

Resum

Aquest projecte presenta un estudi de modelització, disseny de controladors i mètodes d'operació d'una xarxa multiterminal en corrent continu. També es realitzen un seguit de simulacions, amb l'eina informàtica MATLAB-SIMULINK® , per tal de verificar els resultats com a primera aproximació a aquests tipus xarxes.

La xarxa multiterminal estudiada consta de quatre nodes, equipats amb convertidors VSC (Voltage Source Converter), dos dels quals són d'injecció de potència produïda mitjançant aerogeneradors i els dos punts restants són de connexió a la xarxa elèctrica de potència. Els parcs eòlics, de producció nominal de 100 MW es troben equipats amb aerogeneradors de velocitat fixa amb màquina asíncrona de gàbia d'esquirol.

En aquest projecte es pretén operar la xarxa de corrent continu sense ús de les comunicacions. Per això, en operació ordinària, es regula la tensió en els punts de connexió a la xarxa mitjançant controladors *droop*, a més de proporcionar un repartiment de potència entre punts de connexió a la xarxa. En cas de falla elèctrica, es preveu que actuïn mecanismes de reducció de potència com la reducció mecànica mitjançant el regulador de l'angle de pas i un sistema de reducció de potència elèctric, basat, en la reducció de tensió i increment de la freqüència dels parcs.





Índex

Resum	1
Glossari	13
1 Introducció	19
1.1 Objectius	19
1.2 Abast	19
2 Aspectes generals de la tecnologia HVDC	21
2.1 Història dels sistemes HVDC	21
2.2 Sistemes de transmissió i tendències actuals	22
2.2.1 Tipologia de xarxes en corrent continu	22
2.2.2 Tipologia de convertidors utilitzats	23
3 Descripció del sistema estudiat	25
4 Modelització	27
4.1 Modelització d'un aerogenerador	27
4.1.1 Modelització de la turbina de vent	27
4.1.2 Modelització de la transmissió	29
4.1.3 Modelització de la màquina d'inducció de gàbia d'esquirol	29
4.2 Modelització del parc eòlic	31
4.2.1 Model agregat de parc eòlic	32
4.3 Modelització del sistema elèctric de transmissió d'energia	33
4.3.1 Modelització dels convertidors	33
4.3.2 Modelització d'una línia de contínua	35
4.3.3 Modelització de la xarxa d'alterna	35



5	Control d'una xarxa multiterminal en corrent continu	37
5.1	Modes d'operació de la xarxa elèctrica	37
5.2	Controladors del convertidor del costat de la xarxa	38
5.2.1	Control de la tensió de bus	39
5.2.2	Disseny dels llaços de corrent	39
5.2.3	Llaç de seguiment de fase	41
5.3	Controladors del parc eòlic	42
5.3.1	Control del convertidor	43
5.3.2	Disseny del control de l'angle de pas	44
6	Estudi de casos pràctics	49
6.1	Paràmetres de les simulacions	49
6.1.1	Paràmetres físiques del sistema	49
6.1.2	Paràmetres dels controladors	52
6.2	Simulació de l'efecte d'un canvi de vent	53
6.2.1	Introducció	53
6.2.2	Resultats	53
6.2.3	Observacions	56
6.3	Simulació del sistema amb series de vent	57
6.3.1	Introducció	57
6.3.2	Resultats	58
6.3.3	Observacions	61
6.4	Simulació amb presència d'un sot de tensió equilibrat i simètric	62
6.4.1	Introducció	62
6.4.2	Resultats	62
6.4.3	Observacions	66
6.5	Desconnexió d'un convertidor del costat de la xarxa	67
6.5.1	Introducció	67
6.5.2	Resultats	68
6.5.3	Observacions	72
7	Conclusions	73
A	Transformada de Clarke i Park	79
A.0.4	Transformada de Clarke	79
A.0.5	Transformada de Park	81



Modelització, control i simulació de xarxes multiterminal de transport d'energia elèctrica en corrent continu (HVDC-VSC)	5
B Pressupost	85
B.1 Introducció	85
B.2 Pressupost per la modelització, estudi dels sistemes de control i operació de les xarxes multiterminal en corrent continu	85
B.2.1 Pressupost del maquinari	85
B.2.2 Pressupost del programari	85
B.2.3 Pressupost de mà d'obra	86
B.2.4 Suma per capítols	86
C Impacte ambiental	87
C.1 Impacte ambiental dels parcs eòlics marins	87
C.2 Impacte ambiental dels sistemes de transport d'energia multiterminal	88
C.2.1 Impacte energètic dels transport HVDC	88
C.2.2 Impacte sobre la fauna i flora dels conductors HVDC	88





Índex de figures

2.1	Figura (a) connexió punt a punt, (b) xarxa multiterminal	23
2.2	Figura (a) convertidors amb tiristors (b) convertidors en transistors	23
3.1	Diagrama de blocs d'un aerogenerador	25
4.1	Diagrama de blocs de la modelització d'un aerogenerador	27
4.2	Esquema elèctric equivalent de la xarxa del parc eòlic	31
4.3	Esquema per fase del transformador i d'una línia del parc eòlic	32
4.4	Esquema conceptual del convertidor com enllaç entre dos xarxes de diferent natura	33
4.5	Model d'un convertidor en font de tensió	34
4.6	Model del costat d'alterna d'un convertidor VSC	34
4.7	Esquema del model de xarxa de corrent continu	35
4.8	Esquema del model de Thevenin de xarxa d'alterna	36
5.1	Esquema general dels controls del costat de la xarxa	38
5.2	Esquema del controlador de corrent	41
5.3	Esquema d'un llaç de seguiment de fase trifàsic	41
5.4	Esquema de control d'un llaç de seguiment de fase	41
5.5	Esquema general dels controladors del costat de la xarxa	42
5.6	Diagrama de blocs del controlador de reducció de potència per reducció de tensió	43
5.7	Característica potència-velocitat en funció de la tensió en borns de la màquina	44
5.8	Diagrama de blocs del controlador de reducció de potència per freqüència . .	44
5.9	Característica de funcionament de la màquina d'inducció a diferents freqüència amb velocitat limitada	45
5.10	Característica C_p en funció de l'angle de <i>pitch</i>	46
5.11	Diagrama de blocs del sistema de control de l'angle de pitch amb sistema anti-windup	47



6.1	Canvi de vent. Variables mecàniques del parc eòlic 1, $PE_1: v_{vent} \omega_m, \theta_{pitch}$	53
6.2	Canvi de vent. Variables mecàniques del parc eòlic 2, $PE_2: v_{vent} \omega_m, \theta_{pitch}$	54
6.3	Canvi de vent. Corrent per les línies de la xarxa de contínua I_{DC}	54
6.4	Canvi de vent. Tensions en els terminals de contínua dels convertidors E_{DC}	55
6.5	Canvi de vent. Potència ens els nodes dels terminals de contínua P_{DC}	55
6.6	Canvi de vent. Consignes i corrents i_{ql} dels costats de la xarxa CX_n	56
6.7	Sèrie de vent. Velocitat del vent aportada a cada parc	57
6.8	Sèrie de vent. Variables mecàniques del parc eòlic 1 $PE_1: v_{vent} \omega_m, \theta_{pitch}$	58
6.9	Sèrie de vent. Variables mecàniques del parc eòlic 2 $PE_2: v_{vent} \omega_m, \theta_{pitch}$	59
6.10	Sèrie de vent. Corrent per les línies de la xarxa de contínua I_{DC}	59
6.11	Sèrie de vent. Tensions en els terminals de contínua dels convertidors E_{DC}	60
6.12	Sèrie de vent. Potència ens els nodes dels terminals de contínua P_{DC}	60
6.13	Sèrie de vent. Consignes i corrents i_{ql} dels costats de la xarxa CX_n	61
6.14	Sot de tensió. Variables mecàniques del parc eòlic 1 $PE_1: v_{vent} \omega_m, \theta_{pitch}$	62
6.15	Sot de tensió. Variables mecàniques del parc eòlic 2 $PE_2: v_{vent} \omega_m, \theta_{pitch}$	63
6.16	Sot de tensió. Parell generador desenvolupat per les màquines Γ_m	63
6.17	Sot de tensió. Corrent per les línies de la xarxa de contínua I_{DC}	64
6.18	Sot de tensió. Tensions en els terminals de contínua dels convertidors E_{DC}	64
6.19	Sot de tensió. Potència ens els nodes dels terminals de contínua P_{DC}	65
6.20	Sot de tensió. Estat dels mecanismes de reducció de potència per augment de la freqüència i reducció de la tensió	65
6.21	Sot de tensió. Consignes i corrents i_q dels costats de la xarxa	66
6.22	Desconnexió d'un convertidor. Variables mecàniques del parc eòlic 1 $PE_1: v_{vent} \omega_m, \theta_{pitch}$	68
6.23	Desconnexió d'un convertidor. Variables mecàniques del parc eòlic 2 $PE_2: v_{vent} \omega_m, \theta_{pitch}$	69
6.24	Desconnexió d'un convertidor. Parell generador desenvolupat per les màquines Γ_m	69
6.25	Desconnexió d'un convertidor. Corrent per les línies de la xarxa de contínua I_{DC}	70
6.26	Desconnexió d'un convertidor. Tensions en els terminals de contínua dels convertidors E_{DC}	70
6.27	Desconnexió d'un convertidor. Potència ens els nodes dels terminals de contínua P_{DC}	71
6.28	Desconnexió d'un convertidor. Estat dels mecanismes de reducció de potència per augment de la freqüència i reducció de la tensió	71
A.1	Representació del pla $\alpha\beta$	80
A.2	Exemple de tensions trifàsiques en les referències abc i $\alpha\beta 0$	80



A.3 Representació del pla qd	82
A.4 Exemple de tensions trifàsiques en les referències abc i $qd0$	83





Índex de taules

6.1	Paràmetres de la turbina eòlica	50
6.2	Paràmetres de la màquina d'inducció	50
6.3	Paràmetres de la xarxa elèctrica del parc	51
6.4	Paràmetres de la xarxa elèctrica de continu	51
6.5	Paràmetres de de la xarxa d'alterna	51
6.6	Valors del controlador de l'angle de pas	52
6.7	Llindars de tensió dels controladors de reducció de potència	52
6.8	Valors del controlador de tensió	52
6.9	Valors del controlador del llaç de corrent del costat d'alterna	53
6.10	Valors i instants de canvi del vent en els parcs eòlics	53
6.11	Característiques del sot de tensió simulat	62
6.12	Condicions de vent per la simulació del sot de tensió	62
6.13	Instants de desconexió del convertidor CX_1	67
6.14	Condicions de vent per la simulació de la desconexió del convertidor CX_1	67
B.1	Pressupost del maquinari	85
B.2	Pressupost del programari	86
B.3	Pressupost del programari	86
B.4	Suma per capítols	86
C.1	Pèrdues percentuals degudes a la transmissió de 1000 MW	88





Glossari

Símbols

A	Àrea escombrada per la turbina
C_p	Coefficient de potència aerodinàmic de la turbina
$C_{1..9}$	Coefficient constructius de la turbina eòlica
C_{VSC}	Capacitat dels condensadors dels convertidors
E_{DC}	Tensió en un punt del sistema de contínua
E_{Droop}^*	Offset del controlador de tensió
fr_c	Freqüència màxima del costat del parc eòlic
i_l	Corrents que circulen entre el convertidor i la xarxa d'alterna
i_r	Corrents que circulen pels debanats de rotor del generador
i_s	Corrents que circulen pels debanats d'estator del generador
I_{DC}	Corrent que circula per una línia de contínua
J_m	Moment d'inèrcia del rotor del generador
J_m	Moment d'inèrcia total
J_t	Moment d'inèrcia de la turbina
J_{parc}	Moment d'inèrcia total d'un parc eòlic
K_i	Constant integradora d'un controlador PI
K_p	Constant proporcional d'un controlador PI
K_{Droop}	Guany del controlador de tensió
L	Longitud de les línies
l_l	Inductància d'acoblament a la xarxa
l_{DC}	Inductància de la línia de contínua
l_{rr}	Autoinductància dels debanats de rotor
l_r	Inductància de dispersió dels debanats de rotor
l_{ss}	Autoinductància dels debanats d'estator



l_s	Inductància de dispersió dels debanats d'estator
m	Número de màquina d'inducció
P	Potència activa
P_{rotor}	Potència extreta per la turbina
R	Radi de la turbina eòlica
r_l	Resistència d'acoblament a la xarxa
r_r	Resistència dels circuits de rotor
r_s	Resistència dels circuits d'estator
r_{lDC}	Resistència de la línia de contínua
v_c	Tensions aplicades pel convertidor del costat del parc eòlic
v_l	Tensions aplicades pel convertidor del costat de la xarxa
v_r	Tensions als debanats de rotor del generador
v_s	Tensions als debanats d'estator del generador
v_z	Tensions de la xarxa elèctrica
v_{vent}	Velocitat del vent
X	Reactància d'un element elèctric
Z_{PE-lBT}	Impedància de la línia de baixa tensió del parc
Z_{PE-lMT}	Impedància de la línia de mitja tensió del parc
$Z_{PE-trBT}$	Impedància del transformador de baixa tensió del parc
$Z_{PE-trHVDC}$	Impedància del transformador HVDC del parc
G	Funció de transferència

Símbols grecs

Γ_m	Parell mecànic que fa el generador
Γ_t	Parell mecànic que fa el vent sobre la turbina
λ	<i>Tip speed ratio</i>
ν	Constant multiplicadora de la transmissió
ω_m	Velocitat de rotació de l'eix del generador (rad/s)
ω_n	Freqüència natural d'un sistema
ω_t	Velocitat de rotació de la turbina
ω_z	Velocitat angular de la xarxa
ρ	Densitat de l'aire (Kg/m^3)
τ i α	Constant de temps (s)



τ_{pales}	Constant de temps del sistema de pales de l'aerogenerador
τ_{pitch}	Constant de temps de l'actuador de l'angle de pas
θ	Angle emprat d'orientació de la transformada de Park
θ_m	Angle d'orientació de l'eix del generador
θ_{pitch}	Angle de pas (també anomenat de <i>pitch</i>)
ξ	coeficient d'esmortiment

Superíndexs

*	Valor de consigna
<i>abc</i>	Fases d'un sistema trifàsic
<i>DC</i>	Referent a un paràmetre de la xarxa en contínua
<i>m</i>	Número de màquina d'inducció
<i>max</i>	Màxim valor admissible
<i>min</i>	Màxim mínim admissible
<i>n</i>	Número de parc eòlic
<i>pitch</i>	Referent a l'angle de pas
<i>qd0</i>	Eixos de quadratura

Acrònims

BT	Baixa Tensió
CX	Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments
CX	Costat xarxa
HVDC	High Voltage Direct Current
IGBT	Isolated Gate Bipolar Transistor
IMC	Internal Model Control
LCC	Line Commuted Converter
MT	Mitja Tensió
PE	Parc eòlic
PI	Controlador lineal amb part proporcional i part integradora
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya
URSS	Unió de Repúbliques Socialistes Soviètiques
VSC	Voltage Source Converter





Prefaci

A l'horitzó de l'any 2050 es preveu que hi hagi instal·lada una macroxarxa de transmissió de potència en corrent continu que uneixi la generació eòlica marina de gran potència amb la xarxa elèctrica de diferents països europeus banyats per les aigües del mar del Nord. A part d'aquest projecte a gran escala es preveu que la major part de la generació eòlica marina instal·lada sigui transmesa utilitzant corrent continu. També es planteja la instal·lació de parcs eòlics marins en altres mars com el Mediterrani.

Aquestes sistemes de generació eòlica instal·lats al mar, són coneguts com parc eòlics marins o *offshore*. Aquests parcs presenten avantatges respecte els parcs eòlics terrestres o *onshore* tradicionals, el primer dels quals és que al no haver limitacions d'infraestructura de transport, com ara poden ser el radi de les corbes de les carreteres o la precarietat dels camins que condueixen a la localització del parc, es poden fer molins eòlics més grans que els instal·lats a terra. Al mateix temps, el fet d'instal·lar generació eòlica al mar fa que la producció pugui ser més constant, ja que el vents hi bufen de forma regular i sense grans variacions de velocitat. També, el fet desenvolupar la generació eòlica marina es deu a que les ocupacions òptimes terrestres es troben ja explotades o són de difícil accés.

De la necessitat de transportar aquesta energia cap a les xarxes elèctriques terrestres, neixen les xarxes de transport d'energia en corrent continu, ja que el fet de transportar energia elèctrica en corrent altern per sota un medi aquàtic fa que el sistema tingui moltes pèrdues degudes a les reactàncies, per això es reserva l'ús de l'alternativa submarina a les distàncies curtes. Al mateix temps, s'obren noves possibilitats de tipologies de xarxes elèctriques si es pensa en la interconnexió dels diferents parcs, aquestes són les amonedaes multiterminal.

Des d'un punt de vista personal, els inicis d'aquest projecte rau en el projecte finançat pel vicerectorat de recerca de la UPC sobre el transport d'energia en corrent continu, emmarcat sota un programa d'iniciació a la recerca d'estudiant no titulats.





Capítol 1

Introducció

Aquest projecte presenta la modelització, l'estudi dels controls i la simulació d'una xarxa multiterminal en corrent continu. El sistema consta d'una xarxa multiterminal en corrent continu amb quatre nodes, dos d'injecció de potència a la xarxa i nodes de generació de potència a partir de l'energia eòlica amb màquina asíncrona amb gàbia d'esquirol.

També es presenta una discussió dels mètodes d'operació d'una xarxa en corrent continu, com també, es presenta el disseny dels controladors que ho fa possible. Al mateix temps, es verifiquen i comproven els controls proposats a partir de les simulacions proposades.

1.1 Objectius

Amb la realització d'aquest projecte es persegueixen els següents objectius objectius,

- Estudi i modelització dels elements d'una xarxa multiterminal en corrent continu.
- Entendre el funcionament i estratègies d'operació d'una xarxa multiterminal.
- Realització dels controls que permeten operar la xarxa amb seguretat.
- Realització de les simulacions, per tal de verificar els resultats.

1.2 Abast

L'abast d'aquest projecte només considera l'estudi de la xarxa multiterminal amb la modelització ideal dels convertidors VSC, així que, no es consideren pèrdues ni distorsió harmònica. Des del punt de vista de la generació, aquest projecte es realitza l'estudi de la generació eòlica amb màquina asíncrona de gàbia d'esquirol connectades amb un sol convertidor.

Els controladors que es presenten s'han dissenyat considerant que no hi hagi comunicacions entre els diferents equips.





Capítol 2

Aspectes generals de la tecnologia HVDC

2.1 Història dels sistemes HVDC

L'ús del corrent continu en sistemes d'alta tensió no és una idea recent, ja que des dels orígens de l'electrificació es discuteix quin sistema és millor per la transmissió de potència. Exemple d'això són els episodis protagonitzats per Thomas Edison, partidari de el corrent continu de la mà de General Electric i per Nikola Tesla, partidari i ideòleg dels sistemes moderns de corrent altern de la mà de Westinghouse. A aquesta discussió se la va anomenar la guerra de les corrents. A nivell de distribució i transport, van aparèixer diferents instal·lacions de transport que empraven les dues tecnologies.

Un dels primers sistemes desenvolupats en corrent continu va ser el sistema Thury, desenvolupat per l'enginyer francès René Thury [1]. Aquest sistema consistia en l'associació en sèrie de diferents generadors de contínua per tal d'anar sumant nivells de tensió fins arribar al desitjat. Un cop es tenen prou generadors associats com per complir les especificacions es realitza la transmissió de potència a través de dos conductors. Al costat de les càrregues es troben motors de contínua associats en sèrie. D'aquest sistema va haver diferents muntatges funcionant essent el més cèlebre l'instal·lat entre la central de Moutiers i l'estació de ferrocarril de Lió, a França. Aquest muntatge tenia una longitud de més de 180 km amb una potència de 30 MW i operava a una tensió de 125 kV. La instal·lació que va entrar en servei el 1906 i s'estima un període d'operació d'uns 30 anys segons la bibliografia consultada [2].

En els primers anys els sistemes en corrent altern es van anar imposant, però sempre amb la mirada fixada en sistemes en corrent continu per aquelles aplicacions on el corrent altern presentava masses pèrdues, com les connexions submarines o les llargues distàncies. A les primeres dècades del segle XX es van desenvolupar les vàlvules de mercuri per construir rectificadors i convertidors controlats per aplicacions ferroviàries i de ràdio. De seguida, es va veure que aquesta tecnologia podria ser utilitzada per sistemes HVDC. Diferents fabricants com General Electric o Asea van desenvolupar i fer proves experimentals per testar la tecnologia.

El primer projecte comercial destacat amb convertidors de vàlvules de mercuri va ser la línia entre les ciutats alemanyes de Elbe i Berlín l'any 1945. Aquesta línia projectada pel govern del tercer Reich, presentava una longitud total de 115 km, i el seu traçat era subterrani per tal de poder subministrar energia a Berlín sense que els bombarders aliats poguessin malmetre la línia. La instal·lació, construïda per un consorci de tres fabricants, Siemens,



AEG i Felde & Guillaume, va ser acabada l'abril del 1945 però amb el final de la guerra mai va poder entrar en servei, ja que va ser desmantellada i portada a la URSS com a recompensa per l'exèrcit soviètic [2].

El següent projecte destacat es realitza entre les ciutats russes de Moscou i Kashira, separades uns 112 km, dos anys després de la fi de la segona guerra mundial. Aquesta instal·lació va ser concebuda utilitzant part del cable requisat als alemanys, operant a una tensió màxima de 200 kV. La línia va haver de ser tancada degut a les recurrents falles que tenia, segons alguns experts, degut a que el cable alemany reutilitzat havia estat malmès durant el trasllat.

Paral·lelament, a l'Europa alliberada es va projectar el primer enllaç comercial submarí construït per ASEA l'any 1950 entre Suècia i l'illa de Gotland amb una distància de 50 km, operant a una tensió de 100 kV i 20 MW de potència. En el desenvolupament d'aquesta tecnologia dins d'Asea cal destacar el paper molt rellevant que va tenir l'enginyer Uno Lamm, que en aquell moment era el màxim responsable de la recerca de l'empresa i un dels principals desenvolupadors de la tecnologia HVDC amb vàlvules de mercuri, alguns autors li atribueixen el títol de pare de la tecnologia HVDC moderna.

A partir d'aquí, els enllaços en contínua van anar augmentant les potències i tensions i es van anar substituint els convertidors amb vàlvules de mercuri per convertidors equipats amb tiristors d'estat sòlid. La primera connexió construïda utilitzant tiristors data de l'any 1972 a Canada.

A partir dels anys 70 es va començar a discutir sobre la possibilitat de crear xarxes multiterminal de corrent continu, però no va ser fins l'any 1992 que es va posar en servei la primera xarxa d'aquestes característiques usant tiristors a una tensió de 500 kV.

A finals dels anys 90, es van començar a construir les primeres línies de transmissió utilitzant transistors de commutació forçada, encapçalat per dues companyies, ABB amb la tecnologia HVDC Light® i la Siemens amb la tecnologia HVDC Plus®.

2.2 Sistemes de transmissió i tendències actuals

L'ús de la transmissió de potència amb corrent continu es destina a dia d'avui a usos especials on el corrent continu és una solució avantatjosa respecte el corrent altern, com poden ser,

- Transmissions a llargues distàncies
- Transmissions subaquàtiques
- Adaptació de la freqüència en enllaços de xarxes de corrent altern de diferent freqüència

A continuació es fa una petita descripció de les principals tipologies de xarxes i tecnologies utilitzades.

2.2.1 Tipologia de xarxes en corrent continu

Fins al dia d'avui, les xarxes en corrent continu més utilitzades són les connexions punt a punt. Aquestes estan compostes per dues estacions convertidores que permeten fer la conversió de la natura del corrent i una línia de transmissió en corrent continu. Amb la vista fixada a les proposades futures xarxes de corrent continu es parla d'enllaçar via submarina diferents plataformes de generació eòlica instal·lades al mar i connectades amb



la costa utilitzant xarxes en corrent continu multiterminal, és a dir, tots els dispositius es trobarien connectats a la mateixa xarxa (Figura 2.1).

Aquest tipus de xarxa presenten un nou concepte de tipologia de xarxa en contínua, pròxim als conceptes de xarxes en alterna com l'anell o la malla, que esdevenen un repte tecnològic des del punt de vista de la construcció, gestió i control d'aquestes.

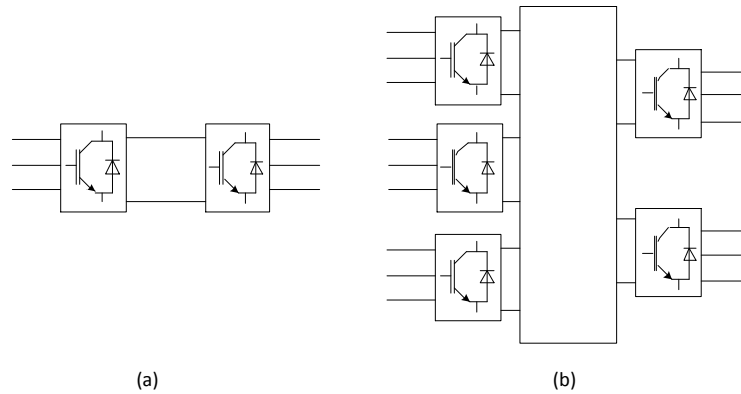


Figura 2.1: Figura (a) connexió punt a punt, (b) xarxa multiterminal

2.2.2 Tipologia de convertidors utilitzats

Actualment, hi ha dues tecnologies possibles per poder fer la conversió de corrent altern a continu. Aquestes són la tecnologia que empra convertidors LCC (Line Commutated Converters), exemplificats amb els tiristors i la que utilitza convertidors VSC (Voltage source Converter) que utilitza transistors de commutació forçada com IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistors) (Figura 2.2). Des d'un punt de vista del desenvolupament tecnològic primer es van desenvolupar els convertidors LCC i a posteriori els VSC.

L'avantatge principal de la tecnologia VSC sobre la LCC és la possibilitat de treballar amb un grau de llibertat superior als convertidors en tiristors i permeten el control d'una variable més com podria ser la reactiva. En el desenvolupament d'aquest projecte s'utilitzarà la tecnologia VSC.

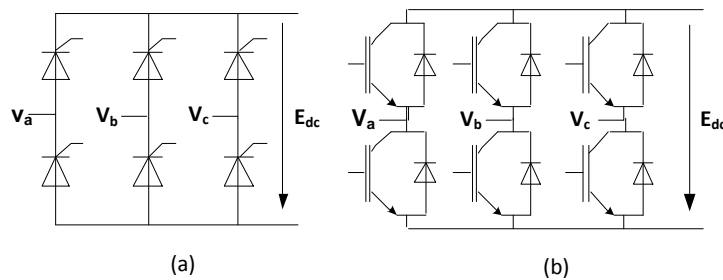


Figura 2.2: Figura (a) convertidors amb tiristors (b) convertidors en transistors



Capítol 3

Descripció del sistema estudiat

En aquest projecte es realitza un estudi de modelització i simulació de sistemes de transmissió de potència en corrent continu multiterminal (Figura 3.1). La xarxa estudiada consta de quatre unitats de conversió, dos que enllacen la xarxa de potència amb la xarxa de contínua (abreviats com, *CX*) i els altres dos connecten dos parcs eòlics a la xarxa de contínua (abreviats com, *PE*).

Els parcs eòlics estudiats es troben equipats amb aerogeneradors màquina d'inducció de gàbia d'esquirrel de velocitat fixa, directament connectats a la xarxa elèctrica del parc eòlic, sense convertidor individual per cada màquina.

Els convertidors que permeten la rectificació i l'ondulació de l'energia produïda en els parcs són convertidors VSC modelats amb el seu comportament ideal i sense pèrdues.

La xarxa de corrent continu està formada per tres línies (L_1, L_2 i L_3), dues de principals i una línia d'enllaç que permet equilibrar la potència generada en el sistema. La xarxa de corrent altern es modela com una xarxa amb el model equivalent de Thevenin.

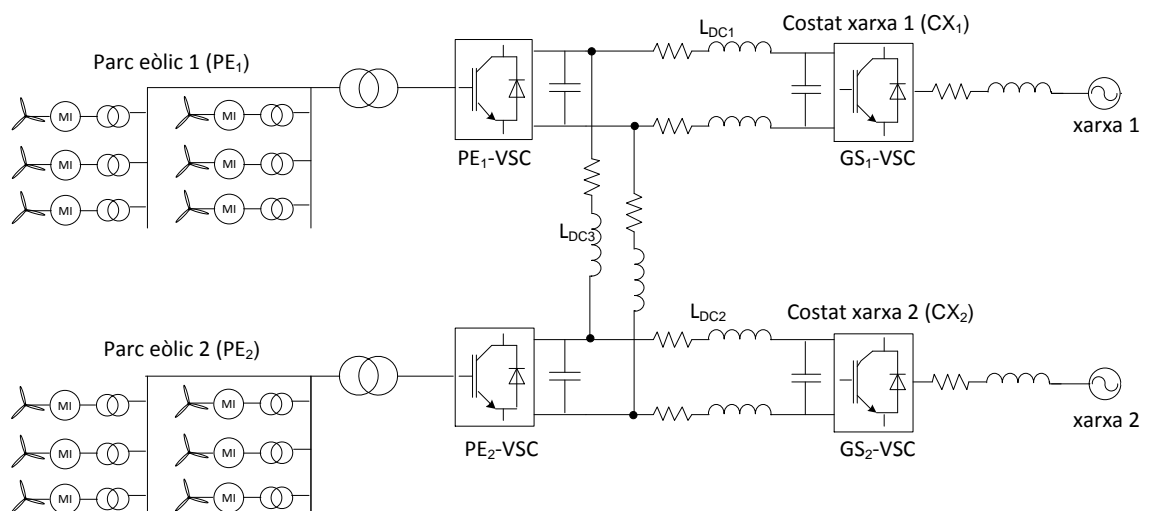


Figura 3.1: Diagrama de blocs d'un aerogenerador





Capítol 4

Modelització

En aquest capítol es pretén fer la modelització d'un sistema multiterminal de transmissió d'energia en corrent continu descrit al Capítol 3. El primer element en ser modelat és el sistema de turbina de vent de velocitat fixa amb màquina d'inducció, seguidament es presenta l'agregació del model per tal de poder simular el conjunt del funcionament del parc eòlic i finalment es presenta la modelització dels convertidors i les xarxes de corrent continu i altern.

4.1 Modelització d'un aerogenerador

L'aerogenerador és un sistema de generació d'energia elèctrica a partir de la conversió de l'energia cinètica disponible a l'aire. Els sistemes d'aerogeneració actualment més utilitzats es componen d'un sistema de captura en forma de turbina eòlica, una transmissió mecànica i una màquina elèctrica rotativa que realitza la conversió d'energia mecànica a elèctrica. La Figura 4.1 mostra el model d'un aerogenerador i les variables involucrades en un sistema format per la turbina de vent, la transmissió i el generador elèctric.

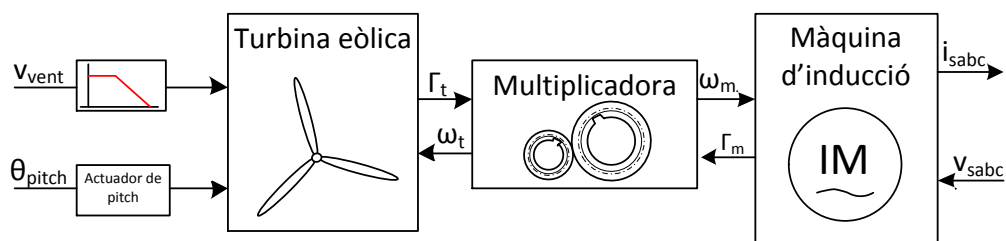


Figura 4.1: Diagrama de blocs de la modelització d'un aerogenerador

4.1.1 Modelització de la turbina de vent

La modelització de la turbina de vent es realitza mitjançant l'expressió de captura de potència dels sistemes de generació eòlica [3], definit com:



$$P_{rotor} = \frac{1}{2} A \rho C_p v_{vent}^3 \quad (4.1)$$

on,

- A és l'àrea d'escombrat de les pales de la turbina eòlica,
- ρ és la densitat de l'aire,
- C_p és el coeficient de potència,
- v_{vent} és la velocitat del vent.

El coeficient de potència, C_p , (4.2) marca el tant per u de la potència que es pot extreure del vent. Aquest factor depèn de diversos termes, uns estàtics, com poden ser els relacionats amb el disseny de la turbina i uns dinàmics com, la velocitat del vent, la velocitat de rotació de la turbina i l'angle de pas de les pales. Aquest factor de potència es veu limitat per el límit que Betz que anuncia que no es pot treure més del 59,3% [4] de la potència de l'aire contingut en un volum de control.

$$c_p(\lambda, \vartheta_{pitch}) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\Lambda} - c_3 \vartheta_{pitch} - c_4 \vartheta_{pitch}^{c_5} - c_6 \right) e^{-c_7 \frac{1}{\Lambda}} \quad (4.2)$$

On $\frac{1}{\Lambda}$, i λ és conegut aquest com TSP o *Tip Speed Ratio* i relaciona la velocitat lineal de la punta de les pales amb la velocitat del vent segons l'expressió:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + c_8 \vartheta_{pitch}} - \frac{c_9}{1 + \vartheta_{pitch}^3} \quad (4.3)$$

$$\lambda = \frac{R \omega_t}{v_{vent}} \quad (4.4)$$

Modelització de l'actuador de l'angle de pas

L'angle d'inclinació de les pales, conegut com angle de pas o *pitch*, segueix la dinàmica proporcionada pel seu actuador. En aquest cas, es modelitza aquest actuador com un sistema de primer ordre amb una constant de temps τ_{pitch} que marcarà la velocitat de l'accionament, tal com:

$$G_{pitch}(s) = \frac{1}{\tau_{pitch}s + 1} \quad (4.5)$$

Filtratge de la senyal de vent d'entrada

En el modelatge de la turbina de vent, a més, cal afegir-hi un filtre passa baixos per emular el comportament d'atenuació de les altres freqüències que presenten les pales del molí [5]. Aquest filtre presenta una expressió com:

$$G_{pales}(s) = \frac{1}{\tau_{pales}s + 1} \quad (4.6)$$

On τ_{pales} és la constant de temps de la dinàmica de les pales d'una turbina eòlica.



4.1.2 Modelització de la transmissió

La transmissió utilitzada per la realització del model de l'aerogenerador és l'equivalent a una transmissió d'una massa on es consideren ideals les característiques mecàniques. Així, aquesta transmissió vindrà definida per l'equació del moviment:

$$\Gamma_t - \Gamma_m \nu = J_{total} \frac{d\omega_t}{dt} \quad (4.7)$$

on,

- Γ_t és el parell de la turbina,
- Γ_m és el parell de la màquina,
- ν és la relació de transmissió de la multiplicadora,
- J_{total} és la inèrcia del conjunt turbina generador,
- ω_t és la velocitat angular de la turbina,
- ω_m és la velocitat angular de la màquina elèctrica.

Per tal de poder treballar amb aquest model s'han de reduir la inèrcia de la turbina o del rotor de la màquina elèctrica en un sol costat, així si es redueix al costat de la turbina mecànica la inèrcia total J_{total} resulta:

$$J_{total} = J_t + J_m \nu^2 \quad (4.8)$$

4.1.3 Modelització de la màquina d'inducció de gàbia d'esquirol

Per la realització del model s'han utilitzat màquines d'inducció de gàbia d'esquirol. Aquest tipus de màquines són les més utilitzat a nivell industrial i en conseqüència és una de les més estudiades [6], [7], [8]. Entre altres avantatges presenten un manteniment gairebé nul, acompanyat d'un cost baix i simplicitat constructiva. Com a principal inconvenient es podria destacar el consum d'energia reactiva i el requeriment de tensió en borns per tal de generar electricitat. Per tal de poder simular de forma àgil es treballa sota el marc de referències estacionàries qd presentat a l'annex A. La màquina asíncrona genèrica presenta un comportament descrit com:

$$\begin{pmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s & l_s \omega_s & 0 & l_m \omega_s \\ -l_s \omega_s & r_s & -l_m \omega_s & 0 \\ 0 & l_m (\omega_s - \omega_r) & r_r & l_r (\omega_s - \omega_r) \\ -l_m (\omega_s - \omega_r) & 0 & -l_r (\omega_s - \omega_r) & r_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_s & 0 & l_m & 0 \\ 0 & l_s & 0 & l_m \\ l_m & 0 & l_r & 0 \\ 0 & l_m & 0 & l_r \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

treballant amb referències qd l_s i l_r són:

$$\begin{aligned} l_s &= l_{ss} + l_m \\ l_r &= l_{rr} + l_m \end{aligned} \quad (4.10)$$



on,

- l_m és la inductància magnetitzant,
- r_s és la resistència estatòrica,
- l_s és la inductància estatòrica,
- r_r és la resistència rotòrica,
- l_r és la inductància rotòrica,
- l_{ss} és la inductància estatòrica d'autoinducció,
- l_{rr} és la inductància rotòrica d'autoinducció,
- ω_s és la velocitat angular de les corrents de l'estator,
- ω_r és la velocitat angular de les corrents del rotor.

Per tal d'agilitzar la simulació i l'estudi de la màquina asíncrona es poden fer un seguit de simplificacions consistents en fer rotar el sistema a la mateixa velocitat que algun dels sistemes elèctrics de màquina. Aquest poden ser:

- Referències fixades a sincronisme.
- Referències fixades al rotor.
- Referències fixades a l'estator.

En aquest cas s'escull fixar la referència a l'estator, això vol dir que el sistema de referència gira a la velocitat angular de les tensions de l'estator, així que la velocitat angular de les corrents de l'estor és 0. Així es simplifiquen les equacions com:

$$\begin{pmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & -l_m\omega_r & r_r & -l_r\omega_r \\ +l_m\omega_r & 0 & +l_r\omega_s & r_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_s & 0 & l_m & 0 \\ 0 & l_s & 0 & l_m \\ l_m & 0 & l_r & 0 \\ 0 & l_m & 0 & l_r \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Si de l'expressió (4.11) es considera que la màquina d'inducció té el rotor curtcircuitat respecte les formulació de la màquina asíncrona, és a dir $v_{qr} = 0$ i $v_{dr} = 0$, i s'expressa en funció de les variables d'estat, el sistema resultant és:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{pmatrix} &= -\frac{1}{l_s l_r - l_m^2} \begin{pmatrix} r_s l_r & l_m^2 \omega_r & -r_r l_m & l_m l_r \omega_r \\ -l_m^2 \omega_r & r_s l_s & -l_m l_r \omega_r & -r_r l_m \\ -r_s l_m & -l_m l_s \omega_r & r_s l_r & -l_s l_r \omega_r \\ l_m l_s \omega_r & -r_s l_m & l_s l_r \omega_r & r_s l_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{pmatrix} \\ &+ \frac{1}{l_s l_r - l_m^2} \begin{pmatrix} l_r & 0 & -l_m & 0 \\ 0 & l_r & 0 & -l_m \\ -l_m & 0 & l_s & 0 \\ 0 & -l_m & 0 & l_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.12)$$



4.2 Modelització del parc eòlic

Els aerogeneradors, usualment, es troben agrupats en parc eòlic. Aquestes instal·lacions tenen el propòsit d'aglutinar tota la potència generada pels aerogeneradors i concentrar-la en un punt de connexió a la xarxa elèctrica. Al mateix temps, per la simulació dels sistemes de generació eòlica es convenient poder fer models fiables on es puguin tenir totes les màquines d'un parc concentrades per estalviar temps de càlcul. Aquest és el concepte que es coneix com a model agregat. En aquest apartat es presenten les modelitzacions que s'han considerat dins un parc eòlic.

Descripció del model elèctric de la xarxa del parc eòlic

Es considera que la xarxa interna d'un parc eòlic comença en borns de la màquina d'inducció on hi ha un tram de línia de baixa tensió, $Z_{PE_n-IBT_m}$, de curta longitud que condueix fins a un transformador, $Z_{PE_n-trBT_m}$, que eleva els nivells de tensió fins a nivells de mitja tensió del parc eòlic. D'aquest transformador neix una línia que uneix tots els aerogeneradors del parc eòlic, Z_{PE_n-IMT} , que es simula com una impedància equivalent entre transformadors. Aquesta línia de mitja tensió condueix fins a un transformador, $Z_{PE_n-trHVDC}$, que eleva la tensió fins els valors requerits per la conversió a contínua. La Figura 4.2 mostra el model d'impedàncies i transformadors utilitzats per modelitzar el parc eòlic.

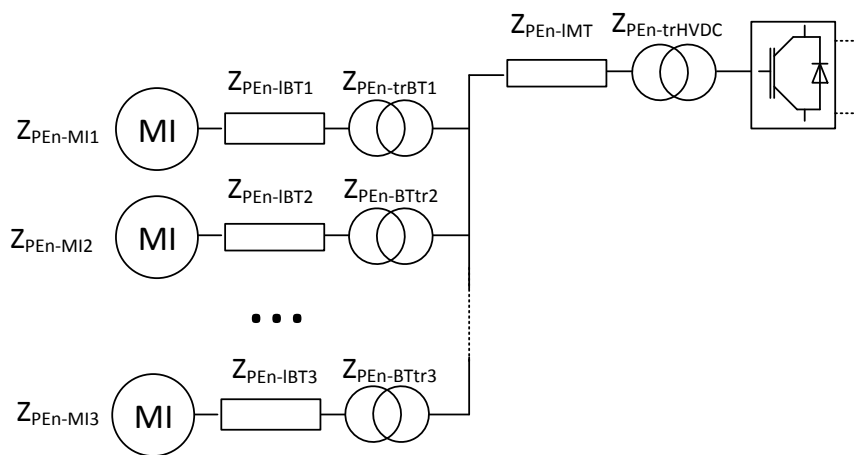


Figura 4.2: Esquema elèctric equivalent de la xarxa del parc eòlic

Modelització de les línies i els transformadors del model de parc eòlic

Les línies elèctriques dels parcs eòlics es modelitzen a partir del model de línia curta [9], degut a la seva curta distància, on només es tenen en consideració la resistència i la reactància del conductor. El model del transformador utilitzat es basa en la reducció al primari dels paràmetres de la resistència i la reactància de dispersió dels debanats amb una branca en paral·lel per considerar les pèrdues per la magnetització. Els models presentats es poden veure a la Figura 4.3.



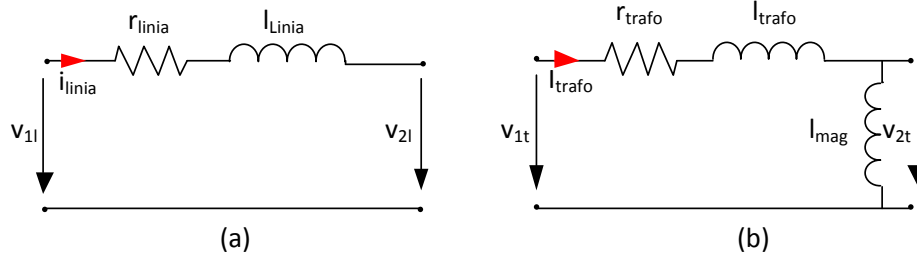


Figura 4.3: Esquema per fase del transformador i d'una línia del parc eòlic

Consideracions sobre la limitació de potència de les línies

Per escollir els paràmetres elèctrics d'una línia d'alterna s'han considerar les limitacions següents:

- El valor de la inductància de la línia elèctrica sigui suficientment petit com per transmetre certa quantitat de potència. Per tal de tenir una certa ordre de magnitud es aproximar segons l'expressió,

$$X_l^{max} = \frac{V^2}{P_{linia}} \quad (4.13)$$

- El valor nominal del corrent ha de ser inferior a l'indicat en els diferents reglaments electrotècnics.

4.2.1 Model agregat de parc eòlic

Agregació de la part mecànica

Per tal de simular un parc eòlic es realitza un model agregat del parc, és a dir, es simulen les dinàmiques de diverses màquines en una sola. Des del punt de vista del sistema mecànic es dedueix a partir de l'equació del moviment multiplicant la inèrcia i el parell pel nombre d'aerogeneradors del parc, tal com mostra la següent expressió:

$$m(\Gamma_t - \Gamma_m) = mJ_{parc} \frac{d\omega_t}{dt} \quad (4.14)$$

on, m és el nombre d'aerogeneradors que hi ha al parc, sabent que,

$$\Gamma_m = \sum_{i=1}^m \Gamma_{m_i} \quad (4.15)$$

$$\Gamma_t = \sum_{i=1}^m \Gamma_{t_i} \quad (4.16)$$

$$J_{parc} = \sum_{i=1}^m J_{total_i} \quad (4.17)$$



Agregació de la part elèctrica

Des d'un punt de vista elèctric, el model agregat de parc s'aconsegueix a partir de la connexió en paral·lel de les diferents unitats generadores [10],[11]. Així la impedància total resultant del parc eòlic pot ser calculada com:

$$Z_{equivalent} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{Z_{PE-MI_m} + Z_{PE-lBT_m} + Z_{PE-trBT_m}}} + Z_{PEN-lMT} + Z_{PEN-trHVDC} \quad (4.18)$$

4.3 Modelització del sistema elèctric de transmissió d'energia

4.3.1 Modelització dels convertidors

Un estudi simplificat de l'electrònica de potència molt habitual [12] [13] és presentar tant el convertidor, com les dos xarxes que fa d'enllaç com fonts elèctriques ideals. En aquest cas, la xarxa de contínua es modela com una font de tensió constant i la xarxa d'alterna com una font de tensió trifàsica, com es mostra a la Figura 4.4.

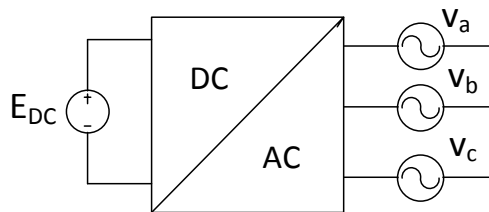


Figura 4.4: Esquema conceptual del convertidor com enllaç entre dos xarxes de diferent natura

Com s'ha comentat, els convertidors utilitzats en aquest estudi són convertidors en font de tensió (VSC), on una de les estructures més utilitzades són els convertidors trifàsics de dos nivells de commutació forçada. Si s'estudia el comportament del convertidor VSC es pot modelar [14] com una font de corrent dependent al costat de contínua i com unes fonts de tensió trifàsiques en el costat d'alterna (Figura 4.5).

Si es substitueix el bloc DC/AC a la Figura 4.4 es viola els principis de l'associació de fonts [12], per això es requereix una inductància entre les fonts de tensió trifàsiques del convertidor i la xarxa. Tot i que aparentment, en el costat de contínua no es compleix cap irregularitat, degut al comportament inductiu dels conductors durant el transitori s'ha d'instal·lar un condensador en borns del convertidor per assegurar la màxima tensió constant.

Així la font dependent de corrent del costat de contínua es definirà com:

$$I_{DC} = \frac{P}{E_{DC}} \quad (4.19)$$



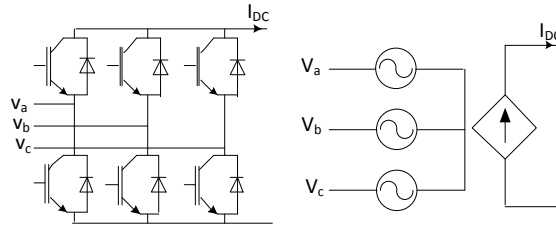


Figura 4.5: Model d'un convertidor en font de tensió

on,

- I_{DC} és el corrent del costat de contínua,
- E_{DC} és la tensió del costat de contínua,
- P és la potència activa disponible al bus d'alterna.

Tanmateix, per la modelització del comportament del dispositiu es tenen present una sèrie de simplificacions com,

- Distorsió deguda a harmònics nul·la.
- Conversió ideal d'energia.
- Es considera el màxim vector sintetitzable en funció de la tensió del costat de contínua

Equacions del costat d'alterna del convertidor

Un cop presentat el model, el comportament de la part d'alterna del convertidor queda simplificat com tres fonts de tensió, unides a la xarxa mitjançant una impedància. El sistema descrit es pot veure a la Figura 4.6.

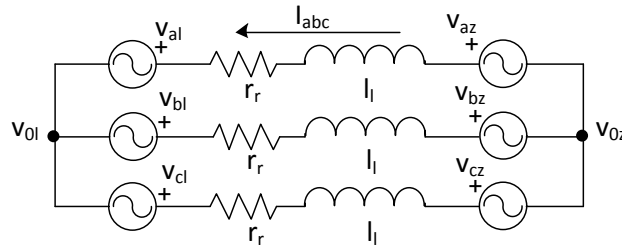


Figura 4.6: Model del costat d'alterna d'un convertidor VSC

Si s'analitza des d'un punt de vista electro tècnic les equacions que descriuen el sistema són:

$$\begin{bmatrix} v_{az} \\ v_{bz} \\ v_{cz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{al} \\ v_{bl} \\ v_{cl} \end{bmatrix} - (v_{0l} - v_{0z}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 & 0 \\ 0 & l_l & 0 \\ 0 & 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

on,



- v_{abcz} és la tensió trifàsica del costat de la xarxa,
- v_{abcl} és la tensió trifàsica imposada pel convertidor,
- v_{0l} és la tensió del punt neutre del convertidor,
- v_{0z} és la tensió del punt neutre de la xarxa,
- i_{abcl} és el corrent trifàsica que circula per la línia,
- r_l és la resistència que presenta la línia,
- l_l és la inductància que presenta la línia.

Si els dos neutres es troben desconnectats apareixerà una diferència de potencial tal com:

$$v_{c0} - v_{z0} = \frac{1}{3} [1 \quad 1 \quad 1] \cdot (v_{abcz} - v_{abcl}) \quad (4.21)$$

4.3.2 Modelització d'una línia de contínua

En aquest model la xarxa de contínua s'ha modelitzat amb un esquema equivalent en π on les admitàncies corresponen els condensadors de filtratge de la tensió que disposa cada estació convertidora i la línia de transmissió s'ha modelat com un model equivalent de línia en sèrie compost per una reactància i una resistència 4.7.

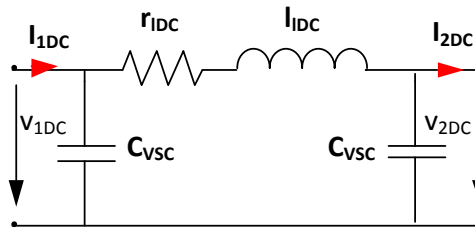


Figura 4.7: Esquema del model de xarxa de corrent continu

4.3.3 Modelització de la xarxa d'alterna

La xarxa de corrent alterna es modela segons el model equivalent de Thevenin com tres fonts ideals de tensió que proporcionen un sistema trifàsic simètric i equilibrat, tal com,

$$\begin{bmatrix} v_{az} \\ v_{bz} \\ v_{cz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos(\omega_z t + \varphi) \\ V \cos(\omega_z t - \frac{2\pi}{3} + \varphi) \\ V \cos(\omega_z t + \frac{2\pi}{3} + \varphi) \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Aquest es connecta es connecta amb la resta del circuit mitjançant la resistència i la inductància equivalent de Thevenin que caracteritzen les propietats de la xarxa elèctrica en un punt (Figura 4.8).



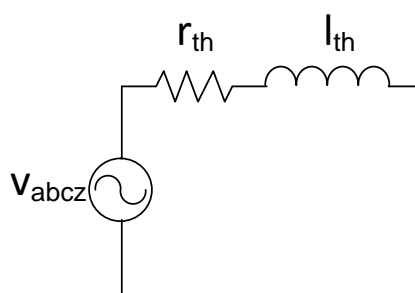


Figura 4.8: Esquema del model de Thevenin de xarxa d'alterna



Capítol 5

Control d'una xarxa multiterminal en corrent continu

5.1 Modes d'operació de la xarxa elèctrica

L'objectiu fonamental de la xarxa de transport en corrent continu és transportar un flux de potència des de la generació fins els consums. Per tal de generar aquest flux, és necessari que hi hagi una diferència de potencial. Seguint aquesta senzilla premissa, s'ha d'establir en una xarxa multiterminal qui controla la tensió de la xarxa per generar aquest fluxos. Primerament, per entendre el funcionament que ha de tenir el sistema s'estudien les connexió punt a punt.

Les connexions punt a punt consten de dos convertidors, si s'aplica al transport d'energia eòlica *offshore* en condicions estacionàries el convertidor del parc injecta tota la potència que generen el aerogeneradors a l'enllaç de contínua, sense considerar regulacions sobre la tensió de bus. En aquest cas és el convertidor connectat a la xarxa elèctrica qui manté constant la tensió de bus a partir de la injecció de potència a la xarxa d'alterna.

Ara, si es planteja el problema per les xarxes multiterminal, és possible seguir el mateix esquema en condicions regulars de funcionament. Sota d'aquestes, els parcs eòlics injectaran tota la potència que es permet i la tensió de bus serà regulada pels convertidors del costat de la xarxa. Però ara, apareix el problema que els convertidors del costat dels parc eòlics no poden mantenir constant la tensió de bus ja que resulta impossible saber quin percentatge de potència extreu cadascun. Per solucionar això existeixen dues possibles solucions:

- Utilitzar comunicacions entre convertidors per tal d'aplicar la tensió necessària en cada terminal per tal de distribuir les potències de la forma desitjada.
- Utilitzar funcions *droop* que permeten un repartiment de potència sense necessitat de comunicacions.

Si s'estudia el problema de la gestió de la xarxa en condicions de fallada en el costat d'alterna, s'observa que el fet de no poder injectar la mateixa potència fa actuar les saturacions del controlador, i el convertidor del costat de la xarxa comença a treballar en mode de limitació de corrent. Com que no és possible injectar tota la potència que hi ha disponible a la



xarxa de contínua, s'han d'idear un seguit de mecanismes que permetin reduir la potència lliurada pels parc eòlics de forma instantània per tal d'evitar que la tensió de bus creixi excessivament. Els principals podrien ser [15]:

- Ús de comunicacions per reduir la consigna de parell dels aerogeneradors del parc.
- Reducció de la tensió de la xarxa interna del parc eòlic.
- Augment de la freqüència de la xarxa interna del parc eòlic.

En el present projecte, els convertidors en condicions normals s'encarregaran de,

- **convertidor costat xarxa:** Mantenir la tensió de bus utilitzant un controlador *droop*.
- **convertidor costat dels parc eòlics:** Injectar tota la potència produïda pels parc eòlics.

En condicions en presència de falles elèctriques els convertidors s'encarregaran de,

- **convertidor costat xarxa:** Passa a funcionar sota referència de corrent, injectant tota la potència que sigui possible.
- **convertidor costat dels parc eòlics:** Redueix potència augmentant la freqüència i disminuint la tensió que aplica en borns d'alterna del parc eòlic, en cas que sigui necessari.

En els dos casos descrits anteriorment, en cas de produir-se una sobrevelocitat del sistema mecànic de la turbina començaria a actuar el sistema de control de l'angle de pitch.

5.2 Controladors del convertidor del costat de la xarxa

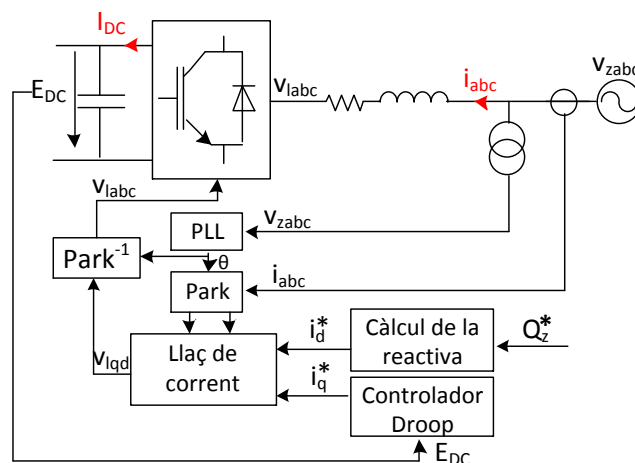


Figura 5.1: Esquema general dels controls del costat de la xarxa



5.2.1 Control de la tensió de bus

A diferència de les connexions HVDC punt a punt, àmpliament utilitzades a dia d'avui, el fet de que la xarxa sigui multiterminal implica un cert grau de dificultat a l'hora de regular el nivell de tensió de la xarxa, ja que al haver-hi més d'un punt de tensió no es pot garantir que l'equilibri d'un terminal impliqui l'estabilitat de tota la xarxa.

Per això s'equipa els convertidors amb funcions de pèrdua de tensió o funcions *droop* que a partir de la tensió que hi ha en extrems del convertidor, proposen un corrent de consigna. Aquest control permet un repartiment de potència entre convertidors sense comunicacions. Aquesta funció *droop* es veu caracteritzada per una constant K_{droop} que emula el comportament d'una resistència en el circuit de contínua com:

$$I_{DC} = K_{Droop} (E_{DC} - E_{Droop}^*) \quad (5.1)$$

on,

K_{Droop} és la constant del controlador K_{droop} ,
 E_{Droop}^* és l'offset del controlador.

Un cop es coneix el corrent de la xarxa de contínua que s'ha d'injectar a la xarxa d'alterna es pot calcular la consigna pel llaç de corrent com:

$$I_{ql}^* = \frac{2 E_{DC} I_{DC}}{3 V_{zq}} \quad (5.2)$$

5.2.2 Disseny dels llaços de corrent

El controlador del convertidor del costat de la xarxa ha de permetre injectar el corrent consignat a partir de la imposició d'una tensió en borns del convertidor. Per tal de poder dissenyar un controlador primerament s'ha d'estudiar la planta, en aquest cas, les impedàncies que permeten la connexió amb la xarxa de potència. Aquests es veuen descrites per les equacions 4.20 que expressades sota la referència *qd* a partir de l'aplicació de la transformació de Park resulta ser,

$$\begin{bmatrix} v_{qz} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{ql} \\ v_{dl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & l_l \omega_e \\ -l_l \omega_e & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ql} \\ i_{dl} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ql} \\ i_{dl} \end{bmatrix}$$

on,

v_{qz} és la tensió de component *q* de la xarxa
 i_{ql} és el corrent de component *q* de la xarxa
 i_{dl} és el corrent de component *d* de la xarxa
 r_l és la resistència del costat de la xarxa
 l_l és la impedància del costat de la xarxa

En aquest sistema si es considera com una pertorbació la dependència de la freqüència de la xarxa, es pot substituir les tensions v_{ql} i v_{dl} per l'expressió 5.3 que correspon a un controlador *feedforward*, això es possible, ja que tant la freqüència de la xarxa com les corrents són conegudes.

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_{ql} + v_{qz} - l_l \omega_e i_{dl} \\ -\hat{v}_{dl} + l_l \omega_e i_{ql} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$



Al mateix temps, queden desacoblades les tensions de les components qd , llavors, el sistema resulta un sistema SISO tal com:

$$\begin{aligned}\frac{\hat{v}_{ql}(s)}{i_{ql}(s)} &= \frac{1}{l_1 s + r_l} \\ \frac{\hat{v}_{dl}(s)}{i_{dl}(s)} &= \frac{1}{l_1 s + r_l}\end{aligned}\quad (5.4)$$

Pel disseny del controlador es proposa la tècnica IMC, *Internal Model Control*, que consisteix en eliminar la dinàmica de la planta, via controlador, i imposar la dinàmica desitjada sempre que es pugui. Per tal de poder aconseguir error estacionari zero seguint consignes tipus graó es proposa un controlador PI (Proporcional-Integral) de la següent forma,

$$G_{c_{corrent}}(s) = \frac{K_{pc}s + K_{ic}}{s} \quad (5.5)$$

on K_{pc} i K_{ic} poden ser sintonitzats com,

$$K_{pc} = \frac{l_l}{\alpha} \quad (5.6)$$

$$K_{ic} = \frac{r_l}{\alpha} \quad (5.7)$$

on α fa referència a la constant enllaç tancat que es vulgui tenir en el sistema. Si es mira la transmitància de llaç queda expressat com,

$$G_{t_{corrent}}(s) = \frac{1}{\alpha s + 1} \quad (5.8)$$

Si es revisa el càlcul de consignes, el corrent de component i_{ql} vé marcada pel controlador *droop* de tensió i la consigna de corrent i_{dl} vé marcada pel nivell de reactiva que desitgi l'operador del sistema segons les següents expressions,

$$I_{ql}^* = \frac{2}{3} \frac{E_{DC} I_{DC}}{V_{qz}} \quad (5.9)$$

$$I_{dl}^* = \frac{2}{3v_{qz}} Q^* \quad (5.10)$$

La Figura 5.2 mostra l'estructura del controlador.

Saturació de les consignes de corrent

Com que els dispositius físics presenten limitacions de potència, aquestes s'han de considerar a l'hora de dissenyar els llaços de control, per això, s'han dissenyat unes saturacions que en el cas d'excedir la corrent permesa ss saturara la consigna del controlador. En aquest cas, s'opta per donar preferència a la corrent activa. Les saturacions seguiran una expressió tal que:

$$\hat{i}_{ql}^* = \text{sign}(i_{ql}^*) \min \{ \|i_{ql}^*\|, i_l^{max} \} \quad (5.11)$$

$$\hat{i}_{dl}^* = \text{sign}(i_{dl}^*) \min \left\{ \|i_{dl}^*\|, \sqrt{(i_l^{max})^2 - (\hat{i}_{ql}^*)^2} \right\} \quad (5.12)$$



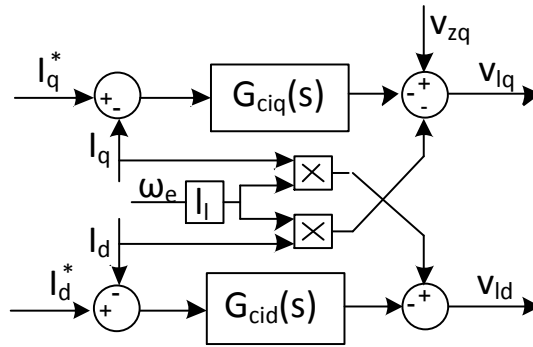


Figura 5.2: Esquema del controlador de corrent

5.2.3 Llaç de seguiment de fase

Els controladors de l'inversor del costat de la xarxa necessiten orientar-se per tal de poder sincronitzar-se amb la xarxa. El dispositiu que ens permet conèixer l'angle elèctric és el llaç de seguiment de fase, o *Phase-locked Loop (PLL)* en anglès. En el cas d'un sistema trifàsic l'esquema equivalent correspon al presentat a la Figura 5.3. Una es base en processar la component v_{dz} resultant de la transformada de Park de les tensions, mitjançant un controlador PI, per tal de deduir la velocitat angular de la xarxa. Si s'integra la velocitat angular es té l'angle elèctric de la tensió.

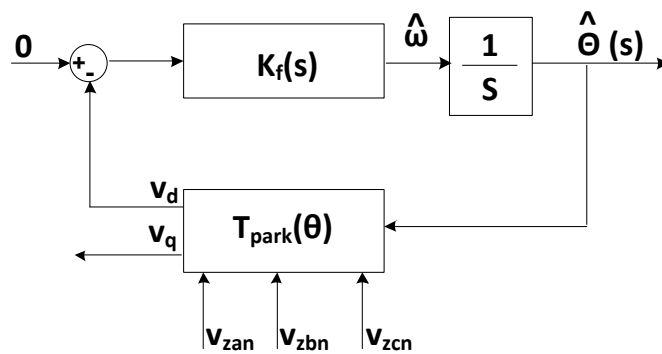


Figura 5.3: Esquema d'un llaç de seguiment de fase trifàsic

Si el sistema presentat anteriorment es considera que el valor real i l'estimat és molt proper es pot estudiar la PLL com es presenta a l'esquema de control 5.4.

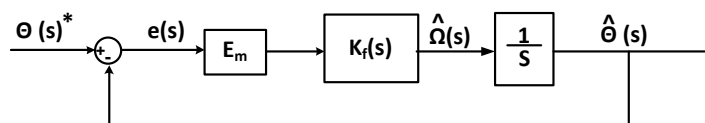


Figura 5.4: Esquema de control d'un llaç de seguiment de fase



Així el controlador PI $K_f(s)$ es pot expressar com,

$$K_f(s) = K_p \left(\frac{1}{\tau} + s \right) \quad (5.13)$$

Si es calcula la funció en llaç tancat del sistema, el sistema es pot expressar com un sistema de segon ordre tal com,

$$\frac{\Theta(\hat{s})}{\Theta(s)} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.14)$$

Per sintonitzar el filtre PI autors [16] recomanen utilitzar un guany E_m igual que el valor de pic de la tensió que es mesurarà, una freqüència natural, ω_n igual a la freqüència nominal de la xarxa i un factor d'esmortiment de $\xi = 0,707$. A partir d'aquestes dades es pot sintonitzar el PI utilitzant les expressions següents,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p E_m}{\alpha_{PLL}}} \quad (5.15)$$

$$xi = \frac{\sqrt{\alpha_{PLL} K_p E_m}}{2} \quad (5.16)$$

on,

- E_m és el valor de la tensió de pic,
- K_p és el guany del controlador,
- α_{PLL} constant de temps desitjada per la PLL.

5.3 Controladors del parc eòlic

Els controls que disposa la banda del parc eòlic estan destinats a la reducció de potència en cas de produir-se una falla elèctrica en un punt del sistema. Per això, s'implementen uns controladors de reducció de potència per augment de freqüència i reducció de tensió que actuaran sobre el convertidor. Aquest controladors s'activaran quan vegin que la tensió del bus de contínua és superior a un llindar. També, cada aerogenerador es troba equipat amb un regulador de velocitat mitjançant la variació de l'angle de pas, aquest últim té la missió de reduir la potència capturada del vent. La Figura 5.5 mostra l'esquema de funcionament del sistema.

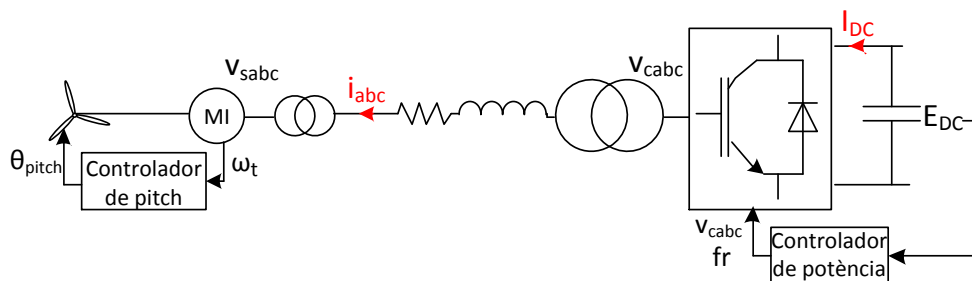


Figura 5.5: Esquema general dels controladors del costat de la xarxa



5.3.1 Control del convertidor

El convertidor del costat del parc té com a objectiu reduir la potència lliurada a la xarxa de corrent contínua. Per això disposa de dos mecanismes un de reducció de tensió pensat per funcionar en casos transitoris que es requereixi una reducció de potència extra i un mecanisme de regulació de potència per freqüència que és capaç de mantenir de forma estable la reducció de potència sempre que es requereixi. Els dos controls s'activen per nivells de tensió essent superiors els nivells de tensió que requereixen l'activació de la reducció de potència per tensió.

Reducció de potència per reducció de la tensió

La reducció de potència per tensió està pensada per funcionar durant els primers instant de la falla elèctrica mentre el sistema de regulació de l'angle de pas s'adapta per tal de lliurar menys potència a la xarxa elèctrica. Aquesta reducció es duu a terme a partir de la reducció del mòdul de les tensions que el convertidor imposa al parc eòlic.

Aquest controlador està implementat com un controlador proporcional que actua quan la tensió del bus de contínua situat entre dos valors crítics, on en el límit inferior el convertidor sintetitzarà el valor màxim de la tensió del parc i en el límit superior el convertidor deixa d'aplicar tensió al parc eòlic. La Figura mostra el diagrama de blocs que representa el controlador. La seva expressió matemàtica és:

$$v_{abcc} = \min \left(v_{abcc}^{nominal}, v_{abcc}^{nominal} \left(1 - \frac{E_{DC-2} - E_{DC}}{E_{DC-3} - E_{DC-2}} \right) \right) \quad (5.17)$$

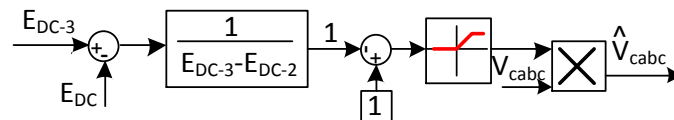


Figura 5.6: Diagrama de blocs del controlador de reducció de potència per reducció de tensió

on V_{abcc} són les tensions imposades pel convertidor. Cal dir que els límits d'aquest regulador es troben entre l'aplicació de la totalitat de la tensió V_{abcc} i 0. Si s'estudia des d'un punt de vista de la màquina d'inducció, es veu que el fet de reduir la tensió fa que es redueixi la característica de la màquina d'inducció, lliurant així menys potència a la xarxa elèctrica com es mostra a la Figura 5.7.

D'altra banda, el fet de no poder lliurar aquesta potència farà que s'acceleri el rotor de l'aerogenerador fent entrar el regulador de l'angle de pas.

Reducció de potència per variació de la freqüència

La reducció de potència per freqüència està pensada per reduir la potència que lliura un parc eòlic en cas de falla elèctrica des del primer instant. Aquest controlador pren el seu sentit quan el controlador d'angle de pitch ja ha actuat i manté la velocitat angular constant, fent que existeixi un punt d'equilibri entre la tensió de bus i la potència generada pels parc (Figura 5.9). Aquest controlador pretén que la freqüència es comporti de forma proporcional entre



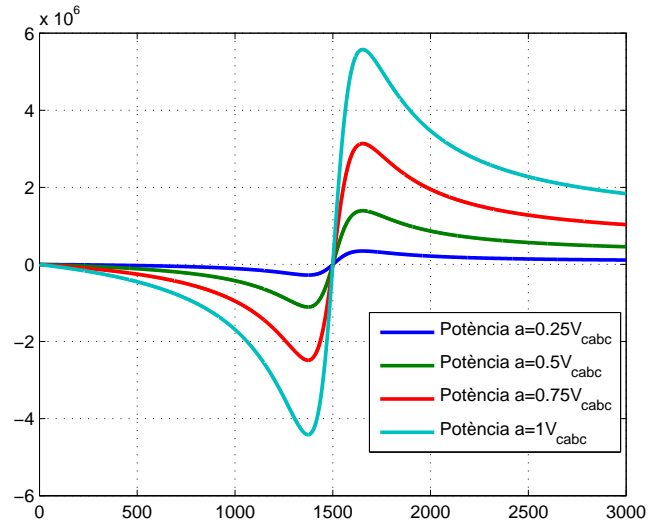


Figura 5.7: Característica potència-velocitat en funció de la tensió en borns de la màquina

un límit superior i un límit inferior de tensió de bus. Així l'expressió d'aquest controlador és,

$$fr_{PE} = \max \left(50, 50 + fr_c \times \frac{E_{DC-2} - E_{DC}}{E_{DC-2} - E_{DC-1}} \right) \quad (5.18)$$

on fr_c és la freqüència màxima que es desitja tenir a la xarxa, aquesta pot coincidir amb la freqüència màxima que girarà la màquina en estat estacionari. La Figura 5.8 mostra el diagrama de blocs d'aquest controlador,

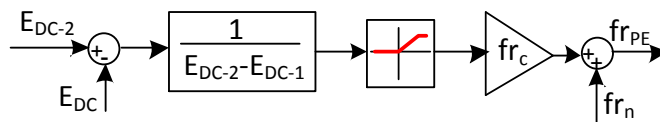


Figura 5.8: Diagrama de blocs del controlador de reducció de potència per freqüència

En el límit inferior d'aquest controlador manté la freqüència de la xarxa elèctrica a 50 Hz i a mesura que va pujant la tensió del bus de contínua va augmentant la freqüència fins que al límit superior d'aquest controlador fa que la freqüència de la xarxa sigui igual a la velocitat de gir dels aerogeneradors fent entrar en sincronisme les màquines no lliurant potència a la xarxa.

5.3.2 Disseny del control de l'angle de pas

L'angle de pas o *pitch* de les pales de l'aerogenerador és utilitzat per regular la potència que s'extreu del parc eòlic reduint la potència capturada. El controlador està dissenyat com un



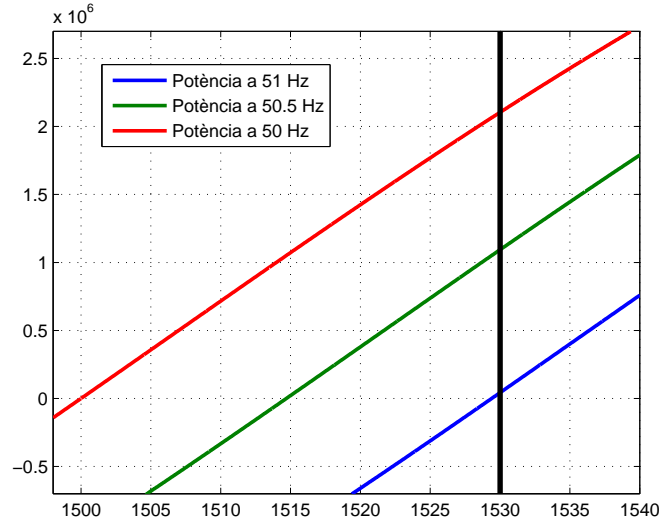


Figura 5.9: Característica de funcionament de la màquina d'inducció a diferents freqüència amb velocitat limitada

regulador que a partir de l'avaluació de l'error de velocitat, assigna un angle de pitch per tal d'evitar la captura excessiva de potència.

Primerament, pel disseny del regulador cal estudiar la dinàmica de la turbina. Malauradament, aquesta dinàmica és no lineal degut a la no linealitat de la característica aerodinàmica. Per aquest motiu, sovint s'han emprat tècniques de control no-lineal pel control de potència mitjançant l'angle de pitch. En aquest cas, s'usa la tècnica del *Gain Scheduling* [17], que consisteix en dissenyar diferents paràmetres dels reguladors per diferents punts de treball del sistema i alternar-los en funció de la regió de funcionament en què es troba el sistema.

Per tal de poder estudiar la planta, es segueixen les recomanacions de disseny proposades a [17] on es proposa linealitzar al voltant del punt de treball habitual del regulador de *pitch*, en aquest cas, el punt nominal de funcionament. Així s'estudia la corba característica C_p per una lambda constant a potència nominal (Figura 5.10).

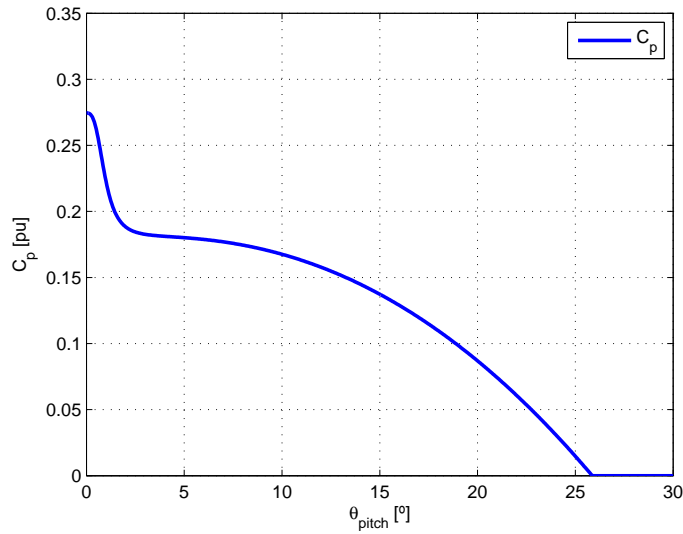
Per dissenyar el controlador es procedirà a la identificació de la planta mitjançant l'excitació de l'entrada del *pitch* amb una variació en forma d'esglaó per cada zona de funcionament que es desitgi. S'ajustarà un model de funció de transferència de primer ordre a la resposta del sistema, que té per expressió,

$$G_{pitch}(s) = \frac{K_{pitch}}{\tau_{pitch} s + 1} \quad (5.19)$$

on, K_{pitch} és la constant del sistema de *pitch* i τ_{pitch} és la constant de temps de l'accionament de l'angle de pas. Un cop identificada la planta és possible dissenyar un controlador PI per tal de tenir controlada la planta usant la tècnica presentada al capítol 5.2.2,

$$G_{cpitch}(s) = \frac{K_{ppitch} s + K_{ipitch}}{s} \quad (5.20)$$



Figura 5.10: Característica C_p en funció de l'angle de *pitch*

La constant del controlador proporcional k_{ppitch} i la constant integral k_{ipitch} , poden ser sintonitzades d'acord,

$$K_{pp} = \frac{\tau_{pitch}}{K_{pitch}\alpha_{pitch}} \quad (5.21)$$

$$K_{ip} = \frac{1}{K_{pitch}\alpha_{pitch}} \quad (5.22)$$

on, α_{pitch} és la constant de temps que es desitja en el sistema en llaç tancat. Per tal d'utilitzar la tècnica del *Gain Scheduling* S'ha de dissenyar un controlador PI per cada zona linealitzada i variar els paràmetres K_{ip} , K_{pp} i K_w en funció de l'angle de pitch del moment.

Ús de la saturació i *anti-windup* del regulador de pitch

L'accionament de pas te límits físics relacionats amb la inclinació màxima que pot prendre per això es aconsellable utilitzar una saturació amb *anti-windup* per tal de limitar l'acció integral. Un *anti-windup* estàndard consisteix en afegir a l'acció integral un valor proporcional a la diferència entre l'acció de control saturada i la no saturada, seguit l'esquema presentar a la Figura 5.11.

on K_w fa referència a un factor que afecta a la realimentació de l'*anti-windup*.



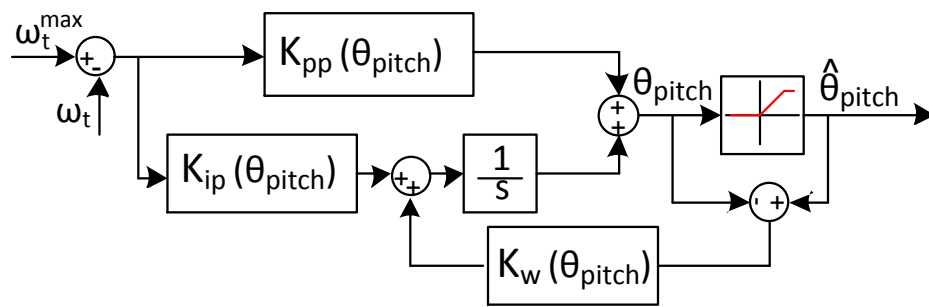


Figura 5.11: Diagrama de blocs del sistema de control de l'angle de pitch amb sistema anti-windup





Capítol 6

Estudi de casos pràctics

En aquest apartat s'especifiquen els diferents paràmetres que han estat utilitzats per realitzar les simulacions, així com, també es presenten els diferents resultats de les simulacions de la xarxa HVDC sota diverses condicions de vent i falles a la xarxa elèctrica resumides en,

1. Simulació de l'efecte d'un canvi de vent
2. Simulació amb sèries de vent
3. Simulació amb presència d'un sot trifàsic
4. Desconnexió d'un convertidor del costat de la xarxa

Per realitzar les simulacions s'usa el programa informàtic MATLAB/SIMULINK amb la toolbox SimPowerSystem.

6.1 Paràmetres de les simulacions

A continuació es descriuen els diferents paràmetres utilitzats en la simulació, separant els paràmetres utilitzades pel sistema físic els usats pel control del sistema.

6.1.1 Paràmetres físiques del sistema

Turbina eòlica

Les variables de la turbina eòlica corresponen a una turbina ajustada segons els paràmetres tipus Heier [8], la qual, permet regulació per angle de pas (taula 6.1).



Paràmetres de la turbina eòlica	Abreviació	Valor numèric	Unitats
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_8	-0,035	
Radi	R	39	[m]
Densitat de l'aire	ρ	1,225	[kg/m ³]
Inèrcia conjunt de les masses rotòriques	J_t	3	[Mkgm ²]
Angle de pas màxim	θ_{pitch}^{max}	55	[°]
Angle de pas mínim	θ_{pitch}^{min}	0	[°]
Velocitat màxima d'acceleració de l'angle de pas	-	25	[°/s]
Velocitat màxima de desacceleració de l'angle de pas	-	-25	[°/s]
Constant de temps del filtratge de les pales	τ_{pales}	4	s
Constant de temps de l'actuador de l'angle de pas	τ_{pitch}	0,8	s

Taula 6.1: Paràmetres de la turbina eòlica

Màquina d'inducció

El generador d'inducció usat en aquestes simulacions és un generador de gàbia d'esquirol de 2 MW i 690 V de tensió nominal [18] (taula 6.2).

Paràmetres de la màquina d'inducció	Abreviació	Valor numèric	Unitats
Potència base	P_{base}	2	[MW]
Tensió base	v_{base}	690	[V]
freqüència base	fr_{base}	50	[Hz]
velocitat nominal	ω_n	1530	[min ⁻¹]
Resistència estatòrica	r_s	0,0048	[pu]
Reactància estatòrica	X_s	0,075	[pu]
Resistència rotòrica	r_r	0,018	[pu]
Reactància rotòrica	X_r	0,12	[pu]
Reactància magnetitzant	x_m	3,8	[pu]

Taula 6.2: Paràmetres de la màquina d'inducció



Xarxa interna del parc

Els paràmetres de la xarxa interna del parc són resultat de la cerca en els catàlegs comercials del fabricant de conductors Prysmian per aplicacions renovables (taula 6.3).

Paràmetres de la xarxa elèctrica del parc	Abreviació	Valor numèric	Unitats
Tensió nominal BT	V_{BT}	690	[V]
Tensió nominal MT	V_{MT}	30	[kV]
Resistència del debanat del transformador de BT	$r_{PE-trBT}$	0	[$\mu\Omega$]
Reactància de dispersió del transformador de BT	$X_{PE-trBT}$	0,06	[$\mu\Omega$]
Resistència del debanat del transformador HVDC	$r_{PE-trHVDC}$	0	[$\mu\Omega$]
Reactància de dispersió del transformador HVDC	$X_{PE-trHVDC}$	0,012	[$\mu\Omega$]
Resistència del conductor de BT	$r_{PE-trBT}$	0,016	[Ω/km]
Inductància del conductor de BT	$l_{PE-trBT}$	0,514	[mH/km]
Longitud del conductor de BT	L_{BT}	0,005	[km]
Resistència del conductor de MT	$r_{PE-trMT}$	0,085	[Ω/km]
Inductància del conductor de MT	$l_{PE-trMT}$	0,063	[mH/km]
Longitud del conductor de MT	L_{MT}	11	[km]

Taula 6.3: Paràmetres de la xarxa elèctrica del parc

Paràmetres de la xarxa de contínua

Els paràmetres pertinents a les xarxes en contínua han estat extrets de [19] (taula 6.4).

Paràmetres de la xarxa elèctrica en corrent continu	Abreviació	Valor numèric	Unitats
Tensió nominal de la xarxa de corrent continu	E_{DCn}	150	[kV]
Resistència del conductor de contínua	r_{lDC}	0,01	[Ω/km]
Reactància del conductor de contínua	l_{lDC}	0,1	[mH/km]
Capacitat del condensador en terminals del convertidor	C_{VSC}	150	[μF]
Longitud de la línia 1 del parc	L_{DC1}	90	[km]
Longitud de la línia 2 del parc	L_{DC2}	80	[km]
Longitud de la línia 3 del parc	L_{DC3}	35	[km]

Taula 6.4: Paràmetres de la xarxa elèctrica de continu

Paràmetres de la xarxa elèctrica d'alterna

El model equivalent de la xarxa utilitzat ha estat extret de [20] (taula 6.5).

Paràmetres de la xarxa elèctrica en corrent altern	Abreviació	Valor numèric	Unitats
Tensió nominal de la xarxa	v_{abcz}	90	[kV]
Resistència del model equivalent de xarxa	r_z	4,36	[Ω]
Inductància del model equivalent de xarxa	l_z	0,052	[H]
Inductància d'acoblament	l_l	0,005	[mH]
Resistència d'acoblament	r_l	0.2	[Ω]

Taula 6.5: Paràmetres de de la xarxa d'alterna



6.1.2 Paràmetres dels controladors

Els paràmetres dels controladors aquí presentats, ha estat calculats amb els mètodes exposats al capítol 5.

Paràmetres dels controladors de l'accionament de l'angle de pas

La taula 6.6 mostra els diferents valors del controlador de l'angle de pas.

Rang de valors de θ_{pitch}	K_{pp}	K_{ip}
$0 \leq \theta_{pitch} > 0,3$	1898	703
$0,3 \leq \theta_{pitch} > 0,5$	170	62
$0,5 \leq \theta_{pitch} > 1$	82	30
$1 \leq \theta_{pitch} > 1,5$	108	40
$1,5 \leq \theta_{pitch} > 1,75$	273	101
$1,75 \leq \theta_{pitch} > 2,5$	698	258
$2,55 \leq \theta_{pitch} > 5$	2777	1028
$5 \leq \theta_{pitch} > 9$	4197	15544
$10 \leq \theta_{pitch} > 14$	1366	506
$14 \leq \theta_{pitch} > 17$	863	320
$17 \leq \theta_{pitch} > 22$	633	234
$22 \leq \theta_{pitch} > \theta_{pitch}^{max}$	457	169

Taula 6.6: Valors del controlador de l'angle de pas

Paràmetres dels controladors de reducció de potència

Es mostren a la taula 6.7 els llindars i la constant dels sistemes de reducció de potència.

Paràmetres dels controladors de reducció de potència	Abreviació	Valor numèric	Unitats
Llindar de tensió 1	E_{DC-1}	151,5	[kV]
Llindar de tensió 2	E_{DC-2}	157	[kV]
Llindar de tensió 3	E_{DC-3}	165	[kV]
Freqüència màxima d'augment	fr_c	2	[Hz]

Taula 6.7: Llindars de tensió dels controladors de reducció de potència

Paràmetres del controlador de tensió *droop*

La taula 6.8 mostra els paràmetres del controlador *droop* de tensió.

Paràmetres del controlador de tensió <i>droop</i>	Abreviació	Valor numèric	Unitats
Valor d'offset del controlador de tensió de bus	E_{Droop}	145	[kV]
Constant	K_{Droop}	1/10	[kA/kV]

Taula 6.8: Valors del controlador de tensió



Paràmetres del controlador de corrent del convertidor del costat d'alterna

La taula 6.9 mostra els paràmetres del controlador del llaç de tensió.

Paràmetres del controlador de corrent del costat d'alterna	K_{pc}	K_{ic}
Valor dels controladors	436	5,2

Taula 6.9: Valors del controlador del llaç de corrent del costat d'alterna

6.2 Simulació de l'efecte d'un canvi de vent

6.2.1 Introducció

En aquesta simulació es preten verificar el funcionament genèric del sistema de xarxa multiterminal HVDC. Per això es simula el sistema amb la variació en forma d'esglaó dels vents d'entrada dels dos parcs eòlics seguint una variació del vent com mostra la taula 6.10.

Parc eòlic	Velocitat inicial [m/s]	Velocitat Final [m/s]	Instant del canvi [s]
Parc eòlic 1	12	15	5
Parc eòlic 2	13	11	15

Taula 6.10: Valors i instants de canvi del vent en els parcs eòlics

6.2.2 Resultats

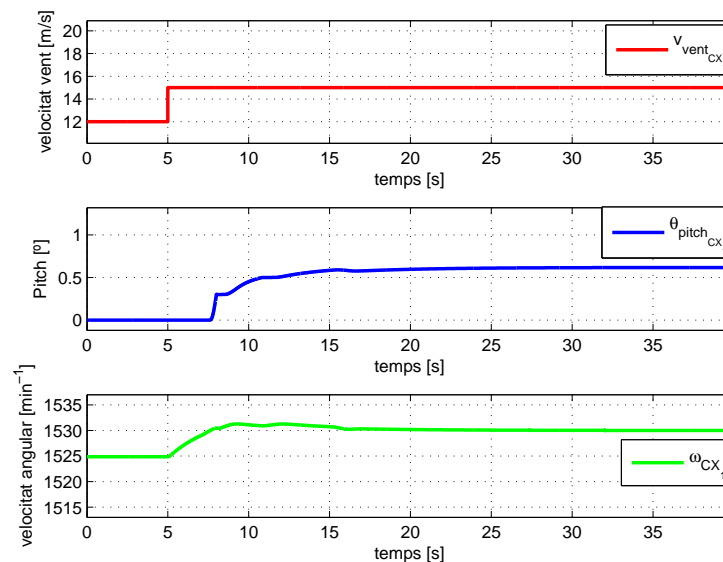


Figura 6.1: Canvi de vent. Variables mecàniques del parc eòlic 1, PE_1 : v_{vent} ω_m , θ_{pitch}



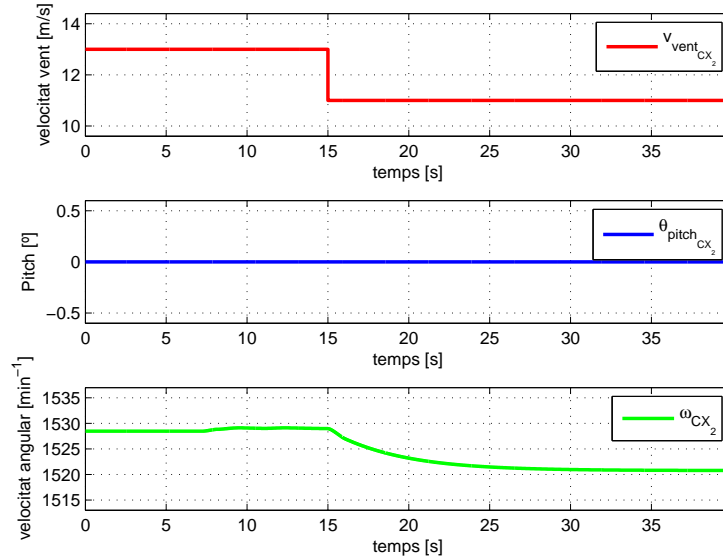


Figura 6.2: Canvi de vent. Variables mecàniques del parc eòlic 2, PE_2 : v_{vent} ω_m , θ_{pitch}

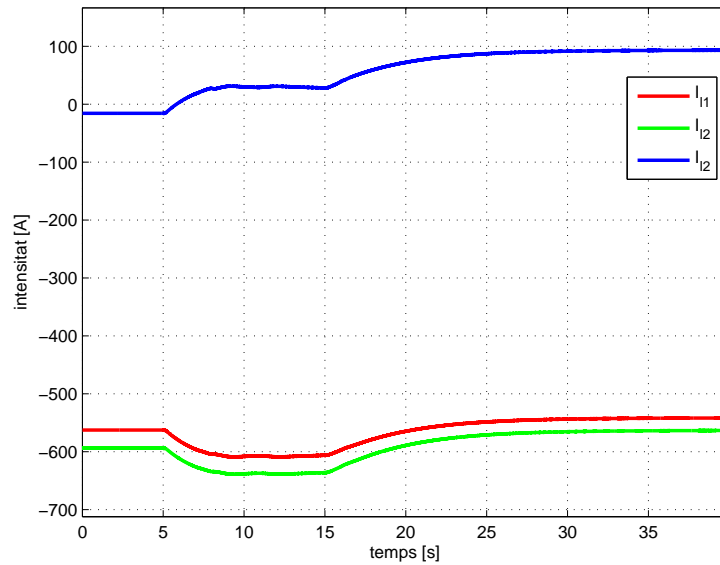


Figura 6.3: Canvi de vent. Corrent per les línies de la xarxa de contínua I_{DC}



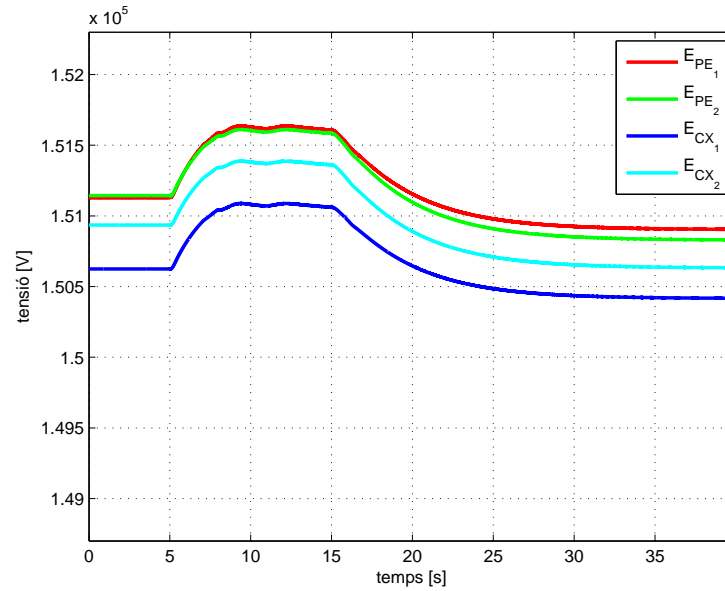


Figura 6.4: Canvi de vent. Tensions en els terminals de contínua dels convertidors E_{DC}

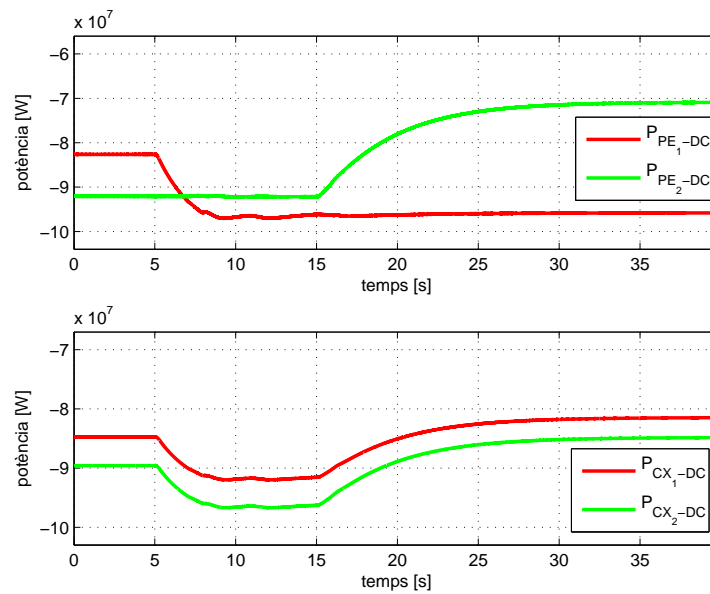


Figura 6.5: Canvi de vent. Potència ens els nodes dels terminals de contínua P_{DC}



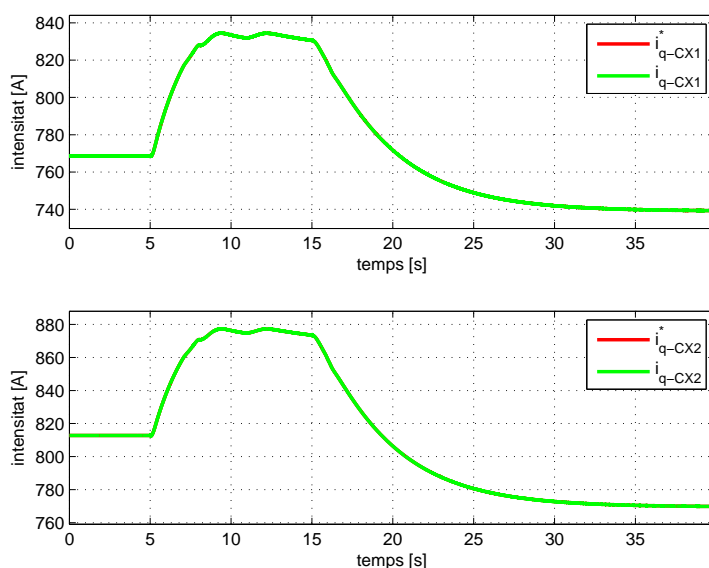


Figura 6.6: Canvi de vent. Consignes i corrents i_{qi} dels costats de la xarxa CX_n

6.2.3 Observacions

L'objectiu fonamental d'aquesta simulació és veure el comportament del sistema complert amb unes entrades tipus graó, ja que permet estudiar el comportament de les diferents parts del sistema i controlar d'una forma relativament fàcil.

La Figura 6.1 mostra el comportament mecànic del parc eòlic 1, PE_1 , que es veu afectat per una pujada de vent de 12 a 15 m/s a l' instant 5 s. Aquesta provoca una acceleració de l'aerogenerador de forma lenta, d'acord a la dinàmica del conjunt, fins a l' instant 7s que la velocitat del conjunt arriba a 1530 min^{-1} i entra en funcionament el regulador de l'angle de pas. Aquest, es va incrementant fins arribar a un valor de $0,6^\circ$ en estat estacionari.

La Figura 6.2 mostra el comportament mecànic del parc eòlic 2, PE_2 , aquest parc pateix un canvi de velocitat de 13 a 11 m/s a l' instant 15 s. Com que la velocitat es troba per sota el llindar d'actuació de l'angle de pas de l'aerogenerador es troba sempre a zero. Des del punt de vista de la velocitat es pot observar una desacceleració gradual de l' instant 15 al 30 s, deguda a la baixada de la velocitat del vent.

Des del punt de vista de la estabilitat de la xarxa de contínua es pot veure a la Figura 6.4 el funcionament del controlador de tensió *droop* que quan més corrent hi ha a evacuar pel costat d'alterna fa pujar la tensió de la xarxa per pujar la potència a transmetre. Si s'observen les potències a la Figura 6.5 es pot veure un repartiment proporcional entre les dues unitats del costat d'alterna que proporciona el controlador *droop*. D'aquesta manera es pot veure l'evolució de les corrents a la Figura 6.3 on el corrent per la línia 3 I_{l3} fa possible el repartiment de potència entre els convertidors del costat de la xarxa, en concret, lliura potència generada pel parc PE_1 al convertir del costat de la xarxa CX_2 .

Un altre aspecte a vigilar és la correcta injecció de la potència transmesa a la xarxa d'alterna, per això es pot verificar el comportament del controlador de corrent observant que es segueixi la consigna de corrent activa a la Figura 6.6



6.3 Simulació del sistema amb series de vent

6.3.1 Introducció

Aquesta simulació pretén verificar el funcionament del sistema sota una sèrie de vent real, ja que són les condicions més properes que funcionarà el sistema real. En aquest cas, es simulen els dos parcs amb una sèrie de vent diferent per cada parc eòlic. Les sèries es poden veure a la Figura 6.7.

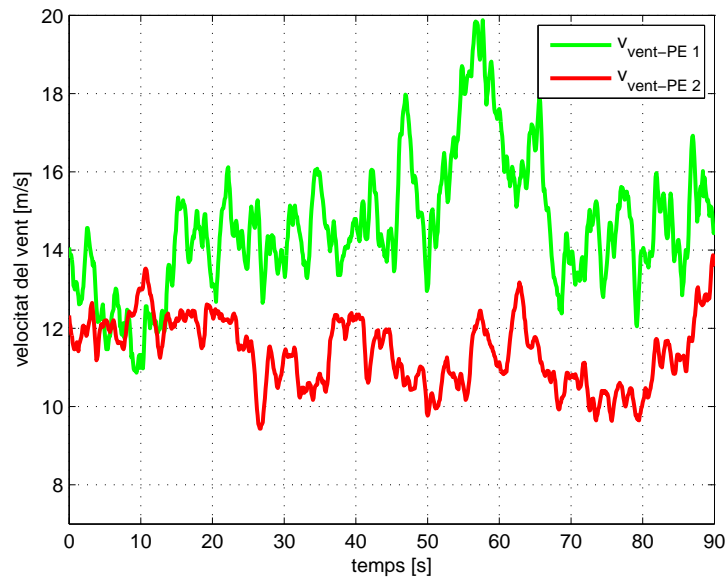


Figura 6.7: Sèrie de vent. Velocitat del vent aportada a cada parc

6.3.2 Resultats

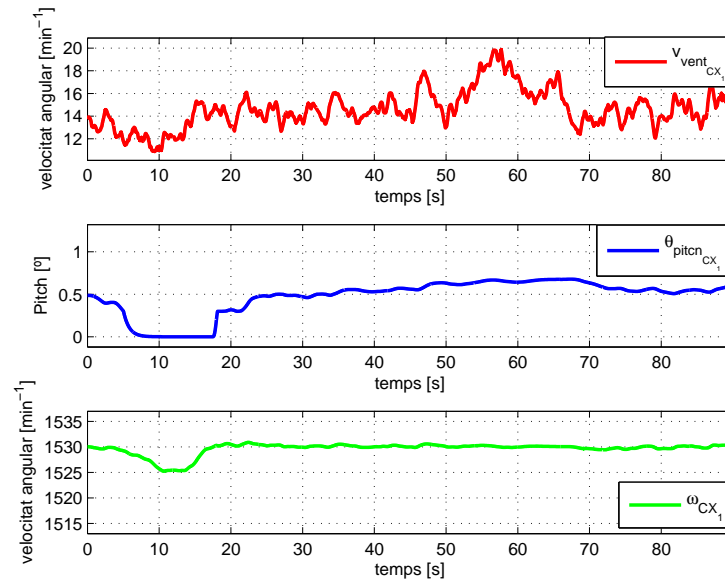


Figura 6.8: Sèrie de vent. Variables mecàniques del parc eòlic 1 PE_2 : v_{vent} , ω_m , θ_{pitch}



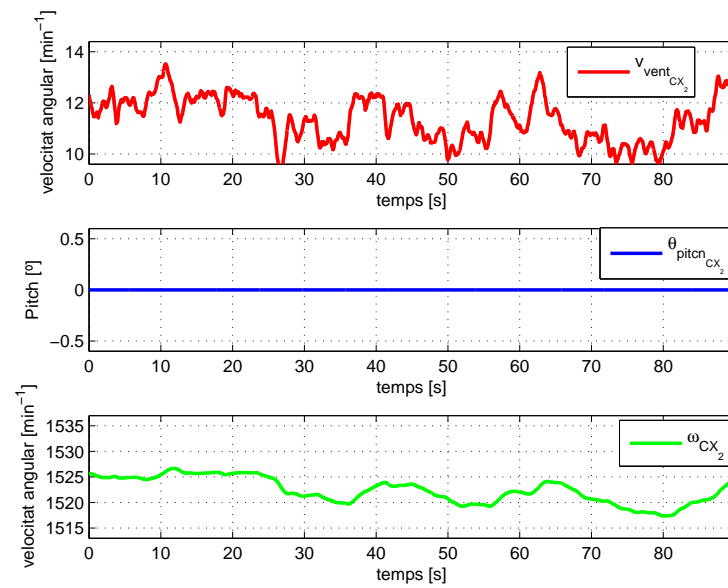


Figura 6.9: Sèrie de vent. Variables mecàniques del parc eòlic 2 PE₂: v_{vent} , ω_m , θ_{pitch}

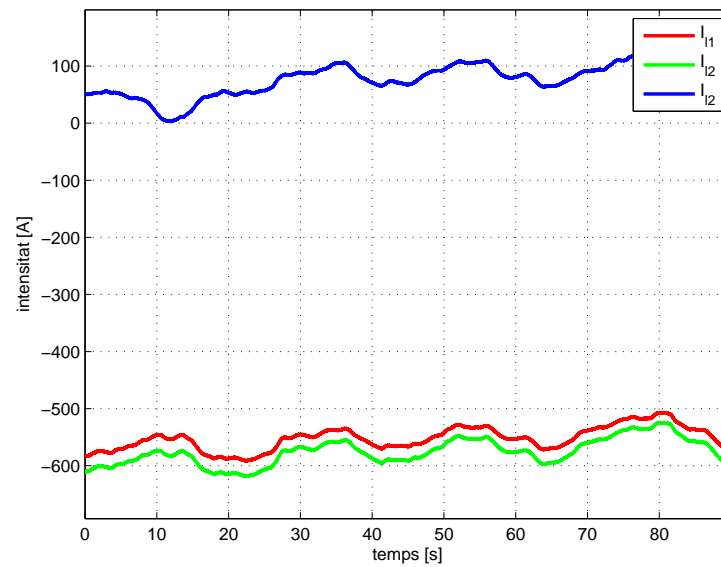


Figura 6.10: Sèrie de vent. Corrent per les línies de la xarxa de contínua I_{DC}



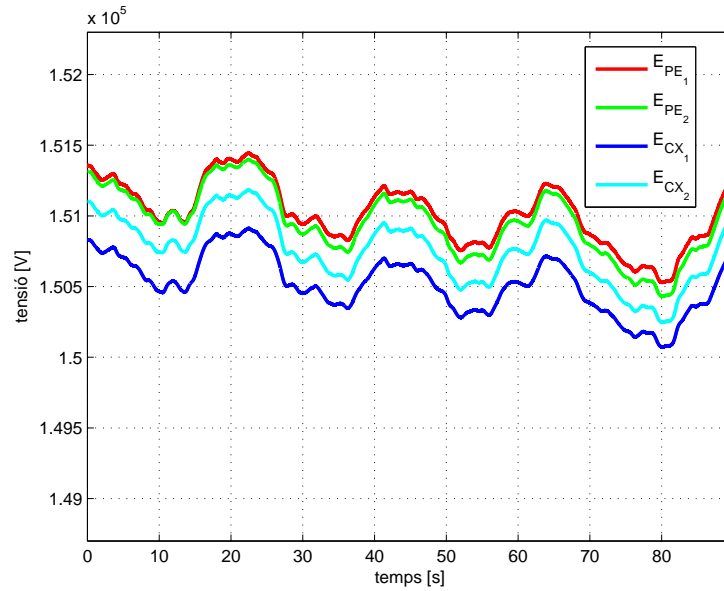


Figura 6.11: Sèrie de vent. Tensions en els terminals de contínua dels convertidors E_{DC}

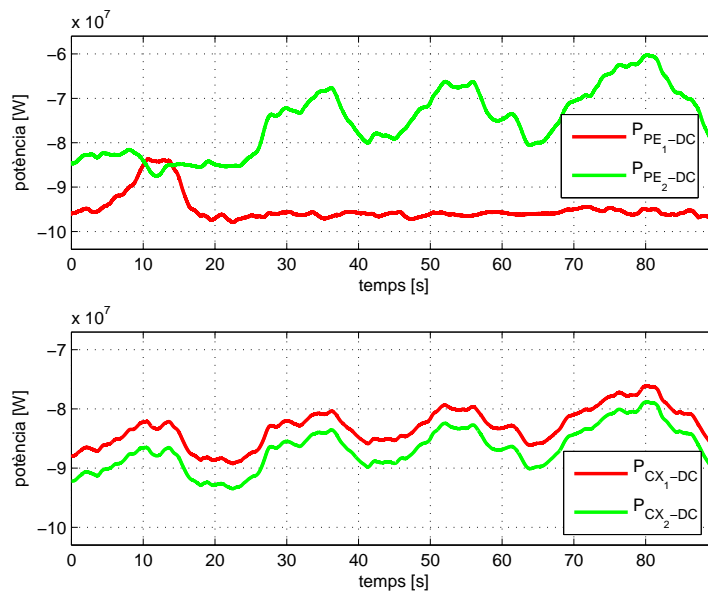


Figura 6.12: Sèrie de vent. Potència en els nodes dels terminals de contínua P_{DC}



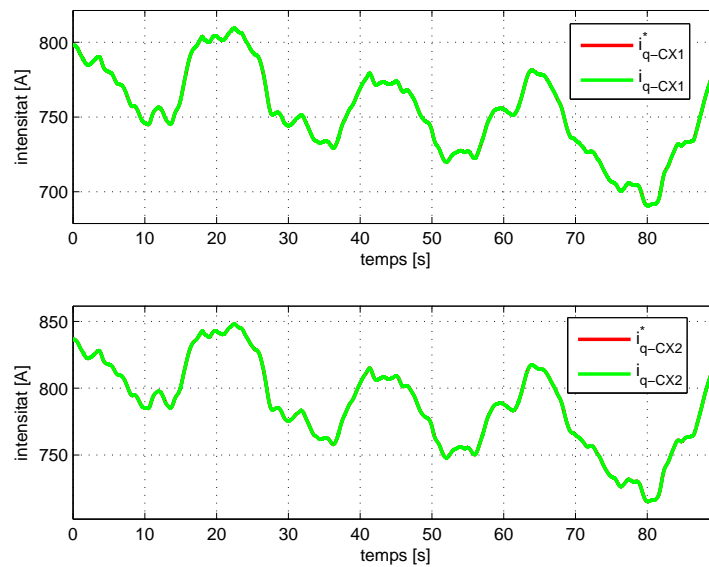


Figura 6.13: Sèrie de vent. Consignes i corrents i_{ql} dels costats de la xarxa CX_n

6.3.3 Observacions

La Figura 6.8 mostra les variables mecàniques del parc eòlic PE_1 davant el comportament d'una sèrie de vent, per aquest parc, es veu que la potència nominal és superat en la majoria del temps i actua la regulació per angle de pas per tal de mantenir la velocitat en el líndar nominal. Aproximadament entre els instants 5 i 15 s es pot veure la desacceleració de la màquina i com es retira l'angle de pas, així verificant el seu comportament dinàmic. Pel que fa al segon parc eòlic la Figura 6.9 mostra com no mai arriba a actuar el regulador de pas.

Les Figures 6.11 i 6.10 mostren l'evolució de les tensions i corrents de la xarxa de contínua, sempre restant entre els líndars d'operació veient que el regulador de tensió *droop* funciona correctament. La Figura 6.12 mostra un repartiment de potència equilibrat entre els diferents punt de connexió amb la xarxa CX_n , si es relaciona amb la gràfica 6.10 es pot dir que la línia 3 és qui realitza l'equilibrat de potències.

Des del punt de vista del controlador de corrent la Figura 6.13 mostra que el sistema és capaç de seguir la consigna.

6.4 Simulació amb presència d'un sot de tensió equilibrat i simètric

6.4.1 Introducció

Una de les falles elèctriques més recurrents ens els sistemes elèctrics de potència són els sots de tensió. Per això, es simula un sot de tensió, trifàsic i simètric que afectarà als dos convertidors del costat de la xarxa. Les característiques d'aquest sot són les descrites a la taula 6.11.

Tipus	Profunditat del sot	Instant inicial	Instant final
-	[%]	[s]	[s]
trifàsic i simètric 1	60	2	2,5

Taula 6.11: Característiques del sot de tensió simulat

La taula 6.12 mostra les entrades tipus vent durant la simulació.

Parc eòlic	Velocitat del vent constant
-	[m/s]
Parc eòlic 1	15
Parc eòlic 2	12

Taula 6.12: Condicions de vent per la simulació del sot de tensió

6.4.2 Resultats

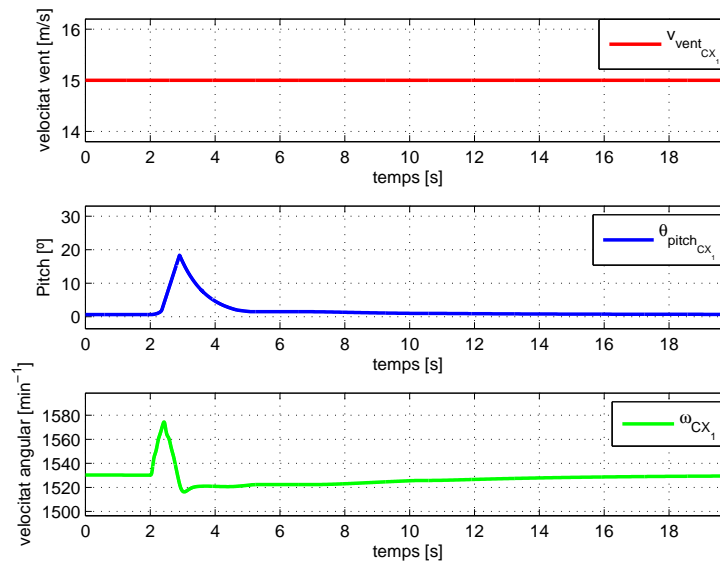


Figura 6.14: Sot de tensió. Variables mecàniques del parc eòlic 1 PE_1 : v_{vent} , ω_m , θ_{pitch}



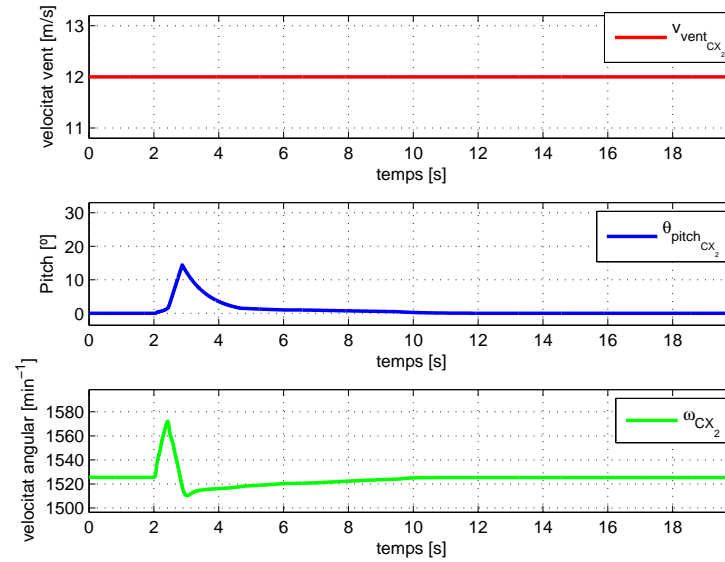


Figura 6.15: Sot de tensió. Variables mecàniques del parc eòlic 2 PE₂: v_{vent} ω_m , θ_{pitch}

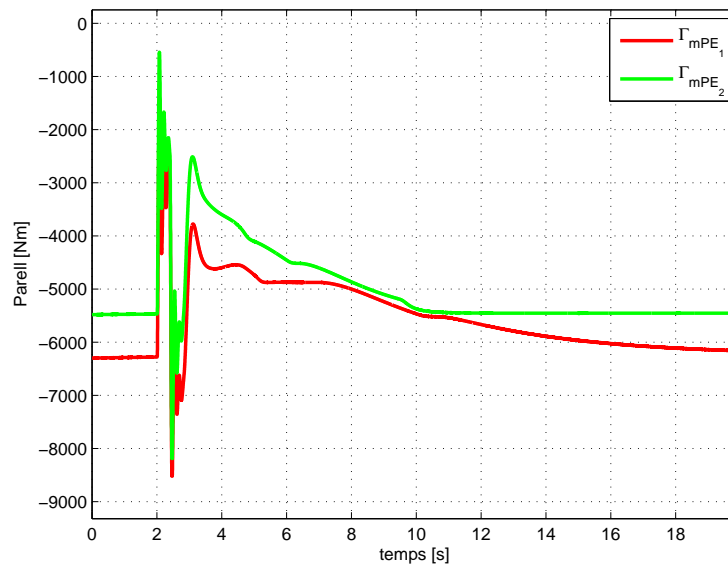
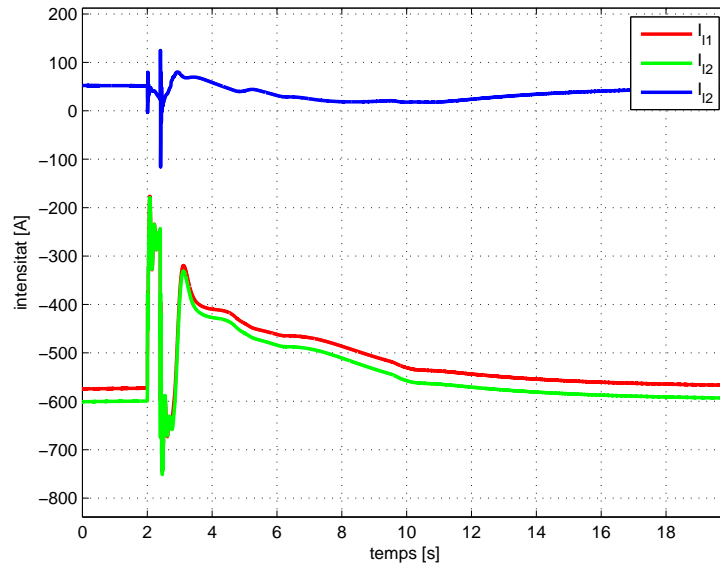
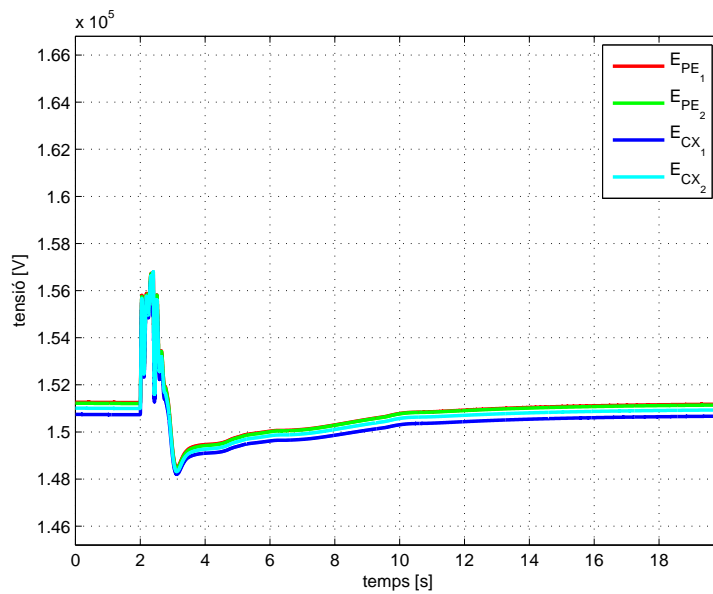


Figura 6.16: Sot de tensió. Parell generador desenvolupat per les màquines Γ_m



Figura 6.17: Sot de tensió. Corrent per les línies de la xarxa de contínua I_{DC} Figura 6.18: Sot de tensió. Tensions en els terminals de contínua dels convertidors E_{DC} 

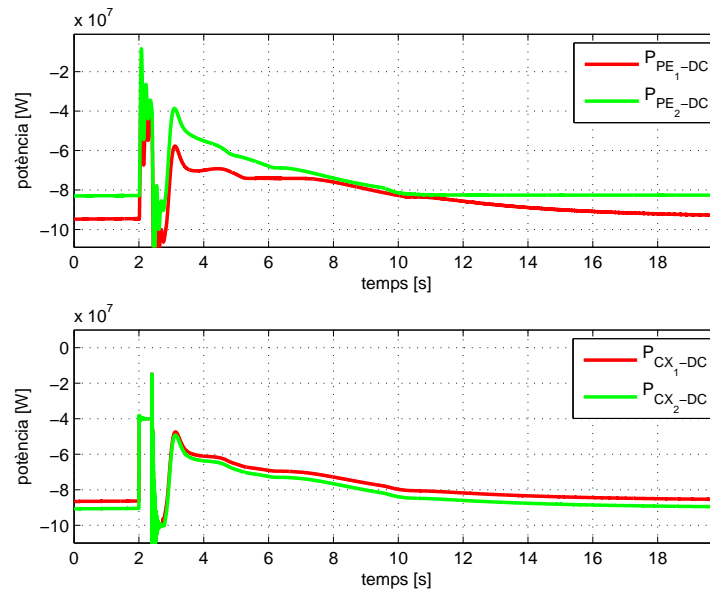


Figura 6.19: Sot de tensió. Potència ens els nodes dels terminals de contínua P_{DC}

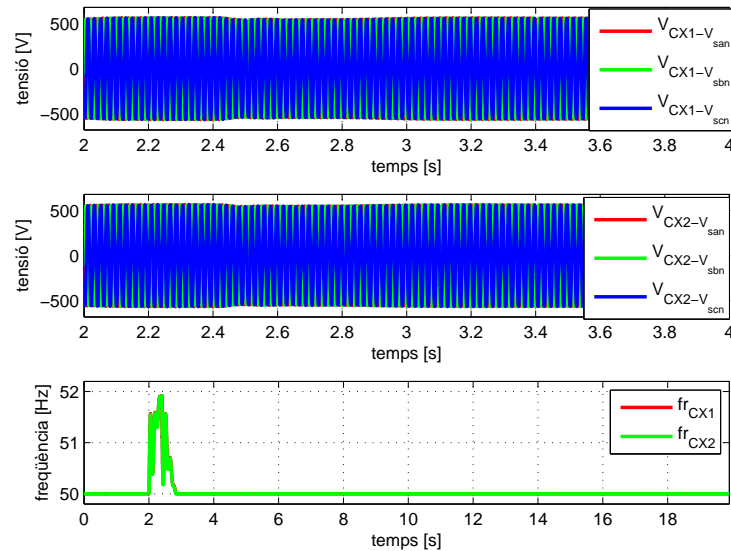


Figura 6.20: Sot de tensió. Estat dels mecanismes de reducció de potència per augment de la freqüència i reducció de la tensió



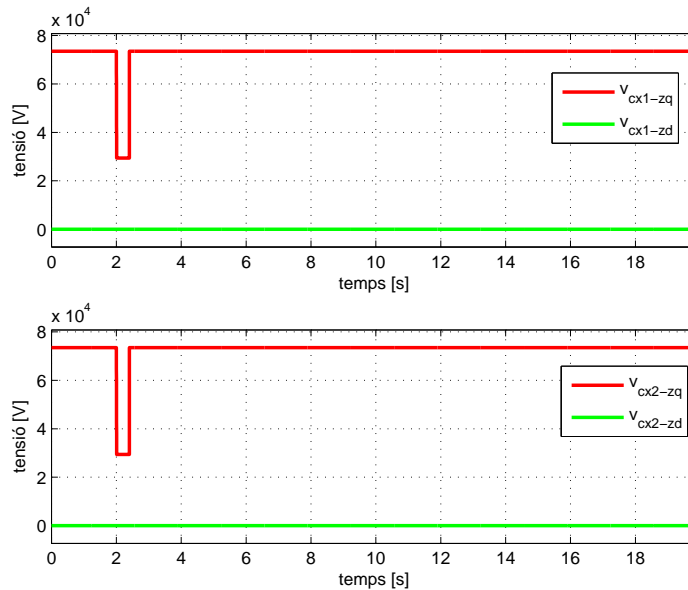


Figura 6.21: Sot de tensió. Consignes i corrents i_q dels costats de la xarxa

6.4.3 Observacions

La Figura 6.21 mostra el sot de tensió que hi ha a les dues xarxes durant 500 ms i una profunditat del 60%. Com que aquest sot es produeix, es redueix la capacitat d'injecció a xarxa dels convertidors com es pot veure a la Figura 6.19 i augmenta la tensió de bus 6.18 i 6.17. Per això, s'ha de reduir la potència que es produeix de forma instantània, a la mateixa Figura es pot veure com es realitza la reducció de potència de forma efectiva gràcies als mecanismes de reducció de potència. La Figura 6.20 mostra l'actuació de la reducció de potència mitjançant l'augment de la freqüència i una lleugera acció de la reducció de la tensió. En cap cas el parell de les màquines passa a ser negatiu, com mostra la Figura 6.16.

Les Figures 6.14 i 6.15 mostren una acceleració de la màquina produïda per la impossibilitat d'entregar potència a la xarxa elèctrica. En les mateixes figures es veu l'acció del regulador d'angle de pas durant el sot per tal de reduir la potència capturada. Quan la xarxa elèctrica es recupera es pot veure com es lliura de forma instantània la potència emmagatzemada en forma d'energia cinètica durant el sot i es recupera la xarxa paulatinament.



6.5 Desconnexió d'un convertidor del costat de la xarxa

6.5.1 Introducció

Un situació crítica en una xarxa multiterminal és la desconnexió d'un convertidor, ja sigui per falla o per manteniment, i veure com reaccionen els parc a aquest esdeveniment. Per això, en aquesta simulació es simula la desconnexió d'un convertidor del costat de la xarxa. La taula 6.13 mostra els paràmetres referents a la desconnexió del convertidor i la taula 6.14 mostra les entrades tipus vent del sistema sota aquestes simulacions. Aquesta prova es duu

Tipus de falla	temps inicial	temps final	convertidor desconnectat
-	[s]	[s]	-
Desconnexió convertidor	5	35	CX_1

Taula 6.13: Instants de desconnexió del convertidor CX_1

a terme amb vent constant per tal d'observar millor el funcionament dels controladors sota les condicions de vent següents,

Parc eòlic	Velocitat del vent constant
-	[m/s]
Parc eòlic 1	15
Parc eòlic 2	12

Taula 6.14: Condicions de vent per la simulació de la desconnexió del convertidor CX_1



6.5.2 Resultats

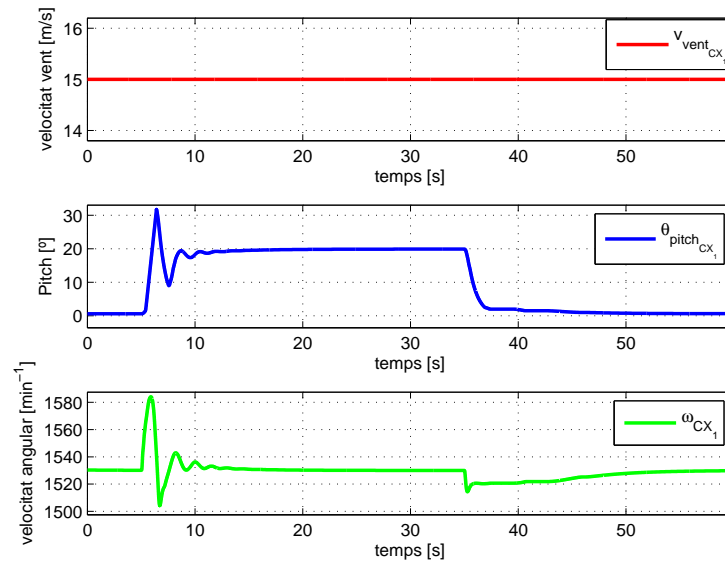


Figura 6.22: Desconnexió d'un convertidor. Variables mecàniques del parc eòlic 1 PE_1 :
 v_{vent} , ω_m , θ_{pitch}



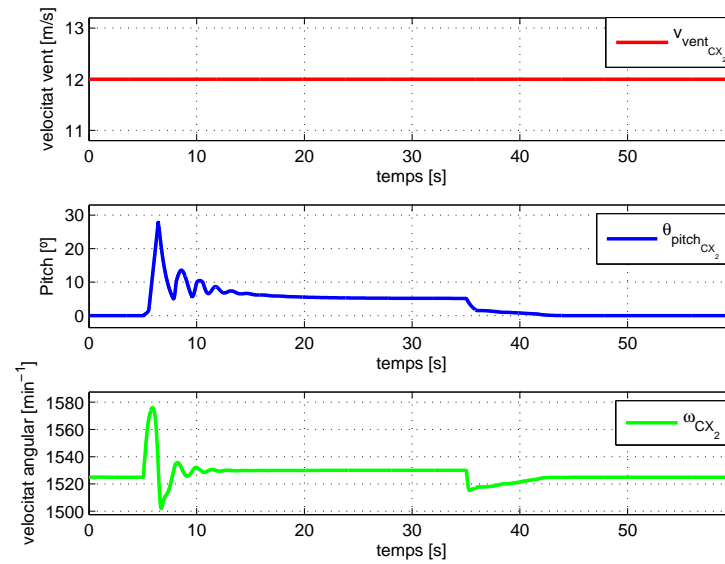


Figura 6.23: Desconnexió d'un convertidor. Variables mecàniques del parc eòlic 2 PE₂: v_{vent} , ω_m , θ_{pitch}

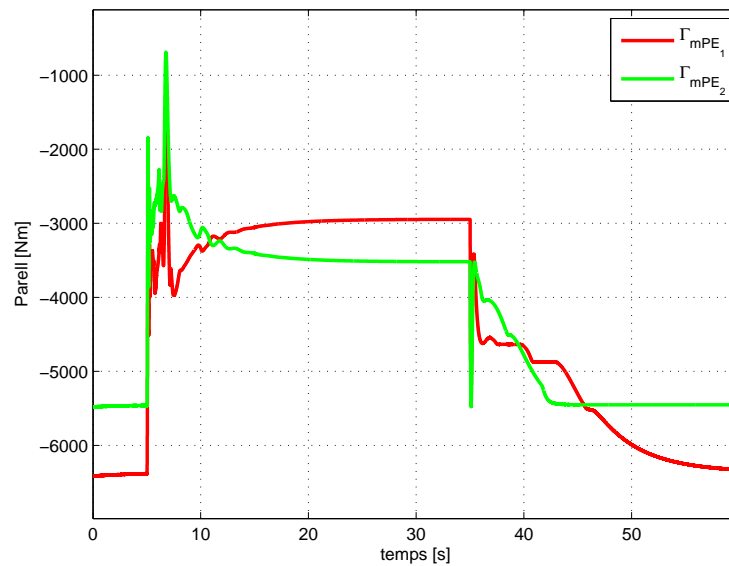


Figura 6.24: Desconnexió d'un convertidor. Parell generador desenvolupat per les màquines Γ_m



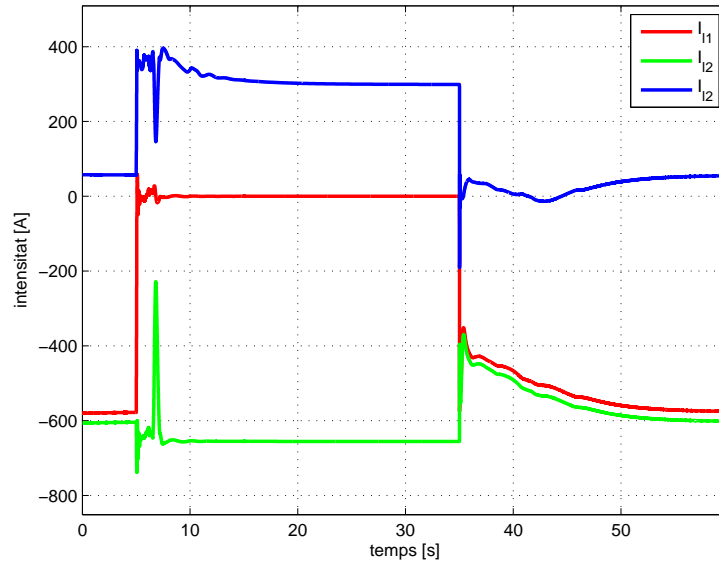


Figura 6.25: Desconnexió d'un convertidor. Corrent per les línies de la xarxa de contínua I_{DC}

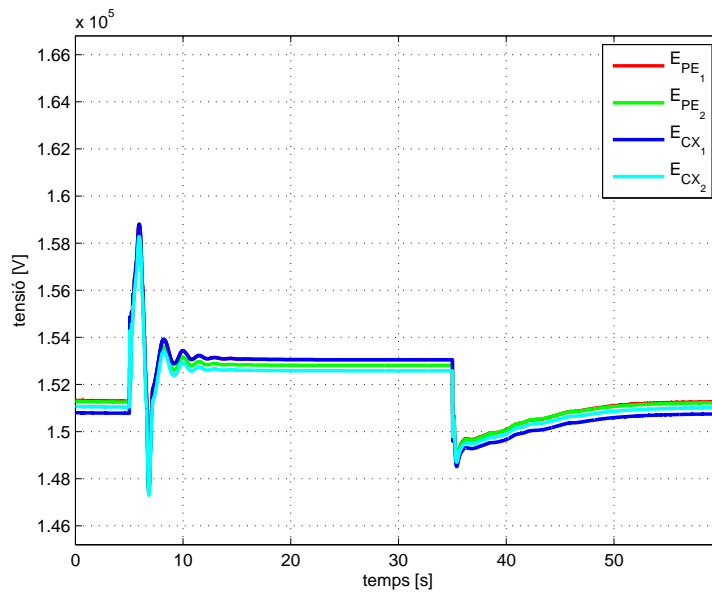


Figura 6.26: Desconnexió d'un convertidor. Tensions en els terminals de contínua dels convertidors E_{DC}



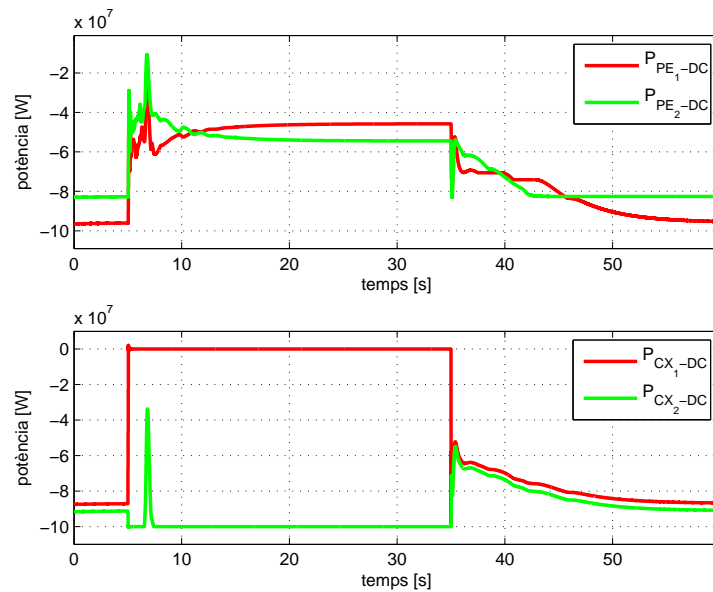


Figura 6.27: Desconnexió d'un convertidor. Potència ens els nodes dels terminals de contínua P_{DC}

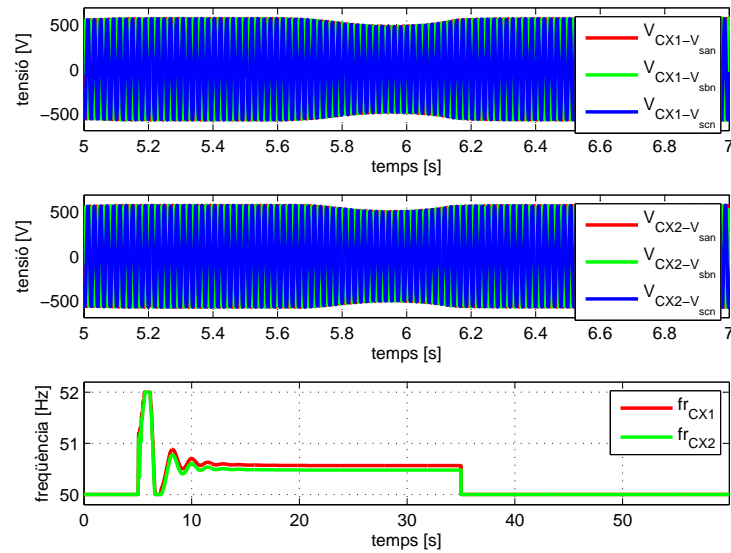


Figura 6.28: Desconnexió d'un convertidor. Estat dels mecanismes de reducció de potència per augment de la freqüència i reducció de la tensió



6.5.3 Observacions

En el cas de la desconexió del convertidor primerament és convenient observar la Figura 6.26 i 6.27 on es pot observar la pèrdua del convertidor CX_1 fet que immediatament fa pujar la tensió del bus de contínua a l'instant 5 de la simulació, cosa que produeix que els parcs eòlics no puguin lliurar la potència a la xarxa de contínua i comença a pujar la velocitat de les màquines com s'observa a les Figures 6.22 i 6.23.

En aquest punt entren un seguit de mecanismes dedicats a la reducció de potència generada, ja que si no es fes res les màquines podrien destruir-se. A les mateixes Figures 6.22 i 6.23, es pot observar com entra en joc el mecanisme de regulació de *pitch* que porta a capturar menys potència. Però, com que la dinàmica que presenten aquest dispositius es lenta es requereixen mètodes instantanis de reducció de la potència elèctrica lliurada a la xarxa de contínua. Per això, a la Figura 6.28 es pot observar com el controlador de reducció de potència per freqüència fa pujar la freqüència de la xarxa, però com que aquesta és insuficient, entra en joc el controlador de reducció de tensió ens els instants més crítics de la simulació. Un cop el sistema s'ha estabilitzat es pot veure com funciona per sobre una freqüència nominal que permet una regulació de potència només amb la freqüència. A la Figura 6.27 es pot observar com s'arriba a un punt estable de funcionament sota el règim degradat de potència. També s'ha de destacar que el parell de les màquines no passa a ser negatiu en cap instant de la simulació 6.24. A l'instant 35 s quan es reconnecta el convertidor es pot apreciar una retirada gradual del *pitch*, i el retorn de la freqüència de la xarxa al seu estat nominal. Passats uns 15 s de la reconexió del convertidor es pot donar el sistema com a restaurat.



Capítol 7

Conclusions

En aquest projecte s'ha presentat en detall la modelització d'una xarxa en corrent continu alimentada per dos parc eòlics i dos punt de connexió a la xarxa. També s'ha usat aquest model per estudiar el comportament del algorismes de control i operació proposats, sobretot els que fan referència a la reducció de potència dels parcs eòlics en cas de fallada elèctrica. Com s'ha pogut veure en les simulacions, els algorismes de reducció de potència funcionen adequadament vers als requeriments que la xarxa elèctrica pugui tenir en qualsevol moment. Al mateix temps s'han verificat els controladors de regulació de la tensió de bus com els llaços de corrent dels convertidors del costat de la xarxa.

De cares a futurs treballs, es podrien mantenir diferents vies de treball, com podria ser l'estudi d'incorporar sistemes de comunicació entre els diferents terminals, que permetrien fer un control total o parcialment centralitzat del sistema. També es proposa poder idear i provar diferents algorismes de reducció de potència que es puguin implementar en el model. Una altra via de treball seria la realització d'un muntatge experimental de baixa potència per tal de verificar els controls proposats.





Agraïments

Primerament voldria agrair molt profundament a l'Adrià Junyent i l'Oriol Gomis la dedicació, atenció i suport que m'han donat en tot el transcurs del l'elaboració del PFC, i fora d'ell, essent uns grans responsables durant el meu període com becari al CITCEA.

Al mateix temps voldria agrair a totes aquelles persones amb qui he compartit moments d'aprenentatge, diversió, reflexió i desesperació que d'alguna manera ens hem trobat involucrats en el tema de la transmissió en contínua, sobretot en David, l'Elena, l'Eduard, la Mònica i la Paola. Com també a tots els companys del CITCEA.

Tampoc em podria oblidar de la meu família que des de que vaig començar els estudis m'han donat suport incondicional per tal de poder-ho aconseguir amb èxit.

A tots,

Gràcies





Bibliografia

- [1] Thomas Worzyk. 100 years of high voltage dc links. *Modern Power Systems*, pages 21–22, 2007. [21](#)
- [2] Owen Peake. The history of high voltage direct current transmission. In *3rd Australasian Engineering Heritage Conference*, 2009. [21](#), [22](#)
- [3] Adrià Junyent. Modelització i control d'un sistema de generació elèctrica de turbina de vent. Master's thesis, ETSEIB-UPC, 2007. [27](#), [87](#)
- [4] Z. Lubosny. *Wind Turbine Operation in electric Power Systems*. Springer, 2003. [28](#)
- [5] J. Slootweg, H. Polinder, and W. L. Kling. *Wind power in power systems*. Wiley, 2005. [28](#)
- [6] Paul C. Krause. *analysis of electric machinery*. Mc Graw Hill, 1986. [29](#)
- [7] Joan Bergas Jané. *Control del motor d'inducció considerant els límits del convertidor i del motor*. PhD thesis, DEE-UPC, 2000. [29](#)
- [8] Andreas Sumper. *Dynamic performance of fixed speed wind turbine generating systems during system fault events*. PhD thesis, UPC, 2008. [29](#), [49](#)
- [9] Juan A. Martinez Velasco. *Sistemas eléctricos de potencia*. CPDA-UPC, 2000. [31](#)
- [10] Wei Qiao, R.G. Harley, and G.K. Venayagamoorthy. Dynamic modeling of wind farms with fixed-speed wind turbine generators. pages 1–8, june 2007. [33](#)
- [11] Y.Q. Jin and P. Ju. Dynamic equivalent modeling of fsig based wind farm according to slip coherency. In *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference on*, pages 1–7, april 2009. [33](#)
- [12] A. Sudrià, Galcera, S Bergas, and J J, Rull. Metodologia de síntesis de convertidores estáticos. In *Reunio de grups de investigacion en ingenieria elèctrica*, 2001. [33](#)
- [13] Philippe Barrade. *Électronique de puissance*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2006. [33](#)
- [14] Guibin Zhang, Zheng Xu, and Ye Cai. An equivalent model for simulating vsc based hvdc. -, 1:20–24 vol.1, 2001. [33](#)
- [15] Ralph L. Hendriks, Ronald Völzke, and Wil L. Kling. Fault ride-through strategies for vsc-connected wind parks. In *EWEC*, 2009. [38](#)
- [16] Se-Kyo Chung. A phase tracking system for three phase utility interface inverters. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 15(3):431–438, may 2000. [42](#)



- [17] Eduard Valseira. Diseño de un control de pitch para la gestión de potencia en una instalación eólica. Master's thesis, ETSEIB, 2008. 45
- [18] vladislav Akhmatov. *Analysus of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power*. PhD thesis, FTU, 2003. 50
- [19] Jun Liang, Oriol Gomis-Bellmunt, Janaka Ekanayake, and Nicholas Jenkins. Control of multi-terminal vsc-hvdc transmission for offshore wind power. -, 2010. 51
- [20] D. Jovicic. Interconnecting offshore wind farms using multiterminal vsc-based hvdc. In *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, page 7 pp., 0-0 2006. 51
- [21] H. Akagi, Y Kanazawa, and A. Nabae. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. *International Power Electronics Conference*, pages 1375–1386, 1983. 79, 81
- [22] H. Akagi, E. Watanabe, and M. Aredes. *Instantaneous power theory and Applications to power conditioning*. Wiley, 2007. 79, 81, 83
- [23] E. Clarke. *Circuit Analysis of AC Power*. John Wiley and Sons, 1941. 79
- [24] R. H. Park. Two-reaction theory of synchronous machines. *AIEE Transactions*, 48:716–730, 1929. 81
- [25] Siemens. Ultra hvdc transmission systems, 2010. 88
- [26] N. Barberis Negra, J. Todorovic, and T. Ackermann. Loss evaluation of hvac and hvdc transmission solutions for large offshore wind farms. *Electric Power Systems Research*, 76(11):916 – 927, 2006. 88
- [27] Thomas Worzyk. *Submarine Power Cables*. Springer, 2009. 88



Apèndix A

Transformada de Clarke i Park

A.0.4 Transformada de Clarke

La teoria de la potència instantània [21, 22] en referència $\alpha\beta 0$, descrita a continuació, es basa en el pas de magnituds elèctriques trifàsiques instantànies expressades en la referència abc , a la referència ortogonal $\alpha\beta 0$ emprant la transformació de Clarke [23]

La transformació de Clarke es defineix de la següent manera:

$$[x_{\alpha\beta 0}] = [T_{\alpha\beta 0}] [x_{abc}] \quad (\text{A.1})$$

i la seva inversa,

$$[x_{abc}] = [T_{\alpha\beta 0}^-] [x_{\alpha\beta 0}] \quad (\text{A.2})$$

on x_{abc} és un vector de tres magnituds en referència abc i $x_{\alpha\beta 0}$ és un vector de magnituds transformades en referència $\alpha\beta 0$.

Les equacions (A.1) i (A.2) també es poden expressar de la següent manera:

$$\begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

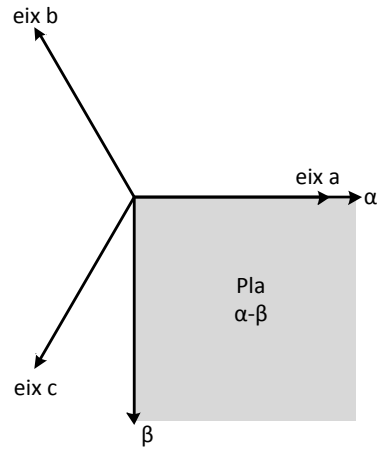
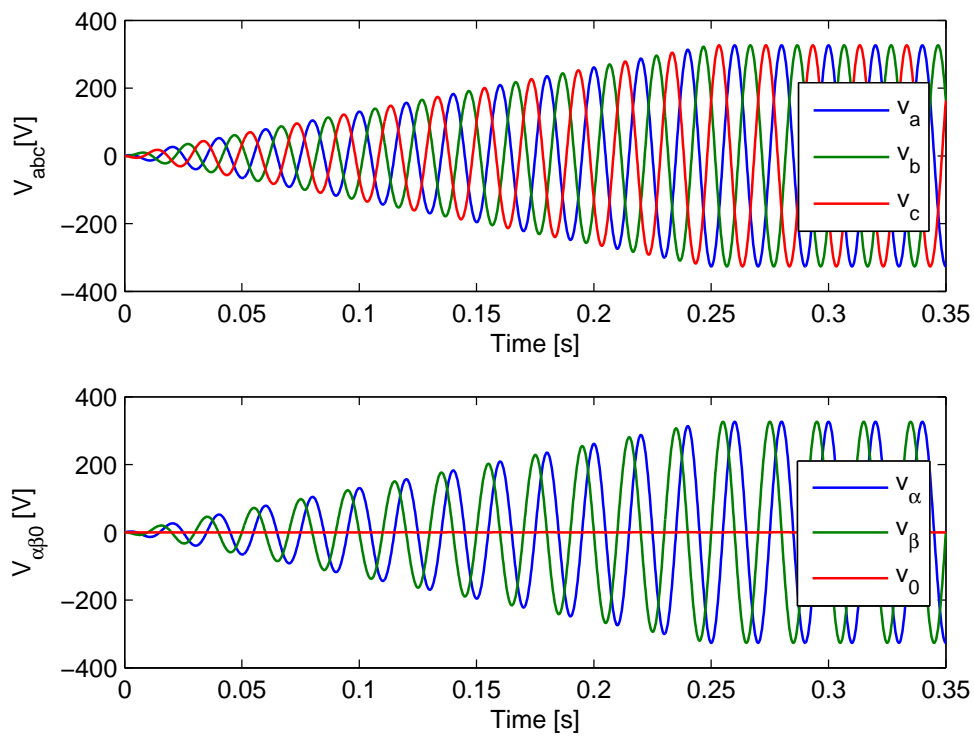
$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \\ x_0 \end{bmatrix}$$

on x_a, x_b, x_c son els valors instantanis de tensió o corrent en referència abc i x_{α}, x_{β} i x_0 són les magnituds transformades en referència $\alpha\beta 0$.

La transformació de Clarke és també una transformació geomètrica tal i com s'il·lustra a la Figura A.1.

A la Figura A.2 es mostra un exemple de tensions trifàsiques tant en referència abc com en $\alpha\beta 0$.



Figura A.1: Representació del pla $\alpha\beta$ Figura A.2: Exemple de tensions trifàsiques en les referències abc i $\alpha\beta 0$ 

Teoria de la potència instantània en referència $\alpha\beta 0$

La teoria de la potència instantània [22] per a sistemes equilibrats i no equilibrats va ser presentada per Akagi al 1983 [21].

Les tensions instantànies i els corrents d'un sistema trifàsic equilibrat poden ser expressats de la següent forma:

$$\begin{aligned} x_a(t) &= \sqrt{2}X \cos(\omega t + \phi) \\ x_b(t) &= \sqrt{2}X \cos\left(\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ x_c(t) &= \sqrt{2}X \cos\left(\omega t + \phi + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Transformant les magnituds elèctriques abc (A.4) a $\alpha\beta 0$ emprant (A.1)

$$\begin{aligned} x_\alpha &= \sqrt{2}X \cos(\omega t + \phi) \\ x_\beta &= -\sqrt{2}X \sin(\omega t + \phi) \\ x_0 &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

on $x_0 = 0$, ja que el sistema és equilibrat.

Definint els fasors de corrent i tensió com a $\sqrt{2}\underline{V}^{\alpha\beta} = v_\alpha - jv_\beta$ i $\sqrt{2}\underline{I}^{\alpha\beta} = i_\alpha - ji_\beta$, l'expressió de la potència en referència $\alpha\beta 0$ es dedueix de l'expressió de la potència en referència abc .

$$\underline{S} = P + jQ = 3\underline{V}^{\alpha\beta} \underline{I}^{\alpha\beta*} = 3 \left(\frac{v_\alpha - jv_\beta}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{i_\alpha + ji_\beta}{\sqrt{2}} \right) \quad (\text{A.6})$$

Reordenant l'expressió (A.6), és possible desacoblar les potències activa i reactiva, de la següent manera:

$$P = \frac{3}{2}(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \quad (\text{A.7})$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha) \quad (\text{A.8})$$

obtenint així les expressions de les potències activa i reactiva en funció de les tensions i corrents en referència $\alpha\beta 0$.

A.0.5 Transformada de Park

Les quantitats en el $\alpha\beta 0$ són útils en nombroses aplicacions, però tenen la mateixa naturalesa oscil·latòria que les quantitats en la referència abc . Pel disseny del controlador és útil treballar amb quantitats constants. Això es pot aconseguir utilitzant la *Transformada de Park* [24] i la denominada referència síncrona.

La Transformació de Park ve donada per

$$[x_{qd0}] = [T_{qd0}] [x_{abc}] \quad (\text{A.9})$$



i la seva inversa

$$[x_{abc}] = [T_{qd0}]^{-1} [x_{qd0}] \quad (\text{A.10})$$

on x_{abc} és un vector amb les tres quantitats de fase en la referència abc i x_{qd0} és un vector amb les quantitats transformades en el marc $qd0$.

La matriu de transformació $T(\theta)$ es pot escriure com

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

i la seva inversa

$$T^{-1} = (\theta) \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

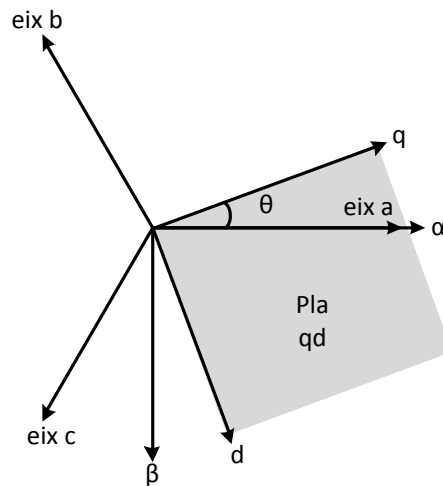


Figura A.3: Representació del pla qd

La Transformada de Park també pot ser interpretada com una transformació geomètrica que combina la Transformada de Clarke i una rotació, il·lustrada a la Figura A.3.

La Figura A.4 mostra un exemple de tensions trifàsiques en les referències abc i $qd0$. S'observa que escollint el correcte angle θ , s'obtenen valors constants.

Teoria de la potència instantània en la referència síncrona

Com s'ha comentat anteriorment, per obtenir quantitats constants en estat estacionari, l'angle θ emprat en la Transformació de Park correspon a l'angle elèctric de tensió. Substituint θ per l'angle elèctric $\theta = \omega t + \phi_0$, i transformant els fasors de corrent en la referència abc a la referència $qd0$, els següents fasors de tensió i corrent es poden definir, anàlogament al cas de la Transformada de Clark, com



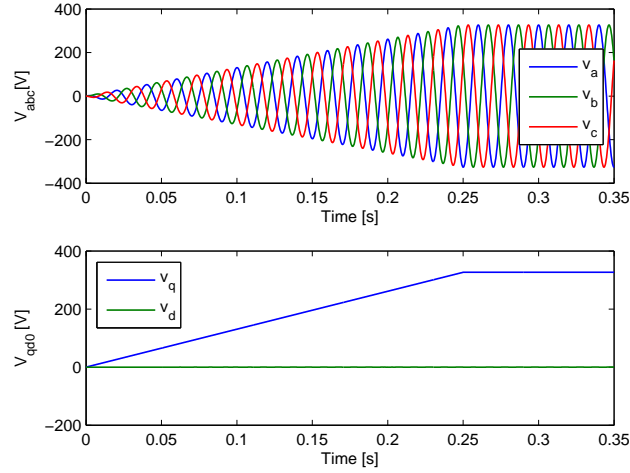


Figura A.4: Exemple de tensions trifàsiques en les referències abc i $qd0$

$$\underline{V}^{qd} = \frac{v_q - jv_d}{\sqrt{2}} \quad (\text{A.13})$$

$$\underline{I}^{qd} = \frac{i_q - ji_d}{\sqrt{2}} \quad (\text{A.14})$$

La potència del sistema trifàsic ve donada per

$$\underline{S} = P + jQ = 3\underline{V}^{qd}\underline{I}^{qd*} = 3\left(\frac{v_q - jv_d}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{i_q + ji_d}{\sqrt{2}}\right) \quad (\text{A.15})$$

Reordenant l'expressió (A.15), la potència activa i reactiva es poden expressar com [22]:

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2}(v_q i_q + v_d i_d) \\ Q &= \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

obtenint l'expressió de la potència activa i reactiva com a funcions de les tensions i corrents en la referència $qd0$.





Apèndix B

Pressupost

B.1 Introducció

El pressupost d'aquest projecte es basa principalment en la tasca de recerca i desenvolupament del model presentat, és a dir, no es considera el cost de cap muntatge experimental.

B.2 Pressupost per la modelització, estudi dels sistemes de control i operació de les xarxes multiterminal en corrent continu

A continuació es presenta el pressupost desglossat en les diferents partides, agrupades per activitats: maquinari programari i mà d'obra. Els preus no contenen l'IVA. El pressupost té una validesa d'un mes a partir de la data de la firma.

B.2.1 Pressupost del maquinari

La taula [B.1](#) mostra el pressupost del maquinari utilitzat per la realització del projecte. Considerant que només s'ha utilitzat aquest equip durant la realització del projecte, que és d'un període de 6 mesos, només es considera la part proporcional de l'amortització corresponent. Per equips informàtics en general es considera una amortització de 4 anys.

Concepte	Preu unitari	Unitats	Cost amortitzat
Ordinador portàtil HP dv3-2320	753 €	1	94 €
Perifèrics (teclat i ratolí)	22 €	1	3 €
TOTAL			97 €

Taula B.1: Pressupost del maquinari

B.2.2 Pressupost del programari

La taula [B.2](#) mostra el pressupost del programari utilitzat per la realització del projecte. Es considera una amortització del programari idèntica a la dels equips informàtics.



Concepte	Preu unitari	Unitats	Cost amortitzat
Matlab ® amb la toolbox SimPowerSystem	2100 €	1	263 €
TOTAL			263 €

Taula B.2: Pressupost del programari

B.2.3 Pressupost de mà d'obra

La taula B.3 mostra el pressupost de la mà d'obra per la realització del projecte. La tasca realitzada en cada tipus de hora es pot descriure com,

- Hores de disseny: Consisteix en les hores dedicades en l'estudi teòric i disseny dels controladors del sistema.
- Hores de programació: Consisteix en les hores dedicades a la implementació i proves amb el suport informàtic.
- Hores de redacció: Consisteix en les hores dedicades a la redacció de la present memòria.

El preu de les hores aquí presentat inclou les tasques descrites anteriorment i les despeses de la seguretat social, IVA no inclòs.

Concepte	Preu/unitat	Unitats	Total
Disseny	40 €/h	250 h	10000 €
Programació	40 €/h	140 h	5600 €
Redacció	40 €/h	150 h	6000 €
TOTAL			21600 €

Taula B.3: Pressupost del programari

B.2.4 Suma per capítols

La taula B.4 mostra el pressupost total com a suma dels deferents capítols.

Capítol	Total
Pressupost del maquinari	97 €
Pressupost del programari	263 €
Pressupost de mà d'obra	21600 €
TOTAL (sense IVA)	21960 €
IVA (18 %)	3952,8 €
TOTAL	25912,8 €

Taula B.4: Suma per capítols

Data: 12 de juliol del 2010

firma: Agustí Egea Àlvarez



Apèndix C

Impacte ambiental

L'impacte ambiental que presenta aquest projecte tindrà dos aspectes fonamentals. El primer, relacionat amb els parcs eòlics marins, i el segon relacionat amb el sistema en transmissió en contínua pròpiament dit.

C.1 Impacte ambiental dels parcs eòlics marins

La instal·lació de parcs eòlics al mar presenta un seguit d'impactes ambientals, ja siguin nocius o positius al medi aquàtic on són instal·lats. En un ordre cronològic segons l'execució del projecte, la construcció dels aerogeneradors no hauria de suposar un impacte major del que presenten els aerogeneradors terrestres actuals. Seguidament s'hauria de tenir present l'impacte que hi ha en el transport i instal·lació dels aerogeneradors, que podria causar trastorns temporals pels diferents medis per on és transportat l'aerogenerador.

Si es consideren les conseqüències de la seva explotació, s'hauria de tenir en compte que els aerogeneradors es troben instal·lats entre dos ecosistemes clarament diferenciats, com poden ser el medi aquàtic i aeri. En el sistema aeri, igual que passa amb els aerogeneradors tradicionals, s'ha de tenir present les rutes de migració dels ocells. Com també, instal·lar el nombre màxim d'avisos lluminosos i colors per evitar el xoc d'aus amb les pales. Si s'observa l'impacte sobre el sistema aquàtic al no haver-hi parts mòbils, s'ha de pensar que després de la instal·lació s'ha de procurar el màxim mimetisme amb el seu entorn.

Si es consideren els efectes sobre la salut humana, un dels problemes més habituals dels sistemes de generació eòlica terrestres és el soroll que provoquen. En aquest cas, al instal·lar els aerogeneradors al mar no es preveuen efectes sobre la salut de les persones físiques.

També s'hauria de considerar l'estudi i seguiment complet de l'anàlisi del Cicle de Vida (ACV) dels diferents dispositius dels parc, que en el cas dels aerogeneradors ronda una vida útil de 25 a 30 anys.

Des d'un punt de vista energètic, si es considera que l'aerogeneració està destinada a substituir la generació més contaminant que hi ha, en el cas espanyol seria la generació per centrals tèrmiques de carbó que emeten de l'ordre de 0,3 kg de diòxid de carboni (CO_2) per cada kWh produït. Així un aerogenerador amb una velocitat mitja de 11 m/s al mig del mar, dona una producció elèctrica de 1,6 MW [3]. Si es calcula l'estalvi en pes de diòxid de carboni, suposa una reducció de 480 kg per hora.



C.2 Impacte ambiental dels sistemes de transport d'energia multiterminal

C.2.1 Impacte energètic dels transport HVDC

En ordre cronològic, la creació i transport dels conductors de contínua no suposa un problema afegit al que presenten els conductors de corrent alterna. Si s'estudia la seva instal·lació, s'ha de considerar, que el fet que siguin subaquàtic presenta un seguit de possibles inconvenients lligats amb l'impacte que poden produir amb la coexistència amb determinada fauna i flora subaquàtica.

Des d'un punt de vista energètic l'ús de les línies en contínua suposa una reducció de les pèrdues [25] de l'ordre del 30-40 % respecte els sistemes d'alterna. Així les pèrdues per cada 1000 km es situen a l'ordre del 3 % de l'energia total transportada. Per exemple, es podria citar l'estudi [26] que fa una comparativa entre diferents sistemes de transmissió de potència, alterna i contínua usant convertidors LCC i VSC.

	Alterna	HVDC LCC	HVDC VSC
Configuració de la línia [MW]	1000	440+600	3x350
Pèrdues a una distància 50 km [%]	1,13	1,75	4,05
Pèrdues a una distància 100 km [%]	2,54	1,87	4,43
Pèrdues a una distància 200 km [%]	7,76	2,11	5,2

Taula C.1: Pèrdues percentuals degudes a la transmissió de 1000 MW

De la taula C.1 extreta de [26] es desprèn que a la solució de la tecnologia HVDC, comença a ser efectiva a partir de llargues distàncies des del punt de vista de les pèrdues energètiques. En concret, la tecnologia LCC té menys pèrdues a partir dels 100 km i la tecnologia VSC presenta menys pèrdues que la solució en alterna a partir dels 200 km. El fet que la tecnologia LCC presenti menys pèrdues que la tecnologia HVDC és base en que la tecnologia VSC presenta més commutacions que la LCC.

Si es fa una comparació de les pèrdues per línies llargues a partir de les dades extretes de la taula C.1 entre la tecnologia VSC i el transport en alterna suposa una diferència del 2,56 % que es tradueix en un estalvi de 25,6 MW. Si es converteix aquesta xifra en tones de CO_2 considerant que s'ha generat utilitzant l'aerogeneració presentada a l'apartat C.1, resulta un estalvi de 7680 de kg de CO_2 per hora en una transmissió de 1000 MW.

C.2.2 Impacte sobre la fauna i flora dels conductors HVDC

La instal·lació de cables marins subaquàtics es realitza a partir de l'obertura d'una petita rasa amb un dispositiu, en forma de ganxo, que s'arrossega amb un vaixell de transport [27]. Un cop oberta aquesta rasa, s'instal·la el conductor i es torna tapar amb la terra que s'ha extret. El fet que hi hagi moviment de terres pot fer que quedi en suspensió una massa de pols que es pot arrossegar uns quants metres en cas d'una forta corrent marina.

Des d'un punt de vista mediambiental, s'ha de tenir present l'empremta que deixa l'obertura i tancament de la rasa sobre el medi. Normalment, segons els estudis que s'han realitzat al mar del Nord, la recuperació de la flora es realitza amb un any després de la instal·lació. S'haurà de tenir especial precaució quan hi hagi medis marins vulnerables, com podrien ser colònies de coralls. En casos com aquest, s'hauria de desviar el conductor per tal de no afectar a aquest tipus de fauna.

