Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Modelització i control de parcs eòlics marins connectats amb VSC-HVDC

MEMÒRIA

Autor: Joan Van Eeckhout Alsinet
Director: Oriol Gomis Bellmunt
Codirector: Ricard Ferrer San José

Convocatòria: Juny 2017

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Resum

Aquest treball presenta un estudi de modelització, disseny de controladors, mètodes d'operació i simulació de xarxes multiterminals d'alta tensió en corrent continu HVDC *(High Voltage Direct Current*) que interconnecten parcs eòlics marins amb la xarxa terrestre principal. Les xarxes HVDC utilitzen convertidors *Voltage Source Converters* (VSC) per tal de mantenir les tensions constants i per transformar els corrents d'alterns a continus i viceversa.

S'estudien tres casos particulars de xarxes HVDC. La primera presenta una configuració punt a punt. Les altres dues xarxes són multiterminals, la principal diferència entre elles és que la darrera té més d'un punt de connexió amb la xarxa elèctrica de potència.

Es pretén controlar les xarxes de corrent continu sense l'ús de comunicacions entre convertidors. Per això, en operació ordinària, es regula la tensió des dels convertidors VSC de connexió a la xarxa mitjançant llaços de control de tensió o controladors *droop*.

L'estudi de cada cas es fa mitjançant simulacions amb un software del tipus EMTP (*ElectroMagnetic Transients Program*), aquestes es poden emprar en un futur per fer altres estudis i simulacions amb el mateix programari.

Sumari

RESUM 1

SUMARI 3

SUMARI DE FIGURES 5

SUMARI DE TAULES 8

***1.* GLOSSARI** 9

1.1. Símbols 9
1.2. Símbols grecs 10
1.3. Subíndexs 10
1.4. Acrònims 11

***2.* PREFACI** 13

3. INTRODUCCIÓ 15

3.1. Objectius del treball 15
3.2. Abast del treball 15

4. GENERALITATS DE LA TECNOLOGIA HDVC 16

4.1. Avantatges de la transmissió en corrent 16
4.1.1. Transmissions de llargues distàncies 16
4.1.2. Transmissions submarines 16
4.1.3. Connexions asíncrones 17
4.2. Convertidors estàtics de potència 17
4.3. Configuracions HVDC 18
4.3.1. Punt a punt 18
4.3.2. *Back to Back* 18
4.3.3. Multiterminal 18

5. DESCRIPCIÓ DELS SISTEMES ESTUDIATS 20

5.1. Xarxa en configuració punt a punt 20
5.2. Xarxa multiterminal amb tres nodes 20
5.3. Xarxa multiterminal amb quatre nodes 21

6. MODELITZACIÓ DE LES XARXES HVDC 22

6.1. Modelització dels convertidors 22
6.2. Modelització dels cables HVDC 24
6.3. Modelització de la xarxa d'altern i dels parcs eòlics. 25

7. CONTROL DE XARXES HVDC 27
7.1. Control de la xarxa en configuració punt a punt 27
7.1.1. Control del convertidor del costat de la xarxa 27
7.1.1.1. Disseny de la PLL (Phase Locked Loop) 28
7.1.1.2. Disseny del llaç de corrent 30
7.1.1.3. Disseny del llaç de tensió 32
7.1.2. Control del convertidor del costat del parc eòlic 36
7.2. Control de la xarxa multiterminal amb tres nodes 37
7.3. Control de la xarxa multiterminal amb quatre nodes 37
7.3.1. El controlador *droop* 39
8. SIMULACIÓ 40
8.1. Simulació de la xarxa en configuració punt a punt 40
8.2. Simulació de la xarxa multiterminal amb tres nodes 47
8.3. Simulació de la xarxa multiterminal amb quatre nodes 55
9. PRESSUPOST DEL TREBALL 71
9.1. Recursos humans 71
9.2. Recursos materials 72
9.3. Cost total 72
10. IMPACTE AMBIENTAL 73
10.1. Impacte ambiental dels parcs eòlics marins 73
10.2. Impacte ambiental dels sistemes de transmissió HVDC 74
10.2.1. Impacte energètic 74
10.2.2. Impacte sobre la fauna i la flora 74
CONCLUSIONS 75
AGRAÏMENTS 77
ANNEX A 78
Transformada de Park 78
BIBLIOGRAFIA 81

Sumari de figures

Figura 4.1: Convertidors LCC i VSC 18
Figura 4.2: Configuracions de xarxes punt a punt i *Back to Back* 19
Figura 4.3: Configuració de xarxa HVDC multiterminal 20
Figura 5.1: Xarxa en configuració punt a punt 21
Figura 5.2: Xarxa multiterminal amb tres nodes 22
Figura 5.3: Xarxa multiterminal amb quatre nodes 22
Figura 6.1: Esquema modelització convertidors VSC [7] 23
Figura 6.2: Esquema acoblament banda AC convertidors VSC 24
Figura 6.3: Esquema del model de cable equivalent en π ajustat 26
Figura 6.4: Esquema equivalent de Tevenin per a la xarxa AC i els parcs eòlics 27
Figura 7.1: Esquema de control d'un convertidor VSC amb llaç de tensió 29
Figura 7.2: Esquema Control PLL 30
Figura 7.3: Evolució temporal de la freqüència angular de la PLL 31
Figura 7.4: Esquema del llaç de corrent 33
Figura 7.5: Funcionament del llaç de corrent i evolució temporal de les components i_q i i_d, davant canvis dels valors de consigna i_q*i i_d* 33
Figura 7.6: Esquema del llaç de tensió 35
Figura 7.7: Esquema bus DC [7] 35
Figura 7.8: Funcionament del llaç de tensió i evolució temporal de la tensió del bus DC 36
Figura 7.9: Esquema control convertidor VSC del costat d'un parc eòlic 37
Figura 7.10: Esquema control convertidor VSC amb controlador *Droop* 39
Figura 8.1: Tensió DC en borns del convertidor GSVSC 42
Figura 8.2: Tensió DC en borns del convertidor WFVSC 42
Figura 8.3: Corrent injectat pel WFVSC i acció de control del GSVSC 43
Figura 8.4: Potències extretes i injectades pel convertidors WFVSC i GSVSC 43
Figura 8.5: Corrents en referència abc de la xarxa principal i del convertidor GSVSC 44
Figura 8.6: Corrents en referència abc del parc eòlic i del convertidor WFVSC 44
Figura 8.7: Tensió en referència abc de la xarxa principal i de la banda AC del GSVSC 45
Figura 8.8: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor GSVSC 45
Figura 8.9: Tensió en referència abc del parc eòlic i de la banda AC del WFVSC 46
Figura 8.10: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor WFVSC 46
Figura 8.11: Tensió DC en borns del convertidor GSVSC 48

Figura 8.12: Tensió DC en borns del convertidor WFVSC1 49
Figura 8.13: Tensió DC en borns del convertidor WFVSC2 49
Figura 8.14: Corrent injectat per WFVSC1 i WFVSC2 i acció de control del GSVSC.... 50
Figura 8.15: Potències extretes i injectades pel convertidors GSVSC, WFVSC1 i WFVSC2 50
Figura 8.16: Corrents en referència abc de la xarxa principal i del convertidor GSVSC 51
Figura 8.17: Corrents en referència abc del parc eòlic 1 i del convertidor WFVSC1 51
Figura 8.18: Corrents en referència abc del parc eòlic 2 i del convertidor WFVSC2 52
Figura 8.19: Tensió en referència abc de la xarxa principal i de la banda AC del GSVSC 52
Figura 8.20: Tensió en referència abc del parc eòlic 1 i de la banda AC del WFVSC1 . 53
Figura 8.21: Tensió en referència abc del parc eòlic 2 i de la banda AC del WFVSC2 . 53
Figura 8.22: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor GSVSC 54
Figura 8.23: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor WFVSC1 54
Figura 8.24: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor WFVSC2 55
Figura 8.25: Tensions DC en borns dels convertidors GSVSC1 (0,1) i GSVSC2 (0,05) 57
Figura 8.26: Potències GSVSC1 (0,1) i GSVSC2 (0,05) 58
Figura 8.27: Tensions DC en borns des convertidor GSVSC1 59
Figura 8.28: Tensions DC en borns des convertidor GSVSC2 60
Figura 8.29: Tensions DC en borns des convertidor WFVSC1 60
Figura 8.30: Tensions DC en borns des convertidor WFVSC2 61
Figura 8.31: Potències convertidors GSVSC1 i GSVSC2 61
Figura 8.32: Potències convertidors WFVSC1 i WFVSC2 62
Figura 8.33: Corrent acció de control de GSVSC1 62
Figura 8.34: Corrent acció de control de GSVSC2 63
Figura 8.35: Corrent injectat per WFVSC1 63
Figura 8.36: Corrent injectat per WFVSC2 64
Figura 8.37: Corrents en referència abc de la xarxa AC punt 1 i del convertidor GSVSC1 64
Figura 8.38: Corrents en referència abc de la xarxa AC punt 2 i del convertidor GSVSC2 65
Figura 8.39: Corrents en referència abc del parc eòlic 1 i del convertidor WFVSC1 65
Figura 8.40: Corrents en referència abc del parc eòlic 2 i del convertidor WFVSC2 66
Figura 8.41: Tensió en referència abc de la xarxa principal 1 i de la banda AC del GSVSC1 66
Figura 8.42: Tensió en referència abc de la xarxa principal 2 i de la banda AC del

GSVSC2 67
Figura 8.43: Tensió en referència abc del parc eòlic 1 i de la banda AC del WFVSC1 . 67
Figura 8.44: Tensió en referència abc del parc eòlic 2 i de la banda AC del WFVSC2 . 68
Figura 8.45: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor GSVSC1 68
Figura 8.46: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor GSVSC2 69
Figura 8.47: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor WFVSC1 69
Figura 8.48: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor WFVSC2 70
Figura A.1: Representació del pla qd 81

Sumari de taules

Taula 6.1: Paràmetres acoblament convertidors VSC [12] 24
Taula 6.2: Paràmetres del model de cable equivalent en π ajustat [8] 26
Taula 6.3: Paràmetres del model equivalent de la xarxa AC i dels parcs eòlics [12] 27
Taula 7.1: Valors dels paràmetres de la PLL 31
Taula 7.2: Valors dels paràmetres del llaç de tensió 36
Taula 9.1: Pressupost dels recursos humans del treball 72
Taula 9.2: Pressupost dels recursos materials del treball..... 73
Taula 9.3: Pressupost total del treball..... 73

1. Glossari

1.1. Símbols

C Capacitància d'acoblament dels convertidors VSC

c_c Capacitàncies equivalents dels cables submarins

E_{DC} Tensió en un punt del bus de continua

E_{DC}^* Tensió de referència dels controladors

$G_c(s)$ Funció de transferència dels controladors

i Intensitats de les parts alternes

I_{DC} Intensitat que entra al condensador del bus DC

I_{DCl} Intensitat de la font de corrent

I_{DCm} Intensitat que circula pel bus DC

k_i Constant integral dels controladors

k_p Constant proporcional dels controladors

l_c Inductàncies equivalents dels cables submarins

l_l Inductàncies d'acoblament dels convertidors VSC

l_z Inductàncies del model equivalent de Thévenin de la xarxa AC

P Potència activa

P^* Valor consigna de potència activa

Q Potència reactiva

Q^* Valor consigna de potència reactiva

r_c Resistències equivalents dels cables submarins

r_l Resistències parasites d'acoblament dels convertidors VSC

$T_{\alpha\beta 0}$ Transformada de Clarke

$T_{\alpha\beta 0}^{-1}$ Antitransformada de Clarke

T_{θ_e} Transformada de Park

$T_{\theta_e}^{-1}$ Antitransformada de Park

v_{abc} Tensions equivalents de Thevenin per als parcs eòlics i la xarxa AC

v_l Tensions aplicades pels convertidors VSC

1.2. Símbols grecs

ξ Factor d'esmorteïment

ω_e Freqüència angular elèctrica

τ Constant de temps dels controladors

θ_e Angle de fase de la xarxa elèctrica

$\hat{\theta}_e$ Angle de fase estimat de la xarxa elèctrica

1.3. Subíndexs

abc En la referència de les magnituds trifàsiques sinusoïdals

DC Referent al llaç de tensió

int Referent al llaç de corrent

PLL Referent a la PLL

$qd0$ En la referència qd0

1.4. Acrònims

AC	Altern Current
DC	Direct Current
GSVSC	Grid Side Voltage Source Converter
HVAC	High Voltage Altern Current
HVDC	High Voltage Direct Current
IMC	Internal Model Control
LCC	Line Commutated Converter
PI	Controlador lineal amb part proporcional i part integradora
PLL	Phase Look Loop
VSC	Voltage Source Converter
WFVSC	Wind Farm Voltage Source Converter

2. Prefaci

S'ha observat que cal fer un replantejament del model de producció i distribució energètica en l'actualitat. La població mundial està patint les conseqüències de seguir un model de producció basat principalment en l'ús de combustibles fòssils que, a més de ser contaminants, també són finits, cosa que evidencia la necessitat de fer canvis i buscar noves fonts d'energia. Cada cop són més els països que aposten per les energies renovables com a fonts d'energia elèctrica.

També s'estan desenvolupant noves tecnologies de transmissió d'energia més eficients que redueixin les pèrdues i permetin interconnectar diferents punts de la xarxa. Amb aquestes interconnexions i un bon control sobre la distribució d'energia, es poden reduir les pèrdues, millorant l'eficiència global del sistema, i al mateix temps fer-lo més robust, segur i garantint un subministre de més qualitat.

Els darrers avenços en noves tipologies de convertidors fan possible que la transmissió d'energia emprant tecnologia HVDC sigui una alternativa viable i interessant enfront a transmissió HVAC (*High Voltage Alternating Current*) en diferents casos i aplicacions. Una d'aquestes és la connexió entre els parcs eòlics marins i la xarxa terrestre principal, també anomenats *offshore*.

Els parcs *offshore* presenten diversos avantatges respecte als parcs eòlics terrestres o *onshore* tradicionals. Aquests permeten superar les limitacions clàssiques sobre la grandària dels aerogeneradors, ja que no tenen limitacions en el transport com ara el radi de les corbes de les carreteres o la precarietat dels camins que condueixen a la localització del parc. També redueixen l'impacte visual, ja que se situen els parcs a desenes de kilòmetres de la línia de costa, lluny d'aquesta. Al mateix temps, el fet d'instal·lar generació eòlica al mar permet una producció més constant, ja que el perfil del vent és més regular.

Per transportar l'energia cap a les xarxes elèctriques terrestres s'usen sistemes de transmissió d'energia en corrent continu. El transport d'energia elèctrica en corrent altern mitjançant cables presenta moltes pèrdues degudes a la capacitat equivalent del cable, provocat pel seu apantallament, per això se'n reserva l'ús només per a les distàncies curtes.

La tecnologia HVDC obre les portes a la construcció de xarxes multiterminals connectant diversos parcs amb diferents punts de la xarxa. En aquest sentit, s'està desenvolupant un projecte amb l'horitzó situat al voltant del 2050 que preveu la formació d'una xarxa multiterminal, anomenada *Supergrid* [1], que interconnectarà diversos parcs situats a la costa del nord i l'oest d'Europa i alguns situats al mar Mediterrani. Però els sistemes multiterminals HVDC no només s'usen per interconnectar parcs eòlics marins, sinó que tenen altres aplicacions com connexions a llargues distancies travessant deserts [2] i [3].

3. Introducció

Aquest treball recull la modelització, el control i la simulació de diferents xarxes multiterminals HVDC que interconnecten parcs eòlics marins amb la xarxa terrestre principal. Concretament s'estudien tres configuracions de xarxes concretes. La primera connecta un únic parc eòlic marí amb la xarxa elèctrica principal mitjançant una configuració punt a punt. La segona és una xarxa multiterminal que connecta dos parcs eòlics *offshore* amb la xarxa elèctrica principal per un únic punt. L'última xarxa estudiada també és multiterminal i interconnecta dos parc eòlics marins amb la xarxa terrestre principal per dos punts diferents.

En el capítol 4 es fa una breu explicació general sobre la tecnologia HVDC. En el capítol 5 es descriuen les tres ºdiferents xarxes que s'estudien en aquest treball. A continuació, en el capítol 6, es modelitzen els diferents elements que formen part d'aquestes, els convertidors VSC, els cables subaquàtics, la xarxa elèctrica principal i els parcs eòlics *offshore*. Seguidament, en el capítol 6, es dissenyen els diferents controls aplicats als convertidors VSC. En el capítol 7 es presenten i analitzen els resultats de les simulacions de les diferents xarxes estudiades i es comprova si els diferents controls proposats són adequats per les diferents tipologies de les xarxes estudiades. A continuació, en els capítols 8 i 9, es realitza un estudi de l'impacte ambiental i es presenta pressupost del projecte. Finalment s'exposen les conclusions del treball.

3.1. Objectius del treball

Amb aquest treball es persegueixen els següents objectius:

- Estudi i modelització dels elements de les xarxes HVDC mitjançant el programa EMTP-RV.
- Entendre el funcionament i les estratègies d'operació de diferents xarxes HVDC.
- Realització dels controls que permeten operar les xarxes amb seguretat.
- Realització de les simulacions, per tal de verificar els resultats.

3.2. Abast del treball

L'abast d'aquest treball considera l'estudi de les xarxa multiterminals amb la modelització ideal dels convertidors VSC, així que, no es consideren pèrdues ni distorsió harmònica en aquests. Els sistemes de control que es presenten s'han dissenyat considerant amb l'objectiu de que no hi hagi comunicacions entre els diferents components de les xarxes.

El programari emprat per a la modelització i simulació del sistema és el programa EMTP-RV. D'altra banda, la representació i l'anàlisi de resultats es realitza mitjançant el programa MATLAB.

4. Generalitats de la tecnologia HDVC

En l'apartat 4.1 s'introdueixen els principals avantatges de les transmissions en corrent continu. L'apartat 4.2 fa una descripció dels diferents tipus de convertidors estàtics que s'utilitzen per operar amb aquesta tecnologia. Finalment, en l'apartat 4.3 s'expliquen les configuracions HVDC més comunes.

4.1. Avantatges de la transmissió en corrent

La tecnologia HVDC és preferible davant els sistemes HVAC en tres camps d'aplicació: transmissions de llargues distàncies, transmissions submarines i connexions asíncrones.

4.1.1. Transmissions de llargues distàncies

Per transmetre energia a través de llargues distàncies, la tecnologia HVDC utilitza menys cables (dos enlloc de tres, en el cas d'un sistema trifàsic). Tampoc pateix l'efecte pel·licular on a l'augmentar la freqüència del corrent que circula a traves d'un cable, es redueix la secció efectiva d'aquest. Addicionalment, en les transmissions en corrent continu, les inductàncies i les capacitàncies dels conductors només afecten durant els règims transitoris, i no en règim permanent.

Quan s'avalua l'elecció entre HVDC o HVAC apareix el concepte *break-even distance*. La *break-even distance* és la distància a partir de la qual resulta econòmicament preferible instal·lar un sistema de transmissió HVDC enlloc de HVAC. Això succeeix quan el cost de les pèrdues de les transmissions de corrent altern esdevenen superiors al cost de la instal·lació dels convertidors. Tot i que pot presentar valors variables, aquesta distància sol estar entorn els 500 km [4].

4.1.2. Transmissions submarines

L'ús de cables submarins presenta una dificultat deguda a l'existència de capacitats paràsites que obliguen a carregar i descarregar els condensadors periòdicament en les transmissions en corrent altern. Això es tradueix en un augment de la potència reactiva que incrementa les pèrdues. En els cables de transmissió de corrent continu, s'aconsegueix que les capacitats paràsites només afectin durant els règims transitoris.

La *break-even distance* en la qual sol ser preferible la instal·lació d'una transmissió HVDC submarina és considerablement inferior a la terrestre. En les transmissions subaquàtiques, aquesta gira al voltant dels 40 km [5].

4.1.3. Connexions asíncrones

Els sistemes de transmissió en corrent continu permeten fer unes connexions entre xarxes asíncrones de diferents freqüències, típicament aquestes xarxes solen ser de 50 Hz i 60 Hz. Amb aquest tipus d'enllaç aconseguim un aïllament elèctric que pot impedir la propagació de pertorbacions o mal funcionaments d'una xarxa a una altra.

4.2. Convertidors estàtics de potència

Tradicionalment, els convertidors més utilitzats en tecnologia HVDC han estat els de tecnologia LCC (Line Commutated Converters), basats en tiristors. Tot i això, presenten una sèrie d'inconvenients. En primer lloc, es pot controlar el seu tancament, però per obrir-los es necessita una xarxa alterna forta (amb una potència de curtcircuit alta). Aquest fet implica que sempre cal una xarxa de corrent altern (AC) per fer funcionar aquests convertidors. Per últim, no permeten controlar potència activa i reactiva independentment, degut al fet de tenir un únic grau de llibertat, i requereixen filtres per eliminar els harmònics produïts [5].

Aquests convertidors actuen com fonts de corrent unidireccionals permetent voltatges bidireccionals, tal i com es pot observar a la part esquerra de la Figura 4.1.

Actualment, els convertidors estàtics implementats de forma més habitual són els VSC, basats en transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors), que permeten un control tant per obrir-los com per tancar-los quan es desitja. Amb aquesta opció s'aconsegueix un grau de llibertat més, que permet, per exemple, controlar la potència activa i reactiva independentment [5].

Aquest tipus de convertidor actua com a font de tensió unidireccionals permetent corrents bidireccionals, tal i com es pot observar a la dreta de la figura 4.1.

Les xarxes HVDC estudiades en aquest treball utilitzen únicament convertidors del tipus VSC per tal de mantenir les tensions constants i controlar els fluxos de corrent que s'intercanvia entre la part alterna i continua.

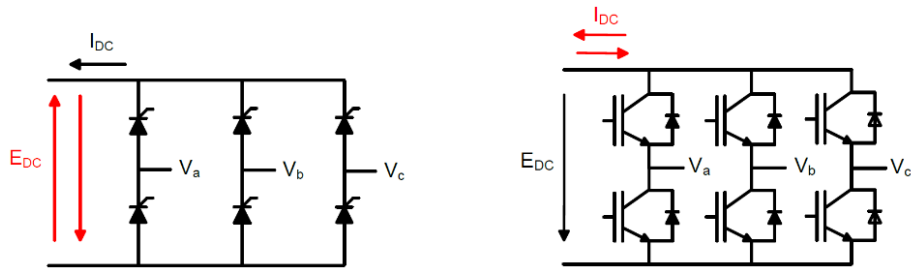

Figura 4.1: Convertidors LCC (esquerra) i VSC (dreta)

4.3. Configuracions HVDC

A continuació es detallen les configuracions més habituals de les xarxes de corrent continu.

4.3.1. Punt a punt

La configuració punt a punt és la més comuna dins els sistemes HVDC. Aquesta enllaça únicament dues estacions convertidores, separades en una certa distància, mitjançant un sistema de transmissió d'energia de corrent continu. Gran part dels parcs eòlics marins connectats amb transmissions HVDC a la xarxa fan servir aquesta configuració. Aquest és el cas de la primera xarxa estudiada i simulada en aquest treball. A la part esquerra de la figura 4.2 s'hi representa un esquema d'una xarxa en configuració punt a punt.

4.3.2. *Back to Back*

El sistema *Back to Back* es basa en la unió de dues estacions convertidores però aquestes estan situades en el mateix emplaçament i no hi ha transmissió d'energia a través de llargues distàncies. D'aquesta manera s'aconsegueix un convertidor indirecte de tipus AC/AC. Aquesta configuració permet transmetre la potència d'una xarxa a l'altra i, alhora, desacobla les dues xarxes AC. Un exemple d'aplicació d'aquesta configuració poden ser les connexions asíncrones. A la part dreta de la figura 4.2 hi ha representat un esquema d'una xarxa en configuració *Back to Back.*

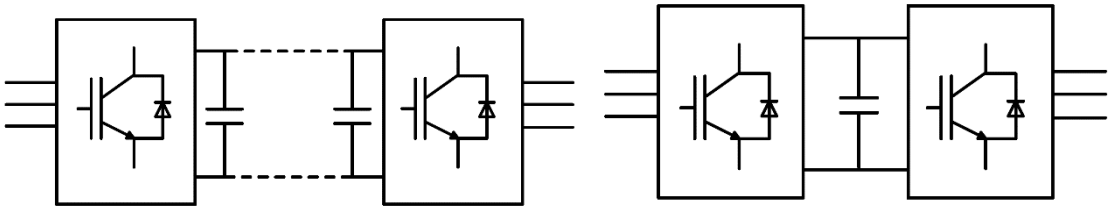

Figura 4.2: Configuracions de xarxes punt a punt i Back to Back

4.3.3. Multiterminal

Una configuració multiterminal interconnecta més de dues estacions convertidores a la mateixa xarxa de corrent continu. Hi ha moltes configuracions multiterminals possibles i el seu control representa encara un repte per a l'enginyeria. A la Figura 4.3 és pot observar un esquema general d'una xarxa HVDC multiterminal.

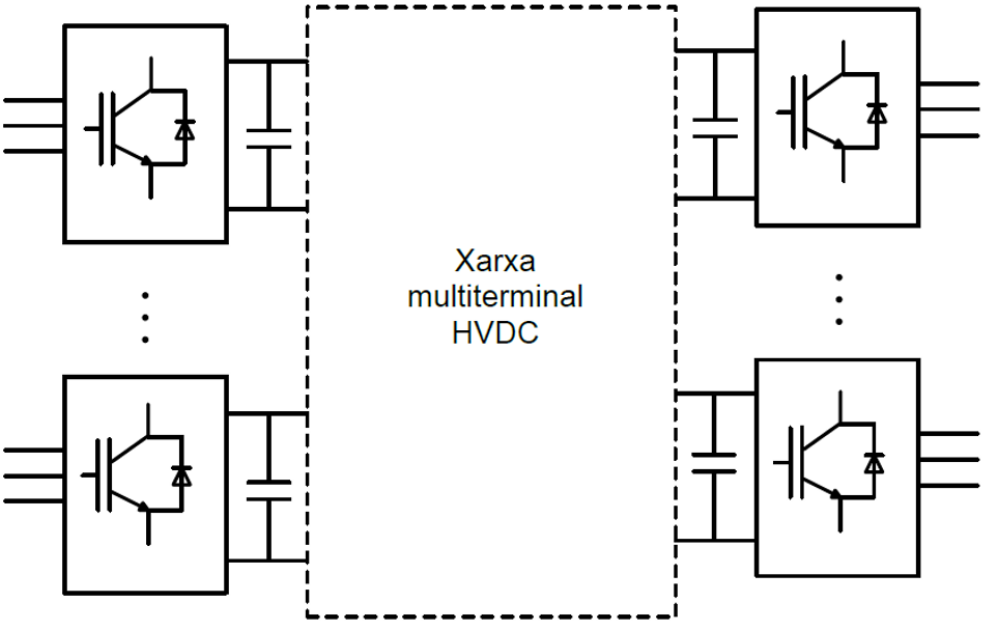

Figura 4.3: Configuració de xarxa HVDC multiterminal

Al 2013 a la Xina es va finalitzar el primer projecte amb un sistema HVDC multiterminal emprant convertidors VSC [6]. El sistema de tres terminals enllaça l'illa xinesa de Nanao amb el continent asiàtic.

En aquest treball s'estudien dues xarxes multiterminals, la principal diferència entre elles és que la darrera té més d'un punt de connexió amb la xarxa elèctrica de potència.

5. Descripció dels sistemes estudiats

En aquest treball s'estudia la modelització i simulació de diferents xarxes de transmissió de potència en corrent continu que connecten diferents parcs eòlics marins amb la xarxa electrica principal. Concretament s'estudien tres configuracions diferents. Una xarxa que presenta una connexió punt a punt i dues de multiterminals amb tres i quatre nodes. Ajustant els diferents sistemes de control que s'empren en aquests tres casos particulars és possible extrapolar els resultats o el sistema d'operació a altres xarxes HVDC amb més terminals.

Per diferenciar fàcilment entre els diferents convertidors s'empren els acrònims WFVSC *(Wind Farm Voltage Source Converter)* pels convertidors del costat dels parcs eòlics i GSVSC *(Grid Side Voltage Source Converter)* pels convertidors de connexió a la xarxa elèctrica principal. En aquest treball s'estudia el funcionament de les xarxes en modes d'operació amb fluxos de potència unidireccionals que va des dels parcs fins a la xarxa terrestre. Tot i això, cal recordar que les xarxes poden treballar de forma bidireccional amb fluxos de potència cap als parcs eòlics, per abastir-los d'energia per exemple en cas d'absència de vent.

5.1. Xarxa en configuració punt a punt

La primera xarxa que s'estudia connecta un únic parc eòlic marí amb la xarxa elèctrica principal amb una configuració punt a punt a partir de dos convertidors VSC i un cable subaquàtic de 100 km. A la figura 5.1 s'observa un esquema d'aquesta xarxa HVDC:

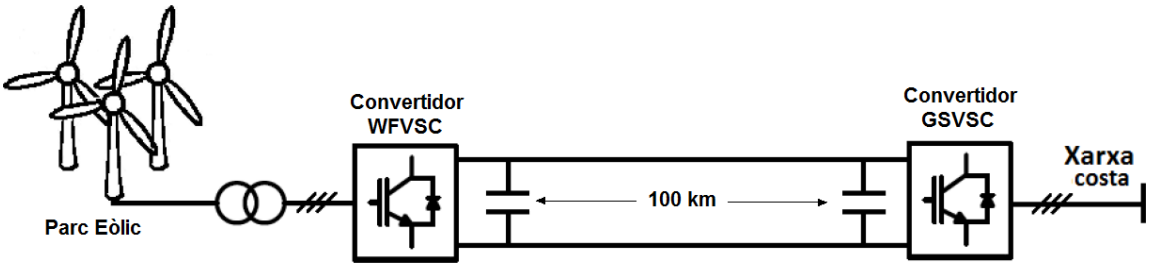

Figura 5.1: Xarxa en configuració punt a punt

5.2. Xarxa multiterminal amb tres nodes

La segona xarxa que s'estudia és multiterminal i connecta dos parcs eòlic marins amb la xarxa elèctrica principal per un únic punt emprant tres convertidors VSC i dos cables subaquàtics de 100 i 80 km. A la figura 5.2 s'observa un esquema d'aquesta xarxa HVDC:

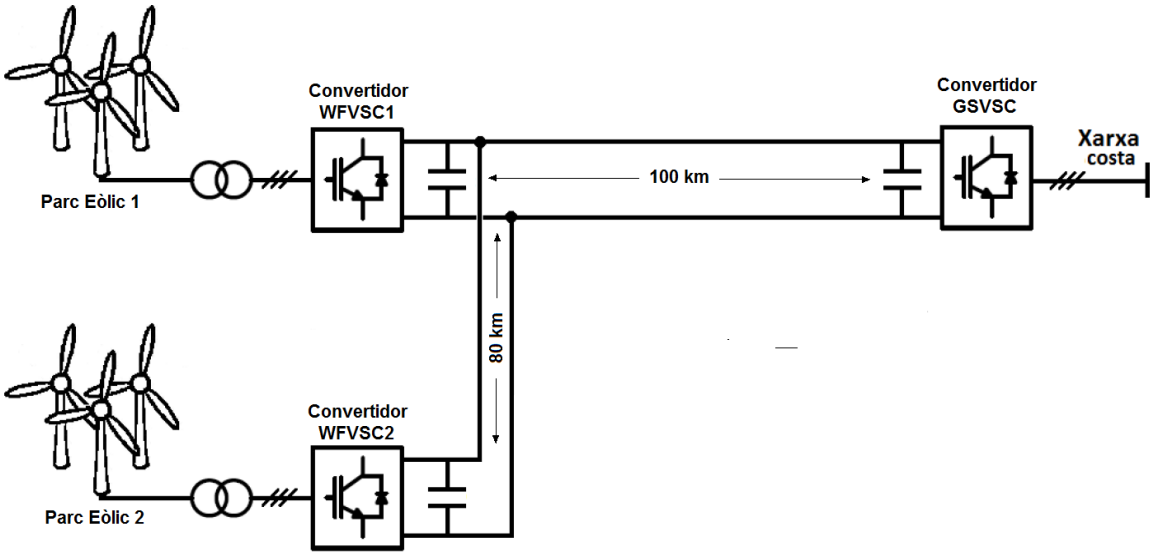

Figura 5.2: Xarxa multiterminal amb tres nodes

5.3. Xarxa multiterminal amb quatre nodes

L'última xarxa que s'estudia també és multiterminal i connecta dos parcs eòlic marins amb la xarxa elèctrica principal usant quatre convertidors VSC i dos cables subaquàtics de 100, 90 i 80 km. A la figura 5.4 s'observa un esquema d'aquesta xarxa HVDC:

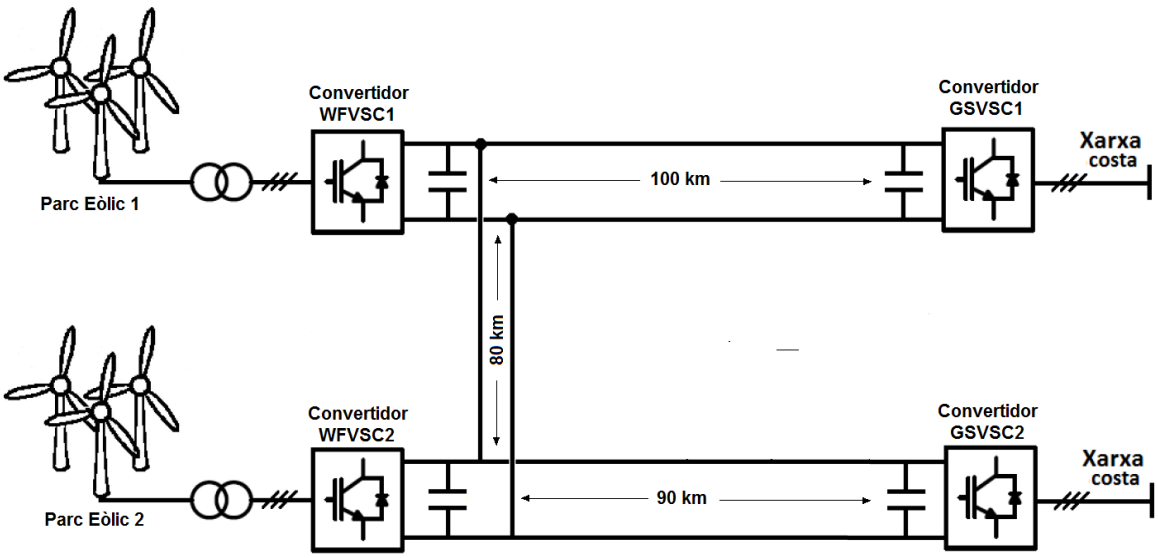

Figura 5.3: Xarxa multiterminal amb quatre nodes

6. Modelització de les xarxes HVDC

En aquest capítol es presenten vàries modelitzacions fetes per estudiar les diferents xarxes. Primerament s'explica la dels convertidors, seguidament la dels cables submarins de corrent continu i finalment les dels sistemes connectats a les xarxes HVDC, tant la xarxa AC com els parcs eòlics. Cal tenir present que mitjançant modelitzacions aconseguim unir i simplificar en un únic model concret una sèrie de dispositius més complexos, per tant, s'ha de ser conscient que amb les modelitzacions ens allunyem del comportament real dels diferents components i que cal comprovar que els models escollits siguin prou propers al funcionament real dels dispositius. Un dels aspectes en el que es pot millorar aquest treball és fent servir altres models més complexos i més fidels a la realitat.

6.1. Modelització dels convertidors

Com s'ha comentat anteriorment, les xarxes estudiades en aquest treball contenen convertidors de tipologia VSC. Tot i que estan formats per 6 transistors IGBT, dos per a cada fase, en la modelització escollida no hi apareix cap transistor. Es simplifica cada convertidor com un conjunt de dues fonts separades i dependents. Una font de corrent a la banda de continua i tres fonts de tensió a la banda d'alterna [7]. A la figura 6.1 s'observa un esquema la modelització dels convertidors VSC emprada en aquest treball.

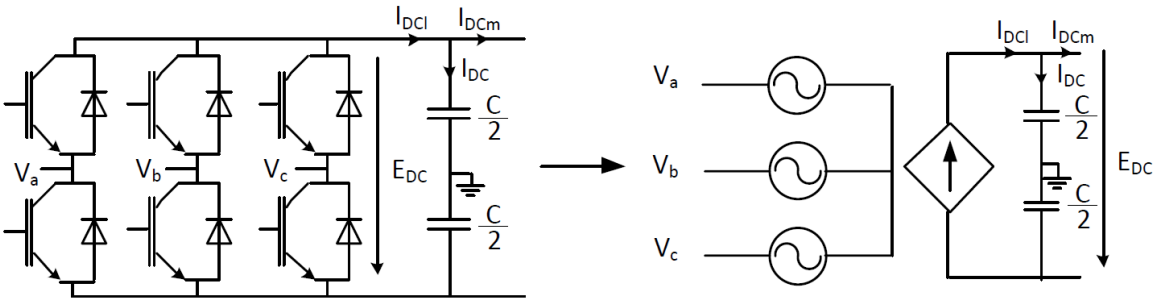

Figura 6.1: Esquema modelització convertidors VSC [7]

Amb aquesta modelització es desacoblen els circuits continus i alterns que uneix el convertidor, mantenint evidentment una relació entre les fonts. Aquesta relació s'obté de considerar que tota la potència que el convertidor extregui d'un circuit serà injectada a l'altre. Així doncs, el valor de la font de corrent s'expressa com:

$$I_{DCl} = \frac{P_{AC}}{E_{DC}}$$

On:

- I_{DCl} és la intensitat de la font de corrent.
- P_{AC} és la potència de la banda d'alterna del convertidor.
- E_{DC} és la tensió de la banda de contínua.

Per poder connectar els convertidors a circuits externs s'han d'afegir elements d'acoblament, evitant així possibles incompatibilitats. Concretament, s'afegeixen inductàncies, amb una resistència paràsita associada, a la banda de corrent altern, i un condensador a la banda de corrent continu. Les inductàncies provoquen que cada fase de la xarxa alterna s'aproximi a una font de corrent mentre que, amb el condensador s'aconsegueix que el bus de contínua es mantingui a una tensió constant, tal i com succeeix realment als convertidors VSC [7]. El model del convertidor amb els seus acoblaments corresponents es mostra a la figura 6.2. Els valors d'aquests condensadors i inductàncies d'acoblament emprats en totes les simulacions són el de la taula 6.1 [12].

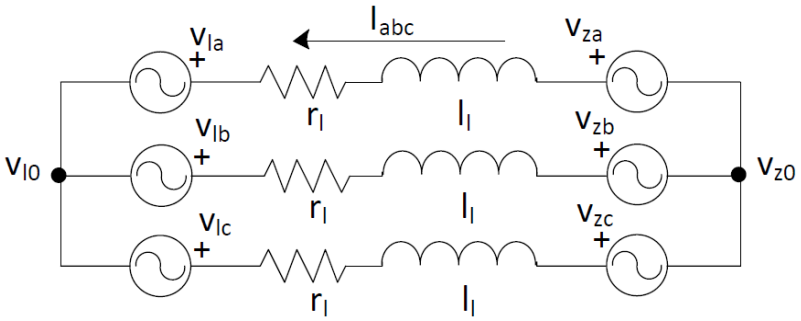

Figura 6.2: Esquema acoblament banda AC convertidors VSC

Paràmetre	Valor
C	$150\ \mu\text{F}$
r_l	$0{,}368\ \Omega$
l_l	$24{,}43\ \text{mH}$

Taula 6.1: Paràmetres acoblament convertidors VSC [12]

Aplicant les lleis de Kirchhoff es troben els voltatges de la part alterna del convertidor i, a través de la transformada de Park, explicada a l'Annex A, s'obtenen les equacions en el sistema de referència qd0:

$$\begin{bmatrix} v_{za} \\ v_{zb} \\ v_{zc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{la} \\ v_{lb} \\ v_{lc} \end{bmatrix} - (v_{l0} - v_{z0}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 & 0 \\ 0 & l_l & 0 \\ 0 & 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ v_{zd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & -l_l\omega_e \\ l_l\omega_e & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix}$$

On:

- v_{za}, v_{zb}, v_{zc} són els voltatges de la xarxa,
- v_{la}, v_{lb}, v_{lc} són els voltatges AC del convertidor,
- r_l és el valor de la resistència de la inductància d'acoblament,
- l_l és el valor de la inductància d'acoblament,
- i_a, i_b, i_c són els corrents de la part alterna del sistema,
- v_{z0} és la tensió del punt neutre de la xarxa,
- v_{l0} és la tensió del punt neutre del convertidor,
- $v_{zq}, v_{zd}, v_{lq}, v_{ld}$ són els voltatges expressats en referència qd0,
- i_q, i_d són els corrents expressats en referència qd0,
- ω_e és la velocitat angular elèctrica.

Si els dos neutres estan desconnectats hi haurà una diferència de potencials expressada per:

$$v_{l0} - v_{z0} = \frac{1}{3}[1 \quad 1 \quad 1] \cdot \left(\begin{bmatrix} v_{za} \\ v_{zb} \\ v_{zc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{la} \\ v_{lb} \\ v_{lc} \end{bmatrix} \right)$$

S'empra el mateix model tant per als convertidors de la banda de la xarxa com per als de la banda del parc.

6.2. Modelització dels cables HVDC

Les xarxes que s'estudien presenten totes connexions subaquàtiques mitjançant cables HVDC. Com s'ha comentat anteriorment, en el cas de ser connexions subaquàtiques la *break-even distance* sol estar entorn als 40 km, per la qual cosa és necessari l'ús d'un model vàlid per a distàncies superiors a aquesta. A més a més, el model de cable ha de ser capaç de mostrar característiques transitòries per tal de poder fer un estudi dinàmic complert del sistema.

El model de cable distribuït compleix aquests requisits, però amb l'inconvenient de què incrementa considerablement el nombre de nodes dels sistemes que s'estudien. Per tant, es descarta aquest model de cable ja que complica de manera considerable l'anàlisi i la simulació del circuit. Es descarta també el model equivalent en T pel mateix motiu. En aquest cas, amb cada model que s'afegeix a la xarxa, s'afegeix un node nou situat al centre d'aquest cable.

Finalment, es tria fer servir un model equivalent en π ajustat com el que s'exposa a [8]. A la

figura 6.3 s'hi representa un esquema del model del cable i a la taula 6.2 es presenten els valors dels diferents elements que el composen. Aquest model presenta unes característiques dinàmiques adients per a un possible estudi posterior del sistema en règims de funcionament fora de l'estat estacionari amb presencia de faltes a la xarxa. Aquest model també és vàlid per a les distàncies de les xarxes que s'estudien. Sempre es pot intentar millorar l'estudi de les xarxes emprant un model de cable més complex i fidel a la realitat, que per contra dificulta les simulacions i requereix més capacitat de computació. És un possible canvi que es pot fer en el cas de necessitar uns resultats més acurats i precisos.

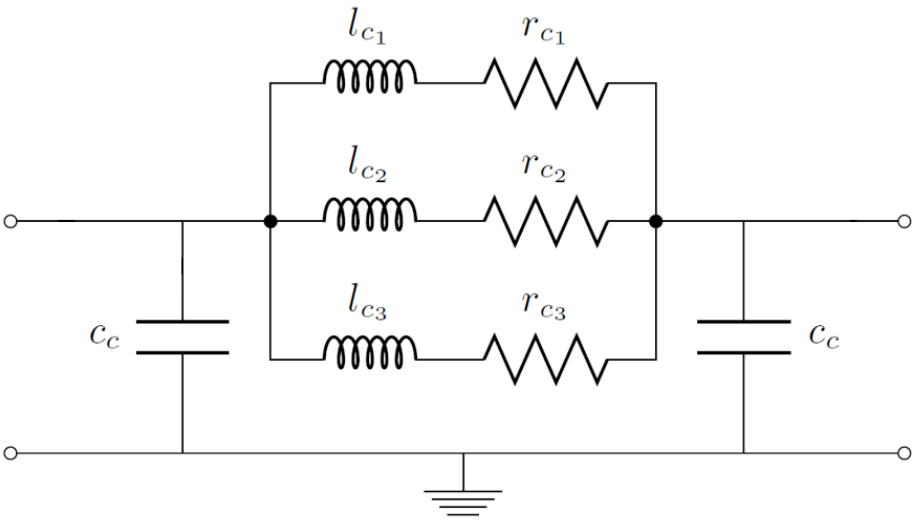

Figura 6.3: Esquema del model de cable equivalent en π ajustat

Paràmetre	Valor
$\boldsymbol{r_{c1}}$	$1{,}1724 \cdot 10^{-1}\ \Omega/\mathrm{km}$
$\boldsymbol{r_{c2}}$	$8{,}2072 \cdot 10^{-2}\ \Omega/\mathrm{km}$
$\boldsymbol{r_{c3}}$	$1{,}1946 \cdot 10^{-2}\ \Omega/\mathrm{km}$
$\boldsymbol{l_{c1}}$	$2{,}2851 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{H/km}$
$\boldsymbol{l_{c2}}$	$1{,}5522 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{H/km}$
$\boldsymbol{l_{c3}}$	$3{,}2942 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{H/km}$
$\boldsymbol{c_c}$	$1{,}9083 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{F/km}$

Taula 6.2: Paràmetres del model de cable equivalent en π ajustat [8]

6.3. Modelització de la xarxa d'altern i dels parcs eòlics.

La xarxa de corrent altern i els parcs eòlics es modelen a partir del model equivalent de

Thevenin, amb tres fonts ideals de tensió d'un sistema trifàsic simètric i equilibrat que es connecten als convertidors mitjançant les resistències i les inductàncies equivalents de Thevenin que caracteritzen les propietats de la xarxa elèctrica en aquell punt [12]. A la figura 6.4 es mostra un esquema del model equivalent de Tevenin, i a la taula 6.2 els valors de les tensions, resistències i inductàncies equivalents de Thevenin.

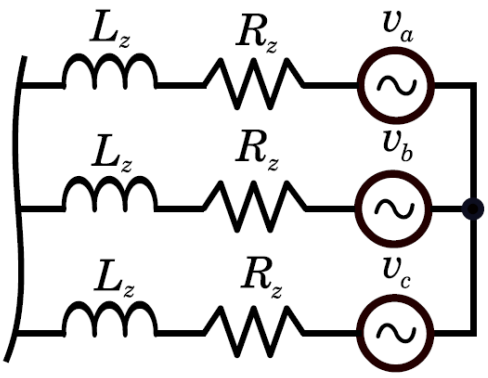

Figura 6.4: Esquema equivalent de Tevenin per a la xarxa AC i els parcs eòlics

Paràmetre	Valor
V_x	90 kV
r_z	3,21 Ω
l_z	34,79 mH

Taula 6.3: Paràmetres del model equivalent de la xarxa AC i dels parcs eòlics [12]

7. Control de xarxes HVDC

El principal objectiu de les xarxes elèctriques de corrent continu és transmetre fluxos de potència des de diferents punts de la forma més eficient possible. En els sistemes estudiats es transporta el flux de potència dels parcs *offshore* fins a la xarxa elèctrica principal terrestre. Per tal de generar aquest flux, és necessari que hi hagi una diferència de potencial, i per transmetre'l eficientment reduint les pèrdues s'ha d'intentar mantenir el potencial a un nivell elevat. Tenint en compte això, s'estableixen diferents sistemes de control amb els quals es controlen les tensions de la xarxa. En tots els diferents sistemes que s'estudien no són necessàries les comunicacions entre els convertidors, aconseguint així uns sistemes de control robustos.

En aquest treball primerament s'estudia un sistema de connexió punt a punt, per tal de comprendre el funcionament de les xarxes HVDC en una configuració senzilla. Posteriorment s'estudien dues configuracions multiterminals i quins canvis cal fer en el control d'aquestes xarxes.

7.1. Control de la xarxa en configuració punt a punt

Les connexions punt a punt consten de dos convertidors. En el cas del transport d'energia des d'un parc *offshore* en condicions estacionàries, el convertidor del parc injecta tota la potència generada pels aerogeneradors a la xarxa HVDC, sense fer cap control sobre la tensió de bus. En canvi, el convertidor connectat a la xarxa elèctrica terrestre és l'encarregat de mantenir constant la tensió a un determinat valor.

7.1.1. Control del convertidor del costat de la xarxa

Com s'acaba de comentar, aquest convertidor s'encarrega de mantenir el valor de la tensió del bus de continu (E_{DC}) a un cert valor de referència (E_{DC}^*). Tanmateix, tal i com s'ha explicat en l'apartat 4.2, els convertidors de tipologia VCS presenten dos graus de llibertat. Amb aquest segon es controla la potència reactiva injectada a la xarxa. En tots els casos estudiats, s'estableix el valor de consigna d'aquesta $Q^* = 0$, per tal de que sigui nul·la. A la figura 7.1 es mostra l'esquema del sistema de control emprat per a aquest convertidor.

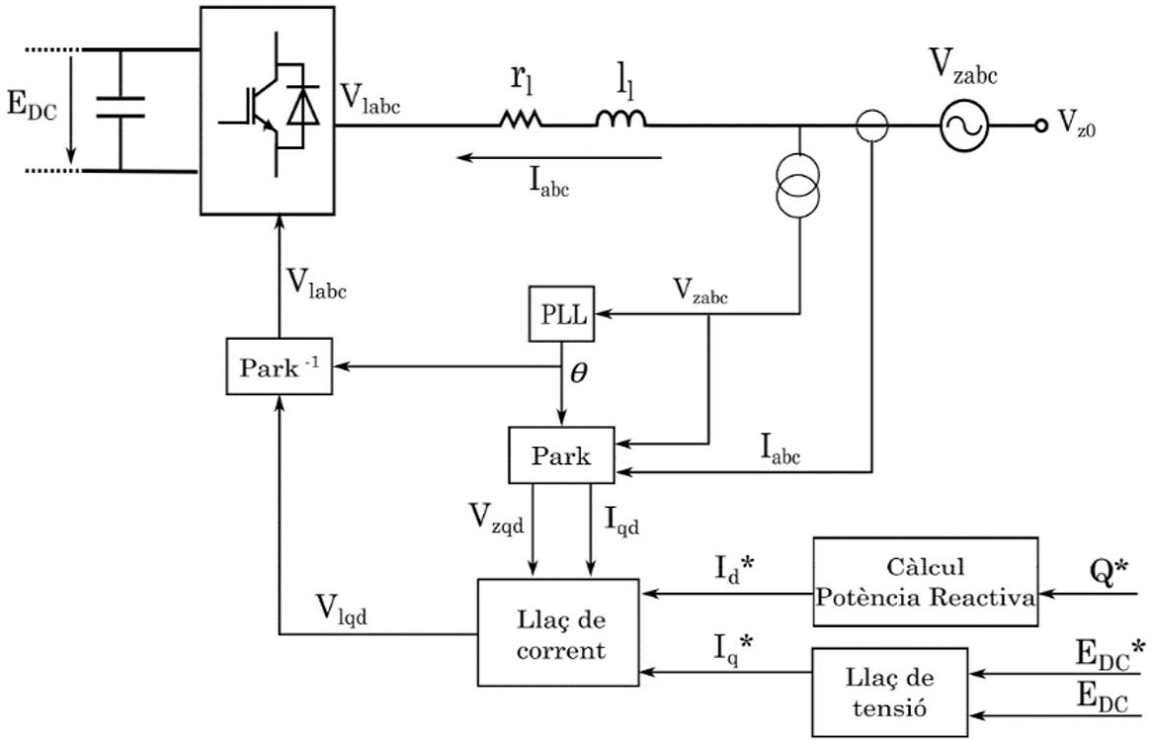

Figura 7.1: Esquema de control d'un convertidor VSC amb llaç de tensió

Amb la modelització dels convertidors presentada a l'apartat 6.1, tenim un control directe sobre les tensions V_{labc} de les fonts d'alimentació de la banda AC del convertidor. El sistema de control presentat es basa en dos controladors en cascada tal com s'explica a [7], mitjançant els quals obtenim quines V_{labc} cal aplicar per obtenir la tensió del bus DC desitjada.

Els llaços de control aplicats en aquest apartat es dissenyen seguint la metodologia descrita a [7]. Com s'observa en l'esquema, en els diferents llaços de control es treballa en referència qd0, per la qual cosa és necessari aplicar la transformada i l'anti-transformada de Park [9]. Per poder fer aquestes transformacions cal conèixer la fase de la xarxa. Per aquest motiu s'implementa una PLL (*Phase Locked Loop*) que manté un seguiment sobre aquest.

A continuació s'expliquen detalladament el disseny de la PLL, així com del llaç de corrent i el llaç de tensió.

7.1.1.1. Disseny de la PLL (Phase Locked Loop)

La PLL serveix per determinar l'angle i la velocitat angular de la xarxa elèctrica. El disseny d'aquesta es fa seguint la metodologia explicada a [10]. La PLL consisteix en la realimentació de la component d del voltatge consignant-la a 0 aplicant un controlador PI. La sortida del controlador és la velocitat angular estimada de la xarxa i, integrant-la, s'obté l'angle estimat. A la figura 7.2 podem observar un esquema de la PLL utilitzada.

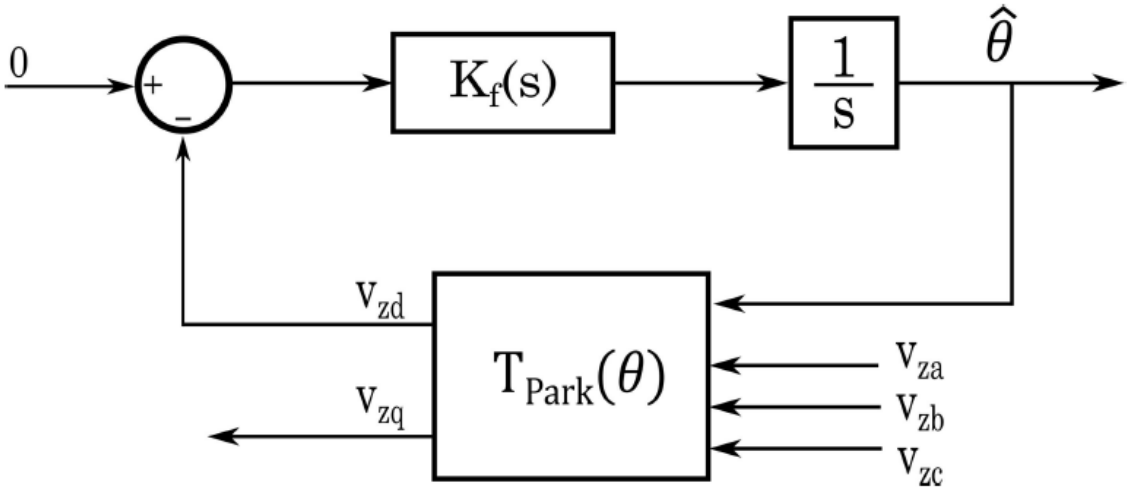

Figura 7.2: Esquema Control PLL

Assumint que la diferència entre l'angle estimat ($\hat{\theta}(s)$) i l'angle real ($\theta(s)$) és petita i linealitzant s'obté el següent sistema de segon ordre:

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{2\xi\omega_n s + {\omega_n}^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + {\omega_n}^2}$$

El controlador PI es pot definir com:

$$K_f = k_{p,PLL}\left(\frac{\frac{1}{\tau_{PLL}} + s}{s}\right)$$

On τ_{PLL} és la constant de temps de la PLL.

Els paràmetres $k_{p,PLL}$ i τ_{PLL} es poden determinar utilitzant les següents expressions:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{p,PLL}E_m}{\tau_{PLL}}}$$

$$\xi = \frac{\sqrt{k_{p,PLL}E_m\tau_{PLL}}}{2}$$

On E_m és el màxim sobre el pic tolerat, ξ és el factor d'esmortiment i ω_n la velocitat angular elèctrica.

A la taula 7.1 es mostren els valors dels paràmetres emprats en el control de les diferents xarxes simulades. A la figura 7.3 es pot observar l'evolució temporal del valor de la freqüència

angular estimada per la PLL en la simulació de la configuració punt a punt (línia continua de clor blau) i s'aprecia com s'estabilitza ràpidament al valor de la freqüència angular de la xarxa (línia discontinua de color vermell). Integrant la freqüència angular, s'obté l'angle de fase utilitzat per fer la transformada de Park.

Paràmetre	Valor
$\boldsymbol{\xi}$	$1/\sqrt{2}$
$\boldsymbol{\omega_n}$	100π (rad/s)
$\boldsymbol{E_m}$	$90.000\sqrt{2}$ (V)
$\boldsymbol{\tau_{PLL}}$	$2\xi/\omega_n$ (s)
$\boldsymbol{k_{p,PLL}}$	$2\xi\omega_n/E_m$
$\boldsymbol{k_{i,PLL}}$	$k_{p,PLL}/\tau_{PLL}$

Taula 7.1: Valors dels paràmetres de la PLL

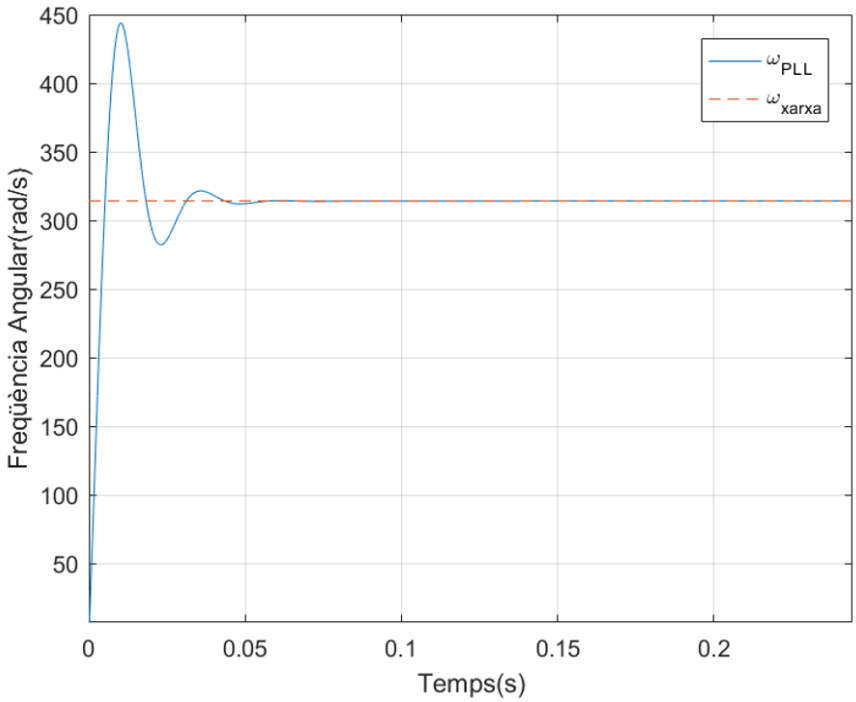

Figura 7.3: Evolució temporal de la freqüència angular de la PLL

7.1.1.2. Disseny del llaç de corrent

Tenint en compte que la PLL fa el seguiment de l'angle a partir dels voltatges de la xarxa v_{za}, v_{zb} i v_{zc} al fer la transformada de Park obtenim una v_{zd} és nul·la. Tenint en compte això, es reescriuen les equacions de voltatge del sistema en referència qd0, exposades prèviament a l'apartat 6.1:

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & -l_l\omega_e \\ -l_l\omega_e & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix}$$

Com s'aprecia en les equacions dels voltatges, les components v_{lq} i v_{ld} dels voltatges depenen, ambdues, d'i_q i d'i_d al mateix temps. Per tal de controlar les dues components del corrent per separat, s'escull aplicar el desacoblament seguit a [7]:

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_{lq} + v_{zq} - l_l\omega_e i_{zd} \\ -\hat{v}_{ld} - l_l\omega_e i_{zq} \end{bmatrix}$$

On $\hat{v}_{lq}$ i $\hat{v}_{ld}$ queden definides per:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{lq} \\ \hat{v}_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 \\ 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix}$$

Aplicant la transformada de Laplace, s'obté la funció de transferència entre les tensions aplicades pel convertidor i les corrents que passen per les inductàncies d'acoblament:

$$\frac{\hat{v}_{lq}(s)}{i_q(s)} = \frac{1}{l_l s + r_l}$$

$$\frac{\hat{v}_{ld}(s)}{i_d(s)} = \frac{1}{l_l s + r_l}$$

Per dissenyar els controladors s'usa la tècnica IMC (Internal Model Control) [11]. En aquest cas els dos controladors són iguals i de tipus PI:

$$G_{cintq}(s) = G_{cintd}(s) = \frac{k_{p,int}s + k_{i,int}}{s}$$

On les constants $k_{p,int}$ i $k_{i,int}$ queden determinades per:

$$k_{p,int} = \frac{l_l}{\tau_{int}}$$

$$k_{i,int} = \frac{r_l}{\tau_{int}}$$

On τ_{int} és la constant de temps del llaç de corrent.

A la figura 7.4 es mostra l'esquema del llaç de corrent intern.

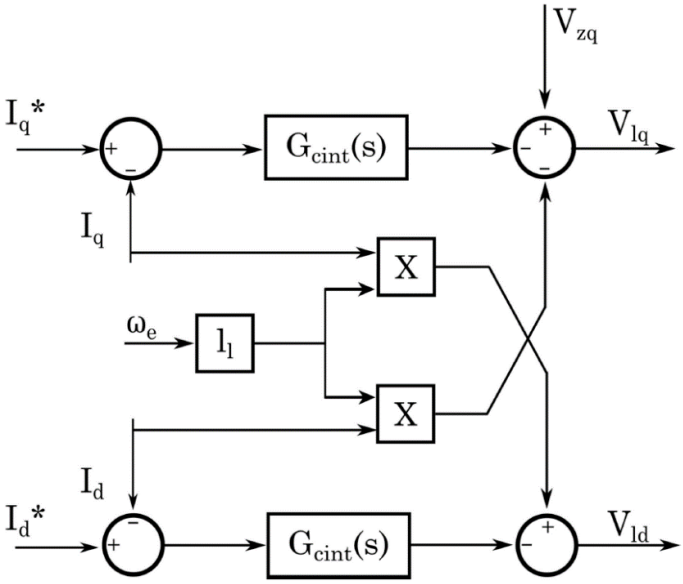

Figura 7.4: Esquema del llaç de corrent

On i_q^* i i_d^* són els valors de consigna desitjats i obtinguts a partir dels llaços de control de nivell superior. En totes les simulacions realitzades en aquest treball s'utilitza una constant de temps pel llaç de corrent de $\tau_{int} = 1\ \mathrm{ms}$.

La Figura 7.5 mostra la resposta del control del llaç de corrent davant de canvis de tipus graó als valors de consigna. S'aprecia com es poden controlar les components q i d del corrent de forma independent. També s'observa com s'obté la resposta pròpia d'un sistema de primer ordre amb una constant de temps d'1 ms.

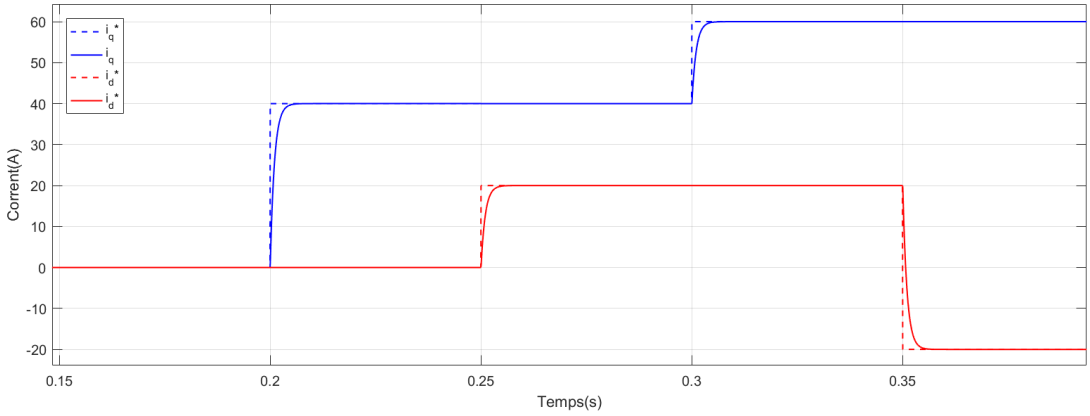

*Figura 7.5: Funcionament del llaç de corrent i evolució temporal de les components i_q i i_d, davant canvis dels valors de consigna i_q*i i_d**

7.1.1.3. Disseny del llaç de tensió

Els valors de consigna i_q^* i i_d^* s'obtenen de les expressions de la potència activa i reactiva. Aquestes expressions són [7]:

$$P^* = \frac{3}{2}\left(v_{zq} i_q^* + v_{zd} i_d^*\right)$$

$$Q^* = \frac{3}{2}\left(v_{zq} i_d^* - v_{zd} i_q^*\right)$$

Com s'ha explicat a l'inici de l'apartat anterior, la component v_{zd} s'anul·la per un bon funcionament de la PLL i en estat estacionari. Per tant, les expressions anteriors es poden reescriure com:

$$P^* = \frac{3}{2} v_{zq} i_q^*$$

$$Q^* = \frac{3}{2} v_{zq} i_d^*$$

Aïllant els termes dels corrents de les equacions anteriors, s'obtenen les expressions dels valors de consigna i_q^* i i_d^*:

$$i_d^* = \frac{2}{3}\frac{Q^*}{v_{zq}}$$

$$i_q^* = \frac{2}{3}\frac{P^*}{v_{zq}}$$

Tal i com s'ha comentat a l'inici de l'apartat 7.1.1, el valor de la potència reactiva Q_z^* es consigna sempre igual a 0 en tots els estudis de xarxes d'aquest treball. Per tant, obtindrem sempre un valor de i_{zd}^* nul. En canvi, el valor consigna i_{zq}^* s'obtindrà a partir de la regulació de tensió del bus DC. Aquest control es basa en mantenir la tensió DC constant i, al mateix temps, injectar a la xarxa AC tota la potència que li arriba del bus DC. Cal recordar que el convertidor respecta sempre la relació entre les fonts de corrent i de tensió del convertidor explicada en l'apartat 6.1. Aquesta relació s'obté de considerar que tota la potència activa que el convertidor extregui d'un circuit serà injectada a l'altre. El valor de la font de corrent expressat es pot ampliar amb:

$$I_{DCl} = \frac{P_{AC}}{E_{DC}} = \frac{\frac{3}{2} v_{zq} i_q^*}{E_{DC}}$$

D'on se n'extreu:

$$i_q^* = I_{DCl}\frac{2}{3}\frac{E_{DC}}{v_{zq}}$$

A la figura 7.5 es mostra l'esquema del llaç de tensió.

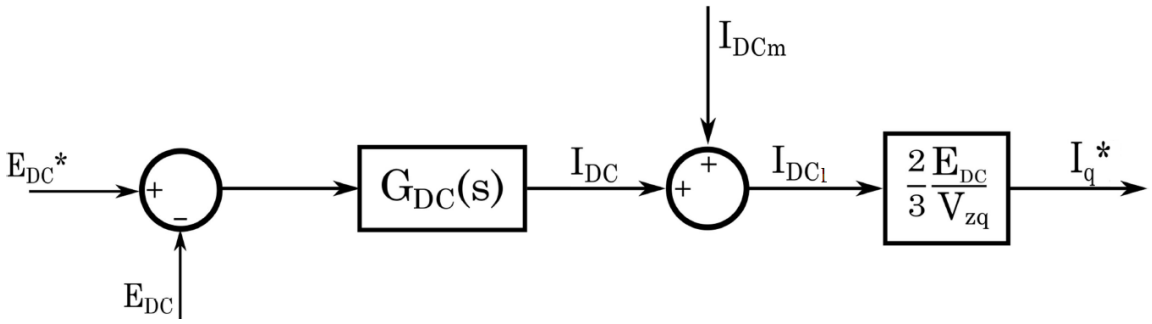

Figura 7.6: Esquema del llaç de tensió

Les entrades d'aquest llaç de control són la tensió de referència E_{DC}^* a la qual es vol mantenir la tensió del bus de continua i la mateixa tensió mesurada al bus E_{DC}. La sortida d'aquest llaç és el valor consigna i_q^*. Per determinar la funció de transferència $G_{DC}(s)$, s'ha d'estudiar el bus DC, que es mostra representat a la figura 7.6:

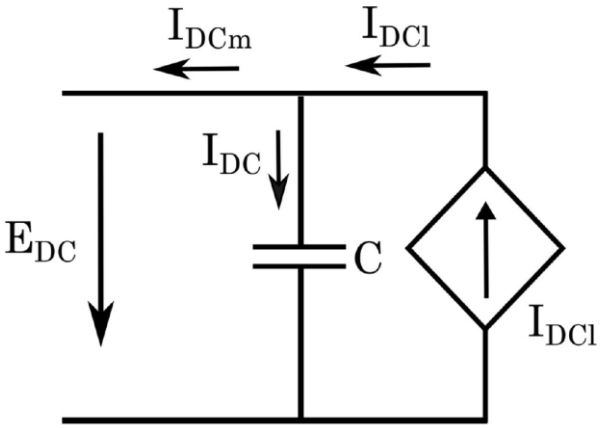

Figura 7.7: Esquema bus DC [7]

Analitzant el bus de continua s'obtenen les següents expressions:

$$I_{DC} = I_{DCl} - I_{DCm}$$

$$I_{DC} = C\frac{d}{dt}E_{DC}$$

D'aquesta darrera en podem extreure la funció de transferència:

$$G_{DC}(s) = \frac{E_{DC}}{I_{DC}} = \frac{1}{Cs}$$

S'implementa un controlador PI utilitzant la tècnica IMC, igual que en el cas del llaç de corrent, aconseguint el següent sistema de segon ordre:

$$G_{DC}(s) = \frac{k_{p,DC}s + k_{i,DC}}{Cs^2 + k_{p,DC}s + k_{i,DC}}$$

A partir de l'expressió pròpia d'un sistema de segon ordre mostrada a continuació i, comparant aquesta amb l'obtinguda anteriorment, els paràmetres del control de $G_{DC}(s)$ són:

$$\frac{2\xi\omega_n s + {\omega_n}^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + {\omega_n}^2}$$

$$k_{p,DC} = 2C\xi\omega_n$$

$$k_{i,DC} = C{\omega_n}^2$$

A la taula 7.2 es mostren els valors utilitzats en totes les simulació pel llaç de tensió. S'empra una freqüència natural major a la del llaç de corrent, ja que aquest el llaç de corrent ha de ser més ràpid.

Paràmetre	Valor
$\boldsymbol{\xi}$	$1/\sqrt{2}$
$\boldsymbol{\omega_n}$	1000π (rad/s)

Taula 7.2: Valors dels paràmetres del llaç de tensió

A la Figura 7.8 es mostra la resposta en la tensió del bus DC (E_{DC}) en aplicar un canvi de tipus graó en la tensió de referència (E_{DC}^*). S'aprecia que la tensió arriba al valor de consigna transcorreguts 5 ms.

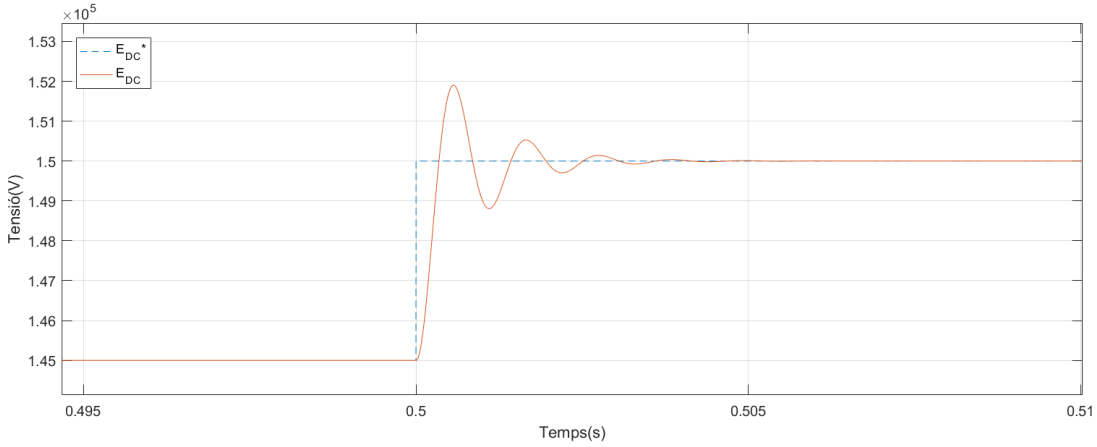

Figura 7.8: Funcionament del llaç de tensió i evolució temporal de la tensió del bus DC

7.1.2. Control del convertidor del costat del parc eòlic

Com s'ha comentat a l'inici de l'apartat 7.1, aquest convertidor s'encarrega d'injectar tota la potència generada pels aerogeneradors a la xarxa HVDC, sense fer cap tipus de control sobre la tensió de bus. Tal i com s'ha explicat en l'apartat 4.2, els convertidors de tipologia VSC presenten dos graus de llibertat. Per tant, es controlen de forma independent les potències activa i reactiva. En tots els casos estudiats es desitja que la reactiva sigui nul·la, perquè aquest es centra en la transmissió de potència per xarxes HVDC, i no en el control de la xarxa interna del parc eòlic o en les pròpies màquines elèctriques dels aerogeneradors, en les quals poden ser desitjables altres valors de potències reactives. Per tant, s'estableix el valor de consigna $Q^* = 0$ que acaba provocant que I_d^* sigui nul·la. A la figura 7.7 es mostra l'esquema del sistema de control emprat per a aquest convertidor, molt semblant al del convertidor del costat de la xarxa.

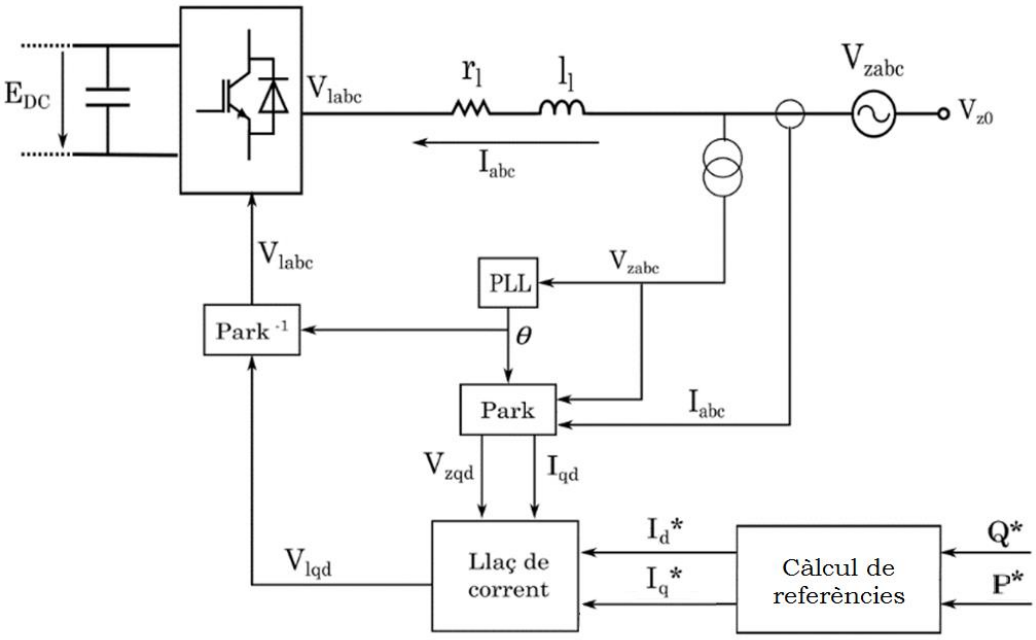

Figura 7.9: Esquema control convertidor VSC del costat d'un parc eòlic

L'única diferència amb el sistema de control del convertidor del costat de la xarxa és l'absència del llaç de control de tensió, ja que aquest convertidor no és l'encarregat de controlar-la. En el càlcul de la potència activa només cal aplicar la senyal consigna en la qual P^* és tota la potència generada pels aerogeneradors a l'equació presentada a l'apartat 7.1.1.3:

$$i_q^* = \frac{2}{3}\frac{P^*}{v_{zq}}$$

Pel que fa a totes les altres parts del sistema de control, tant la PLL com el llaç de corrent, s'empren els mateixos llaços de control amb els mateixos paràmetres que els usats pel

convertidor del costat de la xarxa presentats a l'apartat 7.1.1.

7.2. Control de la xarxa multiterminal amb tres nodes

Aquest tipus de xarxa multiterminal amb dos convertidors connectats a diferents parcs eòlics i amb un únic convertidor de connexió amb la xarxa principal AC és totalment compatible amb el sistema de control per les xarxes en configuració punt a punt presentat a l'apartat 7.1. Per tant, es decideix aplicar el mateix sistema de control que en el cas anterior i els convertidors dels parcs injecten tota la potència generada pels aerogeneradors a la xarxa HVDC, sense fer cap control sobre la tensió de bus. En canvi, el convertidor connectat a la xarxa elèctrica terrestre és l'encarregat de mantenir constant la tensió a un determinat valor i injectar tota la potència que li arriba del bus DC a la xarxa AC. El sistema de control del convertidor del costat de la xarxa és exactament igual, amb els mateixos llaços de control i paràmetres que el presentat a l'apartat 7.1.1 i els sistemes de control del convertidor dels parcs eòlics són exactament iguals, amb els mateixos llaços de control i paràmetres que el presentat a l'apartat 7.1.2. Si la xarxa de tres nodes tingués dos convertidors connectats a la xarxa terrestre i un convertidor al costat dels parcs eòlics els sistema de control que s'hauria d'emprar seria similar al control explicat a l'apartat 7.3.

7.3. Control de la xarxa multiterminal amb quatre nodes

Per controlar les xarxes HVDC multiterminals amb més d'un convertidor de connexió a la xarxa principal terrestre sorgeixen diferents complicacions que impedeixen poder aplicar directament el mateix sistema de control que en els dos altres casos de xarxes estudiats en aquest treball. En condicions regulars de funcionament el sistema de control que s'ha escollit per a aquesta xarxa segueix un mètode d'operació similar en el qual no hi ha comunicacions entre els diferents convertidors. Els convertidors dels parcs injecten totes les potències generades pels aerogeneradors a la xarxa HVDC, sense fer cap control sobre la tensió de bus. En canvi, els convertidors connectats a la xarxa elèctrica terrestre s'encarreguen de mantenir constant la tensió a un determinat valor i de regular quina fracció de la potència que circula per la xarxa HVDC injecten a la xarxa cadascun, evidentment, entre tots els convertidors de connexió a la xarxa terrestre s'injecta tota la potència provinent dels aerogeneradors menys les pèrdues de internes de la xarxa HVDC.

El fet que no es pugui aplicar el mateix sistema de control que en els altres dos casos estudiats es deu a que amb aquest tipus de xarxa hi ha més d'un convertidor de connexió amb la xarxa alterna principal que intentarien injectar tota la potència possible directament a la xarxa alterna. Des d'un altre punt de vista es pot dir que hi ha més d'un convertidor exercint un control sobre la tensió i aquests estan units per uns cables en els quals hi ha caigudes de tensió. Per tant, es necessita que es toleri un cert error en el control de la tensió. És per això

que s'aplica el control *droop*, aquest és simplement un control proporcional, i, per tant, fàcilment implementable en el qual es tolera aquest error. A més a més, permet repartir la potència provinent dels parcs eòlics entre els diferents punts de connexió a la xarxa terrestre principal de forma controlada sense la necessitat de comunicacions entre els diferents convertidors. Cal dir també que amb aquest control no es garanteix que s'estigui desenvolupant un control òptim sobre la xarxa.

A la figura 7.8 es presenta l'esquema del sistema de control dels convertidors de connexió a de la xarxa alterna principal.

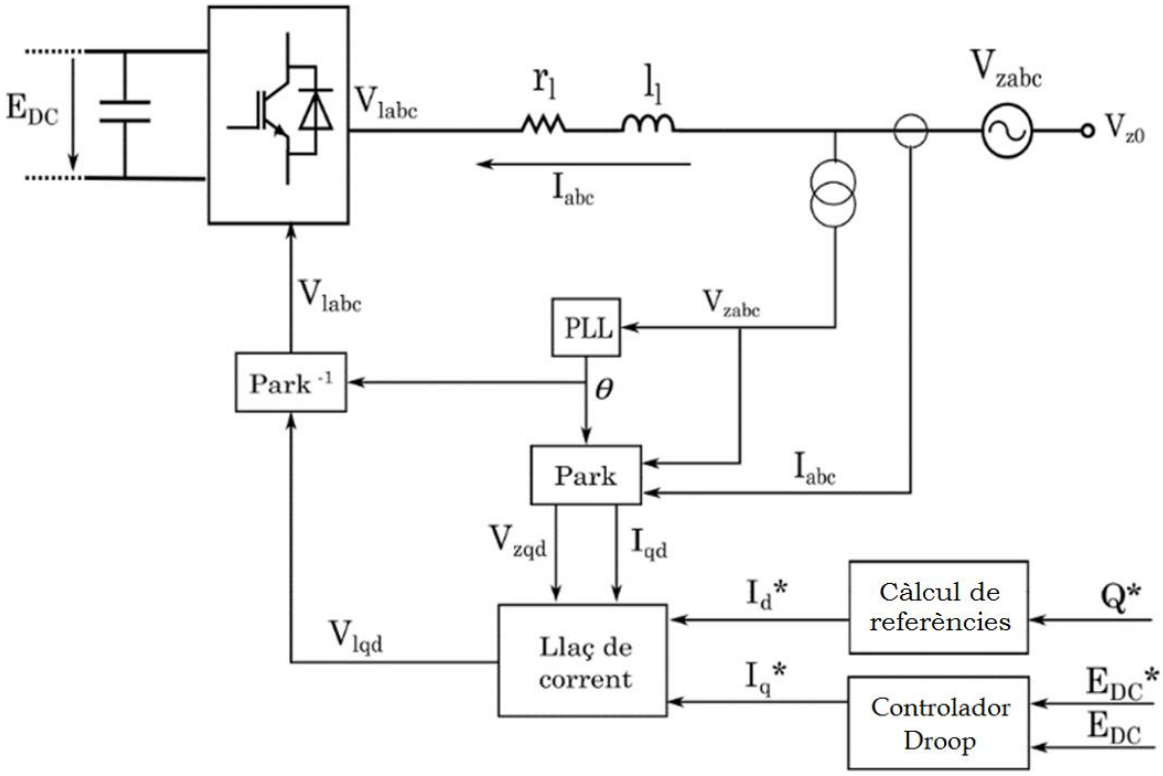

Figura 7.10: Esquema control convertidor VSC amb controlador Droop

Tenint en compte la problemàtica explicada, s'arriba a la conclusió de què totes les variacions que cal fer sobre el sistema de control aplicat en les altres dues xarxes estudiades en aquest treball rauen en els convertidors de connexió a la xarxa terrestre i en el seu llaç de control de tensió que es substituït pel controlador *droop*. Pel que fa a totes les altres parts del sistema de control, tant la PLL com el llaç de corrent, s'empren els mateixos llaços de control amb els mateixos paràmetres que els presentats a l'apartat 7.1.1.

El control que s'exerceix sobre els convertidors dels parcs eòlics és el mateix que l'explicat en l'apartat 7.1.2 i aplicat en totes les xarxes estudiades.

7.3.1. El controlador *droop*

El control *droop* és senzillament un control proporcional basat en la idea de funcionament d'un element resistiu. La següent equació mostra el seu comportament:

$$i_q^* = k_{p,droop}(E_{DC}^* - E_{DC})$$

On $k_{p,droop}$ és la constant coneguda com a constant *droop*, base del control proporcional fet per aquest.

Cadascun dels convertidors connectats a la xarxa principal desenvolupen el seu propi control *droop* amb la seva pròpia constant. Per tal de determinar la constant amb la que funcionen cadascun dels convertidors s'ha de fer un estudi en el que es consideren l'error estacionari màxim tolerat pel sistema i també la potència que ha d'injectar a la xarxa alterna principal cadascun dels convertidors. Per tal de determinar la constant de *droop* òptima que s'ajusta més adequadament a les condicions de funcionament del sistema es poden realitzar diferents estudis sobre les funcions de transferència del control [14]. Tot i això, en aquest treball s'ha considerat més oportú determinar les constants de *droop* dels convertidors de la xarxa multiterminal d'una forma experimental a partir de la realització i el posterior anàlisis de simulacions del funcionament del sistema amb diferents constants de *droop* aplicades als controls dels convertidors.

8. Simulació

Per dur a terme totes les diferents simulacions s´ha emprat el programa EMTP-RV i s'ha usat el programa MATLAB per la representació i anàlisi dels resultats.

Tot i que tots els sistemes estudiats poden treballar de forma bidireccional, ja que els convertidors VSC tenen aquesta característica, en totes les simulacions es considera un flux de potència unidireccional en que els convertidors del costat dels parcs eòlics injecten tota la potència produïda pels aerogeneradors a la xarxa HVDC, actuant sempre com a rectificadors, i els convertidors del connectats a la xarxa elèctrica principal injecten a aquesta la potència que extreuen de la xarxa HVDC, actuant sempre com a onduladors o inversors.

En les diferents simulacions s'estudia l'evolució de diferents variables de la xarxa en les condicions normals de funcionament sense que es produeixi cap falta. En aquestes condicions normals de funcionament es començarà a injectar una potència des dels parcs eòlics en forma de graó. S'estudia l'evolució a partir de l'aplicació d'un graó de potència per tal de situar-nos en el pitjor dels casos d'una variació brusca en el vent i la potència produïda pels aerogeneradors.

8.1. Simulació de la xarxa en configuració punt a punt

A partir de les modelitzacions dels diferents components de l'apartat 6 i aplicant el control explicat a l'apartat 7.1 es realitza la simulació de la xarxa en configuració punt a punt presentada a l'apartat 5.1

Per acabar de concretar les variables de control de la xarxa cal especificar quina potència s'injecta des del parc eòlic i a quina tensió opera la xarxa HVDC. Es considera que la xarxa treballa al voltant d'una tensió nominal de 150 kV [13] pel que s'aplica una tensió de referencia al llaç de tensió del convertidor del costat de la xarxa de 145 kV. Finalment la potència que s'injecta des del parc eòlic és de 100 MW i s'aplica en forma de graó tal i com s'ha explicat anteriorment.

A continuació es mostren els resultats obtinguts en la simulació.

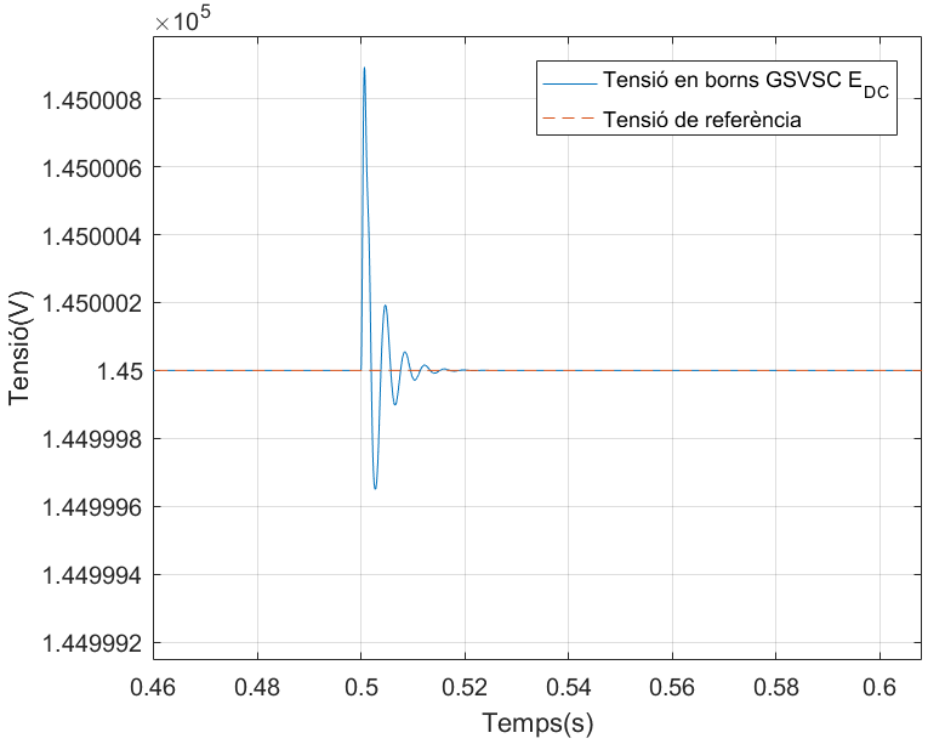

Figura 8.1: Tensió DC en borns del convertidor GSVSC

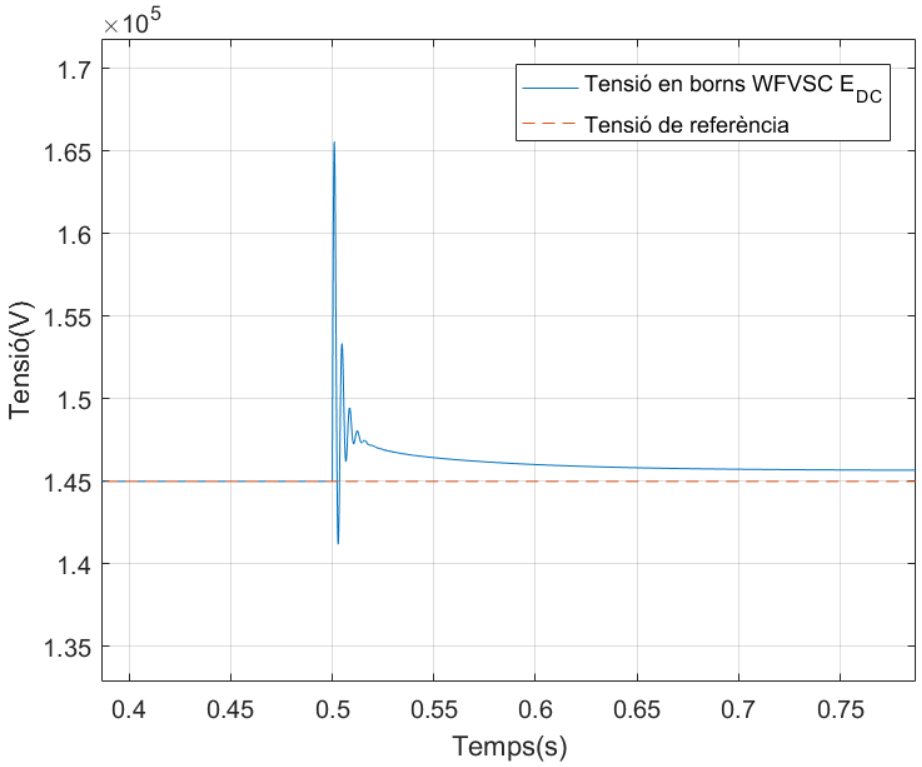

Figura 8.2: Tensió DC en borns del convertidor WFVSC

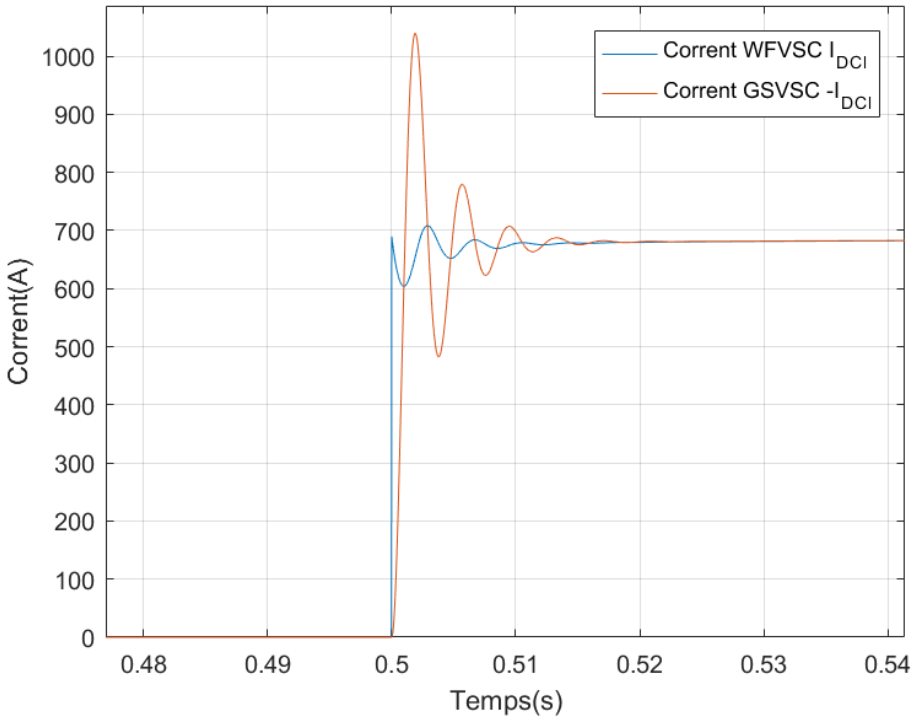

Figura 8.3: Corrent injectat pel WFVSC i acció de control del GSVSC

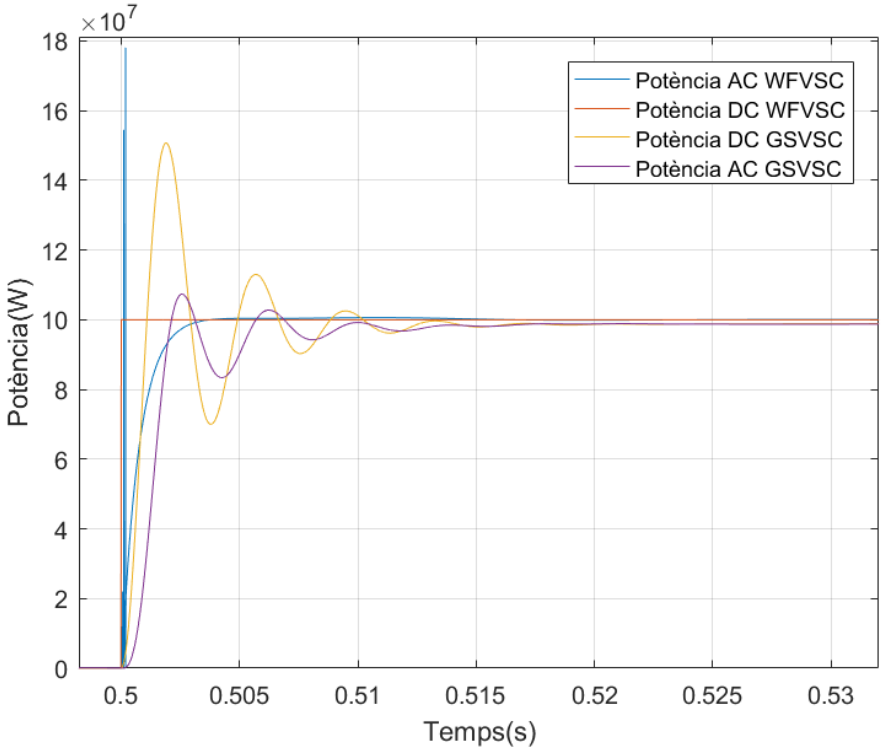

Figura 8.4: Potències extretes i injectades pel convertidors WFVSC i GSVSC

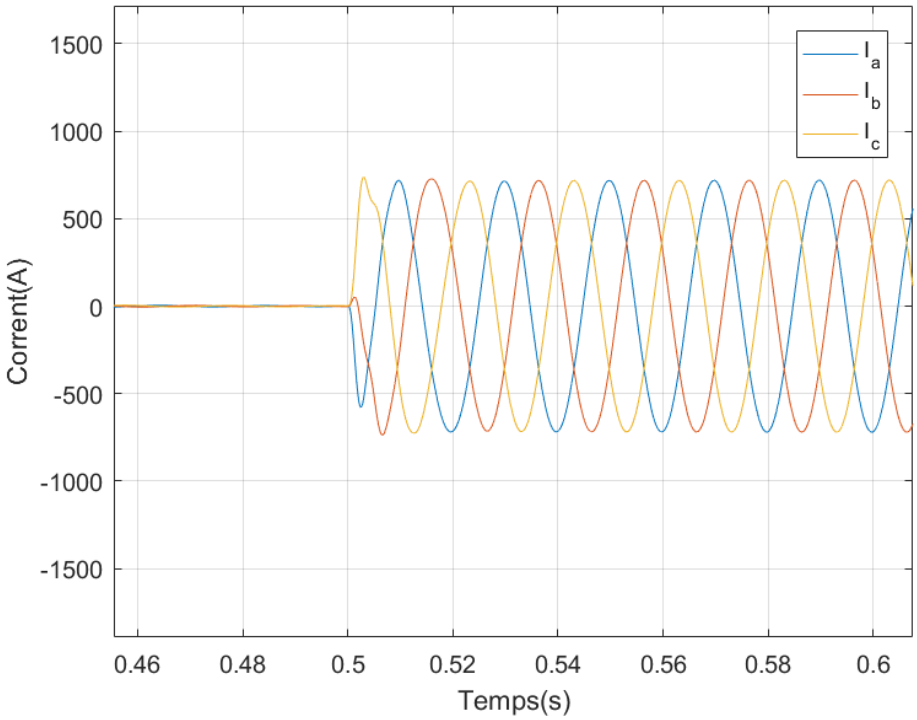

Figura 8.5: Corrents en referència abc de la xarxa principal i del convertidor GSVSC

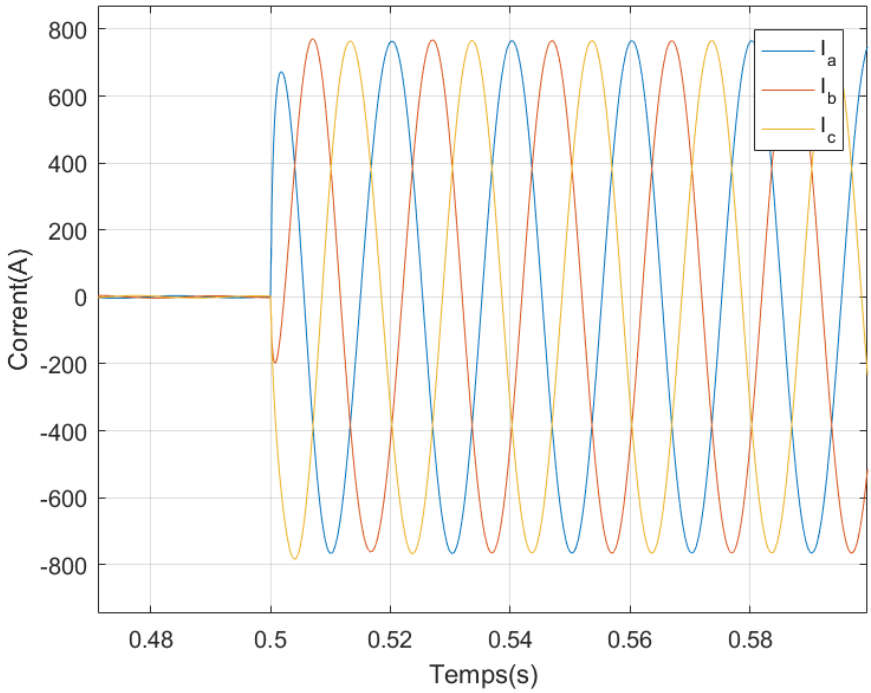

Figura 8.6: Corrents en referència abc del parc eòlic i del convertidor WFVSC

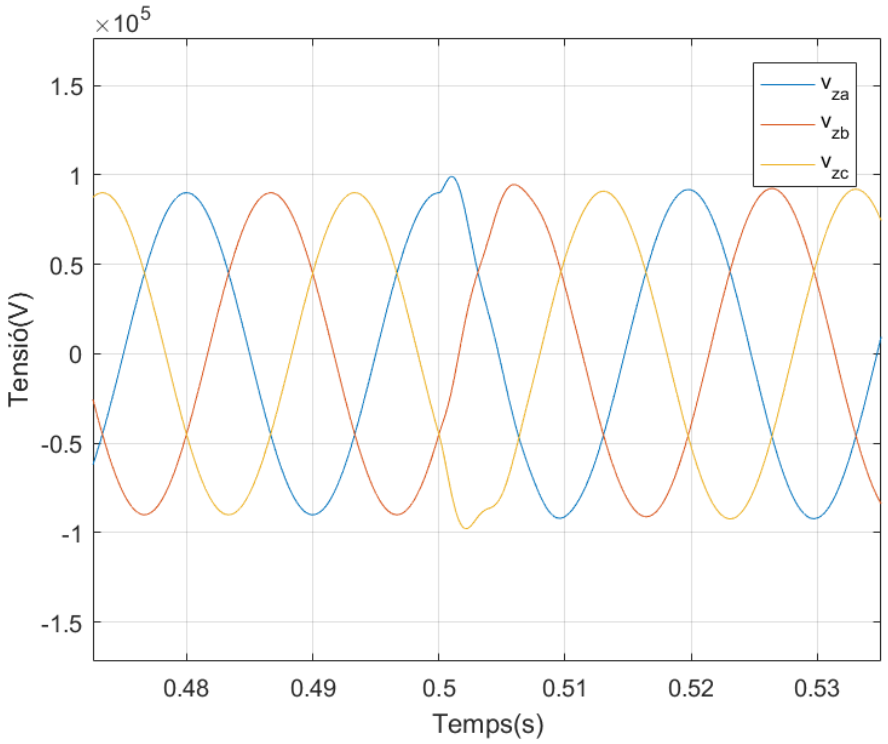

Figura 8.7: Tensió en referència abc de la xarxa principal i de la banda AC del GSVSC

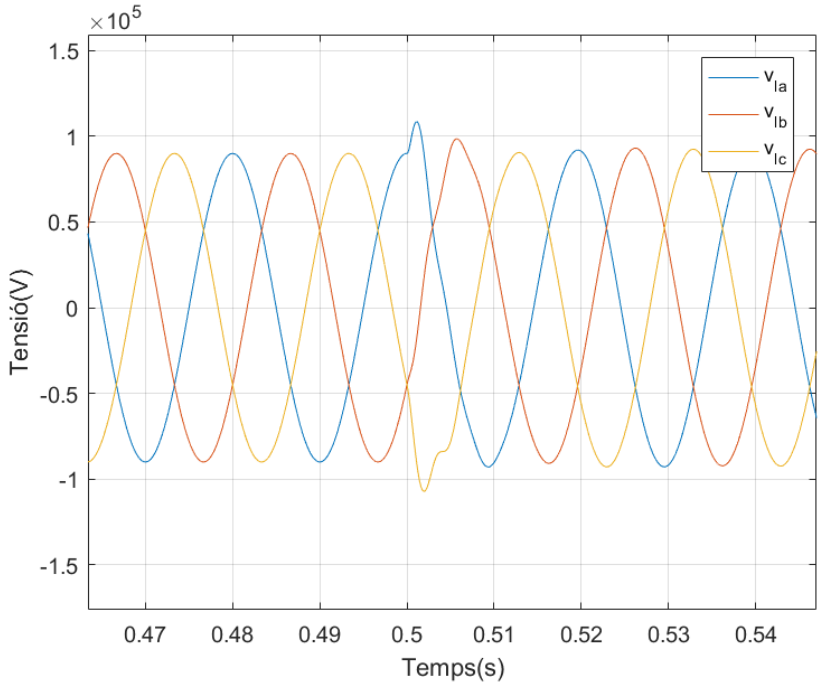

Figura 8.8: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor GSVSC

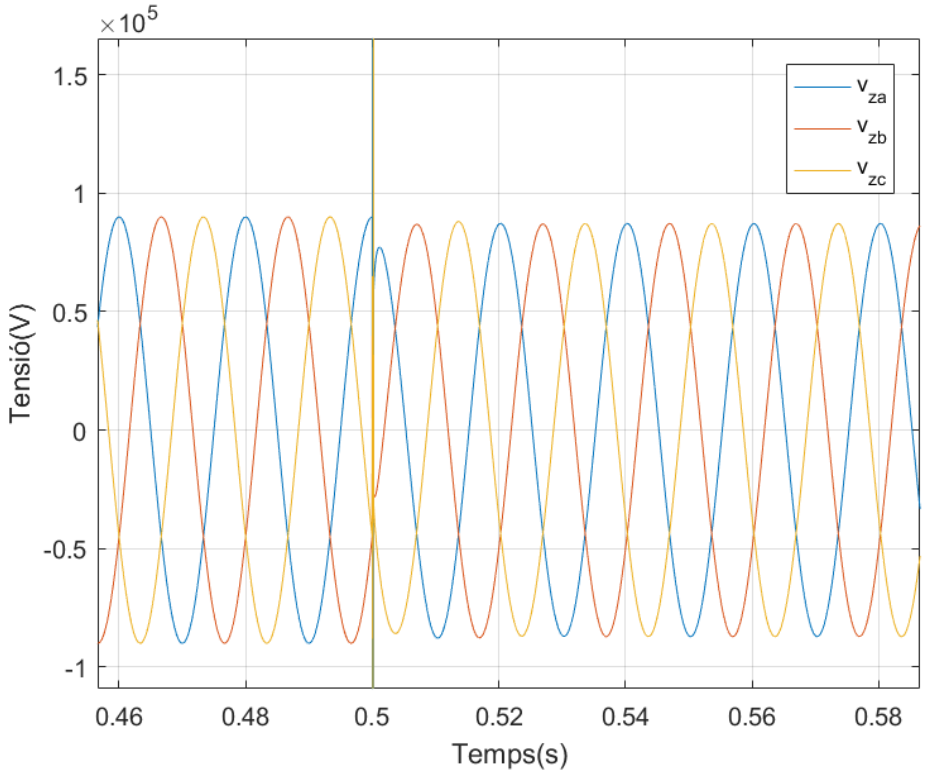

Figura 8.9: Tensió en referència abc del parc eòlic i de la banda AC del WFVSC

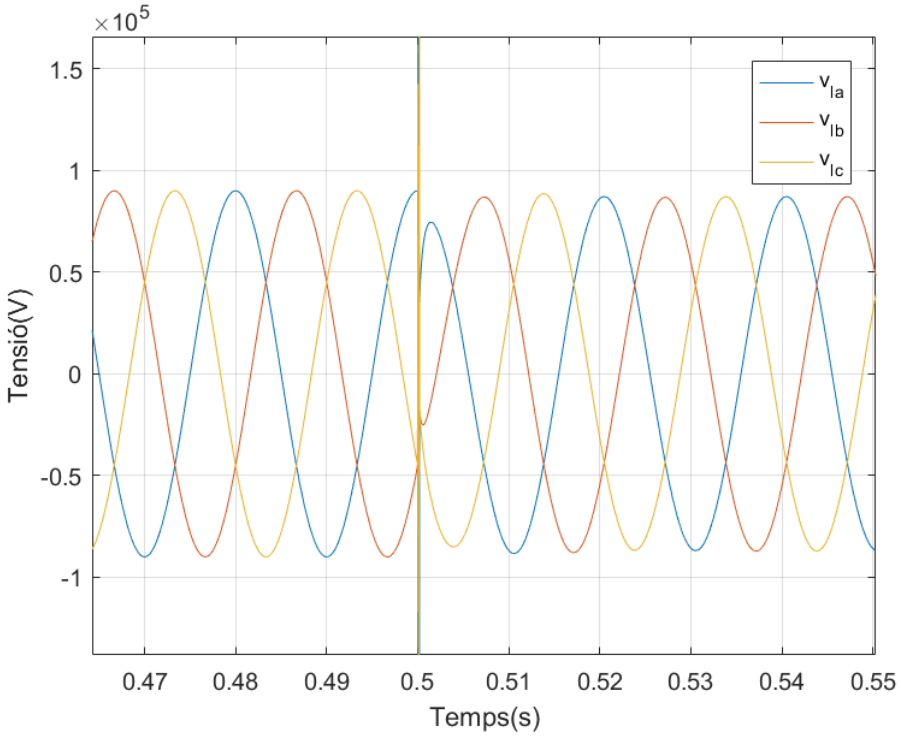

Figura 8.10: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor WFVSC

Les Figures 8.1 i 8.2 mostren l'evolució de les tensions en borns dels convertidors GSVSC i WFVSC respectivament. En estat estacionari presenten entre elles una diferència de 658 V, sent evidentment més elevada la tensió del WFVSC, això es degut a la direcció del corrent i del flux de potència. Es pot observar que abans del graó totes dues tensions són iguals al valor de referència de 145 kV, això és deu a que el flux de potència és nul, i per tant també ho són el corrent i la caiguda de tensió al llarg del cable subaquàtic. Un cop s'ha produït el graó de potència les dues evolucions transitòries són molt rapides, amb presencia de sobrepics tot i que no són massa agressives. Com que el llaç de control és un control PI, l'error en estat estacionari de la tensió de bus del convertidor GSVSC és nul.

L'evolució dels corrents de la banda continua dels convertidors WFVSC i GSVSC es representen conjuntament a la figura 8.3. Es pot apreciar com l'evolució del corrent I_{DCl} del convertidor WFVSC s'aproxima molt al perfil d'un graó, això es deu a que s'aconsegueix mantindré la tensió del bus pràcticament a un valor constant, i per tant el corrent i la potència segueixen un perfil similar. L'evolució del corrent del GSVSC presenta un transitori molt ràpid també, amb presencia de sobrepics.

La figura 8.4 mostra les potències de les bandes continues i alternes dels convertidors WFVSC i GSVSC, les diferències en l'estat estacionari entre les bandes continua i alterna dels dos convertidors, que són degudes a les pèrdues en les resistències parasites de les inductàncies d'acoblament de la banda d'alterna, són inferiors a 40 W i per tant menyspreables. La diferencia en estat estacionari entre les potències de les bandes continues dels convertidors és de 452 kW, pèrdues dissipades en les resistències del cable subaquàtic. Evidentment abans de que s'apliqui el graó totes les potències són nul·les.

Les corrents en referència abc dels convertidors GSVSC i WFVSC es mostren respectivament a les figures 8.5 i 8.6. S'aprecia com per una potència nul·la, el corrents també són nuls, però quan és produeix el graó de potència s'observa com els valors dels corrents també augmenten.

Les tensions aplicades pels convertidors i les tensions de la xarxa i el parc eòlic, s'observen a les Figures 8.7, 8.8, 8.9 i 8.10. S'aprecia una petita distorsió en el punt en el que es produeix el graó de potència.

Finalment a partir dels d'aquests resultats de la simulació, es conclou que l'esquema de control emprat, amb un llaç de tensió i els paràmetres escollits, és adequat per a que la xarxa de configuració punt a punt desenvolupi un bon funcionament.

8.2. Simulació de la xarxa multiterminal amb tres nodes

A partir de les modelitzacions dels diferents components de l'apartat 6 i aplicant el control explicat a l'apartat 7.2 es realitza la simulació de la xarxa multiterminal amb tres nodes presentada a l'apartat 5.2.

Per acabar de concretar les variables de control de la xarxa cal especificar quines potències s'injecten des dels parcs eòlics i a quina tensió opera la xarxa HVDC. Es considera que la xarxa treballa al voltant d'una tensió nominal de 150 kV [13] pel que s'aplica una tensió de referencia al llaç de tensió del convertidor del costat de la xarxa de 145 kV. Finalment les potències que s'injecten des del parc eòlics són de 100 MW cadascun i s'aplica en forma de graó tal i com s'ha explicat anteriorment a l'inici de l'apartat 8.

A continuació es mostren els resultats obtinguts en la simulació.

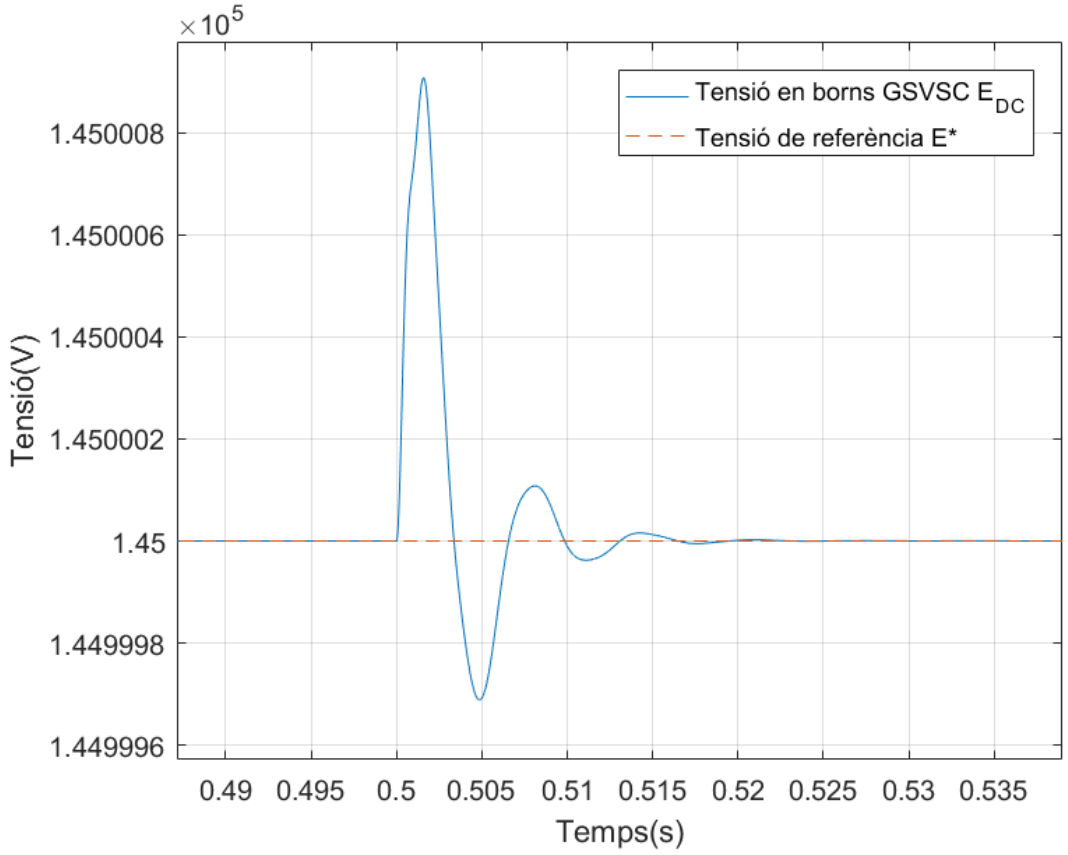

Figura 8.11: Tensió DC en borns del convertidor GSVSC

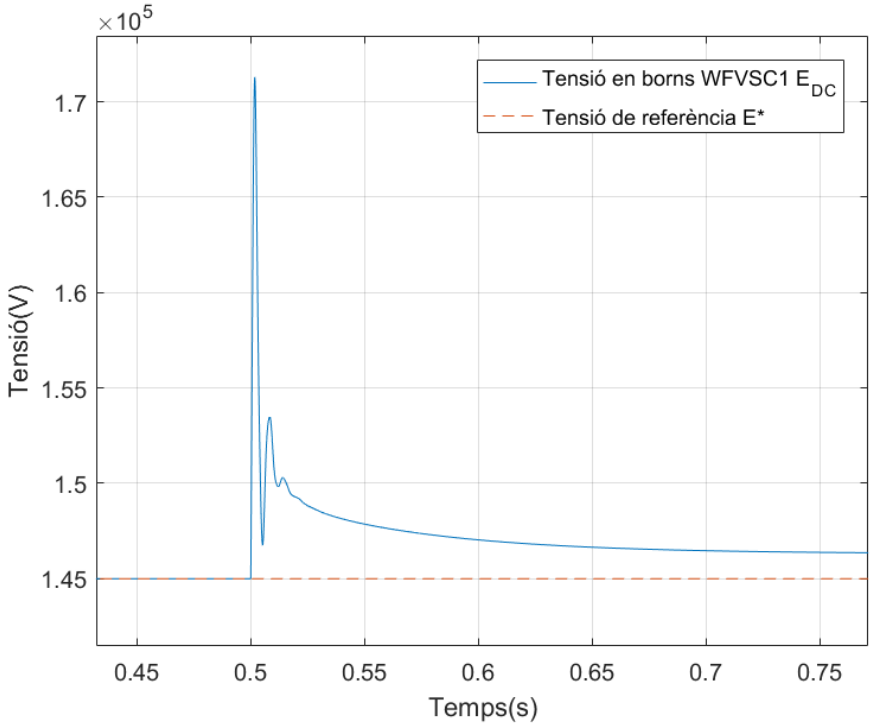

Figura 8.12: Tensió DC en borns del convertidor WFVSC1

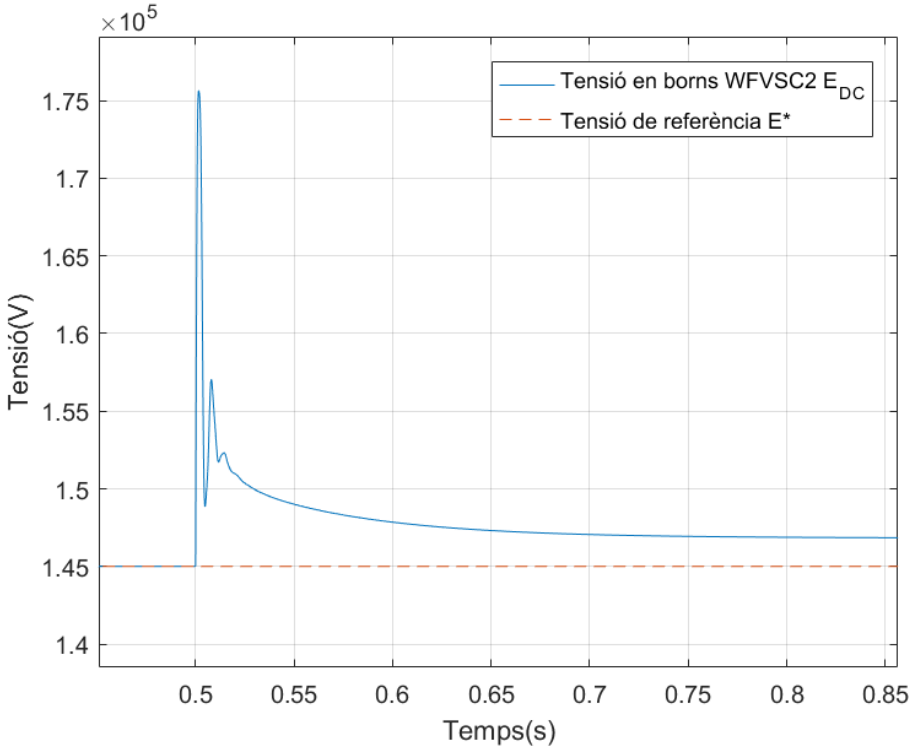

Figura 8.13: Tensió DC en borns del convertidor WFVSC2

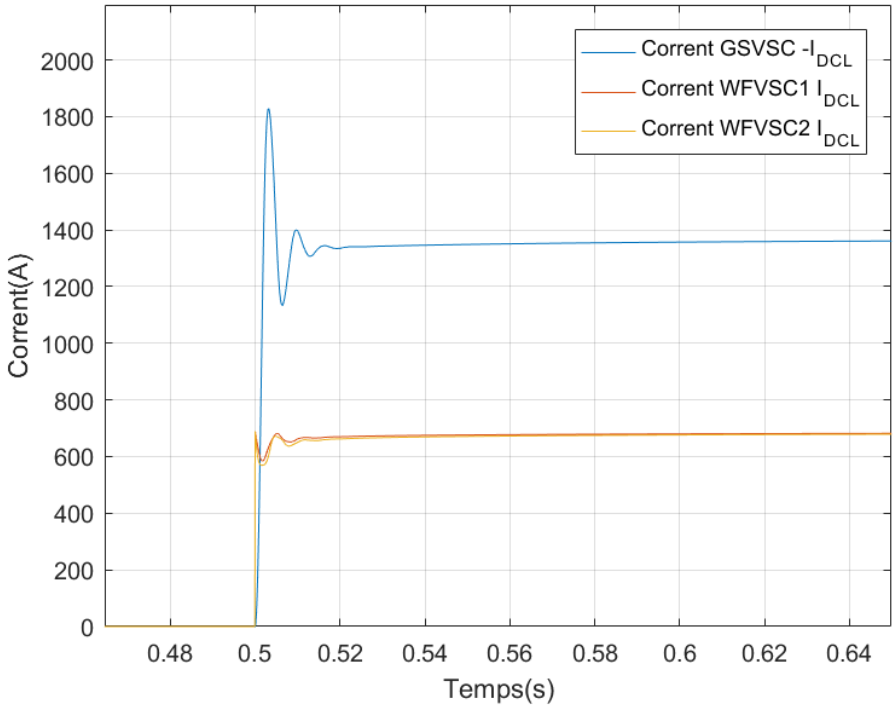

Figura 8.14: Corrent injectat per WFVSC1 i WFVSC2 i acció de control del GSVSC

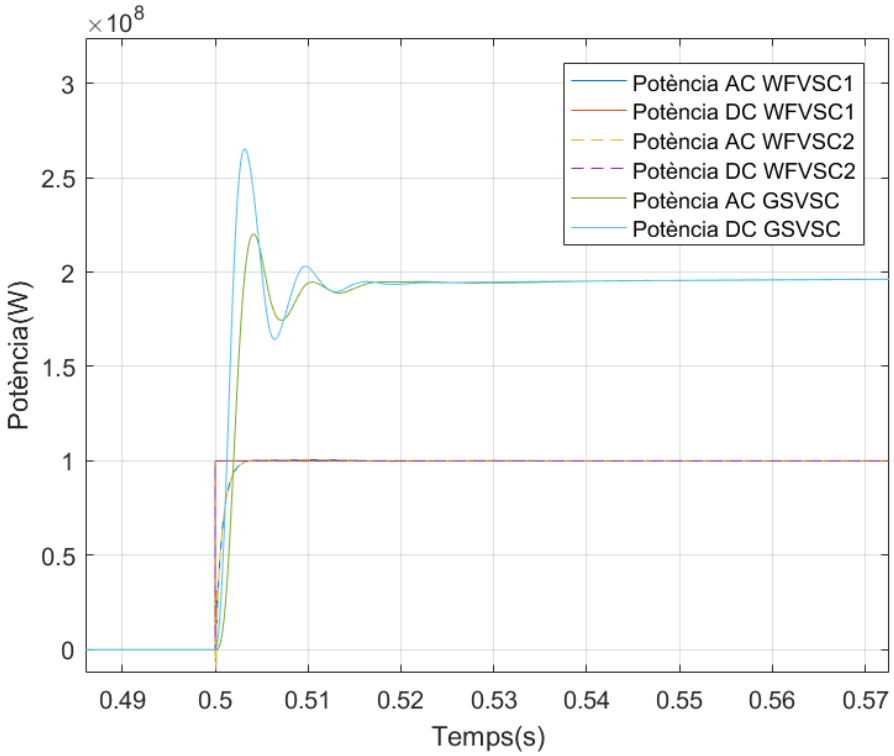

Figura 8.15: Potències extretes i injectades pel convertidors GSVSC, WFVSC1 i WFVSC2

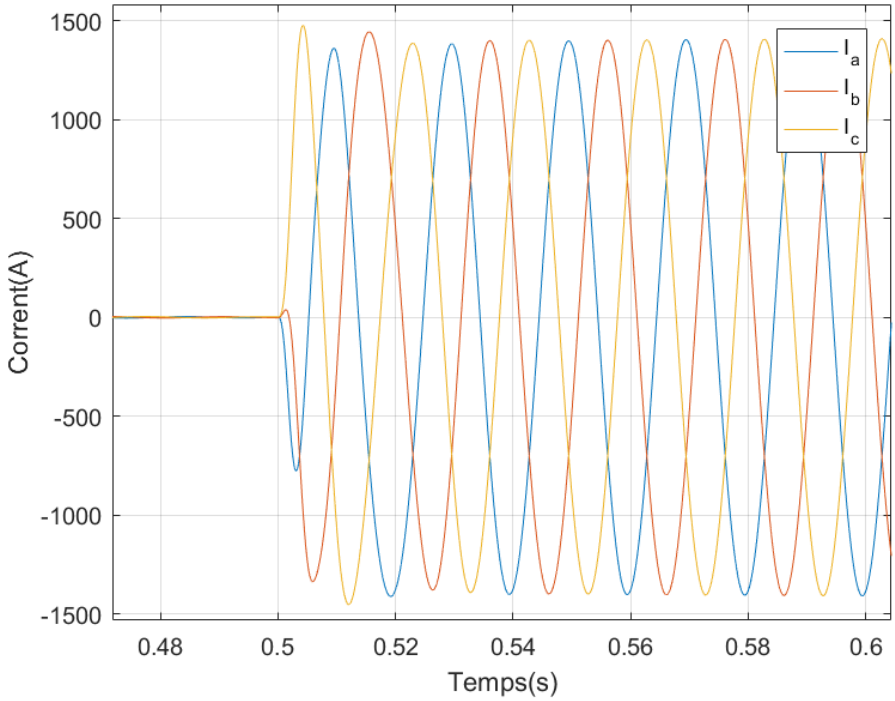

Figura 8.16: Corrents en referència abc de la xarxa principal i del convertidor GSVSC

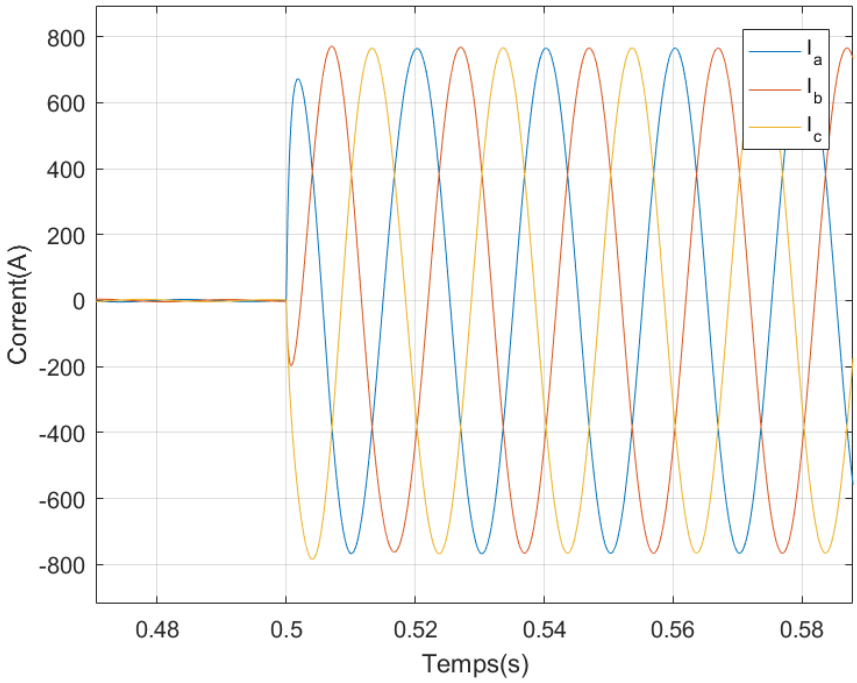

Figura 8.17: Corrents en referència abc del parc eòlic 1 i del convertidor WFVSC1

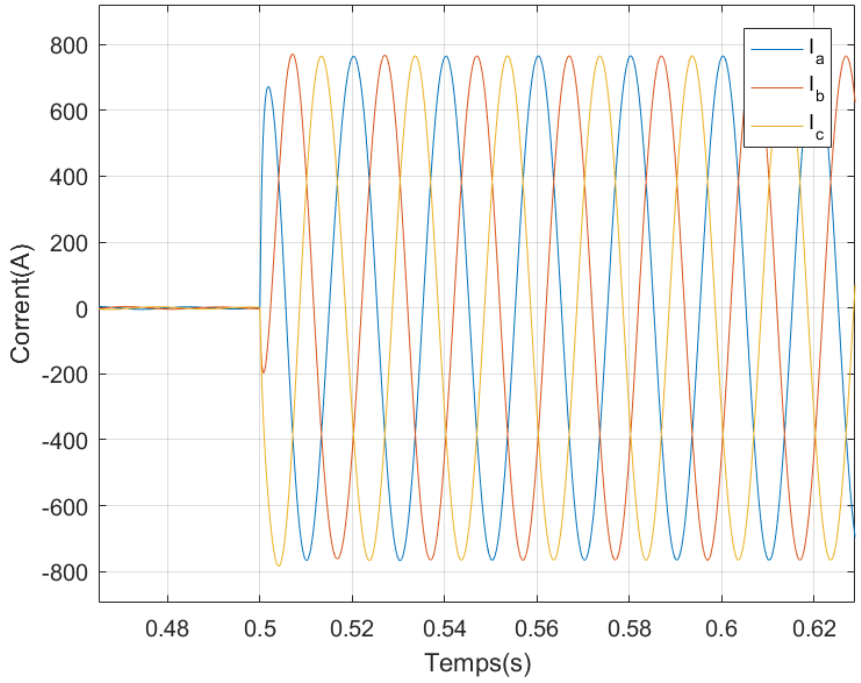

Figura 8.18: Corrents en referència abc del parc eòlic 2 i del convertidor WFVSC2

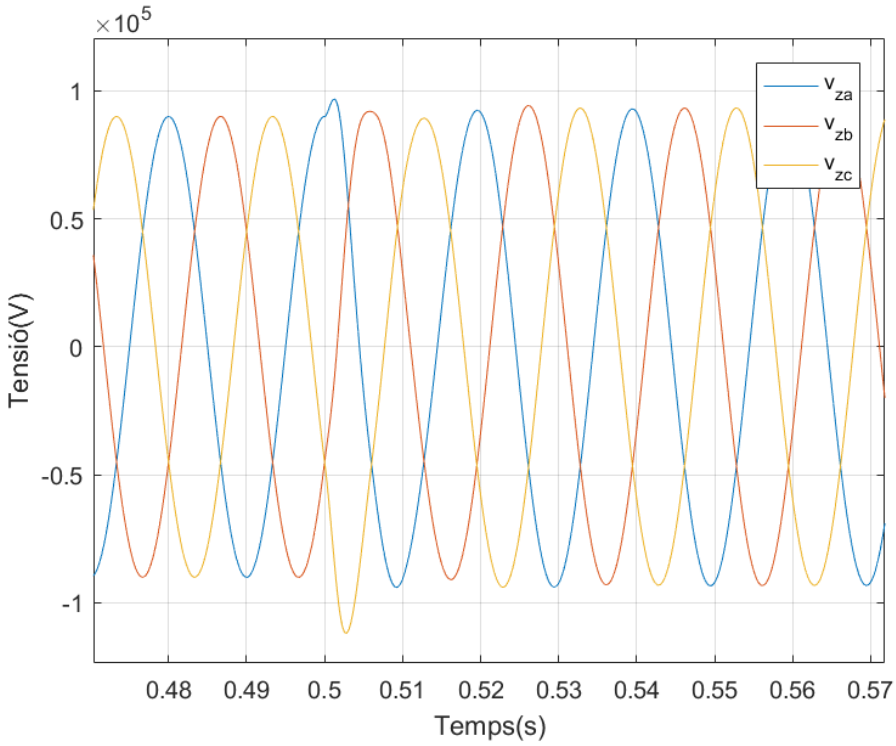

Figura 8.19: Tensió en referència abc de la xarxa principal i de la banda AC del GSVSC

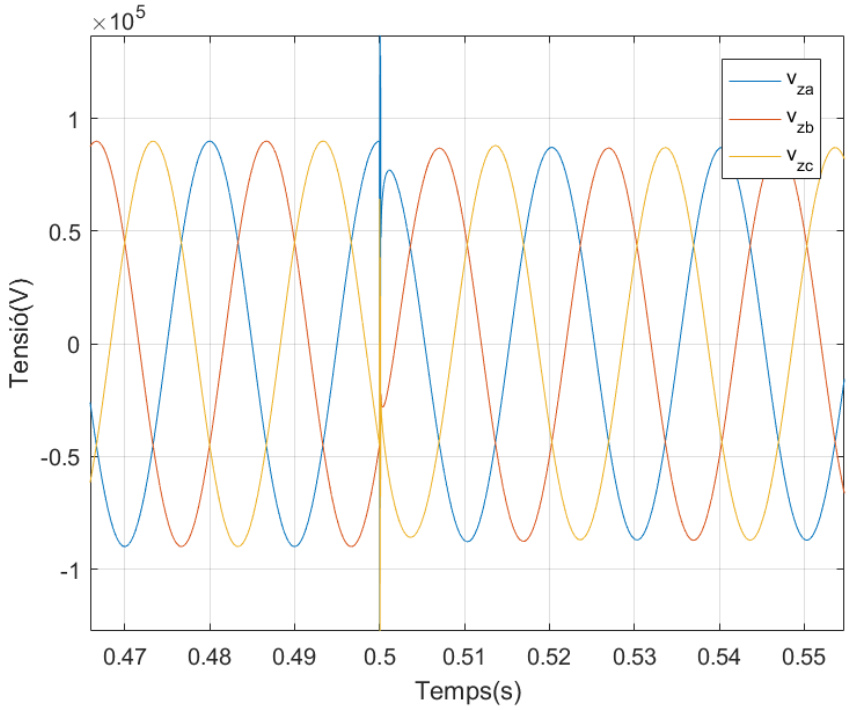

Figura 8.20: Tensió en referència abc del parc eòlic 1 i de la banda AC del WFVSC1

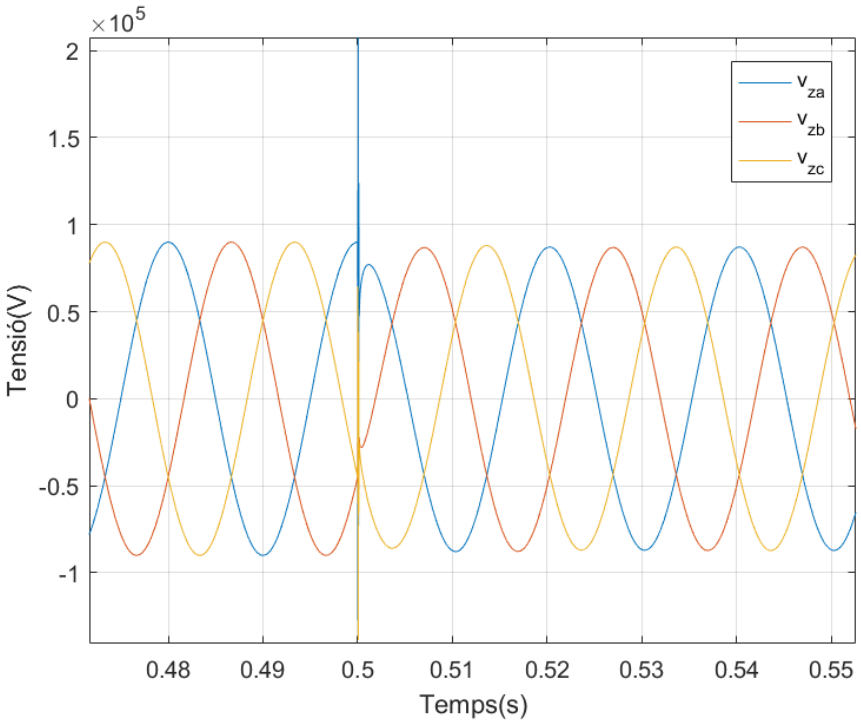

Figura 8.21: Tensió en referència abc del parc eòlic 2 i de la banda AC del WFVSC2

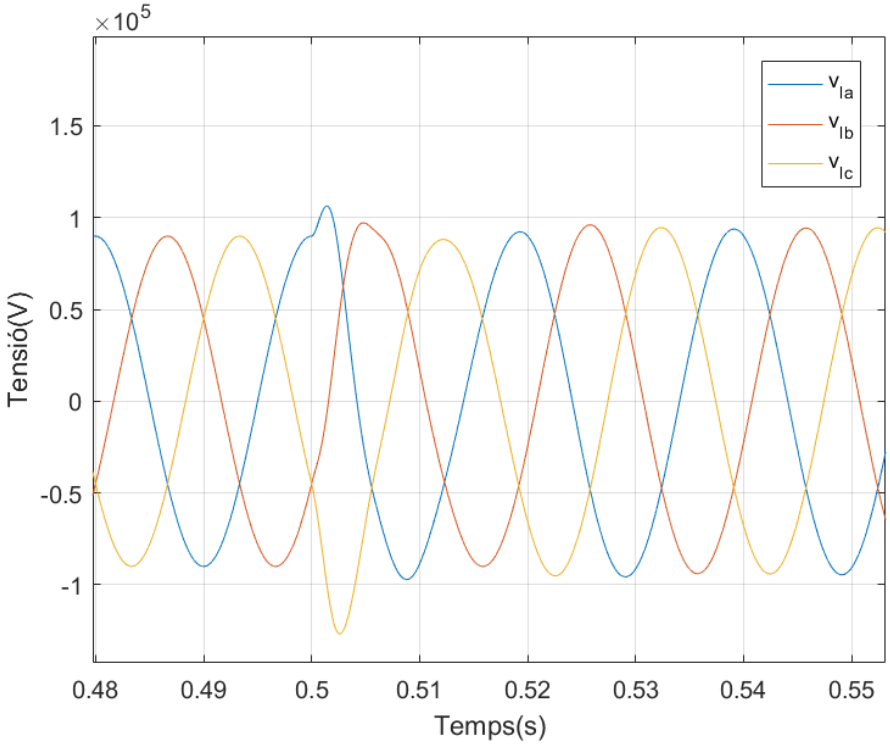

Figura 8.22: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor GSVSC

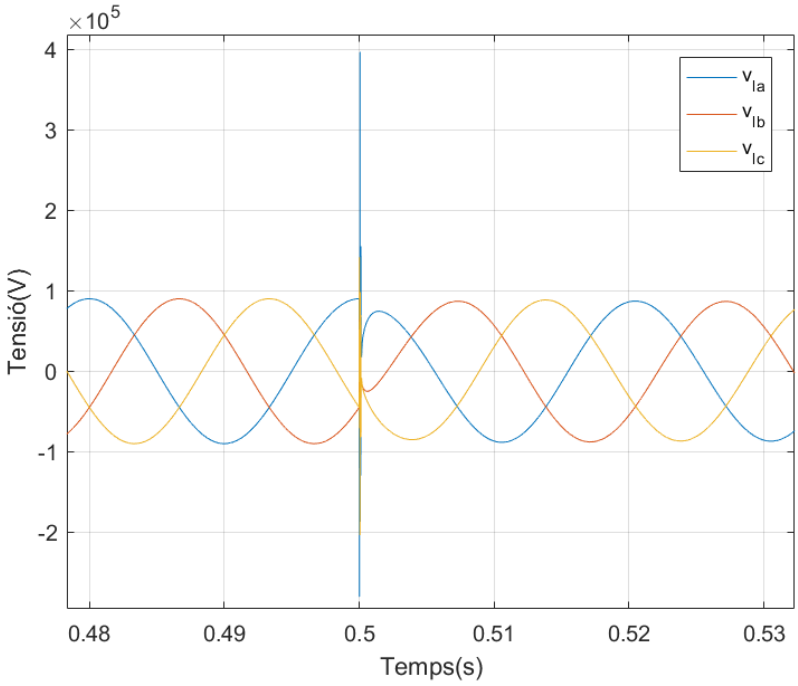

Figura 8.23: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor WFVSC1

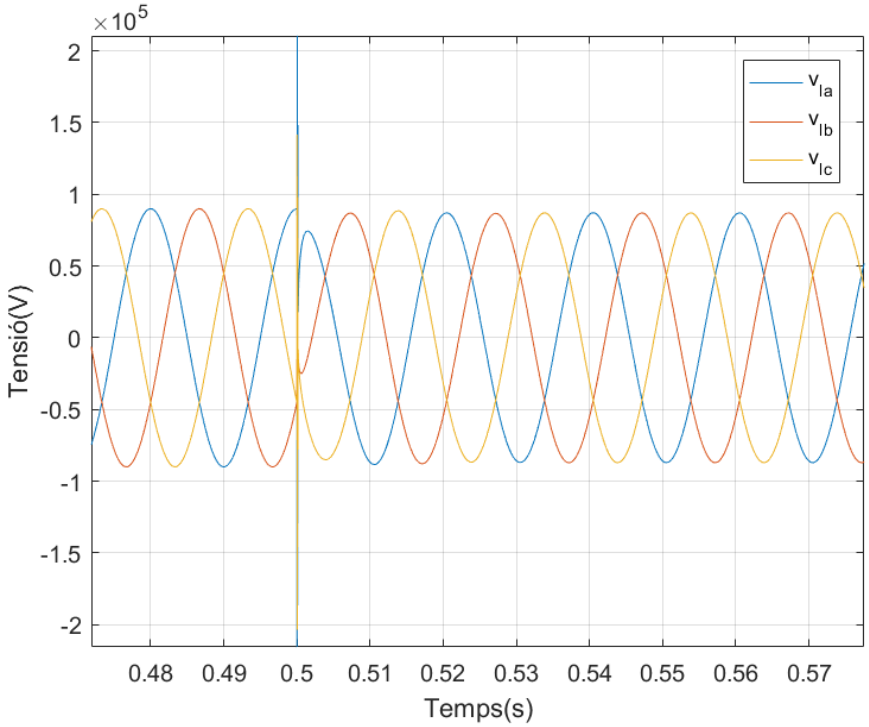

Figura 8.24: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor WFVSC2

Les Figures 8.11, 8.12 i 8.13 mostren l'evolució de les tensions en borns dels convertidors GSVSC, WFVSC1 i WFVSC2 respectivament. En estat estacionari presenten entre les dues primeres una diferència de 1,309 kV, i entre la primera i la tercera de 1,838 kV sent evidentment la tensió del WFVSC2 la més elevada seguida de la del WFVSC1 i sent finalment la del GSVSC la més baixa de les tres, això es degut a la direcció del corrent i del flux de potència. Es pot observar que abans del graó totes les tensions són iguals al valor de referència de 145 kV, això és deu a que el flux de potència és nul, i per tant també ho són els corrents i les caigudes de tensió al llarg dels cables subaquàtics. Un cop s'ha produït el graó de potència les dues evolucions transitòries són molt rapides, amb presencia de sobrepics tot i que no són massa agressives. Com que el llaç de control és un control PI, l'error en estat estacionari de la tensió de bus del convertidor GSVSC és nul.

Si ens fixem en els resultats de la simulació de la configuració punt a punt, la caiguda de tensió al llarg del cable de 10 km és pràcticament el doble per la xarxa estudiada en aquest apartat. Això es deu a que a traves d'aquest cable es transmet una potència de gairebé 200 MW, tret d'unes petites pèrdues al llarg del cable de 8 km, que és pràcticament el doble de la que transmet el cable de 10 km en la configuració punt a punt.

L'evolució dels corrents de la banda continua dels convertidors WFVSC1, WFVSC2 i GSVSC es representen conjuntament a la figura 8.14. Es pot apreciar com l'evolució dels corrents I_{DCl}

dels convertidors WFVSC1 i WFVSC2 s'aproxima molt al perfil d'un graó, això es deu a que s'aconsegueix mantindré la tensió del bus pràcticament a un valor constant, i per tant el corrent i la potència segueixen un perfil similar. L'evolució del corrent del GSVSC presenta un transitori molt ràpid també, amb presencia de sobrepics.

La figura 8.15 mostra les potències de les bandes continues i alternes dels convertidors WFVSC1, WFVSC2 i GSVSC, les diferències en l'estat estacionari entre les bandes continua i alterna dels convertidors, que són degudes a les pèrdues en les resistències parasites de les inductàncies d'acoblament de la banda d'alterna, són inferiors a 70 W i per tant menyspreables. Les pèrdues de potència al llarg del cable de 8 km en estat estacionari són de 356 kW, i la potència dissipada al cable de 10 km és de 1,786 MW. Evidentment abans de que s'apliqui el graó totes les potències són nul·les.

Les corrents en referència abc dels convertidors GSVSC, WFVSC1 i WFVSC es mostren respectivament a les figures 8.16 8.17 i 8.18. S'observa com per una potència nul·la, el corrents també són nuls, però quan és produeix el graó de potència s'aprecia com els valors dels corrents també augmenten.

Les tensions aplicades pels convertidors i les tensions de la xarxa i dels parcs eòlics s'observen a les Figures 8.19-8.24. S'aprecia una petita distorsió en el punt en el que es produeix el graó de potència.

A partir d'aquests resultats de la simulació, es conclou que l'esquema general de control, emprant el llaç de tensió amb tots els paràmetres escollits, és adequat per a que per a que la xarxa multiterminal de tres nodes desenvolupi un bon funcionament. Finalment es considera que aquest sistema de control és extrapolable, amb el conseqüent ajust dels paràmetres de control, a qualssevol tipus de xarxa multiterminal HVDC que interconnecta múltiples parcs eòlics amb la xarxa elèctrica principal per un únic punt.

8.3. Simulació de la xarxa multiterminal amb quatre nodes

A partir de les modelitzacions dels diferents components de l'apartat 6 i aplicant el control *droop* explicat a l'apartat 7.3 es realitza la simulació de la xarxa multiterminal amb quatre nodes presentada a l'apartat 5.3.

Per acabar de concretar les variables de control de la xarxa cal especificar quines potències s'injecten des dels parcs eòlics i a quina tensió opera la xarxa HVDC. Es considera que la xarxa treballa al voltant d'una tensió nominal de 150 kV [13] pel que s'aplica una tensió de referencia al llaç de tensió del convertidor del costat de la xarxa de 145 kV. Finalment les potències que s'injecten des del parc eòlics són de 100 MW cadascun i s'aplica en forma de graó tal i com s'ha explicat anteriorment a l'inici de l'apartat 8.

Com s'ha comentat en l'apartat 7.3, en aquest treball no es determina la millor constant de *droop* per a la xarxa de quatre nodes de forma analítica, sinó que a partir de diverses simulacions i analitzant els resultats d'aquestes s'acaba escollint la constant que es considera més convenient. Per això s'ha fet una primera simulació en la que les constants de *droop* dels dos convertidors connectats a la xarxa principal són diferents. Així es pot observar fàcilment quins efectes tenen l'ús de constants més grans i més petites enfront l'evolució de la tensió del bus continu i la potència injectada a la xarxa alterna principal.

En aquesta primera simulació s'empra una constant de *droop* igual a 0,1 pel GSVSC1 i una de 0,05 pel GSVSC2. Només es representa l'evolució temporal de les tensions dels busos de continua dels convertidors connectats a la xarxa elèctrica terrestre i les potencies que aquests injecten a aquesta, ja que són els dos paràmetres que es controlen mitjançant el control *droop*. Cal recordar que a banda també es realitza un control sobre la potència reactiva de la xarxa HVDC des dels VSC per tal de que sigui nul·la, però la constant de *droop* no afecta en aquest aspecte.

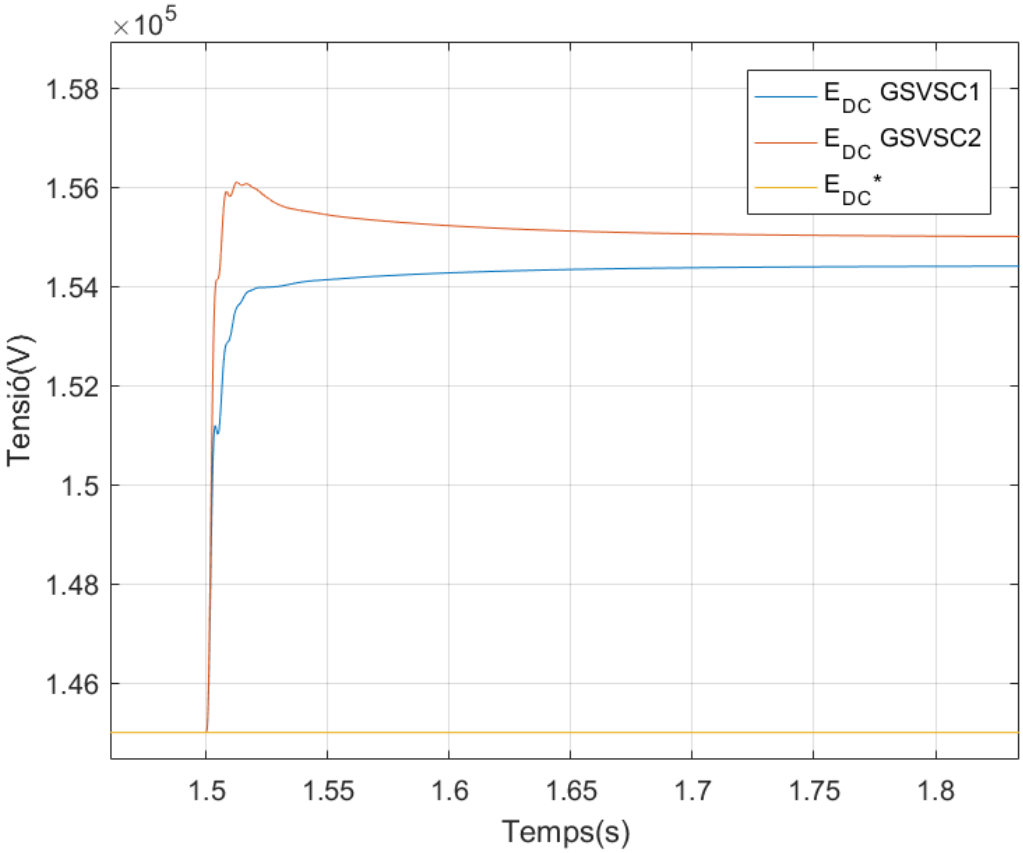

Figura 8.25: Tensions DC en borns dels convertidors GSVSC1 (0,1) i GSVSC2 (0,05)

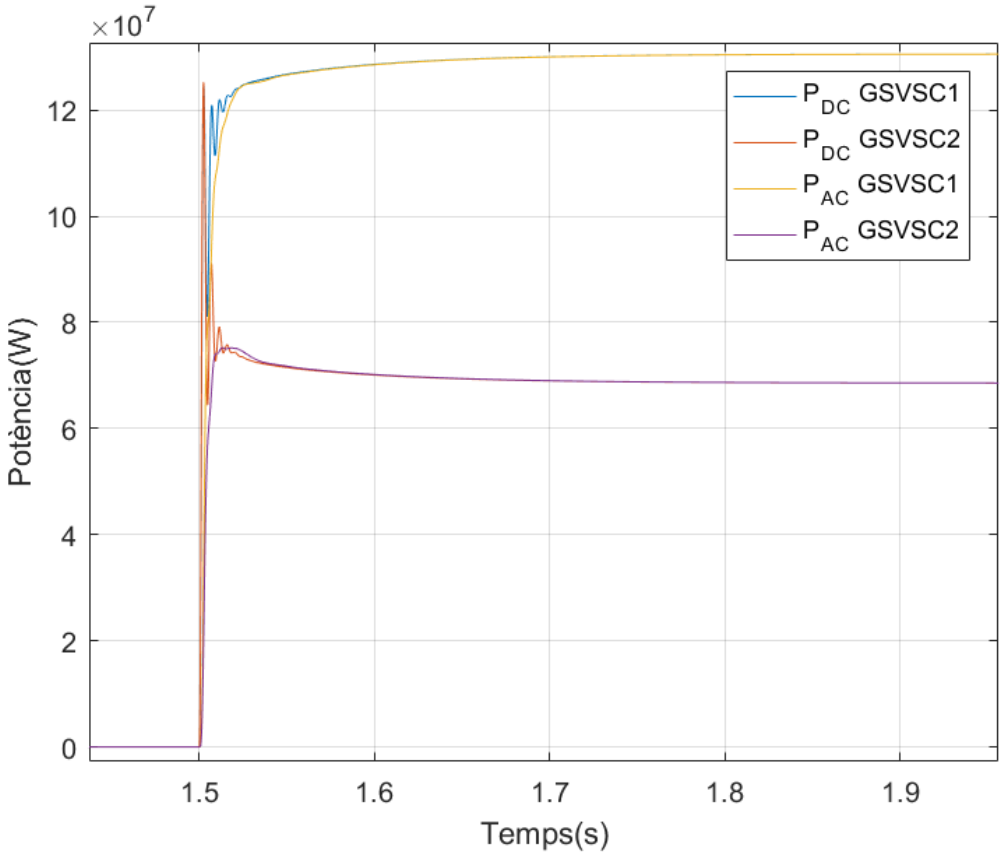

Figura 8.26: Potències GSVSC1 (0,1) i GSVSC2 (0,05)

Analitzant els resultats d'aquesta simulació veiem que com més gran és la constant de *droop* que s'aplica al convertidor, més petit és l'error estacionari de la tensió en el bus DC d'aquest. Per tant, s'intenta trobar de forma experimental a partir de diferents simulacions el valor de constant de *droop* pel qual el sistema té un bon funcionament estable i amb un error estacionari de la tensió del bus continu mínim. Respecte les potències es pot observar que com més gran és la constant de *droop* d'un convertidor, aquest injecta més potència a la xarxa alterna principal.

Lògicament, entre tots els convertidors connectats a la xarxa elèctrica terrestre s'injecta a aquesta tota la potència provinent dels parcs *offshore.* D'aquest fet se'n pot extreure que la part de la potència total generada als parcs que un convertidor injecta a la xarxa alterna principal depèn de la relació entre les constants de *droop* dels diferents convertidors, i no únicament de la constant del propi convertidor. Per tant, si les dues constants de control dels cos convertidors connectats a la xarxa alterna són iguals, aquests injecten la mateixa quantitat de potència a aquesta, sent la meitat de la potència total provinent dels parcs *offshore* menys les pèrdues. En el funcionament real d'aquest tipus de xarxa multiterminal s'ajustarien les constants per tal de satisfer la demanda de potència de la xarxa alterna terrestre en els diferents punts de connexió.

En el cas de la xarxa de quatre nodes s'ha decidit que en la simulació els dos convertidors connectats a la xarxa principal injectin la mateixa potència a aquesta, per tant les dues constants de *droop* que s'empren són iguals. Tal i com s'ha comentat, s'ha determinat de forma experimental la constant més gran per la qual la xarxa estudiada funciona de forma estable i amb un error estacionari mínim i aquesta és igual a 0,177. Així doncs s'ha realitzat la simulació amb aquestes constants de *droop* pels convertidors GSVSC1 i GSVSC2 i aquests són els resultats.

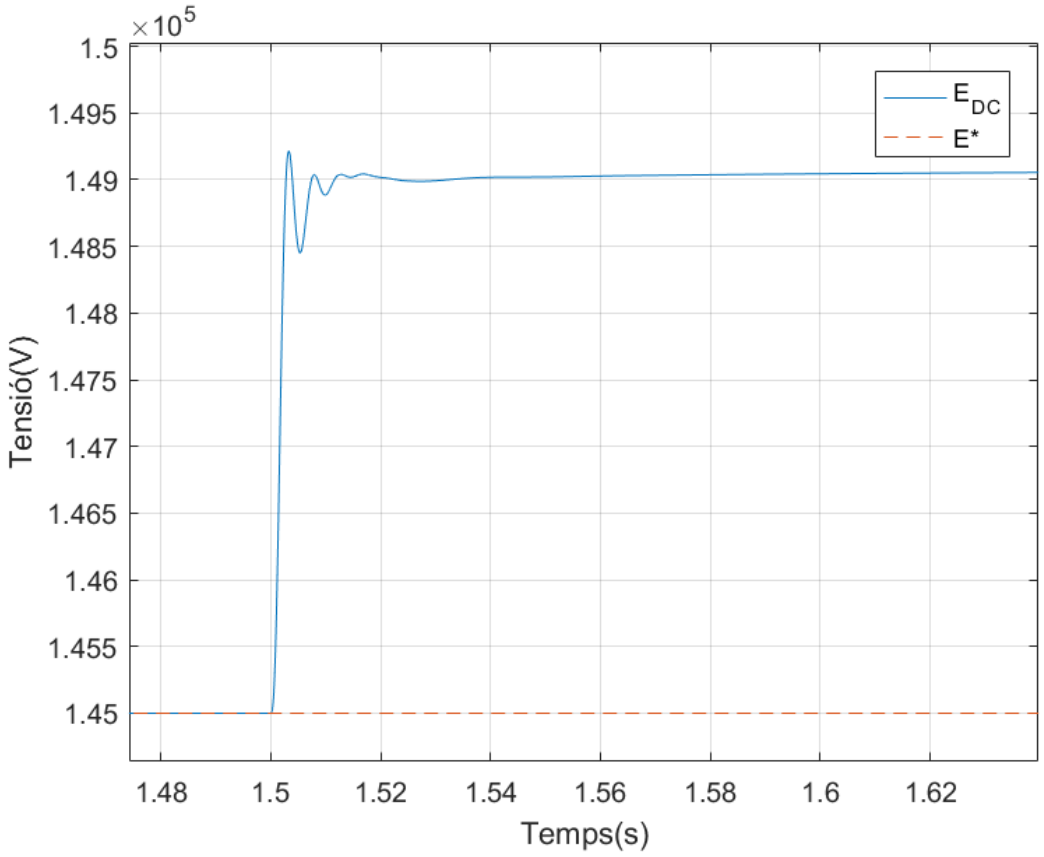

Figura 8.27: Tensions DC en borns des convertidor GSVSC1

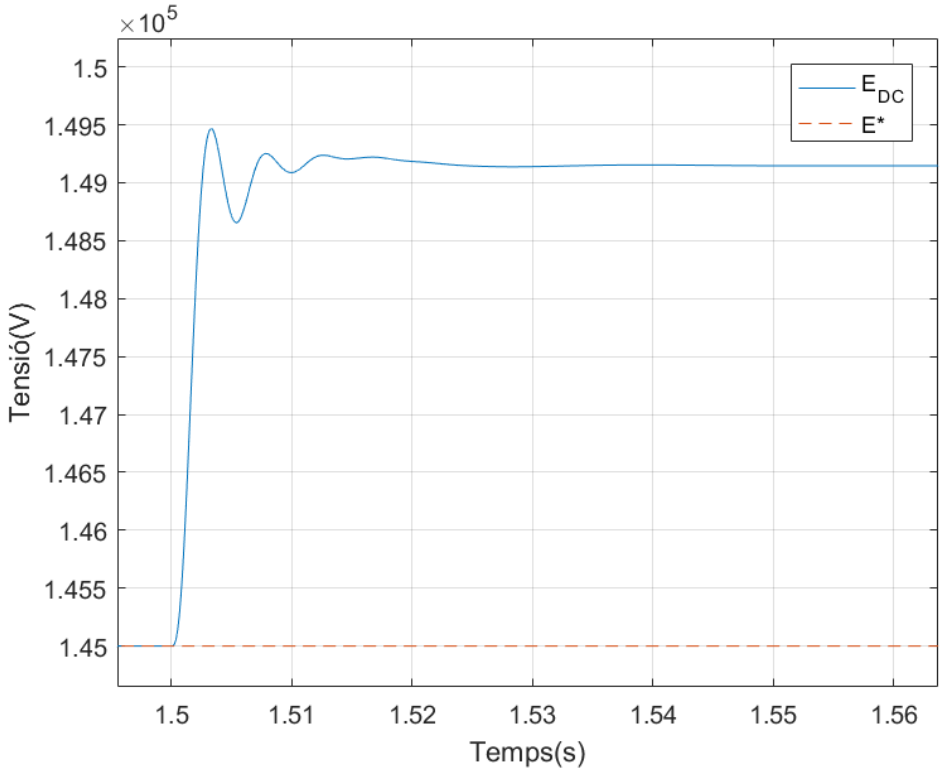

Figura 8.28: Tensions DC en borns des convertidor GSVSC2

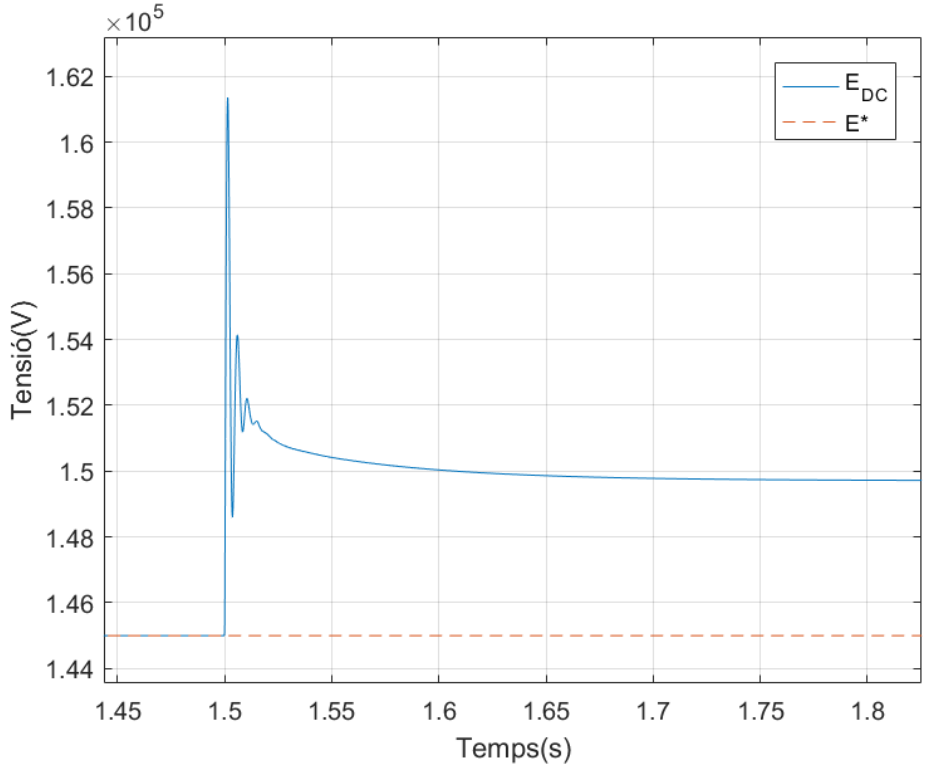

Figura 8.29: Tensions DC en borns des convertidor WFVSC1

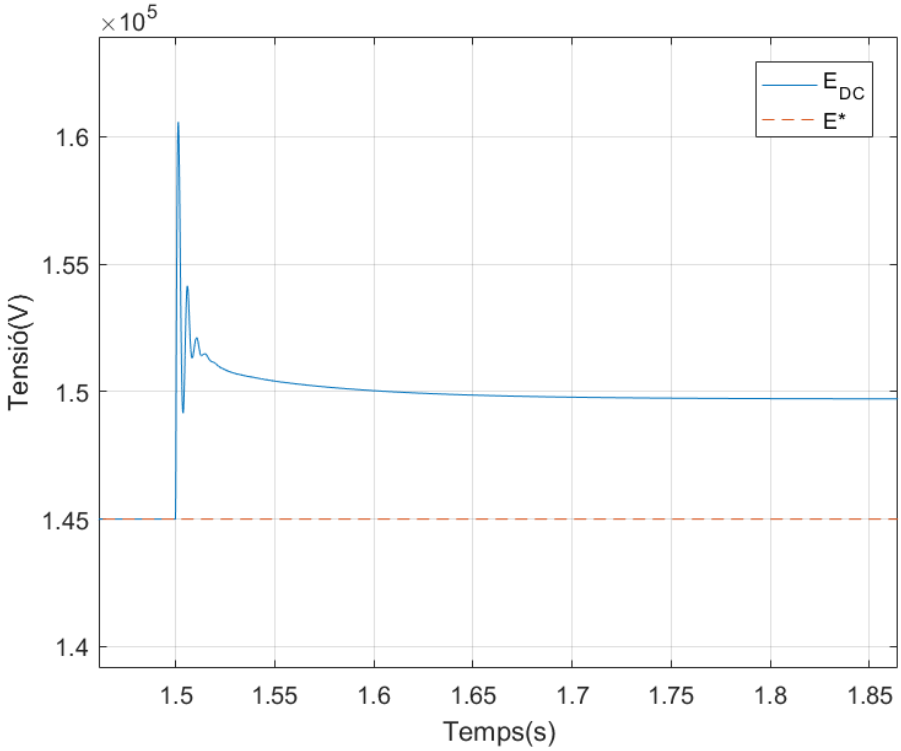

Figura 8.30: Tensions DC en borns des convertidor WFVSC2

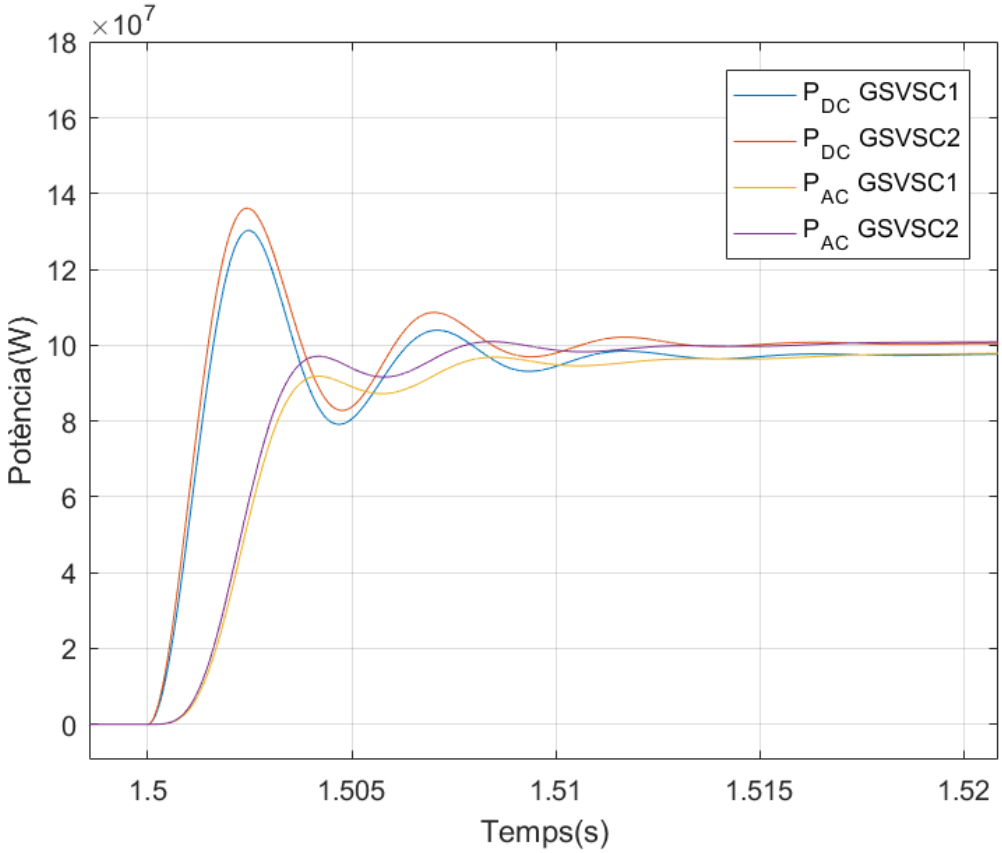

Figura 8.31: Potències convertidors GSVSC1 i GSVSC2

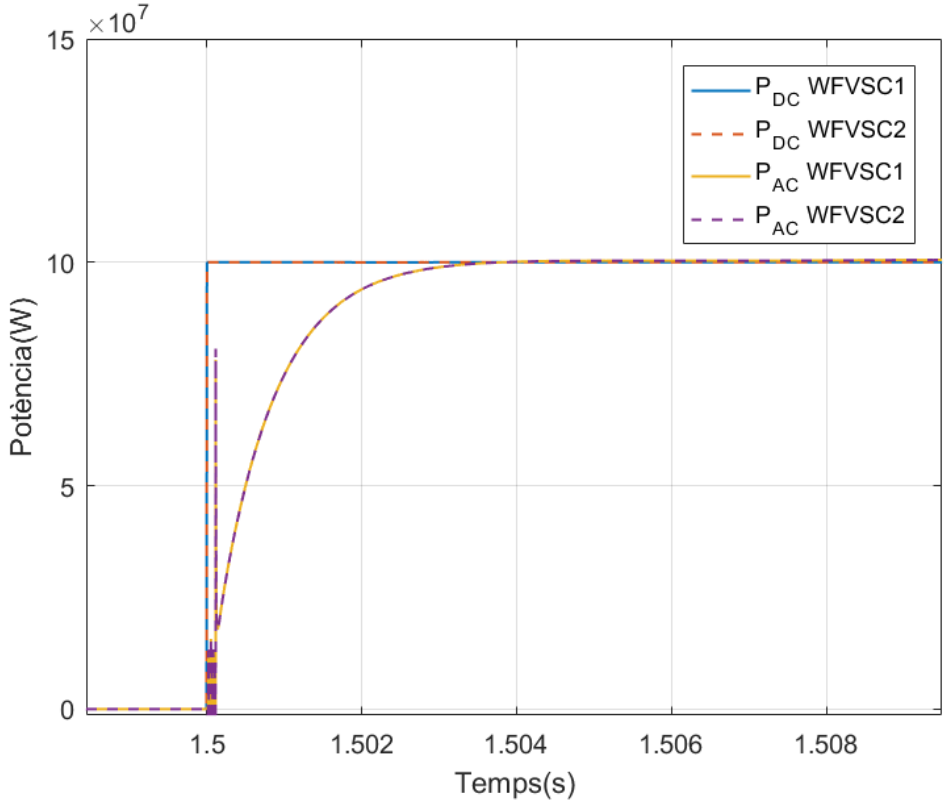

Figura 8.32: Potències convertidors WFVSC1 i WFVSC2

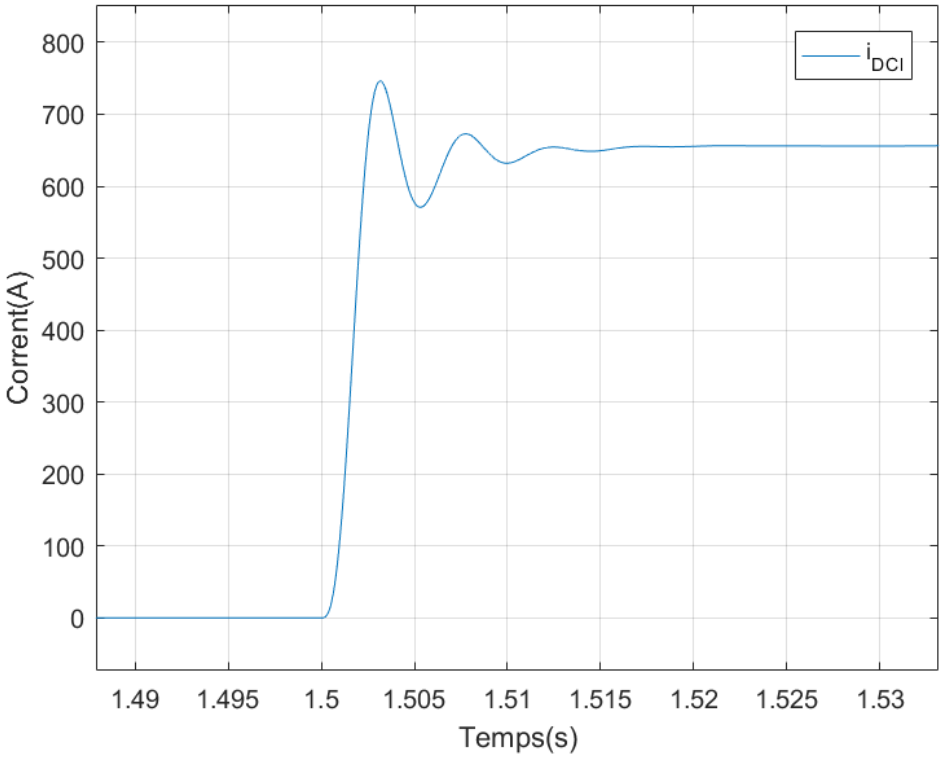

Figura 8.33: Corrent acció de control de GSVSC1

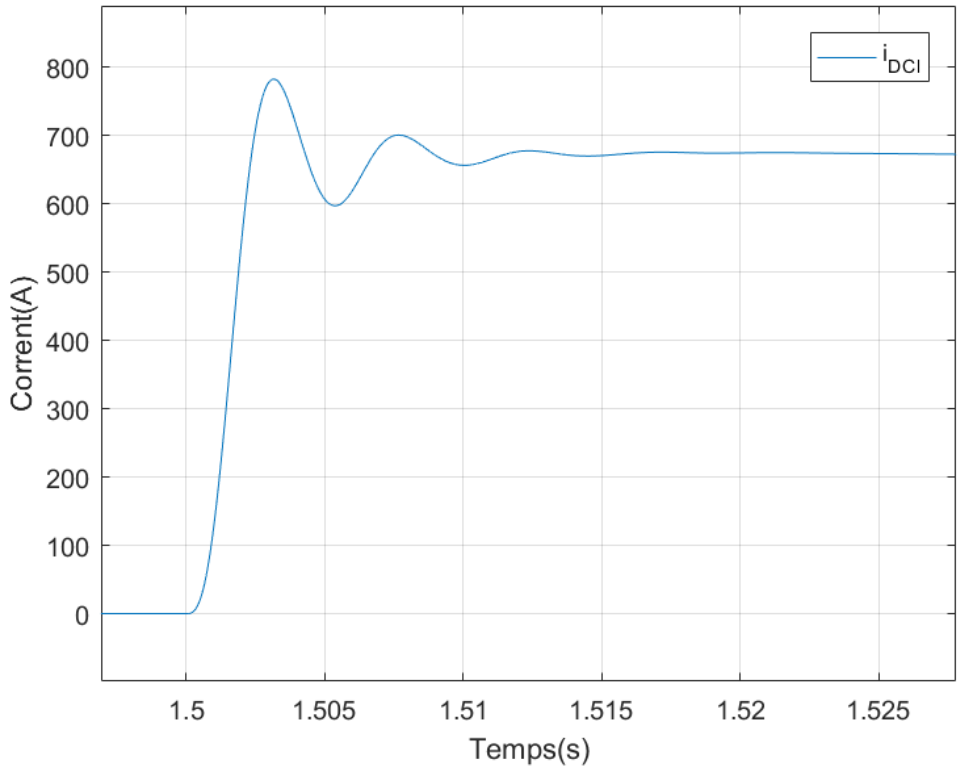

Figura 8.34: Corrent acció de control de GSVSC2

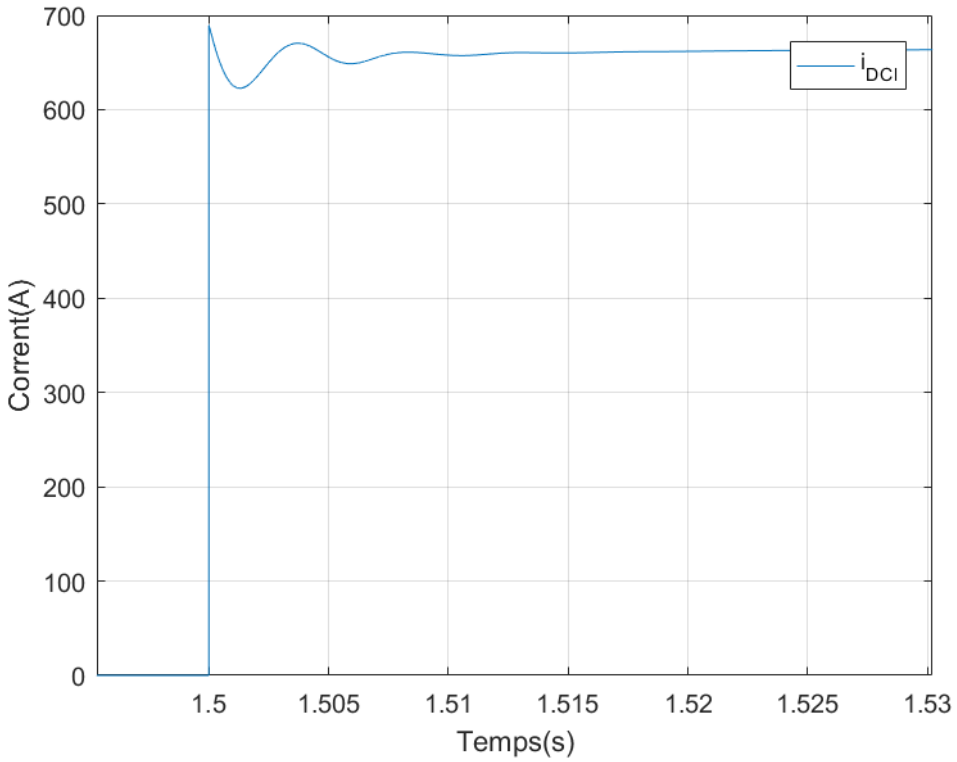

Figura 8.35: Corrent injectat per WFVSC1

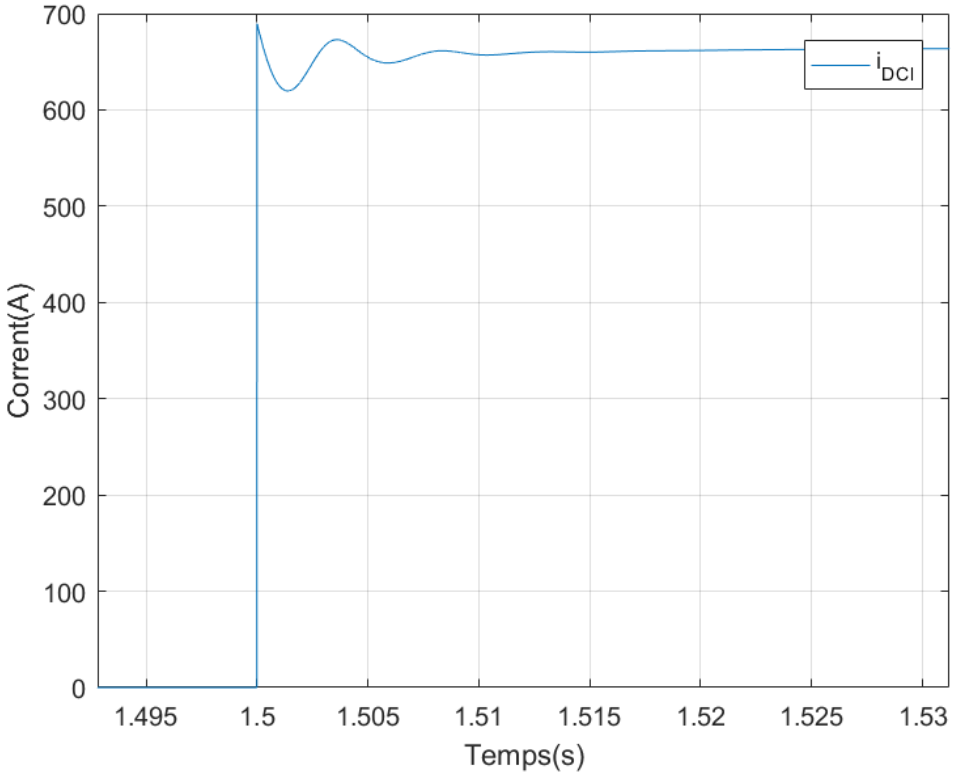

Figura 8.36: Corrent injectat per WFVSC2

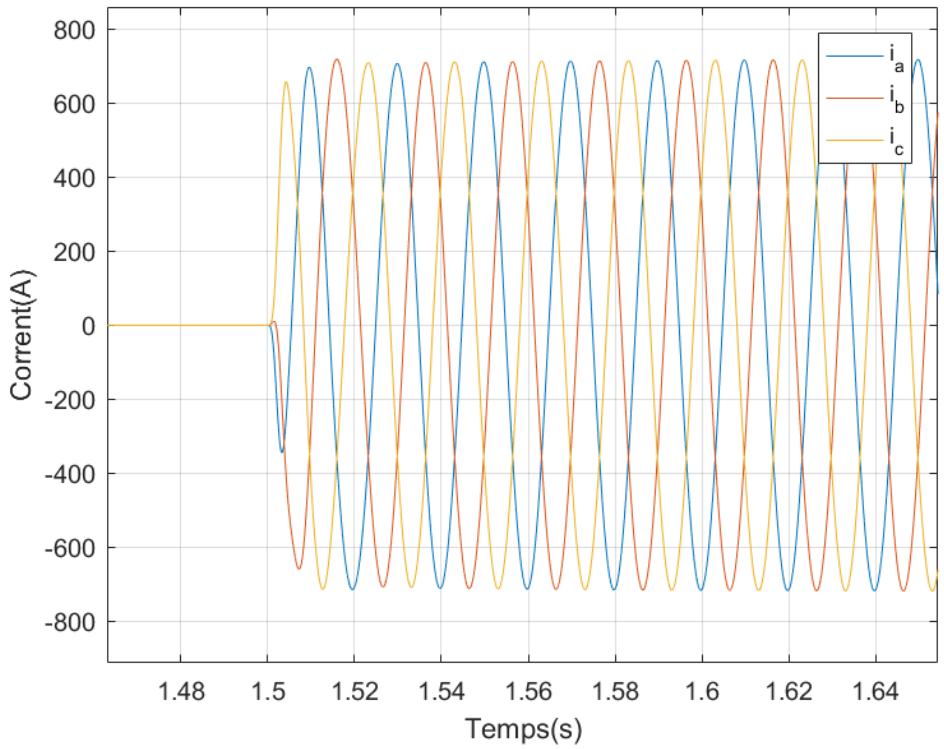

Figura 8.37: Corrents en referència abc de la xarxa AC punt 1 i del convertidor GSVSC1

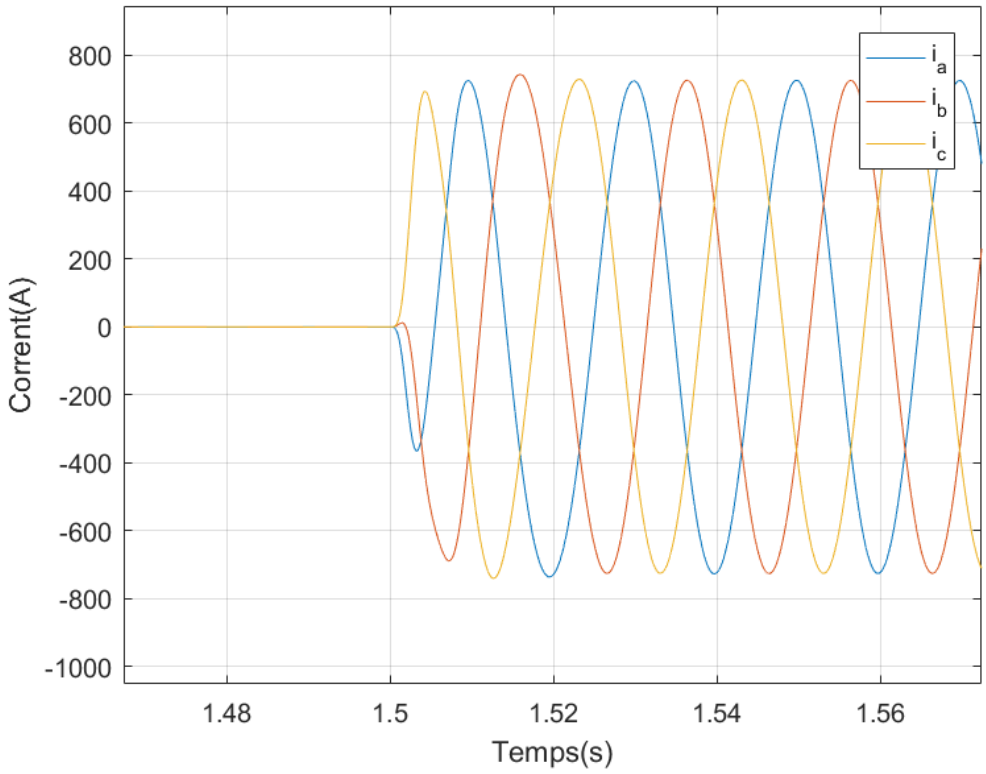

Figura 8.38: Corrents en referència abc de la xarxa AC punt 2 i del convertidor GSVSC2

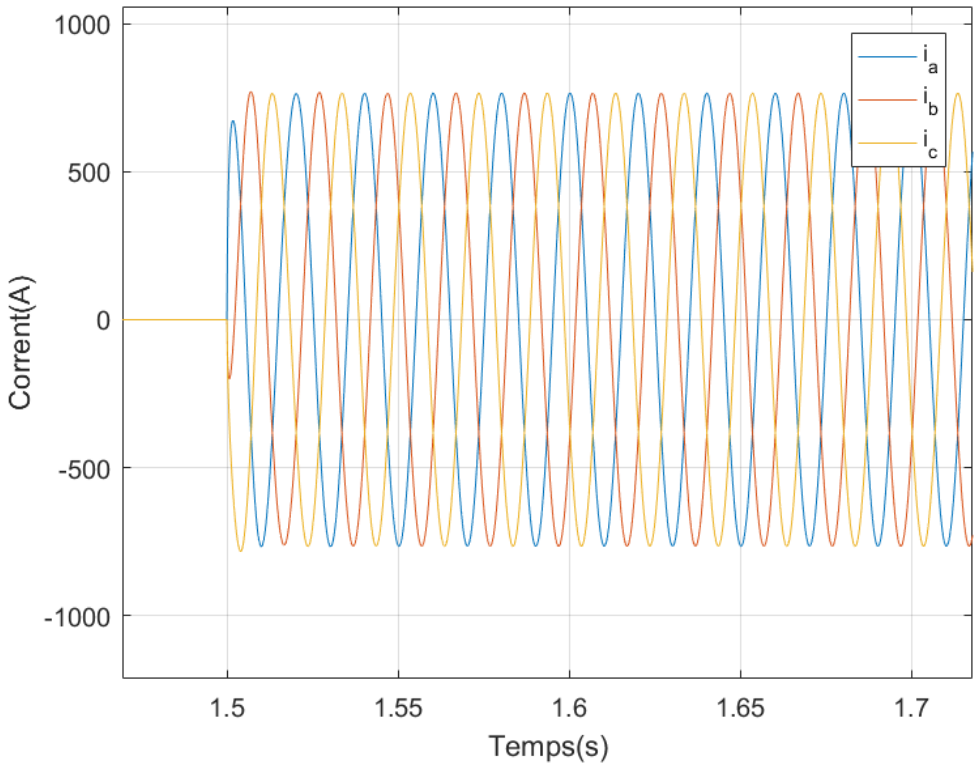

Figura 8.39: Corrents en referència abc del parc eòlic 1 i del convertidor WFVSC1

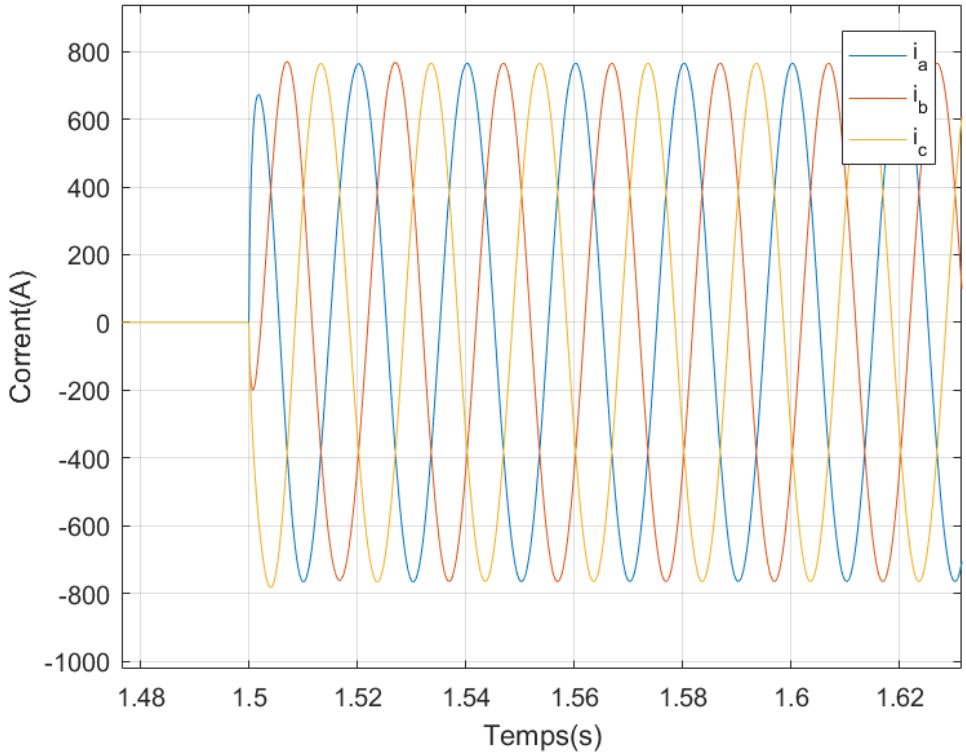

Figura 8.40: Corrents en referència abc del parc eòlic 2 i del convertidor WFVSC2

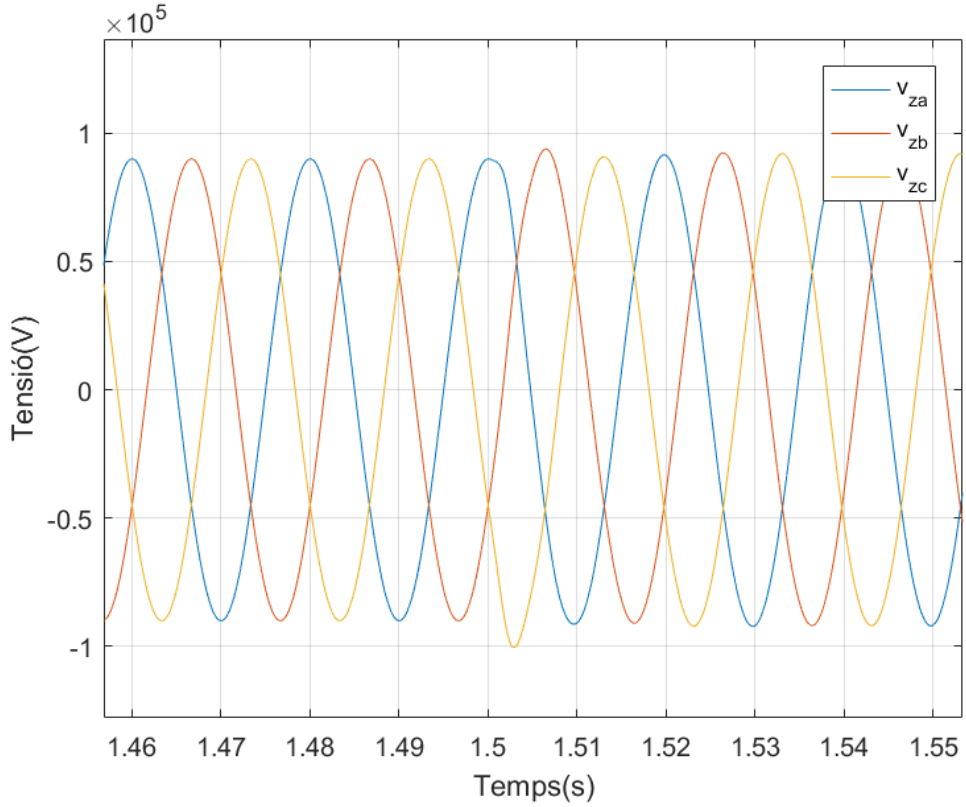

Figura 8.41: Tensió en referència abc de la xarxa principal 1 i de la banda AC del GSVSC1

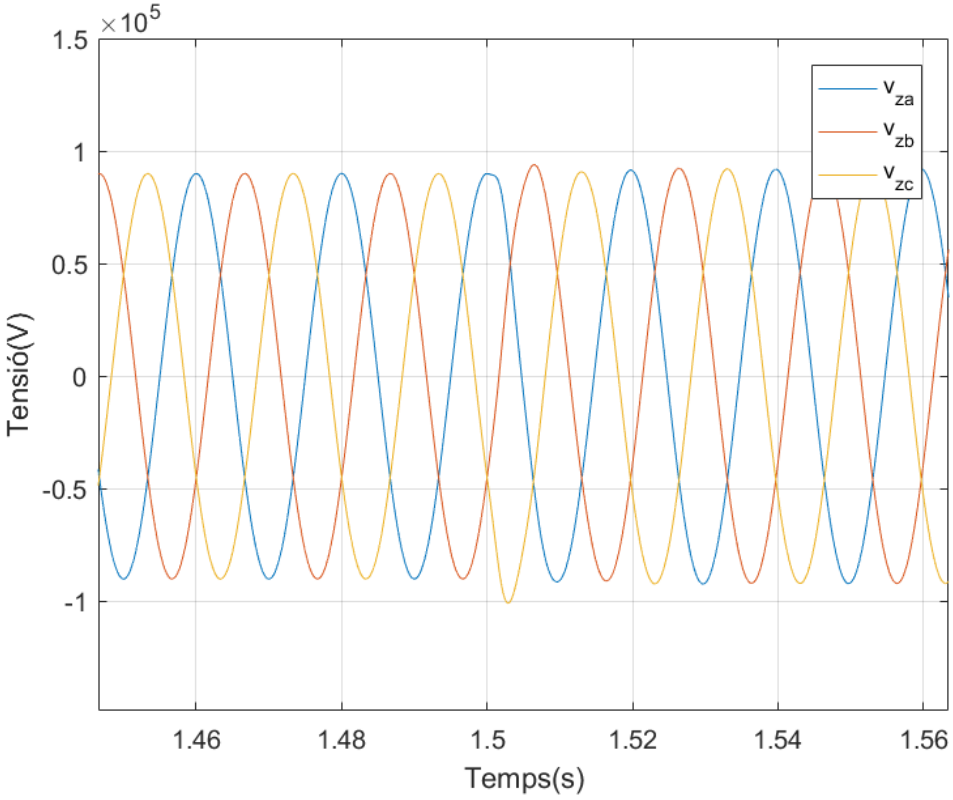

Figura 8.42: Tensió en referència abc de la xarxa principal 2 i de la banda AC del GSVSC2

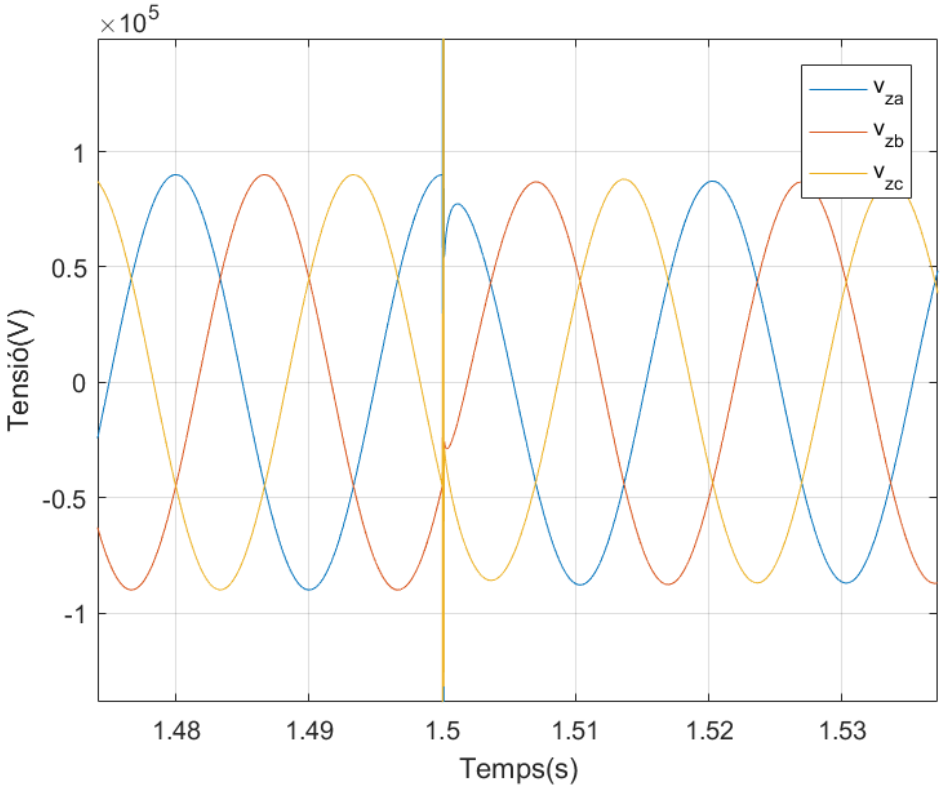

Figura 8.43: Tensió en referència abc del parc eòlic 1 i de la banda AC del WFVSC1

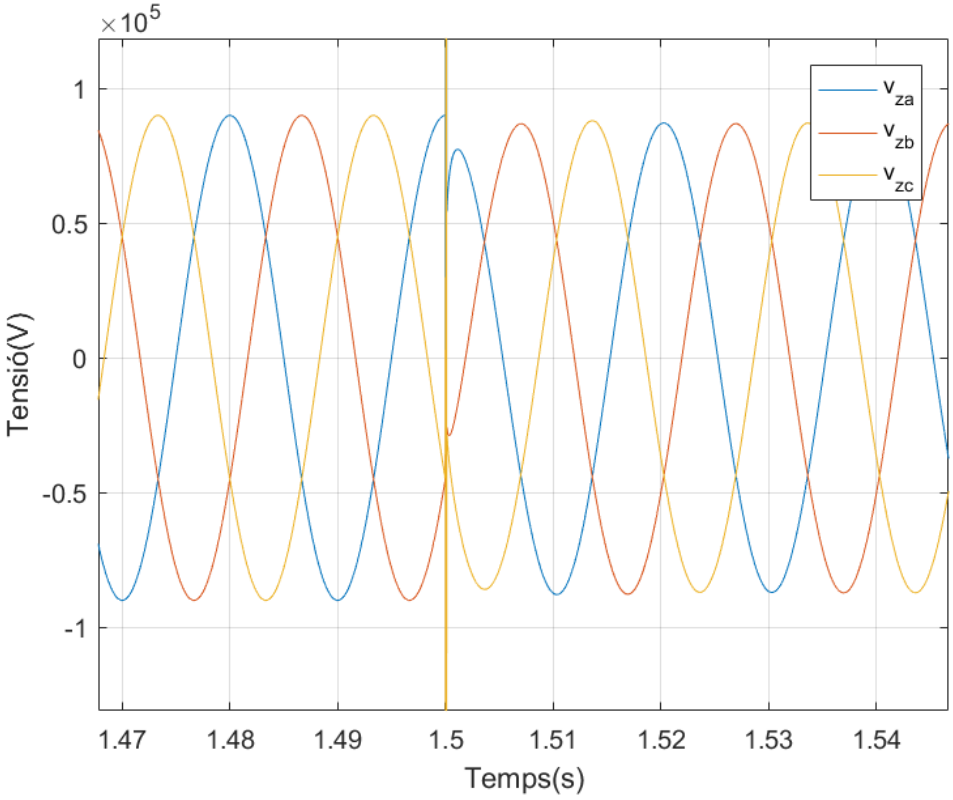

Figura 8.44: Tensió en referència abc del parc eòlic 2 i de la banda AC del WFVSC2

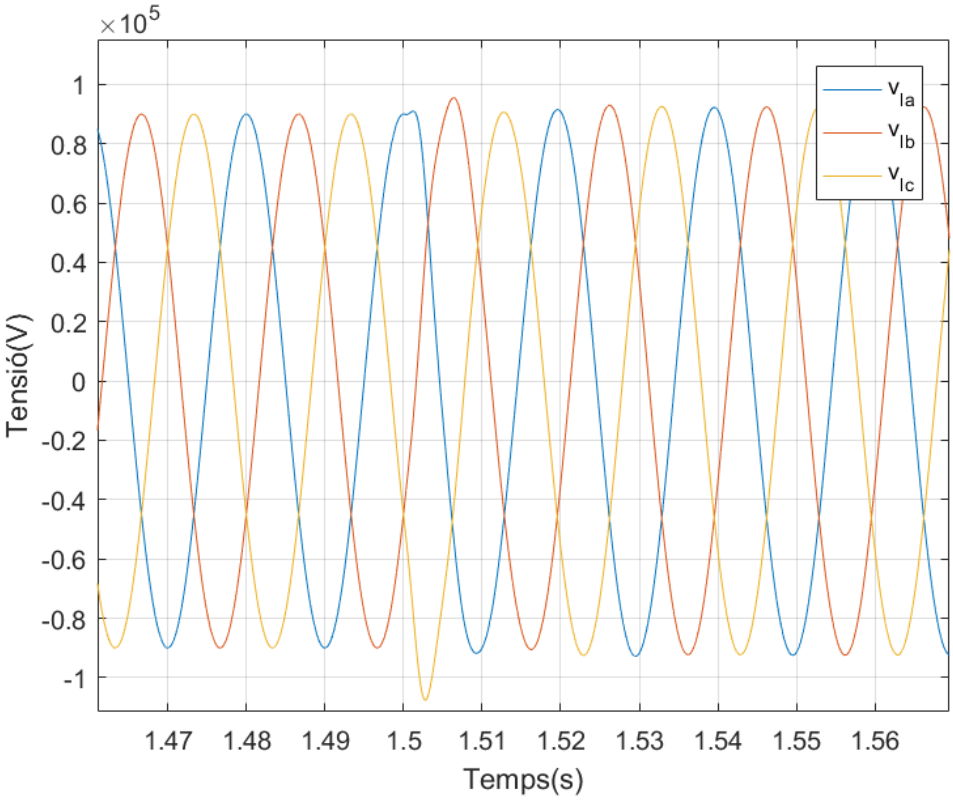

Figura 8.45: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor GSVSC1

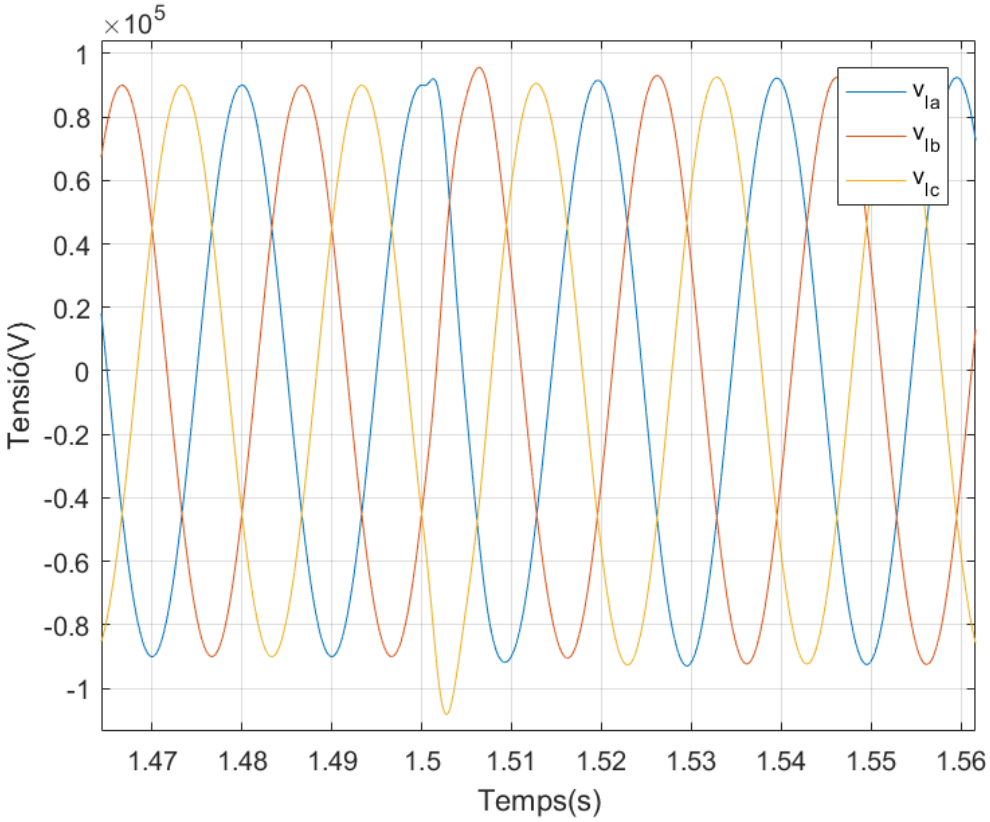

Figura 8.46: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor GSVSC2

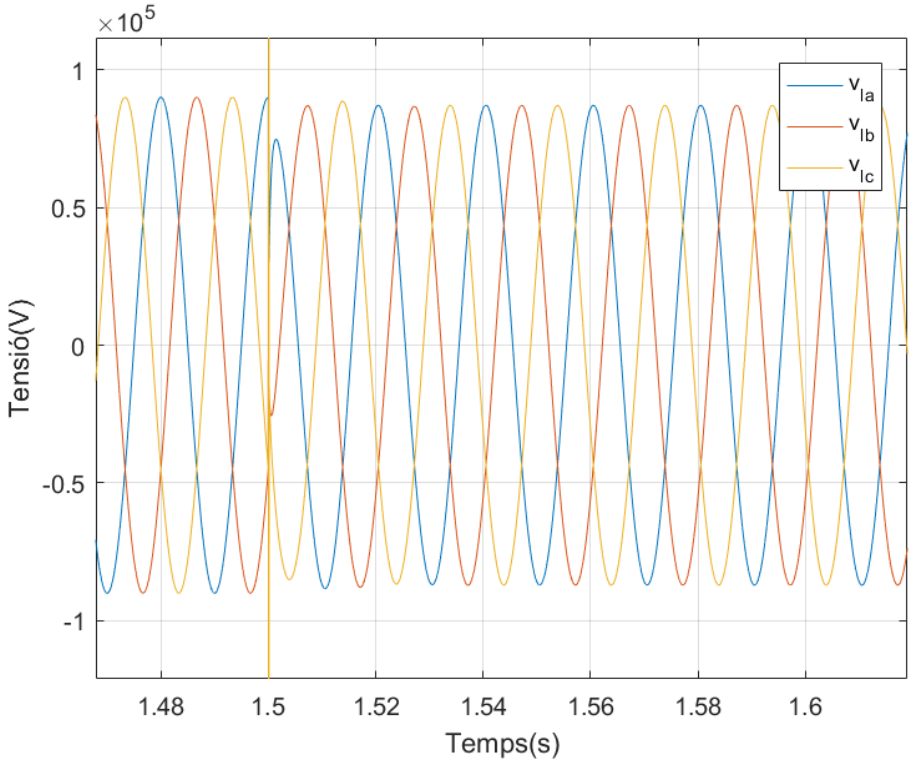

Figura 8.47: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor WFVSC1

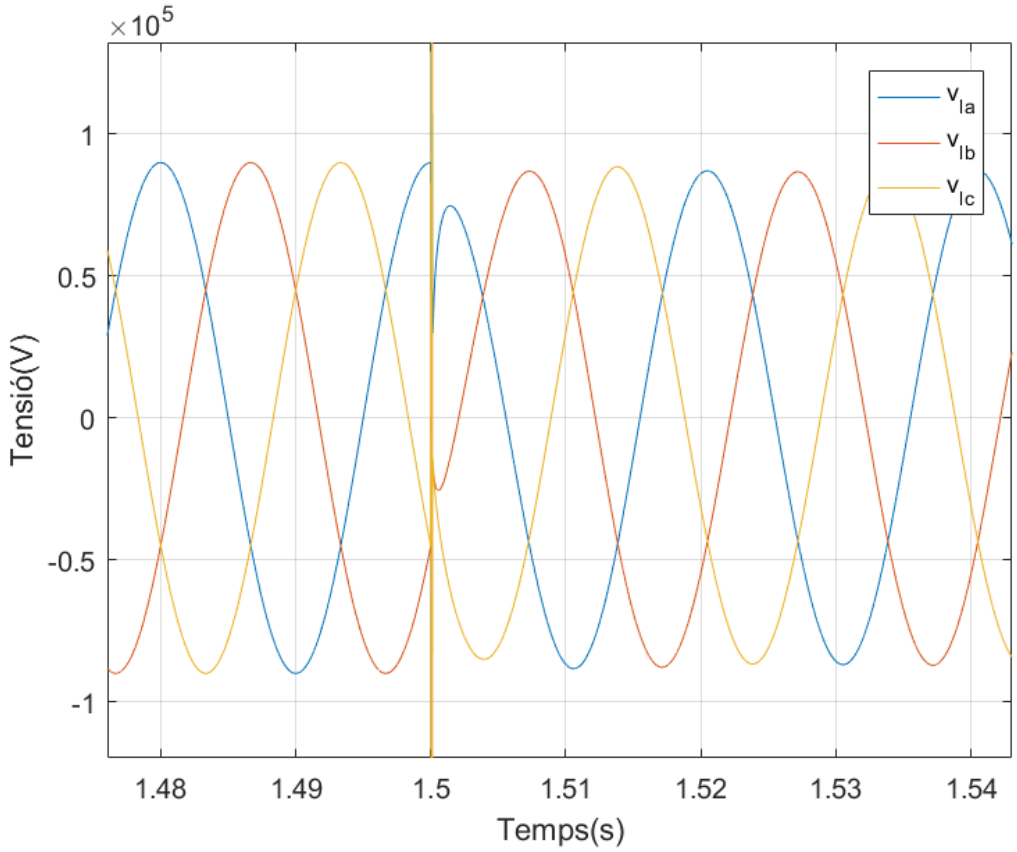

Figura 8.48: Tensió en referència abc aplicades pel convertidor WFVSC2

Les Figures 8.27, 8.28, 8.29 i 8.30 mostren l'evolució de les tensions en borns dels convertidors GSVSC1, GSVSC2, WFVSC1 i WFVSC2 respectivament. En errors dels dos primers en estat estacionari són de 4,0711 i 4,1329 kV, pel que els convertidors funcionen amb un error relatiu inferior al 3% respecte la tensió del bus continu. Es pot observar que abans del graó totes les tensions són iguals al valor de referència de 145 kV, això és deu a que l'error estacionari per un flux de potència nul és zero, i com que els corrents també són nuls la caiguda de tensió al llarg dels cables subaquàtics també ho són. Un cop s'ha produït el graó de potència les dues evolucions transitòries són molt rapides, amb presencia de sobrepics tot i que no són massa agressives.

L'evolució dels corrents de la banda continua dels convertidors GSVSC1, GSVSC2, WFVSC1 i WFVSC2 es representen respectivament a les figura 8.33, 8.34, 8.35 i 8.36. Es pot apreciar com l'evolució dels corrents I_{DCl} dels convertidors WFVSC1 i WFVSC2 s'aproxima molt al perfil d'un graó, això es deu a que s'aconsegueix mantindré la tensió del bus pràcticament a un valor constant, i per tant el corrent i la potència segueixen un perfil similar. L'evolució del corrent dels corrents de GSVSC1 i GSVSC2 presenten transitoris ràpids però suaus amb presencia de sobrepics.

Les figures 8.31 i 8.32 mostren les potències de les bandes continues i alternes dels convertidors GSVSC1 i GSVSC2, i WFVSC1 i WFVSC2 respectivament, es pot observar que tal i com s'ha anunciat al triar les mateixes constants de *droop* pels dos convertidors connectats a la xarxa, les potències que aquests injecten a aquesta són iguals. Les pèrdues de potència totals al llarg de tota la xarxa HVDC i dels convertidors són de 812,6 kW, tenint el sistema de transmissió un rendiment del 99,59%.

Les corrents en referència abc dels convertidors GSVSC1, GSVSC2, WFVSC1 i WFVSC es mostren respectivament a les figures 8.37 8.38, 8.39 i 8.40. S'observa com per una potència nul·la, el corrents també són nuls, però quan és produeix el graó de potència s'aprecia com els valors dels corrents també augmenten.

Les tensions aplicades pels convertidors i les tensions de la xarxa i dels parcs eòlics s'observen a les Figures 8.41-8.48. S'aprecia una petita distorsió en el punt en el que es produeix el graó de potència.

A partir d'aquests resultats de la simulació, es conclou que l'esquema general de control, emprant el llaç control de *droop* amb les constants de control escollides, és adequat per a que per a que la xarxa multiterminal de quatre nodes desenvolupi un bon funcionament. Finalment es considera que aquest sistema de control és extrapolable, amb el conseqüent ajust de les constants de *droop* i dels altres paràmetres de control, a qualssevol tipus de xarxa multiterminal HVDC que interconnecta múltiples parcs eòlics amb la xarxa elèctrica principal per diferents punts.

9. Pressupost del treball

En aquest apartat es presenta el pressupost d'aquest treball que es pot dividir en dues partides ben diferenciades, la partida de recursos humans i la partida de recursos materials. A continuació es detallen aquestes dues partides i, finalment, s'exposa el cost total del projecte.

9.1. Recursos humans

Aquesta partida considera totes les hores dedicades al treball. Aquest temps es divideix en:

- **Investigació:** Inclou les hores dedicades a l'estudi teòric dels sistemes que s'han modelitzat i simulat en aquest projecte, així com l'aprenentatge dels dos programes emprats.
- **Simulació:** Engloba el temps dedicat a la verificació, mitjançant simulacions, dels coneixements teòrics adquirits en la fase d'investigació.
- **Redacció de la memòria:** Comprèn les hores dedicades en la redacció de la memòria del treball.

El cost d'aquesta partida es mostra desglossat, a continuació, en la taula 9.1, aplicant l'IVA corresponent.

Concepte	Preu (€/hora)	Temps dedicat (h)	Cost total (€)
Investigació	35	130	4.550
Simulació	35	130	4.550
Redacció memòria	20	100	2.000
Subtotal		360	11.100
IVA (21%)			2.331
TOTAL			**13.431**

Taula 9.1: Pressupost dels recursos humans del treball

9.2. Recursos materials

Aquesta partida agrupa el maquinari i el programari emprats en la elaboració d'aquest treball. En el cas del maquinari, s'ha considerat un període d'amortització de 6 mesos, que es correspon amb la duració del projecte. En el cas del programari utilitzat, s'ha considerat que la llicència d'aquests programes resulta gratuïta per ser estudiant de la UPC. Aquesta partida es mostra desglossada, a continuació, a la taula 9.2.

Concepte	Preu unitari (€)	Unitats	Cicle de vida (Anys)	Amortització (€)
Ordinador personal	950	1	4	118,75
Ratolí	16	1	4	2,00
Simulació	0	1	-	0,00
Redacció memòria	0	1	-	0,00
TOTAL (IVA inclòs)				**120,75**

Taula 9.2: Pressupost dels recursos materials del treball

9.3. Cost total

Finalment, sumant les dues partides s'obté el pressupost total del treball. Aquest es recull en la taula 9.3.

Partida	Preu unitari (€)
Recursos humans	13.431,00
Recursos materials	120,75
TOTAL (IVA inclòs)	**13.551,75**

Taula 9.3: Pressupost total del treball

10. Impacte Ambiental

L'estudi de l'impacte ambiental que presenta aquest treball té en compte l'impacte relacionat amb els parcs eòlics marins i l'impacte relacionat amb els sistemes de transmissió d'energia amb corrent continu.

10.1. Impacte ambiental dels parcs eòlics marins

La instal·lació de parcs eòlics al mar presenta un seguit d'impactes ambientals, que poden ser tant positius com negatius. En l'etapa de la construcció dels aerogeneradors, l'impacte no ha de ser major del que presenta la construcció dels aerogeneradors terrestres actuals. Seguidament s'ha de tenir present l'impacte que hi ha en el transport i en la instal·lació dels aerogeneradors, que pot causar trastorns temporals pels diferents medis per on és transportat l'aerogenerador.

Si es consideren les conseqüències de la seva explotació, cal tenir en compte que els aerogeneradors es troben instal·lats entre dos medis i ecosistemes diferents, l'aquàtic i l'aeri. Avaluant l'impacte en el medi aeri, igual que passa amb els aerogeneradors tradicionals, s'ha de tenir present les rutes migratòries dels ocells i instal·lar també el màxim nombre de senyals lluminosos per evitar el xoc d'aus amb les pales. Observant l'impacte sobre el medi aquàtic, al no haver 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 terrestre és el soroll. En aquest cas, pels aerogeneradors marins no es consideren efectes directes sobre la salut de les persones.

També s'ha de considerar l'estudi i el seguiment complert de l'anàlisi del Cicle de Vida (ACV) dels diferents dispositius dels parcs, que en el cas dels aerogeneradors la vida útil és de 25 a 30 anys.

Des d'un punt de vista energètic i contaminant, si es considera que amb els aerogeneradors es pot substituir part de la generació d'energia més contaminant, es pot avaluar la disminució de l'emissió de gasos contaminants. En el cas espanyol la generació de les centrals tèrmiques de carbó és la més contaminant i emet de l'ordre de 0,3 kg de diòxid de carboni (CO_2) per cada kWh que produeix. Un aerogenerador amb una velocitat mitja de 11 m/s al mig del mar, dóna una producció elèctrica d'1,6 MW [15]. Si es calcula l'estalvi en l'emissió de diòxid de carboni, aquest suposa una reducció de 480 kg per hora.

10.2. Impacte ambiental dels sistemes de transmissió HVDC

10.2.1. Impacte energètic

Des d'un punt de vista energètic l'ús dels sistemes de transmissió HVDC suposa una reducció de les pèrdues de l'ordre del 30-40 % respecte els sistemes d'alterna. Així doncs, les pèrdues per cada 1.000 km de distància de transmissió se situen a l'entorn del 3 % de l'energia total transportada [4] i [5].

10.2.2. Impacte sobre la fauna i la flora

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 [16]. 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 pot ser arrossegada uns quants metres per 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 flora destruïda es recupera entorn a un any després de la instal·lació. S'ha de tenir especial precaució quan hi ha medis marins vulnerables, com poden ser les colònies de coralls. En casos com aquest, s'hauria de desviar el conductor per tal de no afectar a aquest tipus de fauna.

Conclusions

En aquest treball s'ha presentat la modelització dels components principals d'una xarxa HVDC, també s'han dissenyat diferents sistemes de control per a tres configuracions de xarxes concretes. La primera connecta un únic parc eòlic marí amb la xarxa elèctrica principal mitjançant una configuració punt a punt. La segona és una xarxa multiterminal que connecta dos parcs eòlics *offshore* amb la xarxa elèctrica principal per un únic punt i l'ultima xarxa, també multiterminal, interconnecta dos parc eòlics marins amb la xarxa terrestre principal per dos punts diferents. Posteriorment, s'ha procedit a la simulació d'aquestes xarxes i l'anàlisi i la validació dels diferents sistemes de control dissenyats.

Per a futures línies de treball, es presenten diferents opcions. Primerament, millorar els models emprats pels components principals de les xarxes. Com per exemple, canviar el model simplificat del convertidor VSC pel model real format per sis IGBT controlant l'obertura i tancament d'aquests. Emprar una modelització més fidel a la generació d'energia real en els parcs eòlics *offshore,* variable en funció de les ràfegues de vent, aconseguint un mode de funcionament més pròxim al real. Realitzar també diferents simulacions fora de les condicions estacionàries de funcionament, estudiant el comportament d'aquests sistemes davant de faltes a la xarxa mitjançant el programa EMTP-RV. Comprovar i validar els mateixos models mitjançant altres softwares de simulació. Finalment, una altra possible línia de treball seria intentar implementar un sistema similar als estudiats emprant els controls dissenyats en una plataforma real.

Agraïments

Agraeixo a l'Oriol Gomis per brindar-me l'oportunitat de poder realitzar aquest treball. També vull agrair especialment al Ricard Ferrer, per la seva implicació, paciència i gran suport proporcionat durant l'elaboració d'aquest treball. Sense el seu ajut aquest treball no hagués estat possible.

També vull donar les gràcies als companys i companyes del despatx pel suport i la bona companyia.

Finalment, agrair a la meva família i amics el suport rebut durant el transcurs dels estudis universitaris i durant la realització d'aquest treball.

A tots,

Gràcies.

Annex A

Transformada de Park

La Transformada de Park és una transformació matemàtica utilitzada amb l'objectiu de simplificar l'anàlisi i l'estudi de sistemes trifàsics. Degut a la naturalesa oscil·latòria de les variables quan es treballa amb sistemes de corrent alterna, és molt convenient transformar aquestes variables en magnituds que prenen valors constants per tal de facilitar l'estudi i el control del sistema.

Per tal de transformar en constants les variables del sistema, la Transformada de Park fa un canvi de referència, passant de la referència trifàsica habitual abc a la $dq0$. Per aquest motiu la transformada de Park també es sol anomenar com a transformada $dq0$.

És a dir, donat un vector en referència abc, x_{abc}, aplicant-li la transformada de Park s'obté el mateix vector en referència $qd0$, x_{qd0}.

$$[x_{qd0}] = T(\theta)[x_{abc}]$$

Aquesta transformada va ser proposada per Robert. H. Park al 1929 però amb el temps ha sorgit una gran quantitat de transformades que apliquen el mateix concepte i que també s'anomenen habitualment com transformades de Park [9]. La transformada utilitzada en aquest treball és la següent:

$$T(\theta) = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Agafant com a angle θ l'angle elèctric de tensió en un sistema trifàsic, al passar a la referència $qd0$ s'obtenen valors constants, i en el cas que el sistema elèctric sigui simètric i equilibrat la component 0 sempre és nul·la. A la figura A.1 es mostra una representació del pla qd [17].

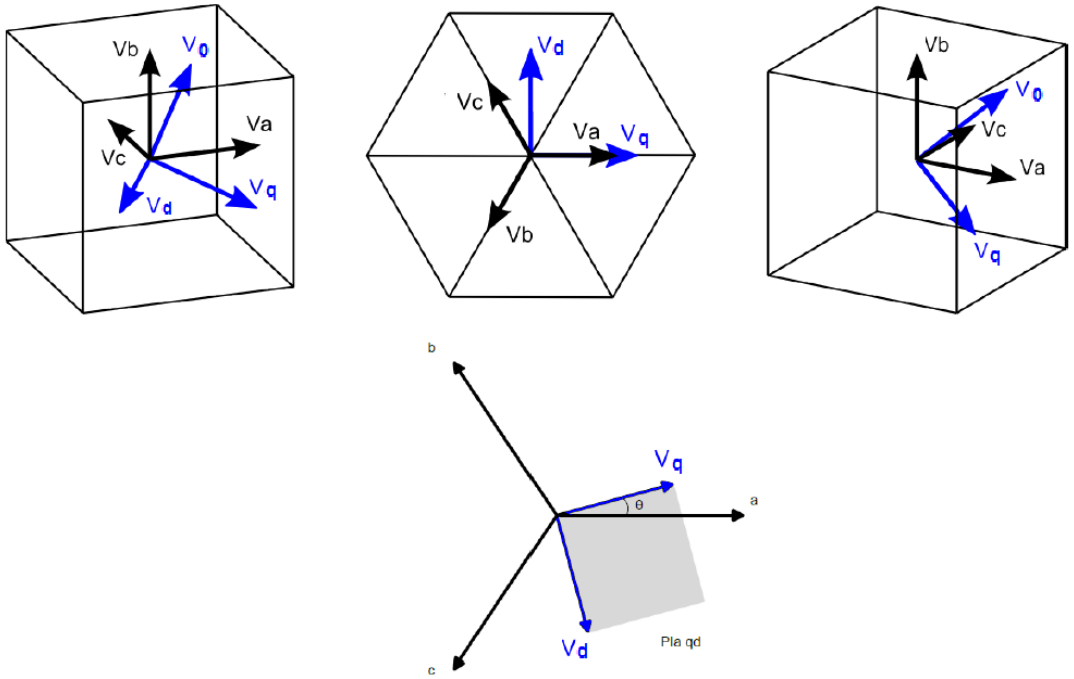

Figura A.1: Representació del pla qd

També es pot fer l'operació inversa, és a dir, passar de la referència $qd0$ a la referència abc. Aïllant el vector x_{abc} de l'equació anterior obtenim:

$$[x_{abc}] = T(\theta)^{-1}[x_{qd0}]$$

On l'antitransformada de Park queda definida per l'expressió:

$$T(\theta)^{-1} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

A l'aplicar aquesta transformació a les tensions i corrents abc per passar a la referència $qd0$ mitjançant l'angle elèctric, s'obtenen les següents expressions.

$$\underline{V}_{qd0} = \frac{v_q - jv_d}{\sqrt{2}}$$

$$\underline{I}_{qd0} = \frac{i_q - ji_d}{\sqrt{2}}$$

La potència d'un sistema trifàsic es pot calcular com:

$$\underline{S} = P + jQ = 3\underline{V}_{qd0}\underline{I}_{qd0} = 3\left(\frac{v_q - jv_d}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{i_q + ji_d}{\sqrt{2}}\right)$$

Reordenant aquesta expressió s'obtenen els valors de les potències activa i reactiva en funció de les tensions i corrents en referència $qd0$.

$$P = \frac{2}{3}(v_q i_q + v_d i_d)$$

$$Q = \frac{2}{3}(v_q i_d - v_d i_q)$$

Bibliografia

[1] Airtricity. European offshore supergrid proposal. www.airtricity.com. 2010.

[2] Michael Henderson, Julien Gagnon, David Bertagnolli, Bill Hosie, Gary L. DeShazo and Brian Silverstein. Building a plan for HVDC. *IEE Power and Energy Magazine,* 52-60. Març 2007.

[3] Roberto Rudervall, J.P. Charpentier and Raghuveer Sharma. High Voltage Direct Current (HVDC)Transmission Systems Technology Review Paper. Presentat a la *Energy Week* a Washington, D.C, USA. Març 2000.

[4] Michael P. Bahrman and Brian K. Johnson. The ABCs of HVDC Transmission technologies. *IEE Power and Energy Magazine,* 32-44. Març 2007.

[5] Ram Adapa. High-Wire Act. *IEE Power and Energy Magazine,* 18-29. Novembre 2012.

[6] Hong Rao. Architecture of Nan'ao Multi-terminal VSC-HVDC System and Its Multifunctional Control. *CSEE journal of power and energy systems, vol. I, no. I*, Març 2015.

[7] Agustí Egea-Alvarez, Adria Junyent-Ferré and Oriol Gomis-Bellmunt. Active and reactive power control of grid connected distributed generation Systems.

[8] Samy Akkari, Eduardo Prieto-Araujo, Jing Dai, Oriol Gomis-Bellmunt and Xavier Guillaud. Impact of the DC Cable Models on the SVD Analysis of a Multi-Terminal HVDC System. 2016.

[9] R. H. Park. Two-reaction theory of synchronous machines. *AIEE Transactions*, 48:716-730, 1929.

[10] Se-Kyo Chung. A phase tracking system for three phase utility interface inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15:431-438, 2000.

[11] L. Harnefors and H.-P. Nee. Model-based current control of ac machines using the internal model control method. *Industry Applications, IEEE Transactions*, 34(1):133-141, 1998.

[12] D. Jovcic. Offshore wind farm with a series multiterminal CSI HVDC. *Electric Power Systems Research*, 78:747-755, 2008.

[13] J. Ekanayake Jun Liang, O. Gomis-Bellmunt and N. Jenkins. Control of multi-terminal

vsc-hvdc transmission for o_shore wind power. In *Proc. 13th European Conf. Power Electronics and Applications EPE '09*, pages 1-10, 2009.

[14] Fernando D. Bianchi and Oriol Gomis-Bellmunt. Droop control design for multi-terminal VSC-HVDC grids based on LMI optimization. *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC),* 4823- 4828, Desembre 2011.

[15] Adrià Junyent. Modelització i control d'un sistema de generació elèctrica de turbina de vent. *Master's thesis*, ETSEIB-UPC, 2007.

[16] Thomas Worzyk. Submarine Power Cables. *Springer*, 2009.

[17] Marc Llonch Masachs. L'espai de tensions i el vector espacial aplicats a la modulació de convertidors. Novembre 2015.