

Treball de Fi de Grau

**Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

**Modelització, control i simulació de xarxes  
VSC-HVDC per a la integració de parcs eòlics  
marins**

**MEMÒRIA**

**Autor:** David Lumbreras Carrasco  
**Director:** Joan Sau Bassols  
**Codirector:** Oriol Gomis Bellmunt  
**Convocatòria:** Gener 2017



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

El present treball presenta l'anàlisi, la modelització, el control i la simulació de xarxes mallades *High Voltage Direct Current* (HVDC) utilitzades per transmetre a la xarxa elèctrica l'energia generada a parcs eòlics marins. La xarxa HVDC utilitza convertidors *Voltage Source Converters* (VSC) per tal de mantenir la tensió constant i per transformar el corrent altern a continu i viceversa. A més, a la xarxa HVDC estudiada, s'ha considerat que un dels convertidors VSC és a la costa, mentre que els altres es troben connectats a parcs eòlics marins.

Adicionalment, es realitza un anàlisi, una modelització i un estudi del control de diferents tipologies de *current flow controllers* (CFC) per gestionar els fluxos de corrent a la xarxa mallada HVDC.

També es realitza la modelització i el control d'una turbina eòlica; i s'utilitza un model agregat per tal de treballar amb dos parcs eòlics sencers.

Finalment, es duu a terme la simulació de la xarxa mallada HVDC amb els models agregats dels parcs eòlics i amb els diferents tipus de *current flow controllers*; emprant models ideals per estudiar els VSCs.

Tots els models, simulacions i càlculs del present treball s'han realitzat utilitzant el programari MATLAB SIMULINK.



*Para mi hermano Alberto.*



# Índex

<b>1</b>	<b>Prefaci</b>	<b>15</b>
1.1	Origen del projecte i motivació . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Introducció</b>	<b>17</b>
2.1	Objectius . . . . .	18
2.2	Abast . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Generalitats de la tecnologia HVDC</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>Descripció del sistema</b>	<b>21</b>
4.1	Aerogenerador . . . . .	24
4.1.1	Turbina . . . . .	25
4.1.2	Transmissió . . . . .	25
4.1.3	Generador . . . . .	26
4.2	Convertidors VSC . . . . .	27
4.2.1	Back-to-Back . . . . .	28
4.2.2	<i>Chopper</i> . . . . .	29
4.3	Parcs eòlics . . . . .	30
4.4	Xarxa HVDC . . . . .	31
4.4.1	Configuracions HVDC . . . . .	31
4.5	Current flow controllers . . . . .	33
4.5.1	Resistència variable . . . . .	34
4.5.2	Convertidors CA/CC . . . . .	35
4.5.3	Convertidors CC/CC . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Modelització del sistema</b>	<b>39</b>
5.1	Model de l'aerogenerador . . . . .	39
5.1.1	Model de la turbina . . . . .	39
5.1.2	Model de la transmissió . . . . .	41
5.1.3	Model del generador . . . . .	42
5.2	Model dels VSCs . . . . .	42
5.2.1	Model del chopper . . . . .	44
5.3	Model dels parcs eòlics . . . . .	45
5.4	Model de la xarxa HVDC . . . . .	46
5.5	Model del current flow controller . . . . .	47
5.5.1	Model del current flow controller ideal . . . . .	48
5.5.2	Model del current flow controller de resistència variable . . . . .	48
5.5.3	Model del current flow controller convertidor CA/CC . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Control del sistema</b>	<b>53</b>
6.1	Control del VSC a la banda de l'aerogenerador . . . . .	53
6.1.1	Algorisme d'extracció de la màxima potència de la turbina . . . . .	55
6.2	Control del VSC de l'aerogenerador a la banda de la xarxa . . . . .	56
6.2.1	Llaç de corrent . . . . .	57

6.2.2	Llaç de tensió . . . . .	58
6.3	Control dels convertidors HVDC . . . . .	60
6.4	Control del current flow controller . . . . .	61
6.4.1	Control del current flow controller ideal . . . . .	61
6.4.2	Control del current flow controller de resistència variable . . . . .	62
6.4.3	Control del current flow controller convertidor CA/CC al Cable 1 . . . . .	64
6.4.4	Control del current flow controller convertidor CA/CC al Cable 2 . . . . .	68
<b>7</b>	<b>Simulacions</b>	<b>71</b>
7.1	Paràmetres utilitzats en les simulacions . . . . .	71
7.1.1	Paràmetres del sistema físic . . . . .	71
7.1.2	Paràmetres de control . . . . .	74
7.2	Resultats de les simulacions . . . . .	75
7.3	Observacions . . . . .	83
<b>8</b>	<b>Estudi econòmic</b>	<b>85</b>
8.1	Cost de l'estudi . . . . .	85
8.2	Cost de l'execució . . . . .	86
8.2.1	Cost d'un parc eòlic marí . . . . .	87
8.2.2	Cost de la transmissió HVDC . . . . .	87
<b>9</b>	<b>Avaluació de l'impacte ambiental</b>	<b>89</b>
9.1	Consideracions durant el disseny . . . . .	90
9.1.1	Emissions electromagnètiques . . . . .	90
9.1.2	Vibracions, soroll i impacte visual . . . . .	90
9.1.3	Riscos ambientals . . . . .	91
9.2	Impacte durant la implementació . . . . .	91
9.2.1	Fase d'instal·lació . . . . .	91
9.2.2	Fase d'operació . . . . .	92
9.2.3	Fase de desmantellament . . . . .	92
<b>10</b>	<b>Conclusions</b>	<b>93</b>
10.1	Contribucions . . . . .	93
10.2	Gestió energètica a les xarxes mallades HVDC . . . . .	93
10.3	Treballs futurs . . . . .	94
	<b>Agraïments</b>	<b>97</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>99</b>
	<b>Annex A: Transformada de Park</b>	
	<b>Annex B: Modulació PWM</b>	
	<b>Annex C: Funcionament de la Phase locked loop</b>	
	<b>Annex D: Esquemes complementaris del model utilitzat</b>	



# Llistat de Figures

3.1	Comparativa del cost entre transmissions HVDC i HVAC . . . . .	20
4.1	Esquema general del sistema . . . . .	21
4.2	Esquema general d'un aerogenerador . . . . .	22
4.3	Esquema general d'un parc eòlic . . . . .	23
4.4	Esquema general de la connexió HVDC . . . . .	23
4.5	Parts d'un aerogenerador . . . . .	24
4.6	Esquema de l'aerogenerador . . . . .	25
4.7	VSC amb dos IGBT per fase . . . . .	27
4.8	Connexió <i>back-to-back</i> bidireccional amb dos IGBT per fase . . . . .	28
4.9	Esquema del <i>chopper</i> . . . . .	29
4.10	Configuracions Punt a Punt . . . . .	32
4.11	Configuració Multiterminal . . . . .	32
4.12	Configuració mallada . . . . .	33
4.13	<i>Current flow controller</i> de resistència variable . . . . .	34
4.14	Esquema general i situació d'un <i>Current flow controller</i> CA/CC . . . . .	35
4.15	Esquema d'un <i>Current flow controller</i> CA/CC amb IGBTs . . . . .	36
4.16	Esquema d'un <i>Current flow controller</i> CC/CC amb Ponts en H . . . . .	37
5.1	Relació entre potència i velocitat per diferents velocitats de vent . . . . .	40
5.2	Relació entre $C_p$ i el <i>Tip-speed ratio</i> en funció de l'angle de Pitch. . . . .	41
5.3	Model ideal d'un convertidor VSC . . . . .	43
5.4	Model ideal del VSC amb acoblament entre xarxes . . . . .	43
5.5	Esquema del model ideal del <i>chopper</i> . . . . .	45
5.6	Model de la xarxa HVDC . . . . .	46
5.7	Emplaçament del <i>current flow controller</i> . . . . .	47
5.8	Model ideal del <i>current flow controller</i> . . . . .	48
5.9	Relació entre la intensitat del cable i la resistència del <i>current flow controller</i> . . . . .	50
5.10	Model del <i>current flow controller</i> convertidor CA/CC . . . . .	51
6.1	Esquema del control del VSC a la banda de l'aerogenerador . . . . .	53
6.2	Esquema del llaç de corrent del VSC a la banda de l'aerogenerador . . . . .	54
6.3	Esquema general del control del VSC a la banda de la xarxa . . . . .	56
6.4	Esquema del llaç de corrent del VSC a la banda de la xarxa. . . . .	59
6.5	Esquema del llaç de tensió. . . . .	59
6.6	Esquema del control del <i>current flow controller</i> ideal . . . . .	62
6.7	Esquema equivalent del <i>current flow controller</i> de resistència variable en funció del sentit de la intensitat . . . . .	63
6.8	Esquema del control del <i>current flow controller</i> de resistència variable . . . . .	64
6.9	Esquema del control del <i>current flow controller</i> convertidor CA/CC situat al cable 1 . . . . .	64
6.10	Esquema equivalent del <i>current flow controller</i> convertidor CA/CC en funció del sentit de la intensitat . . . . .	65
6.11	Esquema de la lògica de commutació del <i>current flow controller</i> convertidor CA/CC . . . . .	67
6.12	Esquema del controlador del <i>current flow controller</i> convertidor CA/CC . . . . .	68

6.13	Esquema del control del <i>current flow controller</i> convertidor CA/CC situat al cable 2 . . . . .	69
7.1	Variables del parc eòlic 1 . . . . .	76
7.2	Variables del parc eòlic 2 . . . . .	77
7.3	Potències i corrents injectats a la xarxa HVDC . . . . .	78
7.4	Tensió aplicada pel <i>current flow controller</i> . . . . .	78
7.5	Intensitat al cable 1 . . . . .	79
7.6	Intensitat al cable 2 . . . . .	79
7.7	Intensitat al cable 3 . . . . .	80
7.8	Potència i intensitat total absorbida pel convertidor HVDC de la costa . .	80
7.9	Tensions a la xarxa HVDC . . . . .	81
7.10	Variables del CFC convertidor CA/CC situat al cable 1 . . . . .	81
7.11	Variables del CFC convertidor CA/CC situat al cable 2 . . . . .	82

# Llistat de Taules

7.1	Paràmetres de la turbina eòlica . . . . .	71
7.2	Paràmetres del generador síncron d'imants permanents . . . . .	72
7.3	Paràmetres de les xarxes internes i dels convertidors VSC dels parcs eòlics . . . . .	72
7.4	Paràmetres de la xarxa alterna de la costa . . . . .	73
7.5	Paràmetres de la xarxa HVDC i dels <i>current flow controllers</i> . . . . .	73
7.6	Paràmetres de control utilitzats als parcs eòlics . . . . .	74
7.7	Paràmetres de control de la xarxa alterna de la costa . . . . .	74
7.8	Paràmetres de control dels <i>current flow controllers</i> . . . . .	75
8.1	Preu del maquinari i programari . . . . .	85
8.2	Preu de la mà d'obra . . . . .	86
8.3	Cost total de l'estudi . . . . .	86
8.4	Cost total de l'execució del projecte . . . . .	86
8.5	Preu dels parcs eòlics . . . . .	87
8.6	Cost dels cables de la xarxa HVDC . . . . .	88
8.7	Cost total de la xarxa HVDC . . . . .	88



# Glossari

## Acrònims

CA	Corrent Altern
CC	Corrent Continu
CFC	<i>Current Flow Controller</i>
CITCEA	Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments
EPD	<i>Environmental Product Declaration</i>
HVAC	<i>High Voltage Alternating Current</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i>
MMC	<i>Multi-Level Converter</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse-Width Modulation</i>
SW	<i>Switch</i> ; referit als transistors IGBT
TFG	Treball de Final de Grau
TPFG	<i>Thyristor Power-Flow Controllers</i>
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>

## Notació llatina

$A$	Àrea d'escombrat de les pales de la turbina.
$C$	Capacitat del condensador del <i>back-to-back</i>
$C_{HVDC}$	Capacitat dels condensadors de la xarxa HVDC
$C_{cfc}$	Capacitat del condensador del CFC convertidor CA/CC
$C_p$	Coefficient de potència
$c_{1...9}$	Coefficients constructius de la turbina eòlica
$D$	<i>Duty cycle</i>
$E_{DC}$	Tensió del bus dels <i>back-to-back</i>
$E_c$	Tensió nominal de la xarxa HVDC
$E_{cfc}$	Tensió al bus de corrent continu del CFC convertidor CA/CC
$E_{max}$	Tensió a partir de la qual el <i>chopper</i> ha de dissipar la màxima potència
$E_{min}$	Tensió a partir de la qual s'ha d'activar el <i>chopper</i>
$f$	Freqüència de la xarxa interna del parc
$f_{cfc}$	Freqüència de commutació dels transistors IGBT
$f_{costa}$	Freqüència de la xarxa alterna de la costa
$I_{1...6}$	Corrents que circulen per la xarxa mallada HVDC
$I_{DC}$	Intensitat injectada al <i>back-to-back</i>
$i_d$	Component $d$ del corrent que circula pel convertidor VSC
$i_q$	Component $q$ del corrent que circula pel convertidor VSC
$i_s$	Corrent de l'estator del PMSG.
$J_{red}$	Conjunt d'inèrcies reduïdes a la turbina eòlica

$K_i$	Constant integral del controlador
$K_{iPH}$	Constant integral del controlador del Pont en H
$K_{m_{c1,2,3}}$	Longitud dels cables de la xarxa HVDC
$K_p$	Constant proporcional del controlador
$K_{pPH}$	Constant proporcional del controlador del Pont en H
$L_{HVDC}$	Inductància dels conductors de la xarxa HVDC
$L_{acob}$	Inductància d'acoblament a la xarxa interna del parc eòlic
$L_{acobcfc}$	Inductància d'acoblament al transformador del VSC al CFC convertidor CA/CC
$L_{acobcosta}$	Inductància d'acoblament a la xarxa alterna de la costa
$L_{acobgran}$	Inductància d'acoblament al convertidor HVDC del parc eòlic
$L_{lin}$	Inductància total a les línies del parc eòlic
$l_s$	Inductància a l'estàtor del PMSG
$m_1$	Relació de transformació del transformador dels aerogeneradors
$m_2$	Relació de transformació del transformador HVDC
$m_{lin1,2}$	Número de línies al parc eòlic
$n_{lin1,2}$	Número d'aerogeneradors per línia al parc eòlic
$P_{AC}$	Potència a part AC del VSC de l'aerogenerador a la banda de la xarxa interna del parc eòlic.
$P_C$	Potència al condensador del bus de corrent continu
$P_{DC}$	Potència al bus de corrent continu.
$P_{costa}$	Potència absorbida per la xarxa alterna de la costa
$P_{gennom}$	Potència nominal del PMSG
$P_{gen}$	Potència activa produïda pel PMSG
$P_{parc1,2}$	Potència produïda al parc eòlic
$P_t$	Potència captada per la turbina eòlica
$P_v$	Potència de l'aire que travessa les pales de la turbina eòlica
$p$	Nombre de parell de pols del PMSG
$Q_{gen}$	Potència reactiva produïda PMSG
$R$	Radi de les pales de la turbina eòlica
$R_{1,2,3}$	Resistència intrínseca dels conductors de la xarxa HVDC
$R_{cable1,2,3}$	Resistència total dels conductors de la xarxa HVDC
$R_{HVDC}$	Resistència dels conductors de la xarxa HVDC en funció de la longitud
$R_{acob}$	Resistència d'acoblament a la xarxa interna del parc eòlic
$R_{acobcfc}$	Resistència d'acoblament al transformador del VSC al CFC convertidor CA/CC
$R_{acobcosta}$	Resistència d'acoblament a la xarxa alterna de la costa
$R_{acobgran}$	Resistència d'acoblament al convertidor HVDC del parc eòlic
$R_{cfc}$	Resistència física del CFC de resistència variable
$R_{chopper}$	Resistència del chopper
$R_{interna}$	Resistència interna dels IGBT
$R_{lin}$	Resistència total a les línies del parc eòlic
$R_{snubber}$	Resistència d'esmorçiment dels IGBT
$r_s$	Resistència a l'estàtor del PMSG
$S_{HVDC}$	Potència nominal dels convertidors HVDC
$S_{VSC}$	Potència dels convertidors VSC
$V_{buit}$	Tensió simple en buit del PMSG a la velocitat nominal
$V_{cfc}$	Tensió aplicada pel CFC

$V_{fase}$	Tensió de fase abans del <i>back-to-back</i>
$V_{fasecfc}$	Tensió de fase al VSC del CFC convertidor CA/CC
$V_{fasegran}$	Tensió de fase abans del convertidor HVDC del parc eòlic
$V_{faseparc}$	Tensió de fase de la xarxa interna del parc eòlic
$V_{fcosta}$	Tensió de fase de la xarxa alterna de la costa
$v_{ld}$	Component $d$ de la tensió del convertidor VSC
$v_{lq}$	Component $q$ de la tensió del convertidor VSC
$v_s$	Voltatge de l'estator del PMSG
$v_v$	Velocitat mitjana del vent
$v_{zq}$	Component $q$ de la tensió de la xarxa

## Notació grega

$\Gamma_m$	Parell del generador d'imants permanents
$\Gamma_t$	Parell de la turbina eòlica
$\vartheta$	Angle de Pitch
$\lambda$	<i>Tip-speed ratio</i>
$\lambda_m$	Flux concatenat
$\xi$	<i>Damping ratio</i>
$\rho$	Densitat de l'aire
$\tau_{CL}$	Constant de temps del llaç de corrent del VSC a la banda de la xarxa
$\tau_{CLcosta}$	Constant de temps del llaç de corrent de la costa
$\tau_{gen}$	Constant de temps del llaç de corrent del VSC a la banda de l'aerogenerador
$\omega_e$	Velocitat angular de la xarxa
$\omega_t$	Velocitat angular del rotor
$\omega_{tnom}$	Velocitat nominal de la turbina
$\omega_{vl}$	Velocitat angular del llaç de tensió
$\omega_{vlcosta}$	Velocitat angular del llaç de tensió de la costa

## Subíndexs o superíndexs

*	Indica valor desitjat
<i>abc</i>	En la referència de les magnituds trifàsiques sinusoidals
<i>acob</i>	Referent als acoblaments
<i>btb</i>	Referent al <i>back-to-back</i>
<i>cfc</i>	Referent als <i>current flow controllers</i>
<i>chopper</i>	Referent al <i>chopper</i>
<i>cl</i>	Referent al llaç de corrent
<i>costa</i>	Referent a la xarxa de la costa
<i>dq0</i>	En la referència <i>qd0</i>
<i>gen</i>	Referent al PMSG
<i>HVDC</i>	Referent a la xarxa HVDC
<i>max</i>	Indica un valor màxim
<i>min</i>	Indica un valor mínim
<i>nom</i>	Indica un valor nominal
<i>opt</i>	Indica un valor òptim
<i>t</i>	Referent a la turbina eòlica
<i>v</i>	Referent al vent
<i>vl</i>	Referent al llaç de tensió





# Capítol 1

## Prefaci

### 1.1 Origen del projecte i motivació

Quan vaig decidir estudiar enginyeria industrial, ho vaig fer ja que esperava poder dedicar-me a les energies renovables en el futur. És per això que al moment d'escollir un Treball de Final de Grau vaig tenir ben clar que el volia fer sobre algun tema relacionat amb l'obtenció d'energia a partir de fonts renovables.

L'energia eòlica, la solar, i d'altres menys populars com l'hidrogen, ofereixen la possibilitat de canviar la societat i convertir-la en una més respectuosa amb el medi ambient. Les possibilitats de les energies renovables són enormes i penso que la investigació al respecte augmentarà a mesura que s'esgotin els combustibles fòssils i conforme la consciència social en relació al medi ambient creixi.

Esperava que, l'elecció d'aquest TFG, m'aportés una visió més realista i pragmàtica de les energies renovables. Esperava veure les dificultats a les que s'enfronta l'energia eòlica i, sobretot, esperava que m'aportés uns coneixements que em resultessin útils a la meva vida laboral ja que, apart de poder viure amb la meva futura feina, m'agradaria que aquesta aportés algun altre bé a la societat i no només un benefici econòmic.

De les meves inquietuds personals i del meu anhel d'intentar millorar la societat on vivim va sorgir aquest TFG. Per casualitat un dia vaig veure a un dels plafons de l'escola que al CITCEA buscaven estudiants per fer projectes relacionats amb l'energia eòlica, de manera que no vaig dubtar en contactar amb ells tot i que encara em quedava lluny el moment d'entregar el TFG.

En resum, buscava un treball relacionat amb les energies renovables i que em fes aprendre el màxim possible durant la realització del mateix amb la idea de poder utilitzar aquests coneixements en el futur, ja sigui avançant en la investigació, o contribuint en la producció d'energia mitjançant fonts renovables.



## Capítol 2

# Introducció

Per fer front a les emissions de gasos hivernacle, al canvi climàtic i a la futura extinció dels combustibles fòssils, diferents governs estan afavorint el desenvolupament de fonts d'energies renovables i la seva integració a l'actual xarxa elèctrica [13]. Una de les principals contribuents en la popularització de les fonts d'energia renovable és l'energia eòlica marina atès a la seva capacitat de generar energia neta i respectuosa amb el medi ambient [26]. Només a Europa, a l'any 2020, s'esperen produir 28 GW mitjançant només parcs eòlics marins. El mateix any i utilitzant només energia eòlica, tant marina com terrestre, es podria produir el 17% de l'energia demanada a Europa [25].

Als parcs eòlics marins, la connexió a la xarxa elèctrica de la costa es fa d'una manera o d'una altra en funció de la distància que hi hagi a la costa [7]. Als parcs eòlics propers a la costa la transmissió d'energia s'acostuma a fer amb corrent altern però, als parcs eòlics situats lluny de la costa la transmissió d'energia elèctrica es complica. En aquest últim cas, la transmissió normalment es fa utilitzant corrent continu degut a que la transmissió emprant corrent altern acostuma a ser molt més cara per distàncies superiors a 50 km [7]. La transmissió emprant corrent continu a alta tensió, també anomenat *High Voltage Direct Current* (HVDC), presenta certs avantatges comparada amb la transmissió utilitzant corrent altern. Per exemple, la transmissió emprant corrent continu permet connectar entre elles xarxes de corrent altern de característiques molt diferents, facilitant així que xarxes elèctriques de diferents països siguin alimentades amb electricitat produïda amb energia eòlica. És de preveure que a mesura que creixi la demanda d'energia eòlica, es requeriran un major nombre de línies a les xarxes de corrent continu per tal de connectar els diversos terminals de les xarxes a les que fan d'enllaç.

La tecnologia HVDC s'ha utilitzat principalment per realitzar connexions entre dues estacions convertidores [10]. En el cas dels parcs eòlics, una de les estacions envia la potència generada pel parc eòlic i l'altra l'absorbeix i la injecta a la xarxa de la costa. L'existència d'un nombre significatiu de connexions d'aquest tipus va originar la idea d'unir-les entre elles, creant així una xarxa mallada HVDC. La implementació d'una xarxa mallada HVDC no només incrementaria la redundància de la transmissió d'energia, sinó que també augmentaria la seva flexibilitat. Addicionalment, la implementació d'una xarxa HVDC podria permetre la integració massiva de fonts d'energia renovable a l'actual xarxa elèctrica [18]. No obstant, les xarxes mallades HVDC presenten alguns problemes. A mesura que es vagin integrant fonts d'energies renovables i, en definitiva, augmenti el número de convertidors i malles presents a la xarxa HVDC, el control de la potència que circula pels diferents cables de la xarxa esdevindrà més difícil. Una mala gestió de la transmissió energètica podria originar certes inconveniències a la xarxa HVDC, com ara colls d'ampolla, la fallada dels cables de corrent continu o pèrdues de potència [4]. Tot i això, la gestió de l'energia a les xarxes HVDC es pot realitzar utilitzant dispositius com els *current flow controllers*, que permeten regular el pas d'energia als cables de la xarxa, millorant així la gestió energètica i prevenint possibles fallades.

El present Treball de Final de Grau presenta la modelització, el control i la simulació de dos parcs eòlics marins connectats a la costa amb una xarxa mallada HVDC. A l'actual capítol 2 es descriuen els objectius i l'abast del projecte. Tot seguit, al capítol 3, s'exposen les característiques principals de la tecnologia HVDC. Al capítol 4 es descriu el sistema estudiat i es presenten els conceptes generals del funcionament del sistema. A continuació, al capítol 5 es detallen els models utilitzats per simular el sistema estudiat. Seguidament, al capítol 6, s'explica el control de tots els elements modelitzats anteriorment. El capítol 7 conté els resultats de les simulacions realitzades. Per acabar, el capítol 8 presenta un estudi econòmic del projecte mentre que el capítol 9 tracta sobre l'impacte ambiental que tindria la implantació del sistema estudiat. Finalment, al capítol 10 es presenten les conclusions del present treball.

## 2.1 Objectius

- Anàlisi, modelització i estudi del control de convertidors *Voltage Source Converters* (VSC), incloent una connexió *back-to-back*. La connexió *back-to-back* inclou l'anàlisi, la modelització i el disseny del control d'un *chopper*.
- Anàlisi, modelització i estudi del control d'una turbina eòlica.
- Anàlisi, modelització i disseny del control de diferents tipologies de *current flow controllers*. També s'estudia l'impacte a la distribució de l'energia per la xarxa HVDC pels diferents tipus de *current flow controllers*.
- Anàlisi, modelització i simulació d'una xarxa multiterminal HVDC, concretament d'una xarxa mallada HVDC amb tres terminals, dos dels quals estan connectats a models agregats de parcs eòlics mentre que l'altre es troba connectat a un model de la xarxa de corrent altern de la costa. Aquest estudi inclou l'impacte dels *current flow controllers*.

## 2.2 Abast

L'abast del projecte inclou l'anàlisi i la modelització de convertidors VSC així com un estudi del seu control, emmarcat en una connexió HVDC mallada que enllaça dos parcs eòlics marins amb la xarxa alterna de la costa.

Adicionalment, es realitza l'anàlisi i la modelització d'una xarxa mallada HVDC així com també un estudi de la gestió energètica a la xarxa utilitzant diferents tipologies de *current flow controllers*. Es presenta l'anàlisi, el model i el disseny del control per diferents tipus de *current flow controllers* i s'estudia el seu impacte a la xarxa HVDC. Els VSCs s'han modelitzat emprant models ideals però alguns dels *current flow controllers* presentats s'han modelitzat utilitzant models reals.

A més, es modela una turbina eòlica marina i s'estudia el seu control mitjançant una connexió *back-to-back* entre dos VSCs.

Finalment, s'obtenen resultats del sistema modelitzat mitjançant simulacions amb el programa MATLAB SIMULINK.

## Capítol 3

# Generalitats de la tecnologia HVDC

El sistema de transmissió de l'energia elèctrica generada a parcs eòlics marins encara avui en dia presenta moltes dificultats. Als parcs eòlics terrestres, la transmissió s'acostuma a fer emprant corrent altern ja que no hi ha cap necessitat de fer-la utilitzant corrent continu. En canvi, els parcs eòlics marins la distància a la costa, o a l'estació transformadora més propera, acostuma a ser significativament més elevada. Això implica que la transmissió amb corrent altern s'hauria de fer a una tensió major per tal de reduir pèrdues [1]. De fet, a la majoria de parcs eòlics marins la transmissió es fa utilitzant corrent altern, mentre que la transmissió HVDC es reserva per a parcs eòlics llunyans a la costa [7].

Certament, les estacions convertidores d'una xarxa HVDC són molt més costoses que les seves equivalents d'una xarxa *High Voltage Alternating Current* (HVAC), però, per transportar energia elèctrica a llargues distàncies, la transmissió emprant corrent continu usualment és l'alternativa més econòmica. Quan es planteja l'elecció entre HVDC i HVAC, sorgeix el concepte *break even distance*, que és la distància a partir de la qual és econòmicament preferible utilitzar una transmissió HVDC respecte a una HVAC. Aquesta distància ronda els 800 km en el cas de transmissions terrestres i els 50 km en el cas de transmissions submarines [4]. És per això que els parcs eòlics propers a la costa, normalment realitzen la transmissió mitjançant corrent altern ja que la reducció de pèrdues que els suposaria una transmissió HVDC, no és suficient per compensar el cost econòmic addicional que requereix una instal·lació d'aquest caire [1]. Els costos d'ambdós tipus de transmissió es mostren de forma esquemàtica a la figura 3.1.

Les xarxes HVDC també esdevenen de gran utilitat per tal de connectar dues o més xarxes asíncrones de diferent freqüència, com per exemple una xarxa alterna de 50 Hz i una altra de 60 Hz. La connexió utilitzant HVDC, o un altre sistema de transmissió amb corrent continu, evita la propagació de perturbacions o mal funcionaments des d'una xarxa alterna a l'altra.

Com s'ha introduït al capítol 2, un dels aspectes claus de la tecnologia HVDC és que aquesta podria servir per integrar de manera massiva fonts d'energies renovables a l'actual xarxa elèctrica [18]. Les fonts d'energies renovables presenten una generació d'energia variable i, fins a cert punt, impredecible, [18] però amb la tecnologia HVDC es podria pal·liar aquesta variabilitat en la producció d'energia.

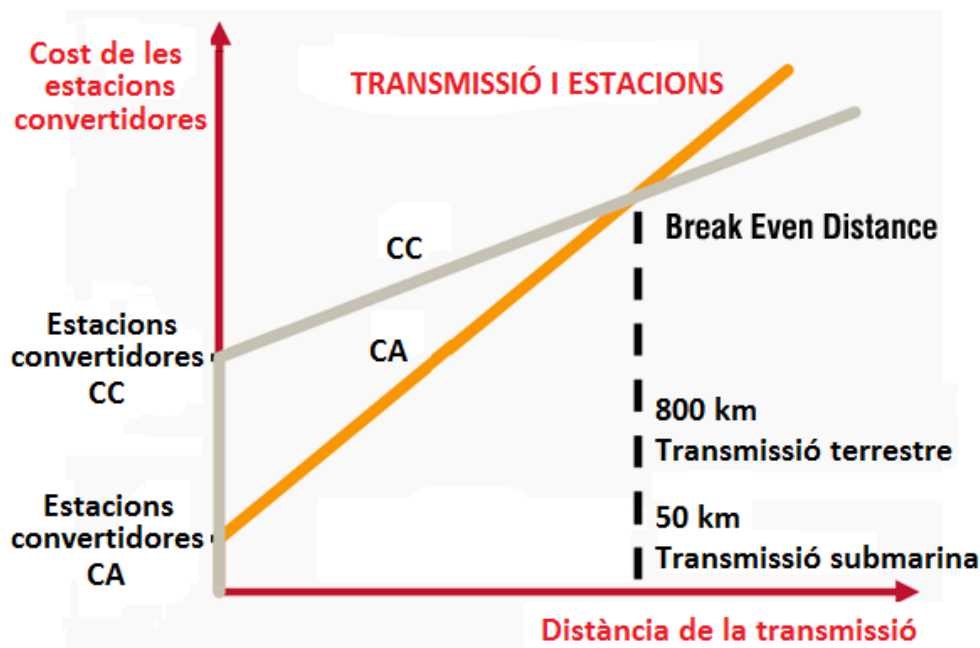


Figura 3.1: Comparativa del cost entre transmissions HVDC i HVAC

Font: <http://electrical-engineering-portal.com/>

Unificant en una única xarxa HVDC la producció d'energia produïda amb diferents fonts d'energies renovables s'aconseguiria reduir la variabilitat de l'energia obtinguda gràcies a la diversitat de climes i de temps meteorològics a partir dels quals s'obtingria energia [18]. Per exemple, amb una xarxa HVDC prou gran, es podria equilibrar la producció d'energia eòlica del nord d'Europa amb l'energia solar produïda a Espanya o al desert del Sàhara. A més, també es podria equilibrar l'energia produïda amb l'energia hidroelèctrica generada als Alps o a la península escandinava o, fins i tot, amb l'energia geotèrmica d'Islàndia [18]. D'aquesta manera existiria una xarxa global nodrida d'una producció constant d'energia a partir de fonts renovables, cosa que facilitaria enormement l'abandonament definitiu dels combustibles fòssils.

# Capítol 4

## Descripció del sistema

En aquest capítol es presenten els diferents elements que componen el sistema estudiat. Principalment, el sistema analitzat està format per dos parcs eòlics marins connectats a la xarxa alterna de la costa mitjançant una xarxa mallada HVDC. Un esquema general del sistema s'exposa a la figura 4.1.

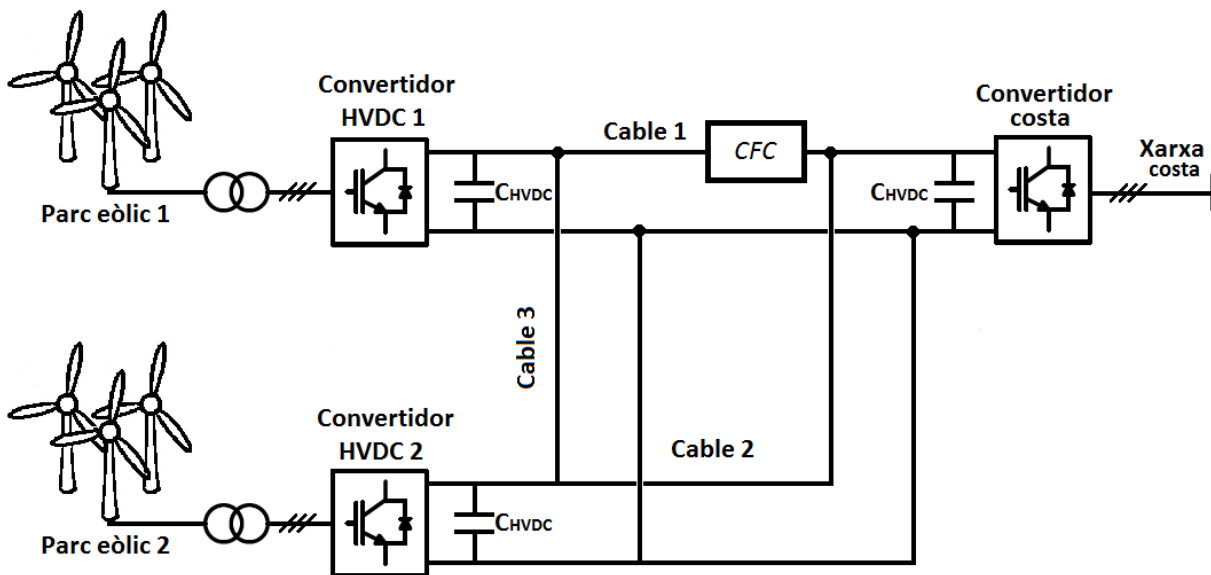


Figura 4.1: Esquema general del sistema  
Font: Pròpia

Seguidament s'introdueixen els diferents elements del sistema. L'ordre seguit per presentar els elements és anàleg al recorregut de l'energia elèctrica, és a dir, es produeix als aerogeneradors, circula pels parcs eòlics, es transmet a la xarxa HVDC i, finalment, arriba a la costa.

El sistema que s'analitza està format per dos parcs eòlics marins, on cada aerogenerador es troba connectat, sense caixa de transmissions a un generador d'imants permanents de velocitat variable. Al seu torn, aquest generador està connectat a dos convertidors *Voltage Source Converters* (VSCs) en *back-to-back* que transmeten la potència generada a la xarxa elèctrica interna del parc eòlic a través d'inductàncies que actuen com a filtres.

Un dels convertidors del *back-to-back* funciona com a ondulator mentre que l'altre ho fa com a rectificador. Per tal d'assegurar l'intercanvi de potència entre els dos convertidors, aquests estan connectats pel que s'anomena bus de corrent continu, format per un o més condensadors connectats en paral·lel respecte els VSCs.

L'esquema general d'un aerogenerador es mostra a la figura 4.2.

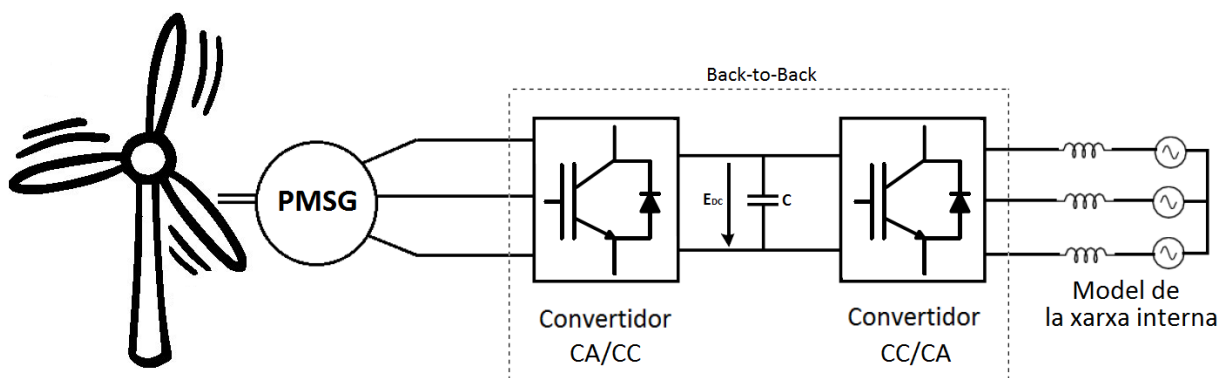


Figura 4.2: Esquema general d'un aerogenerador  
Font: Pròpia

La sortida de cada *back-to-back* es connecta a un transformador que eleva la tensió per tal de reduir pèrdues, o dit d'una altra manera, el transformador fa que la tensió de la xarxa interna del parc eòlic sigui superior a la que surt dels *back-to-back*. La xarxa interna del parc recull la potència generada per tots els aerogeneradors i la transmet a una subestació situada a la vora del parc eòlic. A la subestació, l'energia elèctrica passa per un altre transformador que eleva la tensió al nivell requerit per la xarxa HVDC i, tot seguit, un únic convertidor rectifica l'energia elèctrica i la transmet a la xarxa HVDC.

La configuració del parc eòlic es pot observar a la figura 4.3. Cal remarcar que aquesta configuració és present als dos parcs eòlics modelitzats.

La xarxa HVDC que transmet la potència generada pels parcs eòlics fins a la costa es tracta d'una xarxa mallada que serveix de connexió entre els convertidors HVDC dels parcs eòlics amb un altre convertidor situat a la costa. Convé reiterar que aquesta xarxa de corrent continu és una xarxa mallada, un tipus de xarxa que presenta la particularitat de que el corrent pot circular per diferents camins quan va d'un convertidor a un altre. És per això que les xarxes mallades poden necessitar dispositius addicionals, com ara *current flow controllers*, per controlar el flux de corrent pels cables.

Finalment, el convertidor de la costa és l'encarregat d'injectar la potència subministrada pels parcs eòlics a la xarxa alterna trifàsica.

L'esquema general de la connexió HVDC modelitzada s'exposa a la figura 4.4.



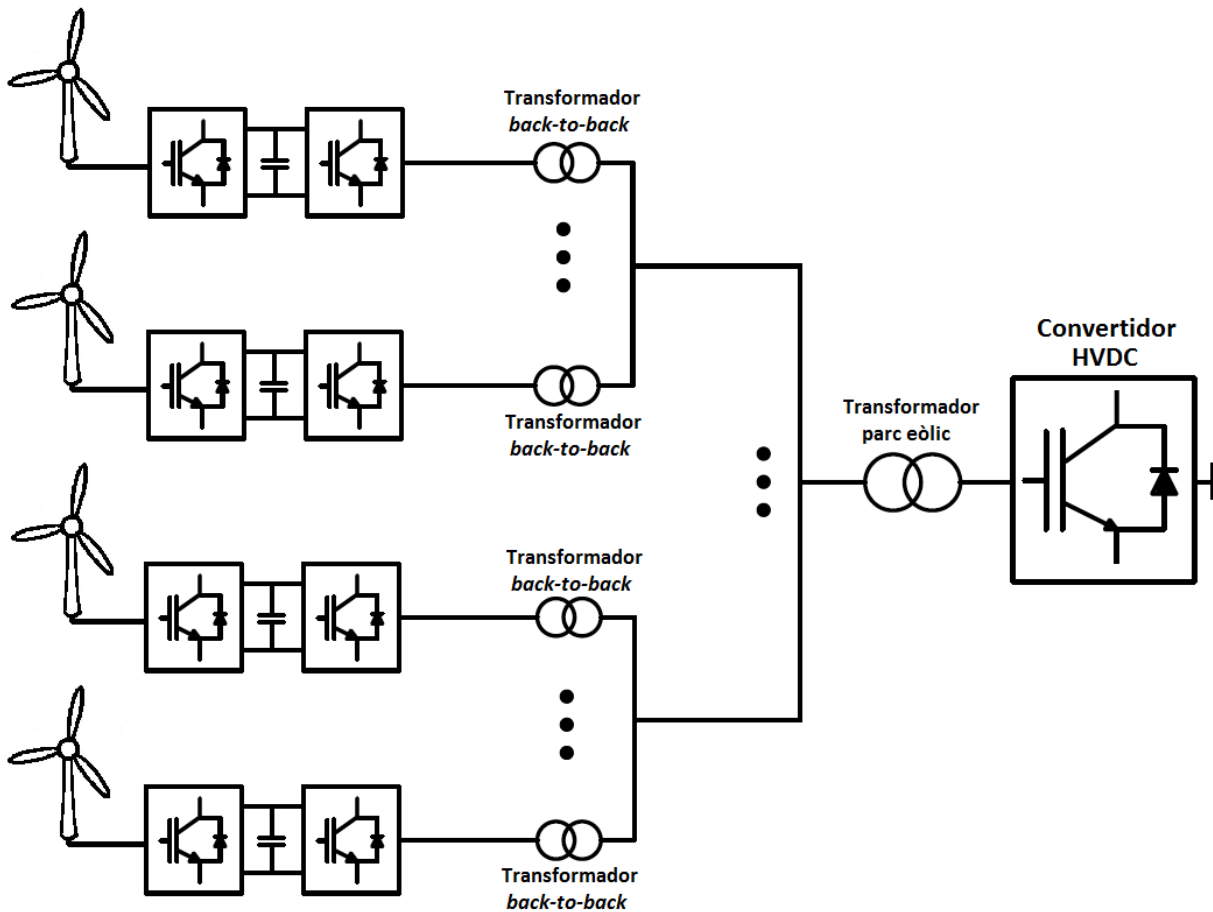


Figura 4.3: Esquema general d'un parc eòlic  
Font: Pròpia

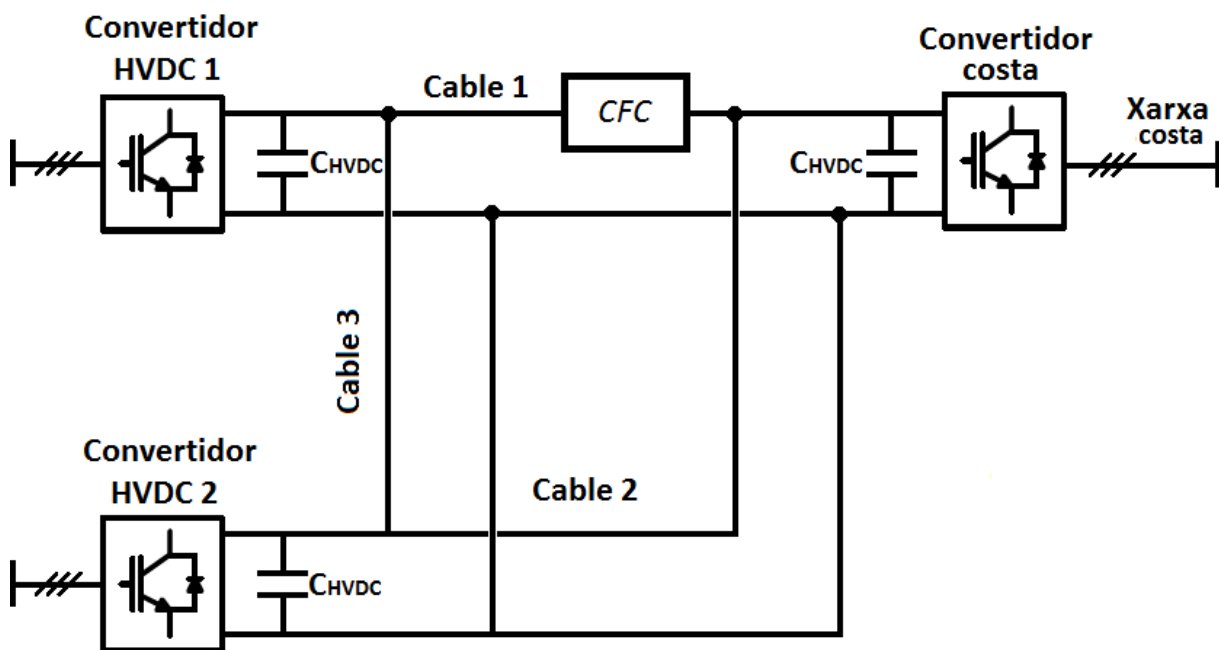


Figura 4.4: Esquema general de la connexió HVDC  
Font: Pròpia

## 4.1 Aerogenerador

Un aerogenerador té la finalitat de convertir l'energia cinètica que obté del vent en energia elèctrica que injectarà a la xarxa. Aquesta transformació de l'energia no es fa directament, sinó que es fa emprant les diferents parts que conformen l'aerogenerador.

En general els aerogeneradors estan formats per una turbina eòlica, un generador elèctric i una transmissió entre la turbina i el generador. Tots aquests elements es situen sobre dins d'un element anomenat góndola que els protegeix de les condicions ambientals externes. Cal mencionar que, en les turbines controlades mitjançant VSCs, dins la góndola també es situen els convertidors que governen la turbina. A la góndola s'acoblen les pales de l'aerogenerador, normalment 3, que al seu torn també van acoblades a la turbina eòlica. Per últim, la góndola se sol situar a gran alçada degut a que les velocitats del vent solen ser majors, i s'aguanta mitjançant una estructura anomenada torre. A la figura 4.5 tal es poden observar les diferents parts que conformen un aerogenerador.

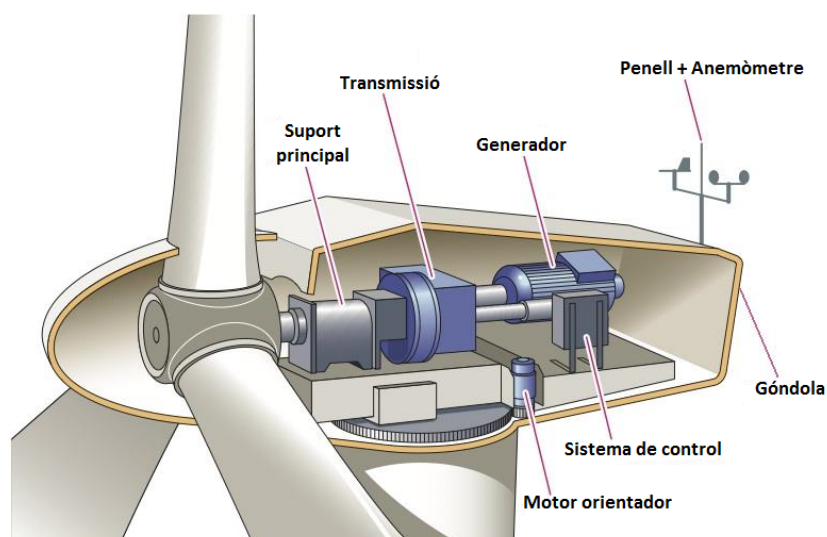


Figura 4.5: Parts d'un aerogenerador  
 Font: <http://energiadoblezero.com/>

A un aerogenerador també hi poden haver altres elements, com ara un anemòmetre, un penell, o un motor que l'orienti de manera que el rotor romangui en direcció perpendicular al vent per obtenir la màxima potència, però aquests elements no s'han considerat en el sistema estudiat. En l'estudi de l'aerogenerador només s'han considerat els elements principals d'aquest, és a dir, la turbina eòlica, la transmissió, i el generador, tots ells amb els seus respectius controls. Addicionalment, l'aerogenerador estudiat consta d'un convertidor *full-rated* per tal de transmetre tota la potència captada a la xarxa interna del parc eòlic.

La figura 4.6 mostra l'esquema de l'aerogenerador estudiat. Es poden observar les relacions entre les parts principals que formen l'aerogenerador i també les entrades del sistema.

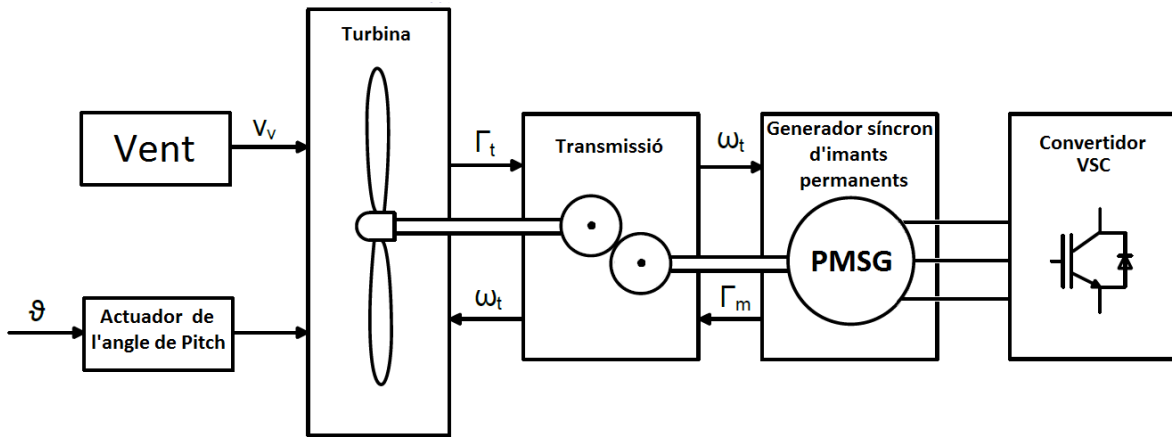


Figura 4.6: Esquema de l'aerogenerador  
Font: Pròpia

#### 4.1.1 Turbina

La turbina eòlica és la part de l'aerogenerador que transforma l'energia cinètica del vent en energia mecànica. Típicament una turbina consta d'un rotor i d'un número variable de pales que es troben unides al rotor.

La finalitat de les pales es cobrir una determinada àrea per a que el vent impacti sobre elles i captar així la seva energia cinètica. La força del vent mou aquestes pales i fa girar el rotor que, al seu torn, transmet el seu moviment per ser utilitzat en alguna aplicació concreta. El moviment del rotor de la turbina pot ser utilitzat en una gran varietat d'operacions com per exemple moldre, en els molins de vent, o generar energia elèctrica, als aerogeneradors.

Les turbines eòliques emprades als aerogeneradors normalment utilitzen tres pales i, a més, poden disposar de sistemes d'orientació de les pales i de la gòndola que allotja el rotor amb la finalitat de variar la captació de vent.

El funcionament detallat de la turbina eòlica estudiada, incloent les equacions que governen el seu comportament, s'explica a la secció 5.1.1.

#### 4.1.2 Transmissió

La transmissió, com el seu nom indica, transmet la velocitat de rotació de la turbina al rotor del generador elèctric. El tipus de transmissió no és únic i depèn del disseny de l'aerogenerador. Les transmissions més comuns són les següents:

- **Caixes de canvis amb estats múltiples:** Fins a finals dels anys 90, la majoria d'aerogeneradors empraven turbines que giraven a una única velocitat, de manera que les caixes de canvis amb estats múltiples eren molt utilitzades [22]. Al tenir diferents relacions, aquest tipus de transmissió permet variar la velocitat del rotor del generador segons es requereixi, però com a contrapartida, requereixen molt manteniment.

- **Transmissió directa:** A partir de 1991, alguns fabricants d'aerogeneradors van començar a fabricar aerogeneradors on la transmissió entre la turbina i el generador es feia de manera directa, és a dir, sense caixa de canvis [22]. La transmissió directa, més coneguda pel seu nom en anglès: *direct-drive*, fa que la velocitat de rotació de la turbina i la del generador siguin iguals. Els principals avantatges d'aquesta transmissió són que es redueix la probabilitat de fallida, en comparació amb una caixa de canvis amb estats múltiples, i que necessiten molt poc manteniment. Per contra, aquest tipus de transmissió requereix generadors més cars, degut a que han de generar molt de parell amb poca velocitat del rotor. Tot i això, aquests generadors són de gran utilitat als parcs eòlics marins, principalment, a causa del poc manteniment que necessiten.
- **Caixes de canvis amb relació única:** Les caixes de canvis amb relació única són una barreja dels dos sistemes esmentats anteriorment. La relació d'aquest tipus de transmissió acostuma a ser de 6 o més [22]. D'una banda aquest sistema de transmissió combina els inconvenients dels sistemes de transmissió directa i de les caixes de canvis degut a que requereix generadors similars als emprats en sistemes de transmissió directa però també necessita molt manteniment al tenir una caixa de canvis. D'altra banda, comparat amb els sistemes de transmissió directa, s'obté una millora significativa de l'eficiència del generador i, els generadors necessaris en aquesta transmissió són més econòmics [22].

A l'aerogenerador estudiat s'ha considerat que aquest no disposa d'una caixa de canvis i que, per tant, la transmissió entre turbina i generador és fa utilitzant una transmissió directa.

#### 4.1.3 Generador

El generador elèctric és l'element que transforma l'energia mecànica en energia elèctrica. En un aerogenerador, el generador obté l'energia mecànica de la transmissió i transmet l'energia elèctrica generada a un convertidor, en aquest cas un VSC.

El generador considerat en el present estudi és un generador síncron d'imants permanents, també conegut pel seu nom en anglès *permanent magnet synchronous generator* (PMSG).

Els PMSG són molt útils als parcs eòlics situats a alta mar degut a que tenen una baixa velocitat de rotació (aproximadament de 10 a 25 rpm) de manera que es poden connectar directament a la turbina, prescindint així d'una caixa de canvis i reduint el manteniment necessari. A més, al funcionar amb imants permanents, els PMSG no necessiten alimentar el rotor amb corrent, cosa que permet prescindir d'elements presents a altres tipus de generadors com ara les escombretes, reduint un cop més el manteniment, el pes del generador, i el cost d'aquest [19].

Un dels inconvenients dels generadors d'imants permanents és que, els dissenyats per treballar a potències molt grans i velocitats petites, esdevenen molt cars. Addicionalment, els generadors d'imants permanents, a diferència d'altres tipus de generadors, requereixen d'un convertidor *full-rated* per tal de connectar-se a la xarxa [22]. També cal mencionar que els materials utilitzats per fabricar els imants permanents són molt cars i encareixen els PMSG [1]. Un altre inconvenient dels imants permanents és que són molt sensibles a

la temperatura, de manera que s'ha de controlar la temperatura del rotor i fins i tot pot ser necessari un sistema de refrigeració [1].

En funció de com es col·loquin els imants permanents al rotor del PMSG es poden diferenciar diferents tipologies de rotor: els imants permanents poden estar muntats a la pròpia superfície del rotor o encastats a dintre seu (enterrats) [1]. Aquestes diferències en la col·locació dels imants fan variar les característiques del generador i el seu control.

Un generador d'imants superficials té la particularitat de que la inductància no depèn de la posició del rotor a cada instant, és a dir, es manté constant. En canvi a un generador amb els imants enterrats la inductància sí que depèn de la posició del rotor, però, aquests generadors també poden proporcionar més parell amb les mateixes característiques que un d'imants superficials [1].

## 4.2 Convertidors VSC

Els convertidors VSC estan formats per transistors, típicament IGBT, de manera que es pot controlar el tancament i l'obertura dels mateixos transistors, que actúen així com a interruptors controlats. Amb una tècnica de modulació adequada es poden controlar les potències activa i reactiva de manera independent [3].

Els convertidors VSC tenen la particularitat d'actuar com una font de tensió, d'aquí que s'anomenin *voltatge source converters*, de manera que el seu voltatge presenta sempre la mateixa polaritat a la banda de contínua i roman gairebé constant.

A la figura 4.7 s'observa l'esquema d'un convertidor VSC.

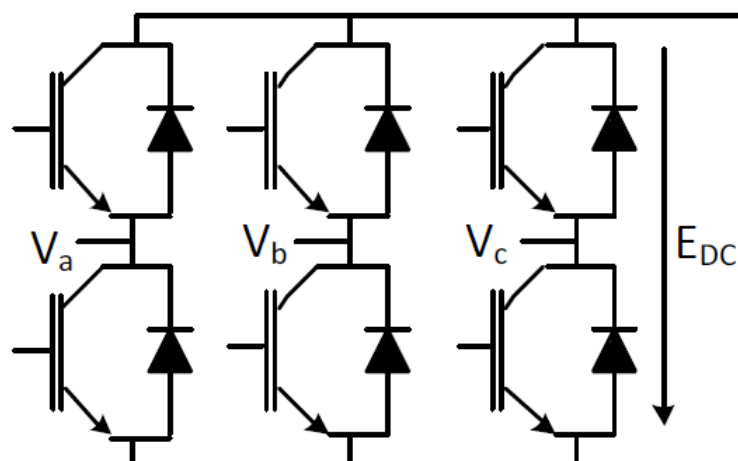


Figura 4.7: VSC amb dos IGBT per fase  
Font: Pròpia

Degut a la seva arquitectura, els convertidors VSC són bidireccionals en potència i corrent, és a dir, poden funcionar com a onduladors però també com a rectificadors.

El control de la commutació dels IGBT que formen els convertidors normalment es fa modulant el voltatge mitjançant *Sinusoidal Pulse-Width Modulation* (SPWM) tal i com s'explica a l'apèndix B.

#### 4.2.1 Back-to-Back

La configuració *back-to-back* és molt utilitzada per controlar la potència generada en els aerogeneradors. Aquesta configuració utilitza dos convertidors VSC: un connectat a la xarxa elèctrica i l'altre a la part de l'aerogenerador. Els convertidors estan connectats per la part de corrent continu, anomenada bus de corrent continu. Al bus de CC s'utilitzen condensadors per tal de mantenir una tensió pràcticament constant, garantint així l'equilibri de potències entre ambdós convertidors.

El principal avantatge d'una connexió *back-to-back* és el control absolut sobre les potències activa i reactiva. No obstant, al disposar de dos convertidors aquesta configuració també presenta molta més robustesa que altres sistemes CA/CA sense part intermitja de CC, com ara els cicloconvertidors [8].

Un esquema d'una connexió *back-to-back* s'observa a la figura 4.8.

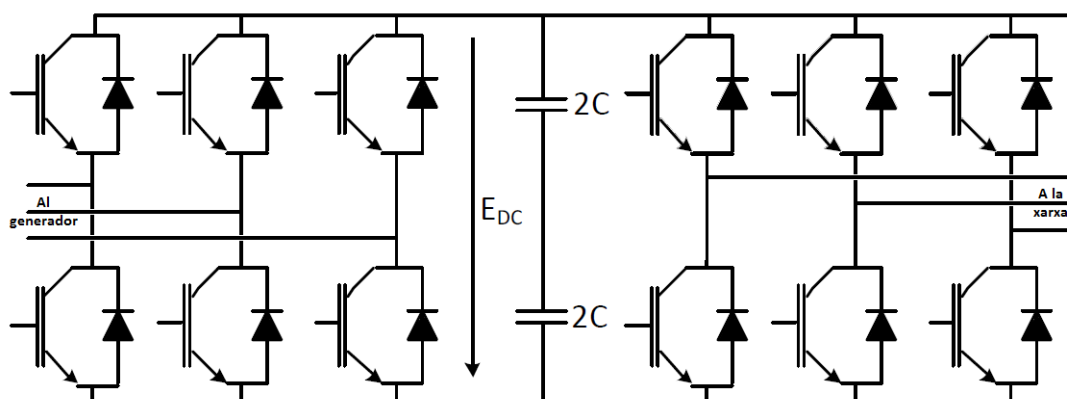


Figura 4.8: Connexió *back-to-back* bidireccional amb dos IGBT per fase  
Font: Pròpia

El funcionament del *back-to-back* al sistema estudiat és el següent:

El convertidor connectat a la xarxa elèctrica absorbeix la potència que li dona l'altre convertidor, actuant així com a ondulator. Aquest convertidor és l'encarregat de mantenir una tensió constant al bus de CC, subministrant potència quan la tensió  $E_{DC}$  baixa i absorbint-la quan es produeix un pic de tensió. Al poder controlar la potència activa i reactiva de manera independent, el convertidor pot generar la potència reactiva que necessiti la xarxa elèctrica a cada instant.

Hi ha diverses situacions on el convertidor ondulator no pot absorbir un excés de potència subministrada pel rectificador. Per solucionar aquesta problemàtica s'implementen sistemes addicionals com l'explicat a l'apartat 4.2.2 per tal de no malmetre els convertidors.

El convertidor connectat a la banda de l'aerogenerador és l'encarregat de controlar la velocitat de gir de l'aerogenerador i, amb això, la potència generada pel mateix. Hi ha diverses estratègies per controlar un aerogenerador però l'aplicada aquí s'explica a la secció 6.1. A més, aquest convertidor absorbeix la potència generada per l'aerogenerador i la transmet a l'altre convertidor, actuant així com a rectificador.

#### 4.2.2 *Chopper*

El *chopper* és un element que s'utilitza per dissipar potència quan el convertidor del costat de la xarxa elèctrica no pot absorbir tota la potència que li arriba del rectificador. Quan això passa, la tensió del bus de corrent continu augmenta de manera incontrolada, cosa que pot malmetre els convertidors. S'ha de reduir aquesta tensió fins al seu valor nominal per tal de garantir la integritat del sistema. El *chopper* també ha de dissipar potència quan, per exemple degut a les fluctuacions de la velocitat del vent, es generi un estat transitori que provoqui una sobretensió al bus de contínua [8].

Un *chopper* consisteix en un interruptor i una resistència connectats en sèrie. Al sistema estudiat aquest interruptor és un IGBT i es troba connectat a una resistència en sèrie tal i com s'observa a la figura 4.9. Aquest *chopper* es col·loca connectat en paral·lel amb els condensadors del bus de CC.

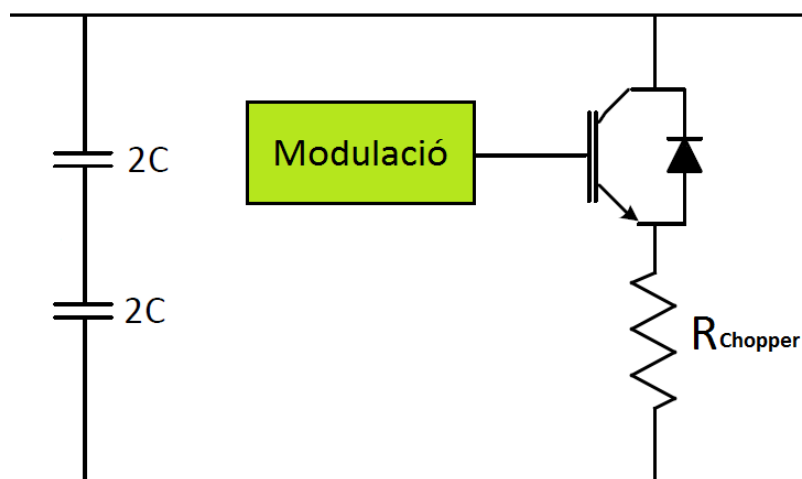


Figura 4.9: Esquema del *chopper*  
Font: Pròpia

El funcionament del *chopper* és el següent: quan la tensió al bus de CC és massa gran, el transistor IGBT s'activa i deixa passar corrent de manera que es dissipa potència a les resistències connectades en sèrie. Normalment l'IGBT no es manté activat quan ha de dissipar potència, simplement commuta a una determinada freqüència per tal d'obtenir l'efecte desitjat. La modulació d'aquest IGBT es du a terme mitjançant PWM.

### 4.3 Parcs eòlics

Un parc eòlic és una agrupació d'aerogeneradors, situats a una localització terrestre o marina, amb la finalitat de produir una gran quantitat d'energia elèctrica a partir del vent. Els parcs eòlics poden ser a una gran varietat d'emplaçaments però normalment estan situats allà on la velocitat del vent acostuma a ser alta i constant. En funció de les característiques de l'emplaçament del parc i del vent, el nombre d'aerogeneradors que conformaran el parc eòlic presentarà variacions.

Els parcs eòlics marins tenen la particularitat d'estar situats a alta mar, principalment degut a que allà les velocitats del vent són majors i permeten produir una major potència elèctrica. Un increment del 10% en la velocitat del vent incrementa, teòricament, un 30% la producció d'energia elèctrica [1]. No obstant, els parcs eòlics marins presenten alguns inconvenients respecte als parcs eòlics terrestres com ara la dificultat de realitzar el manteniment a les turbines i l'elevat cost d'instal·lació.

Als parcs eòlics estudiats, cada aerogenerador és controlat per dos convertidors VSC connectats en *back-to-back* tal i com es detalla a la secció 4.2. Cada aerogenerador disposa del seu propi transformador que eleva la tensió de l'energia elèctrica produïda abans d'injectar-la a la xarxa interna del parc eòlic, operació que té la finalitat de reduir les pèrdues a la xarxa interna del parc eòlic.

Quan l'energia elèctrica produïda per un dels aerogeneradors ha passat pel transformador, aquesta energia circula per un cable on s'uneix amb l'energia produïda pels altres aerogeneradors del parc. Aquest cable s'anomena línia i, en funció del disseny del parc eòlic, pot ser única o no. És a dir, pot existir una única línia que reculli l'energia produïda per tots els aerogeneradors o bé, en poden existir diverses, de manera que cada línia recollirà l'energia d'un cert nombre d'aerogeneradors.

A la sortida del parc eòlic, totes les línies, en el cas d'existir-ne més d'una, s'uneixen i injecten l'energia produïda a una estació transformadora HVDC. L'estació transformadora consta, principalment, de dos elements: un transformador i un convertidor HVDC. El transformador eleva un cop més la tensió al nivell requerit per la xarxa HVDC mentre que el convertidor és un VSC que rectifica el corrent i el transmet a la xarxa HVDC.

Aquest esquema és el mateix als dos parcs eòlic estudiats i es pot veure a la figura 4.3. Les úniques variacions entre els parcs estudiats són el número de línies i el número de turbines que hi ha a cada línia.



## 4.4 Xarxa HVDC

Anteriorment, al capítol 3, s'han exposat les característiques principals de la tecnologia HVDC. No obstant, dins de les transmissions HVDC existeixen diverses maneres de realitzar la connexió entre parcs eòlics marins i la xarxa alterna de la costa. Convé recordar que, tot i que s'incideixi molt en les connexions HVDC entre parcs eòlics marins i la xarxa de la costa, les connexions HVDC no només tenen aquesta utilitat.

### 4.4.1 Configuracions HVDC

En funció dels elements que formen una xarxa HVDC i de com es connectin entre ells, o dit d'una altra manera, en funció de la seva configuració, la xarxa HVDC serà d'un tipus o d'un altre. A continuació es detallen les configuracions més usuals de les xarxes HVDC:

- **Punt a punt:** Gran part dels parcs eòlics marins connectats amb transmissions HVDC utilitzen connexions punt a punt. Això vol dir que cada parc eòlic es connecta directament a una estació transformadora de la costa mitjançant una línia de corrent continu [12]. Dit d'una altra manera, una línia de corrent continu només enllaça dues estacions transformadores, en el sistema estudiat serien la del parc eòlic i la situada a la costa. La figura 4.10 il·lustra dues connexions punt a punt.
- **Multiterminal:** Una configuració multiterminal implica que més de dues estacions convertidores estan connectades a la mateixa xarxa de corrent continu, per exemple, dos parcs eòlics podrien estar connectats a la mateixa estació transformadora situada a la costa si s'utilitzés una configuració multiterminal. Una xarxa multiterminal es mostra a la figura 4.11.
- **Mallada:** Una xarxa mallada és un tipus especial de xarxa multiterminal. De la mateixa manera que en una configuració multiterminal, una xarxa mallada connecta tres o més estacions convertidores. La diferència és que aquesta configuració presenta més d'una connexió entre terminals, és a dir, el corrent pot circular des d'una estació convertidora a una altra per més d'un camí. Tenir més d'una connexió entre terminals augmenta la flexibilitat de la xarxa i la seva redundància, cosa especialment útil en cas de fallada, però, per contra, l'augment de connexions entre terminals també presenta certs inconvenients. Com que el corrent té més d'un camí per circular, aquest fluirà majoritàriament pel camí que presenti una menor resistència [5], cosa que pot causar sobrecàrregues, colls d'ampolla, pèrdues de potència i, fins i tot, la fallada del cable [4]. Els VSCs utilitzats a les xarxes VSC-HVDC poden controlar la potència que s'injecta o s'absorbeix a la xarxa HVDC però no poden controlar el corrent que circula pels cables de la xarxa. És per això que aquest tipus de configuració requereix dispositius addicionals per controlar l'energia que circula per les diferents línies; dispositius com ara els *current flow controllers* explicats a la secció 4.5. Un exemple de xarxa mallada es presenta a la figura 4.12.

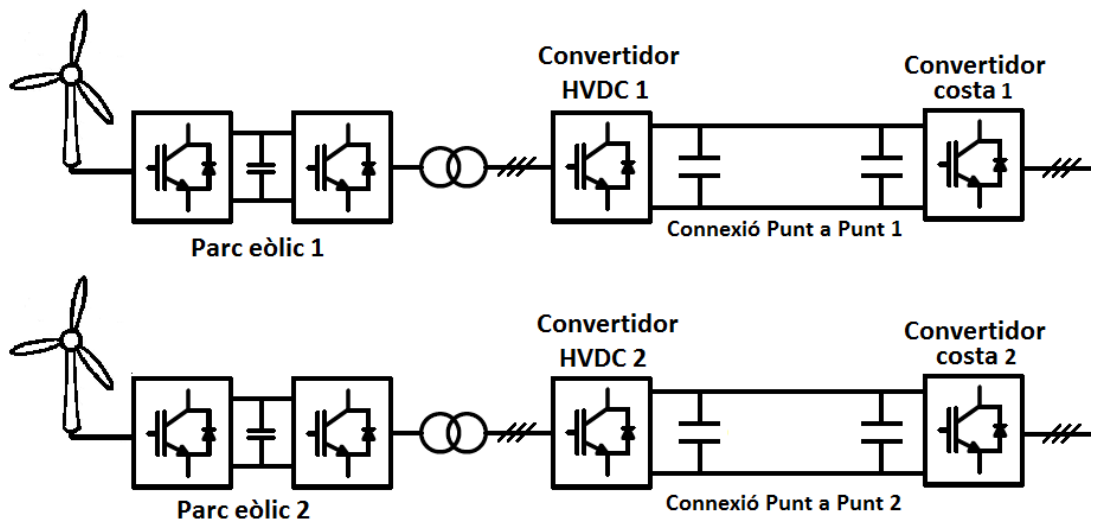


Figura 4.10: Configuracions Punt a Punt  
Font: Pròpia

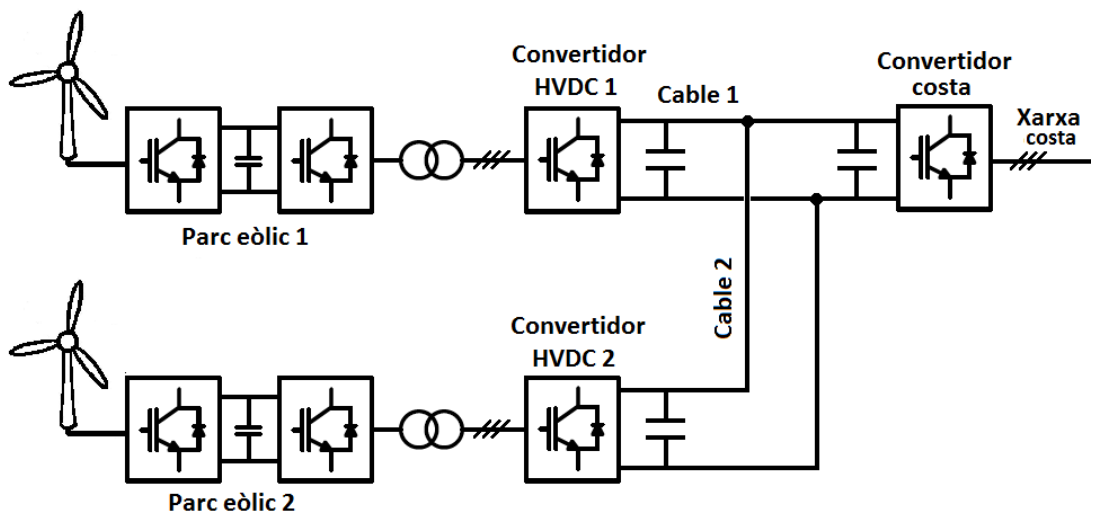


Figura 4.11: Configuració Multiterminal  
Font: Pròpia

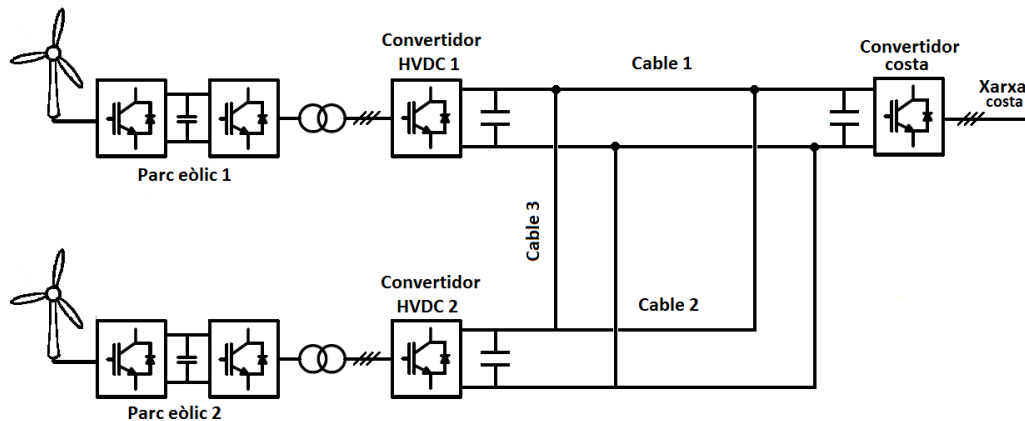


Figura 4.12: Configuració mallada

Font: Pròpia

La xarxa estudiada es tracta d'una xarxa mallada HVDC que connecta dos parcs eòlics marins amb l'estació transformadora de la costa, tal i com es mostra a les figures 4.4 i 4.12. Aquesta xarxa és relativament petita i senzilla, de manera que no hi hauria d'haver problemes de sobrecàrrega significatius si es dissenyés correctament. No obstant, al treballar amb xarxes mallades HVDC més grans, és habitual que es produeixi aquesta situació, especialment si s'uneixen petites i mitjanes xarxes HVDC construïdes a països i anys diferents, formant així una única xarxa HVDC més gran.

La xarxa HVDC considerada és la versió més simple d'una xarxa mallada, ja que només està formada per una única malla i tres estacions convertidores. El principal avantatge de treballar amb aquesta xarxa és que això permet estudiar i analitzar el comportament dels *current flow controllers* de manera més assequible.

## 4.5 Current flow controllers

Com s'ha introduït a la secció 4.4.1 els *current flow controllers* (CFC) són uns dispositius que permeten controlar el pas de corrent per un determinat cable. Els CFC tenen una especial importància a les xarxes mallades HVDC, on gestionar l'energia és un factor crucial per garantir el correcte funcionament de la xarxa.

Actualment, els *current flow controllers* són propostes teòriques fetes a la literatura científica i només s'han fabricat alguns prototips a petita escala. No obstant, tot i ser una tecnologia nova, existeixen diverses tipologies de CFCs [4] [21] [27]. Els CFCs estudiats es connecten només al pol positiu o al negatiu de la transmissió HVDC, de manera que no han de suportar l'elevada tensió nominal entre línies de la xarxa de corrent continu; els CFCs són, per tant, dispositius en sèrie. Per contra, per tal de garantir l'equilibri de potències, és necessita un *current flow controller* a cadascun dels pols de la xarxa.

Els *current flow controllers* basen el seu funcionament en la Llei d'Ohm, és a dir, com que la diferència de resistència entre cables acostuma a ser molt baixa, és possible variar molt el corrent que hi circula aplicant-hi una diferència de potencial d'uns pocs kV. En altres paraules, els *current flow controllers* fan variar la tensió als cables per tal de controlar la intensitat que hi circula.

Seguidament, s'expliquen els principis de disseny i funcionament d'algunes tipologies de *current flow controllers*. Concretament, es detallen els *current flow controllers* que funcionen utilitzant resistències variables, els que ho fan emprant convertidors CA/CC, i els que basen el seu funcionament en convertidors CC/CC. Tot i que al present treball no s'ha modelitzat cap *current flow controller* CC/CC, és útil explicar-los per tal de poder tenir idea global sobre l'estat actual de la tecnologia dels CFC.

#### 4.5.1 Resistència variable

Aquest tipus de *current flow controller* aconseguix variar la tensió a la línia afegint una resistència en sèrie amb el cable. En aplicar una resistència, la impedància a la línia augmenta i, per tant, el corrent que hi circula disminueix.

Un *current flow controller* d'aquest tipus està format principalment per una resistència connectada en paral·lel a dos interruptors IGBT, tal i com s'esquematitza a la figura 4.13.

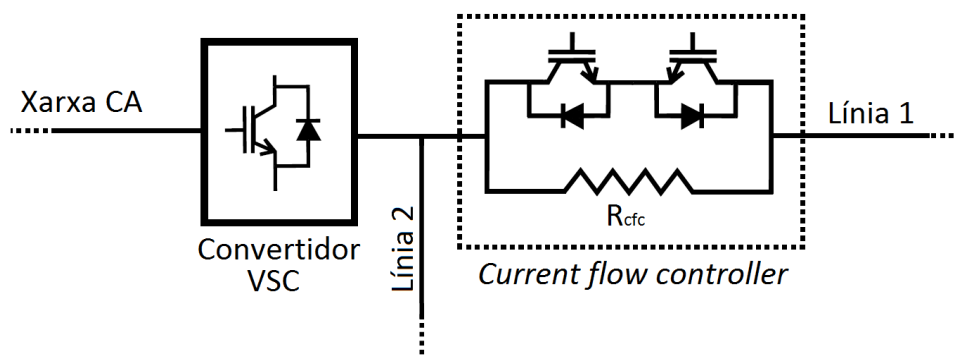


Figura 4.13: *Current flow controller* de resistència variable  
Font: Pròpia

El funcionament és el següent: els IGBTs commuten per tal de dirigir el corrent que passa pel *current flow controller*, si els IGBTs s'obren, el corrent passarà per la resistència però, si es tanquen, el corrent fluirà a través d'ells i no passarà per la resistència. D'aquesta manera, controlant la commutació dels IGBTs es controla la resistència que hi ha a la línia i, en conseqüència, el corrent que hi circula. Com que s'augmenta físicament la resistència d'un cable, tindria sentit situar els *current flow controllers* de resistència variable a aquelles línies que presenten una menor resistència.

Per a que el CFC sigui capaç de treballar amb corrents bidireccionals, es necessiten dos transistors IGBTs, un per a cada sentit del corrent. A més, per tal de mantenir el corrent i suavitzar l'impacte de les commutacions dels IGBTs, es pot incloure una petita inductància en sèrie amb la resistència del *current flow controller* [21].

Els principals avantatges d'un *current flow controller* de resistència variable són la seva senzillesa i facilitat d'implementació. Per contra, el principal inconvenient és que al augmentar físicament la resistència d'una línia també s'augmenten les pèrdues del sistema.

A més, els CFCs de resistència variable presenten un altre inconvenient important: mai podran augmentar el corrent a la línia on estan situats, només podran reduir-lo. Aquesta limitació de funcionament implica que, utilitzant un CFC de resistència variable, mai es podrà reduir el corrent d'una línia on el CFC no hi estigui situat. Això converteix als CFCs de resistència variable en els *current flow controllers* menys flexibles en comparació a la resta de CFCs estudiats.

#### 4.5.2 Convertidors CA/CC

Un convertidor CA/CC pot ser utilitzat com a *current flow controller*. El convertidor pot injectar potència de la xarxa d'alterna a la xarxa HVDC però també pot consumir-la, aplicant una tensió positiva o negativa segons convingui i controlant així el corrent que circula. Dit d'una altra manera, aquests CFC intercanvien potència entre la xarxa de corrent altern i la xarxa HVDC.

Aquests *current flow controllers* es connecten a la xarxa d'alterna mitjançant un transformador. La funció del transformador és, principalment, proveir al circuit d'un aïllament galvànic de protecció, cosa que representa un problema ja que el transformador ha de ser capaç de suportar tensions molt elevades [27]. La parc CC del convertidor es connecta a la línia de la xarxa HVDC on es vol controlar el flux de corrent. A diferència dels *current flow controllers* de resistència variable, els convertidors CA/CC no s'han de connectar necessàriament a la línia amb menor resistència. A la figura 4.14 s'esquematitzen les connexions d'un *current flow controller* d'aquest tipus.

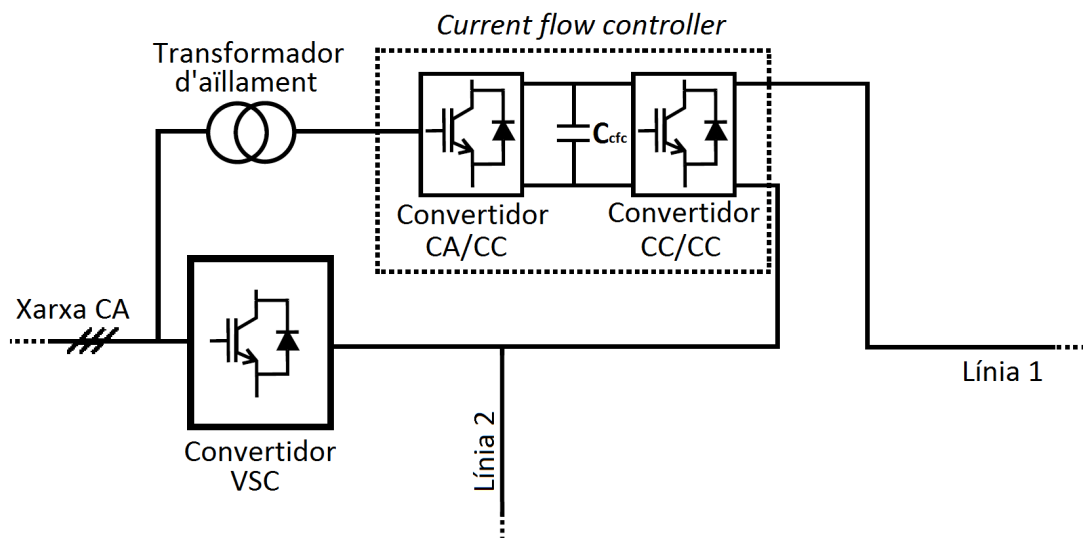


Figura 4.14: Esquema general i situació d'un *Current flow controller* CA/CC  
Font: Pròpia

Hi ha diversos tipus de *current flow controllers* que funcionen mitjançant convertidors CA/CC, per exemple, els *Thyristor power-flow controllers* (TPFC) funcionen utilitzant tiristors [27]. No obstant, en aquest estudi s'ha considerat que el convertidor CA/CC funciona commutant IGBTs, com els VSCs utilitzats als aerogeneradors.

El convertidor estudiat està format per un rectificador VSC connectat a un convertidor CC/CC mitjançant un bus de corrent continu. En conjunt, aquests dos convertidors actuen com si fossin un únic convertidor CA/CC, de la mateixa manera que els dos VSCs d'un *back-to-back* actuen com un convertidor CA/CA. La connexió a la xarxa alterna és fa utilitzant el VSC, que és anàleg als explicats anteriorment, i la connexió a la xarxa HVDC es fa utilitzant el convertidor CC/CC. El convertidor de corrent continu també funciona commutant IGBTs però només utilitza un total de quatre IGBTs. És habitual referir-se al convertidor CC/CC com el "Pont en H" ( *H-Bridge* ). De la mateixa manera que a les connexions *back-to-back*, el bus de corrent continu situat entre els dos convertidors serveix per assegurar l'equilibri de potències. Un esquema del *current flow controller* es pot observar a la figura 4.15.

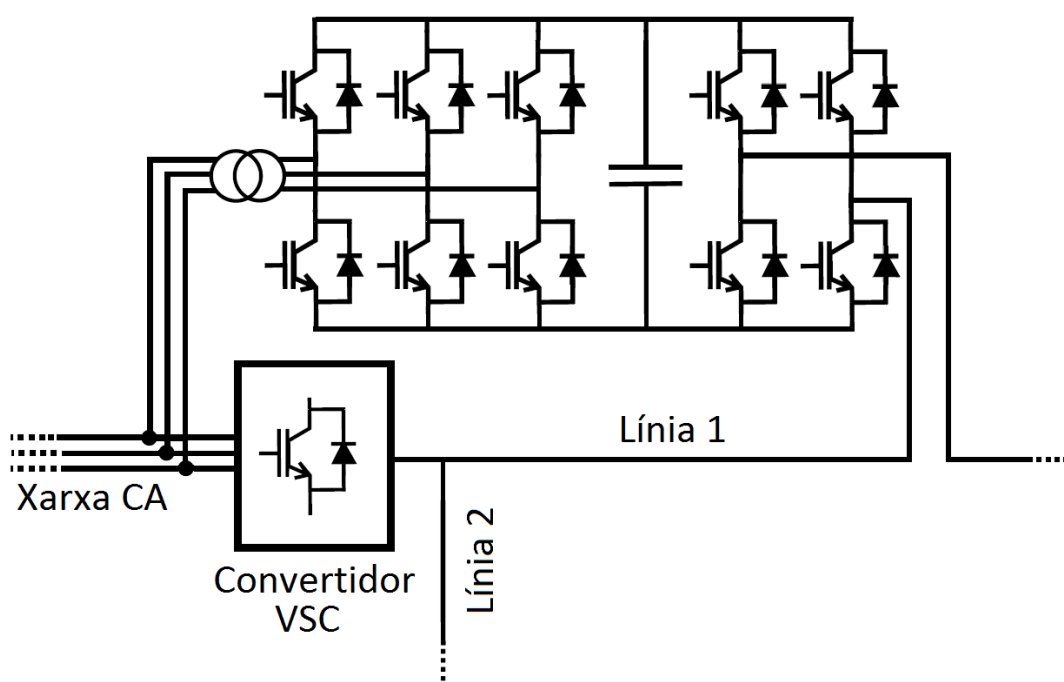


Figura 4.15: Esquema d'un *Current flow controller* CA/CC amb IGBTs  
Font: Pròpia

El funcionament d'aquest tipus de *current flow controller* és similar al dels *back-to-back*: el VSC connectat a la xarxa alterna s'encarrega de mantenir la tensió al bus constant, mentre que el Pont en H aplica una diferència de tensió a la xarxa per tal de regular el corrent que circula per la xarxa HVDC. Cal mencionar que la tensió que pot aplicar el CFC està limitada per la tensió del bus de CC situat entre el rectificador i el Pont en H [4].

Un dels avantatges d'aquests CFCs és que, a diferència dels CFCs de resistència variable, els CFCs convertidors CC/CA poden injectar una tensió negativa a la xarxa HVDC. D'aquesta manera, s'aconsegueix que circuli més corrent per una línia en concret i controlar així el pas de corrent a línies on no estigui situat el *current flow controller*. D'altra banda, alguns inconvenients d'aquests convertidors són les pèrdues produïdes al commutar els IGBT, la necessitat d'estar connectats a la xarxa d'alterna per poder funcionar i la necessitat d'un transformador d'aïllament.

### 4.5.3 Convertidors CC/CC

Els convertidors CC/CC, consumeixen o injecten potència de la xarxa HVDC a la mateixa xarxa HVDC, és a dir, a diferència dels *current flow controllers* CA/CC, no necessiten ni una xarxa de corrent altern per tal d'aplicar una tensió variable ni, en conseqüència, un transformador d'aïllament. Això es degut a que la tensió aplicada pels convertidors depèn únicament dels corrents a la xarxa HVDC.

El principi de funcionament d'aquests *current flow controllers* és que la potència extreta en una línia, s'injecta en una altra. Per realitzar aquesta operació el convertidor ha d'aplicar una tensió positiva en una línia, i negativa en una altra, cosa que causarà una variació del corrent que circula per ambdues línies. És per això que els CFC que utilitzen aquesta tecnologia s'acostumen a situar als punts on s'uneixen diverses línies de la xarxa HVDC, o dit d'una altra manera, als nodes de la xarxa.

Hi ha diverses tipologies de CFC basats en convertidors CC/CC però és habitual que els convertidors funcionin utilitzant IGBTs [20] [28] [29]. La figura 4.16 exposa un esquema d'un *current flow controller* CC/CC basat en dos Ponts en H.

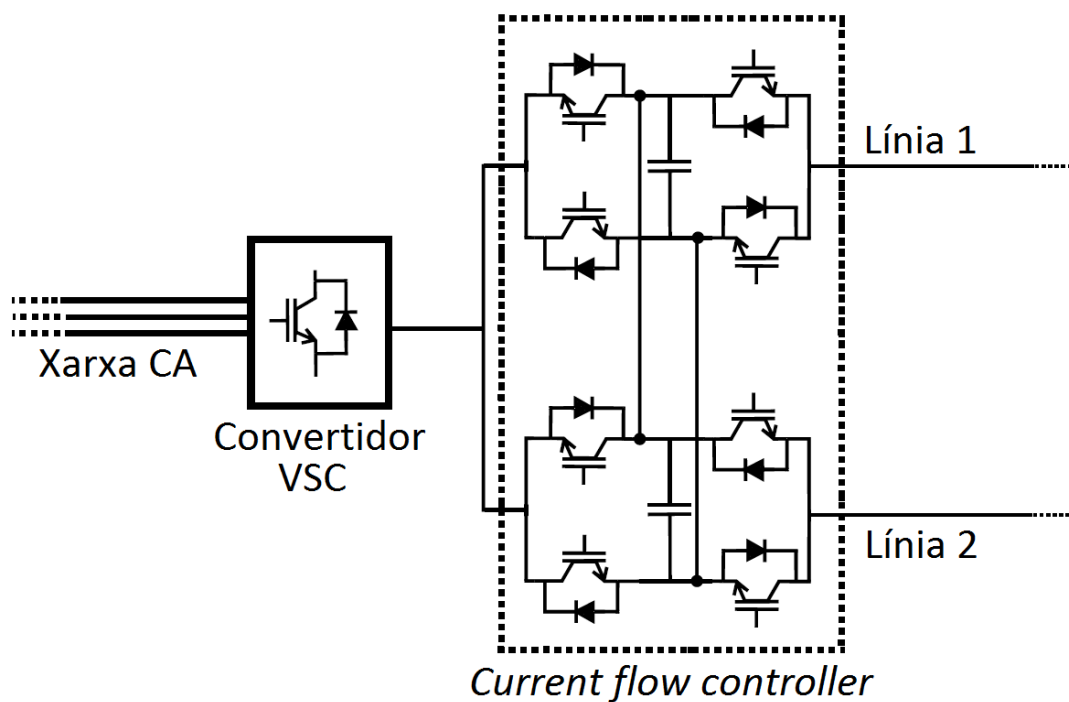


Figura 4.16: Esquema d'un *Current flow controller* CC/CC amb Ponts en H  
Font: Pròpia





# Capítol 5

## Modelització del sistema

En el present capítol es detallen els diferents models utilitzats per tal de simular els elements que conformen el sistema estudiat. Els models exposats són, per ordre, el model dels aerogeneradors i de tots els seus components; el model dels convertidors VSCs, del *back-to-back* i del *chopper*; el model dels parcs eòlics, el model de la xarxa mallada HVDC i, per últim, els models dels diferents tipus de *current flow controllers*.

Amb la finalitat d'analitzar el sistema d'una forma més ràpida, senzilla i assequible s'han utilitzat, majoritàriament, models ideals. Comparats amb els models reals, els models ideals consumeixen molts menys recursos quan es simulen. És cert que existeix una diferència entre els resultats que s'obtenen utilitzant models ideals o reals però, al present estudi, s'ha considerat que aquesta diferència no és significativa.

### 5.1 Model de l'aerogenerador

Amb l'objectiu de modelitzar l'aerogenerador, s'han modelitzat per separat els diferents que elements que el formen i, tot seguit, s'han unit entre ells com si es tractés d'un aerogenerador real.

Els diferents elements que formen l'aerogenerador s'han modelitzat utilitzant les equacions presentades al llarg de la present secció. Per exemple, per modelitzar la transmissió s'han introduït al SIMULINK tots els blocs necessaris per definir l'equació (5.4). Els elements que componen l'aerogenerador es detallen a la secció 4.1.

#### 5.1.1 Model de la turbina

Com s'ha introduït a la secció 4.1.1, la turbina eòlica és la part de l'aerogenerador que transforma l'energia cinètica del vent en energia mecànica. La potència captada per la turbina és calcula mitjançant la llei de Betz, que l'expressa com la potència de l'aire que travessa la superfície de les pales de la turbina multiplicada per un coeficient adimensional anomenat  $C_p$ . La llei de Betz es mostra a l'equació (5.1) [1].

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p \rho A v_v^3 \quad (5.1)$$

on:

$P_t$  és la potència captada per la turbina.

$P_v$  és la potència de l'aire que travessa la superfície de les pales de la turbina.

$\rho$  és la densitat de l'aire.

$A$  és l'àrea d'escombrat de les pales de la turbina.

$v_v$  és la velocitat mitjana del vent.

El coeficient  $C_p$  s'anomena coeficient de potència i es pot entendre com el rendiment aerodinàmic de la turbina. El seu valor depèn de les característiques constructives de la turbina, de la velocitat de rotació de la turbina, de la velocitat del vent i de l'angle de pas de les pales. El valor màxim de  $C_p$  es coneix amb el nom de límit de Betz i és 0,593.

La figura 5.1 mostra la relació entre la potència captada per la turbina, la velocitat de rotació de la turbina, i la velocitat del vent. Es pot observar que no es tracta d'una relació lineal i que, per a cada corba, existeix una velocitat òptima de gir per la turbina.

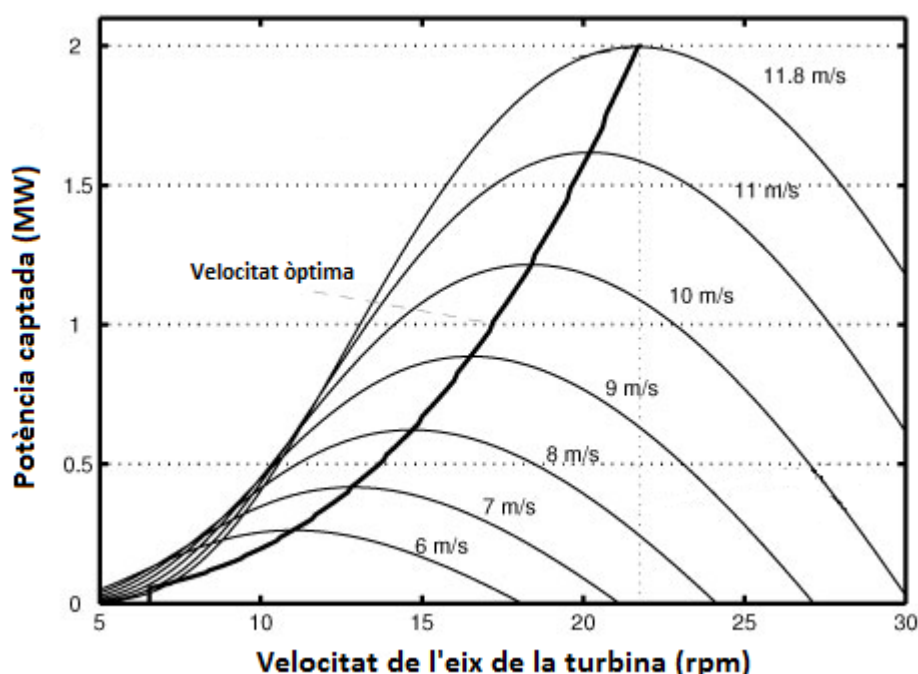


Figura 5.1: Relació entre potència i velocitat per diferents velocitats de vent

Font: <http://www.scielo.br/>

És molt comú fer dependre  $C_p$  només de dues variables: el *Tip-speed ratio* ( $\lambda$ ) i l'angle de pas de les pales, també anomenat angle de Pitch ( $\vartheta$ ) [1]. Seguidament es detallen aquestes variables:

- *Tip-speed ratio* ( $\lambda$ ): Relaciona la velocitat de rotació de la turbina amb la velocitat mitjana del vent. Es modelitza amb l'equació (5.2)
- Angle de Pitch ( $\vartheta$ ): És l'angle que formen les pales respecte el seu eix longitudinal. Un angle de Pitch de 0 vol dir que tot el vent impacta sobre tota la superfície de les pales, mentre que si s'augmenta l'angle la superfície de les pales disminuirà així com la potència captada per la turbina.

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v_v} \quad (5.2)$$

Per tal de modelitzar  $C_p$ , s'utilitzen les equacions (5.3) [1].

$$C_p(\lambda, \vartheta) = c_1 \left( c_2 \frac{1}{\Lambda} - c_3 \vartheta - c_4 \vartheta^{c_5} - c_6 \right) e^{-c_7 \frac{1}{\Lambda}} \quad (5.3a)$$

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + c_8 \vartheta} - \frac{c_9}{1 + \vartheta^3} \quad (5.3b)$$

Utilitzant les equacions (5.3) es pot representar com varia  $C_p$  en funció del *Tip-speed ratio* i de l'angle de Pitch. Aquesta relació es mostra a la figura 5.2, on també es pot observar que un angle de Pitch igual a 0 implica una major  $C_p$  i, per tant, una major potència captada.

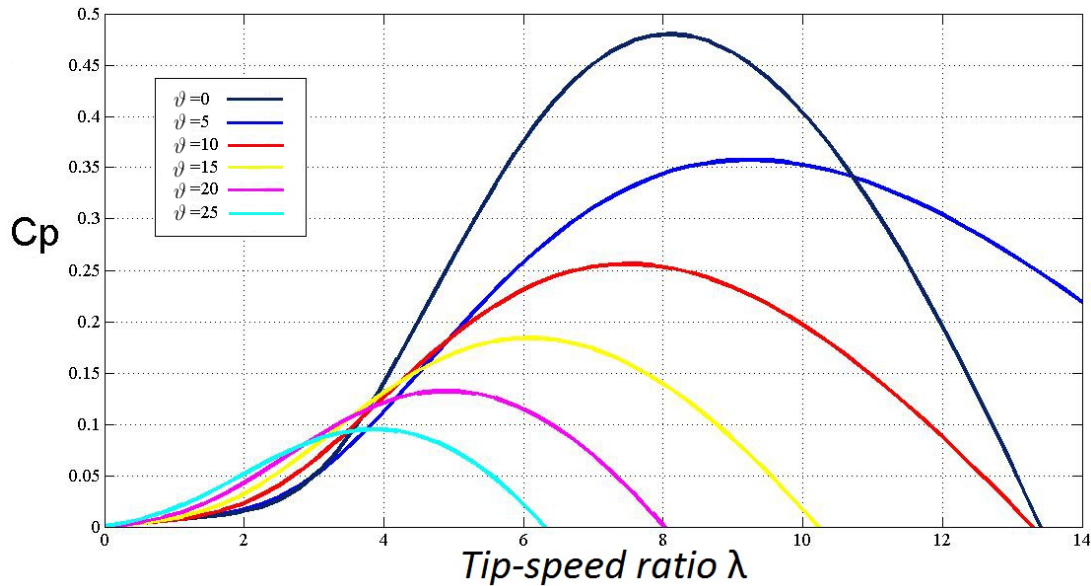


Figura 5.2: Relació entre  $C_p$  i el *Tip-speed ratio* en funció de l'angle de Pitch.

Font: [19]

### 5.1.2 Model de la transmissió

En l'estudi realitzat, s'ha considerat que la transmissió és del tipus directa. També s'ha negligit la dinàmica de l'eix per tal de simplificar els càlculs. L'equació que descriu el comportament de la transmissió és (5.4).

$$\Gamma_t - \Gamma_m = J_{red} \frac{d}{dt} \omega_t \quad (5.4)$$

on:

$\Gamma_t$  és el parell de la turbina eòlica.

$\Gamma_m$  és el parell del generador d'imants permanents.

$J_{red}$  és el conjunt d'inèrcies reduïdes a la turbina.

$\omega_t$  és la velocitat angular del rotor.

### 5.1.3 Model del generador

Amb l'objectiu de simplificar la modelització del PMSG, es suposa que el generador és d'imants superficials i que les fases estan equilibrades. L'equilibri entre les fases implica que la suma de corrents  $abc$  serà 0, però també ho serà el corrent de la seqüència 0 en referència  $qd0$ , de manera que només caldrà estudiar  $qd$ . La referència estacionària  $qd0$ , i la seva relació amb la referència  $abc$ , s'explica a l'apèndix A.

Seguint les consideracions anteriors, les equacions que governen el comportament del generador en referència  $qd0$  són (5.5). Al realitzar la transformada  $qd0$ , s'agafa com a angle la posició del rotor.

$$\begin{bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & \omega_t p l_s \\ -\omega_t p l_s & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 \\ 0 & l_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix} + \lambda_m p \omega_t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

on,

$v_s$  és el voltatge de l'estator.

$i_s$  és el corrent de l'estator.

$r_s$  és la resistència de l'estator.

$l_s$  és la inductància total del generador.

$\lambda_m$  és el flux concatenat del generador.

$\omega_t$  és la velocitat angular del rotor.

$p$  són els parells del pols del generador.

El generador es modelitza utilitzant les equacions (5.5) que defineixen el seu comportament, però aquestes equacions no s'han utilitzat de la forma presentada anteriorment. Això es degut a que s'ha modelitzat el PMSG com un bloc el qual a partir d'unes tensions genera uns corrents, tot expressat en referència  $qd0$ . Les equacions utilitzades s'obtenen aïllant els corrents de (5.5) i negligint el terme del transitori. Aquestes equacions només corresponen a l'estat estacionari i es presenten a (5.6).

$$\begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & \omega_t p l_s \\ -\omega_t p l_s & r_s \end{bmatrix}^{-1} \left( \begin{bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \end{bmatrix} - \lambda_m p \omega_t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (5.6)$$

Finalment, el parell del generador d'imants permanents s'expressa com (5.7).

$$\Gamma_m = \frac{3}{2} p \lambda_m i_{sq} \quad (5.7)$$

## 5.2 Model dels VSCs

Un convertidor VSC es pot sintetitzar com la unió de dues fonts de diferent naturalesa: una font de corrent constant a la banda de CC i tres fonts de tensió a la banda de CA [11]. Utilitzant aquesta modelització es poden desacoblar les parts de CC i de CA del convertidor com es mostra a la figura 5.3. No obstant, aquest model és un model ideal i els resultats que se n'extreuen varien lleugerament dels que s'obtenen amb un model més fidel a la realitat.

Per tal de connectar el convertidor a xarxes externes cal afegir elements d'acoblament per no tenir fonts del mateix tipus enllaçades. Per exemple si volem connectar el convertidor

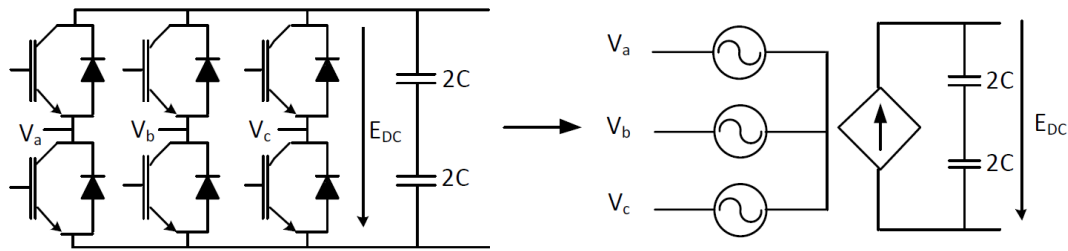


Figura 5.3: Model ideal d'un convertidor VSC

Font: [11]

a una xarxa elèctrica de corrent altern, modelitzaríem cada fase de la xarxa com una font de tensió alterna però l'hauríem de connectar a la part de CA del convertidor també modelitzada de la mateixa manera, aquestes dues fonts no es podrien connectar entre elles ja que es produiria un curtcircuit.

Per evitar aquestes situacions a la part de CA s'afegeixen inductàncies i a la part de CC s'afegeix un condensador. Les inductàncies de la part de corrent altern fan que cada fase de la xarxa alterna es transformi en una font de corrent mentre que, el condensador de la banda de corrent continu, assegura que el bus de contínua es comporti com una font de tensió tal i com passa realment als convertidors VSC. El model del convertidor amb els seus acoblaments corresponents es mostra a la figura 5.4.

El model ideal del VSC que finalment s'ha utilitzat és idèntic al de la figura 5.4 però amb resistències a cada fase entre la xarxa i el convertidor. Aquestes resistències que tenen la finalitat de simular les pèrdues que es produeixen als cables.

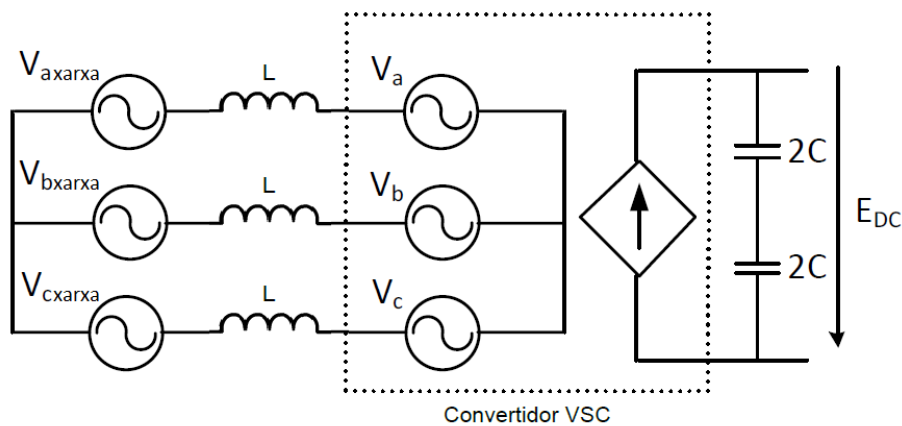


Figura 5.4: Model ideal del VSC amb acoblament entre xarxes

Font: Pròpia

Les dues bandes del convertidor, CC i CA, es relacionen garantint l'equilibri de potències, és a dir, tota la potència que subministra el costat de CC s'injecta a la banda de CA, i viceversa. Les potències de les dues bandes es relacionen definint la intensitat de la part de corrent continu amb l'equació (5.8).

$$I_{DC} = \frac{P_{AC}}{E_{DC}} \tag{5.8}$$

on:

$P_{AC}$  és la potència a la banda de corrent altern del convertidor.

$E_{DC}$  és el voltatge fix del bus de CC.

$I_{DC}$  és la intensitat de la font de corrent de la banda de CC del convertidor.

Emprant aquest model es negligeixen les pèrdues degudes a la commutació del interruptors al propi convertidor. Aquestes pèrdues sí que quedarien reflectides modelitzant el convertidor amb transistors IGBT.

### 5.2.1 Model del chopper

Degut a la naturalesa del funcionament del *chopper*, un *chopper* ideal es pot modelitzar com una font de corrent controlada. Quan l'interruptor del *chopper* es tanca, permet el pas de corrent per una resistència tal i com s'explica a 4.2.2. Si es modelitza l'interruptor de potència i la resistència com una font de corrent que controla el pas de corrent segons les demandes del sistema, s'aconsegueix un model prou acurat.

Per controlar la quantitat de corrent que passa per la font s'estableix un límit superior ( $E_{max}$ ) i un límit inferior ( $E_{min}$ ) per la tensió del bus de CC. Quan la tensió es troba per sota del valor mínim, el *chopper* no actua. En canvi quan la tensió del bus és per sobre del valor màxim, pel *chopper* circula la màxima intensitat possible. Així es pot definir un *duty cycle* pel *chopper* com es mostra a l'equació (5.9).

$$D = \frac{E_{DC} - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \quad (5.9)$$

on:

$D$  és el *duty cycle*. Es limita a un valor entre 0 i 1.

$E_{DC}$  és la tensió nominal del bus de corrent continu.

$E_{max}$  és la tensió a partir de la qual el *chopper* ha de dissipar la màxima potència.

$E_{min}$  és la tensió a partir de la qual s'ha d'activar el *chopper*.

Amb la resistència del *chopper* podem calcular la intensitat que hi circularà en funció de la tensió al bus de CC a cada instant mitjançant la Llei d'Ohm. El propi funcionament del *chopper* obrirà o tancarà el circuit en funció de les necessitats del sistema, de manera que no sempre circularà intensitat per la branca del *chopper* [8]. El control de la intensitat que circularà es fa multiplicant pel *duty cycle* (5.9) la intensitat obtinguda amb la Llei d'Ohm. El resultat d'aquestes operacions es pot veure a l'equació (5.10).

$$I_{chopper} = D \frac{E_{DC}}{R_{chopper}} \quad (5.10)$$

Convé mencionar que el *chopper* sempre es situa en paral·lel als condensadors a la part de CC. Un esquema de la modelització del *chopper* ideal es pot veure a la figura 5.5.

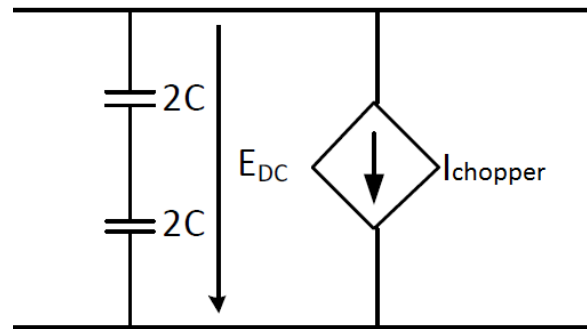


Figura 5.5: Esquema del model ideal del *chopper*  
Font: Pròpia

### 5.3 Model dels parcs eòlics

Els parcs eòlics consten de quatre grans elements a modelitzar: els aerogeneradors, els transformadors, les línies internes del parc i, el convertidor HVDC.

En relació amb els aerogeneradors, es consideren dos generadors, un per cada parc eòlic, amb els seus respectius generadors PMSG i *back-to-backs*. Per tal de simplificar el model, els dos aerogeneradors es modelitzen de forma idèntica. Seguint la hipòtesi de que tots els aerogeneradors del parc eòlic tenen les mateixes característiques constructives i reben la mateixa potència del vent, s'extrapola el comportament dels aerogeneradors modelitzats a la resta d'aerogeneradors del corresponent parc. Dit d'una altra manera, a cada parc eòlic es modelitza un únic aerogenerador, però es considera que la resta d'aerogeneradors del parc es comporten igual.

Per tal de modelitzar els transformadors, s'han considerat que aquests són ideals, és a dir, que no presenten pèrdues de cap mena. Aquests transformadors s'han implementat al programari MATLAB SIMULINK utilitzant el bloc anomenat *Three-Phase Transformer 12 Terminals*.

Pel que fa a les línies internes del parc eòlics, només es té en compte la resistència i la inductància dels cables. Aquests paràmetres dependran de les característiques físiques de cable, com per exemple la longitud, però s'han modelitzat en un punt concret com si es tractessin de resistors i bobines.

Com s'ha explicat a la secció 4.3, cada grup  $n_{lin}$  d'aerogeneradors es connecten a conductors que els enllacen amb el transformador HVDC. Al transformador HVDC hi arriben  $m_{lin}$  conductors de corrent altern, cadascun dels quals transporta la potència generada per  $n_{lin}$  aerogeneradors. És necessari subratllar que els conductors que formen la xarxa interna dels parcs eòlics són cables trifàsics. Seguint aquestes consideracions, la potència total d'un parc eòlic es pot expressar com (5.11).

$$P_{parc} = P_t n_{lin} m_{lin} \quad (5.11)$$

Finalment, el transformador HVDC transmet la potència al convertidor HVDC que, al seu torn, la transmet a la xarxa HVDC. El convertidor és un VSC i en conseqüència es modelitza de forma anàloga a l'exposada a la secció 5.2.

## 5.4 Model de la xarxa HVDC

La xarxa HVDC modelitzada és una xarxa mallada que uneix dos parcs eòlics amb una única estació convertidora a la costa. En el model, la xarxa consta de tres línies amb les seves respectives impedàncies. Cada línia està formada per dos cables, el pol positiu i el negatiu, que estan units per condensadors als punts on hi ha estacions convertidores.

Per modelitzar les línies, únicament s'han considerat la resistència i la inductància dels cables. A més, a una mateixa línia els dos cables que la formen tindran un comportament simètric, és a dir, les tensions i corrents que hi hagin a als cables seran iguals però de signe oposat. És per això que es modelitza només la meitat de la xarxa HVDC o, dit d'una altra manera, només es considera un cable per línia; això també s'anomena considerar la meitat d'un *symmetrical monopole*. Un esquema de la xarxa modelitzada es pot veure a la figura 4.4 mentre que el model, sense els condensadors, s'observa a la figura 5.6.

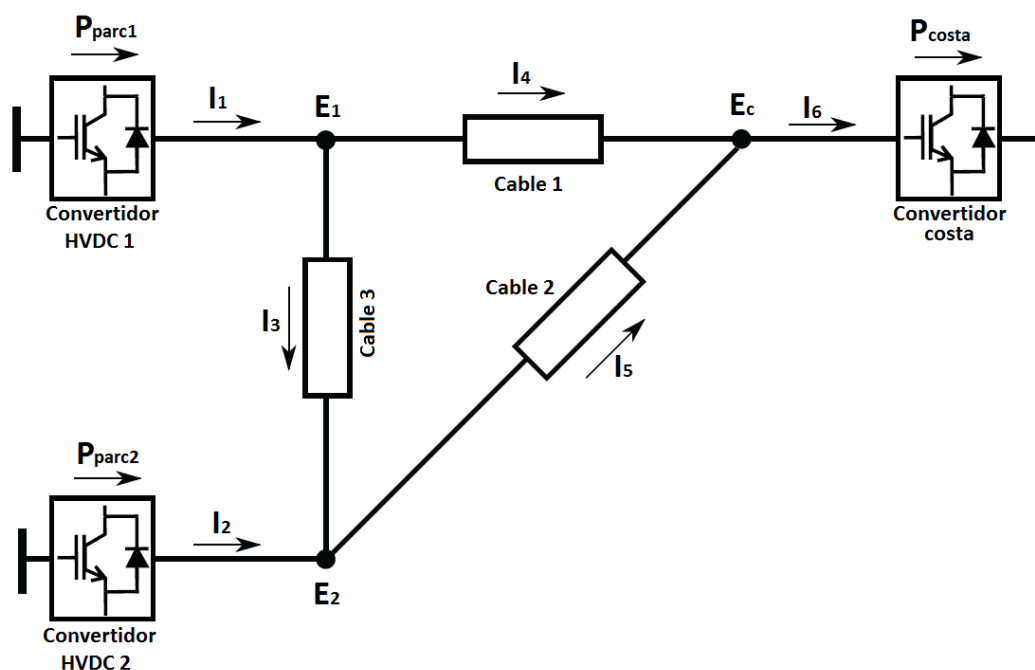


Figura 5.6: Model de la xarxa HVDC

Font: Pròpia

Per tal de modelitzar la meitat de la xarxa, és modelitza el pol positiu amb la seva respectiva impedància i s'uneixen tots punts dels pols negatius com si fossin punts equipotencials. A més, utilitzar aquesta modelització implica que els condensadors de la xarxa únicament suportaran la meitat de la tensió de la xarxa HVDC. Per simular correctament la xarxa modelitzada, cal adaptar el valor que s'injecta a la meitat de la xarxa HVDC al valor que s'injectaria a una xarxa HVDC completa; concretament s'injectarà la meitat de la potència subministrada per les estacions convertidores.



El principal avantatge de simular la meitat de la xarxa és que permet simplificar molt l'anàlisi del sistema al introduir els *current flow controllers* ja que només caldrà modelitzar un únic *current flow controller*.

### 5.5 Model del current flow controller

Com s'ha mencionat anteriorment, al present treball s'ha modelitzat únicament la meitat de la xarxa HVDC, cosa que permet modelitzar un únic *current flow controller*. Si s'hagués modelitzat la xarxa sencera, en una mateixa línia seria necessari utilitzar un *current flow controller* a cada cable per tal de garantir l'equilibri de potències.

Seguint aquesta premissa, s'han modelitzat tres tipologies de *current flow controllers*: un CFC ideal, un *current flow controller* de resistència variable i un CFC convertidor CA/CC.

Convé recalcar que tots els *current flow controllers* s'han situat al cable 1 del model, com es pot consultar a la figura 5.7a). Així mateix, el *current flow controller* convertidor CA/CC també s'ha situat al cable 2 del model, tal i com s'observa a la figura 5.7b). Aquesta localització addicional del *current flow controller* convertidor CA/CC s'ha escollit per tal d'estudiar les diferències de control i comportament del CFC en funció del seu emplaçament.

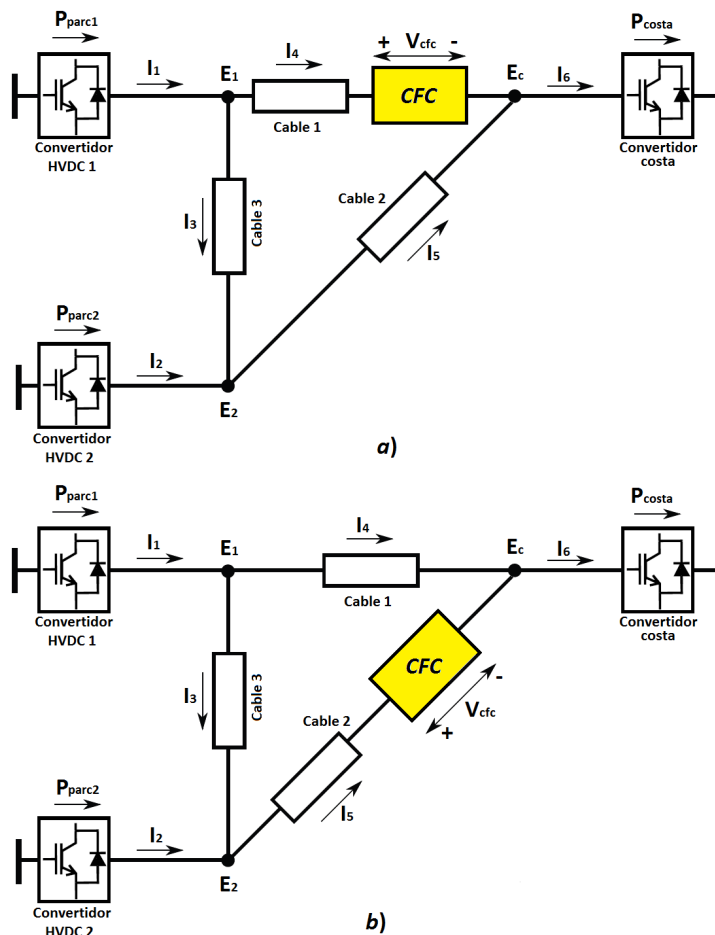


Figura 5.7: Emplaçament del *current flow controller*  
Font: Pròpia

### 5.5.1 Model del current flow controller ideal

Un CFC es pot modelitzar com una font de tensió controlada. Al tractar-se d'un model ideal, el *current flow controller* es capaç de variar el corrent exactament fins al valor que es desitgi a cada instant, és a dir, a diferència d'altres tipus de *current flow controllers*, no presenta limitacions constructives.

Un *current flow controller* ideal fa variar els corrents que circulen per les línies introduint tensions en sèrie amb el cable on està situat. Si a una línia s'augmenta la diferència de tensió, el corrent que hi circularà serà menor, en canvi si es crea una diferència de tensió negativa, el corrent que hi circularà serà major. S'ha de tenir en compte que causar una disminució de corrent a un cable farà que s'incrementi el corrent que circula per un altre sempre i quan es mantingui la potència injectada a la xarxa HVDC.

El model ideal del *current flow controller* es pot observar a la figura 5.8

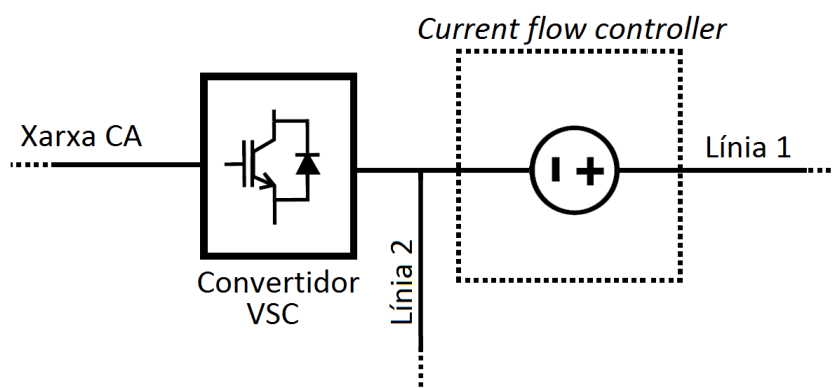


Figura 5.8: Model ideal del *current flow controller*

Font: Pròpia

### 5.5.2 Model del current flow controller de resistència variable

Per modelitzar el *current flow controller* de resistència variable s'ha utilitzat un model real, és a dir, el CFC s'ha modelitzat incloent al model tots els elements detallats a la secció 4.5.1 a excepció de la inductància. Aquest model es mostra a la figura 4.13.

No obstant, l'elecció de la resistència del *current flow controller* ( $R_{cfc}$ ) té un paper molt important en la modelització. D'una banda, una resistència molt gran permetrà limitar més el corrent però també farà augmentar les pèrdues, d'altra banda, una resistència molt petita causarà unes pèrdues menors al sistema però no podrà limitar tant el corrent. És per això que el valor de la resistència és un dels factors clau al moment de dissenyar aquest tipus de *current flow controllers*.

Per tal d'escollir la resistència, s'ha realitzat un estudi de la xarxa mallada utilitzant la nomenclatura i el conveni de signes mostrats a la figura 5.6. Per simplificar aquest estudi no es consideren inductàncies a les línies i, a més, les potències subministrades pels parcs eòlics s'expressen utilitzant les equacions (5.12).

$$P_{\text{parc1}} = I_1 E_c \quad (5.12a)$$

$$P_{\text{parc2}} = I_2 E_c \quad (5.12b)$$

Adicionalment, es considera que la resistència total que hi haurà al cable 1 vindrà donada per l'equació (5.13).

$$R_{\text{cable1}} = R_1 + R_{\text{cfc}} \quad (5.13)$$

on:

$R_1$  és la resistència intrínseca del cable 1.

$R_{\text{cfc}}$  és la resistència del *current flow controller*.

Per veure com afectarà el *current flow controller* al corrent, s'ha d'expressar el corrent del cable 1 en funció de  $P_{\text{parc1}}$ ,  $P_{\text{parc2}}$ ,  $E_c$ , i  $R_{\text{cfc}}$ . Per tal d'obtenir aquesta expressió, primer s'utilitza la segona llei de Kirchoff i s'obté l'equació (5.14).

$$I_4(R_1 + R_{\text{cfc}}) = I_3 R_3 + I_5 + R_2 \quad (5.14)$$

on:

$R_2$  és la resistència del cable 2.

$R_3$  és la resistència del cable 3.

Seguidament, s'empra la primera llei de Kirchoff per trobar relacions entre intensitats i s'utilitza l'equació (5.12) per expressar-les en funció de les potències. D'aquesta manera s'obtenen les equacions (5.15).

$$I_3 = I_1 - I_4 = \frac{P_{\text{parc1}}}{E_c} - I_4 \quad (5.15a)$$

$$I_5 = I_6 - I_4 = \frac{P_{\text{parc1}} + P_{\text{parc2}}}{E_c} - I_4 \quad (5.15b)$$

Finalment, es substitueixen els corrents de (5.14) per les expressions de (5.15) i s'aïlla  $I_4$ . El resultat d'aquestes operacions és l'equació (5.16).

$$I_4 = \frac{P_{\text{parc1}}(R_2 + R_3) + P_{\text{parc2}}R_2}{E_c(R_1 + R_{\text{cfc}} + R_2 + R_3)} \quad (5.16)$$

Utilitzant l'equació (5.16) es pot expressar el corrent que circularà pel cable 1 en funció de la resistència que apliqui el *current flow controller*. Aquesta relació, considerant diferents valors de tensió a la xarxa HVDC i la potència màxima dels parcs eòlics, es mostra a la figura 5.9.

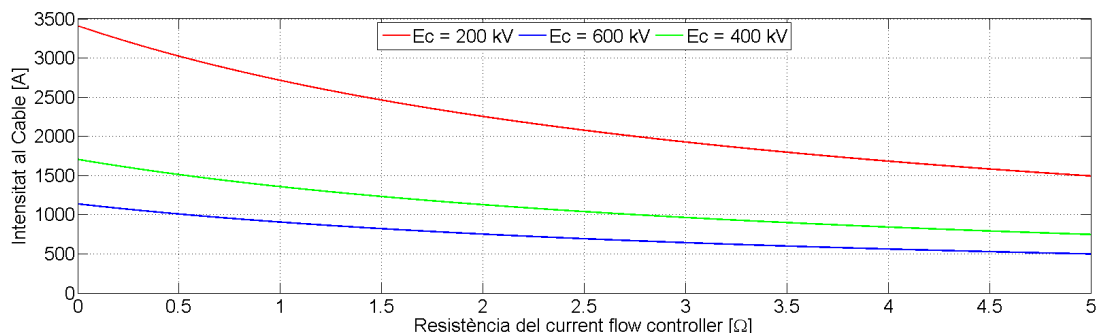


Figura 5.9: Relació entre la intensitat del cable i la resistència del *current flow controller*  
Font: Pròpia

El funcionament del *current flow controller* farà que s'apliqui una resistència entre 0 i  $R_{cfc}$ , de manera que l'elecció d'una resistència determinarà el corrent mínim que circularà pel cable segons la figura 5.9. A tall d'exemple, si es considera que la intensitat nominal dels cables és de 1500 A i es vol que hi circuli un corrent mínim igual al nominal, a una xarxa HVDC de 600 kV no seria necessari un CFC, a una xarxa de 200 kV es requeriria una resistència molt elevada, concretament de 4,96  $\Omega$ , i a una xarxa de 400 kV seria necessària una resistència de 0,53  $\Omega$ .

### 5.5.3 Model del *current flow controller* convertidor CA/CC

Tal i com s'ha explicat a la secció 4.5.2, aquest tipus de *current flow controller* està format per un transformador d'aïllament i un convertidor VSC connectat a un convertidor CC/CC, mitjançant un bus de corrent continu. En conjunt tots aquests elements actuen com un únic convertidor CA/CC.

El transformador d'aïllament no s'ha modelitzat directament. S'ha modelitzat una xarxa alterna totalment separada de la costa però amb la tensió que tindria el corrent de la costa si passés per un transformador d'aïllament real. Aquesta xarxa s'ha modelitzat utilitzant tres fonts de tensió ideals i, a més, s'ha considerat una impedància d'acoblament al transformador.

Per modelitzar el convertidor VSC s'ha considerat un model ideal anàleg a l'explicat a la secció 5.2. En canvi, el Pont en H s'ha modelitzat utilitzant un model real, és a dir, considerant els 4 IGBT amb els seus respectius díodes. El model utilitzat es mostra a la figura 5.10.

Convé subratllar que la tensió que pot aplicar el *current flow controller* es troba limitada pel seu bus de corrent continu. Conseqüentment, no sempre es podrà aconseguir que el corrent que circula sigui igual al desitjat. El rang de valors de la tensió aplicada pel CFC s'expressa a (5.17) [4].

$$- E_{cfc} \leq V_{cfc} \leq E_{cfc} \quad (5.17)$$

on:

$E_{cfc}$  és la tensió al bus de corrent continu del *current flow controller*.

$V_{cfc}$  és la tensió aplicada pel *current flow controller* a la xarxa HVDC.

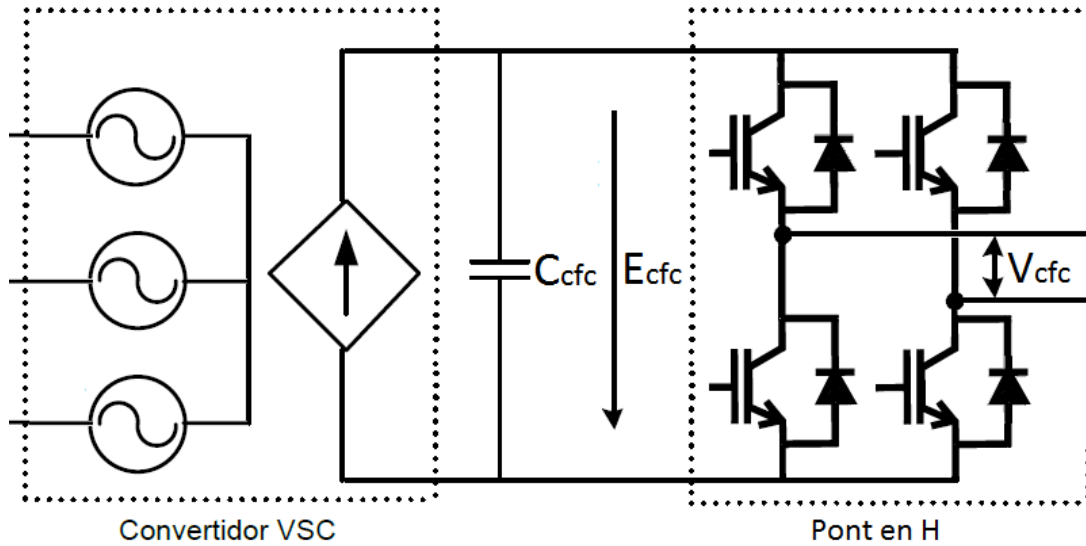


Figura 5.10: Model del *current flow controller* convertidor CA/CC  
 Font: Pròpia



# Capítol 6

## Control del sistema

En el present capítol es presenten les estratègies de control pels diferents elements modelitzats. A les seccions 6.1 i 6.2 s'explica el control dels convertidors VSCs dels aerogeneradors. Seguidament, a la secció 6.3 es detalla el control dels diferents convertidors HVDC. Finalment s'exposa el control dels diferents tipus de *current flow controllers* a la secció 6.4.

No obstant, l'explicació del control del *chopper* és relativament breu i senzilla, per tant, aquesta es detalla conjuntament amb la seva modelització a la secció 5.2.1.

### 6.1 Control del VSC a la banda de l'aerogenerador

El control del VSC de la banda de l'aerogenerador permet controlar la velocitat de gir del PMSG. Al seu torn, la velocitat de gir del PMSG està relacionada amb la velocitat de gir de la turbina eòlica mitjançant la transmissió, per tant, controlant la velocitat de gir del PMSG es pot controlar la velocitat de gir de la turbina.

Tal i com s'explica a la secció 4.1.1, controlar la velocitat de gir de la turbina permet a la turbina captar la potència màxima per diferents velocitats del vent. La figura 5.1 mostra la relació entre la velocitat de gir de la turbina, la velocitat del vent i la potència captada.

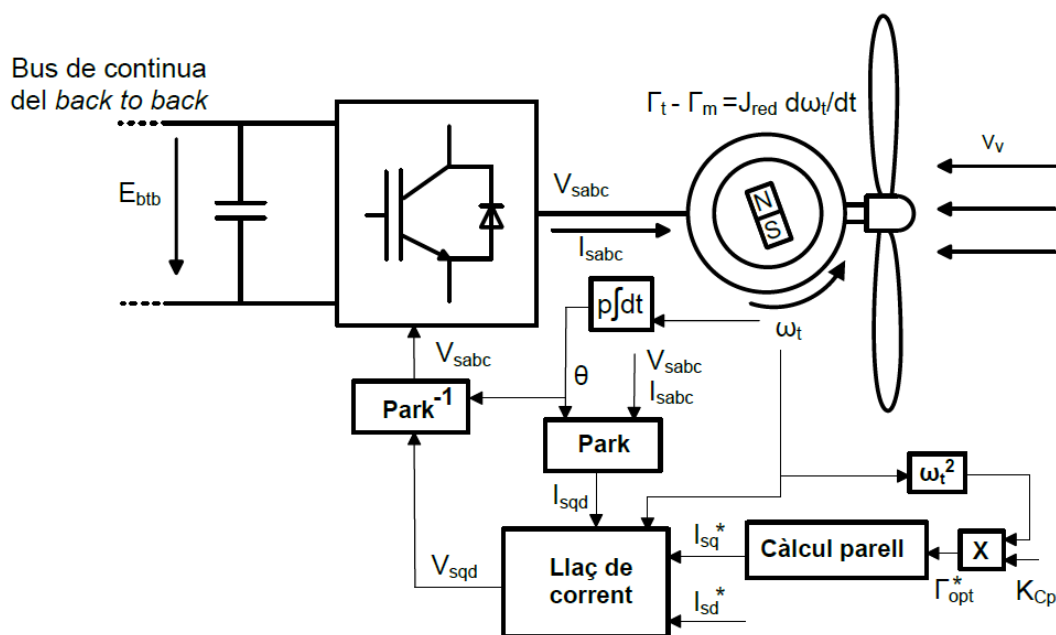


Figura 6.1: Esquema del control del VSC a la banda de l'aerogenerador

Font: [24]

Per controlar el VSC de la banda de l'aerogenerador, s'utilitza el principi de que la velocitat de gir del generador síncron d'imants permanents depèn únicament del parell de la turbina i del parell del generador [2], tal i com s'observa a l'equació (5.4). El parell del generador és el que es pot controlar amb el VSC i és el que determina el valor que assolirà el parell de la turbina. Addicionalment, el parell del generador depèn únicament de la component  $q$  del corrent, relació definida per l'equació (5.7), de manera que es fixa que la component  $d$  sigui 0 per tal d'obtenir el parell desitjat amb el mínim corrent. Les consignes de corrent utilitzades queden definides per les equacions (6.1).

L'esquema general del control del present VSC es presenta a la figura 6.1.

$$i_{sq}^* = \frac{2 \Gamma_m^*}{3 p \lambda_m} \quad (6.1a)$$

$$i_{sd}^* = 0 \quad (6.1b)$$

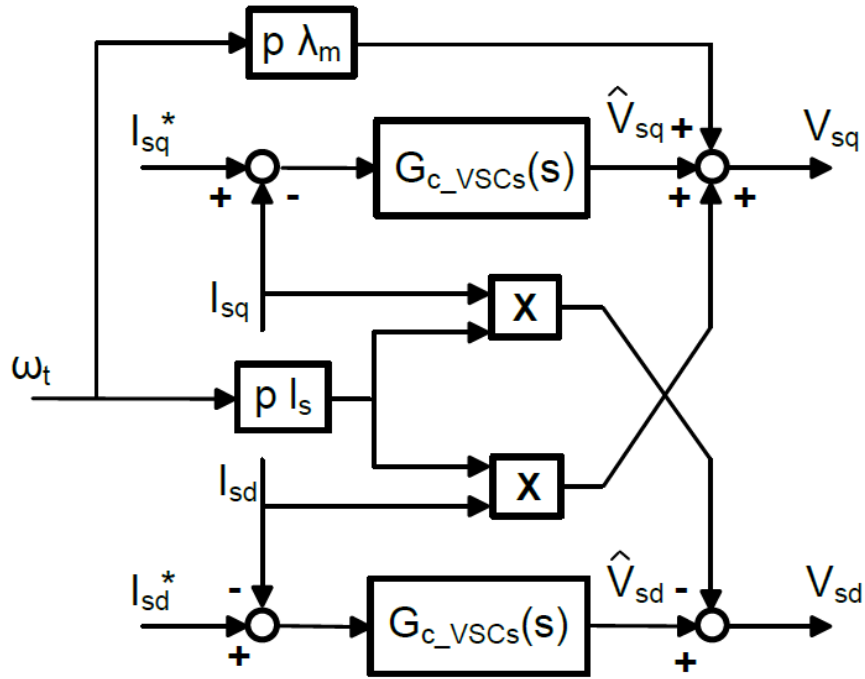


Figura 6.2: Esquema del llaç de corrent del VSC a la banda de l'aerogenerador

Font: [24]

Per implementar aquest control només és necessari un llaç de corrent similar al detallat a la secció 6.2.1. El llaç de corrent d'aquest VSC és esquematitzat a la figura 6.2. Els controladors utilitzats al llaç de corrent són controladors PI que queden definits mitjançant les equacions (6.2).

$$G_{c\_VSCs}(s) = \frac{K_{pgen}s + K_{igen}}{s} \quad (6.2a)$$

$$K_{pgen} = \frac{l_s}{\tau_{gen}} \quad (6.2b)$$



$$K_{igen} = \frac{r_s}{\tau_{gen}} \quad (6.2c)$$

On  $\tau_{gen}$  és la constant de temps del llaç de corrent.

Finalment, les tensions obtingudes al llaç de corrent s'utilitzen per realimentar el generador directament. Per relacionar la potència obtinguda pel generador i la del bus de corrent continu, s'utilitza l'equació (5.8).

En cas de que s'utilitzés una modelització real, les tensions obtingudes al llaç de corrent es passarien a referència *abc* i s'utilitzarien com a senyals moduladores a una modulació SPWM. Per últim, els polsos resultants d'aquesta modulació, s'utilitzarien com a consignes als IGBTs que formen convertidor.

### 6.1.1 Algoritme d'extracció de la màxima potència de la turbina

Com s'ha comentat anteriorment, controlar el parell de la turbina implica poder captar la màxima potència a una certa velocitat del vent, o dit d'una altra manera, per a cada velocitat del vent existeix una velocitat de rotació de la turbina que maximitza l'extracció de potència.

Si es parteix d'aquesta premissa, es pot afirmar que sempre existirà un *tip-speed ratio* constant i òptim ( $\lambda_{opt}$ ) que maximitzarà la potència captada. Aquest *tip-speed ratio* òptim es pot obtenir derivant l'equació de  $C_p$  (5.3) considerant un angle de pitch nul. El resultat d'aquesta operació s'evidencia a l'equació (6.3).

$$\lambda_{opt} = \frac{c_2 c_7}{c_2 c_7 c_9 + c_6 c_7 + c_2} \quad (6.3)$$

Si es substitueix l'expressió de  $\lambda_{opt}$  (6.3) a l'expressió de  $C_p$  (5.3) s'obté l'equació (6.4).

$$C_{p_{opt}} = \frac{c_1 c_2 e^{-\frac{c_6 c_7 + c_2}{c_2}}}{c_7} \quad (6.4)$$

Si es substitueixen les expressions (6.3) i (6.4) a l'expressió de la potència captada per la turbina (5.1), és pot obtenir l'expressió del parell que assegura un coeficient de potència màxim i, per tant, la màxima captació de potència per part de la turbina a una determinada velocitat del vent. L'expressió del parell òptim es presenta a (6.5).

$$\Gamma_{t_{opt}} = \frac{c_1 e^{-\frac{c_6 c_7 + c_2}{c_2}} (c_2 c_7 c_9 + c_6 c_7 + c_2)^3}{c_2^2 c_7^4} \frac{1}{2} \rho A R^3 \omega_t^2 = \frac{C_{p_{opt}}}{2 \lambda_{opt}^3} \rho A R^3 \omega_t^2 = K_{C_p} \omega_t^2 \quad (6.5)$$

A més a més, degut a que la transmissió considerada és directa, el parell òptim de la turbina serà igual al consignat al generador en estat estacionari, de manera n'hi ha prou amb que el control es realitzi calculant i consignat al PMSG el parell òptim, segons l'expressió (6.5), en funció de la velocitat que hi hagi a cada instant.

## 6.2 Control del VSC de l'aerogenerador a la banda de la xarxa

Com s'ha introduït anteriorment, els convertidors VSC tenen dos graus de llibertat, característica que els permet controlar independentment la potència activa i la reactiva [3].

En el cas del VSC situat a la banda de la xarxa, el valor de la potència reactiva acostuma a ser nul o, en cas contrari, es dona en funció dels requeriments de la xarxa de corrent altern. En canvi, la potència activa s'ajusta per assegurar que la tensió al bus de corrent continu es manté constant. Ajustant els valors de potències d'aquesta manera s'aconsegueix automàticament el balanç de potències; o dit d'una altra manera, si la tensió al bus de corrent continu es manté constant, la potència que el VSC absorbirà del bus de CC serà igual a la potència generada per l'aerogenerador [11].

L'esquema de control general per aquest convertidor es mostra a la figura 6.3.

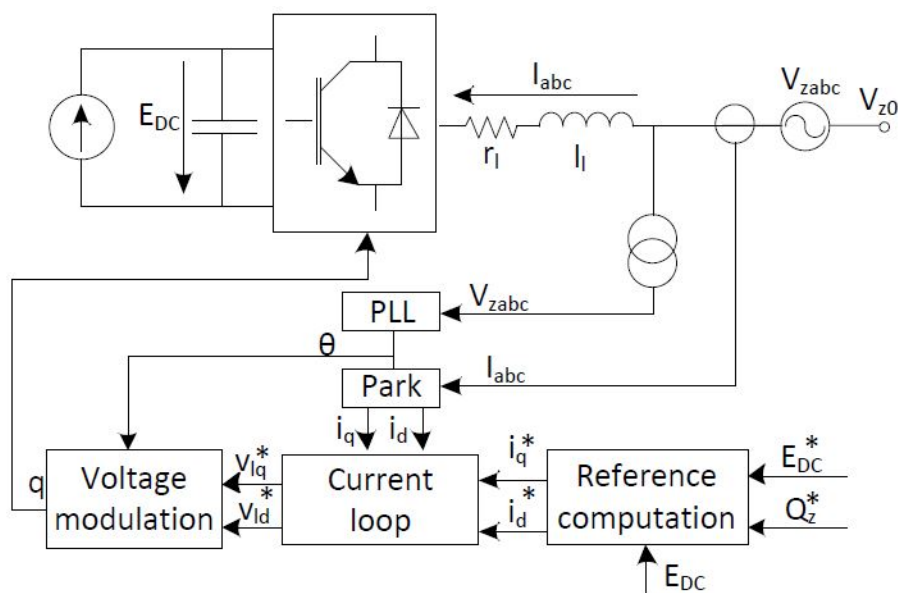


Figura 6.3: Esquema general del control del VSC a la banda de la xarxa  
Font: [11]

El sistema de control està basat en dos controls en cascada: el control del corrent i el control de la tensió al bus de corrent continu. A més, el control està dissenyat per treballar en referència  $qd0$  i l'angle utilitzat per fer la transformació és el de la xarxa d'alterna.

El funcionament general del control del VSC és el següent:

Abans de res, es necessita l'angle de la xarxa d'alterna per poder realitzar la Transformada de Park. L'angle s'obté mitjançant un sistema anomenat *Phase locked loop* (PLL) que mesura l'angle de la xarxa a cada instant. El funcionament de la PLL es detalla a l'annex C. L'angle obtingut amb la PLL s'utilitzarà per fer totes les Transformades i Antitransformades de Park necessàries per controlar el sistema.

Com s'ha mencionat anteriorment, les consignes del control del VSC són la potència reactiva que es vol injectar a la xarxa i la tensió que es vol mantenir al bus de corrent

continu. Es mesura la tensió al bus a cada instant  $i$ , amb les consignes mencionades, es calculen els corrents necessaris que han de circular pel convertidor en referència  $qd0$ . Aquest sistema s'anomena Llaç de Tensió o, en anglès, *Voltage Loop* i a la figura 6.3 es representa com el bloc "Reference computation".

Els corrents obtinguts al llaç de tensió es comparen amb els corrents reals que circulen pel convertidor mitjançant un Llaç de Corrent, també anomenat pel seu nom en anglès: *Current Loop*. Al llaç de corrent surten les tensions necessàries per tal de que els corrents reals passin a ser els obtinguts al llaç de tensió.

Fins aquí el funcionament sistema de control és el mateix independentment de si es treballa amb un model real del VSC o amb el model ideal, però aquests dos models difereixen lleugerament a partir del llaç de corrent.

Al model ideal, les tensions obtingudes al llaç de corrent es passen a referència  $abc$  i s'introdueixen com a consigna a les fonts de tensió que modelitzen la part d'alterna del VSC. Per tal de relacionar les potències de la part de corrent altern i de corrent continu s'utilitza l'equació (5.8) i, el corrent resultant, es fa servir com a consigna a la font de corrent de la part de CC.

En un model real les tensions del llaç de corrent també es passen a referència  $abc$ , però s'utilitzen per modular els IGBTs que formen el convertidor mitjançant una modulació SPWM. Finalment, els polsos obtinguts a la modulació s'envien als IGBTs per a que commutin adequadament. Convé mencionar que els principis de la modulació SPWM s'exposen amb detall a l'annex B.

### 6.2.1 Llaç de corrent

El llaç de corrent té la funció de determinar les tensions que ha d'aplicar el VSC per tal de que les intensitats que circulen pel convertidor siguin iguals a les requerides pel control. Dit d'una altra manera, a partir dels corrents reals que circulen pel convertidor ( $I_q$  i  $I_d$ ) i dels corrents requerits ( $I_q^*$  i  $I_d^*$ ) el llaç de corrent determina les tensions ( $v_{lq}$  i  $v_{ld}$ ) necessàries per a que  $I^{qd0}$  sigui igual a  $I^{qd0*}$ .

Considerant que la component  $v_d$  és 0 degut al correcte funcionament de la PLL, el sistema d'equacions que descriu el comportament de la planta en referència  $qd0$  és (6.6) [11].

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{acob} & L_{acob}\omega_e \\ -L_{acob}\omega_e & R_{acob} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{acob} & 0 \\ 0 & L_{acob} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

on:

$v_{zq}$  és la component  $q$  de la tensió de la xarxa.

$v_{lq}$  és la component  $q$  de la tensió del convertidor.

$v_{ld}$  és la component  $d$  de la tensió del convertidor.

$i_q$  és la component  $q$  del corrent que circula pel convertidor.

$i_d$  és la component  $d$  del corrent que circula pel convertidor.

$R_{acob}$  és la resistència de la inductància d'acoblament.

$L_{acob}$  és el valor de la inductància d'acoblament.

$\omega_e$  és la velocitat angular de la xarxa.

Del sistema (6.6) es poden desacoblar les components  $q$  i  $d$  obtenint així les equacions (6.7).

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_{lq} + v_{zq} - L_{acob}\omega_e i_{ld} \\ -\hat{v}_{ld} + L_{acob}\omega_e i_{lq} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

on:

$\hat{v}_{lq}$  és la component  $q$  de la tensió de sortida del llaç de corrent.

$\hat{v}_{ld}$  és la component  $d$  de la tensió de sortida del llaç de corrent.

Substituint l'equació (6.7) a l'equació de la planta (6.6), s'obtenen equacions amb les components  $q$  i  $d$  totalment independents (6.8).

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{lq} \\ \hat{v}_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{acob} & 0 \\ 0 & R_{acob} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{acob} & 0 \\ 0 & L_{acob} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Amb les equacions anteriors es pot dissenyar el llaç de corrent. Utilitzant una tècnica coneguda com IMC (*Internal Model Control*) es defineix un controlador PI [11] amb les constants indicades a les equacions (6.9).

$$G_{cl}(s) = \frac{K_{pcl}s + K_{icl}}{s} \quad (6.9a)$$

$$K_{pcl} = \frac{L_{acob}}{\tau_{CL}} \quad (6.9b)$$

$$K_{icl} = \frac{R_{acob}}{\tau_{CL}} \quad (6.9c)$$

On  $\tau_{CL}$  és la constant de temps del llaç de corrent. Aquesta constant s'agafa en funció de les restriccions físiques del convertidor. És usual definir-la uns 10 cops major que la freqüència de commutació dels IGBTs del convertidor [11].

Finalment, un esquema de la implementació del llaç de corrent al VSC situat a la banda de la xarxa es mostra a la figura 6.4.

### 6.2.2 Llaç de tensió

El llaç de tensió és necessari per tal de controlar la tensió al bus de CC, assegurant l'equilibri de potències entre la potència aportada per l'aerogenerador i l'absorbida per la xarxa. El llaç de tensió genera els corrents requerits ( $I_q^*$  i  $I_d^*$ ) que s'utilitzaran al llaç de corrent. Un esquema del llaç de tensió es pot observar a la figura 6.5.

El llaç de tensió i el llaç de corrent estan connectats en cascada, o dit d'una altra manera, les sortides del llaç de tensió són les entrades del llaç de corrent. És per això que s'ha de mencionar que el llaç de tensió ha de ser sempre molt més lent que el llaç de corrent per tal d'assegurar l'estabilitat del sistema [11].

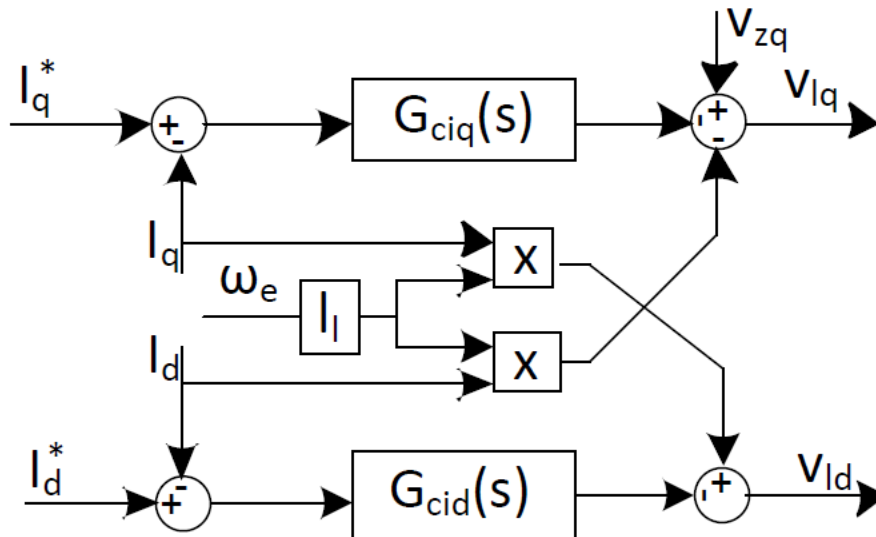


Figura 6.4: Esquema del laç de corrent del VSC a la banda de la xarxa.

Font: [11]

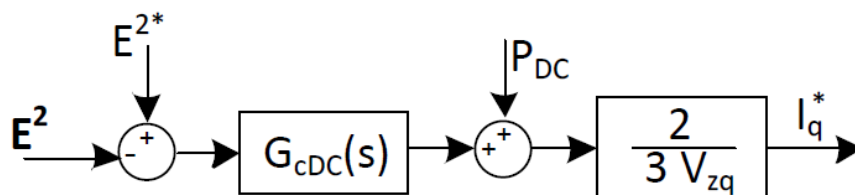


Figura 6.5: Esquema del laç de tensió.

Font: [11]

Una particularitat del laç de tensió és que s'utilitza com a variable de control  $E_{DC}^2$  ja que millora la resposta del sistema degut a que  $E_{DC}^2$  és proporcional a l'energia emmagatzemada al condensador [11]. Aquesta relació ve donada per l'equació (6.11).

El funcionament del laç de tensió és el següent:

Primer de tot, es mesura la tensió del bus de CC, s'eleva al quadrat, i es compara amb la tensió desitjada al bus, també elevada al quadrat. La diferència resultant d'aquesta comparació, es fa passar per un controlador per obtenir la potència activa que s'hauria de subministrar al condensador per a que la tensió al bus sigui igual a la desitjada.

Aquesta potència es suma a la potència mesurada al bus de contínua abans del condensador com s'evidencia a l'equació (6.10). La potència resultant és la que haurà d'injectar el convertidor VSC de la xarxa al bus per obtenir la tensió desitjada.

$$P^* = P_C^* + P_{DC} \quad (6.10)$$

on:

$P^*$  és la potència que hauria de subministrar el VSC.

$P_C^*$  és la potència activa que s'hauria d'injectar al condensador.

$P_{DC}^*$  és la potència, actual, mesurada just abans del condensador.

Per últim, s'aïlla el corrent que ha de circular per el VSC de l'equació (A.7a) i s'implementa, l'equació aïllada, al llaç de corrent. Com que normalment interessa que la component  $I_d$  sigui nul·la, així es considera a l'equació (A.7a) per tal de simplificar la seva implementació al llaç.

El controlador emprat al llaç de corrent pot ser de diversos tipus però amb l'esquema del llaç de corrent mostrat a la figura 6.5 es solen utilitzar controladors P o PI. En aquest cas s'ha utilitzat un controlador PI per tal de modelitzar el llaç de corrent.

Per dissenyar el controlador PI s'utilitza l'equació (6.11) que expressa la potència del condensador al domini de Laplace. En aquesta equació s'evidencia que la potència del condensador depèn de la tensió al condensador al quadrat tal i com s'ha mencionat anteriorment.

$$P_C(s) = \frac{1}{2} s C E_{DC}^2 \quad (6.11)$$

on:

$P_C$  és la potència del condensador.

$C$  és la capacitat del condensador.

Amb aquesta equació, tal i com es detalla a [11], es pot obtenir l'equació que governa al controlador PI del llaç (6.12a). Els paràmetres  $K_{pvl}$  i  $K_{ivl}$  poden ser calculats amb les equacions (6.12b) i (6.12c) respectivament.

$$G_{vl}(s) = \frac{K_{pvl}s + K_{ivl}}{s} \quad (6.12a)$$

$$K_{pvl} = C\xi\omega_{vl} \quad (6.12b)$$

$$K_{ivl} = \frac{C\omega_{vl}^2}{2} \quad (6.12c)$$

on:

$\xi$  és el *damping ratio* i és anàlog a l'utilitzat a la PLL.

$\omega_{vl}$  és la velocitat angular del llaç de tensió.

### 6.3 Control dels convertidors HVDC

Al sistema estudiat existeixen tres convertidors HVDC: dos als parcs eòlics i un a la costa. Tots aquests convertidors són VSCs i presenten un control similar basat en un llaç de corrent i un llaç de tensió.

En el sistema estudiat, la funció dels convertidors HVDC dels parcs eòlics es mantenen constant la tensió de la xarxa interna del parc eòlic on estan situats. Per simplificar el control, aquests dos convertidors s'han considerat com a fonts de tensió alterna ideals i constants. Seguint l'anterior consideració, els convertidors subministren, en tot moment, la tensió nominal del parc eòlic.

Pel que fa al convertidor HVDC localitzat a la costa, aquest presenta un control anàleg al dels VSCs dels aerogeneradors a la banda de la xarxa explicats a la secció 6.2. S'ha

considerat que el convertidor situat a la costa és l'encarregat de mantenir la tensió de la xarxa HVDC a un valor constant, tot i que serien possibles altres implementacions [6] [29]. No obstant, convé destacar que al llaç de tensió es consigna la meitat de la tensió de la xarxa HVDC. Això es conseqüència de modelitzar només la meitat de la xarxa HVDC tal i com s'explica a 5.4.

## 6.4 Control del current flow controller

En les següents seccions s'introdueixen les estratègies de control emprades per governar els *current flow controllers*. Es presenten dues estratègies de control ben diferenciades: una primera estratègia aplicada al CFC ideal i al de resistència variable, i una segona estratègia de control utilitzada en els CFCs convertidors CC/CA.

La primera estratègia de control necessita, per funcionar correctament, comunicació contínua entre els parcs eòlics i el *current flow controller*. El CFC rep dades sobre la potència que subministren els parcs eòlics i actua en funció d'aquestes, és a dir, el control del CFC no disposa d'un controlador ni d'una realimentació per eliminar l'error, simplement aplica la consigna que rep. Dit d'una altra manera, el control del CFC es realitza en llaç obert. Un dels inconvenients d'aquesta estratègia de control és que requereix d'un anàlisi de la xarxa HVDC com el realitzat a la secció 5.5.2; anàlisi que pot ser de difícil realització en xarxes complexes amb una gran quantitat de malles.

D'altra banda, el segon control proposat sí que es fa en llaç tancat mitjançant un controlador PI. Utilitzar un controlador permet que el *current flow controller* funcioni de forma automàtica, o sigui, en funció de les fluctuacions de corrent a les línies.

### 6.4.1 Control del current flow controller ideal

Per governar el *current flow controller* ideal s'aplica la primera estratègia de control, és a dir, el CFC es controla en funció de les potències subministrades pels parcs eòlics a cada instant.

Un *current flow controller* ideal sempre intentarà que el corrent que circuli per la línia sigui igual al corrent límit. En conseqüència, i per garantir el correcte funcionament del sistema, es limita el seu funcionament als moments en els que els parcs subministren potència suficient per arribar o superar el corrent desitjat. Altrament, el corrent serà menor al consigna i, per tant, no caldrà activar el CFC. Per limitar el funcionament del *current flow controller* es calcula el corrent màxim que circularà per la línia on actua el CFC mitjançant l'equació (5.16). Per realitzar aquest càlcul es considera que la resistència del *current flow controller* és nul·la. Si el corrent màxim calculat és inferior al corrent consigna, el *current flow controller* no actuarà.

La tensió que ha d'aplicar el *current flow controller* es calcula en funció de les potències subministrades pels parcs eòlics i de la intensitat desitjada. Primerament, es calcula la resistència que hi hauria d'haver al cable per a que circulés el corrent desitjat. Aquest càlcul es fa utilitzant l'equació (6.13), que s'obté aïllant  $R_{cfc}$  de l'equació (5.16). Al tractar-se d'un model ideal, el valor d'aquesta resistència no presenta cap limitació física i podria ser un valor negatiu.

$$R^* = \frac{P_{\text{parc1}}(R_2 + R_3) + P_{\text{parc2}}R_2}{E_c I_4} - (R_1 + R_2 + R_3) \quad (6.13)$$

Finalment, la resistència virtual calculada es multiplica pel corrent desitjat, obtenint així la tensió que ha d'aplicar el *current flow controller*.

L'esquema del control presentat s'evidencia a la figura 6.6.

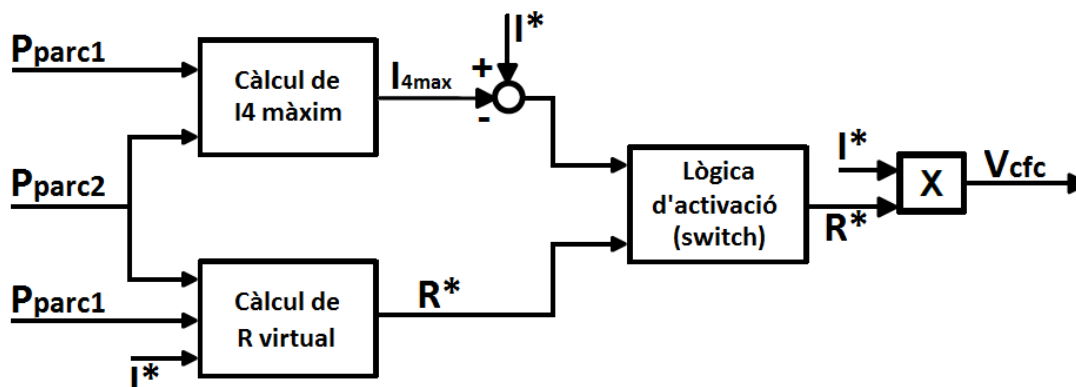


Figura 6.6: Esquema del control del *current flow controller* ideal  
Font: Pròpia

Han de menester uns comentaris sobre el control del present *current flow controller*. D'entrada, tot i que no s'ha considerat en aquest control, un CFC ideal podria determinar el corrent d'una línia on no hi estigués situat, sempre i quan es controlés adequadament; dit amb unes altres paraules, el CFC podria limitar el corrent de l'altra línia de la xarxa estudiada, on no hi és connectat. En segon lloc, quan el *current flow controller* no ha d'actuar, la lògica d'activació consigna una resistència virtual nul·la, cosa que garanteix que no s'aplicarà cap mena de tensió.

#### 6.4.2 Control del *current flow controller* de resistència variable

El *current flow controller* de resistència variable utilitza un sistema de control molt similar al del *current flow controller* ideal. No obstant, com s'ha mencionat a la secció 5.5.2, el CFC només pot reduir el corrent fins a cert valor determinat per  $R_{cfc}$ .

A diferència d'altres tipus de *current flow controllers*, els de resistència variable no intentaran en tot moment que el corrent que circula per la línia sigui igual al corrent límit i, consegüentment, no necessiten una lògica d'activació. Altrament, durant el funcionament del CFC només commuta un dels IGBT i, en conseqüència, es necessita una petita lògica de commutació. El transistor IGBT que no commuta roman obert, de manera que només actua el díode situat en antiparal·lel. El sentit del corrent que circula pel cable és el que determina quin dels dos IGBT commuta i quin roman obert. La relació entre el sentit del corrent i l'estat dels transistors es mostra a la figura 6.7.



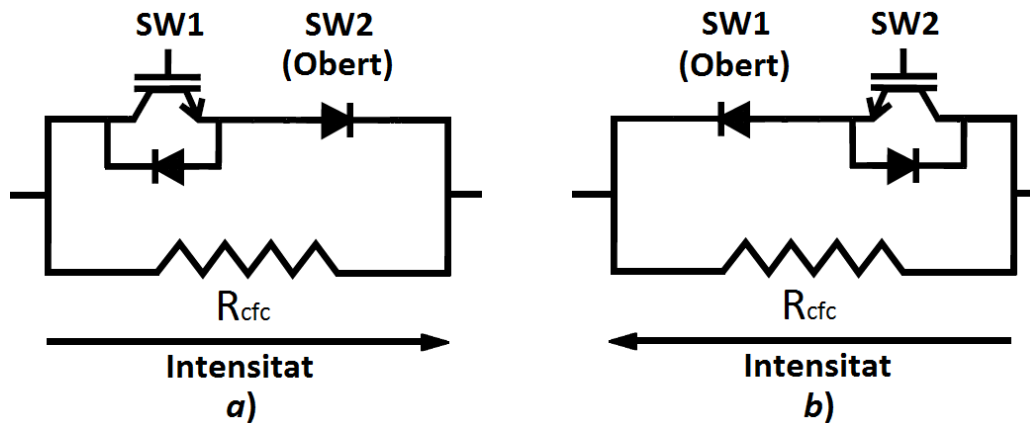


Figura 6.7: Esquema equivalent del *current flow controller* de resistència variable en funció del sentit de la intensitat

Font: Pròpia

Tornant al sistema de control, d'una forma breu es podria dir que aquest calcula la resistència virtual que hauria d'existir al cable per a que circulés un corrent  $I^*$  i l'aplica mitjançant una modulació PWM.

La resistència virtual es calcula emprant el mateix mètode que al *current flow controller* ideal, és a dir, es calcula mitjançant l'equació (6.13). Convé destacar que el valor de la resistència virtual es limita entre 0 i  $R_{cfc}$ , ja que el CFC només pot aplicar una resistència situada entre aquests dos valors, ambdós inclosos.

Després, es calcula el *duty cycle* necessari per aplicar la resistència virtual; càlcul que es fa utilitzant l'equació (6.14).

$$D = \frac{R_{cfc} - R^*}{R_{cfc}} \quad (6.14)$$

Si es considera que l'estat d'un transistor és "1" quan està tancat i "0" quan està obert, de l'equació (6.14) es dedueix que, quan el *duty cycle* és "0", els IGBTs estaran oberts i s'aplicarà una resistència  $R_{cfc}$ ; en canvi, quan el *duty cycle* és "1", un dels IGBT es tancarà i permetrà així el pas de corrent sense aplicar cap resistència addicional.

El *duty cycle* es fa servir com a senyal modulador en una modulació PWM, de la qual s'obtenen els polsos que s'han d'aplicar a un dels IGBT. No obstant, abans d'aplicar els polsos, aquests passen per la lògica de commutació, formada per dos blocs "Switch". Finalment, aquesta lògica determina, en funció del sentit del corrent, quin IGBT commuta i quin roman obert. Convé mencionar que la lògica de commutació simplement dirigeix els polsos obtinguts a la PWM cap al IGBT que ha de commutar i, consigna un pols constant de valor 0 al transistor que ha d'estar obert.

Un esquema del control del *current flow controller* de resistència variable es pot observar a la figura 6.8.

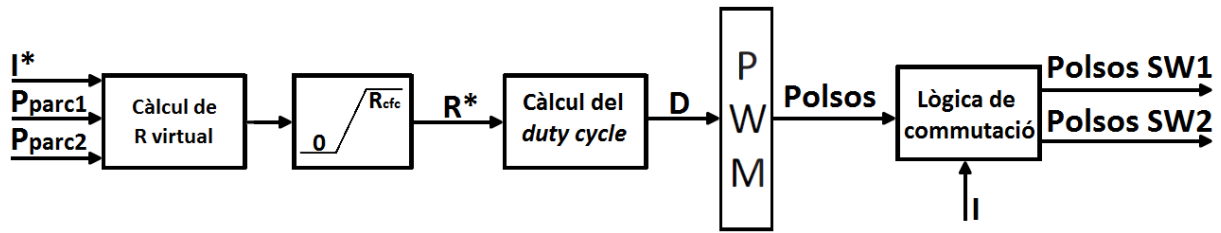


Figura 6.8: Esquema del control del *current flow controller* de resistència variable  
Font: Pròpia

### 6.4.3 Control del *current flow controller* convertidor CA/CC al Cable 1

El convertidor CA/CC presenta dos controls ben diferenciats: el control del VSC i el control del Pont en H. Mentre que la funció del VSC és garantir una tensió constant al bus de corrent continu, el Pont en H és l'encarregat d'aplicar tensions a la xarxa HVDC. Amb l'objectiu de no donar explicacions redundants, a aquesta secció no es detalla el control del VSC atès que aquest és anàleg al del VSC exposat a la secció 6.2.

El control del Pont en H està inspirat en el control exposat a [4]. De manera global, es pot dir que la diferència entre el corrent real i el consignat passa per un controlador PI; la sortida del controlador és una tensió que s'utilitza per calcular un *duty cycle* i fer una modulació PWM. L'esquema del control del *current flow controller* es pot observar a la figura 6.9

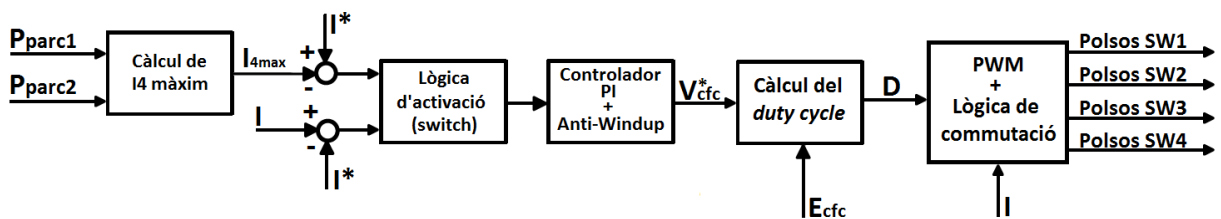


Figura 6.9: Esquema del control del *current flow controller* convertidor CA/CC situat al cable 1  
Font: Pròpia

Aquest *current flow controller* necessita una lògica d'activació, com el CFC ideal, i una lògica de commutació, com el CFC de resistència variable. D'una banda, la lògica d'activació és idèntica a la del *current flow controller* ideal però, en el cas de que el CFC no s'hagi d'activar, la lògica transmet al PI que la diferència entre el corrent real i el consignat és nul·la. D'altra banda, la lògica de commutació és més complexa que al *current flow controller* de resistència variable, i necessita d'unes explicacions prèvies abans de poder ser exposada.

Abans de poder profunditzar en sistema el control, cal explicar com aplica tensions el *current flow controller*. De la mateixa manera que al CFC de resistència variable, el sentit del corrent a la xarxa HVDC determina quins IGBT commuten i quins romanen oberts. En el present convertidor sempre commutaran dos IGBT mentre que els altres dos romandran oberts i actuaran com a díodes. La relació entre el sentit del corrent i l'estat dels transistors es pot observar a la figura 6.10.

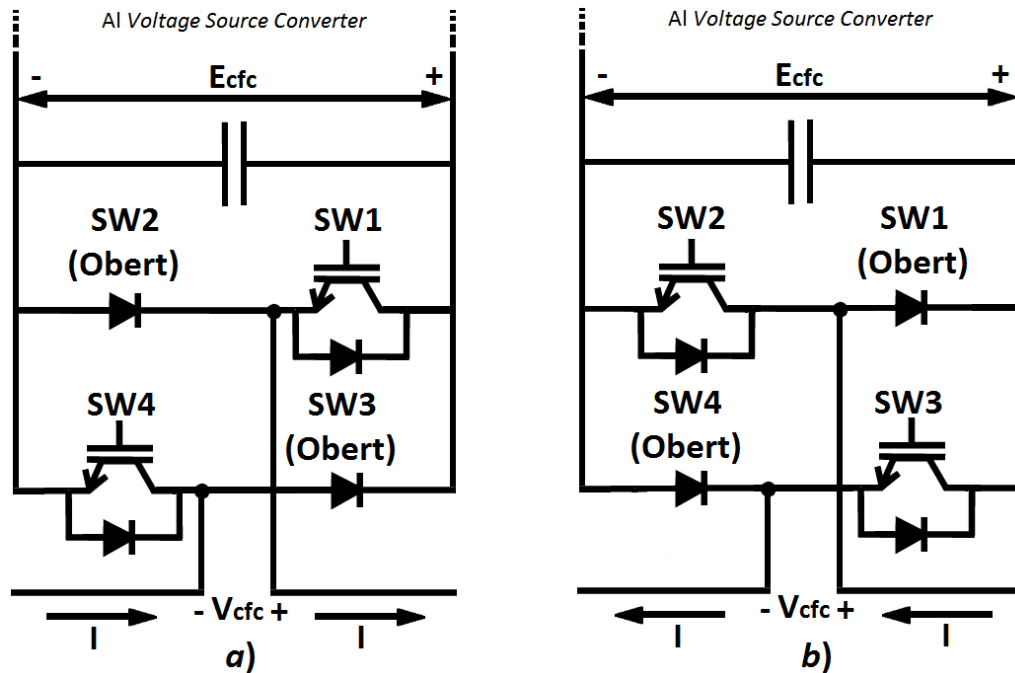


Figura 6.10: Esquema equivalent del *current flow controller* convertidor CA/CC en funció del sentit de la intensitat

Font: Pròpia

En el model estudiat, i seguint el conveni de signes de la figura 6.10, el costat positiu del convertidor és el costat més proper als parcs eòlics mentre que el costat negatiu és el més proper a la costa. Per aquest fet, durant el funcionament normal del *current flow controller*, només commutaran els IGBTs anomenats SW2 i SW3.

És per això que es pot analitzar el funcionament del Pont en H considerant dos escenaris segons el sentit del corrent:

- **Escenari 1:** Quan la direcció del corrent és la mostrada a la figura 6.10a), només commuten els transistors SW1 i SW4. Els IGBT SW2 i SW3 es troben oberts, aconseguint així que el corrent circuli pels seus díodes. L'estat de cada transistor és "1" si està tancat i "0" si està obert. Amb aquestes consideracions, la tensió  $V_{cfc}$  es defineix com (6.15):

$$V_{cfc} = \begin{cases} -E_{cfc} & \text{si SW1} = 0 \text{ i SW4} = 0 \\ 0 \text{ (Bypass)} & \text{si SW1} = 0 \text{ i SW4} = 1 \\ 0 \text{ (Bypass)} & \text{si SW1} = 1 \text{ i SW4} = 0 \\ E_{cfc} & \text{si SW1} = 1 \text{ i SW4} = 1 \end{cases} \quad (6.15)$$

- **Escenari 2:** Quan la direcció del corrent és la mostrada a la figura 6.10b), només commuten els IGBT SW2 i SW3. Els transistors SW1 i SW4 es troben oberts. En aquest cas, la tensió  $V_{cfc}$  es defineix com (6.16):

$$V_{cfc} = \begin{cases} E_{cfc} & \text{si SW2} = 0 \text{ i SW3} = 0 \\ 0 \text{ (Bypass)} & \text{si SW2} = 0 \text{ i SW3} = 1 \\ 0 \text{ (Bypass)} & \text{si SW2} = 1 \text{ i SW3} = 0 \\ -E_{cfc} & \text{si SW2} = 1 \text{ i SW3} = 1 \end{cases} \quad (6.16)$$

A (6.15) i (6.16) s'observa que el *current flow controller* només aplica tensió quan els dos transistors que commuten es troben al mateix estat, és a dir, tots dos es troben oberts o tancats. Altrament, el CFC no aplica tensió i, en conseqüència, el corrent que circula per la xarxa HVDC no es veu afectat. Quan el *current flow controller* no aplica tensió, es diu que es troba en estat de *bypass*.

Els CFCs convertidors CA/CC necessiten una lògica de commutació ja que una modulació PWM normal i corrent no genera, per si mateixa, els polsos necessaris per controlar adequadament els transistors segons (6.15), (6.16) i (6.18). Concretament, hi ha dues situacions on la modulació no realitzarà el control correctament: l'estat de *bypass* i la commutació segons (6.16). Addicionalment, la lògica de commutació té la funció de fer commutar els dos transistors adequats segons el sentit del corrent que circula per la xarxa HVDC (Figura 6.10).

La lògica de commutació, aquesta està formada un conjunt de blocs “Switch” que s'encarreguen de generar les consignes apropiades per fer commutar correctament els IGBT. La lògica de commutació està estretament lligada a la modulació PWM, ja que és l'encarregada de transmetre els polsos generats per la modulació als transistors indicats. L'esquema de la lògica de commutació es pot consultar a la figura 6.11.

Com s'ha introduït anteriorment, la lògica de commutació està formada per dos nivells de blocs “Switch” situats en cascada. Els blocs “Switch”, com el seu nom indica, actuen com si fossin interruptors: reben una consigna i, en funció d'aquesta, fan una cosa o una altra. La consigna s'introdueix a l'entrada central del bloc i és comparada amb un cert valor programat; si la consigna és major al valor programat, el bloc transmet el senyal introduït a la seva entrada superior, altrament, el bloc transmet el senyal introduït a l'entrada inferior. D'aquesta manera els blocs “Switch” són capaços de commutar entre l'entrada superior i la inferior en funció de la consigna rebuda.

El funcionament de la lògica de commutació és el següent:

En primer lloc, es transmeten els polsos generats per la PWM al primer nivell de blocs “Switch”. Addicionalment, per a que els transistors SW2 i SW3 commutïn correctament, segons (6.18) i (6.16), els polsos es fan passar abans per una porta lògica NOT.

La funció del primer nivell de blocs “Switch” és posar el *current flow controller* en estat de *bypass* quan es requereixi. Per entendre el funcionament d'aquest primer nivell, cal saber que el *duty cycle* serà 0,5 quan el CFC no hagi d'aplicar tensió. Per tal de detectar quan es requereix un *bypass* i consignar els transistors de forma apropiada, es resta 0,5 al

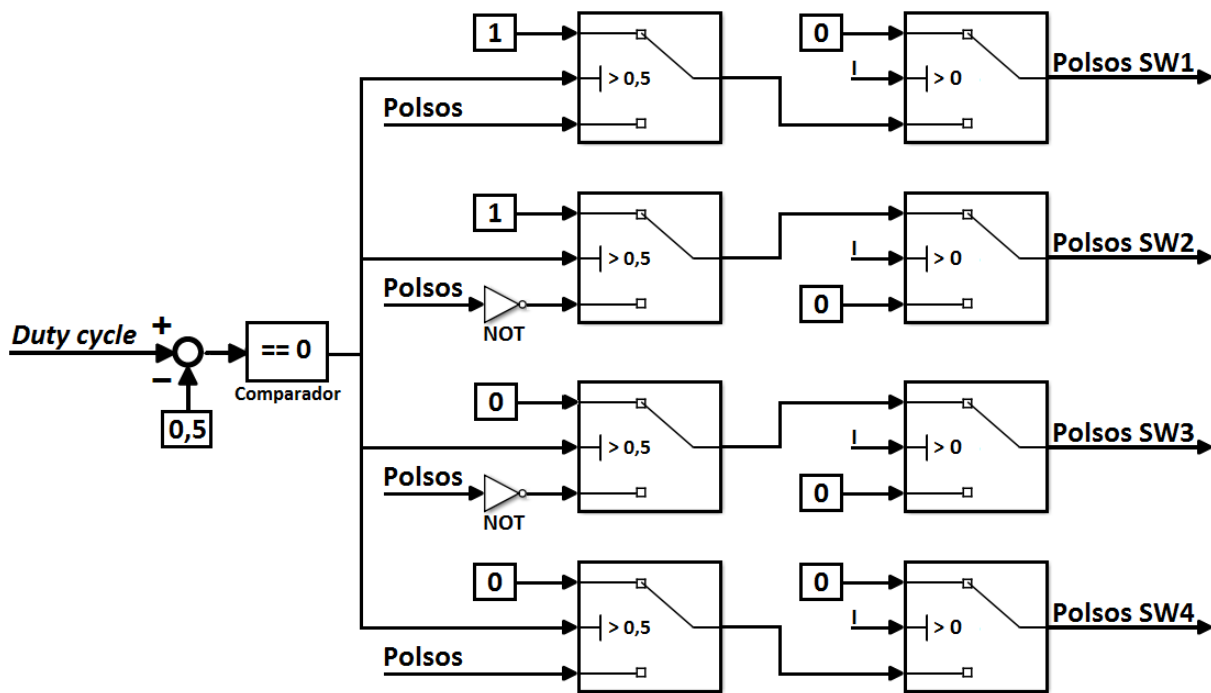


Figura 6.11: Esquema de la lògica de commutació del *current flow controller* convertidor CA/CC

Font: Pròpia

*duty cycle* i es compara el resultat amb "0" a un comparador. El comparador retorna el valor "1" només si la seva entrada és nul·la; altrament retorna "0". Per últim, el resultat del comparador es fa servir com a consigna als blocs "Switch", aconseguint així que, quan el CFC hagi de fer un *bypass*, aquesta part de la lògica sigui capaç de consignar el valor "1" als transistors SW1 i SW2, i el valor "0" a SW3 i SW4.

El segon nivell de blocs "Switch" és l'encarregat de mantenir oberts els transistors que no han de commutar com es mostra a la figura 6.10. Aquesta part de lògica funciona amb el mateix principi que la del *current flow controller* de resistència variable, és a dir, es mesura el valor del corrent i es mira el seu signe, seguidament, el valor del corrent es fa servir com a consigna als blocs "Switch". Així s'aconsegueix que el *current flow controller* commuti els transistors adequats segons el sentit del corrent.

Utilitzant aquests dos nivells de blocs "Switch", la lògica és capaç de transmetre als IGBTs els polsos adequats per a que el *current flow controller* funcioni correctament. Un detall que cal mencionar és que el control segons el signe del corrent sempre s'ha de realitzar l'últim, ja que es tracta del més restrictiu. Si es realitzés el primer, el CFC no seria capaç de realitzar un *bypass* i seria necessària una estratègia de control alternativa.

El *duty cycle*, utilitzat en la modulació PWM i en la lògica de commutació, es calcula a partir de la tensió obtinguda al controlador PI i de la tensió present al bus de corrent continu mitjançant l'equació (6.17). Es pot observar, a la pròpia equació (6.17), que el valor del *duty cycle* determinarà el signe de la tensió que aplicarà el CFC segons s'exposa a (6.18). A més, de l'equació (6.17) i, de (6.15) i (6.16), es pot deduir la relació entre el *duty cycle* i la commutació dels diferents IGBTs.

$$D = \frac{1}{2} \left( \frac{V_{cfc}^*}{E_{cfc}} + 1 \right) \quad (6.17)$$

$$V_{cfc} \begin{cases} > 0 & \text{si } D > 0,5 \\ = 0 & \text{si } D = 0,5 \\ < 0 & \text{si } D < 0,5 \end{cases} \quad (6.18)$$

Per a que tot aquest sistema de control funcioni, primerament es compara la intensitat que circula pel cable amb el corrent desitjat o nominal. Aquesta diferència passa per la lògica d'activació i, en cas de que el CFC s'hagi d'activar, per un controlador PI com l'exposat a [4]. Altrament, la lògica d'activació consigna un error "0" al controlador, aconseguint així que el *current flow controller* no apliqui cap tensió al cable.

Per tal de garantir el correcte funcionament del controlador PI, aquest es dissenya amb un sistema *anti-windup* com el de la figura 6.12. Gràcies a la lògica d'activació del CFC, l'*anti-windup* només es fa servir quan el controlador vol aplicar una tensió major a la del bus de corrent continu. Cal destacar també que, després del controlador PI, es limita el valor de tensió obtingut per a que aquest es trobi dins del rang de tensions aplicables pel CFC (5.17).

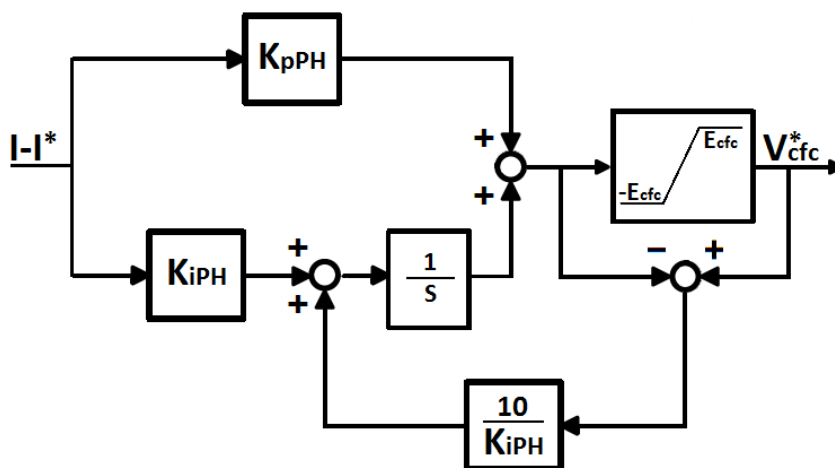


Figura 6.12: Esquema del controlador del *current flow controller* convertidor CA/CC  
Font: Pròpia

#### 6.4.4 Control del *current flow controller* convertidor CA/CC al Cable 2

El control del *current flow controller* situat al cable 2, segons la figura 5.7b), és pràcticament idèntic al del *current flow controller* del cable 1. Això és conseqüència de que la xarxa modelitzada només consta de 3 terminals i una malla.

En una xarxa mallada real, amb un major número de malles i terminals, un CFC hauria d'actuar en funció de les necessitats de la xarxa HVDC, és a dir, si a algun cable es supera el corrent nominal, el *current flow controller* l'hauria de limitar. D'altra banda,

si a cap cable hi circula un corrent superior al nominal, el *current flow controller* no hauria d'actuar. No cal dir que en una xarxa real potser seria necessari instal·lar més d'un *current flow controller*, i dissenyar el control d'aquests CFCs és un dels reptes als que s'enfronta l'enginyeria a l'actualitat.

En qualsevol cas, tenir una xarxa com la modelitzada simplifica l'estudi del control, ja que el corrent que no circula pel cable 1, ho fa pel cable 2. Addicionalment, la relació de resistències de la xarxa estudiada garanteix que només es sobrecarregarà el cable 1, de manera que només cal limitar el corrent que circula per aquest cable sense sobrecarregar el cable 2 en el procés.

Atès que, a la xarxa estudiada, el cable 1 és el més crític, només cal controlar el corrent que circula per ell, ja que el cable 2 mai es sobrecarregarà en condicions normals. Conseqüentment, es pot utilitzar la mateixa lògica d'activació que al Pont en H del *current flow controller* convertidor CA/CC de l'anterior secció 6.4.3. Així mateix, al tractar-se del mateix tipus de *current flow controller*, es pot mantenir igual el control del VSC i del Pont en H, aquest últim amb una petita diferència.

Com que es vol controlar el corrent que circula pel cable 1 mitjançant un *current flow controller* situat al cable 2, el CFC ha de limitar el corrent que circula pel seu cable de manera que el corrent del cable 1 sigui el nominal o desitjat. Per fer-ho, es calcula el corrent total a utilitzant les equacions (5.12), la potència subministrada pels parcs eòlics i la tensió al bus de corrent continu del convertidor. Un cop obtingut el corrent total, se li resta el corrent nominal per tal d'obtenir el corrent que ha de circular pel cable 2. Addicionalment, el corrent que s'ha de consignar al cable 2 es limita a un valor màxim igual al corrent nominal, assegurant així la no sobrecàrrega del cable.

Amb aquesta petita modificació de la consigna, el *current flow controller* aplicarà les tensions necessàries per a que no es superi el corrent nominal. L'esquema del control del *current flow controller* s'exposa a la figura 6.13.

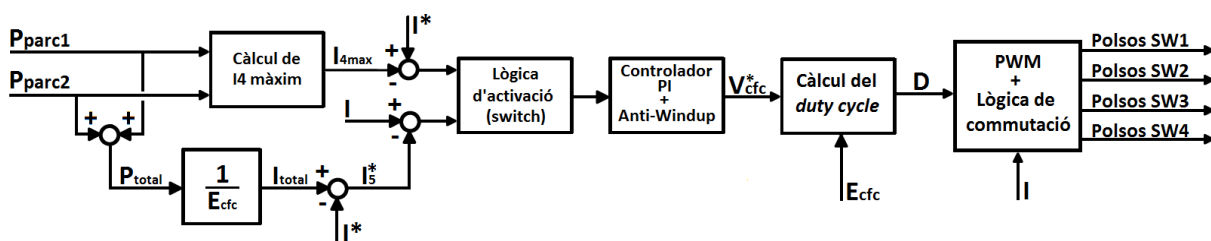


Figura 6.13: Esquema del control del *current flow controller* convertidor CA/CC situat al cable 2

Font: Pròpia





# Capítol 7

## Simulacions

En aquest capítol s'exposen les simulacions realitzades per tal de verificar el correcte funcionament dels aerogeneradors, els parcs eòlics i, sobretot, dels *current flow controllers*. A més, les simulacions permeten estudiar l'impacte de les diferents tipologies de *current flow controllers* a la xarxa HVDC. Es recomana consultar l'annex D com a suport per interpretar tan els paràmetres utilitzats com els obtinguts a les simulacions realitzades.

Les simulacions s'han realitzat amb el programa MATLAB SIMULINK fent us de la *toolbox* SimPowerSystems. El *solver* utilitzat ha estat el ode23tb (stiff/TR-BDF2), amb un *max step size* de  $10^{-4}$  segons i una tolerància relativa també de  $10^{-4}$ .

### 7.1 Paràmetres utilitzats en les simulacions

Els paràmetres emprats es poden dividir en dues categories: els paràmetres del sistema físic, detallats a 7.1.1, i els paràmetres utilitzats en el control, exposats a 7.1.2.

#### 7.1.1 Paràmetres del sistema físic

Primerament s'exposen els paràmetres de la turbina eòlica a la taula 7.1. Els paràmetres de la turbina són paràmetres reals d'una turbina comercial de 5 MW, concretament d'una turbina G132-5.0 MW Offshore [14]. Les constants d'ajust s'han extret de [1] i corresponen al tipus Heier.

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
Potència nominal	$P_{tnom}$	5	[MW]
Radi de les pales	$R$	66	[m]
Densitat de l'aire	$\rho$	1,18	[kg/m <sup>3</sup> ]
Conjunt d'inèrcies reduïdes a la turbina	$J_{red}$	4,38	[Mgm <sup>2</sup> ]
Velocitat nominal de la turbina	$\omega_{tnom}$	11,8	[rpm]
Angle de Pitch	$\vartheta$	0	[°]
Coefficient d'ajust 1	$c_1$	0,5	
Coefficient d'ajust 2	$c_2$	116	
Coefficient d'ajust 3	$c_3$	0,4	
Coefficient d'ajust 4	$c_4$	0	
Coefficient d'ajust 5	$c_5$	0	
Coefficient d'ajust 6	$c_6$	5	
Coefficient d'ajust 7	$c_7$	21	
Coefficient d'ajust 8	$c_8$	0,08	
Coefficient d'ajust 9	$c_9$	0,035	

Taula 7.1: Paràmetres de la turbina eòlica  
Font: Pròpia

Seguidament, a la taula 7.2, es presenten els paràmetres corresponents al generador síncron d'imants permanents acoblat a la turbina eòlica. Aquests paràmetres s'han consultat a [16].

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
Potència base	$P_{genmom}$	5,3	[MW]
Resistència de l'estator	$r_s$	0,08	[ $\Omega$ ]
Inductància de l'estator	$l_s$	8,38	[mH]
Tensió simple en buit a la velocitat nominal	$V_{buit}$	2,31	[kV]
Nombre de parell de pols	$p$	100	
Flux concatenat	$\lambda_m$	20,0715	[Wb]

Taula 7.2: Paràmetres del generador síncron d'imants permanents  
Font: Pròpia

A continuació, a la taula 7.3, es mostren els paràmetres de les xarxes internes dels parcs eòlics. La majoria de paràmetres de les xarxes s'han calculat a partir dels valors donats a [11] i a [24]. Addicionalment, a la taula 7.3 també consten els paràmetres dels convertidors VSC. Convé recordar que els transformadors situats al parc eòlics s'han considerat ideals i, en conseqüència, no presenten impedància.

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
Tensió del bus dels <i>back-to-back</i>	$E_{DC}$	7	[kV]
Capacitat del condensador del <i>back-to-back</i>	$C$	1020	[ $\mu$ F]
Tensió de fase abans del <i>back-to-back</i>	$V_{fase}$	3,5	[kV]
Potència dels convertidors VSC	$S_{VSC}$	5	[MVA]
Resistència d'acoblament a la xarxa interna	$R_{acob}$	0,225	[ $\Omega$ ]
Inductància d'acoblament a la xarxa interna	$L_{acob}$	2,43	[mH]
Relació de transformació del transformador dels aerogeneradors	$m_1$	0,1061	
Tensió de fase de la xarxa interna	$V_{faseparc}$	33	[kV]
Freqüència de la xarxa interna del parc	$f$	50	[Hz]
Resistència total a les línies del parc	$R_{lin}$	0,0064	[ $\Omega$ ]
Inductància total a les línies del parc	$L_{lin}$	0	[mH]
Nº de línies al Parc 1	$m_{lin1}$	3	
Aerogeneradors per línia al Parc 1	$n_{lin1}$	35	
Nº de línies al Parc 2	$m_{lin2}$	2	
Aerogeneradors per línia al Parc 2	$n_{lin1}$	55	
Relació de transformació del transformador HVDC	$m_2$	0,22	
Tensió de fase abans del convertidor HVDC	$V_{fasegran}$	150	[kV]
Resistència d'acoblament al convertidor HVDC	$R_{acobgran}$	0,15	[ $\Omega$ ]
Inductància d'acoblament al convertidor HVDC	$L_{acobgran}$	0	[mH]

Taula 7.3: Paràmetres de les xarxes internes i dels convertidors VSC dels parcs eòlics  
Font: Pròpia

Tot seguit, s'exposa la taula 7.4, on es detallen els paràmetres de la xarxa de corrent altern de la costa. Aquests paràmetres també han estat extrets de [11] i [24].

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
Tensió de fase de la xarxa alterna	$V_{fcosta}$	220	[kV]
Resistència d'acoblament a la xarxa alterna	$R_{acobcosta}$	0,225	[ $\Omega$ ]
Inductància d'acoblament a la xarxa alterna	$L_{acobcosta}$	2,43	[mH]
Freqüència de la xarxa alterna de la costa	$f_{costa}$	50	[Hz]

Taula 7.4: Paràmetres de la xarxa alterna de la costa  
Font: Pròpia

Per últim, a la taula 7.5 es presenten els paràmetres de la xarxa mallada HVDC, dels convertidors HVDC dels parcs i dels *current flow controllers*. Les impedàncies dels cables de la xarxa s'han obtingut de [10] i les característiques del *current flow controller* CA/CC s'han consultat a [4].

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
Potència nominal dels convertidors HVDC	$S_{HVDC}$	550	[MVA]
Tensió nominal de la xarxa HVDC	$E_c$	400	[kV]
Capacitat dels condensadors de la xarxa HVDC	$C_{HVDC}$	1500	[ $\mu$ F]
Intensitat nominal dels conductors	$I$	1500	[A]
Resistència dels conductors	$R_{HVDC}$	0,0095	[ $\Omega$ /km]
Inductància dels conductors	$L_{HVDC}$	2,1110	[mH/km]
Longitud del cable 1	$Km_{c1}$	90	[km]
Longitud del cable 2	$Km_{c2}$	117	[km]
Longitud del cable 3	$Km_{c3}$	203	[km]
Resistència física del <i>current flow controller</i> de resistència variable	$R_{cfc}$	0,6855	[ $\Omega$ ]
Tensió de fase al VSC del <i>current flow controller</i> convertidor CA/CC	$V_{fasecfc}$	320	[kV]
Resistència d'acoblament al transformador del VSC al CFC convertidor CA/CC	$R_{acobcfc}$	0,225	[ $\Omega$ ]
Inductància d'acoblament al transformador del VSC al CFC convertidor CA/CC	$L_{acobcfc}$	2,43	[mH]
Capacitat del condensador del <i>current flow controller</i> convertidor CA/CC	$C_{cfc}$	5200	[ $\mu$ F]
Tensió al bus de corrent continu del <i>current flow controller</i> convertidor CA/CC	$E_{cfc}$	5	[kV]
Resistència interna dels IGBT	$R_{interna}$	1	[m $\Omega$ ]
Resistència d'esmoreïment dels IGBT	$R_{snubber}$	0,1	[M $\Omega$ ]

Taula 7.5: Paràmetres de la xarxa HVDC i dels *current flow controllers*  
Font: Pròpia

### 7.1.2 Paràmetres de control

En primer lloc es presenten a la taula 7.6 els paràmetres del control utilitzats als parcs eòlics. Aquests paràmetres inclouen els utilitzats en els llaços de corrent, el llaç de tensió, la PLL i el control del chopper. Cal mencionar que els paràmetres utilitzats en el disseny de la PLL s'han extret de [9].

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
<i>Damping ratio</i>	$\xi$	0,707	
Constant de temps del llaç de corrent del VSC a la banda de la xarxa	$\tau_{CL}$	1	[ms]
Velocitat angular del llaç de tensió	$\omega_{vl}$	218,88	[rad/s]
Constant de temps del llaç de corrent del VSC a la banda de l'aerogenerador	$\tau_{gen}$	5	[ms]
Tensió màxima al bus de corrent continu	$E_{max}$	7,35	[kV]
Tensió d'activació del chopper	$E_{min}$	7,14	[kV]

Taula 7.6: Paràmetres de control utilitzats als parcs eòlics  
Font: Pròpia

Tot seguit, es detallen els paràmetres utilitzats en el control de la xarxa alterna situada a la costa. Els paràmetres s'exposen a la taula 7.7.

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
<i>Damping ratio</i>	$\xi$	0,707	
Constant de temps del llaç de corrent de la costa	$\tau_{CLcosta}$	1	[ms]
Velocitat angular del llaç de tensió de la costa	$\omega_{vlcosta}$	218,88	[rad/s]

Taula 7.7: Paràmetres de control de la xarxa alterna de la costa  
Font: Pròpia

Finalment, a la taula 7.8, s'exposen els paràmetres utilitzats en el control dels *current flow controllers*. Convé destacar que els paràmetres de control del *current flow controller* ideal i del de resistència variable, s'obtenen a cada instant de la pròpia xarxa HVDC. És per això que tots els paràmetres presentats a la taula 7.8 corresponen al *current flow controller* convertidor CA/CC a excepció dels referits a la modulació PWM. Les constants dels diferents llaços del *current flow controller* convertidor CA/CC s'han extret de [4].

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
<i>Damping ratio</i>	$\xi$	0,707	
Constant proporcional del llaç de corrent del convertidor CA/CC	$K_{pclf}$	0,98	
Constant integral del llaç de corrent del convertidor CA/CC	$K_{iclf}$	5	
Constant proporcional del llaç de tensió del convertidor CA/CC	$K_{pvlf}$	0,0477	
Constant integral del llaç de tensió del convertidor CA/CC	$K_{ivlf}$	0,549	
Freqüència de commutació dels transistors IGBT	$f_{cf}$	1500	[Hz]
Constant proporcional del controlador del Pont en H	$K_{pPH}$	1,26	
Constant integral del controlador del Pont en H	$K_{iPH}$	174,02	

Taula 7.8: Paràmetres de control dels *current flow controllers*  
Font: Pròpia

## 7.2 Resultats de les simulacions

Es realitzen simulacions amb la finalitat de comprovar el correcte funcionament del sistema i d'observar l'impacte dels diferents tipus de *current flow controllers* a la xarxa HVDC. Per aquest fet es simulen 5 xarxes mallades HVDC, amb els seus respectius parcs eòlics i també amb la xarxa de la costa.

La única diferència entre les xarxes HVDC simulades és el tipus de *current flow controller* present. Per concretar, a continuació es presenten les xarxes HVDC simulades:

- Una xarxa HVDC sense *current flow controller*;
- Una xarxa HVDC amb un *current flow controller* ideal;
- Una xarxa HVDC amb un *current flow controller* de resistència variable i;
- Dues xarxes HVDC amb un *current flow controller* convertidor CA/CC. A una de les xarxes el *current flow controller* està situat al Cable 1, segons la figura 5.7a), mentre que a l'altra el CFC es troba al Cable 2, tal i com s'exposa a la figura 5.7b).

Convé recordar que el *current flow controller* ideal i el de resistència variable només es simulen emplaçats al Cable 1, localització mostrada a la figura 5.7a).

Per tal d'obtenir una simulació més realista, es realitzen les simulacions sota un canvi de vent a les turbines eòliques. Les figures 7.1 i 7.2 mostren, en forma de gràfica, les variables dels aerogeneradors. Seguidament, la figura 7.3 presenta les potències i corrents que els parcs eòlics injecten a la xarxa HVDC. D'altra banda, les figures 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 i 7.9 exposen les variables de la xarxa HVDC. Finalment, a les figures 7.10 i 7.11 s'evidencia el comportament de les variables dels dos *current flow controllers* convertidors CA/CC.

Els resultats observats a les gràfiques es comenten a la secció 7.3.

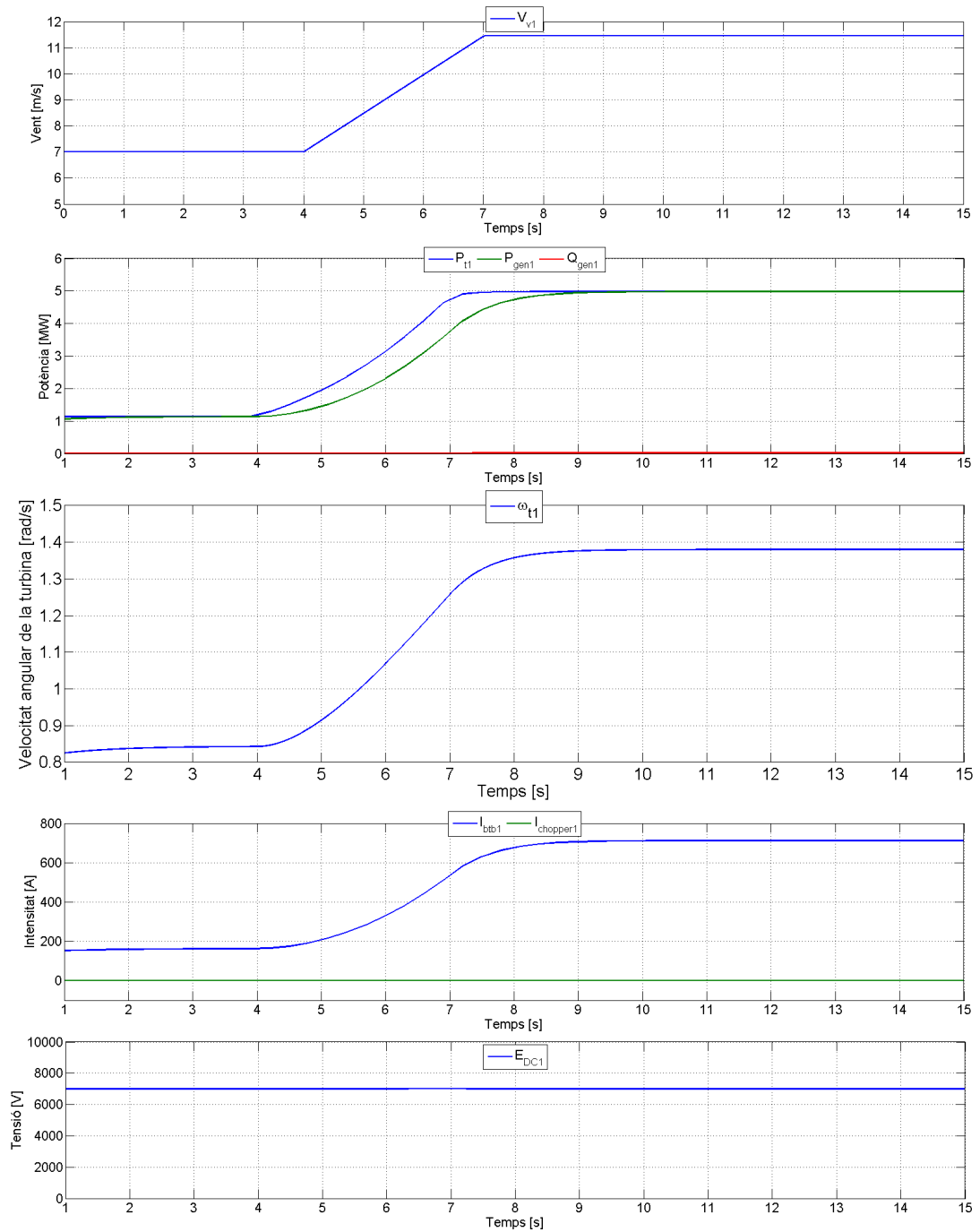


Figura 7.1: Variables del parc eòlic 1  
Font: Pròpia

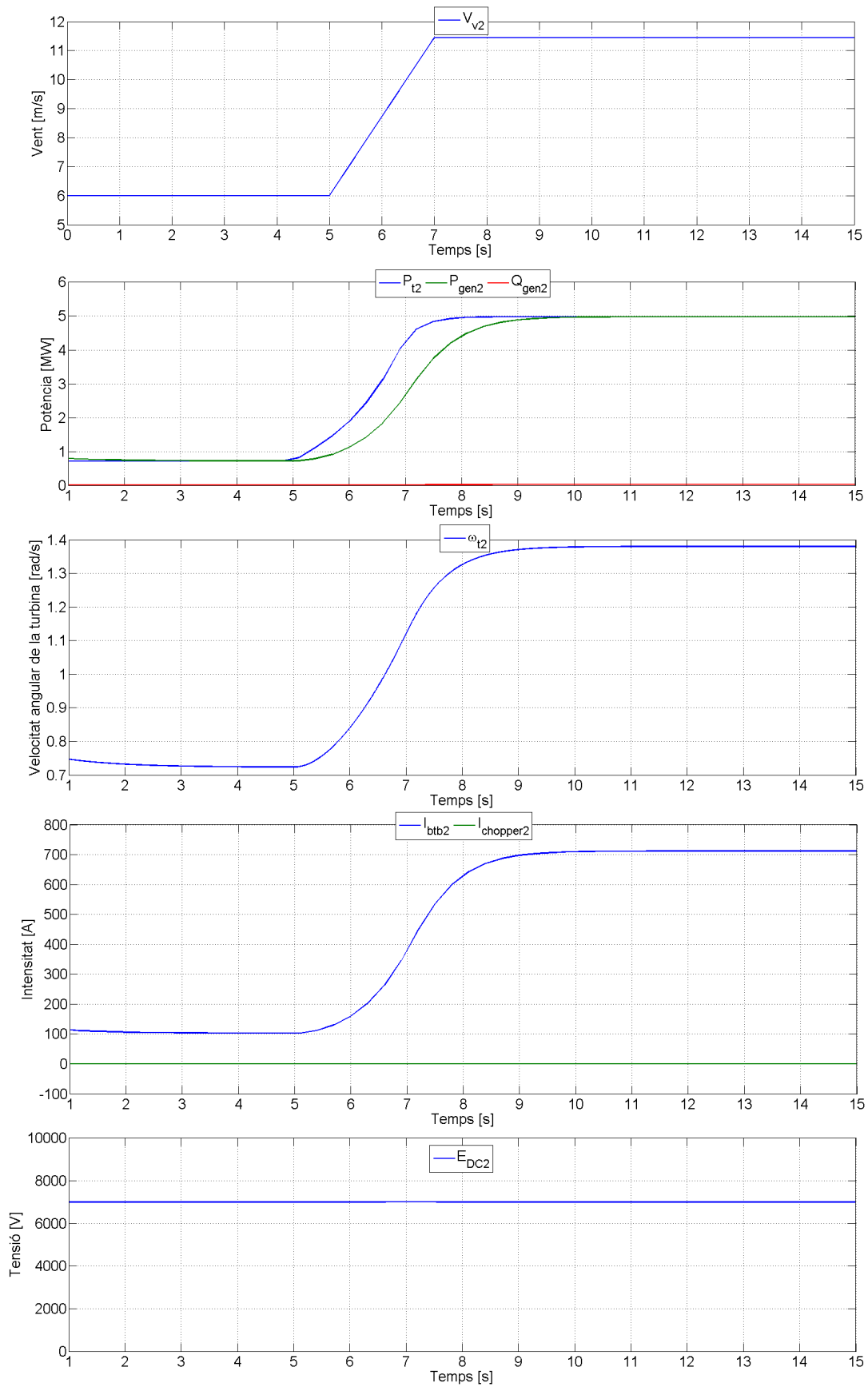


Figura 7.2: Variables del parc eòlic 2  
Font: Pròpia

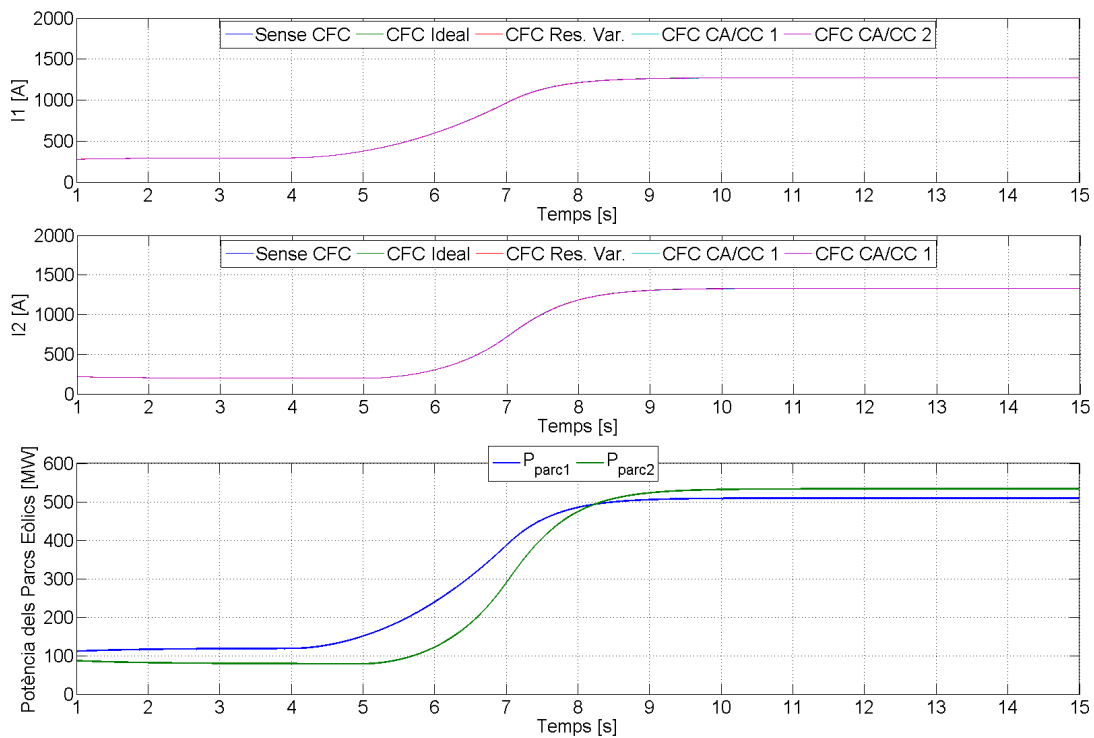


Figura 7.3: Potències i corrents injectats a la xarxa HVDC  
Font: Pròpia

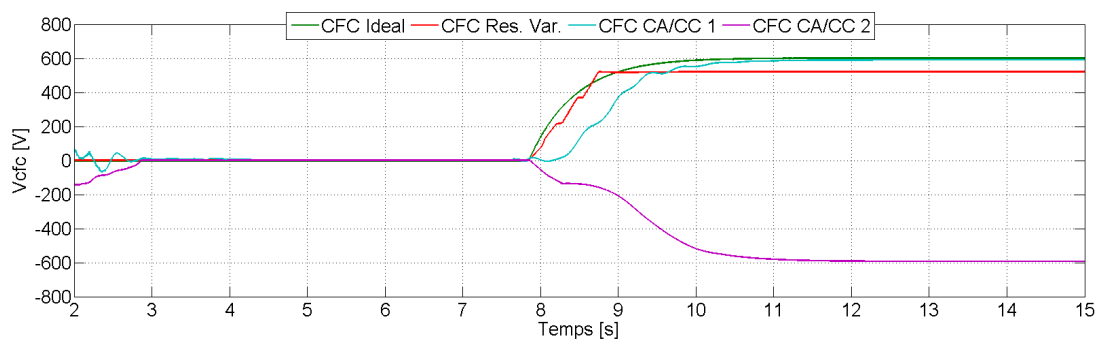


Figura 7.4: Tensió aplicada pel *current flow controller*  
Font: Pròpia



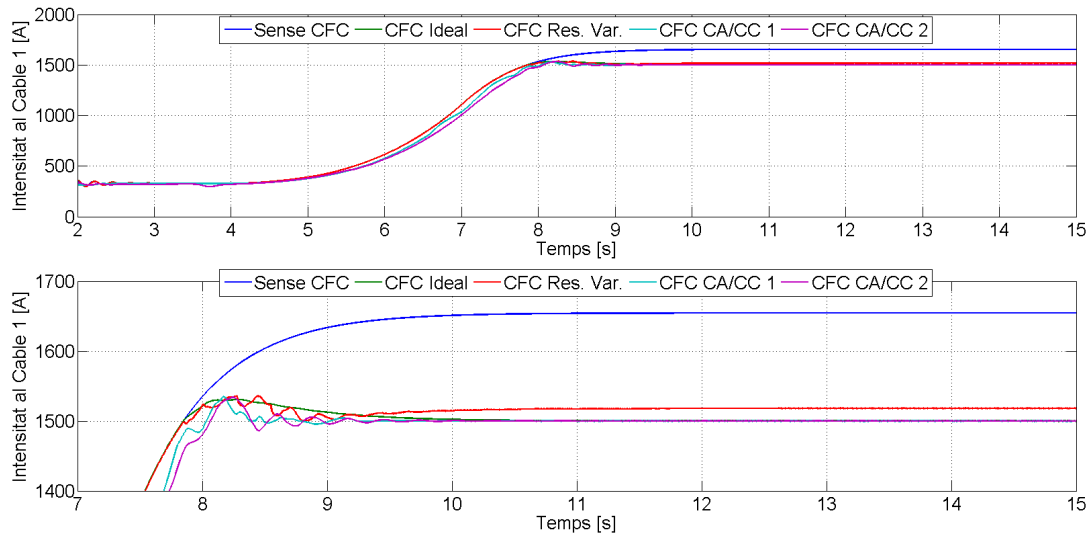


Figura 7.5: Intensitat al cable 1  
Font: Pròpia

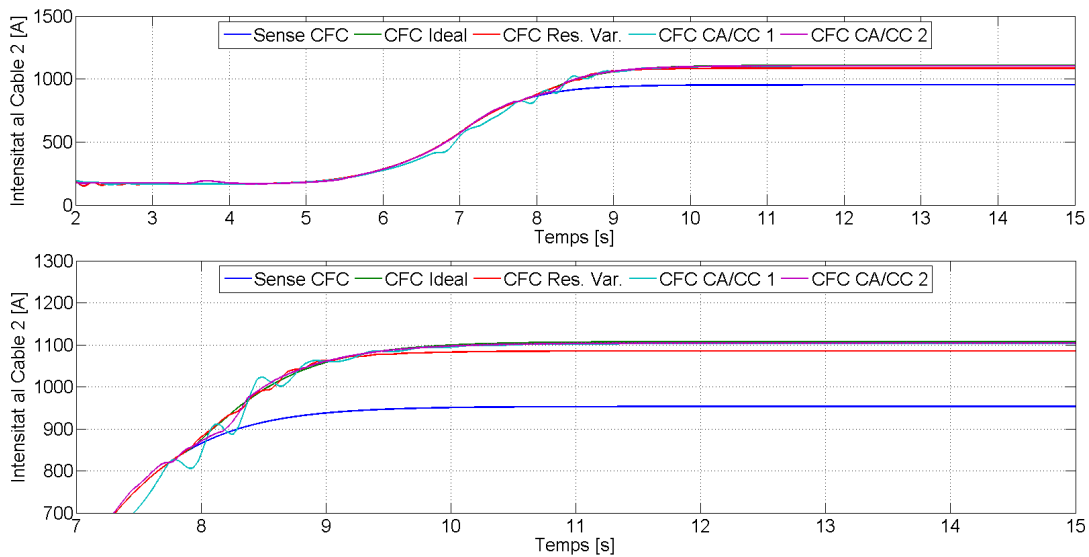


Figura 7.6: Intensitat al cable 2  
Font: Pròpia

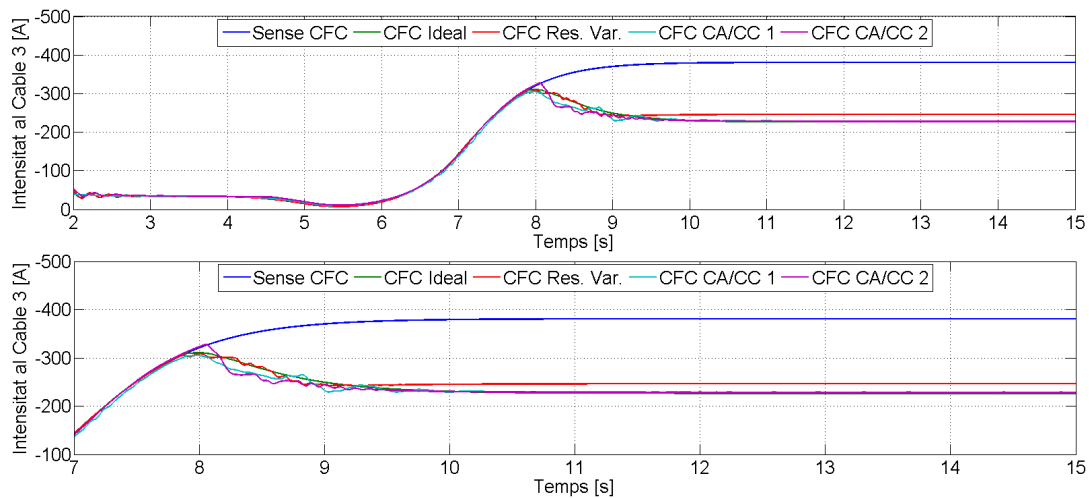


Figura 7.7: Intensitat al cable 3  
Font: Pròpia

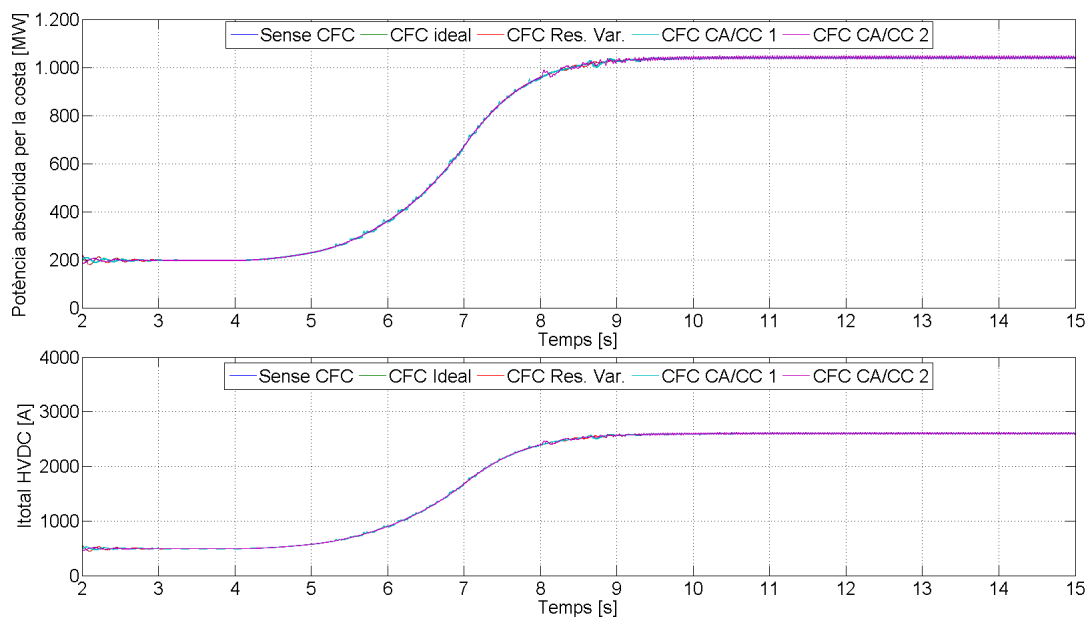


Figura 7.8: Potència i intensitat total absorbida pel convertidor HVDC de la costa  
Font: Pròpia

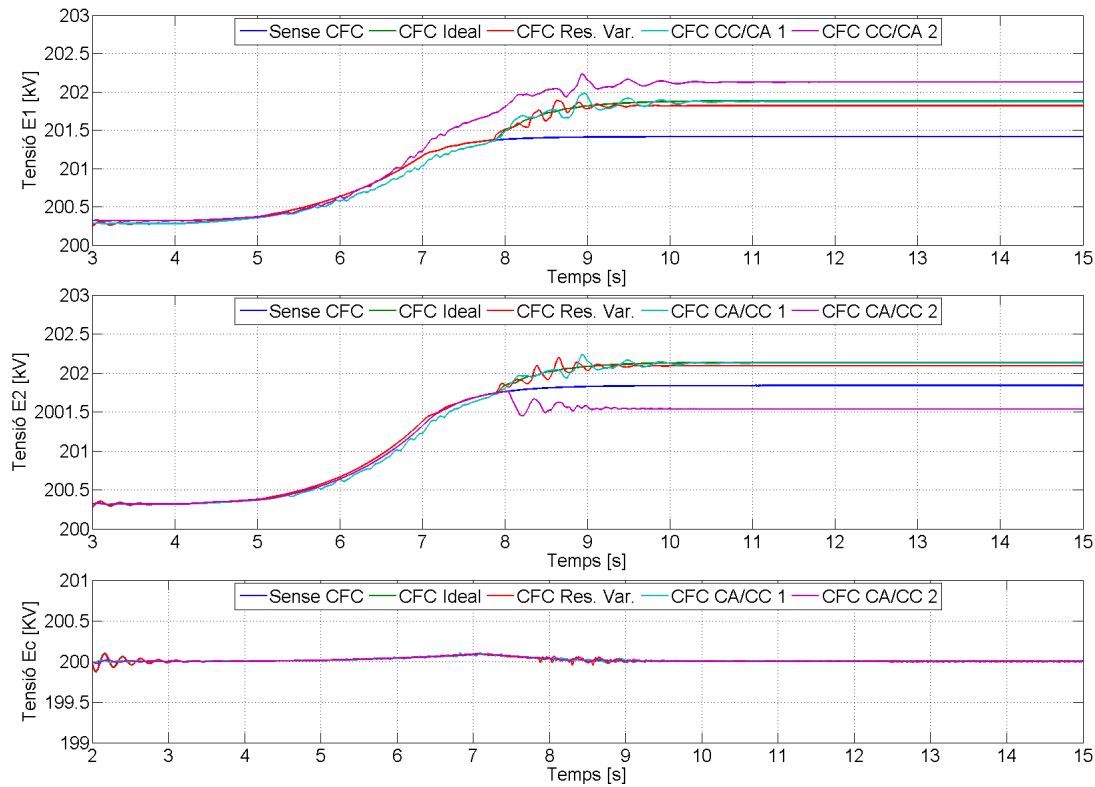


Figura 7.9: Tensions a la xarxa HVDC  
Font: Pròpia

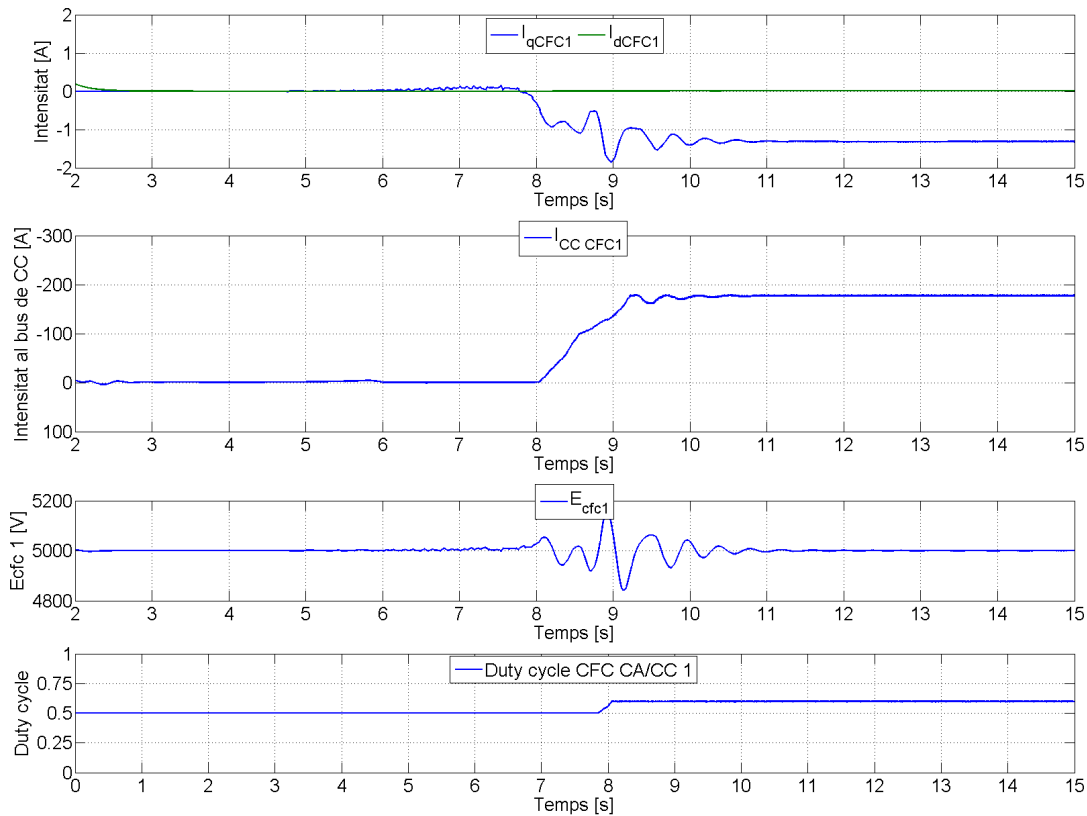


Figura 7.10: Variables del CFC convertidor CA/CC situat al cable 1  
Font: Pròpia

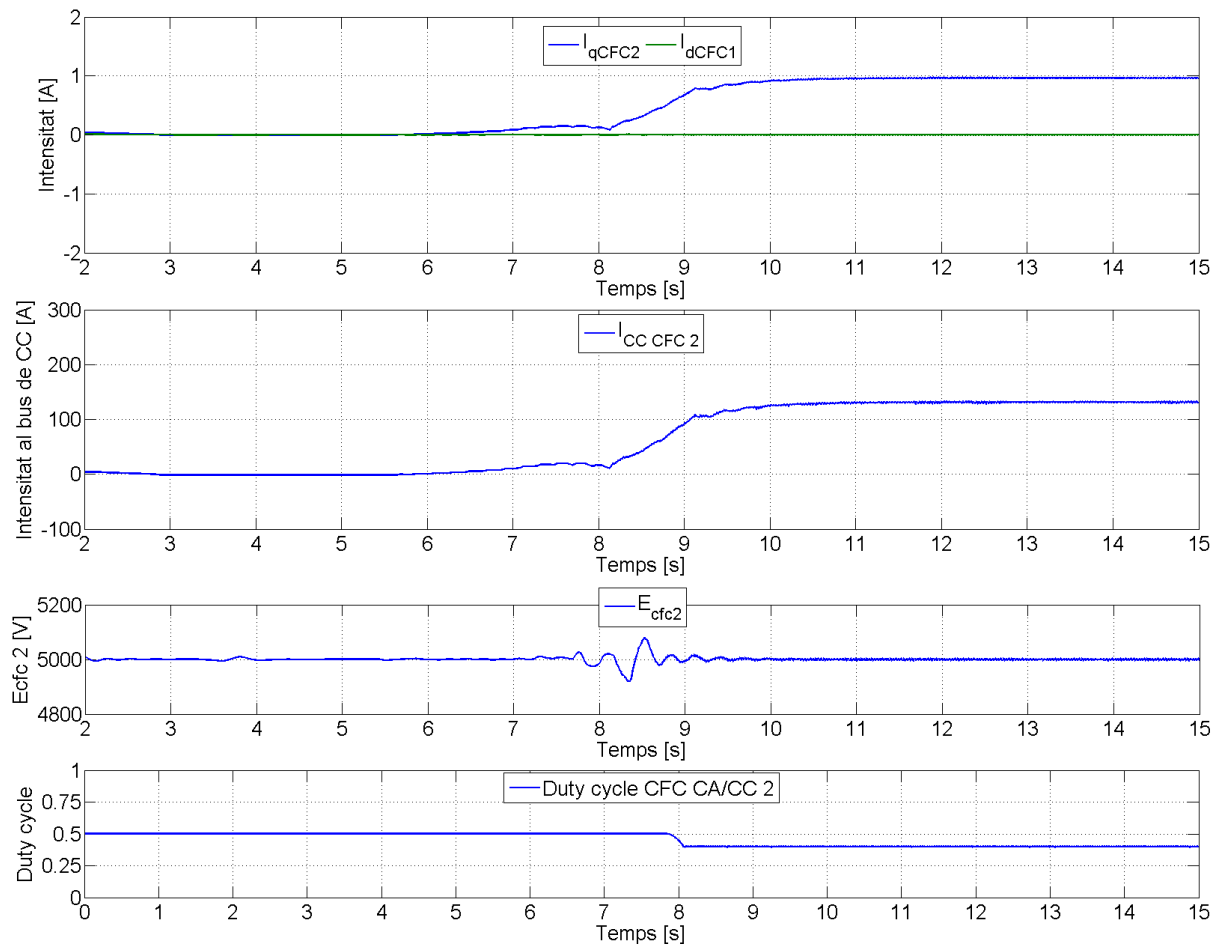


Figura 7.11: Variables del CFC convertidor CA/CC situat al cable 2  
Font: Pròpia

### 7.3 Observacions

En primer lloc, a les figures 7.1 i 7.2 es poden veure les variables de les turbines eòliques. Al gràfic superior es pot veure la velocitat del vent que arriba a les pales dels aerogeneradors. S'evidencia que la potència captada per les turbines augmenta a mesura que ho fa la velocitat del vent, així com també ho fan les potències actives produïdes pels PMSGs. Les potències reactives són 0 ja que es fixen mitjançant el component  $d$  del corrent. Tot seguit, al gràfic central es mostra la velocitat angular de l'eix de la turbina, velocitat que és igual a la del rotor del PMSG atès a l'utilització d'una transmissió directa. S'evidencia que l'eix de la turbina s'accelera quan augmenta el vent però també s'observa que l'eix no reacciona als canvis de vent immediatament. Conseqüentment, l'acceleració de l'eix de la turbina és la causa de la diferència de potències entre la turbina i el PMSG en el transitori. D'altra banda, als dos gràfics inferiors es comprova que les intensitats absorbides pels *back-to-backs* són proporcionals a les potències generades als PMSGs. Addicionalment, es pot veure com la tensió als busos de corrent continu dels *back-to-backs* es manté constant, evidenciant així el seu correcte funcionament. Convé mencionar que com que la tensió al bus de corrent continu no fluctua, el chopper no ha d'actuar i, en conseqüència, el corrent que hi circula és nul.

Les potències i corrents que els parcs eòlics injecten a la xarxa HVDC es poden veure a la figura 7.3. S'observa que aquestes potències augmenten a mesura que ho fa la velocitat del vent, al igual que els corrents. A les gràfiques dels corrents no s'aprecia cap diferència significativa en funció del tipus de *current flow controller* utilitzat a la xarxa HVDC.

Les tensions aplicades pels diferents tipus de *current flow controllers* es presenten a la figura 7.4. S'evidencia que durant els 8 primers segons de la simulació, els *current flow controllers* no apliquen cap diferència de tensió ja que tots els corrents que circulen pels cables de la xarxa són inferiors al corrent nominal. A partir del segon 8 el corrent que circula pel cable 1 és superior al nominal, així que els *current flow controllers* comencen a aplicar tensió i limiten aquest corrent. Addicionalment, s'aprecia que el *current flow controller* ideal i el convertidor CA/CC situat al cable 1 apliquen la mateixa tensió, uns 600 V. Contràriament, el CFC de resistència variable aplica una tensió una mica inferior, d'uns 520 V aproximadament, cosa que, com s'observa a la figura 7.5, fa que el corrent que circula pel cable 1 sigui lleugerament superior al nominal. Pel que fa al CFC convertidor CC/CA situat al cable 2, aquest aplica una tensió igual que l'aplicada pel CFC ideal i l'altre convertidor, però de signe oposat. Com que la xarxa HVDC només està composta d'una malla, és coherent que aquesta tensió sigui igual i oposada a l'aplicada al cable 1 degut a la segona llei de Kirchoff.

Les figures 7.5, 7.6 i 7.7 corresponen als corrents que circulen pels principals cables de la xarxa HVDC. Concretament la figura 7.5 correspon al cable 1 de la xarxa, de manera que es pot observar com els *current flow controllers* limiten el corrent que circula a 1500A, el corrent nominal dels cables. Les figures 7.6 i 7.7 mostren els corrents que circulen pels cables 2 i 3 respectivament. En aquests cables la intensitat del corrent no és crítica, però s'evidencia l'efecte dels diferents CFCs sobre els corrents de la xarxa. Com que la xarxa HVDC només consta d'una malla, es pot veure que una disminució del corrent que circula al cable 1 comporta un augment de corrent al cable 2; al cable 3 només circula la diferència entre els dos corrents anteriors.

En relació al funcionament dels diferents *current flow controllers*, s'observa que tots limiten el corrent amb exactitud excepte el *current flow controller* de resistència variable que presenta un error d'uns 20 A. L'error produït al CFC de resistència variable probablement es produeix per les resistències dels IGBTs i pel sistema de control utilitzat. En primer lloc, el control, que es fa en llaç obert, calcula el *duty cycle* necessari per consignar els transistors. Seguidament, els transistors reben les consignes del sistema de control i commuten en conseqüència però, a causa de la seva resistència, el valor de corrent que limiten no és exactament el mateix que el consignat. Així, si s'implementés un sistema de control en llaç tancat, es podria detectar que el corrent real no és el mateix que el consignat i el control podria actuar per solucionar-ho, com en el cas dels CFCs convertidors CA/CC. És cert que el CFC ideal presenta el mateix control que el de resistència variable però com que és capaç de limitar amb precisió i sense errors el corrent, no necessita un control en llaç tancat.

A la figura 7.8 s'observa que el corrent total que circula per la xarxa HVDC només depèn de la potència subministrada pels parcs eòlics i, en conseqüència, de la velocitat del vent. Els *current flow controllers* no tenen cap impacte en el corrent total de la xarxa.

Les tensions a la xarxa HVDC es mostren a la figura 7.9. Cal remarcar que, a causa del model de xarxa HVDC utilitzat, aquestes tensions són la meitat de la tensió total de la xarxa HVDC, tensió que té un valor de 400 kV. A les dues gràfiques superiors es poden observar diferències a les tensions en funció del tipus de *current flow controller* utilitzat, mentre que a la gràfica inferior no s'observen diferències significatives entre tensions. Les diferències entre les tensions de la xarxa HVDC només apareixen als nodes controlats pels convertidors HVDC dels parcs eòlics i, a més, aquestes tensions acaben tenint un valor superior a 200 kV. En canvi, la tensió controlada per l'estació convertidora de la costa es manté constant, en tots els casos a 200 kV. Convé recordar que, tal i com s'explica a la secció 6.3, els convertidors HVDC dels parcs eòlics presenten un sistema de control simplificat ja que no controlen la tensió de la xarxa HVDC i, probablement, aquest sigui l'origen de la variació entre tensions. És a dir, els convertidors HVDC dels parcs eòlics subministren a la xarxa HVDC tota la potència que els hi arriba. Per injectar més potència és necessita més corrent i, per tant, els convertidors augmenten la tensió per a que circuli més corrent a la xarxa HVDC.

Finalment, a les figures 7.10 i 7.11 s'exposen les variables dels CFC convertidors CA/CC. Als gràfics superiors es presenten els corrents que circulen pels VSCs en referència  $qd0$ . De la mateixa manera que en els aerogeneradors, el component  $d$  del corrent és fixa a 0 per eliminar la potència reactiva. Seguidament, s'evidencien els corrents que circulen entre els Ponts en H i els convertidors VSC. Es pot apreciar com pràcticament no circulen corrents pels CFCs fins al segon 8, quan aquests comencen a aplicar tensions a la xarxa HVDC. També s'observa que els corrents que circulen pels CFCs són similars però amb diferent signe atès que els *current flow controllers* apliquen tensions iguals però de signe oposat. Després, s'exposen els gràfics que mostren les tensions als busos de corrent continu, tensions que es mantenen constants al llarg de tota la simulació gràcies a la correcta actuació dels VSCs. Per últim, als gràfics inferiors, es poden veure els *duty cycles* que els sistemes de control utilitzen per governar als transistors. Als gràfics dels *duty cycles* es veu reflectit que els CFCs convertidors CA/CC no s'activen fins, aproximadament, el segon 8 de la simulació.

# Capítol 8

## Estudi econòmic

Al següent capítol es realitza una aproximació econòmica del cost de la realització del projecte presentat. El pressupost es desglossa en dos grans blocs: el cost de l'estudi realitzat al present treball de final de grau i el cost d'execució del projecte en si mateix.

Cal mencionar que, un factor crucial a l'hora d'estudiar la viabilitat econòmica del projecte és l'estat del mercat i l'economia a escala global perquè, aquest factor, pot fer variar àmpliament els preus dels materials i de les operacions necessàries per executar el projecte. Tot i això, es discutible que un projecte d'aquest caire hagi de ser rentable econòmicament, ja que presenta moltes possibilitats de millorar les condicions de vida de les persones, com ara acabant o pal·liant amb la pobresa energètica i, contribuint a frenar el canvi climàtic, entre d'altres.

Es per això que, en el present capítol, no es contempla la viabilitat econòmica del projecte i, només es detallen les despeses necessàries per poder construir i posar en funcionament el sistema estudiat, incloent l'estudi previ.

### 8.1 Cost de l'estudi

El cost de l'estudi inclou el cost del maquinari utilitzat, el del programari i també el de la mà d'obra necessària.

La taula 8.1 recull les partides del maquinari i del programari utilitzat en l'elaboració del present treball de final de grau. Totes les dades d'aquesta taula han sigut extretes de proveïdors d'equips informàtics i de les pàgines web dels fabricants.

Concepte	Preu unitari [€]	Unitats	Cost total [€]
Ordinador	527,67	1	527,67
Perifèrics - Ratolí	9,95	1	9,95
Perifèrics - Teclat	14,87	1	14,87
MATLAB amb SimPowerSystems	2.850,00	1	2.850,00
<b>Total</b>			<b>3.402,49</b>

Taula 8.1: Preu del maquinari i programari  
Font: Pròpia

D'altra banda la taula 8.2 recull el cost de la mà d'obra utilitzada. Per tal d'estimar aquest cost, s'ha considerat que una jornada laboral de 8 hores suposa un cost de 900 €. La taula 8.2, a més, justifica el cost de la mà d'obra desglossant-lo en funció del temps dedicat a cadascuna de les parts de l'estudi.

Finalment, la taula 8.3 mostra el cost total de l'estudi realitzat, contemplant els tres factors anteriors: programari, maquinari i mà d'obra.

Concepte	Preu per hora [€/h]	Hores [h]	Cost total [€]
Formació	112,50	20	2.250,00
Estudi i disseny	112,50	240	27.000,00
Modelització i programació	112,50	190	21.375,00
Simulació	112,50	40	4.500,00
Redacció	112,50	50	5.625,00
<b>Total</b>		<b>540</b>	<b>60.750,00</b>

Taula 8.2: Preu de la mà d'obra  
Font: Pròpia

Concepte	Cost [€]
Maquinari i programari	3.402,49
Mà d'obra	60.750,00
<b>Total</b>	<b>64.152,49</b>

Taula 8.3: Cost total de l'estudi  
Font: Pròpia

## 8.2 Cost de l'execució

El cost de l'execució del projecte inclou tots aquells costos que sorgirien en el cas de voler implementar el sistema estudiat. Entre altres conceptes, el cost de l'execució, inclou el cost de la construcció i la posada en funcionament de dos parcs eòlics, el cost de la transmissió HVDC i el cost dels convertidors utilitzats.

El cost total de l'execució del projecte es pot veure a la taula 8.4, no obstant, els conceptes que apareixen a la taula es troben desglossats a la taula 8.5 i a la taula 8.7. A més, per calcular el cost total, es consideren també diversos costos relacionats amb la mà d'obra i els estudis necessaris per poder implementar el projecte, com per exemple el cost d'una avaluació d'impacte ambiental.

Concepte	Cost [€]
Parcs eòlics	1.462.000.000,00
Xarxa HVDC	930.200.000,00
Avaluació d'impacte ambiental	750.000,00
Inspecció del fons marí	1.600.000,00
Mà d'obra	7.500.000,00
<b>Total</b>	<b>2.402.050.000,00</b>

Taula 8.4: Cost total de l'execució del projecte  
Font: Pròpia



### 8.2.1 Cost d'un parc eòlic marí

Per tal d'estimar el cost d'un parc eòlic marí s'ha agafat com a referent el parc eòlic, actualment en construcció, FloCan 5 situat a la costa sud-est de Gran Canària. Aquest parc eòlic estarà situat a uns 3,7 km de la costa, però utilitzarà el mateix tipus de turbines i generadors que els considerats al sistema estudiat, de manera que es pot agafar el seu cost com a referent.

El parc eòlic FloCan 5 va rebre 34 milions d'euros de la Unió Europea per la seva construcció i posada en funcionament [17]. A causa de que aquest futur parc eòlic disposarà de 5 turbines com la modelitzada, es pot considerar un cost de 6,8 milions d'euros per cada aerogenerador.

Seguint les consideracions anteriors, el cost d'implantació dels dos parcs eòlics marins es mostra a la taula 8.5.

Concepte	Preu unitari [€]	Unitats per parc	Cost total del parc [€]
Aerogenerador	6.800.000,00	105	714.000.000,00
Aerogenerador	6.800.000,00	110	748.000.000,00
<b>Total</b>			<b>1.462.000.000,00</b>

Taula 8.5: Preu dels parcs eòlics  
Font: Pròpia

### 8.2.2 Cost de la transmissió HVDC

El cost d'una transmissió HVDC depèn d'una gran varietat de factors, com per exemple:

- La potència màxima que es pot transmetre;
- El nivell de tensió a la xarxa HVDC;
- El medi de transmissió. Per exemple, si els cables són submarins;
- Les condicions ambientals i;
- Les normatives i lleis relatives a la salut i seguretat, al medi ambient, etc.

Adicionalment i com s'ha mencionat al capítol 2, una mala gestió de l'energia a la xarxa HVDC pot acurtar la vida de la mateixa i fer que no s'amortitzi el cost de la inversió.

En qualsevol cas, per estimar el cost de la implantació d'una xarxa HVDC, s'ha considerat que una estació convertidora HVDC té un cost d'uns 236 milions d'euros, i que cada cable de la connexió HVDC té un cost de 235.000 euros per kilòmetre [23]. Cal remarcar que, per cada parell d'estacions convertidores, es requereixen dos cables per connectar-les.

Un altre factor a considerar és la presència de *current flow controllers*. Els *current flow controllers* s'acostumen a situar a la costa per tal de reduir costos però, en funció del tipus del *current flow controller* utilitzat, el preu podria variar significativament. A més, al tractar-se d'una tecnologia nova de la qual només existeixen prototips, és difícil donar una preu acurat de la mateixa. En el present estudi econòmic, s'ha considerat el cas més crític, és a dir, un *current flow controller* convertidor CA/CC, de manera que s'aproxima el seu preu al d'una vuitena part d'una estació convertidora HVDC.

Finalment, el cost dels cables es mostra a la taula 8.6 i el cost total de la transmissió HVDC es desglossa a la taula 8.7.

Concepte	Preu per km [€/km]	Distància [km]	Cost total [€]
Cable 1	235.000,00	90	21.150.000,00
Cable 2	235.000,00	203	47.705.000,00
Cable 3	235.000,00	117	27.495.000,00
<b>Total (6 cables)</b>			<b>192.700.000,00</b>

Taula 8.6: Cost dels cables de la xarxa HVDC

Font: Pròpia

Concepte	Preu unitari [€]	Unitats	Cost total [€]
Estacions convertidores	236.000.000,00	3	708.000.000,00
Current flow controller	29.500.000,00	1	29.500.000,00
Total cables	192.700.000,00	1	192.700.000,00
<b>Total</b>			<b>930.200.000,00</b>

Taula 8.7: Cost total de la xarxa HVDC

Font: Pròpia

## Capítol 9

# Avaluació de l'impacte ambiental

Aquest capítol presenta una avaluació de l'impacte ambiental que pot tenir la implantació del sistema estudiat. L'avaluació de l'impacte ambiental considera l'impacte generat pels parcs eòlics i, d'altra banda, també analitza l'impacte sobre el medi ambient de les xarxes HVDC formades per cables submarins.

L'energia eòlica acostuma a ser considerada com una font d'energia respectuosa amb el medi ambient, no obstant, no és una energia lliure d'emissions. La producció de les pales dels aerogeneradors, la torre, la gòndola i la resta de components components, l'obtenció de les matèries primeres utilitzades en la fabricació, i el transport dels equips consumeixen recursos energètics. Això vol dir que es produeixen emissions sempre i quan, els recursos energètics consumits, es basin en combustibles fòssils. Aquest tipus d'emissions s'anomenen emissions indirectes [1] i queden reflectides a les declaracions ambientals dels productes.

Actualment un significatiu número de fabricants opta per realitzar declaracions ambientals dels seus productes, també conegudes pel seu nom en anglés: *Environmental Product Declaration* (EPD). Aquestes declaracions donen unes dades més acurades de l'impacte ambiental que té un determinat producte al llarg de tot el seu cicle de vida ja que contempnen les emissions indirectes. Els anàlisis del cicle de vida dels productes són regulats per la sèrie de normes ISO 14040.

L'anàlisi del cicle de vida d'un producte permet determinar totes les emissions i la contaminació que produeix el producte, des de l'extracció de la matèria prima per fabricar-lo fins al procés de reciclatge o desmantellament al final de la seva vida. Aquesta metodologia permet veure i estudiar la interacció real entre el producte analitzat i el medi ambient [15].

No obstant, la metodologia descrita només quantifica l'impacte ambiental en quant a materials i emissions i no considera l'impacte a l'ecosistema, l'efecte de les radiacions electromagnètiques, el soroll, l'impacte visual o el risc d'accidents [15]. Es per això que el present capítol avalua l'impacte ambiental des d'un punt de vista de l'ecosistema i la societat.

A l'apartat 9.1 s'exposen fets que s'haurien de considerar en el disseny del sistema per tal de minimitzar l'impacte ambiental i la petjada ecològica. En contrast, a l'apartat 9.2 s'exposen certes consideracions que s'haurien de tenir en compte en el moment de decidir l'emplaçament del parc eòlic i d'organitzar la seva instal·lació des d'un punt de vista mediambiental. A més, l'apartat 9.2 explica com podria afectar a l'ecosistema marí la implantació d'un parc eòlic i una xarxa HVDC.

## 9.1 Consideracions durant el disseny

Durant el disseny del parc eòlic, les turbines, la xarxa HVDC i tots els components i maquinària que componen aquests elements, s'han de considerar els següents requisits per tal de minimitzar els efectes negatius que es puguin produir al medi ambient.

Com a norma general, els productes que componen els aerogeneradors i la xarxa HVDC, haurien de complir la Directiva RAEE (2012/19/UE), relativa als residus d'aparells elèctrics i electrònics, i la Directiva RoHS II (2011/65/UE), relativa a l'utilització de substàncies perilloses en aparells elèctrics i electrònics.

### 9.1.1 Emissions electromagnètiques

Al moment de dissenyar un component que es susceptible d'emetre o de veure's afectat per radiacions electromagnètiques, molts fabricants només es basen en la poc restrictiva Directiva de Compatibilitat Electromagnètica (2014/30/UE) per assegurar que els seus components no presenten cap risc per l'entorn.

Per tal d'assegurar que els parcs eòlics i la xarxa HVDC no generen cap radiació electromagnètica que pugui suposar un perill per les persones o el medi ambient es recomanable realitzar assajos segons una norma en concret. Pel que fa a la fauna i a la flora, no hi ha cap norma harmonitzada que limiti l'emissió de radiacions electromagnètiques, no obstant, la norma EN 62311, una norma harmonitzada de la Directiva de Baixa Tensió (2014/35/UE), limita l'exposició de persones a camps electromagnètics. Al no existir cap norma específica, es recomanable assajar i dissenyar els equips segons la norma EN 62311 per tenir una certa evidència de que, ni la instal·lació, ni els components, suposaran un perill per l'ecosistema en aquest àmbit.

### 9.1.2 Vibracions, soroll i impacte visual

D'una banda, la xarxa HVDC no produeix cap tipus de vibració o soroll. A més, al fer-se amb cables submarins, l'impacte visual de la mateix és nul.

En el cas del parcs eòlics marins, al estar situats molt lluny de la costa, l'impacte visual que produeixen també és negligible. Pel que fa les vibracions, l'únic element que pot produir vibracions són els elements mòbils situats a la gòndola i les pales. Aquests elements es troben subjectats per la torre de l'aerogenerador, que evita que les vibracions produïdes es transmetin al mar, evitant així que afectin a l'ecosistema en cas de ser significatives.

En relació al soroll produït pel parc eòlic, aquest sí que pot ser significatiu. Principalment el soroll d'un aerogenerador es produeix perquè les pales tallen el vent quan giren i, a més velocitat, aquest soroll augmenta [15]. Aquest tipus de soroll, anomenat soroll aerodinàmic, no es pot reduir i s'ha d'estudiar per veure si pot afectar negativament al medi ambient en funció de l'emplaçament del parc eòlic.

Algunes consideracions a tenir en compte durant el disseny dels aerogeneradors es poden obtenir de la Directiva de Màquines (2006/42/CE). Segons aquesta Directiva, uns nivells de vibracions inferiors a  $2,5 \text{ m/s}^2$  i de soroll inferiors a 70 dBA acostumen a ser adequats per a la gran majoria de màquines.

### 9.1.3 Riscos ambientals

Durant el funcionament normal d'un parc eòlic poden produir-se accidentalment algunes situacions que poden afectar negativament al medi ambient. Un exemple d'aquest tipus de situacions podria ser que caigués un raig a un dels aerogeneradors, i això causés un incendi. Aquests accidents s'han de tenir en compte durant el disseny per tal de prevenir-los i minimitzar l'efecte negatiu que puguin tenir, tant per les persones com pel medi ambient.

A continuació es detallen situacions que poden passar per casualitat però que, el cas d'ocórrer, produirien un impacte mediambiental significatiu:

- **Incendi:** Un incendi es pot produir si cau un raig a un aerogenerador o si el PMSG es sobreescalfa molt. El principal efecte d'un incendi seria una gran emissió de diòxid de carboni, i altres gasos derivats de la combustió, a l'atmosfera. A més, quan un component es crema, es produeix un residu sòlid que podria contaminar el mar.
- **Vessament de substàncies lubricants o combustibles:** Aquesta situació pot originar-se al realitzar operacions de manteniment. Accidentalment, poden vessar-se els lubricants utilitzats en els aerogeneradors o també, el combustible utilitzat en les embarcacions que utilitzen els operaris per desplaçar-se fins al parc eòlic. Un accident d'aquestes característiques afectaria molt negativament a la flora i a la fauna del fons marí i, fins i tot, podria arribar a destruir l'ecosistema local.
- **Vessament de formigó:** Durant la construcció de la instal·lació, o durant operacions de reparació de les cimentacions del parc eòlic, pot vessar-se accidentalment formigó o alguna altra substància similar. Principalment, la flora és qui es veuria més afectada per un accident d'aquest caire.

## 9.2 Impacte durant la implementació

Les consideracions detallades a continuació s'han de tenir en compte al decidir l'emplaçament del parc eòlic i la xarxa HVDC. Aquestes consideracions, a diferència de les exposades anteriorment, són de caire més logístic i moltes requereixen d'un estudi previ del lloc de la instal·lació.

### 9.2.1 Fase d'instal·lació

Durant la construcció i la instal·lació d'un parc eòlic marí, el fons marí es veu molt afectat. Les cimentacions necessàries per instal·lar els aerogeneradors, les plataformes corresponents i l'excavació de les rases necessàries per dipositar dels conductors de la xarxa HVDC, són algunes de les operacions que poden afectar greument a l'ecosistema marí.

És possible recuperar la flora malmesa durant la instal·lació en un temps relativament curt però, cal tenir especial cura quan el llit marí és l'hàbitat d'alguna espècie de flora o fauna protegida, com es el cas del corall. En aquest casos, seria imperatiu evitar aquesta zona o trobar una ruta alternativa per on instal·lar els cables de la transmissió.

La instal·lació del parc eòlic i de la xarxa HVDC requereix la utilització de maquinària pesada i d'embarcacions grans, la qual cosa pot suposar unes emissions considerables de gasos contaminants, com per exemple de diòxid de carboni.

Adicionalment, el soroll produït durant la instal·lació pot ser significatiu i podria afectar negativament a la fauna que habita el fons marí. És per això que, durant la fase d'instal·lació, s'han de prendre totes les mesures necessàries per tal de minimitzar el soroll. Si és possible, també s'haurien de reduir al mínim les vibracions produïdes durant la instal·lació si aquestes poden afectar negativament a l'entorn.

### 9.2.2 Fase d'operació

La instal·lació de parcs eòlics marins pot interferir amb l'activitat pesquera i la circulació d'embarcacions i avionetes. Cal realitzar un estudi exhaustiu sobre com l'emplaçament del parc eòlic pot entrar en conflicte amb l'activitat pesquera i amb les activitats que es realitzen al litoral. També s'hauria d'estudiar si l'emplaçament del parc podria afectar a rutes de transport marítimes i aèries. En qualsevol cas, es molt recomanable la instal·lació de dispositius d'advertència lluminosos als aerogeneradors. Aquests dispositius poden evitar xocs amb embarcacions i avionetes, evitant així accidents i prevenint també de possibles xocs amb embarcacions que transportin substàncies tòxiques o perilloses.

Per tal d'evitar xocs dels ocells amb les pales dels aerogeneradors, al decidir la localització del parc eòlic, cal tenir en compte les rutes de les diferents aus migratòries. Addicionalment, cal considerar les rutes dels peixos i altres animals marins amb la finalitat de minimitzar la interferència a l'ecosistema marí. És imperatiu no instal·lar parcs eòlics a zones protegides o considerades patrimoni cultural per la seva diversitat de flora i fauna.

Pel que fa a les emissions, els aerogeneradors produeixen electricitat sense emetre cap gas a l'atmosfera, només amb la força del vent. La instal·lació d'aerogeneradors i de parcs eòlics podria servir per abandonar els combustibles fòssils, especialment els més contaminants com el carbó, i reduir així el diòxid de carboni emès a l'atmosfera.

Per últim, i com s'ha mencionat a 9.1.2, el soroll produït pels aerogeneradors del parc eòlic pot arribar a ser significatiu. Caldria realitzar un estudi sobre si els nivells de soroll produït poden ser perjudicials per la fauna i la flora i, si fos necessari, prendre mesures al respecte.

### 9.2.3 Fase de desmantellament

La vida útil d'un parc eòlic és d'uns 20 a un 30 anys. La fase de desmantellament no es especialment complicada però, al igual que la fase d'instal·lació, pot requerir de maquinària contaminant i pot afectar al fons marí. Per tal d'alterar el mínim l'ecosistema, cal tenir en compte les consideracions detallades a la secció 9.2.1 i, a més, cal realitzar un estudi meticulós sobre com realitzar el desmantellament de forma adequada.

A més, es extremadament recomanable realitzar un estudi sobre els materials que formen el parc eòlic i la xarxa HVDC. Un estudi detallat pot revelar quins dels materials utilitzats es poden reciclar o reutilitzar, minimitzant així els residus produïts pel desmantellament.

# Capítol 10

## Conclusions

### 10.1 Contribucions

En el present TFG s'han proposat diferents mètodes per tal de controlar el corrent que circula a xarxes mallades HVDC. Atès que es poden implementar una elevada quantitat de xarxes HVDC, s'ha considerat una xarxa HVDC multiterminal formada únicament per una malla i tres estacions convertidores. La xarxa HVDC modelitzada connecta dos parcs eòlics marins, situats a diferents emplaçaments, amb la xarxa elèctrica de la costa.

En primer lloc s'ha realitzat el model d'un aerogenerador controlat per dos VSCs connectats en *back-to-back*. Aquest model ha servit per estudiar el funcionament i el control dels convertidors VSCs i d'una turbina eòlica. A més, s'ha extrapolat el comportament de l'aerogenerador modelitzat per tal de realitzar el model agregat d'un parc eòlic amb la seva respectiva estació convertidora. A continuació, s'ha seguit el mateix procediment per modelitzar una altra turbina i un segon parc eòlic.

En segon lloc s'ha modelitzat la xarxa mallada HVDC i la xarxa alterna de la costa. Seguidament, s'ha estudiat l'operació de la xarxa HVDC amb la presència de tres tipus diferents de *current flow controllers*. Addicionalment, un dels tipus de *current flow controller*, el convertidor CA/CC, s'ha situat a diversos llocs de la xarxa HVDC per analitzar si un canvi a l'emplaçament del *current flow controller* produiria alguna diferència significativa.

Per últim, s'han sotmès les turbines eòliques a variacions del vent i s'han realitzat simulacions amb la finalitat de comprovar el correcte funcionament del sistema i analitzar l'impacte dels *current flow controllers* a la xarxa HVDC.

### 10.2 Gestió energètica a les xarxes mallades HVDC

L'objectiu principal d'aquest TFG era estudiar les dificultats que presenta la integració de parcs eòlics marins a la xarxa alterna de la costa. Al present treball s'ha demostrat que a una xarxa mallada HVDC la gestió energètica és un factor clau per garantir el correcte funcionament de la xarxa.

Incloure parcs eòlics al model ha evidenciat que el control de la xarxa HVDC està estretament lligat amb la potència subministrada pels parcs eòlics i, en conseqüència, amb la velocitat del vent que reben els aerogeneradors. Expressat amb unes altres paraules, el present estudi ha exposat la importància crucial dels *current flow controllers* quan els parcs eòlics subministren prou potència per a que els corrents que circulen per la xarxa HVDC siguin molt elevats i la puguin malmetre.

Per gestionar els corrents que circulen per la xarxa, s'han proposat diferents tipologies de *current flow controllers*. S'ha observat que els *current flow controllers* estudiats poden limitar els corrents que circulen per la xarxa HVDC evitant així possibles fallades i mal funcionaments. A més s'ha evidenciat que no tots els *current flow controllers* presentats limiten els corrents amb la mateixa precisió, revelant així l'important paper que té el sistema de control utilitzat en el correcte funcionament dels *current flow controllers*.

No obstant, aquest TFG només ha estudiat la gestió energètica a una xarxa mallada senzilla, de manera que en una xarxa mallada HVDC més complexa no serien vàlides algunes de les deduccions exposades al present treball. Tot i això, el funcionament i la modelització dels *current flow controllers*, així com també els dels parcs eòlics, els convertidors VSC i els aerogeneradors, és vàlida per a qualsevol xarxa mallada HVDC i pot ser d'utilitat en futurs estudis. Degut a les limitacions intrínseques de l'estudi realitzat, a la següent secció es proposen algunes possibles millores enfocades a futures línies de treball.

### 10.3 Treballs futurs

Com s'ha mencionat amb anterioritat, l'estudi de la integració de parcs eòlics marins, i d'altres fonts d'energies renovables, a la xarxa mitjançant xarxes mallades HVDC pot ser millorat de diverses maneres. Algunes de les millores proposades impliquen modificar el model, per aconseguir resultats més precisos, però d'altres són simplement línies d'estudis futurs sobre aspectes que el present treball no ha pogut cobrir.

#### Un model basat en VSCs reals

Al capítol 5, es justifica l'elecció d'un model promitjat per tal modelitzar de VSCs. El principal objectiu d'aquesta decisió va ser simplificar la simulació per a que un ordinador la pogués realitzar amb més facilitat. No obstant, la utilització d'un model commutat o real permet obtenir un resultat més acurat sobre el comportament de les variables de la xarxa elèctrica. Per implementar un model real es podrien utilitzar els mateixos sistemes de control que s'han exposat al llarg del treball però afegint una modulació per tal de commutar els IGBT. Convé subratllar que la simulació d'un model real consumeix molts recursos a un ordinador i, és necessari un ordinador excel·lent per poder simular diversos convertidors VSC reals.

#### Un model real del *current flow controller* convertidor CA/CC

Al capítol 5 s'exposen algunes petites simplificacions realitzades al model del *current flow controller* convertidor CA/CC. En aquest cas es va simplificar el model per diverses raons: d'una banda es va considerar el convertidor VSC ideal per a que un ordinador domèstic pogués simular el model, d'altra banda no es va simular el transformador d'aïllament per evitar errors i discontinuïtats a les simulacions a causa del programari utilitzat. En principi, aquestes simplificacions no haurien d'influir en els resultats obtinguts però es podrien eliminar, i simular un convertidor CA/CC més fidedigne, per veure si tenen algun impacte significatiu a la xarxa.



## Estudi dels *current flow controllers* convertidors CC/CC

Al capítol 4 s'introdueixen breument els *current flow controllers* convertidors CC/CC i s'explica la base del seu funcionament. Sembla ser que els *current flow controllers* convertidors CC/CC són els CFCs que més avantatges presenten. Seria interessant incloure aquests dispositius a l'estudi realitzat per tal de poder comparar-los amb les altres tipologies de *current flow controllers*. A més, existeixen diversos tipus de *current flow controllers* convertidors CC/CC, de manera que també es podrien estudiar i analitzar els avantatges i inconvenients de cadascun.

## Estudi sobre les estratègies de control dels *current flow controllers*

Al capítol 6 es proposen dues estratègies de control per als *current flow controllers*. Una de les estratègies proposades, la implementada al *current flow controller* ideal i al de resistència variable, requereix d'un estudi acurat de la xarxa HVDC. Aquest estudi pot ser difícil de dur a terme a xarxes HVDC més complexes, així que seria interessant dissenyar un controlador que pogués governar els *current flow controllers* sense necessitat d'un estudi previ de la xarxa. A banda d'això, hi ha autors que proposen un control dels *current flow controllers* basat en un doble llaç [5], [4], [21], és a dir, proposen realitzar primer un llaç de corrent i tot seguit un llaç de tensió. L'estudi d'aquest sistema de control així com d'altres alternatives podria aportar resultats útils per dissenyar controls més eficients al futur.

## Estudi sobre les pèrdues de potència

Un aspecte de gran interès en la transmissió d'energia elèctrica és la pèrdua d'energia que es produeix durant el transport. Al present treball no s'han estudiat les pèrdues produïdes a la xarxa HVDC ni als *current flow controllers* ja que molts dels elements modelitzats eren ideals i no produïen pèrdues. La implementació d'un model real podria servir per estudiar les pèrdues produïdes pels diferents tipus de CFCs, unes dades que podrien ser de gran utilitat al escollir un tipus de *current flow controller* per implementar en una xarxa real.

## Estudi sobre xarxes mallades HVDC complexes

Al capítol 5 s'exposa que la xarxa HVDC modelitzada només consta d'una malla i, a més, només es modelitza la meitat d'aquesta per tal de modelitzar només un *current flow controller* per línia. Primerament, es podria analitzar una xarxa HVDC completa, amb tots els *current flow controllers* necessaris per garantir l'equilibri de potències. En segon lloc, es podria estudiar la gestió energètica necessària a una xarxa HVDC més complexa, és a dir, amb més malles, parcs eòlics i estacions convertidores a la costa. Els dos estudis proposats permetrien analitzar l'impacte dels *current flow controllers* de manera més fidedigna a xarxes HVDC i estudiar els problemes que sorgirien al utilitzar xarxes més grans.

## Estudi sobre xarxes HVDC basades en altres convertidors

Una altra línia de treball futur seria l'anàlisi de xarxes mallades HVDC basades en altres convertidors. Un dels tipus de convertidors que podria ser d'interès són els *Modular Multi-Level Converter* (MMC) un tipus de VSC que ha guanyat popularitat en els últims anys. Analitzar xarxes HVDC governades per diferents convertidors podria servir estudiar l'evolució dels convertidors en els últims anys i observar els avantatges i inconvenients de cadascun. A més a més, l'estudi de xarxes basades en convertidors MMC podria aportar uns resultats de gran interès i utilitat per tal de dissenyar futures xarxes HVDC.

# Agraïments

Primer de tot voldria agrair a en Joan Sau tota la ajuda que m'ha donat durant l'elaboració d'aquest TFG. Vull agrair el seu interès i tots aquells coneixements que m'ha proporcionat desinteressadament i que m'han servit per poder elaborar aquest treball. Des d'aquí aprofito per desitjar-li el millor a la seva carrera professional així com molta sort quan arribi el moment de presentar la seva tesi.

També voldria aprofitar l'ocasió per agrair la confiança i el suport que he rebut per part de tots aquells joves amics i amigues que han cregut en mi. En especial, voldria agrair a la Clàudia tota la confiança i els ànims que m'ha donat, no només durant la realització d'aquest treball, sinó durant tota la carrera. No tinc cap dubte de que sense ells i elles, el meu pas per la universitat no hauria sigut el mateix.

Por último, querría agradecer a mis padres y a mi hermano todo el apoyo que me han proporcionado a lo largo de mi vida y de mis estudios. Gracias a vosotros tengo unos valores y soy consciente de la importancia de la formación, gracias a vosotros he tenido la suficiente determinación para acabar mis estudios y, sobre todo, gracias a vosotros estoy escribiendo estas líneas y dedicándoos este trabajo.

A tots i a totes,

Moltes gràcies.



# Bibliografia

- [1] Thomas Ackermann. *Wind Power in Power Systems*, volume 140. 2005.
- [2] Gustavo Azevedo. Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator. (ISIE):734–739, 2009.
- [3] Michael P. Bahrman and Brian K. Johnson. The ABCs of HVDC transmission technologies. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(2):32–44, 2007.
- [4] Senthoooran Balasubramaniam and Carlos E Ugalde-loo. An IGBT Based Series Power Flow Controller for Multi-Terminal HVDC Transmission.
- [5] Carl Barker and Robert Whitehouse. A Current Flow Controller for Use in HVDC Grids. (3):1–5.
- [6] Carl Barker and Robert Whitehouse. Autonomous Converter Control in a Multi-Terminal HVDC System.
- [7] A Beddard and M Barnes. Availability analysis of VSC-HVDC schemes for offshore windfarms.
- [8] Anders Carlsson. *The back to back converter: control and design*. 1998.
- [9] Se-kyo Chung. A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters. 15(3):431–438, 2000.
- [10] Sebastien Dennetière. The CIGRE B4 DC Grid Test System.
- [11] Agustí Egea Àlvarez, Adrià Junyent Ferré, and Oriol Gomis Bellmunt. Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems. pages 1–35, 2000.
- [12] Agustí Egea-alvarez, Student Member, Fernando Bianchi, Adrià Junyent-ferré, Gabriel Gross, Oriol Gomis-bellmunt, and Senior Member. Voltage Control of Multiterminal VSC-HVDC Transmission Systems for Offshore Wind Power Plants : Design and Implementation in a Scaled Platform. 60(6):2381–2391, 2013.
- [13] Parlamento Europeo and Consejo Europeo. DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE, 2009.
- [14] G Gamesa, European and Mw. Gamesa Offshore. Cutting Edge Technology Solutions. Technical report.
- [15] G Gamesa, European and Mw. Environmental product declaration. Electricity from European GAMESA G132 - 5.0 MW offshore wind farm. Technical report, 2015.
- [16] Ahmed M Hemeida, Wael a Farag, and Osama a Mahgoub. Modeling and Control of Direct Driven PMSG for Ultra Large Wind Turbines. *Engineering and Technology*, 59(August 2015):918–924, 2011.

- [17] José Joaquín Hernández. Opportunities for Testing and Demonstration of Marine Energy Technologies in the Canary Islands.
- [18] Dirk Van Hertem and Mehrdad Ghandhari. Multi-terminal VSC HVDC for the European supergrid : obstacles. pages 1–15, 2010.
- [19] Mohammed Aslam Husain and Abu Tariq. Modeling and Study of a Standalone PMSG Wind Generation System Using MATLAB / SIMULINK. 2(7):270–277, 2014.
- [20] G J Kish, Student Member, M Ranjram, Student Member, P W Lehn, Senior Member, and A Three-string Architecture. A Modular Multilevel DC / DC Converter with Fault Blocking Capability for HVDC Interconnects. (c), 2014.
- [21] Qing Mu, Jun Liang, Yalou Li, and Xiaoxin Zhou. Power Flow Control Devices in DC Grids. 2012.
- [22] Henk Polinder, Frank F A Van Der Pijl, Gert Jan De Vilder, and Peter J. Tavner. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(3):725–733, 2006.
- [23] Roberto Rudervall, J.P. Charpentier, and Sharma Raghuvver. High Voltage Direct Current ( HVDC ) Transmission Systems Technology Review Paper. (Ccc):1–17, 1999.
- [24] Joan Sau Bassols. Anàlisi i Control de Tipologies de Convertidors per a Parcs Eòlics Marins Connectats en HVDC. pages 1–102.
- [25] Joan Sau Bassols and Eduardo Prieto Araujo. Modelling and control of an interline Current Flow Controller for meshed HVDC grids. 8977(c):1–11, 2015.
- [26] European Union. European Wind Integration Study (EWIS). Technical report.
- [27] Etienne Veilleux and Boon-teck Ooi. Power Flow Analysis in Multi-Terminal HVDC Grid. pages 1–7, 2011.
- [28] Ricardo Vidal, Enrique Belenguer, Diego Soto, and Javier Riedemann. Power Flow Control Using a DC-DC MMC for HVDC grid Connected Wind Power Plants.
- [29] Sheng Wang, Jingli Guo, Chuanyue Li, Senthoran Balasubramaniam, Rui Zheng, and Jun Liang. Coordination of DC power flow controllers and AC / DC converters on optimising the delivery of wind power. 10:815–823, 2016.