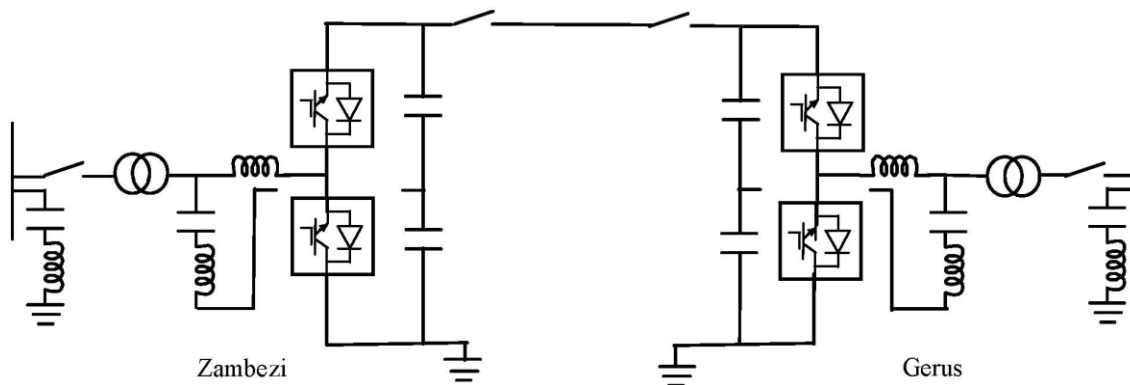


Figura 3.8: Esquema simplificat de CLI.

La vàlvula convertidora està connectada a la xarxa de corrent altern mitjançant el transformador i el reactor convertidor. El transformador del convertidor adapta i ajusta la tensió de la xarxa a una tensió del convertidor òptima i permet reduir fins al 80% la tensió DC nominal en cas de problemes d'aïllament de la línia.

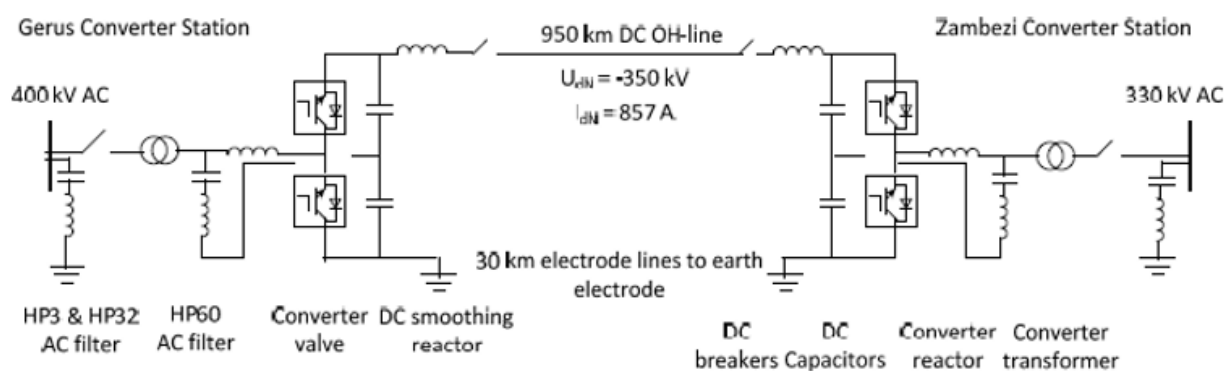
La conversió es controla mitjançant commutació de modulació d'amplada d'impuls (PWM) i el reactor convertidor proporciona la reactància adequada per al control del flux de potència activa i reactiva. El terminal d'alta tensió de la vàlvula convertidora està connectat a les línies aèries DC i el terminal de baixa tensió es connecta a l'elèctrode de terra a través de les línies d'elèctrodes de retorn metàl·lic. El conductor de retorn metàl·lic està connectat a terra a Gerus a la xarxa de terra de l'estació. Els filtres AC són els encarregats d'eliminar el contingut harmònic de la forma d'ona PWM de forma quadrada.

En cas d'error o falla a la línia DC, les estacions convertidores s'aïllen temporalment de la xarxa de corrent altern i de la línia DC obrint els interruptors automàtics de corrent altern i corrent continu per interrompre els corrents de fallada. Immediatament després d'esborrar els corrents de fallada, es tornen a tancar els interruptors i es repren la transmissió.

**Taula 3.1.** Paràmetres Caprivi Link HVDC.

Data	Paràmetres
Proveïdor	ABB
Número de pols	1
Capacitat de transmissió de potència	300 MW
Voltatge AC subestació 1 (Gerus)	400 kV
Voltatge AC subestació 2 (Zambezi)	330 kV
Voltatge DC	350 kV
Coupling transformator on both sides	315 MVA
Longitud línia aèria	950 km
Frequència de conversió	1150 kHz

Aplicant les dades recollides en la *taula 3.1* a l'esquema de la *figura 3.8* obtenim el següent esquema:



**Figura 3.9:** Diagrama de l'enllaç monopolar Caprivi Link HVDC.

## 3.2. Interconnexió Elèctrica Espanya - França (Baixàs – Santa Llogaia).

### 3.2.1. Informació general

INELFE (Interconnexió Elèctrica França - Espanya) és l'empresa responsable de la construcció i posada en funcionament, l'octubre de 2015, de la interconnexió elèctrica Baixàs-Santa Llogaia, amb l'objectiu d'incrementar la capacitat d'intercanvi entre la península Ibèrica i la resta d'Europa; és propietat al 50% de Red Eléctrica de España (REE) i Réseau de Transport d'Électricité (RTE).

Aquest enllaç fou dissenyat com un enllaç amb convertidors de font de tensió (VSC) idèntics però independents entre si entre Santa Llogaia (Espanya) i Baixàs (França), *veure a les figures 3.7 i 3.8*, amb una potència activa nominal de 1.000 MW cadascun i una tensió DC nominal de  $\pm 320$  kV. Aquest projecte va ser la primera interconnexió terrestre DC d'Europa integrada a la xarxa AC sincrònica. Aquesta interconnexió ha permès duplicar el nivell d'interconnexió entre França i Espanya, que passa dels 1.400 MW previs a la seva construcció, als 2.800 MW, o cosa que és el mateix, del 3% actual de la demanda al 6%

En qualsevol cas, la capacitat que Espanya exporti quilowatts a França o que els importa d'aquest país serà més gran, i afavorirà, entre altres coses, que es pugui donar sortida a l'excident de producció de les renovables espanyoles en moments de molt vent o bé rebre energia de país veí quan no n'hi hagi.

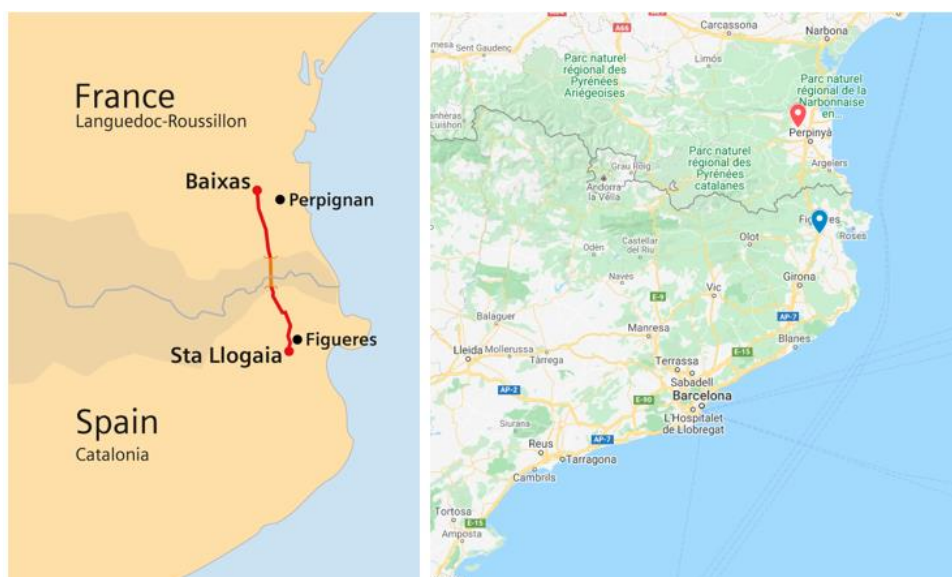


Figura 3.10 i 3.11: Situació geogràfica de Santa Llogaia (blau) i Baixàs (vermell).

Aquesta interconnexió elèctrica entre Espanya i França representa una inversió de 700 milions d'euros, rebent una subvenció de 225 milions de la Unió Europea en el marc del programa EEPR<sup>1</sup> (European Energy Programme for Recovery). Segons els estudis realitzats a la prèvia construcció del projecte s'espera una rendibilitat de la inversió inferior a 10 anys, principalment ja que permet utilitzar plantes de generació més eficients i, per tant, més econòmiques

Actualment, Espanya i França estan connectats per vuit línies transfrontereres (veure figura 3.10), dues línies a 400 kV, tres línies a 220 kV i dues línies a 132 kV, més la connexió Santa Llogaia – Baixàs. Com que aquestes línies són l'única connexió entre Espanya i la resta del sistema europeu, tenen una importància especial pel conjunt del Sistema Ibèric.



Figura 3.12: Interconnexions transfrontereres d'Espanya.

Aquest enllaç va suposar un avanç extraordinari tant en l'àmbit nacional com a escala europea ja que, permet augmentar la capacitat d'intercanvi<sup>2</sup> a través de la frontera Franco-Espanyola i l'assoliment de part dels objectius energètics europeus. A més a més, té la particularitat de ser

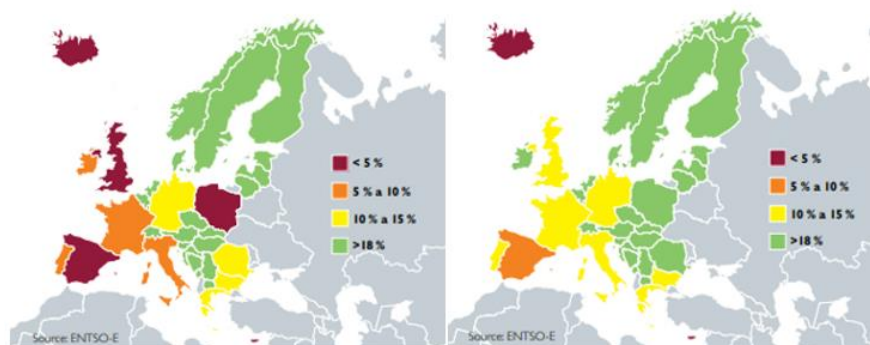
<sup>1</sup> El Programa Energètic Europeu per a la Recuperació (EEPR) es va establir el 2009 per abordar tant la crisi econòmica europea com els objectius de la política energètica europea i constava d'un pressupost de 4.000M d'euros per a finançar projectes de la UE amb l'objectiu d'impulsar l'economia.

<sup>2</sup> La capacitat d'intercanvi es defineix com la màxima potència elèctrica instantània que es pot importar o exportar entre dos sistemes elèctrics mantenint els criteris de seguretat de cadascun dels sistemes.



un enllaç HVDC construït a partir dels últims avanços tecnològics, tant pel que fa a les estacions de conversió (*Siemens VSC Plus*) com pel que fa als cables de transport (*XLPE*).

Per tal que tots els països obtinguin el màxim benefici d'aquest intercanvi, és fonamental mantenir un alt nivell de capacitat d'intercanvi és per això que la Unió Europea recomana que la capacitat mínima d'interconnexió entre països representi almenys el 10% de la capacitat de generació instal·lada de cadascun d'ells amb l'objectiu que finalment s'aconsegueixi l'anomenat mercat intern de l'electricitat a Europa per tal d'integrar tots els mercats actuals existents dins de la Unió Europea en un mercat únic.



**Figura 3.13 i 3.14:** Capacitat d'intercanvi entre països de la UE, anys 2011 i 2020 respectivament.

La xarxa d'interconnexió existent proporciona una capacitat transfronterera de 2.800 MW entre Espanya i França. Amb el pas dels anys, la necessitat d'augmentar la capacitat de transferència ha adquirit cada vegada més importància a causa de l'augment de la demanda d'ambdós sistemes, a causa de la liberalització del mercat elèctric i de l'ambició de la UE sobre un mercat elèctric europeu, i més recentment a causa dels objectius energètics europeus coneguts com a *objectius 20-20-20*<sup>1</sup>.

A causa de la desaprovació social per a la construcció d'una línia aèria a la zona, només fou possible una solució subterrània o submarina; la variable submarina va ser descartada ràpidament degut a la presència de bancs de *posidònia*<sup>2</sup> a la zona fet que va fer que el projecte es decantés per a la solució de cable enterrat.

<sup>1</sup> L'objectiu del 20/20/20 per al 2020 són mesures per combatre el canvi climàtic amb l'objectiu de portar els països d'Europa cap a un futur més sostenible, amb una economia que generi poques emissions de carboni.

<sup>2</sup> Planta subaquàtica endèmica del Mar Mediterrani.

### 3.2.2. Informació tècnica

Un dels requisits principals per a l'ús de la nova tecnologia (VSC) era un control automàtic de la potència reactiva a la zona propera a la frontera, a més, calia garantir la seguretat del subministrament a aquesta zona, principalment Girona. Aquest lloc és avui una àrea de demanda creixent, amb poca generació i alimentada des de la xarxa de transmissió per punts remots i una línia de doble circuit de 220 kV a Juia, que en cas de fallada crearia una important necessitat d'energia. D'altra banda, la zona de Perpinyà, que és una regió d'importació elevada, milloraria la seguretat del subministrament amb una nova connexió de suport en cas del doble circuit a Narbona (400 kV Baixas-Gaudiere).

La tecnologia VSC permet un control independent de la potència activa i reactiva, i un control de voltatge continu i precís, que compleix els requisits esmentats anteriorment. La capacitat de realitzar un "Black start"<sup>1</sup> és molt important en cas de fallada de les línies de corrent altern per a la recuperació del sistema. A més, la possibilitat d'alimentar una xarxa passiva i cap control mínim de potència activa permet garantir la seguretat transfronterera del subministrament. A més, no tenir un requisit mínim de potència de curtcircuit no limita el flux de transferència, com ho faria amb la tecnologia LCC, i no tenir potència activa mínima és un altre avantatge.

D'altra banda, la inversió del flux d'energia sense inversió de polaritat de la tensió en molt poc temps (ja que el corrent pot ser bidireccional mitjançant IGBT en paral·lel al díode) pot ser útil per al suport tant en l'àmbit local com nacional.

Finalment, els harmònics són menys problemàtics que a la tecnologia LCC, els transformadors de convertidors no són tan particulars com per a LCC i, pel que fa a la seguretat de la xarxa, la tecnologia VSC és capaç d'amortir les oscil·lacions de potència d'una manera millorada i permet un millor control de freqüència el que millora l'estabilitat de la xarxa.

La conclusió dels estudis va demostrar que certes característiques de la tecnologia VSC eren indispensables per a un funcionament millor i flexible de l'enllaç DC a la xarxa francès-espanyola. Els resultats quant a l'estat estacionari i l'anàlisi dinàmica, necessaris per comprovar la consistència de la nova solució tecnològica, van demostrar que el comportament del sistema de xarxa és correcte i que s'assoleixen els objectius de capacitat d'intercanvi mantenint la seguretat de la xarxa.

---

<sup>1</sup> Un "Black-Start" és una manera de restaurar l'energia després d'un apagat sense l'ajut de fonts d'energia externes i és necessari després del tancament del sistema a causa, normalment, d'una falla.

Es va encarregar la nova interconnexió entre França i Espanya com a dos enllaços independents de 1.000 MW de capacitat implementats amb tecnologia VSC i  $\pm 320$  kV<sub>dc</sub>. Les estacions convertidores de França i Espanya es van dissenyar i implementar per Siemens i estan connectades respectivament als nodes AC 400 kV 50 Hz de Baixas que és un node existent a la zona de Perpinyà, i Santa Llogaia que és un node nou.

A continuació podem veure la distribució de les estacions de conversió:



**Figura 3.15:** Esquema de les estacions de conversió de l'enllaç HVDC Baixàs-Santa Llogaia.

1. Caps de cable.
2. Transformadors (6 en funcionament i 1 de backup).
3. Sales de conversió DC-AC i viceversa: (3 files de 900 mòduls de potència per sala. 25 equips de backup).
4. Cabines de refrigeració.
5. Edifici de control i comandament.
6. Central de tractament d'aire.
7. Aerorefrigeradors.
8. Connexió a la resta de la xarxa AC.

Pel que fa a la línia de transmissió, la longitud al voltant dels 64,5 km entre els dos nodes està realitzat amb 2 cables amb una secció transversal de 2.500 mm<sup>2</sup>, de cable de coure amb aïllament XLPE i pantalla de tub d'alumini. Al voltant de 8,5 km són enterrats en un túnel, amb un diàmetre de 3,5 m) que travessa els Pirineus orientals a causa de les dificultats presentades pel terreny el qual impossibilitava la ruta normal del cable (veure figures 3.16 i 3.17). La resta del cable està enterrat en una trinxera que requereix una ocupació permanent entre 4-7 m (veure figura 3,15).



Figura 3.16 i 3.17: Imatges del cable enterrat i esquema del túnel subterrani.

Com ja s’ha fet amb anterioritat, accedim a la base de dades per a obtenir les característiques de l’enllaç i s’elabora la *taula* 3.2.

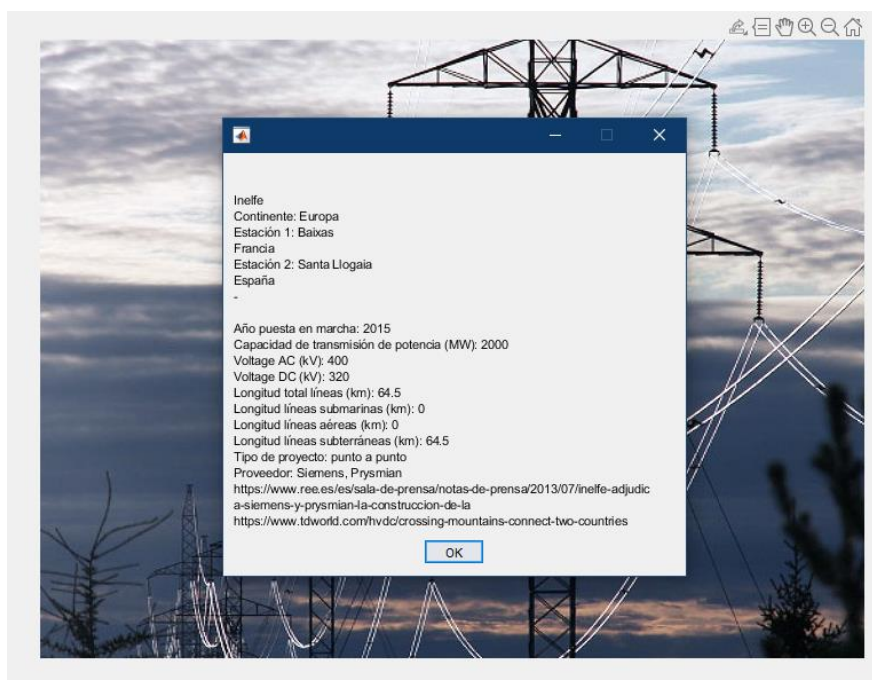
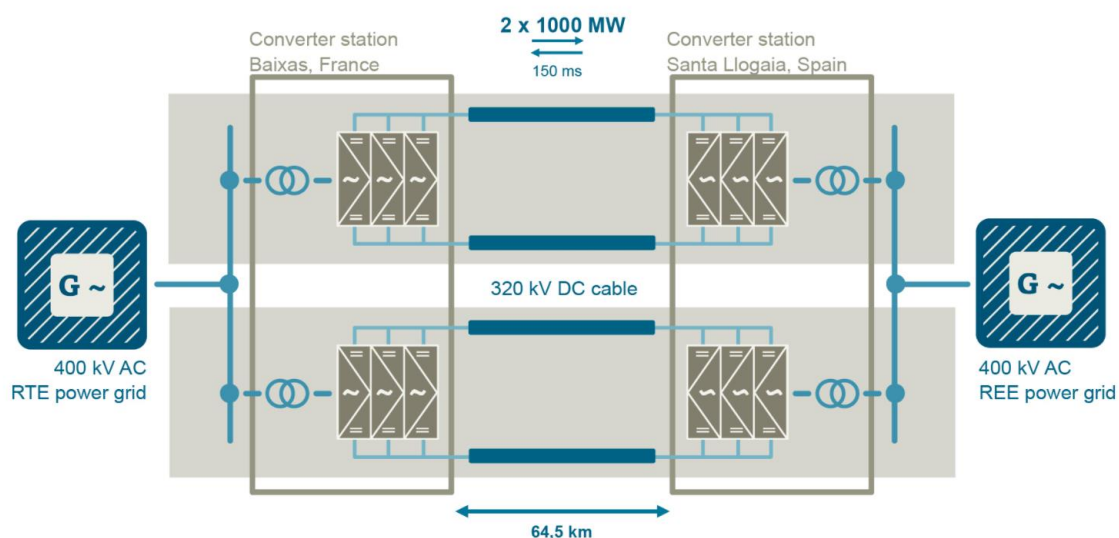


Figura 3.18: Informació tècnica del projecte “INELFE Baixas-Santa Llogaia”.

**Taula 3.2.** Paràmetres INELFE Baixàs-Santa Llogaia.

Data	Paràmetres
Proveïdor	Siemens
Numero de circuits	2 sistemes independents (2x monopòl simètric)
Número de cables	4 cables (2 per enllaç)
Tecnologia del cable	XLPE
Capacitat de transmissió de potència	2000 MW (2x1000) MW
Voltatge AC subestació 1 (Baixàs)	400 kV
Voltatge AC subestació 2 (Santa Llogaia)	400 kV
Voltatge DC	320 kV
Longitud línia subterrània	64,5 km

Aplicant les dades recollides en la *taula 3.2* a l'esquema de la *figura 3.19* obtenim el següent esquema format per dos enllaços monopolars connectats en paral·lel que treballen de forma independent.



**Figura 3.19:** Diagrama de l'enllaç INELFE Baixàs-Santa Llogaia.

### 3.3. East-West Interconnection (EWIC)

#### 3.3.1. Informació general

Des de 2006, *EirGrid*<sup>1</sup> opera i desenvolupa la xarxa elèctrica nacional d'alta tensió a Irlanda i és en concret propietari i operador de la interconnexió East-West de corrent continu d'alta tensió (EWIC), que va entrar en servei comercial el desembre del 2012. La interconnexió proporciona una capacitat bidireccional d'intercanvi de potència de 500 MW entre les xarxes irlandesa i britànica de 400 kV tal com es pot veure en la figura següent:

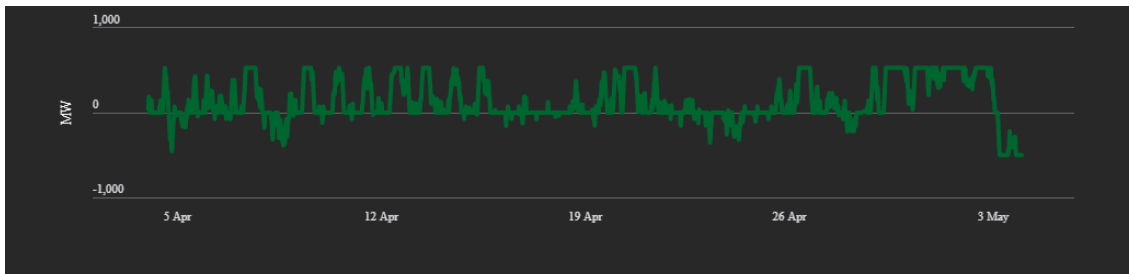


**Figura 3.20:** Interconnexions del Regne Unit. EWIC destacat.

EirGrid va adjudicar un contracte a ABB per subministrar equips elèctrics per connectar les xarxes elèctriques d'Irlanda i Gal·les. Amb l'objectiu d'ampliar la seva generació d'energia eòlica i el sistema de transmissió EWIC HVDC-Light de 500 MW  $\pm$  200 kV proporciona una oportunitat per exportar l'excés d'energia al mercat britànic. Com que EWIC transmet electricitat en ambdues direccions, beneficia els consumidors millorant la seguretat del subministrament, augmentant la competitivitat i fomentant el creixement de la generació d'energia renovable.

<sup>1</sup> És l'operador estatal de transmissió d'energia elèctrica a Irlanda, constituïda com a empresa privada.

És per això, que des que va entrar al servei comercial, EWIC s'ha utilitzat molt per importar energia a Irlanda, aprofitant els costos de generació més baixos disponibles a Gran Bretanya, amb períodes d'exportació ocasionals, tal com podem observar en la *figura 3.21*, on podem observar l'intercanvi energètic entre abril i maig de 2021.



**Figura 3.21:** Flux d'energia a través del EWIC entre 04/04/2021 i 03/05/2021.

L'East-West Interconnection representa una fita significativa en el desenvolupament de la tecnologia VSC-Light d'ABB, ja que fou el primer projecte que treballà a una tensió de  $\pm 200\text{kV}$  i amb una secció de cables HVDC, la més gran del món. En posar-se en marxa, el projecte EWIC va convertir-se en el convertidor VSC més potent del món. Aquest enllaç, també és el primer projecte comercial HVDC-VSC en connectar el Regne Unit amb Irlanda.

Els avantatges addicionals per al sistema energètic Irlandès, a causa de l'elecció de la tecnologia HVDC Light, són la capacitat de realitzar un "Black Start" del sistema per restaurar l'energia en cas d'apagades i suport actiu de la tensió de corrent altern. A més, en connectar-se a la xarxa nacional del Regne Unit, Irlanda ja pot accedir a l'energia des de tota Europa (mitjançant un interconnector des de Gran Bretanya fins al continent).

ABB va ser responsable de l'enginyeria de sistemes, inclòs el disseny, subministrament i instal·lació de les estacions convertidores i dels cables marítics i terrestres.

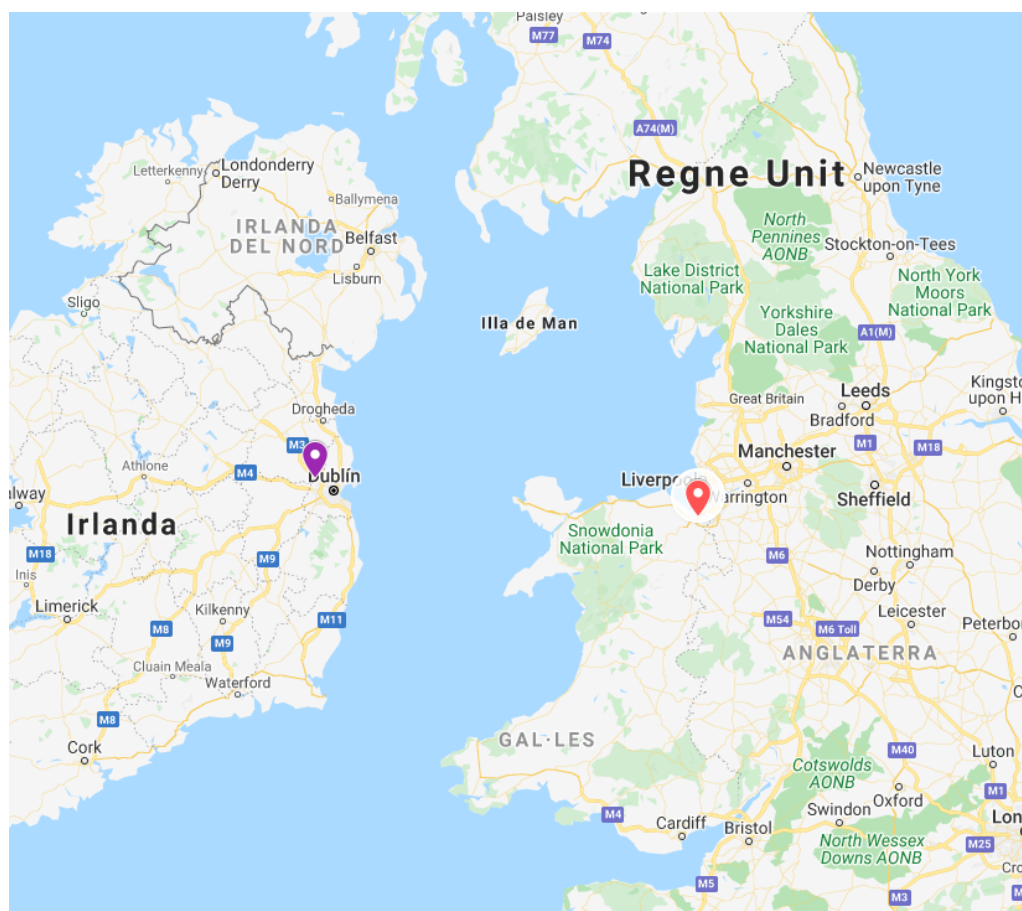


**Figura 3.22:** EWIC entre el Regne Unit i Irlanda.

La interconnexió East-West connecta Shotton al nord de Gal·les, i Portan, originalment Woodland, al comtat de Meath, a Irlanda (veure *Figura 3.23*). Aproximadament 260 km de longitud, l'enllaç subterrani (75 km) i submarí (186 km) té la capacitat de transportar prou energia per alimentar unes 300.000 llars. Aquests cables tenen les següents característiques

**Taula 3.4.** Característiques Oil-free HVDC Light Cable.

Característica	Submarí	Subterrani
Aïllament	Polímer extruït	Polímer extruït
Secció del conductor	1.650 mm <sup>2</sup>	2.210 mm <sup>2</sup>
Material del conductor	Coure	Alumini
Armadura	Acer	-
Diàmetre	117mm	107mm
Densitat	39kg/m	12kg/m



**Figura 3.23:** Situació geogràfica de les estacions convertidores, Woodland (lila) i Shotton (vermell).



### 3.3.2. Informació tècnica

Per a l'esquema VSC-HVDC del projecte EWIC, la tecnologia utilitza HVDC Light de tercera generació, que consta d'un convertidor de 2 nivells. La topologia del convertidor de 2 nivells s'ha estudiat en l'aparat 2.5 d'aquest projecte. La tecnologia VSC-HVDC està en desenvolupament i millora contínua, i s'ha actualitzat i ha millorat a un disseny més modern posterior al projecte East-West Interconnection. Les estacions convertidores de l'enllaç utilitzen la tecnologia de convertidor de font de tensió (VSC), basada en un disseny de convertidor de 2 nivells, mitjançant una tècnica de commutació de modulació d'ample de pols (PWM).

Això proporciona la capacitat de controlar el flux de potència real (P), fins a 500 MW, a través de l'enllaç, incloent-hi la inversió ràpida de la potència i també el control independent de la potència reactiva (Q) a cada estació a  $\pm 175$  Mvar. Addicionalment, s'instal·len filtres harmònics per controlar la distorsió harmònica específica per la seqüència de commutació del PWM.

Accedim a la base de dades per a obtenir les dades tècniques del projecte:

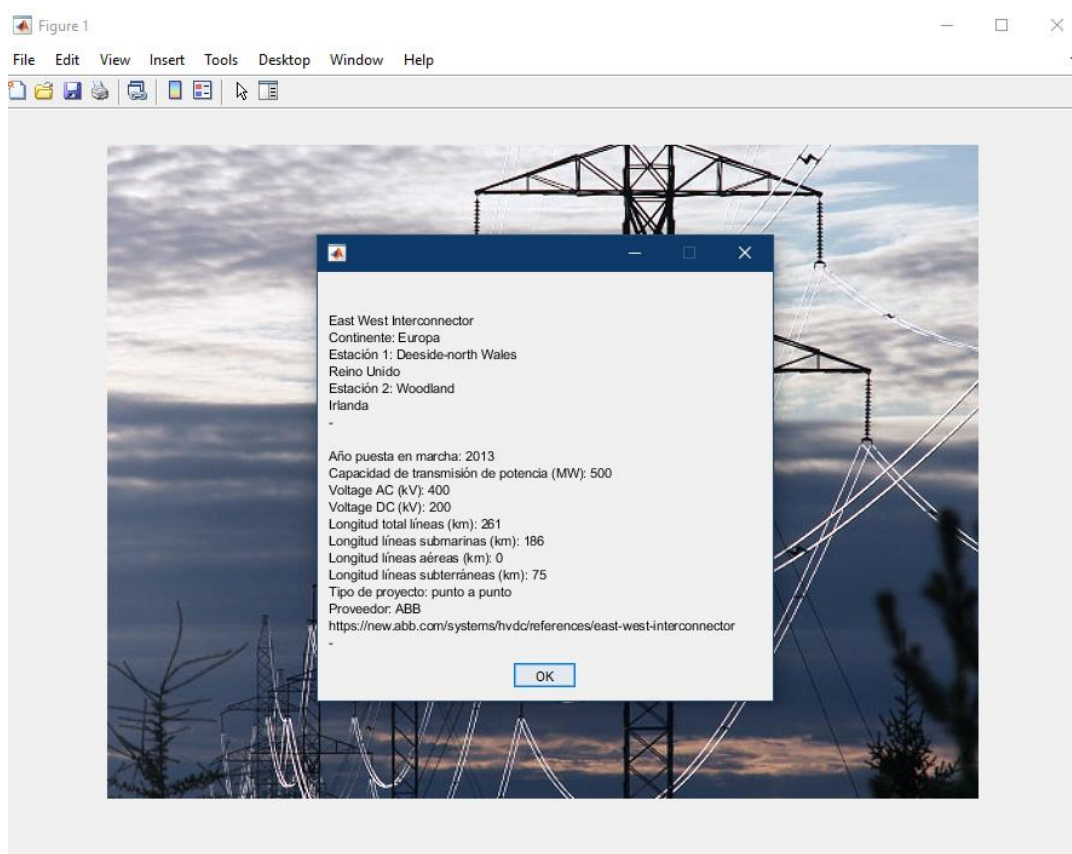
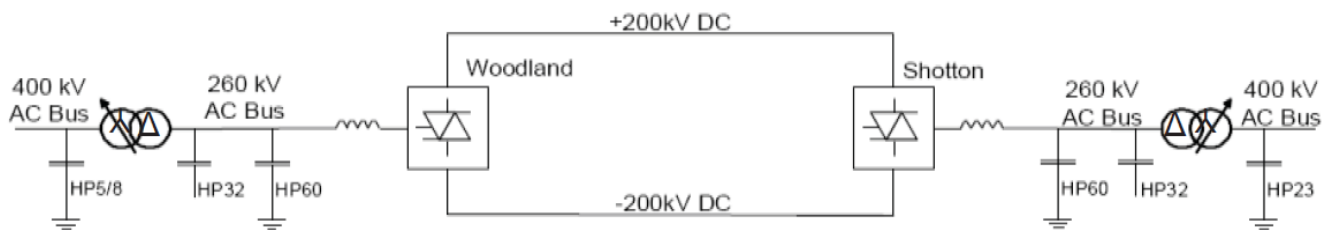


Figura 3.24: Informació tècnica del projecte "East-West Interconnection".

**Taula 3.4.** Paràmetres EWIC.

Data	Paràmetres
Proveïdor	ABB
Número de circuits	1
Capacitat de transmissió de potència	500 MW
Voltatge AC subestació 1 (Woodland)	400 kV
Voltatge AC subestació 2 (Shotton)	400 kV
Freqüència xarxa AC	50 Hz
Voltatge DC	200 kV
Longitud línia submarina	75 km
Longitud línia soterrada	186 km

La interconnexió East-West entre Irlanda i el Regne Unit, es configura com un monopol simètric i mitjançant les dades de la taula 3.4, obtenim el següent esquema:



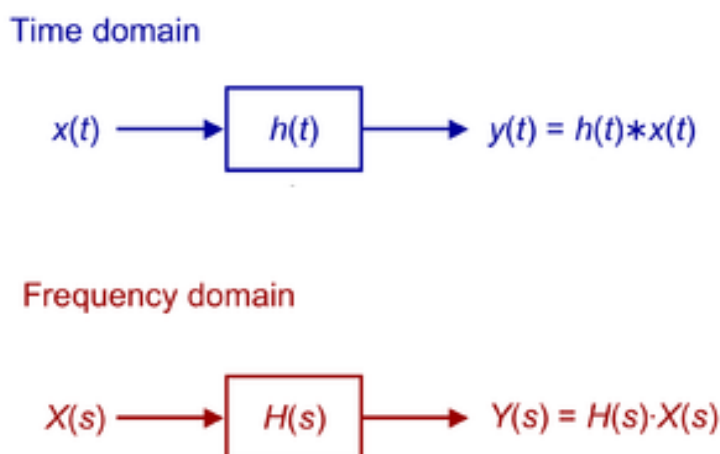
**Figura 3.25:** Esquema de l'enllaç EWIC.

## 4. Estudi d'estabilitat associat a un enllaç HVDC

En aquest apartat es procedeix a realitzar un estudi d'estabilitat d'un enllaç HVDC amb dades provinents d'un article publicat a la base de dades de l'IEEE, referència [41].

### 4.1. Càlculs previs a l'estudi

En aquest apartat, l'enllaç HVDC serà considerat com un sistema continu i invariant en el temps (LTI System) en relació a l'estudi d'estabilitat. Aquest estudi d'estabilitat pot realitzar-se a partir de la representació del sistema en l'espai d'estats o bé representat com a funció de transferència.



**Figura 4.1:** Relació entre el domini del temps i el domini de la freqüència en una funció determinada.

En enginyeria de control, el control clàssic s'analitza en el domini de la freqüència, i està limitat a sistemes lineals amb una única entrada i una única sortida. La representació d'espais d'estat proporciona una manera compacte i convenient de modelar i analitzar sistemes amb múltiples entrades i sortides, tant per a sistemes lineals com no lineals.

Una representació d'espais d'estats és un model matemàtic d'un sistema físic descrit mitjançant un conjunt d'entrades, sortides i variables d'estat relacionades per equacions diferencials de qualsevol ordre en el domini de el temps, que es combinen en una equació diferencial matricial de primer ordre. Les variables d'entrades, sortides i estats són convenientment expressades com a vectors un vector d'entrada, un vector de sortida i un vector d'estats; i si el sistema dinàmic és lineal i invariant en el temps, les equacions algebraiques s'escriuen en forma matricial.

Una forma general de representació d'espais d'estat d'un sistema lineal s'escriu com:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (15)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \quad (16)$$

On:

$x(t) \in \mathbb{R}^n$  és el vector d'estats.

$y(t) \in \mathbb{R}^q$  és el vector de sortides.

$u(t) \in \mathbb{R}^p$  és el vector d'entrades.

$A(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  és la matriu d'estats.

$B(t) \in \mathbb{R}^{n \times p}$  és la matriu d'entrada.

$C(t) \in \mathbb{R}^{q \times n}$  és la matriu de sortida.

$D(t) \in \mathbb{R}^{q \times p}$  és la matriu de transmissió directa.

Per a un sistema continu i invariable en el temps:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (17)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (18)$$

Fent servir la *transformada de Laplace*<sup>1</sup>, és possible relacionar les representacions en l'espai d'estats i com a funció de transferència d'un sistema LTI.

$$sX(s) = AX(s) + BU(s) \quad (19)$$

$$Y(s) = CX(s) + DU(s) \quad (20)$$

---

<sup>1</sup> La transformada de Laplace és una transformada integral que converteix una funció  $f(t)$  de variable real  $t$  (normalment temps), a una funció de variable complexa  $s$  (normalment freqüència)

Ara, agrupem i aïllem  $X(s)$ :

$$(sI - A)X(s) = BU(s)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1}BU(s)$$

Substituïm  $X(s)$  a l'equació de  $Y(s)$ :

$$Y(s) = C[(sI - A)^{-1}BU(s)] + DU(s)$$

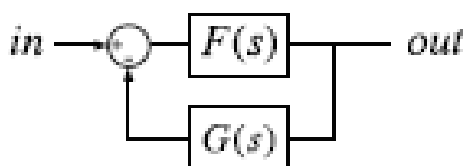
Com que per definició la funció de transferència és la taxa de sortida sobre l'entrada d'un sistema, prenem:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

I substituïm  $Y(s)$  per a obtenir la *funció de transferència*:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (21)$$

A continuació, és procedeix a obtenir una representació d'una sola entrada i una sola sortida (SISO System) del model VSC-HVDC de dos terminals, compatible amb la representació de la *figura 4.1*.



**Figura 4.1:** SISO sistema amb realimentació negativa.

Si es fa servir la representació del sistema en l'espai d'estats, un sistema és estable si la part real de tots els valors propis (vap's) de la matriu  $A$  és negativa. Si es fa servir la representació del sistema com a funció de transferència, un sistema és estable si la part real de tots els pols de la funció de transferència és negativa.

Els vap's de la matriu  $A$  i els pols de la funció de transferència són sempre coincidents.

Com es comenta en l'apartat 2.6: “En la configuració típica d'un enllaç VSC-HVDC de dos terminals, si la potència es transmet de l'estació 1 a l'estació 2, llavors l'estació 1 es una estació controlada per tensió contínua i l'estació 2 està controlada per potència activa”. **Així doncs, per arribar a la representació de l'enllaç HVDC en l'espai d'estats**, es recupera les definicions de l'apartat 2.6 juntament amb el fet que per a aquesta anàlisi les dos estacions VSC poden ser representades com a fonts de corrent controlable amb el rectificador injectant corrent  $i_1$  i l'inversor injectant corrent  $i_2$ :

$$P_1 = v_{dc1} \cdot i_1 \rightarrow i_1 = \frac{P_1}{v_{dc1}} \quad (22)$$

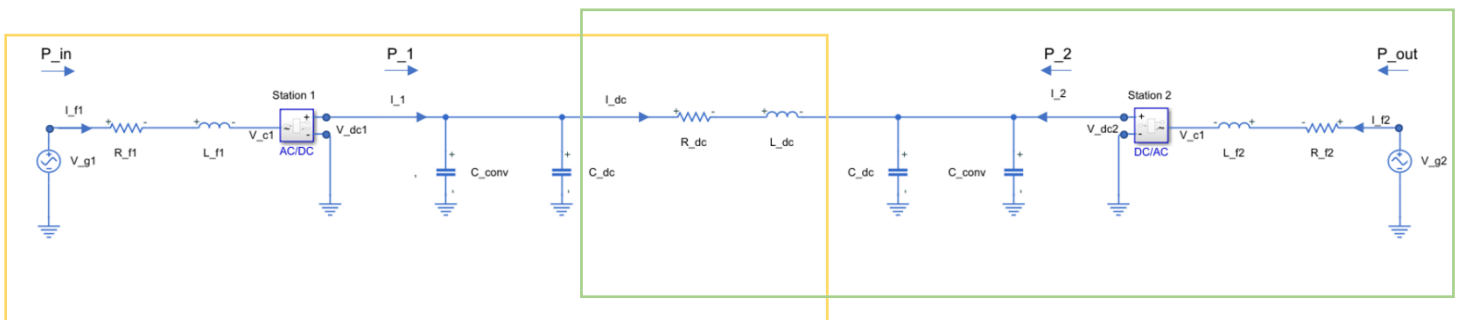
$$P_2 = v_{dc2} \cdot i_2 \rightarrow i_2 = \frac{P_2}{v_{dc2}} \quad (23)$$

$$R_{dc} = 2 \cdot R_{pole} \quad (24)$$

$$L_{dc} = 2 \cdot L_{pole} \quad (25)$$

$$C_{dc} = \frac{C_{pole}}{4} \quad (26)$$

Recuperem la *figura 2.49*:



**Figura 4.2:** Model VSC-HVDC.

Primer s'aplica la KCL (equació 27) al nus situat a la dreta de l'estació convertidora 1 (station 1 a la figura 4.3), tal que:

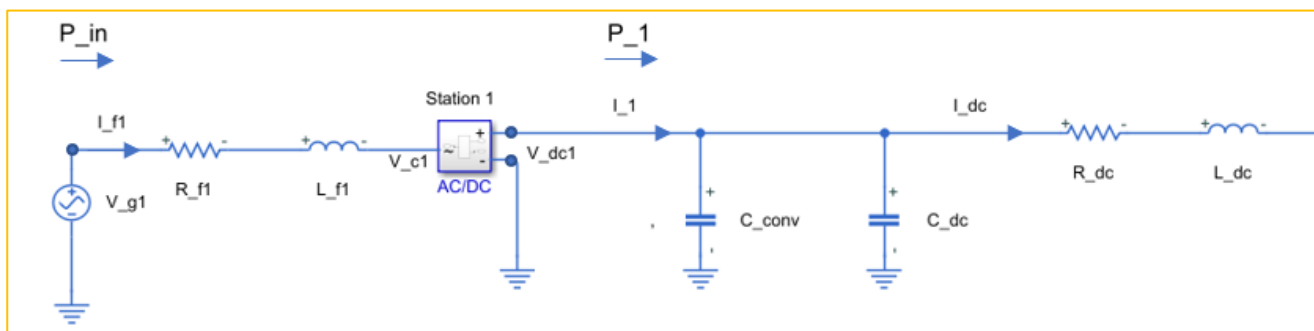


Figura 4.3: Model VSC-HVDC ampliat (dreta de l'estació convertidora 1).

$$i_1 = i_{C_{conv}+C_{dc}} + i_{dc} \quad (27)$$

$$\frac{P_1}{v_{dc1}} = (C_{conv} + C_{dc}) \cdot \frac{dv_{dc1}}{dt} + i_{dc}$$

$$(C_{conv} + C_{dc}) \cdot \frac{dv_{dc1}}{dt} = \frac{P_1}{v_{dc1}} - i_{dc}$$

Obtenint l'equació 28:

$$C_{tot} \frac{d\Delta v_{dc1}}{dt} = \frac{1}{v_{dc1,0}} \Delta P_1 - \frac{P_{1,0}}{v_{dc1}^2} \Delta v_{dc1} - \Delta i_{dc} \quad (28)$$

A continuació, s'aplica la KCL (equació 29) al nus situat a l'esquerra de l'estació convertidora 2 (station 2 a la figura 4.4):

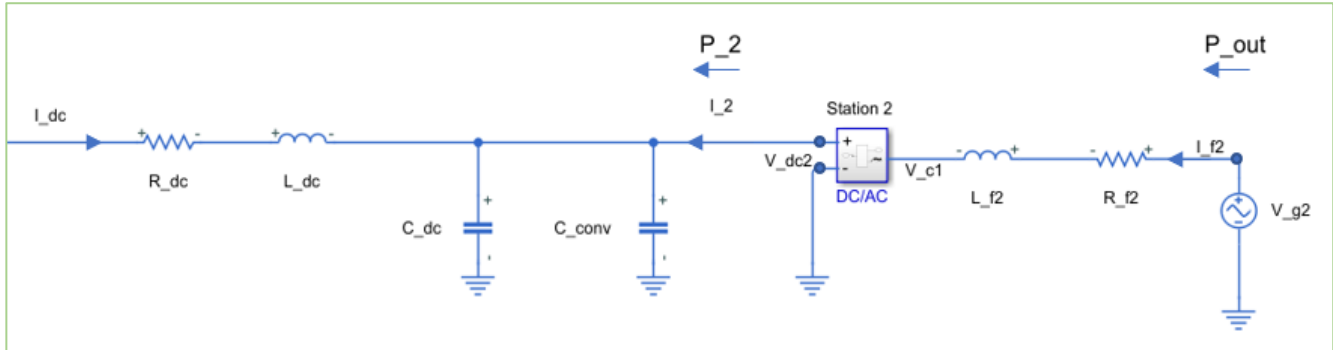


Figura 4.4: Model VSC-HVDC ampliat (esquerra de l'estació convertidora 2).

$$i_{C_{conv}+C_{dc}} = i_{dc} + i_2 \quad (29)$$

$$i_{dc} + \frac{P_2}{v_{dc2}} = (C_{conv} + C_{dc}) \frac{dv_{dc2}}{dt}$$

$$C_{tot} \frac{dv_{dc2}}{dt} = i_{dc} + \frac{P_2}{v_{dc2}}$$

Obtenint l'equació 30:

$$\frac{d\Delta v_{dc2}}{dt} = \frac{\Delta i_{dc}}{C_{tot}} - \frac{P_{2,0} \cdot \Delta v_{dc2}}{C_{tot} \cdot v_{dc2,0}^2} \quad (30)$$



Finalment, s'aplica la KVL (equació 31) a la malla compresa entre el nus situat a la dreta de l'estation 1 i el nus situat a l'esquerra de l'estation 2:

$$v_{dc1} = R_{dc}i_{dc} + L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} + v_{dc2} \quad (31)$$

$$L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} = v_{dc1} - R_{dc}i_{dc} - v_{dc2}$$

Obtenim l'equació 32:

$$L_{dc} \frac{d\Delta i_{dc}}{dt} = \Delta v_{dc1} - R_{dc}\Delta i_{dc} - \Delta v_{dc2} \quad (32)$$

Així doncs, identifiquem els estats, les sortides i les entrades de l'enllaç HVDC en l'espai d'estats com a sistema a partir de les equacions 28,30 i 32:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta v_{dc1}}{dt} &= -\frac{P_{1,0}}{v_{dc1,0}^2} \cdot \frac{1}{C_{tot}} \cdot \Delta v_{dc1} - \frac{1}{C_{tot}} \cdot \Delta i_{dc} + \frac{1}{v_{dc1,0}} \cdot \frac{1}{C_{tot}} \cdot \Delta P_1 \rightarrow \\ \frac{d\Delta v_{dc1}}{dt} &= -\frac{1}{R_{1,0}} \cdot \frac{1}{C_{tot}} \cdot \Delta v_{dc1} - \frac{1}{C_{tot}} \cdot \Delta i_{dc} + \frac{1}{v_{dc1,0}} \cdot \frac{1}{C_{tot}} \cdot \Delta P_1 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta v_{dc2}}{dt} &= \frac{1}{C_{tot}} \cdot \Delta i_{dc} - \frac{P_{2,0}}{v_{dc2}^2} \cdot \frac{1}{C_{tot}} \cdot \Delta v_{dc2} \rightarrow \\ \frac{d\Delta v_{dc2}}{dt} &= \frac{1}{C_{tot}} \cdot \Delta i_{dc} - \frac{1}{R_{2,0}} \cdot \frac{1}{C_{tot}} \cdot \Delta v_{dc2} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\Delta W = 2v_{dc1,0} \cdot \Delta v_{dc1} \quad (35)$$

$$\frac{d\Delta i_{dc}}{dt} = \frac{1}{L_{dc}} \cdot \Delta v_{dc1} - \frac{R_{dc}}{L_{dc}} \cdot \Delta i_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} \cdot \Delta v_{dc2} \quad (36)$$

**Estats:**

$$x_1 = \Delta v_{dc1}$$

$$x_2 = \Delta i_{dc}$$

$$x_3 = \Delta v_{dc2}$$

**Entrada:**

$$y_1 = \Delta P_1$$

**Sortida:**

$$W = v_{dc1}^2$$

$$y_1 = \Delta W = 2v_{dc1,0} \cdot \Delta v_{dc1}$$

Les equacions anteriors donen lloc a les matrius **A**, **B**, **D** i **C** recollides en l'equació 37:

$$A_{dc-link} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_{tot} R_{1,0}} & -\frac{1}{C_{tot}} & 0 \\ \frac{1}{L_{dc}} & -\frac{R_{dc}}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} \\ 0 & \frac{1}{C_{tot}} & -\frac{1}{C_{tot} R_{2,0}} \end{bmatrix}$$

$$B_{dc-link} = \begin{bmatrix} 1 \\ C_{tot} v_{dc1,0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{dc-link} = [2v_{dc1,0} \quad 0 \quad 0]$$

$$D_{dc-link} = 0 \tag{37}$$

Per arribar a la representació de l'enllaç HVDC com a funció de transferència, s'aplica el que s'ha vist a (21) i s'obté la funció de transferència segons s'indica a l'equació següent per a la qual  $\Delta P_1$  a  $\Delta W$  és:

$$G(s) = [C_{dc-link} (sI - A_{dc-link})^{-1} B_{dc-link} + D_{dc-link}] \quad (38)$$

Essent  $G(s)$  la impedància d'entrada de la xarxa DC, que representa la forma en que una variació de la potència  $P_1$  injectada al sistema DC provoca una reacció en la seva energia  $W$ .

Observant les matrius  $A$ ,  $B$ ,  $C$  i  $D$ , apareixen coeficients que depenen de variables amb subíndex "0". Aquestes variables representen els valors de punt d'equilibri o d'estat estacionari del sistema al voltant del qual aquest sistema ha estat linealitzat. Del punt d'equilibri es coneixen com a dada  $P_{2,0}$  i  $v_{dc1,0}$  quedant com a incògnites  $P_{1,0}$  i  $v_{dc2,0}$ .

Aquestes incògnites poden trobar-se escrivint les equacions (33), (34) i (36) tal com queden en el punt d'equilibri

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \frac{P_1}{v_{dc1}} - i_{dc} \quad (39) \\ 0 = \frac{P_2}{v_{dc2}} + i_{dc} \quad (40) \\ 0 = v_{dc1} - R_{dc} i_{dc} - v_{dc2} \quad (41) \end{array} \right.$$

Les equacions resultants 39, 40 i 41 formen un sistema de tres equacions amb tres incògnites ( $P_{1,0}$ ,  $i_{dc0}$  i  $v_{dc2,0}$ ), el qual es pot acabar simplificant en un sistema de dues equacions amb dues incògnites ( $P_{1,0}$  i  $v_{dc2,0}$ ).

A partir de les equacions (40) i (41) s'arriba a la primera equació del sistema:

$$v_{dc2} + R_{dc}i_{dc} - v_{dc1} = 0$$

$$v_{dc2} + R_{dc} \left( -\frac{P_2}{v_{dc2}} \right) - v_{dc1} = 0$$

$$v_{dc2}^2 - R_{dc}P_2 - v_{dc1} \cdot v_{dc2} = 0$$

$$v_{dc2}^2 - v_{dc1} \cdot v_{dc2} - R_{dc} \cdot P_2 = 0$$

A partir de les equacions (39) i (40) s'arriba a la segona equació del sistema:

$$\frac{P_1}{v_{dc1}} = i_{dc} = -\frac{P_2}{v_{dc2}} \rightarrow$$

$$P_1 = v_{dc1} \left( -\frac{P_2}{v_{dc2}} \right)$$

(42)

## 4.2. Simulació mitjançant MATLAB

S'estudiarà l'estabilitat d'un enllaç HVDC amb les dades que s'especifiquen al programa de MATLAB adjunt en l'annex. Aquestes dades estan basades en les de l'article [41] de la bibliografia adjunta, dades que han estat adaptades als models presentats a les *Figures 2.48 i 2.49* corresponents a l'apartat 2.6.

**Taula 4.1:** Valors de paràmetres base.

Paràmetre base	Valor
$P_{dc}$	600 MW
$V_{dc}$	300 kV
$R_{dc}$	300 $\Omega$
$L_{dc}$	0,954 H
$C_{dc}$	10,61e-6 F

**Taula 4.2:** Valors d'entrada per a paràmetres específics.

Paràmetre específics	Valor
$C_{conv}$	3,30e-5 F
$r_{pole}$	0,0188 $\Omega$ /km
$l_{pole}$	9,45e-5 H/km
$c_{pole}$	8,28e-7 F/km
Length	50 km
$V_{dc}$	300 kV

Es defineixen els valors de la *taula 4.1*:

```
Pdcbase_MW=600
Vdcbase_kV=300
Rdcbase_Ohm=300
Ldcbase_H=0.954
Cdcbase_F=10.61e-6
```

I de la *taula 4.2*:

```
Cconv_F=33e-6
rpole_Ohmkm=0.0376/2
lpole_Hkm=0.189e-3/2
cpole_Fkm=4*0.207e-6
length_km=50
```

Mitjançant les següent línies de codi, escrits a partir de les equacions descrites en l'apartat 4.1, s'obtenen els valors de la *taula 4.3*:

```

Cconv_pu=Cconv_F/Cdcbase_F

Rpole_Ohm=rpole_Ohmkm*length_km
Rdc_Ohm=2*Rpole_Ohm
Rdc_pu=Rdc_Ohm/Rdcbase_Ohm

Lpole_H=lpole_Hkm*length_km
Ldc_H=2*Lpole_H
Ldc_pu=Ldc_H/Ldcbase_H

Cpole_F=cpole_Fkm*length_km
Cdc_F=Cpole_F/4
Cdc_pu=Cdc_F/Cdcbase_F

Ctot_pu=Cconv_pu+Cdc_pu

Vdc1_kV=300
Vdc10_pu=Vdc1_kV/Vdcbase_kV

```

**Taula 4.3:** Valors de paràmetres específics.

Paràmetre específics calculats	Valor
$C_{conv}$	3,1103 pu
$R_{pole}$	0,9400 $\Omega$
$R_{dc}$	1,8800 $\Omega$ / 0,0063 pu
$L_{pole}$	0,0047 H
$L_{dc}$	0,0095 H / 0,0099 pu
$C_{pole}$	4,14e-5 F
$C_{dc}$	1,035e-5 F / 0,9755 pu
$V_{dc}$	300kV / 1 pu

Finalment aquesta línia de codi ens permet definir un vector des de -600MW fins a 600MW amb salts de 60 en 60MW:

```
P2_MW=-600:60:600
```

A continuació, es mostra el cos del programa el qual ens fa un escombrat de potències de l'estation 2 des de -600 MW fins a 600 MW i representa l'evolució dels tres *vap*'s de la matriu **A** i l'evolució dels tres pols de la funció de transferència en el pla de Gauss.

```

for k=1:length(P2_MW)
    P20_pu=P2_MW(k)/Pdcbase_MW;

    c2=1;
    c1=-Vdc10_pu;
    c0=-Rdc_pu*P20_pu;

    pol=[c2 c1 c0];

    r=roots(pol);

    Vdc20_pu=max(r);

    P10_pu=Vdc10_pu*(-P20_pu/Vdc20_pu);

    R10_pu=Vdc10_pu^2/P10_pu;
    R20_pu=Vdc20_pu^2/P20_pu;

    Adclink=[-1/(Ctot_pu*R10_pu) -1/Ctot_pu 0;
             1/Ldc_pu -Rdc_pu/Ldc_pu -1/Ldc_pu;
             0 1/Ctot_pu -1/(Ctot_pu*R20_pu)];

    es=eig(Adclink);

    real_es(:,k)=real(es);
    imag_es(:,k)=imag(es);

    Bdclink=[1/(Ctot_pu*Vdc10_pu); 0; 0];
    Cdclink=[2*Vdc10_pu 0 0];
    Ddclink=0;

    [b,a]=ss2tf(Adclink,Bdclink,Cdclink,Ddclink);
    sys=tf(b,a);
    ps=pole(sys);

    real_ps(:,k)=real(ps);
    imag_ps(:,k)=imag(ps);
end

```

Finalment, es mostra el codi referent a la part final del programa, que ens permet visualitzar les dues figures, les quals ens mostren la transició dels vap's o pols entre -600MW i 600MW.

```

h_fig=figure;
set(h_fig, 'Units', 'normalized', ...
      'Name', 'Eigenvalues', ...
      'NumberTitle', 'off', ...
      'Position', [0 0.040364583333333333 1 0.87], ...
      'Resize', 'off')
plot(real_es(:,1), imag_es(:,1), 'ko')
hold on
plot(real_es(:,2:end-1), imag_es(:,2:end-1), 'b*')
plot(real_es(:,end), imag_es(:,end), 'kd')
title('Eigenvalues')
xlabel('Real part eigenvalues (pu)')
ylabel('Imaginary part eigenvalues (pu)')
grid on
zoom on

h_fig=figure;
set(h_fig, 'Units', 'normalized', ...
      'Name', 'Poles', ...
      'NumberTitle', 'off', ...
      'Position', [0 0.040364583333333333 1 0.87], ...
      'Resize', 'off')
plot(real_ps(:,1), imag_ps(:,1), 'ko')
hold on
plot(real_ps(:,2:end-1), imag_ps(:,2:end-1), 'b*')
plot(real_ps(:,end), imag_ps(:,end), 'kd')
title('Poles')
xlabel('Real part poles (pu)')
ylabel('Imaginary part poles (pu)')
grid on
zoom on

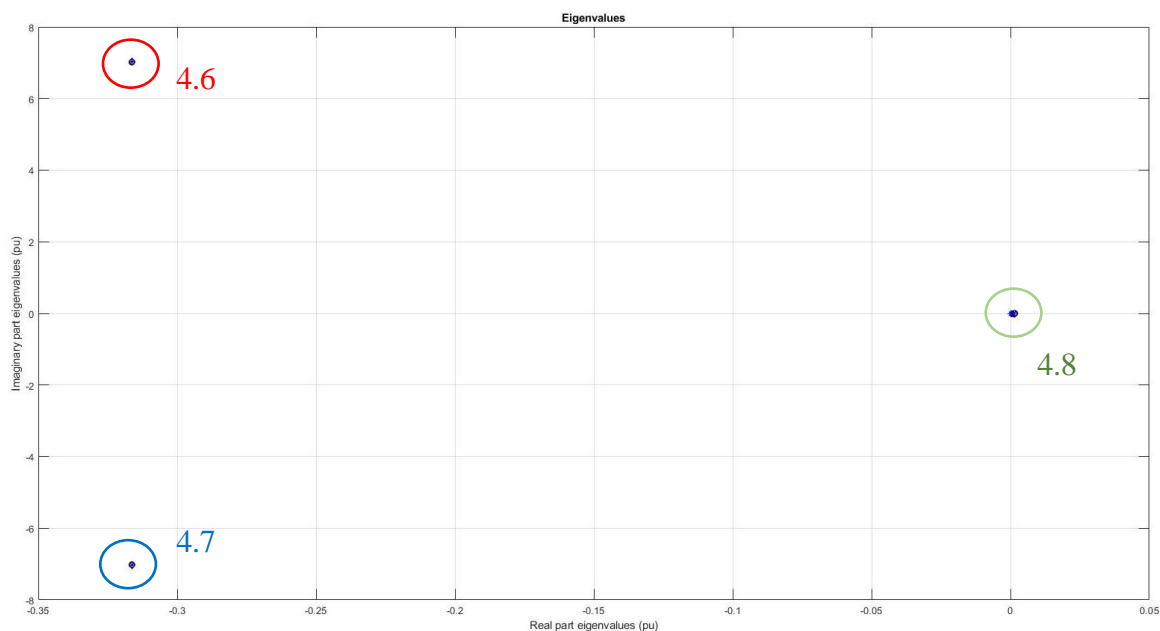
```

Fent "zoom in" en qualsevol de les tres zones on apareix un dels tres vap's/pols, **el cercle negre** representa el vap/pol associat a -600 MW, **els asteriscs blaus** representen el camí que segueix el vap/pol a mesura que transiciona de -600 MW a 600 MW i **el rombe negre** representa el vap/pol associat a 600 MW.

Com s'ha comentat en l'apartat anterior, "Els vap's de la matriu A i els pols de la funció de transferència són sempre coincidents."

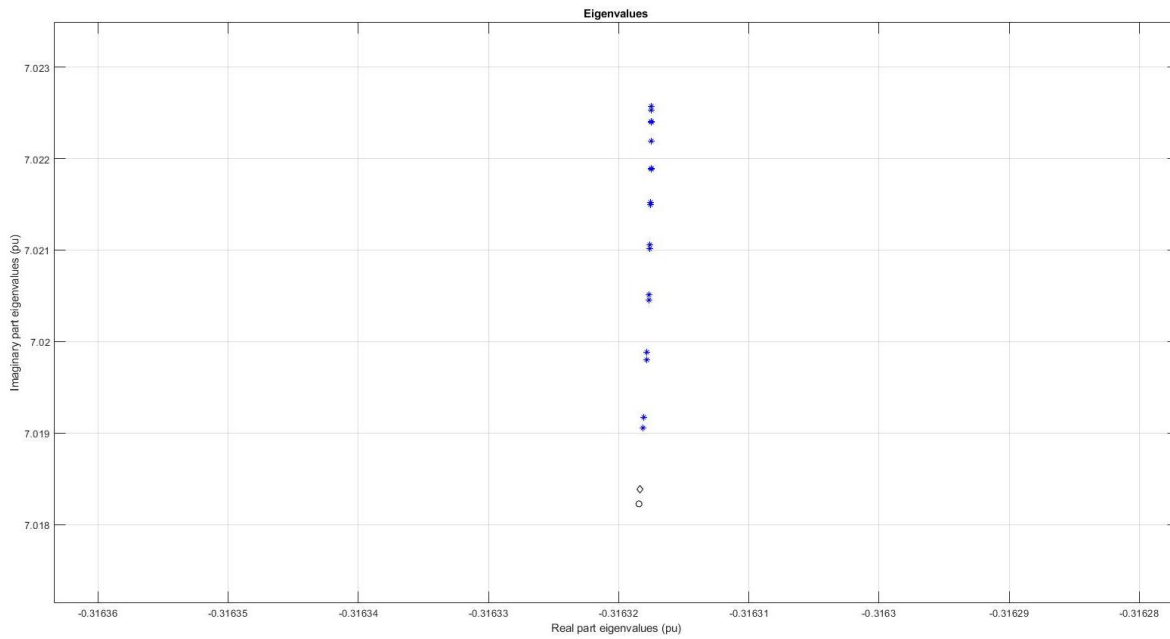


## VAP's de la matriu A



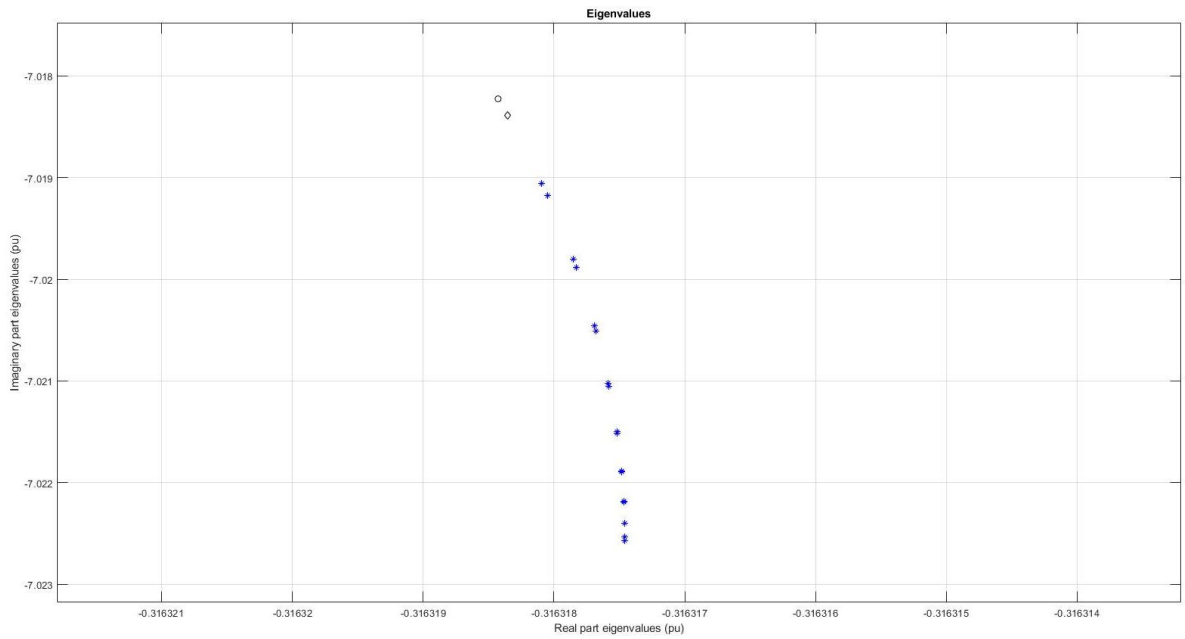
**Figura 4.5:** Evolució Valors Propis obtinguts per a la matriu A.

Aquesta és la primera figura que proporciona el programa que s'ha elaborat, la qual permet estudiar l'estabilitat de l'enllaç HVDC representat com a sistema en l'espai d'estats quan la potència de l'station 2 transiciona des de -600 MW fins a 600 MW. La trajectòria seguida pels tres vap's trobats no és distingible a simple vista, però queda clar que dos d'ells sempre tenen part real negativa. Així doncs, per poder arribar a una conclusió definitiva pel que fa a l'estabilitat de l'enllaç HVDC, es procedirà a mostrar tres figures més anomenades 4.6, 4.7 i 4.8 obtingudes fent "zoom in" a les zones encerclades amb diferents colors en la figura 4.5.



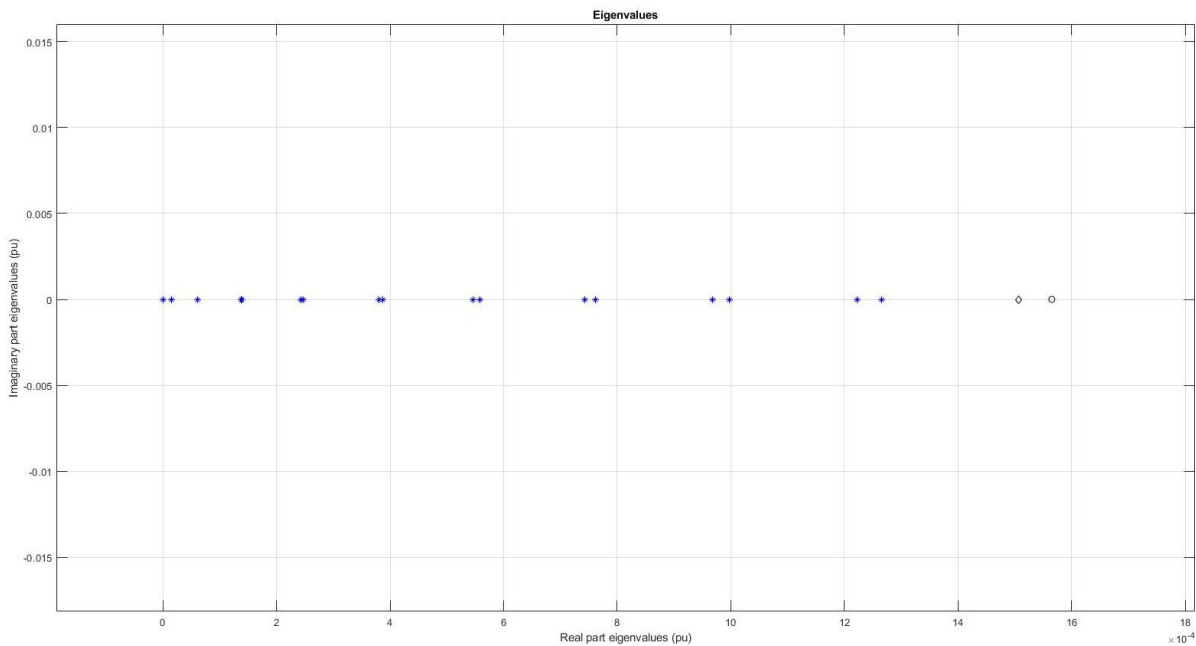
**Figura 4.6:** Evolució VAPs matriu A – “Zoom in” (vermell).

Aquesta figura mostra que el vap situat a dalt a l’esquerra dins de la figura 4.5, quan la potència de l’station 2 transiciona des de -600 MW fins a 600 MW, segueix un camí de pujada sortint del cercle negre i baixada arribant al rombe negre. Queda clar que la part real d’aquest vap és sempre negativa.



**Figura 4.7:** Evolució VAPs matriu A – “Zoom in” (blau).

Aquesta figura mostra que el vap situat a baix a l’esquerra dins de la figura 4.5, quan la potència de l’estacion 2 transiciona des de -600 MW fins a 600 MW, segueix un camí de baixada sortint del cercle negre i pujada arribant al rombe negre. Queda clar que la part real d’aquest vap també és sempre negativa.

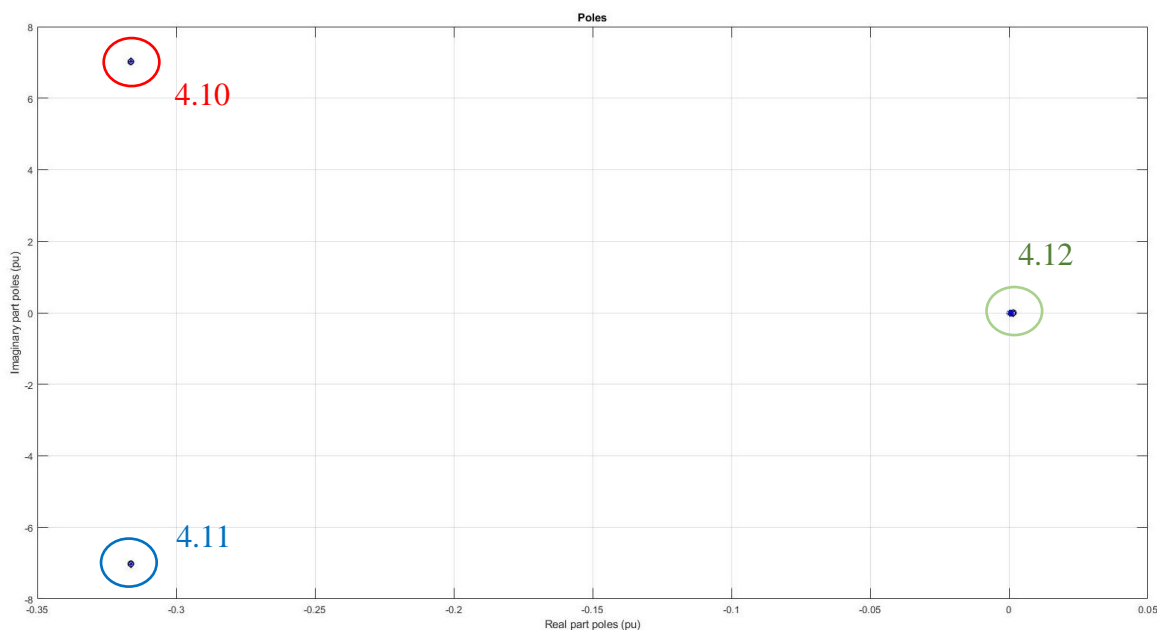


**Figura 4.8:** Evolució VAPs matriu A – “Zoom in” (verd).

Aquesta figura mostra que el vap situat al centre a la dreta dins de la figura 4.5, quan la potència de l'estation 2 transiciona des de -600 MW fins a 600 MW, segueix un camí d'anada cap a l'esquerra sortint del cercle negre i de tornada cap a la dreta arribant al rombe negre. La part real d'aquest vap és sempre positiva o nul·la.

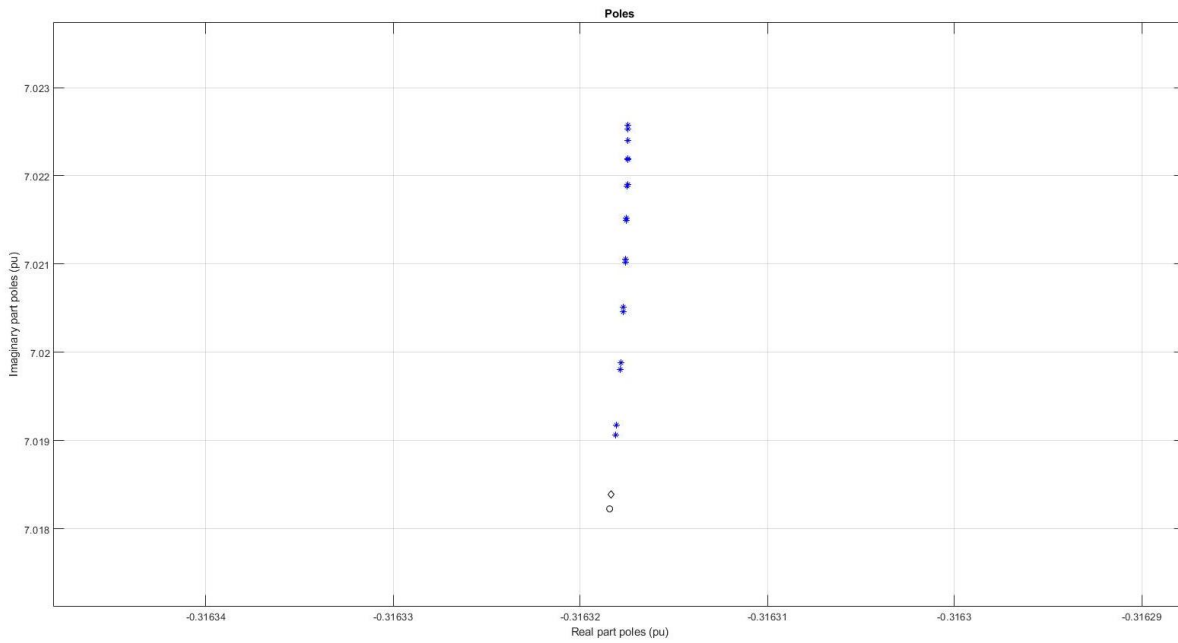
En conseqüència, un cop analitzades les tres figures anteriors, pot afirmar-se que l'enllaç HVDC considerat, quan la potència de l'estation 2 transiciona des de -600 MW fins a 600 MW, funciona bàsicament de forma inestable, arribant a comportar-se de forma críticament estable només quan la part real del vap mostrat a la figura 4.8 és nul·la.

## Pols de la funció de transferència



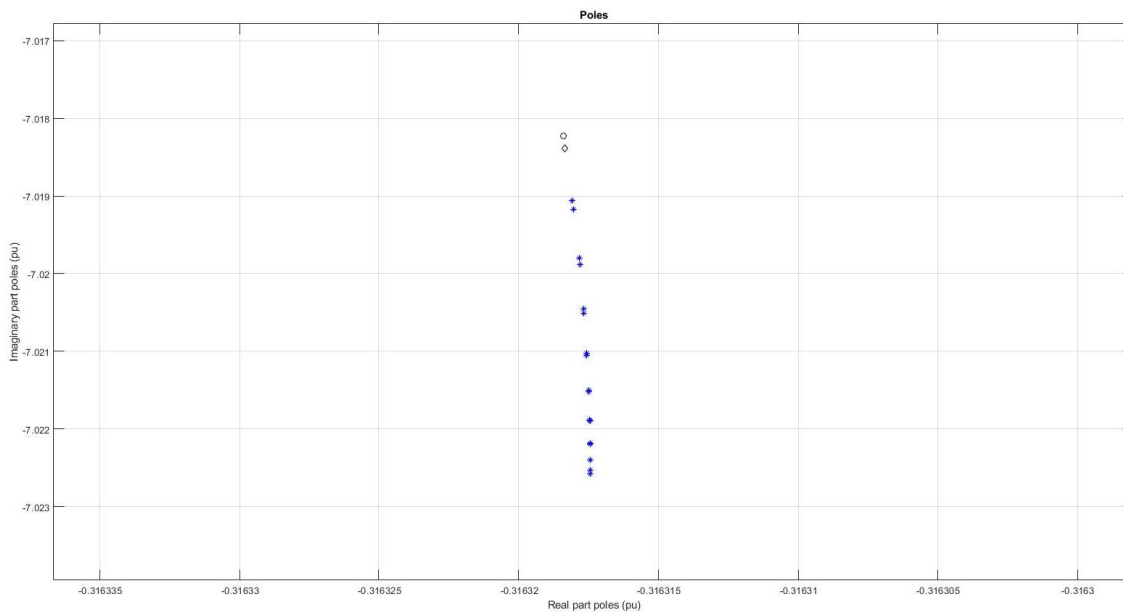
**Figura 4.9:** Evolució Pols de la funció de transferència

Aquesta és la segona figura que proporciona el programa que s’ha elaborat, la qual permet estudiar l’estabilitat de l’enllaç HVDC representat com a sistema mitjançant funció de transferència quan la potència de l’estacion 2 transiciona des de -600 MW fins a 600 MW. La trajectòria seguida pels tres pols trobats no és distingible a simple vista, però queda clar que dos d’ells sempre tenen part real negativa. Així doncs, per poder arribar a una conclusió definitiva pel que fa a l’estabilitat de l’enllaç HVDC, es procedirà a mostrar tres figures més anomenades 4.10, 4.11 i 4.12 obtingudes fent “zoom in” a les zones encerclades amb diferents colors en la figura 4.9.



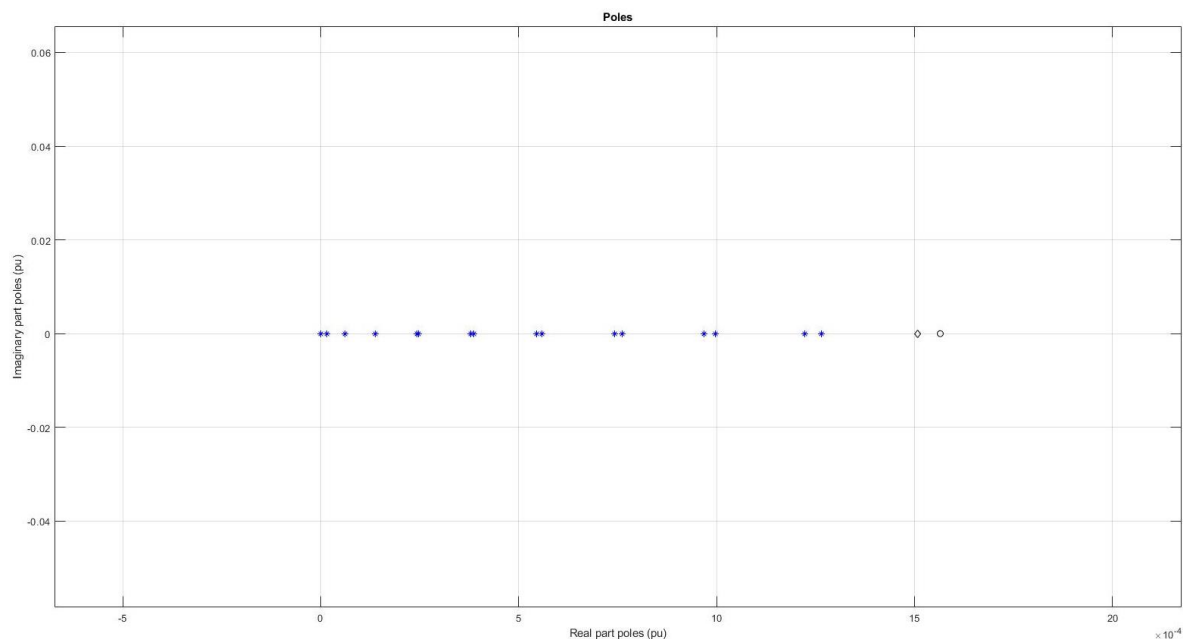
**Figura 4.10:** Evolució Pols de la funció de transferència – “Zoom in” (vermell).

Aquesta figura mostra que el pol situat a dalt a l'esquerra dins de la figura 4.9, quan la potència de l'estacion 2 transiciona des de -600 MW fins a 600 MW, segueix un camí de pujada sortint del cercle negre i baixada arribant al rombe negre. Queda clar que la part real d'aquest pol és sempre negativa.



**Figura 4.11:** Evolució Pols de la funció de transferència – “Zoom in” (blau).

Aquesta figura mostra que el pol situat a baix a l’esquerra dins de la figura 4.9, quan la potència de l’estation 2 transiciona des de -600 MW fins a 600 MW, segueix un camí de baixada sortint del cercle negre i pujada arribant al rombe negre. Queda clar que la part real d’aquest pol també és sempre negativa.



**Figura 4.12:** Evolució Pols de la funció de transferència – “Zoom in” (verd).

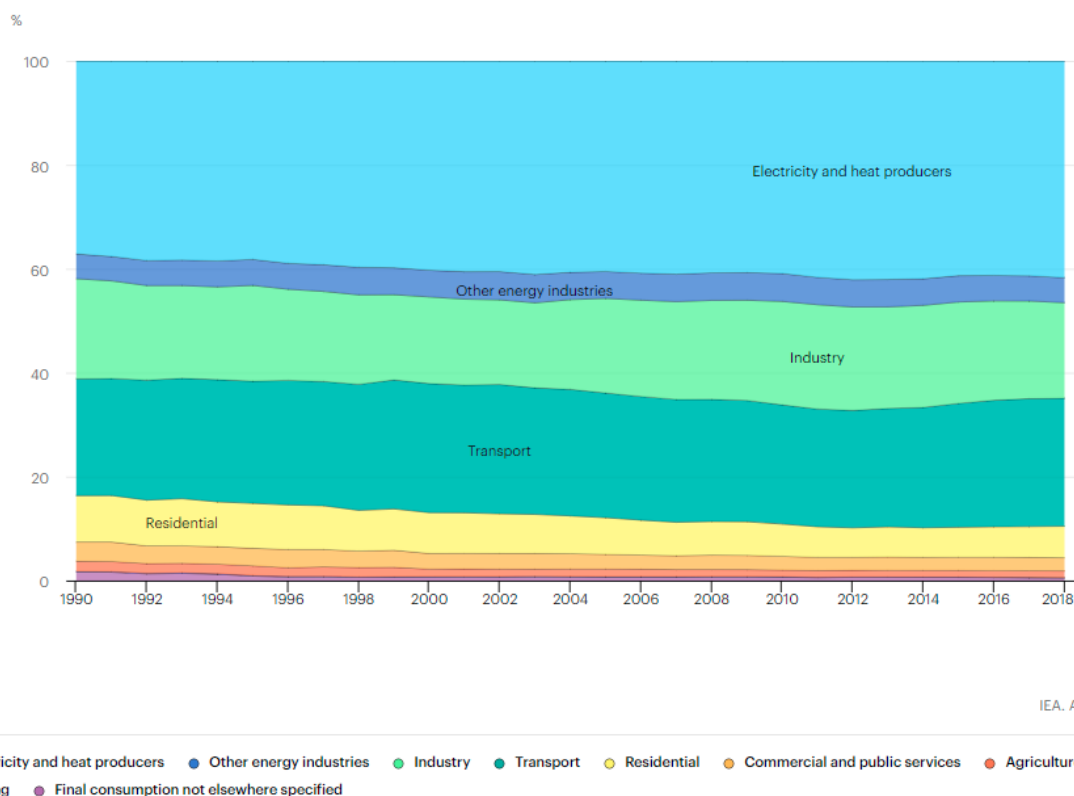
Aquesta figura mostra que el pol situat al centre a la dreta dins de la figura 4.9, quan la potència de l'estation 2 transiciona des de -600 MW fins a 600 MW, segueix un camí d'anada cap a l'esquerra sortint del cercle negre i de tornada cap a la dreta arribant al rombe negre. La part real d'aquest pol és sempre positiva o nul·la.

En conseqüència, un cop analitzades les tres figures anteriors, pot afirmar-se que l'enllaç HVDC considerat, quan la potència de l'estation 2 transiciona des de -600 MW fins a 600 MW, funciona bàsicament de forma inestable, arribant a comportar-se de forma críticament estable només quan la part real del pol mostrat a la figura 4.12 és nul·la.



## 5. Anàlisi de l'impacte ambiental

En relació a l'impacte mediambiental, tenint en compte que la major part del projecte es basa simplement en l'estudi i investigació a nivell teòric, es considera que el present treball no té un efecte directe significatiu contra el medi ambient però a tractar-se d'un projecte emmarcat dins el món de les tecnologies energètiques, concretament el transport d'electricitat, s'aprofundirà en aquest apartat en tant que més del 40% de les emissions de CO<sub>2</sub> l'any 2018 a escala mundial van ser generades per productors d'electricitat i calor tal com recull l'IEA en el seu recull anual de dades.



**Figura 5.1:** Emissió de CO<sub>2</sub> per sector (%) a nivell mundial entre 1990 i 2018.

L'any 2016, les *emissions antropogèniques*<sup>1</sup> mundials de gasos d'efecte hivernacle foren de 48.5 Gt. La major part d'aquestes emissions, vora el 75%, consisteixen en CO<sub>2</sub> i la gran majoria es produïda per la crema de combustible fòssil. Per frenar la concentració de GHG a l'atmosfera és necessari apostar per fonts d'energia renovable que permeten la reducció d'emissions i preservar els oceans i boscos, que absorbeixen part del diòxid de carboni.

<sup>1</sup> Emissions generades per persones o resultats de l'activitat humana.

És per això que s’ha de donar major importància a la producció d’electricitat de fonts renovables. Tal com s’ha vist en punts anteriors, els enllaços HVDC són apropiats per al transport submarí i per a grans distàncies; afavorint així la producció d’energia elèctrica en parcs eòlics off-shore.

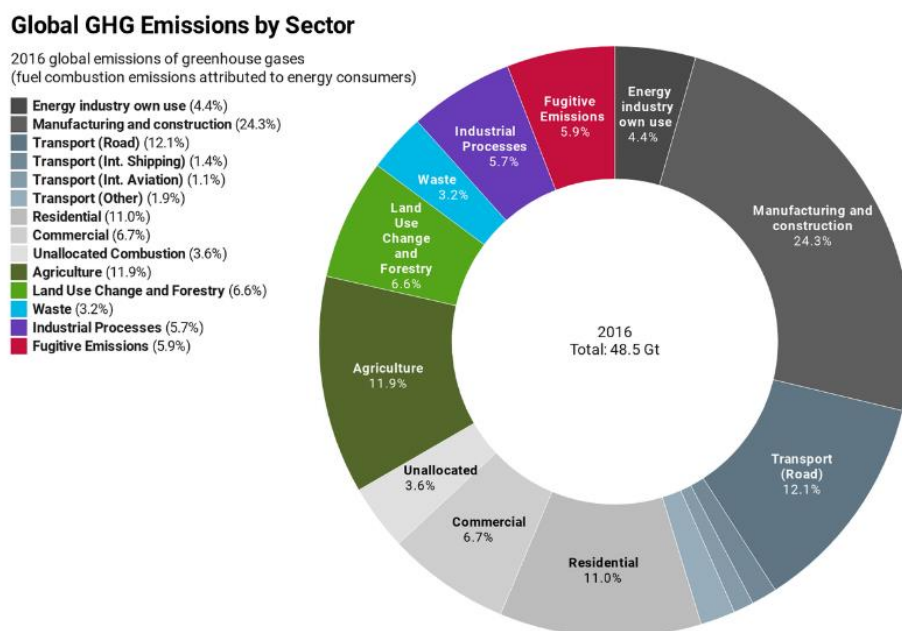


Figura 5.2: Emissió de GHG per sector l’any 2016.

Evidentment tot procés comporta unes despeses o residus, les quals es poden associar a un impacte ambiental determinat, essent pràcticament impossible un impacte zero per a qualsevol classe de projecte. En el cas concret que concerneix aquest projecte, es considerarà la despesa elèctrica com a únic element d’impacte directe amb relació al medi ambient. De la *Taula 5.1* se sap que s’han consumit aproximadament 240 kWh d’energia. Tenint en compte que el mix de la xarxa elèctrica espanyola publicat per la CNMC en data 16 d’abril de 2021 és 0,15 kg CO<sub>2</sub>/kWh, la petjada de carboni associada al projecte en CO<sub>2</sub> equivalent al consum elèctric és d’uns **36 kg de CO<sub>2</sub>**.

Cal destacar que s’ha menyspreat la resta de materials físics menors utilitzats en el procés d’elaboració del projecte en tant que són materials reaprofitables com bolígrafs, llapis o marcador de text i en cap cas el seu ús representa un impacte ambiental considerable en comparació la resta d’aspectes.

## Pressupost

Per tal de realitzar un pressupost el més ajustat possible, s'ha tingut en compte dos tipus de cost segons siguin recursos humans o recursos materials.

### Costos materials

Els costos de recursos materials es poden observar degudament desglossats en la *Taula 5.1*, pel que fa a aquests recursos, s'ha tingut en compte tant els costos purament materials com són l'equip informàtic format per l'ordinador, el sistema operatiu i els seus respectius perifèrics (monitor, ratolí i teclat).

A més a més, s'ha considerat els costos associats al consum elèctric, la connexió a internet i el software necessari per a la realització del projecte. Per al cost elèctric s'ha considerat una despesa energètica horària de 400Wh i un preu de 33,96 €/MWh el qual s'ha extret d'OMIE i correspon al valor mitjà del preu del MWh a Espanya durant l'any 2020. I per a la connexió a internet s'ha suposat una tarifa plana de 30€ mensuals.

Finalment, es considera un cost de papereria referent als bolígrafs, papers, llibretes, marcadors de text, entre altres materials que s'hagin pogut utilitzar.

**Taula 5.1:** Costos de recursos materials.

Concepte	Cost unitari (€)	Unitats	Cost total (€)
Ordinador	700	1	700
SO Windows 10	145	1	145
Monitor	110	1	110
Ratolí	15	1	15
Teclat	40	1	40
Microsoft Office	59.99\$ /any <sup>1</sup>	1	49,11
Matlab	0 <sup>2</sup>	-	0
Electricitat	0.40 kWh	600h	8,150
Internet	30€/mes	6	180
Papereria	60	-	60
<b>TOTAL MATERIAL</b>			<b>1.307,26</b>

<sup>1</sup> Suposant que 1USD = 0,82 EUR.

<sup>2</sup> Gratuït gràcies a l'acord de distribució de programari entre UPC i MathWorks.

## Costos de recursos humans

Dins els recursos humans, s'han considerat diferents tipus de feina realitzada, amb les seves corresponents retribucions. El tipus 1 correspon a la part *administrativa i burocràtica* i purament de gestió documental que ha requerit el projecte, el tipus 2 correspon a la part *d'investigació, recerca i simulació* i finalment el tipus 3 correspon a l'estricta *disseny* del projecte i a la seva redacció. Tots aquests costos es mostren en la *Taula 5.2* mostrada a continuació.

**Taula 5.2:** Costos de recursos humans.

Tipus	Concepte	Dedicació (h)	Cost horari (€/h)	Cost total (€)
Tipus 1	Administratiu/burocràtic	100	10	1000
Tipus 2	Investigació/recerca/simulació	250	15	3750
Tipus 3	Disseny/redacció	250	15	3750
<b>TOTAL RH</b>		<b>600</b>		<b>8.500</b>

## Costos totals

Tenint en compte el cost desglossat en els diferents tipus de despesa, s'obté el cost total del projecte el qual s'observa a la *Taula 5.3*. S'ha sumat els costos de recursos humans i dels recursos materials per obtenir un *subtotal*. Al tractar-se d'un pressupost que només planteja el fet de fer una aproximació a una valoració econòmica s'han menyspreat diversos aspectes com la fluctuació del preu de l'electricitat en funció de les hores de consum, l'època de l'any o la climatologia i tampoc s'ha tingut en compte desplaçaments ni cost econòmic relacionats directament amb espais de treball. Per tal de considerar un valor per aquests costos "extraordinaris" es considera una despesa del 5% sobre el *subtotal*.

**Taula 5.3:** Costos de recursos materials.

Concepte	Cost (€)
Costos Material	1.307,26
Costos RRHH	8.500
Subtotal	9.807,26
Costos extra (5%)	490,363
<b>TOTAL</b>	<b>10.297,623</b>

Així doncs, el cost total del projecte equival a **10.300 EUR**

## Conclusions

Un cop finalitzat el projecte, les conclusions que se n'extreuen es presenten seguint l'ordre del treball a continuació:

La primera part del projecte es dedica a explicar des d'un punt de vista històric l'evolució de l'electricitat, així com ens permet introduir-nos en el món de la transmissió d'energia elèctrica en corrent continu; des del mitificat Nikola Tesla fins ABB o Siemens passant per August Uno Lamm, considerat el pare dels sistemes HVDC.

Seguidament, el projecte es va enfocant i centrant en els sistemes HVDC, descrivint-ne la gran quantitat d'elements i explicant el seu funcionament. Per a realitzar això, el projecte ha hagut de treballar tant en els àmbits dels Sistemes Elèctrics de Potència com en l'Electrònica de Potència o l'Enginyeria de Control. En aquesta exhaustiva descripció, es comparen les tecnologies HVDC i HVAC a partir de consideracions tècniques, econòmiques i mediambientals. És en aquest subapartat on s'extreuen les primeres conclusions, ja que els sistemes HVDC presenten avantatges tant en l'aspecte tècnic com en el mediambiental, però els seus majors costos fan que aquests només siguin viables per a transmissions a llargues distàncies o submarines o determinades situacions on els sistemes HVAC no siguin viables a causa de mancances tècniques com en connexions de xarxes asíncrones o connexions de suport a xarxes febles.

A continuació, es presenten les diferents configuracions que existeixen per als sistemes HVDC, on podem destacar les dues tecnologies més emprades HVDC-LCC i HVDC-VSC, quedant clar que existeixen similituds entre ambdues, com les possibles connexions i configuracions; la principal diferència radica en l'ús de dispositius semiconductors IGBT's en sistemes VSC tecnologia per la qual s'està apostant amb força avui en dia, i tecnologia la qual s'ha escollit per a la realització dels apartats 3 i 4. També s'ha descrit els components que formen un enllaç HVDC-VSC, el qual a l'estar compost per una quantitat tan gran de dispositius és de vital importància un estudi previ exhaustiu.

En l'apartat 3, s'han caracteritzat un total de 3 enllaços HVDC-VSC monopolars amb connexió de punt a punt existents i operatius al món. Gràcies a això, s'ha pogut aprendre les característiques i elements, posant cara a tots els conceptes documentats en els apartats anteriors. A més a més, es comenten altres aspectes característics dels enllaços, com els costos econòmics o els motius politicoeconòmics de la seva construcció.

Finalment, s'ha procedit a desenvolupar un programa en MATLAB per a realitzar un estudi d'estabilitat en un enllaç HVDC, per a desenvolupar aquest programa, primerament es realitzen uns càlculs previs els quals ens permeten implementar les equacions obtingudes directament a MATLAB. La idea inicial d'aquest estudi era que es dugués a terme en un dels enllaços anteriorment caracteritzats, finalment no ha estat així i s'han pres com a paràmetres els valors d'un article referenciat a la bibliografia [41]. Per aquest motiu en aquest apartat s'han complert els objectius de manera parcial.

Pel que fa a l'estudi de l'impacte mediambiental i el pressupost, tant en la introducció com en aquest últim apartat, s'ha pogut veure com a causa de l'augment de la demanda energètica a escala mundial, apareix la necessitat d'augmentar la producció d'energia elèctrica, la qual representa una de les principals fonts de generació de gasos d'efecte hivernacle. Una de les fonts d'energia renovable per a les que s'està apostant és l'energia eòlica en especial els parcs eòlics off shore, que complementats amb sistemes d'enllaç HVDC permeten una generació i transport d'energia pràcticament neta. Mentre que pel pressupost s'han pres valors considerats lògics, intentant tenir en compte el màxim d'aspectes possibles, obtenint un pressupost final de 10.300 euros.

Durant la realització del projecte s'ha donat molta importància al fet que tots els conceptes o idees quedin ben definides, per tant que siguin comprensibles tant per persones de l'àmbit de l'enginyeria com per a persones externes a ell. Tota la informació obtinguda i col·lectada en aquest projecte, així com el programa adjuntat en l'annex, poden ser utilitzats posteriorment per a la realització de futurs estudis d'investigació relacionats ja sigui de manera genèrica amb els enllaços HVDC com per a la realització d'estudis d'estabilitat.

Per acabar, m'agradaria comentar que a escala personal, la realització d'aquest projecte m'ha permès créixer com a estudiant, però sobretot com a persona. Malgrat totes les dificultats, descobrir el món de la recerca des de prop ha estat una experiència que m'ha fet créixer acadèmicament, destacant el fet que s'ha dedicat moltes hores a comprendre conceptes necessaris, però que després no apareixen de forma explícita en el projecte, derivant en un sentiment de frustració i fins i tot bloqueig mental.

## Bibliografia

- [1] Viquipèdia [en línia]. Wikimedia Foundation, 2018. Disponible a: <<https://es.wikipedia.org/wiki>>.
- [2] Standard 141. A: IEEE [en línia]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 02 de desembre de 1993. Disponible a: <<https://standards.ieee.org/standard/141-1993.html>>.
- [3] IEA [en línia]. International Energy Agency, 2020. Disponible a: <<https://www.iea.org/>>.
- [4] Espanya. Jefatura del Estado. Ley 17/2007, de 4 de julio, por la que se modifica la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, para adaptarla a lo dispuesto en la Directiva 2003/54/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de junio de 2003, sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad. A: Boletín oficial del Estado [en línia]. Madrid: BOE, 5 de juliol de 2007, no. 160, p. 29047 a 29067. Disponible a: <<https://www.boe.es/eli/es/l/2007/07/04/17>>.
- [5] Historia de la electricidad. A: Iberdrola [en línia]. Iberdrola, S.A. Disponible a: <<https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/historia-electricidad>>.
- [6] Unión Europea. Comisión europea. Reglamento (UE) 2016/1447 de la comisión de 26 de agosto de 2016 por el que establece un código de red sobre requisitos de conexión a la red de sistemas de alta tensión en corriente continua y módulos de parque eléctrico conectados en corriente continua. A: Diario Oficial de la Unión Europea [en línia]. Luxemburg: EUR-Lex, 8 de setembre de 2016. Disponible a: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R1447&from=EN>>.
- [7] Red Elèctrica de España [en línia]. Grupo Red Eléctrica, 2020. Disponible a: <<https://www.ree.es>>.
- [8] Espanya. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 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 ITC-LAT 01 a 09. A: Boletín oficial del Estado [en línia]. Madrid: BOE, 19 de març de 2008, no. 68, p. 16436 a 16554. Disponible a: <<https://www.boe.es/eli/es/rd/2008/02/15/223>>.
- [9] Mesas García, Juan José; Sumper, Andreas; (2019). Sistemes Elèctrics de Potència, Departament d'Enginyeria Elèctrica UPC-EEBE. [PPT].

- 
- [10] HVDC A: Hitachi ABB Power Grids [en línia]. ABB & Hitachi, Ltd. Disponible a: <<https://new.abb.com/systems/hvdc>>.
- [11] Doggerbank [en línia]. Doggerbank 2021. Disponible a: <<https://doggerbank.com/>>.
- [12] HVDC Plus. A: Siemens Energy [en línia]. Disponible a: <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/portfolio/high-voltage-direct-current-transmission-solutions/hvdc-plus.html>>.
- [13] Gunnar Asplund. Transmisión de ultra alta tensión. A: ABB library [en línia]. Disponible a: <[https://library.e.abb.com/public/ff499832d4f2d734c12573020031f4d6/22-27%202M733\\_SPA72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/ff499832d4f2d734c12573020031f4d6/22-27%202M733_SPA72dpi.pdf)>.
- [14] Analysing the costs of High Voltage Direct Current (HVDC) transmissions. A: Electrical Engineering Portal [en línia]. Edvard Csanyi, 6 d'agost de 2014. Disponible a: <<https://electrical-engineering-portal.com/analysing-the-costs-of-high-voltage-direct-current-hvdc-transmission>>.
- [15] Rodríguez Masnou, Oriol. Caracterización y estudio de parques eólicos off-shore [en línia]. Treball final de grau, UPC, Escola d'Enginyeria de Barcelona Est. Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2020. Disponible a: <<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/180315>>.
- [16] Rodríguez Freire, Ignacio. Transporte de energía eléctrica por corriente continua (Direct current Energy Transmission) [en línia]. Treball final de grau, Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicación, 2016. Disponible a: <<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9151/386942.pdf?sequence=1>>.
- [17] Garcia Aguilar, Cristina. Descripción y estudio de los enlaces HVDC en los sistemas eléctricos [en línia]. Treball final de grau, UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2020. Disponible a: <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185216/tfg-cristina-garcia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.
- [18] Garcia Aguilar, Cristina. (2020). HVDC\_projects.m for MATLAB. [Database]. Descripción y estudio de los enlaces HVDC en los sistemas electricos, 2020.
- [19] J. Arrillaga. High Voltage Direct Current Transmission. Institution of Electrical Engineers, London, U.K., 2nd edition, 1998. ISBN 0852969410.



- [20] N. Bizon; N.M. Tabatabaei; F. Blaabjerg; E.Kurt. Energy Harvesting and Energy Efficiency. Technology, Methods, and Applications. Springer, Switzerland, 2017. ISBN 978-3-319-49874-4.
- [21] Thomas Ackermann. Wind poer in power systems, Wiley. Noida, India, 2nd edition, 2012. ISBN 9780470974162
- [22] Georg Schett. Power System: HVDC [en línia]. desembre 2019. Disponible a: [https://www.youtube.com/watch?v=t4FWAmaBPfs&list=PLi5hEpEXBAsLWtXR9\\_UYN\\_DfINeoEK7s6y](https://www.youtube.com/watch?v=t4FWAmaBPfs&list=PLi5hEpEXBAsLWtXR9_UYN_DfINeoEK7s6y).
- [23] Alexander Bueno. Transmisión en Corriente Continua (HVDC) [en línia]. Juny 2019. Disponible a: [https://www.youtube.com/watch?v=vX-T0mdIF6s&list=PLgqw\\_8WBlqbAkVWdSakqGKVx2Qh2UlrOV](https://www.youtube.com/watch?v=vX-T0mdIF6s&list=PLgqw_8WBlqbAkVWdSakqGKVx2Qh2UlrOV).
- [24] Francisco José Rodríguez Ramiro; Juan Manuel Carrasco Solís. Comparativa convertidores HVDC-VSC, Grupo Tecnología Electrónica. Universidad de Sevilla. [PDF].
- [25] Piqué Lopez, Robert. (2019). Electrònica de Potència, UPC-EEBE. [PPT].
- [26] Luis Fernández Beites. (12 de novembre de 2012). Introducció a los Enlaces de Continua de Alta Tensión, UPM-ETSI. [PPT].
- [27] Victor F. Lescale. (15 d'abril de 2015). Tecnología HVDC. Parte 1 de 2: Características y Beneficios. ABB Group. [en línia]. <https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/documentos-peru/presentaciones-primeras-jornadas-tecnicas-abb-peru/ps/tecnolog%C3%ADa-hdvc-caracter%C3%ADsticas-y-beneficios-parte-i-jan-johansson.pdf?sfvrsn=2>.
- [28] Unidad N°8: Transmisión de Energía con Corriente Continua en Alta Tensión. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rosario. [en línia]. <https://docplayer.es/52353989-Transmision-de-energia-con-corriente-continua-en-alta-tension.html>.
- [29] Lennart Carlsson. HVDC: ABB, de pionero a líder mundial. *Revista ABB 4/2003*. [en línia]. Gener 2008, Suècia. Disponible a: [https://www.researchgate.net/publication/28241749\\_HVDC\\_ABB\\_de\\_pionero\\_a\\_lider\\_mu\\_ndial](https://www.researchgate.net/publication/28241749_HVDC_ABB_de_pionero_a_lider_mu_ndial).

---

[30] Siemens AG: Power Transmission and Distribution High Voltage Division. High Voltage Direct Current Transmission - Proven Technology for Power Exchange [en línia]. Erlangen, Alemanya. Disponible a: <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/portfolio/high-voltage-direct-current-transmission-solutions.html>>.

[31]. ABB Group R&D and Technology. ABB review: 60 years of HVDC. [en línia]. Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH. Dornbirn, Austria. ISSN 1013-3119. Disponible a: <<https://global.abb/group/en/technology/abb-review>>.

[32] Abhishek Kumar. HVDC (High Voltage Direct Current) Transmission System: A Review Paper. [en línia] Gyancity Journal of Engineering and Technology. Juliol 2018, Nova Delhi, India. ISSN: 2456-0065. Disponible a: <[https://www.researchgate.net/publication/326338129\\_HVDC\\_High\\_Voltage\\_Direct\\_Current\\_Transmission\\_System\\_A\\_Review\\_Paper](https://www.researchgate.net/publication/326338129_HVDC_High_Voltage_Direct_Current_Transmission_System_A_Review_Paper)>.

[33] E. Harika; B.Vijayashanthi. High Voltage Direct Current (HVDC) Power Systems. [en línia]. Department of EEE, Sree Vidyanikethan Engineering College, India. 18 de Febrer de 2017. Tirupati, India. ISSN: 2319-8753. Disponible a: <[http://www.ijirset.com/upload/2017/ncratem/29\\_NCRATEM\\_%20EEE003.pdf](http://www.ijirset.com/upload/2017/ncratem/29_NCRATEM_%20EEE003.pdf)>.

[34] M. P. Bahrman and B. K. Johnson. The ABCs of HVDC transmission technologies. A: IEEE Power and Energy Magazine, vol. 5, no. 2, pp. 32-44. [en línia] Març/Abril de 2007. Disponible a: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4126468>>.

[35] Georgios Stamatou and Massimo Bongiorno. Stability Analysis of Two-Terminal VSC-HVDC Systems Using the Net-Damping Criterion. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 31, NO. 4 [en línia]. Agost 2016. Disponible a: <[https://www.researchgate.net/publication/28241749\\_HVDC\\_ABB\\_de\\_pionero\\_a\\_lider\\_mundial](https://www.researchgate.net/publication/28241749_HVDC_ABB_de_pionero_a_lider_mundial)>.

[36] T. Magg, M. Manchen, E. Krige, J. Wasborg and J. Sundin, "Connecting networks with VSC HVDC in Africa: Caprivi Link interconnector," IEEE Power and Energy Society Conference and Exposition in Africa: Intelligent Grid Integration of Renewable Energy Resources (PowerAfrica), 2012, pp. 1-6, Disponible a: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6498630>>.

- [37] A. F. Nnachi, J. L. Munda, D. Nicolae and A. M. Mabwe, "VSC HVDC transmission corridor: An option for PV power injection and AC network stability support," 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2013, pp. 1787-1792, Disponible a: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6505946>>.
- [38] P. L. Francos, S. S. Verdugo, H. F. Álvarez, S. Guyomarch and J. Loncle, "INELFE — Europe's first integrated onshore HVDC interconnection," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012, pp. 1-8, Disponible a: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6344799>>.
- [39] J. Egan, P. O'Rourke, R. Sellick, P. Tomlinson, B. Johnson and S. Svensson, "Overview of the 500MW EirGrid East-West Interconnector, considering System Design and execution-phase issues," 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), 2013, pp. 1-6, Disponible a: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6714867>>.
- [40] N. Macleod, N. Cowton and J. Egan, "System restoration using the "black" start capability of the 500MW EIRGRID East- West VSC-HVDC interconnector," IET International Conference on Resilience of Transmission and Distribution Networks (RTDN) 2015, Disponible a: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7447234>>.
- [41] G. Pinares, "Analysis of the DC dynamics of VSC-HVDC systems connected to weak AC grids using a frequency domain approach," 2014 Power Systems Computation Conference, 2014, pp. 1-7, doi: 10.1109/PSCC.2014.7038406. Disponible a: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7038406>>
- [42] Resultados del mercado. A: OMIE [en línia]. OMI, Polo Español S.A. 2021. Disponible a: <<https://www.omie.es/es/market-results/annual/daily-market/daily-prices?scope=annual&year=2020&system=1>>.
- [43] Global Greenhouse Gas Emissions by sector A: Earthcharts [en línia]. EarthCharts, 6 de març de 2020. Disponible a: <<http://earthcharts.org/emissions-sources/>>.
- [44] Factor d'emissió de l'energia elèctrica: el mix elèctric A: gencat.cat [en línia]. Oficina Catalana del Canvi Climàtic, 20 d'abril de 2021. Disponible a: <[https://canviclimatic.gencat.cat/ca/actua/factors\\_demissio\\_associats\\_a\\_lenergia/](https://canviclimatic.gencat.cat/ca/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/)>.



## Annex

```

function HVDClink_eigvaluesandpoles

close all
clc

Pdcbase_MW=600;
Vdcbase_kV=300;
Rdcbase_Ohm=300;
Ldcbase_H=0.954;
Cdcbase_F=10.61e-6;

Cconv_F=33e-6;
rpole_Ohmkm=0.0376/2;
lpole_Hkm=0.189e-3/2;
cpole_Fkm=4*0.207e-6;
length_km=50;

Cconv_pu=Cconv_F/Cdcbase_F

Rpole_Ohm=rpole_Ohmkm*length_km;
Rdc_Ohm=2*Rpole_Ohm
Rdc_pu=Rdc_Ohm/Rdcbase_Ohm

lpole_H=lpole_Hkm*length_km;
Ldc_H=2*lpole_H
Ldc_pu=Ldc_H/Ldcbase_H

Cpole_F=cpole_Fkm*length_km;
Cdc_F=Cpole_F/4
Cdc_pu=Cdc_F/Cdcbase_F

Ctot_pu=Cconv_pu+Cdc_pu;

Vdc1_kV=300;
Vdc10_pu=Vdc1_kV/Vdcbase_kV;

P2_MW=-600:60:600;

[real_es, imag_es]=deal(zeros(3,length(P2_MW)));
[real_ps, imag_ps]=deal(zeros(3,length(P2_MW)));

for k=1:length(P2_MW)
    P20_pu=P2_MW(k)/Pdcbase_MW;

    c2=1;
    c1=-Vdc10_pu;

```

```

c0=-Rdc_pu*P20_pu;

pol=[c2 c1 c0];

r=roots(pol);
Vdc20_pu=max(r);

P10_pu=Vdc10_pu*(-P20_pu/Vdc20_pu);

R10_pu=Vdc10_pu^2/P10_pu;
R20_pu=Vdc20_pu^2/P20_pu;

Adclink=[-1/(Ctot_pu*R10_pu) -1/Ctot_pu 0;
          1/Ldc_pu -Rdc_pu/Ldc_pu -1/Ldc_pu;
          0 1/Ctot_pu -1/(Ctot_pu*R20_pu)];

es=eig(Adclink);

real_es(:,k)=real(es);
imag_es(:,k)=imag(es);

Bdclink=[1/(Ctot_pu*Vdc10_pu); 0; 0];
Cdclink=[2*Vdc10_pu 0 0];
Ddclink=0;

[b,a]=ss2tf(Adclink,Bdclink,Cdclink,Ddclink);
sys=tf(b,a);
ps=pole(sys);

real_ps(:,k)=real(ps);
imag_ps(:,k)=imag(ps);
end

h_fig=figure;
set(h_fig,'Units','normalized',...
     'Name','Eigenvalues',...
     'NumberTitle','off',...
     'Position',[0 0.04036458333333333 1 0.87],...
     'Resize','off')
plot(real_es(:,1),imag_es(:,1),'ko')
hold on
plot(real_es(:,2:end-1),imag_es(:,2:end-1),'b*')
plot(real_es(:,end),imag_es(:,end),'kd')
title('Eigenvalues')
xlabel('Real part eigenvalues (pu)')
ylabel('Imaginary part eigenvalues (pu)')
grid on
zoom on

```

```
h_fig=figure;
set(h_fig, 'Units', 'normalized', ...
    'Name', 'Poles', ...
    'NumberTitle', 'off', ...
    'Position', [0 0.040364583333333333 1 0.87], ...
    'Resize', 'off')
plot(real_ps(:,1), imag_ps(:,1), 'ko')
hold on
plot(real_ps(:,2:end-1), imag_ps(:,2:end-1), 'b*')
plot(real_ps(:,end), imag_ps(:,end), 'kd')
title('Poles')
xlabel('Real part poles (pu)')
ylabel('Imaginary part poles (pu)')
grid on
zoom on
```