

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Modelització d'un aerogenerador offshore

MEMÒRIA

Autor: Marc de Fuentes Prats
Director: Oriol Gomis Bellmunt
Convocatòria: Maig 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest projecte consisteix en el disseny i modelització d'un aerogenerador offshore (al mar). Aquest treball pretén aprofundir en l'anàlisi i el control de l'energia eòlica, en aquest cas generada al mar. L'estructura del treball consta de diferents blocs: en el primer es descriuen les parts i el funcionament d'un aerogenerador, i més tard es dissenya un model i un sistema de control, amb el qual es faran simulacions i s'estudiaran els resultats.

Resumen

Este proyecto consiste en el diseño y modelización de un aerogenerador offshore (en el mar). Este trabajo pretende profundizar en el análisis y el control de la energía eólica, en este caso generada al mar. La estructura del trabajo consta de diferentes bloques: en el primero se describen las partes y el funcionamiento de un aerogenerador, y más tarde se diseña un modelo y un sistema de control, con el que se harán simulaciones y se estudiarán los resultados.

Abstract

This project involves the design and modeling of an offshore wind turbine. This work aims to deepen the analysis and control of wind energy, in this case generated at sea. The structure of the work consists of different blocks: the first describes the parts and operation of a wind turbine, and later a model and a control system are designed, with which simulations will be studied and the results will be studied.

Índex

1. INTRODUCCIÓ	7
1.1. Objectius del projecte	7
1.2. Abast del projecte	7
2. ENERGIA EÒLICA	8
2.1. Orígens energia eòlica.....	8
2.1.1. L'energia eòlica a Catalunya.....	10
2.2. El vent: principis teòrics	10
2.3. Aerogenerador	11
2.3.1. Torre	13
2.3.2. Rotor	15
2.3.3. Aspes.....	21
2.3.4. Generador elèctric	24
2.3.4.1. Turbina de velocitat fixa	24
2.3.4.2. Turbina amb lliscament variable.....	25
2.3.4.3. Turbina de velocitat variable amb convertidor parcial	26
2.3.4.4. Turbina de velocitat variable amb convertidor en plena potència	26
2.3.5. Convertidor	27
2.3.5.1. Convertidor DC/AC	28
2.4. Estructures de suport aerogeneradors offshore.....	30
2.4.1. Estructures de suport de base fixa	30
2.4.1.1. Estructures de pilons.....	30
2.4.1.2. Suction buckets.....	32
2.4.1.3. Gravity-based structures (GBS)	32
2.4.2. Estructures de suport flotants	33
2.4.2.1. <i>Buoyancy Stabilized Platforms</i>	33
2.4.2.2. <i>Mooring Stabilized Platforms</i>	34
2.4.2.3. Plataformes estabilitzades amb llast	35
3. MODELITZACIÓ	37
3.1.1. Modelització del generador elèctric.....	37
3.1.2. Modelització del convertidor.....	40
4. CONTROL	43

4.1. Control del convertidor.....	43
4.1.1. Banda xarxa.....	44
4.1.2. Banda màquina elèctrica	44
4.1.3. Phase Locked Loop (PLL)	45
4.1.4. Intensitats i potències de referència	47
4.1.5. Regulador voltatge DC.....	49
4.1.6. Llaç de corrent	50
4.1.7. Control potència òptima	53
4.2. Control de l'angle de pitch	54
5. SIMULACIONS	56
5.1. Costat xarxa del convertidor	56
5.1.1. Sistema d'emmagatzament	56
5.1.1.1. Resultats	57
5.1.2. Sistema d'energia renovable	60
5.1.2.1. Resultats	60
5.1.3. Sot de tensió	63
5.1.3.1. Resultats	64
5.2. Costat màquina del convertidor.....	67
5.2.1. Velocitat constant.....	67
5.2.1.1. Resultats	68
5.2.2. Graó de velocitat.....	70
5.2.2.1. Resultats	70
5.2.3. Rampa de velocitat	72
5.2.3.1. Resultats	72
5.3. Sistema complet	74
5.3.1. Velocitat constant.....	74
5.3.1.1. Resultats	75
5.3.2. Sot de tensió	78
5.3.2.1. Resultats	78
CONCLUSIONS	80
ANNEX	81
A. TRANSFORMACIONS	82
A.1 Transformada de Clarke.....	82
A.2 Transformada de Park.....	84
B. MODULACIÓ	86

B.1 SVPWM	86
BIBLIOGRAFIA	89

1. Introducció

1.1. Objectius del projecte

En aquest treball s'estudia i es modelitza un aerogenerador offshore. Aquest tipus d'aerogeneradors van sorgir uns anys després dels aerogeneradors elèctrics convencionals, i tenien un objectiu principal: millorar l'eficiència. Els aerogeneradors offshore estan situats al mar, per a aprofitar d'aquesta forma els forts vents que es generen.

Aquests aerogeneradors tenen com a principal avantatge la qualitat del vent que poden rebre, ja que al mar no hi ha muntanyes ni boscos que desviïn o frenin els corrents d'aire. El principal inconvenient però, és la seva connexió amb la xarxa elèctrica, i com transportar tota l'energia generada. La seva estabilitat i el seu manteniment també s'han de tenir en compte.

Un cop es dissenya el model, es vol controlar i simular l'aerogenerador davant diverses situacions, com poden ser sots de tensió, o diferents velocitats del vent. D'aquesta manera es pot estudiar el comportament de l'aerogenerador.

1.2. Abast del projecte

L'objectiu final d'aquest treball és obtenir un model que representi el funcionament d'un aerogenerador offshore en la realitat.

Per a poder fer això s'estudien abans les diferents parts de les que consta un aerogenerador, la funció que tenen aquestes, i com es poden optimitzar per a millorar el rendiment.

Més tard s'elabora un model matemàtic per a poder estudiar el comportament de l'aerogenerador en diferents situacions, el més fidel possible a la realitat.

És important el disseny d'un sistema de control per a poder representar el model de la forma més realista possible, tenint en compte les limitacions físiques de l'aerogenerador.

A continuació es simula aquest model utilitzant l'eina Simulink, i s'analitzen els resultats.

Per últim, aquest treball conté al principi una introducció teòrica on s'expliquen els orígens de l'energia eòlica, així com els seus principis físics necessaris per a construir el model.

2. Energia eòlica

2.1. Orígens energia eòlica

L'ésser humà porta aprofitant l'energia que proporciona el vent per al seu benefici. Des dels primers vaixells que van incorporar veles, com alguns vaixells sumeris que daten de l'any 3500aC, fins als molins de vent, que van arribar més tard, i que tindrien el seu origen a Sistan, Afganistan durant el segle VII. No es té constància de molins de vent a Europa fins a principis del segle XII. A partir d'allà es va generalitzar el seu ús, ja que per exemple als Països Baixos s'empraven per a bombar aigua.



Fig. 2.1. Molí de vent del segle XII
(Catarinella, M., 2009)

El seu ús va decreïxer durant la revolució industrial, amb l'arribada de la màquina de vapor. Tot i així al segle XIX els molins de vent van arribar a Amèrica. En aquella època els Estats Units estaven vivint un procés d'expansió, en part potenciat per la implantació del ferrocarril. Això feia molt necessari el transport d'aigua, i per a bombejar-la es va utilitzar el molí de vent americà.



Fig. 2.2. Molí de vent americà del segle XIX
(Strummer, S., 2012)

Durant aquella època també es va dur a terme la construcció del que es considera el primer aerogenerador per a generar electricitat per part de Charles F. Brush. Tot i ser un gran avenç en aquella època, l'aerogenerador només tenia una potència de 12kW, un valor molt inferior comparat amb els actuals.

Tot i la seva existència l'energia eòlica no era utilitzada a gran escala. No va ser fins a finals del segle passat quan la crisi del petroli va obligar a mirar altres vies d'obtenir energia. Els Estats Units i Canadà prenen la decisió d'impulsar la recerca en el camp de l'energia eòlica, amb el *U.S. Federal Wind Energy Program* (Hau, E., 2006, p.45). A Europa, països com Dinamarca, Suècia i la República Federal Alemanya comencen a traçar plans propis per desenvolupar l'energia eòlica entre el 1974 i el 1975. Aquest desenvolupament va portar a Dinamarca a ser el país europeu més avançat en l'ús d'energia eòlica, amb un parc eòlic de 200MW als anys 90.

Avui en dia les perspectives de creixement de l'energia eòlica es basen, sobretot a Europa, en la progressió de les plataformes *offshore*, que permeten millorar l'aprofitament energètic. El creixement de la lluita contra el canvi climàtic, tan present en la actualitat, suposa un impuls important per a l'energia eòlica i altres fonts energètiques renovables.

2.1.1. L'energia eòlica a Catalunya

Catalunya va ser pionera en el desenvolupament de l'energia eòlica a Espanya. El 1984 es va inaugurar al Baix Empordà el primer aerogenerador de Catalunya, un del quatre primers a l'Estat espanyol. Va ser el primer model que es va comercialitzar. Era un aerogenerador de tres pales amb dotze metres de diàmetre de rotor i una potència nominal de 15 kW. Aquell mateix any es va inaugurar el primer parc eòlic de l'Estat, a l'Alt Empordà (Mitjà, A., 198-).

Actualment, després d'un període on es va investigar més a fons l'energia nuclear i es van deixar de banda les energies renovables, Catalunya torna a apostar per l'energia eòlica. Tot i no haver estrenat cap parc eòlic des del 2012, Catalunya té com a objectiu tornar a ser una de les principals productores d'energia en aquest sector dins de l'Estat espanyol.

2.2. El vent: principis teòrics

Per a calcular la potència que pot proporcionar el vent utilitzem el següent raonament:

L'energia cinètica d'una massa d'aire m movent-se a una velocitat v és la següent:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Aleshores, considerant que la potència és l'energia partit el temps, obtenim que:

$$P = \frac{1}{2} \frac{m}{\tau} v^2 \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Per últim, sabem que el flux d'aire que passa per una secció S és el producte de la seva densitat per la secció i per la velocitat del fluid, i al mateix temps és igual a la massa que passa per l'àrea partit el temps. És a dir:

$$\dot{m} = \frac{m}{\tau} = \rho S v \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Substituïm aquesta última equació i obtenim una nova expressió de la potència

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Observem que la potència proporcionada pel vent és directament proporcional al cub de la seva velocitat.

Representem gràficament aquesta equació obtinguda, suposant que el fluid és aire a pressió atmosfèrica ($\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$) i que la secció és un quadrat d'1m de costat ($S = 1 \text{ m}^2$).

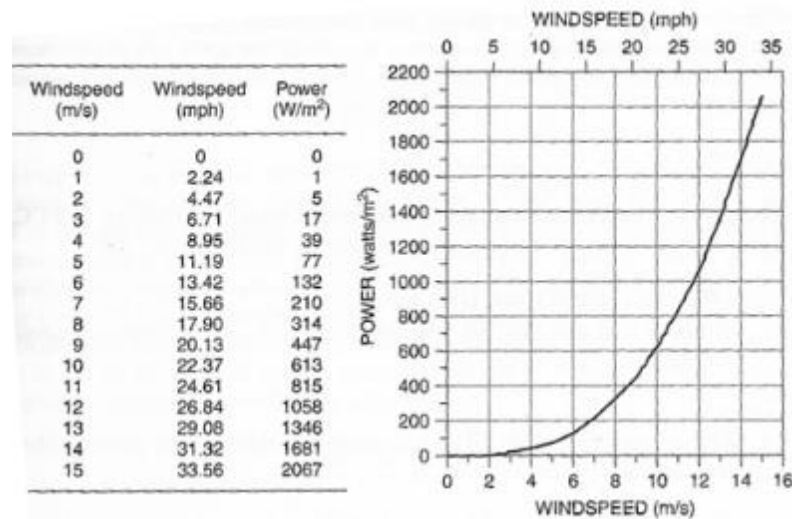


Fig. 2.3. Gràfic pressió-velocitat del vent
(Masters, Gilbert M., 2004, p.313)

Com s'ha vist, el factor de la velocitat influeix molt en la potència final obtinguda.

2.3. Aerogenerador

Els aerogeneradors es poden classificar segons l'eix a partir del qual giren les seves aspes. D'aquesta manera diferenciem entre:

- Aerogenerador d'eix vertical: el seu principal avantatge és el fet de no necessitar un control amb un anemòmetre per a orientar les aspes de cara al vent. Tot i així, presenta nombrosos inconvenients que fan que el seu ús sigui menor que el dels aerogeneradors d'eix horitzontal. Per exemple, les seves aspes estan a menys altura que en els aerogeneradors d'eix horitzontal, fet que provoca que hagin de fer front vents de menor velocitat i major turbulència. El resultat d'això és un pitjor rendiment i una major càrrega per a les aspes.
- Aerogenerador d'eix horitzontal: és el model més utilitzat globalment. Dins d'aquests aerogeneradors es pot diferenciar entre dos tipus més:

- Sobrevent: el seu principal inconvenient és la necessitat d'un control de la guinyada per a tenir l'aerogenerador constantment orientat de cara al vent. El seu funcionament, però, és millor i menys turbulent que el de l'aerogenerador a sotavent.
- Sotavent: no necessita un control de guinyada, ja que el vent l'orienta per si sol. Tot i així, en el moment que l'aspa passa per darrera de la torre aquesta tapa una mica el cabal d'aire que arriba a l'aspa durant un breu període de temps. Aquesta irregularitat provoca unes tensions que acurten la vida útil de les aspes, així com soroll i una eficiència menor.

Les parts d'un aerogenerador d'eix horitzontal a sobrevent són:

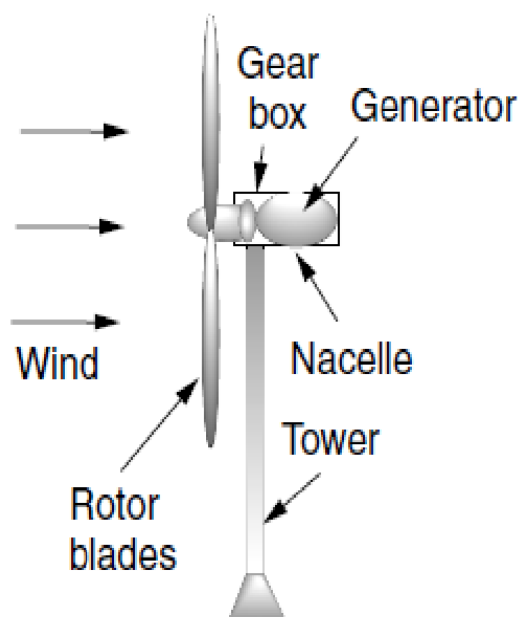


Fig. 2.4. Parts d'un aerogenerador
(Anaya-Lara, O., O Tande, J., Uhlen, K., Merz, K., 2018, p.310)

- Aspes: transmeten la potència del vent.
- Gòndola(nacelle): carcassa que protegeix les parts fonamentals de l'aerogenerador.
- Generador elèctric: transforma l'energia mecànica en elèctrica.
- Controlador electrònic: monitoritza les condicions del vent i controla el mecanisme d'orientació. Situat dins de la gòndola.
- Torre: Dona suport a l'estructura. La seva alçada influeix la qualitat del vent.

2.3.1. Torre

En el cas de la torre, la seva alçada és el factor que determina la velocitat de l'aire que arriba a les aspes. La velocitat segueix l'equació següent:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \frac{\ln(H/z)}{\ln(H_0/z)} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

on v és la velocitat de l'aire a una alçada H , v_0 és la velocitat a l'alçada de referència H_0 ,

que sol ser de 10m, i on z és el la longitud de la rugositat. Aquest factor depèn de la superfície sobre la que es trobi l'aerogenerador. A la superfície la rugositat és més alta, sobretot a les zones amb boscos i muntanyes. En el cas d'un aerogenerador offshore la rugositat és menor, ja que el mar ofereix menys resistència. El valor numèric d'aquest factor ve mostrat a la següent taula:

Roughness Class	Description	Roughness Length $z(m)$
0	Water surface	0.0002
1	Open areas with a few windbreaks	0.03
2	Farm land with some windbreaks more than 1 km apart	0.1
3	Urban districts and farm land with many windbreaks	0.4
4	Dense urban or forest	1.6

Fig. 2.5. Taula factor de rugositat en diferents superfícies
(Masters, Gilbert M., 2004, p.320)

Una aproximació d'aquesta equació és la següent:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (\text{Eq. 2.6})$$

on α és el coeficient de fregament. El seu valor depèn també de la superfície, i el seu valor també està tabulat:

Terrain Characteristics	Friction Coefficient α
Smooth hard ground, calm water	0.10
Tall grass on level ground	0.15
High crops, hedges and shrubs	0.20
Wooded countryside, many trees	0.25
Small town with trees and shrubs	0.30
Large city with tall buildings	0.40

Fig. 2.6. Taula coeficient de fregament en diferents superfícies (Masters, Gilbert M., 2004, p.320)

Aquesta equació permet una representació gràfica més senzilla, que serveix per veure la influència de la superfície en la velocitat de l'aire. Aquests gràfics a continuació representen la potència i la velocitat del vent en funció de l'alçada per a tres diferents casos: aigua($\alpha = 0.1$), petits arbres i vegetació($\alpha = 0.2$) i un poble amb vegetació($\alpha = 0.3$):

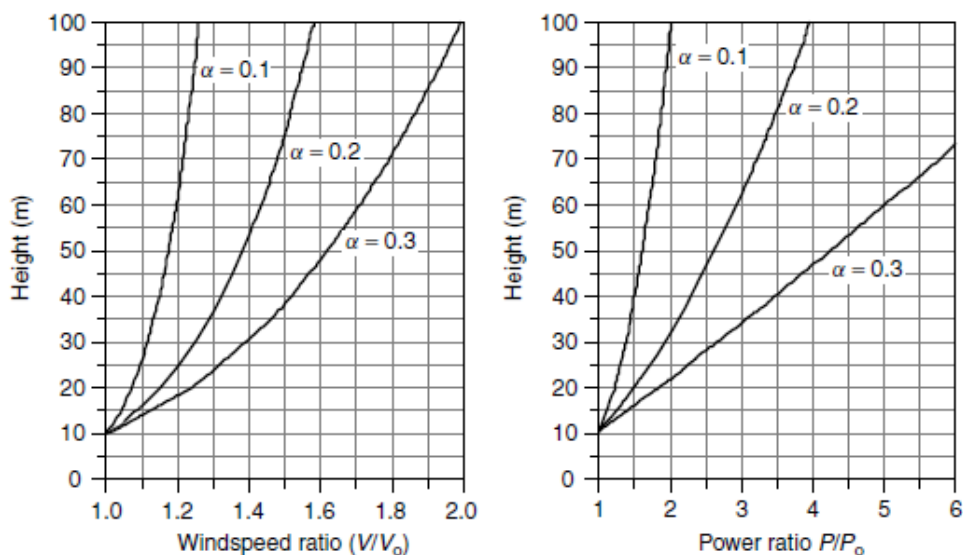


Fig. 2.7. Potència i velocitat del vent en funció de l'alçada de la torre (Masters, Gilbert M., 2004, p.321)

Clarament la velocitat obtinguda amb un aerogenerador offshore és més alta, i per tant la potència també.

2.3.2. Rotor

En el cas del rotor, per a millorar la seva eficiència hem de tenir en compte el principi de Betz. Seguint aquest principi, la turbina extreu part de l'energia cinètica del vent que passa a través d'ella. Això fa que es formi un tub d'aire quan aquest surt de la turbina, com es veu a la figura.

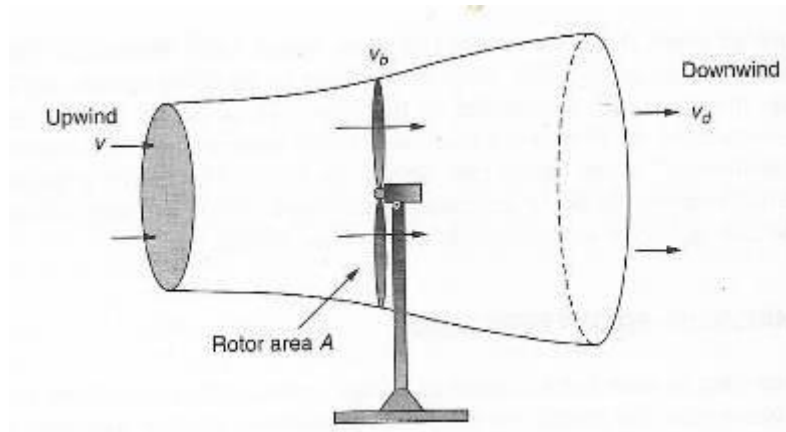


Fig. 2.8. Variació flux d'aire al passar per una turbina
(Masters, Gilbert M., 2004, p.324)

Es pot veure com la velocitat del flux de l'aire varia. A sobrevent és v , a l'arribar a les aspes es redueix i pren el valor v_b , i un cop s'expandeix torna a canviar i passa a ser v_d .

El flux d'aire que circula és constant i val \dot{m} .

Les aspes no poden extreure tota l'energia cinètica de l'aire, ja que això voldria dir que aquest passa a tenir una velocitat zero. Això faria que s'aturés al passar la turbina i evités el flux de més aire a través d'ella. D'altra banda, v_d no pot tenir el mateix valor que v , ja que això voldria dir que l'energia extreta per les aspes seria nul·la. Per tant, per a trobar la relació òptima entre v i v_d maximitzem la potència que genera el flux. Aquest es calcula a partir de la diferència d'energia cinètica a l'entrada i a la sortida, que es pot representar així:

$$P_{aspes} = \frac{1}{2} \dot{m} (v^2 - v_d^2) \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Per a obtenir el valor del flux \dot{m} utilitzem la secció coneguda de les aspes del rotor, que en la figura 4.9 veiem que pren el valor d' A .

$$\dot{m} = \rho A v_b \quad (\text{Eq. 2.8})$$

El valor de v_b és desconegut, però una aproximació que es pot utilitzar és el de la mitjana entre els valors de sortida i entrada, deixant l'equació de la potència de la següent manera:

$$P_{aspes} = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v+v_d}{2} \right) (v^2 - v_d^2) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Per a simplificar els càlculs creem la variable λ , que relaciona la velocitat de sortida amb la d'entrada.

$$\lambda = \frac{v_d}{v} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

De nou, substituïm aquesta nova variable dins de l'equació de la potència, i obtenim el següent:

$$P_{aspes} = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v+\lambda v}{2} \right) (v^2 - (\lambda v)^2) \quad (\text{Eq. 2.11})$$

Que es pot reescriure de la següent forma:

$$P_{aspes} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot \left[\frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \right] \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Amb aquesta expressió es pot observar que la potència a les aspes és proporcional a la generada pel vent $P = \frac{1}{2} \rho S v^3$. Per tant, la part restant de l'equació és la que realment extreuen les aspes del rotor, també conegut com la seva eficiència, també escrita com C_p . És per tant el valor que s'haurà de maximitzar.

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Per a fer-ho es deriva l'eficiència en funció del factor λ i s'igualava el resultat a 0. D'aquesta forma es troba quina és la relació de velocitats òptima.

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = \frac{1}{2} [(1 + \lambda)(-2\lambda) + (1 - \lambda^2)] = 0 \quad (\text{Eq. 2.14})$$

$$\frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - 3\lambda) = 0 \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Aquesta equació pren dos valors. El valor negatiu no té sentit, ja que vol dir que l'aire hauria de sortir en la direcció contrària a la que entra. De forma que el resultat obtingut

és el de $\lambda_{m\grave{a}x} = \frac{1}{3}$. Això vol dir que la potència generada a les aspes serà màxima si la velocitat de sortida és un terç de la d'entrada.

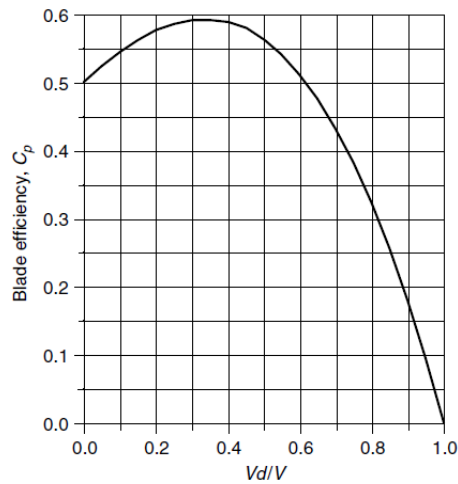


Fig. 2.9. Eficiència en funció de la relació velocitat sortida/entrada
(Masters, Gilbert M., 2004, p.326)

Per a veure quina és l'eficiència màxima que el rotor pot assolir substituïm el valor $\lambda_{m\grave{a}x}$ dins l'equació de C_p . El valor obtingut és **0.593**, és a dir l'eficiència màxima és del **59.3%**.

La velocitat de sortida del vent depèn de diferents factors, com l'orientació de les pales o la longitud d'aquestes. És per això que el coeficient de potència C_p es pot expressar també en funció de l'angle de pitch i del coeficient *Tip-Speed-Ratio*.

L'angle de pitch (β) és l'angle que formen les pales respecte el seu eix longitudinal.

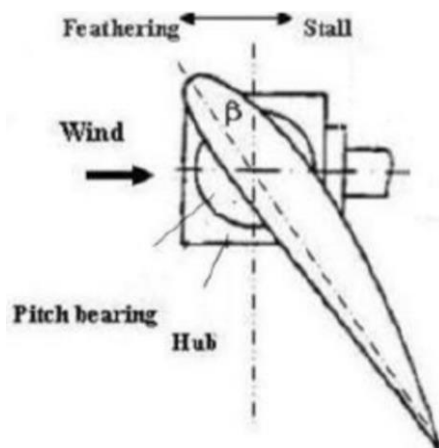


Fig. 2.10. Angle de pitch
(Maalawi, K., 2011, p.16)

El coeficient TSR (*Tip-Speed-Ratio*), que representa el quocient entre la velocitat de la punta d'una de les aspes i la velocitat del vent.

$$TSR = \frac{\text{Velocitat punta del rotor}}{\text{Velocitat vent}} = \frac{w_{\text{rotor}} \cdot r}{v} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

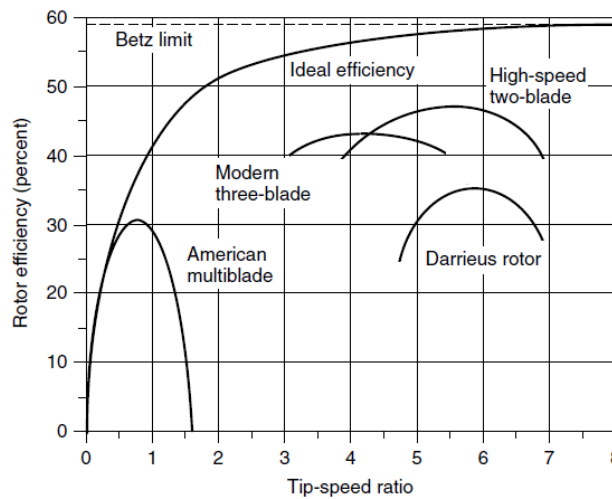


Fig. 2.11. Eficiència en funció de la TSR en diferents aerogeneradors (Masters, Gilbert M., 2004, p.327)

El C_p s'expressa en funció de β i del TSR de la següent manera:

$$C_p(\beta, TSR) = c_1(c_2\Lambda - c_3\theta_p - c_4\beta^{c_5} - c_6)e^{-c_7\Lambda} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

$$\Lambda = \frac{1}{TSR + c_8\beta} - \frac{c_9}{1 + \beta} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

La velocitat a la que gira el rotor d'un aerogenerador afecta en gran mesura a la seva eficiència. Un gir massa lent la redueix, degut a que el flux d'aire afectat per les turbines és molt menor. En canvi, un gir massa ràpid genera turbulències, i aquestes també fan que la seva eficiència sigui més baixa.

És important que el rotor pugui tenir una velocitat variable per així poder millorar la seva

eficiència. Actualment els aerogeneradors funcionen quan el seu TSR té un valor entre 4 i 6. En una situació amb vent variable les aspes haurien de poder rotar a diferents velocitats per a mantenir el C_p del rotor. Aquest gràfic permet veure la relació entre la velocitat del vent i l'eficiència del rotor per a tres velocitats diferents.

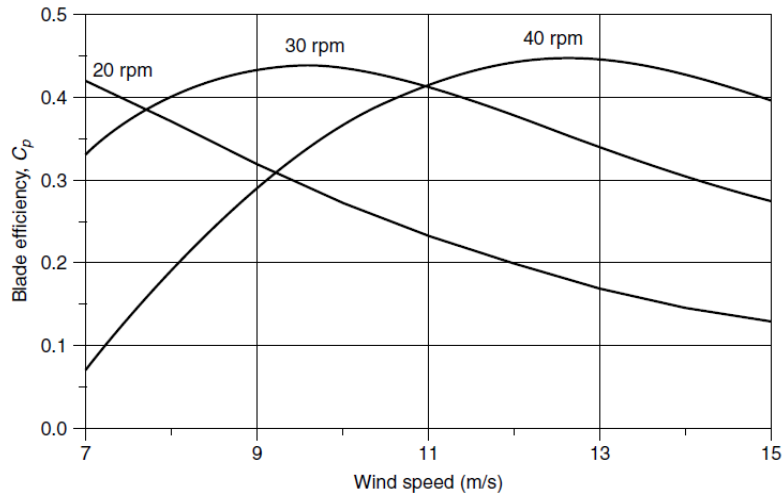


Fig. 2.11. Eficiència en funció de la velocitat del vent per diferents velocitats de gir del rotor (Masters, Gilbert M., 2004, p.335)

També es pot veure en aquest gràfic com varia la potència generada segons la velocitat del vent depenent de la velocitat amb la que gira el rotor.

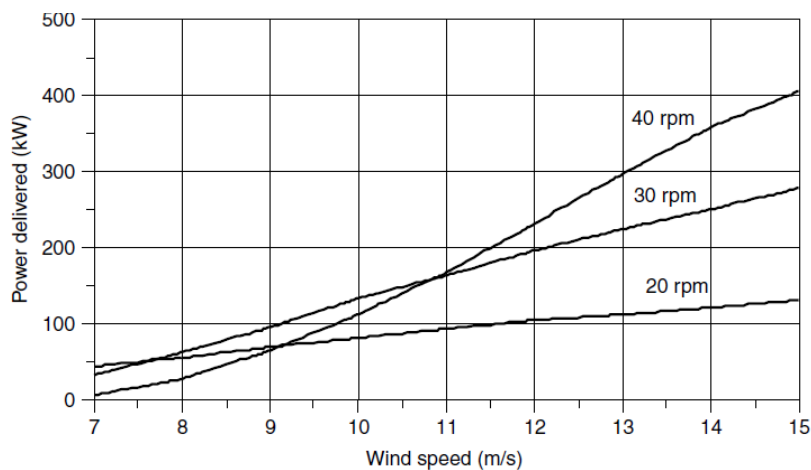


Fig. 2.13. Potència en funció de la velocitat del vent per diferents velocitats de gir del rotor (Masters, Gilbert M., 2004, p.336)

2.3.3. Aspes

El moviment de les aspes del rotor amb el vent té com a base el principi de Bernoulli.

En el cas d'una sola aspa, aquesta està dissenyada de forma que l'aire té molta més distància per recórrer a la part superior de l'aspa que a l'inferior. Com el flux és constant, la velocitat a la part de dalt és molt superior, cosa que genera una depressió. Això provoca l'aixecament de l'aspa, també anomenat *lift*. També es genera un arrossegament anomenat *drag*.

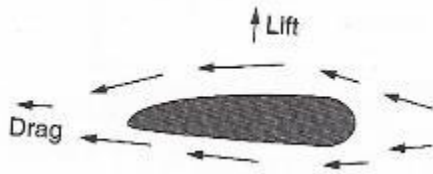


Fig. 2.12. Línies de corrent de l'aire al passar per un aspa
(Masters, Gilbert M., 2004, p.354)

El cas d'una turbina amb més d'una aspa és més complex, ja que no només influeix l'aire provocat pel vent, si no el que es genera amb el moviment propi de l'aspa al girar. La suma d'aquests dos fluxos d'aire és la que circula pel perfil de l'aspa, amb una inclinació suficient per a provocar el *lift* que permeti continuar girar al rotor.

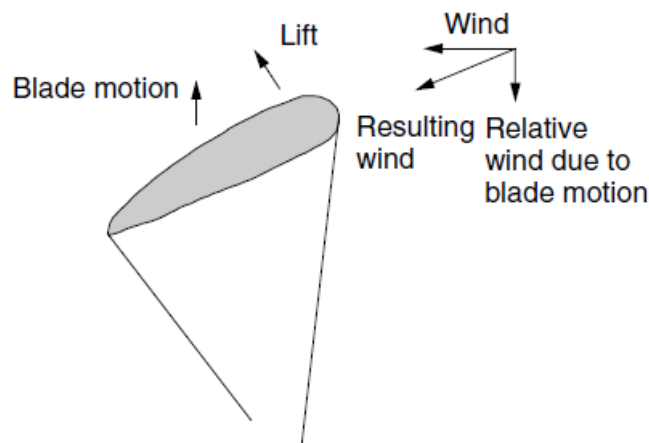


Fig. 2.13. Descomposició de les direccions del vent en una turbina amb més d'una aspa
(Masters, Gilbert M., 2004, p.354)

La inclinació que té l'aspa respecte al vent s'anomena angle d'atac. L'augment de l'angle d'atac provoca un augment del *lift*, però al mateix temps genera un major *drag*, fins al punt que es provoca un despreniment de l'aire a la superfície del perfil. Aquest

despreniment genera unes turbulències que resulten negatives per al funcionament del rotor.

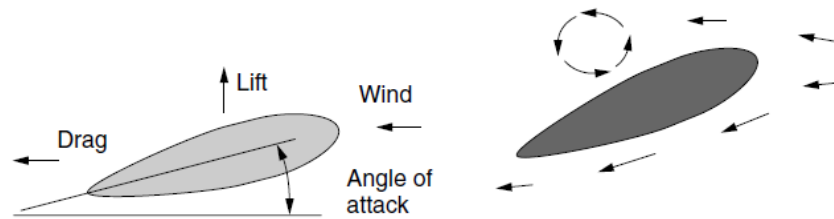


Fig. 2.14. Aspa amb un angle d'atac > 0
(Masters, Gilbert M., 2004, p.355)

Un aspecte molt important dels aerogeneradors és la seva corba de potència. Aquesta mostra la relació entre la velocitat del vent i la potència elèctrica del generador. La corba ideal de potència d'un aerogenerador té la forma següent, amb tres parts diferenciades:

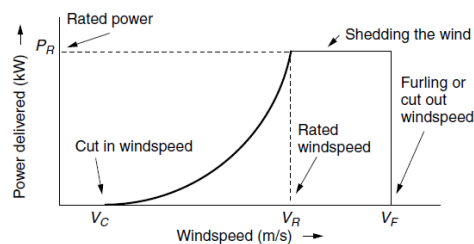


Fig. 2.15. Corba de potència d'un aerogenerador
(Masters, Gilbert M., 2004, p.355)

Velocitat d'arrencada (V_c): és la velocitat mínima requerida per a que el generador proporcioni potència. De no arribar a V_c , la força del vent no pot superar la fricció amb les aspes o no serà capaç de posar el generador en marxa. Si es produeix això l'energia del vent no es perdrà.

Velocitat nominal (V_R): quan la velocitat del vent és la nominal, la potència del generador és la nominal (P_R). Un cop es supera V_R , però, s'ha de deixar escapar part de la potència per a no fer malbé el generador. Hi ha tres maneres de fer-ho:

- Controlador freqüencial: el generador està controlat per un sistema electrònic que, al detectar un excés de velocitat, activa un sistema hidràulic que fa rotar lleugerament les aspes. D'aquesta manera es redueix el seu angle d'atac i per tant la seva eficiència.
- Bloqueig del rotor: en condicions superiors a la nominal s'atura la rotació i no es mou cap peça, aquesta forma de control s'anomena control passiu. En aquest cas el disseny aerodinàmic de les aspes ha de ser tal que a mesura que augmenta la velocitat del vent també ho faci el *lift* de l'aspa. En alguns casos el control pot ser actiu, per exemple per a aerogeneradors de gran mida. En aquest cas per a reduir la velocitat de les aspes s'augmenta el seu angle d'atac, provocant el despreniment de la capa d'aire abans.
- Combinació control freqüencial i bloqueig rotor.

Velocitat de frenada (V_F): a partir d'aquesta velocitat es necessari aturar la màquina per a prevenir accidents. Hi ha diverses maneres de fer-ho. Als aerogeneradors amb controlador freqüencial es fa girar les aspes al voltant del seu eix longitudinal per a provocar fregament. Als aerogeneradors amb bloqueig de rotor les puntes de les aspes es pleguen i es col·loquen en posició perpendicular al vent. Un cop s'ha pogut aturar el rotor, s'activa un fre que el bloqueja. Aquest fre s'activa també a l'hora de fer manteniment de l'aerogenerador.

Hi ha dues maneres d'optimitzar l'aerogenerador:

- Augmentar el diàmetre del rotor sense canviar el generador: D'aquesta manera s'assoleix la potència nominal a velocitats més baixes.

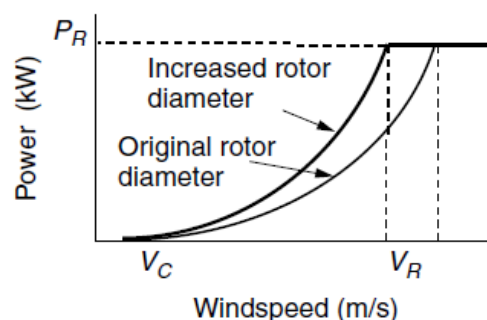


Fig. 2.16. Corba de potència optimitzada per augment del rotor
(Masters, Gilbert M., 2004, p.357)

- Mantenir el rotor però adquirir un generador amb més potència: la velocitat nominal és la mateixa, però el valor de la potència nominal és més gran.

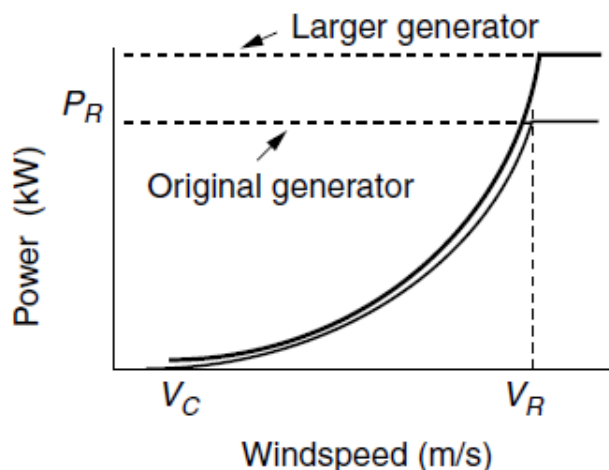


Fig. 2.17. Corba de potència optimitzada per millora del generador
(Masters, Gilbert M., 2004, p.357)

2.3.4. Generador elèctric

Aquesta màquina elèctrica és l'encarregada de generar l'energia. Depenent del tipus de turbina que s'utilitza i de les necessitats que s'hagin de cobrir es fa ús de diferents tipus de generadors.

2.3.4.1. Turbina de velocitat fixa

Com el seu nom indica, aquesta turbina gira a una velocitat constant, independentment de la velocitat del vent. Això provoca que el seu TSR (Equació 4.17) variï en funció del vent, i per tant el rendiment nominal només s'assoleix amb una velocitat del vent determinada.

En aquest cas s'utilitza un generador d'inducció trifàsic de gàbia, també anomenat *squirrel-cage*, amb una caixa de canvis. Aquest es connecta a la xarxa a través d'un transformador.

L'energia reactiva produïda durant el funcionament es compensa amb una bateria de condensadors. També té un sistema d'arrencada suau per a reduir els grans corrents que es generen durant l'arrencada. Quan la velocitat del vent és superior a la desitjada,

es limita la potència generada mitjançant el mètode de *natural aerodynamic stall*, o bé mitjançant el *pitching*, que consisteix en variar l'angle de regulació de la pala. Aquesta tècnica s'explicarà més endavant.

Aquest tipus de turbines són senzilles de construir, robustes, segures i tenen un baix cost inicial. El seu inconvenient principal és la seva baixa eficiència en zones amb vent variable.

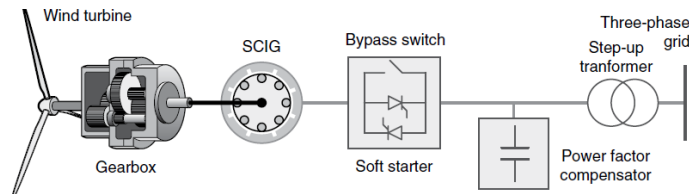


Fig. 2.18. Esquema turbina velocitat fixa
(Anaya-Lara, O Tande, Uhlen, Merz, 2018, p.18)

2.3.4.2. Turbina amb lliscament variable

Aquest tipus de turbines utilitzen un generador d'inducció, *wound rotor induction generator*, amb una bobina al rotor, i un resistor variable connectat en sèrie al rotor. Aquest resistor està controlat per un sistema electrònic de potència, i s'activa quan la velocitat del vent és superior a la nominal. Un cop activat aquest resistor permet controlar la velocitat de lliscament de l'aire, amb un marge de fins el 10%. D'aquesta forma el funcionament d'aquest tipus de turbina és similar al d'una turbina de velocitat variable. Com en el cas anterior, aquest generador està acompanyat d'una caixa de canvis, d'un sistema d'arrencada suau i una bateria de condensadors que funcionen com a compensadors de càrrega reactiva.

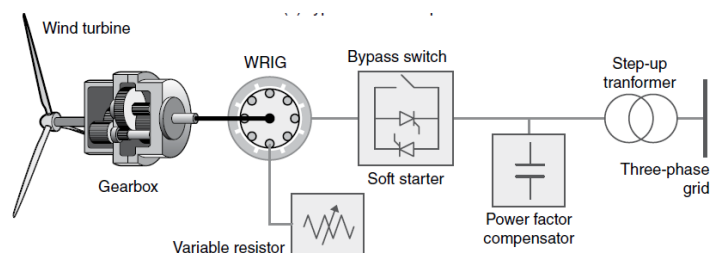


Fig. 2.19. Esquema turbina velocitat variable
(Anaya-Lara, O Tande, Uhlen, Merz, 2018, p.18)

2.3.4.3. Turbina de velocitat variable amb convertidor parcial

En aquest tipus de turbines s'utilitza una configuració DFIG, és a dir, *Doubly Feed Induction Generator*. Aquesta configuració consisteix en connectar l'estator del generador a través d'un transformador i el rotor a través d'un convertidor de potència. Aquest sistema permet controlar la potència de sortida del generador amb un convertidor sobre el 30% de la potència nominal del generador.

Permet també treballar amb un rang ampli de velocitats, per tant el generador està acompanyat d'una caixa de canvis. En aquest cas, però, el sistema d'arrencada suau i la bateria de condensadors no són necessaris. Es protegeix el sistema limitant els voltatges amb un circuit crowbar.

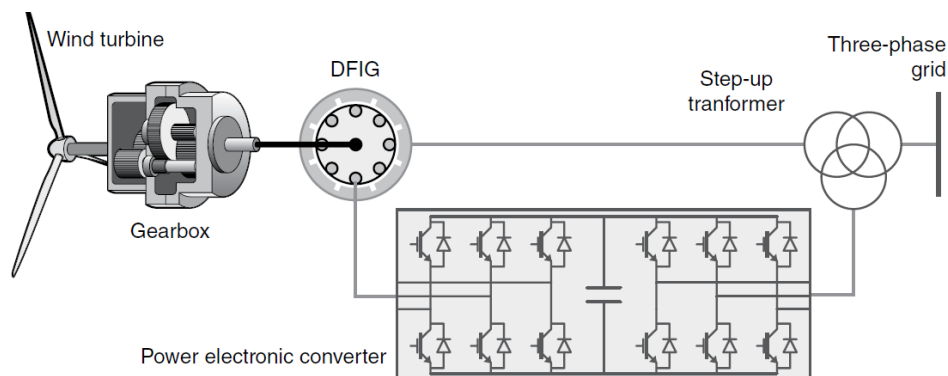


Fig. 2.20. Esquema turbina velocitat variable amb convertidor parcial
(Anaya-Lara, O Tande, Uhlen, Merz, 2018, p.19)

2.3.4.4. Turbina de velocitat variable amb convertidor en plena potència

Aquesta tipus de turbina pot treballar amb o sense caixa de canvis, i permet la utilització de diferents generadors elèctrics, ja siguin l'asíncron, el síncron convencional o el síncron d'imants permanents. Gràcies a que el convertidor funciona en plena potència, la freqüència del generador pot variar degut a un canvi en la velocitat del vent mentre la freqüència de la xarxa es manté constant. El convertidor proporciona també la compensació de potència reactiva, per tant no es necessita una bateria de condensadors.

Amb la utilització de la màquina elèctrica d'imant permanent es permeten eliminar la caixa de canvis i els anells lliscants, ja que no es requereix una alimentació al rotor. Això fa aquests tipus de màquines ideals en els aerogeneradors offshore, ja que redueixen el pes i el volum de l'aerogenerador.

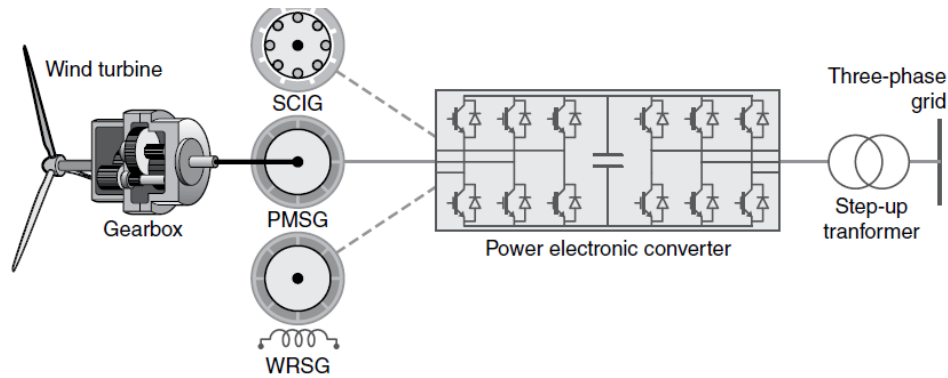


Fig. 2.21. Esquema turbina velocitat variable amb convertidor en plena potència (Anaya-Lara, O Tande, Uhlen, Merz, 2018, p.20)

En aquesta figura apareixen tres possibles màquines elèctriques: SCIG (*Squirrel-Cage Induction Generator*), PMSG (*Permanent-Magnet Synchronous Generator*) i WRSG (*Wound-Rotor Synchronous Generator*).

2.3.5. Convertidor

El convertidor és un circuit format per dispositius semiconductors i que pot incloure condensadors, bobines i transformadors. La seva funció és facilitar l'intercanvi d'energia entre dos o més subsistemes, que sovint treballen a diferents nivells de voltatge, corrent, o freqüència.

Els convertidors es poden classificar segons el tipus de circuits que enllacen:

- Convertidor DC/AC: connecta un subsistema DC i un AC.
- Convertidor DC/DC: enllaça dos subsistemes DC.
- Convertidor AC/AC: connecta dos subsistemes AC.

Els convertidors DC/AC, també anomenats rectificadors, poden ser bidireccionals, és a dir, poden funcionar com convertidors AC/DC, o convertidors. (Yazdani, Iravani, 2010, p.1-2)

Des del final de la dècada del 80 aquests dispositius han pres més importància. Els motius d'aquest fet són:

- Avançaments en l'àmbit de la microelectrònica que han permès realitzar procés de senyals més sofisticades.

- Desenvolupament dels dispositius semiconductors que treballen en sistemes d'elevada potència.
- Canvis en les dinàmiques en el sector elèctric per poder satisfer l'alta demanda.
- Augment de la demanda energètica, que ha portat a un desenvolupament en el camp de l'energia elèctrica.
- La incorporació de l'energia renovable, degut al canvi climàtic. Aquestes fonts d'energia renovable es connecten a la xarxa elèctrica mitjançant convertidors.

2.3.5.1. Convertidor DC/AC

Els convertidors DC/AC es poden classificar en:

- Convertidor de font de corrent (*Current-sourced converter, CSC*): En aquest convertidor es manté la polaritat del corrent en el bus de contínua. D'aquesta manera, la polaritat del flux de potència es determina per la polaritat del voltatge en el bus de contínua. El bus de contínua es connecta en sèrie amb una inductància relativament gran que manté el corrent constant, i que es pot assimilar a una font de corrent.
- Convertidor de font de tensió (*Voltage-sourced converter, VSC*): En aquest convertidor es manté la polaritat del voltatge en el bus de contínua. D'aquesta manera, la polaritat del flux de potència es determina per la polaritat del corrent en el bus de contínua. El bus de contínua es connecta en paral·lel amb un condensador relativament gran, que es pot assimilar a una font de tensió .

El VSC s'utilitza més que el CSC en l'àmbit de sistemes de potència, ja que el CSC requereix la utilització d'interruptors electrònics bipolars, una tecnologia que encara no està molt desenvolupada. Per tant, l'aerogenerador que s'estudiarà utilitzarà un convertidor de font de tensió.

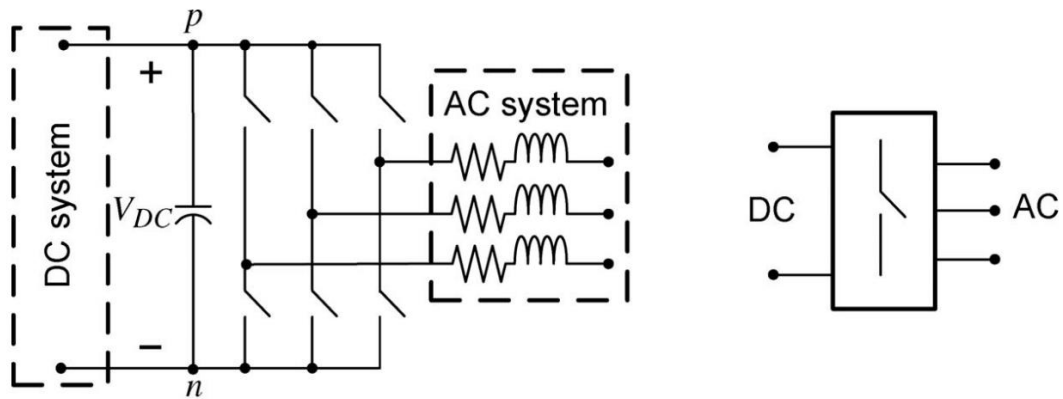


Fig. 2.22. Esquema d'un convertidor de font de corrent trifàsic
(Yazdani, Iravani, 2010, p.11)

Els sistemes VSC es poden classificar segons la seva freqüència en:

- Freqüència controlada per la xarxa (*Grid-Imposed Frequency VSC System*): aquests sistemes estan connectats a un gran sistema AC, com la xarxa elèctrica. La freqüència del sistema la dicta la xarxa i es manté gairebé constant.
- Freqüència controlada (*Controlled-Frequency VSC System*): la freqüència del sistema AC està regulada pel convertidor.
- Freqüència variable (*Variable-Frequency VSC System*): el sistema està connectat a una màquina, i la seva freqüència depèn del punt de treball on es trobi aquesta.

Els sistemes VSC solen ser compostos, és a dir, estan formats per més d'un dels tres tipus de sistemes explicats. En el cas d'un aerogenerador de velocitat variable, el seu sistema està format per una combinació d'un sistema de freqüència variable i per un sistema de freqüència controlada per xarxa. (Yazdani, Iravani, 2010, p.125-126).

Aquests dos sistemes VSC són DC/AC. Per a aconseguir un convertidor AC/AC es connecten els dos sistemes DC/AC pel costat de contínua. Aquesta configuració es coneix com back-to-back.

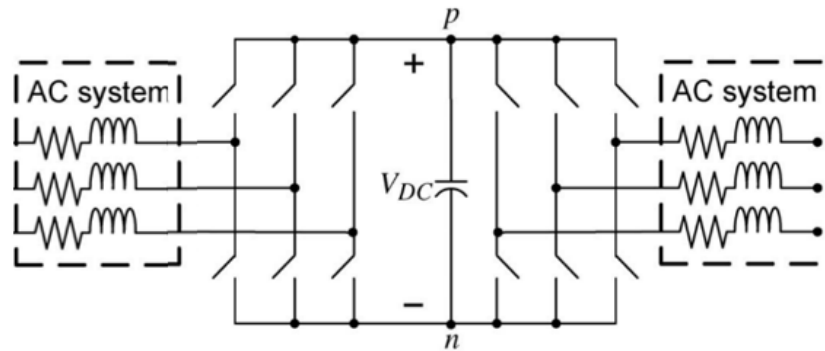


Fig. 2.23. Esquema connexió back-to-back entre dos convertidors VSC

2.4. Estructures de suport aerogeneradors offshore

Com ja s'ha comentat abans, l'energia eòlica offshore suposa una millora davant l'energia eòlica tradicional. Degut a la qualitat del vent al mar, el rendiment d'aquests aerogeneradors és superior als situats als parcs eòlics al camp. Tot i així, apareixen nous problemes que no es tenien amb els models terrestres. Un d'ells és el de la fixació de l'aerogenerador. Actualment existeixen diferents solucions que garanteixen l'estabilitat de l'estructura i el bon funcionament treballant dins d'un medi inestable com és l'aigua.

2.4.1. Estructures de suport de base fixa

Aquests sistemes de suport s'utilitzen sobretot en aigües de poca profunditat, i es caracteritzen per tenir un alt grau de fixació al fons del mar. L'estabilitat del sistema està directament relacionada entre la interacció entre la terra i la base. Aquest tipus de suports es poden classificar segons els mètodes de fixació.

2.4.1.1. Estructures de pilons

Estan formades majoritàriament d'acer, i la seva instal·lació requereix foradar la terra amb martells hidràulics o foradar la roca del fons marí. Depenent del nombre de pilons utilitzats a la base es diferencien diferents tipus d'estructures:

- *Monopile*: la seva estructura consta d'un sol piló. Aquesta és l'estructura de suport més comú, degut a la seva simplicitat. Les característiques del piló, diàmetre, longitud i gruix, depenen de les condicions de l'entorn: la profunditat de l'aigua, la rigidesa del terra i les condicions meteorològiques de la zona. A l'hora

de dissenyar el piló s'han de considerar també possibles moviments i rotacions al nivell del terra, fatiga (especialment entre 5 i 20 metres sota terra) i fortes onades.

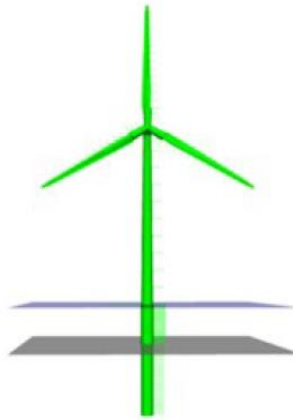


Fig. 2.24. Estructura de suport *monopile*
(Anaya-Lara, O., O Tande, J., Uhlen, K., Merz, K., 2018, p.105)

- *Jacket structure*: Els seu nom prové de la similitud del disseny amb una jaqueta, ja que la base està formada per uns pilons units per un entramat d'acer, com si fossin les mànigues. Aquesta estructura té una millor eficiència geomètrica que la del *monopile* i permeten un millor flux de les onades, protegint més la base davant la fallida. Un altre aspecte a considerar durant el disseny és el possible desgast en la unió entre els pilons i l'entramat. Aquest tipus d'estructura pot tenir diferents dissenys.

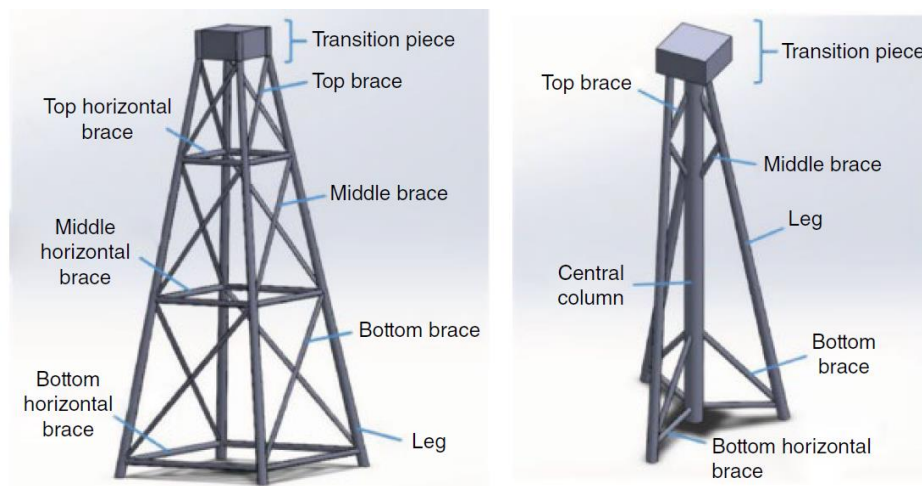


Fig. 2.25. Estructura de suport *jacket structure*
(Anaya-Lara, O., O Tande, J., Uhlen, K., Merz, K., 2018, p.106)

- *Tripod* i *quadpod*: Aquestes estructures són una combinació dels dos tipus anteriors. Com el seu nom indica, l'estructura *tripod* està formada per tres pilons i l'estructura *quadpod* per quatre. A diferència de la *jacket structure*, aquests pilons convergeixen en una torre central, simplificant el seu disseny.

2.4.1.2. Suction buckets

Aquest suport es presenta com una alternativa a la perforació del terra amb pilons. La fixació s'obté bombejant aigua d'un recinte en forma de cubell situat a la base. D'aquesta forma, la diferència de pressió atreu la base al fons marí. Aquesta solució s'utilitza sobretot en l'extracció de petroli i gas del fons marí. En el cas dels aerogeneradors, es necessita un recinte més gran, i és per això que aquesta tecnologia no està gairebé en ús.

2.4.1.3. Gravity-based structures (GBS)

Aquests suports basen l'equilibri del sistema en el seu pes. La base, que sol ser ampla i gran, es carrega amb llast, i es connecta a un eix que connecta amb l'aerogenerador ja sobre l'aigua. Aquesta alternativa també neix intentant evitar el foradament del fons marí. Algunes consideracions que s'han de tenir a l'hora de dissenyar aquests suports són l'estabilitat geotècnica, ja que s'ha de preparar el fons marí on se situarà la base, i la reducció de costos.

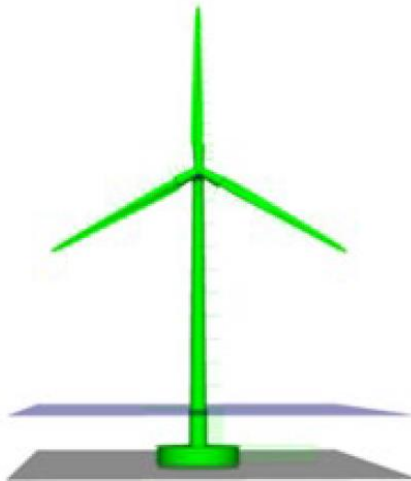


Fig. 2.26. Estructura de suport GBS
(Anaya-Lara, O., O Tande, J., Uhlen, K., Merz, K., 2018, p.105)

2.4.2. Estructures de suport flotants

A diferència dels sistemes de suport anterior, aquestes estructures estan pensades per a aigües més profundes, on la fixació de la base al terra no és una solució viable. Hi ha molts tipus de plataformes, però es poden classificar segons el mètode que s'utilitza per estabilitzar-les.

2.4.2.1. *Buoyancy Stabilized Platforms*

Aquestes plataformes són semi-submergibles. Estan formades per columnes que tenen la major part sota de l'aigua i que es connecten entre si donant forma a l'estructura. Alguns criteris que es tenen en compte durant el disseny són la distància entre les columnes, la porció que sobresurt, i la distribució del llast. També es té en compte el nombre de columnes utilitzades i la seva geometria, rectangular o cilíndrica.

La posició de l'aerogenerador sobre l'estructura també pot variar. Pot estar col·locat sobre una de les columnes com a la figura 2.29, o bé es pot construir una plataforma central com a la figura 2.30.

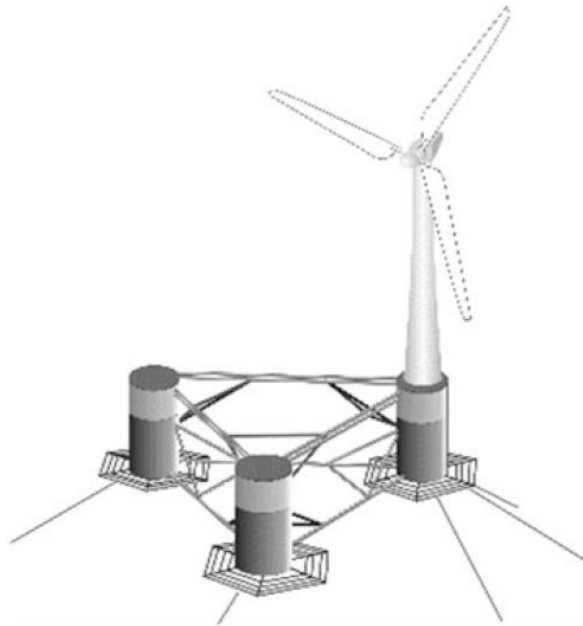


Fig. 2.27. Estructura de suport semi-submergible en forma V
(Uzunoglu, E., Karmakar, D., Guedes Soares, C., 2016, p.58)

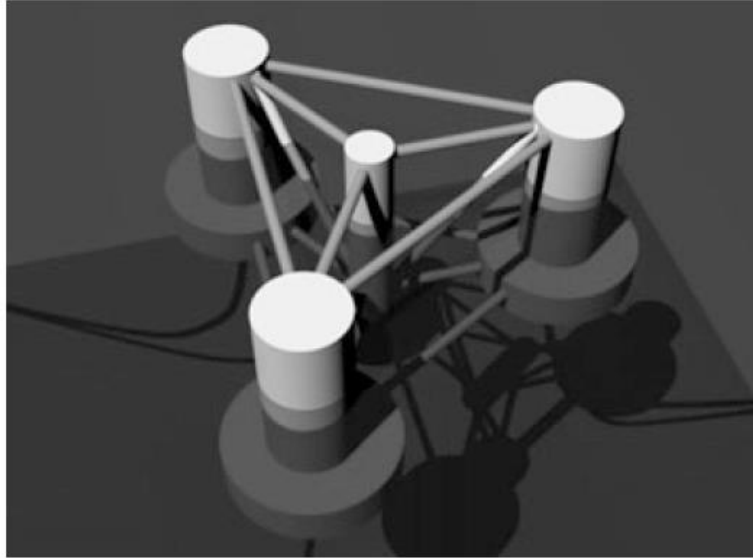


Fig. 2.28. Estructura de suport semi-submergible centrada
(Uzunoglu, E., Karmakar, D., Guedes Soares, C., 2016, p.59)

2.4.2.2. Mooring Stabilized Platforms

A diferència de les plataformes semi-submergibles, aquestes estructures es mantenen estables gràcies a l'arranjament al terra mitjançant cables en tensió. Aquests limiten el moviment de la plataforma gràcies a la seva alta rigidesa.

El disseny d'aquest tipus d'estructures consisteix en una columna central, sobre la qual es posicionarà l'aerogenerador, d'on surten els cables que proporcionaran l'estabilitat. El nombre de cables pot variar, encara que se sol trobar entre tres i quatre.

La rigidesa dels cables és imprescindible per a garantir que l'estructura floti. La fixació dels cables al terra es duu a terme amb mecanismes com pilons, àncores o *suction buckets*. En aquest sentit aquestes plataformes s'assimilen a les estructures de base fixa.

El seu principal desavantatge és la seva complexitat de disseny. Un mal acoblament entre la plataforma i el sistema d'arranjament pot comportar una pèrdua de la plataforma, ja que aquesta s'enfonsaria.



Fig. 2.29. Estructura de suport amb arranjament
(Anaya-Lara, O., O Tande, J., Uhlen, K., Merz, K., 2018, p.108)

2.4.2.3. Plataformes estabilitzades amb llast

Dins d'aquest grup, l'estructura més utilitzada és la SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*). El seu disseny és el d'una boia amb una forma cilíndrica, allargada i prima, amb una alta quantitat de llast situada a l'extrem inferior. Això proporciona estabilitat a la boia. Per a garantir que no es mogui també s'utilitza un sistema de cables que la connecten al fons marí.

Un dels inconvenients que pot tenir aquesta estructura és l'augment considerable de preu a mesura que augmenta la profunditat de les aigües on s'utilitza. També s'han de considerar els corrents marítims, ja que aquestes plataformes tenen un gran percentatge de la seva estructura sota l'aigua.



Fig. 2.30. Estructura de suport SPAR
(Anaya-Lara, O., O Tande, J., Uhlen, K., Merz, K., 2018, p.108)

3. Modelització

En aquest apartat es realitzarà l'explicació del model matemàtic que defineix les dues parts més importants de l'estudi d'aquest treball, el generador elèctric i el convertidor.

3.1.1. Modelització del generador elèctric

Com s'ha explicat anteriorment, la màquina elèctrica més adient per a un generador offshore és la màquina síncrona d'ímants permanents, *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), ja que al no necessitar una caixa de transmissió per fer variar la velocitat de rotació de la turbina permet obtenir un aerogenerador més lleuger. Això és possible gràcies al gran nombre de parells pols que solen tenir aquest tipus de generadors, cosa que els permet treballar a velocitats baixes. Aquest generador tampoc consta d'anells lliscants al rotor, i d'aquesta forma es redueixen els costos per manteniment del sistema.

La modelització del generador en aquest treball es basa en el model de Junyent, A. (2011).

Les equacions de voltatge a l'estator estan definides per l'equació

$$v_s^{abc} = r_s i_s + \frac{d}{dt} \phi_s^{abc} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

v_a, v_b i v_c representen les tensions de fase, i_a, i_b i i_c els corrents cada fase, i ϕ representa el flux magnètic a l'estator. La variació del flux és la força electromotriu que es genera pel corrent induït.

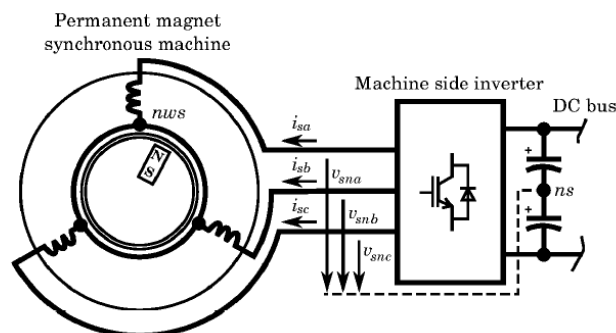


Fig. 3.1. Esquema PMSG
(Junyent, A., 2011, p.42)

L'equació que defineix el flux per a cada fase és la següent:

$$\phi_s^{abc} = i_s^{abc} (L_1 + L_2(\theta_r)) + \phi_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

3.2)

On ϕ_m és el flux causat per l'imant, i L_1 i $L_2(\theta_r)$ són les matrius d'inductància amb els coeficients d'inductància entre les diferents fases.

$$L_1 = \begin{bmatrix} L_s + L_A & -\frac{1}{2}L_A & -\frac{1}{2}L_A \\ -\frac{1}{2}L_A & L_s + L_A & \frac{1}{2}L_A \\ -\frac{1}{2}L_A & \frac{1}{2}L_A & L_s + L_A \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$L_2(\theta_r) = -L_B \begin{bmatrix} \cos 2(\theta_r) & \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & \cos 2(\theta_r) \\ \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & \cos 2(\theta_r) & \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

L_A és un terme d'inductància constant i L_B és un terme d'inductància que depèn de l'orientació del rotor. En el cas d'una màquina d'imants permanents amb disposició superficial el valor d'aquesta inductància es pot menysprear.

Per a simplificar les equacions es treballa amb la referència qd, que s'obté mitjançant la transformada de Park (A.2).

Les equacions de voltatge queden aleshores de la següent manera:

$$V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt}$$

$$V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

V, I i ϕ són, respectivament, voltatge, intensitat i flux dels components d i q. R_s és la resistència. Substituint les equacions del flux dins de les equacions de voltatge obtenim

$$V_s^{qd} = \begin{bmatrix} R_s & w_r \cdot (L + \frac{3}{2}(L_A + L_B)) \\ -w_r \cdot (L + \frac{3}{2}(L_A + L_B)) & R_s \end{bmatrix} i_s^{qd} + \begin{bmatrix} L + \frac{3}{2}(L_A + L_B) & 0 \\ 0 & L + \frac{3}{2}(L_A + L_B) \end{bmatrix} \cdot \frac{d i_s^{qd}}{dt} + \phi_m \cdot w_r \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

$$V_s^0 = R_s i_s^0 + L \frac{d i_s^0}{dt} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Per últim es defineixen els paràmetres L_q i L_d :

$$L_q = L + \frac{3}{2}(L_A - L_B)$$

$$L_d = L + \frac{3}{2}(L_A + L_B) \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Menyspreant L_B veiem que són iguals. Per tant les equacions de voltatge resultants són les següents:

$$V_s^{qd} = \begin{bmatrix} R_s & w_r \cdot L \\ -w_r \cdot L & R_s \end{bmatrix} i_s^{qd} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \cdot \frac{d i_s^{qd}}{dt} + \phi_m \cdot w_r \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Per obtenir la potència, utilitzem l'equació:

$$P_{gen} = \frac{3}{2} (v_{sq} i_{sq} + v_{sd} i_{sd}) \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Amb els valors de l'equació de voltatge substituïts pren la següent forma:

$$P_{gen} = \frac{3}{2} \phi_m w_r i_{sq} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

I el parell s'obté dividint la potència per la velocitat de rotació de la turbina,

$$w_t = \frac{w_r}{p}$$

$$\Gamma_{gen} = \frac{3}{2} P \phi_m i_{sq} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

3.1.2. Modelització del convertidor

En aquest treball s'estudia i es modelitza un convertidor trifàsic VSC de dos nivells. Està format per tres branques amb dos interruptors IGBT (*Isolated Gate Bipolar Transistors*) cadascuna. Cada branca està connectada en el seu punt mig amb la xarxa mitjançant una inductància. Modulant els interruptors IGBT s'aconsegueix generar els voltatges desitjats a la banda AC, controlant així el flux de potència activa i reactiva

El model seguit en aquest apartat és el d'Egea, Junyent, i Gomis (2012).

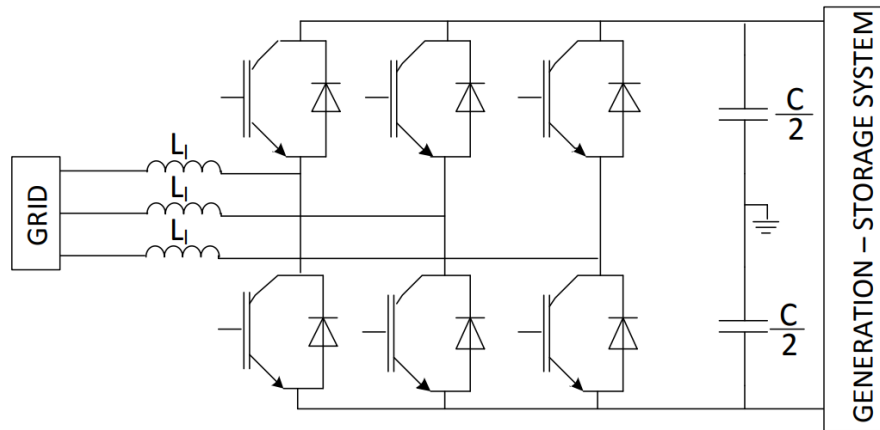


Fig. 3.31. Convertidor de font de corrent trifàsic VSC de dos nivells connectat a la xarxa (Egea, Junyent, Gomis 2012, p.51)

Per a simplificar el model de cara a facilitar el procés de control, el desacoblen les parts DC i AC del convertidor i s'estudien per separat. La part DC es modelitza com una font de corrent i un condensador, i la part AC es modelitza amb fonts de tensió alterna a cada branca.

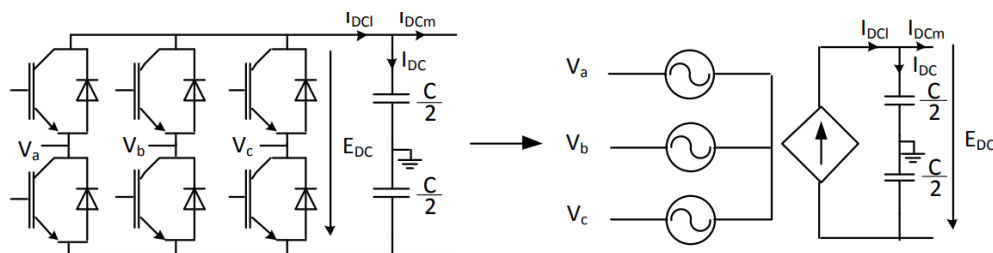


Fig. 3.32. Esquema del model del convertidor VSC i esquema simplificat (Egea, Junyent, Gomis 2012, p.57)

La font de corrent de la banda de contínua indica la potència activa intercanviada entre les bandes d'alterna i contínua i assegura el balanç de potència entre les dues bandes. El valor de la intensitat de la font es pot calcular com

$$I_{DCi} = \frac{P_{ac}}{E_{DC}} \tag{Eq. 3.13}$$

on P_{ac} és la potència activa intercanviada entre el converidor i la xarxa a la banda

d'alterna i E_{DC} és la tensió del bus de contínua.

Per a trobar les equacions de voltatge s'utilitza la banda AC . Com s'ha explicat abans, aquesta banda està connectada a la xarxa mitjançant unes bobines. L'esquema següent permet veure més clarament el circuit:

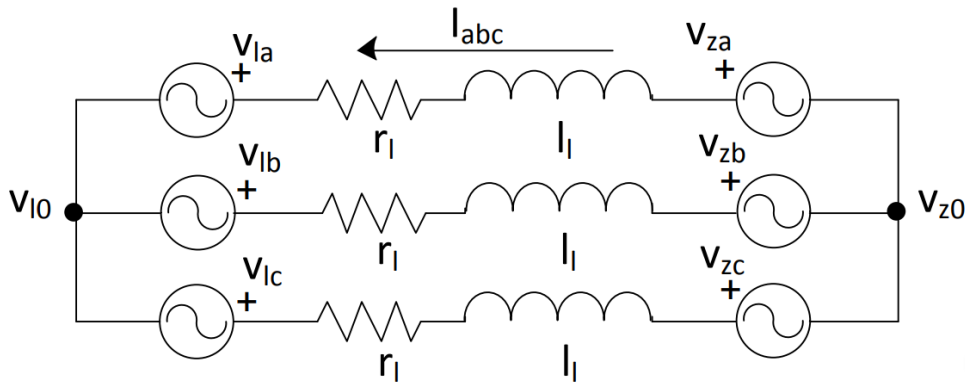


Fig. 3.4. Esquema del costat AC del convertidor VSC
(Egea, Junyent, Gomis 2012, p.58)

A partir d'aquest circuit es troba l'equació del voltatge

$$\begin{bmatrix} v_{za} \\ v_{zb} \\ v_{zc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{la} \\ v_{lb} \\ v_{lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_l & 0 & 0 \\ 0 & R_l & 0 \\ 0 & 0 & R_l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_l & 0 & 0 \\ 0 & L_l & 0 \\ 0 & 0 & L_l \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

on per a cada branca v_z es correspon a la tensió en el costat de la xarxa, v_l és la tensió en el costat de convertidor, entre els quals circula una intensitat i , R_l és la resistència equivalent de la inductància i L_l és el valor de la inductància.

Mitjançant la transformació de Park s'obté una versió simplificada del model

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ v_{zd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_l & -L_l \omega_e \\ L_l \omega_e & R_l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_l & 0 \\ 0 & L_l \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

en la base qd, i on ω_e és la velocitat angular de la xarxa elèctrica.

4. Control

En aquest capítol s'expliquen els mecanismes de control utilitzats al convertidor i a l'angle de pitch de les pales de la turbina, és a dir, a l'orientació de les pales respecte la direcció del vent.

El sistema de control de convertidor està destinat a controlar el corrent que hi circula. S'estudien els dos costats del convertidor, el costat de la màquina elèctrica i el costat de la xarxa. Els components que el formen el sistema de control són el PLL, el regulador de voltatge, el laç de corrent i el control de potència òptima.

En el cas de l'angle de pitch, el seu control està orientat al funcionament de l'aerogenerador per sobre de les velocitats de vent nominals.

4.1. Control del convertidor

El convertidor del treball és del tipus *back-to-back*, és a dir, està format per dos convertidors AC/DC connectats per la banda de contínua. El convertidor aleshores es pot dividir en dos blocs: el convertidor al costat de la xarxa i el convertidor al costat del generador. Aquests s'estudiaran per separat i després es faran les simulacions amb el sistema complet, que té el següent esquema

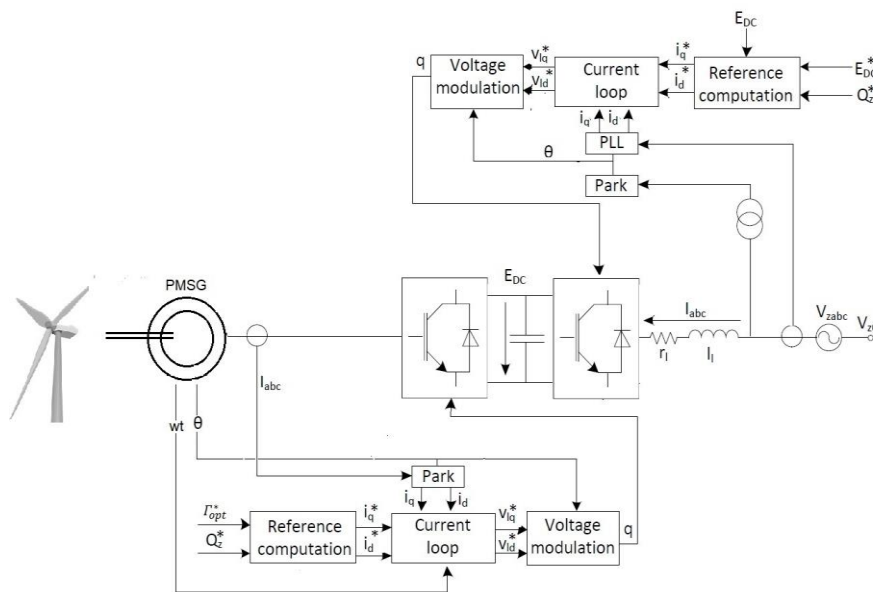


Fig. 4.1. Esquema complet control del convertidor

4.1.1. Banda xarxa

El sistema VSC permet controlar per separat la potència activa i la reactiva, degut a que treballa en la referència qd . La potència reactiva de referència s'obté a partir de la xarxa, mentre que en els sistemes d'energia renovable, com és el cas en aquest treball, la potència activa depèn de la font que es connecta a la banda de contínua del convertidor. Es regula el voltatge del bus de contínua per a mantenir el balanç de potència, i que la potència injectada per la xarxa sigui la mateixa que es genera.

L'esquema consta d'un sistema de control en cascada de dos nivells, on el nivell inferior regula el corrent altern, i el nivell inferior controla el voltatge a la banda DC.

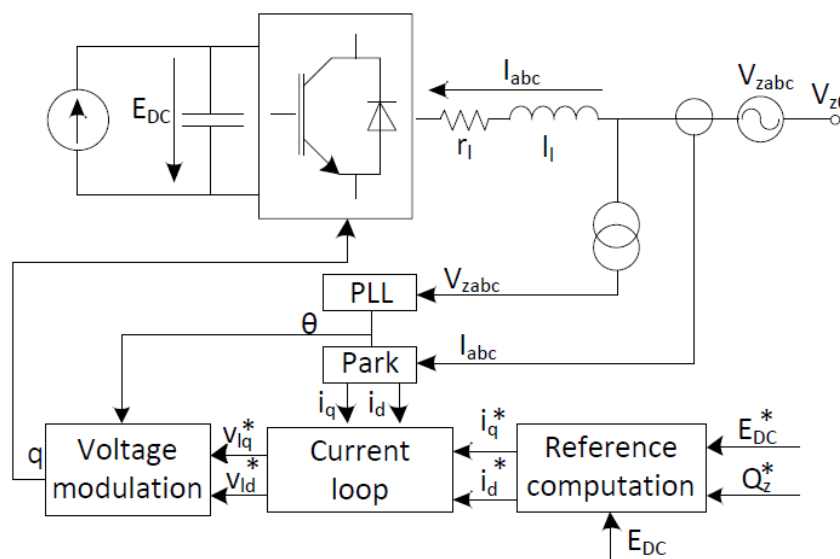


Fig. 4.2. Esquema control del convertidor banda xarxa
(Egea, Junyent, Gomis, 2012, p.60)

4.1.2. Banda màquina elèctrica

En aquesta banda també es controlen les dues potències per separat. La potència reactiva s'obté controlant la velocitat de rotació de la turbina de l'aerogenerador, i obtenint el parell òptim, com s'explica més endavant. Per a la potència activa la seva regulació depèn, com a la banda xarxa, de la font que es connecta a la banda de contínua del convertidor. També es manté la condició de balanç de potència activa entre el costat DC i el costat AC.

L'esquema està format per la turbina, connectada al generador, i aquest connectat al

convertidor.

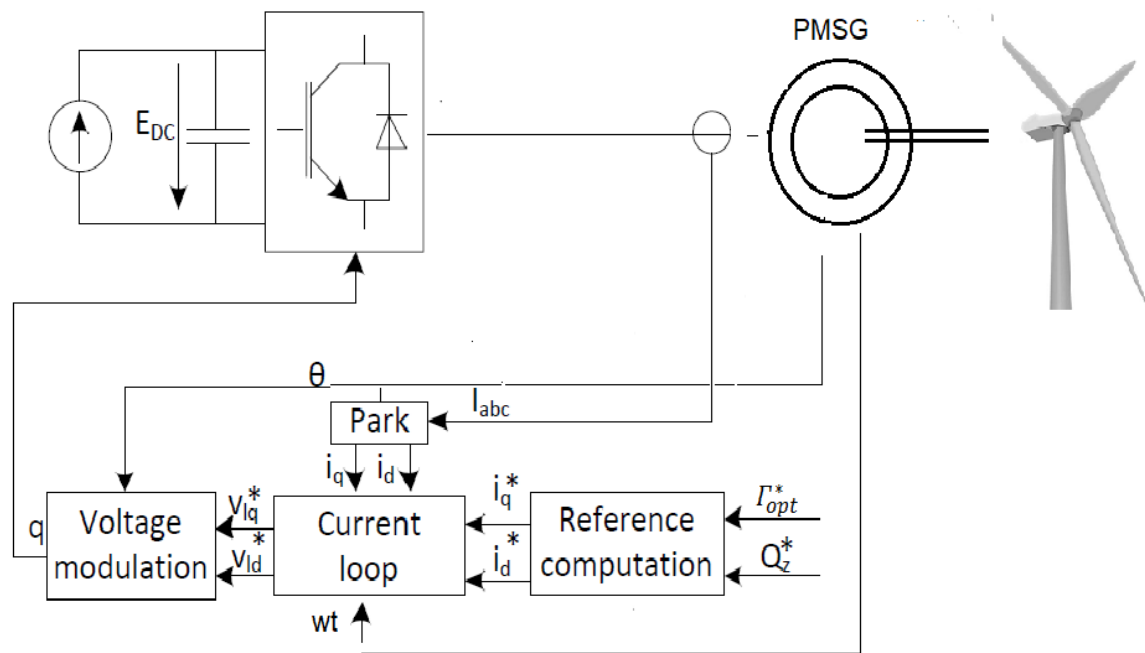


Fig. 4.33. Esquema control del convertidor banda generador

4.1.3. Phase Locked Loop (PLL)

Es treballa a la referència qd tenint en compte l'angle de la xarxa elèctrica. Per seguir la variació d'aquest angle s'utilitza el subsistema *Phase Locked Loop* (PLL).

Aquest subsistema consisteix en una realimentació de la component d del voltatge. Per a fer això es necessita tenir la matriu de la Transformació de Park (A.2) al llaç de realimentació. Al llaç de control, aquesta senyal es filtra amb un controlador PI.

D'aquesta forma s'obté la velocitat angular de la xarxa ω_e . Aquesta s'integra, obtenint

així l'angle ϕ_e .

L'esquema té la forma següent

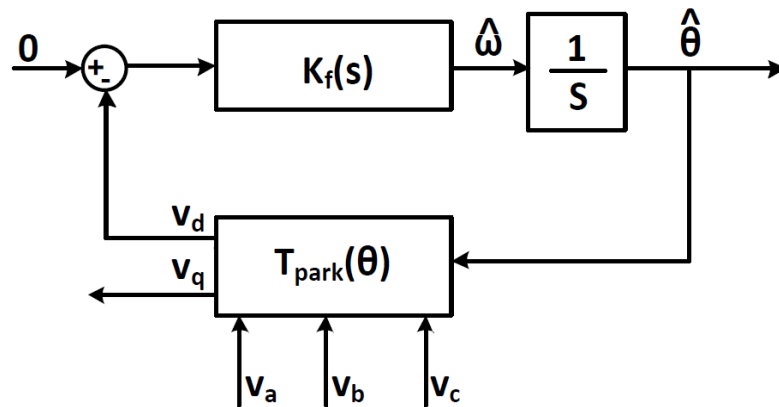


Fig. 4.4. Esquema sistema PLL
(Egea, Junyent, Gomis, 2012, p.65)

Assumint que l'error d'angle és petit, es pot modelitzar el sistema amb l'equació

$$\frac{\hat{\theta}_s}{\theta_s} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

sent $\hat{\theta}_s$ l'angle desitjat i θ_s l'angle real. El controlador es pot definir com

$$K_f(s) = K_p \left(\frac{\tau + s}{s} \right) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

on τ és la constant de temps.

Per trobar els valors de K_p i τ s'utilitzen les expressions del coeficient d'esmoreïment ξ i

de la velocitat angular elèctrica ω_n .

$$\xi = \frac{\sqrt{\tau K_p V_m}}{2} \tag{Eq. 4.3}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p V_m}{\tau}} \tag{Eq. 4.4}$$

i on V_m és el voltatge màxim admissible. L'estat transitori del sistema té la següent forma

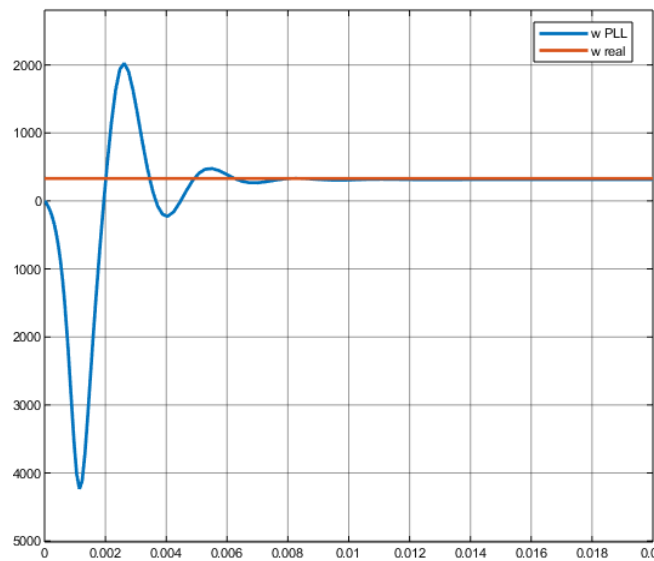


Fig. 4.5. Estat transitori PLL

4.1.4. Intensitats i potències de referència

Les potències activa i reactiva es poden relacionar amb les intensitats i_d i i_q com

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

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

(Eq. 4.5)

Per tant, si parlem de les potències i intensitats de referència aquestes equacions s'escriuen com

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

$$Q^* = \frac{3}{2} (v_{zq} i_d^* - v_{zd} i_q^*)$$
(Eq. 4.6)

Amb el sistema PLL es pot garantir que els valors d del voltatge seran sempre 0. Per tant les equacions anteriors queden reduïdes a

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

$$i_d^* = \frac{2 Q^*}{3 v_{zq}}$$
(Eq. 4.7)

S'ha de limitar el corrent de referència tenint en compte les limitacions físiques dels convertidors. Per a fer això es poden seguir tres criteris diferents en funció de les prioritats que es tenen:

- Prioritzar la potència activa, per tant i_q .
- Prioritzar la potència reactiva, per tant i_d .
- Mantenir l'angle entre P i Q constant.

A la banda de la màquina elèctrica, es controla el corrent i_q a partir del parell òptim, explicat més endavant. L'objectiu a l'hora de controlar el parell òptim és obtenir la màxima potència generada per l'aerogenerador. A partir d'aquí la intensitat s'obté amb l'equació 3.16, vista a l'apartat de modelització del generador.

4.1.5. Regulador voltatge DC

La seva funció és controlar el voltatge del bus de contínua mantenint el balanç entre la potència generada i la que s'injecta a la xarxa. La sortida del controlador de corrent donarà el valor i_q^* de referència per al llaç de corrent.

Com s'ha explicat abans, el bus de contínua està connectat en paral·lel a un condensador que funciona com a font de tensió.

L'esquema d'aquest subsistema no consta de realimentació, és de tipus *feed-forward*, per millorar la velocitat de resposta d'aquest.

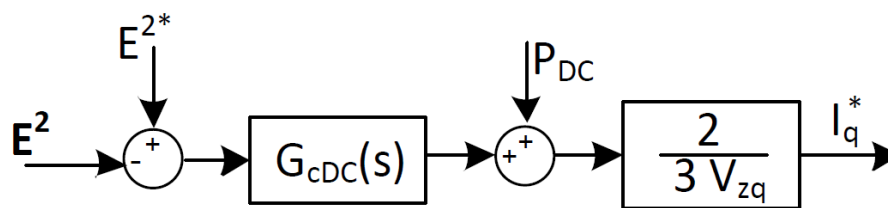


Fig. 4.6. Esquema sistema regulador de tensió
(Egea, Junyent, Gomis, 2012, p.61)

En aquest sistema, E^2 representa l'energia emmagatzemada al condensador. La sortida del controlador G_{cDC} és la potència activa que s'injecta al condensador. A aquesta potència se li afegeix P_{DC} , la potència mesurada abans del condensador. Un cop es té la potència de referència es fa el canvi vist anteriorment i s'obté i_q^* . El controlador G_{cDC} pot ser de tipus P o PI. En aquest treball es tria utilitzar el segon perquè és més estable. La seva equació, llavors, és la següent

$$G_{cDC} = K_{pDC} + \frac{K_{iDC}}{s} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

La funció de transferència del controlador és

$$\frac{W_s}{W_s^*} = \frac{sK_{pDC} + K_{iDC}}{\frac{1}{2}s^2C + sK_{pDC} + K_{iDC}} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Aquesta pot ser escrita també com

$$\frac{W_s}{W_s^*} = \frac{2\xi_E\omega_E s + \omega_E^2}{s^2 + 2\xi_E\omega_E s + \omega_E^2} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

on ξ_E és l'esmoreïment desitjat del llaç de voltatge i ω_E és la velocitat angular desitjada per

aquest subsistema. Amb aquestes dues equacions podem extreure que les constants del controlador es poden representar com

$$K_{pDC} = C\xi_E\omega_E$$

$$K_{iDC} = \frac{C\omega_E^2}{2} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

4.1.6. Llaç de corrent

Recordem l'equació vista anteriorment (Eq. 3.19) i considerant que v_{zd} és 0, com s'ha comprovat amb el subsistema PLL, queda més simplificada:

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_l & -L_l\omega_E \\ L_l\omega_E & R_l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_l & 0 \\ 0 & L_l \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

es veu que hi ha un acoblament entre les components q i d de les variables de tensió i corrent. Per a desacoblar-les s'usa el següent canvi de variable

$$\begin{bmatrix} v_{iq} \\ v_{id} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\widehat{v}_{iq} + v_{zq} - L_l W_{ei_d} \\ -\widehat{v}_{id} + L_l W_{ei_d} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

on \widehat{v}_{iq} i \widehat{v}_{id} són les sortides del controlador de corrent. Amb aquest canvi de variable l'equació de voltatge pren la següent forma

$$\begin{bmatrix} \widehat{v}_{iq} \\ \widehat{v}_{id} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_l & 0 \\ 0 & R_l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_l & 0 \\ 0 & L_l \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Aleshores s'aplica la transformada de Laplace, i s'obtenen les següents equacions, que relacionen els voltatges i corrents

$$\frac{i_q(s)}{\widehat{v}_{iq}(s)} = \frac{1}{L_l s + R_l}$$

$$\frac{i_d(s)}{\widehat{v}_{id}(s)} = \frac{1}{L_l s + R_l} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

D'aquesta forma s'obtenen les dues funcions de transferència de

$G_{c_{iq}}(s)$ i $G_{c_{id}}(s)$. Aquests controladors són de tipus PI, per tant tenen la forma

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

i les constants es poden definir com

$$K_p = \frac{L_l}{\tau}$$

$$K_i = \frac{R_l}{\tau}$$

(Eq. 4.17)

on τ és una constant a triar, tenint en compte les limitacions del convertidor. L'esquema del llaç de corrent és el següent

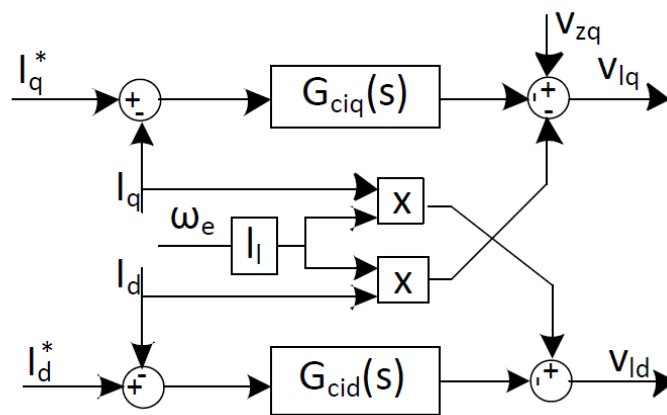


Fig. 4.7. Esquema llaç de control de corrent
(Egea, Junyent, Gomis, 2012, p.64)

Per observar la resposta del llaç de corrent, analitzem la branca d'una intensitat, per exemple i_q . Mirem la resposta del sistema en llaç tancat i amb el controlador G_{ciq} i veiem que respon com un sistema de primer ordre.

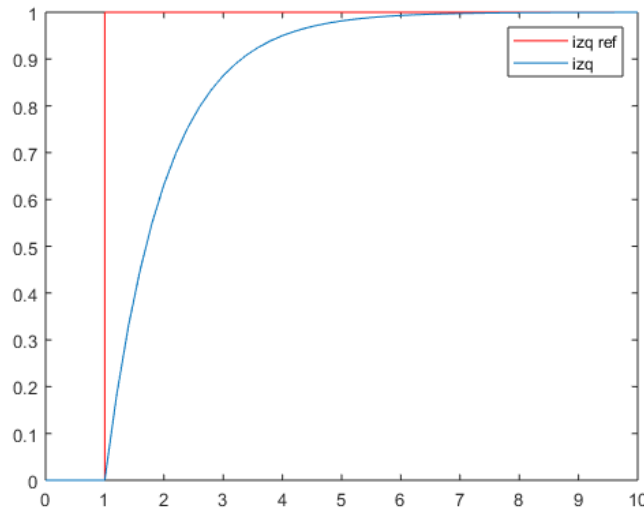


Fig. 4.8. Resposta i_q per entrada de graó unitari

4.1.7. Control potència òptima

La potència màxima que es pot extreure a cada moment depèn de la velocitat del vent en aquell instant. Les aspes han de girar a una velocitat concreta en funció de la velocitat del vent.

Calcular la velocitat exacta del vent a cada moment és una opció inviable, degut a la seva constant variació i a les distorsions provocades pel moviment de les aspes. L'alternativa que es segueix per a maximitzar l'energia extreta és el seguiment del punt de màxima potència mitjançant la tècnica anomenada *constant tip speed ratio control* (Junyent, A., 2011, p.16), que manté el valor del *tip speed ratio* (λ) constant per un angle de pitch, que en aquest cas es considerarà de 0°.

Per a extreure la potència màxima s'ha d'obtenir el parell òptim. El parell obtingut per l'aerogenerador s'obté dividint la potència per la velocitat angular

$$\Gamma_t = \frac{C_p \rho A v_w^3}{2\omega_t} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

D'aquesta expressió, els únics components no constants són la velocitat del vent i el coeficient d'eficiència C_p . Com ja s'ha dit abans no es pot controlar la velocitat del vent

així que per optimitzar el parell s'haurà trobar el màxim valor de C_p . Aquest es troba mitjançant una equació diferencial amb la que s'obté el valor màxim de λ , que es substitueix dins de l'expressió de C_p .

$$\lambda^{opt} = \frac{1}{c_9 + \frac{c_6}{c_2} + \frac{1}{c_7}}$$

$$C_p^{opt} = \frac{c_1 c_2}{c_7} e^{-\frac{c_2 + c_6 c_7}{c_2}}$$
(Eq. 4.19)

on els coeficients c_1, \dots són paràmetres de l'aerogenerador que es poden obtenir mitjançant l'estudi analític amb dades d'un aerogenerador real i amb simulacions seguint el mètode d'elements finits.

Un cop obtinguda l'eficiència màxima, l'equació del parell queda en funció de la velocitat angular de la següent manera

$$\Gamma_m^* = \frac{K_{C_p} W_t^2}{v}$$

$$K_{C_p} = \frac{\rho A R^3}{2} \frac{c_1 (c_2 + c_6 c_7)^3}{c_2^2 c_7^4} e^{-\frac{c_2 + c_6 c_7}{c_2}}$$
(Eq. 4.20)

4.2. Control de l'angle de pitch

Com s'ha vist a l'apartat 2.3.2, el coeficient de potència depenia de l'angle de pitch i del coeficient TSR. La inclinació de les pales de la turbina respecte la direcció del vent afecta a la quantitat d'energia que el generador absorbeix. És important, doncs, poder controlar aquesta inclinació en situacions on la velocitat del vent és superior a la nominal, ja que de no ser així la turbina adquiriria velocitats molt altes que podrien fer malbé el generador.

L'objectiu del control és aconseguir que en situacions de vent elevades la potència del generador segueixi sent la nominal. Per aconseguir això es poden seguir diverses

estratègies, controlant l'angle a partir de la velocitat del vent, o a partir de la potència que es vol generar, o, en el cas d'aquest treball, a partir de la velocitat de rotació del rotor.

Per simplificar els càlculs s'assumeix un TSR constant, d'aquesta forma el coeficient de potència té un comportament lineal. Això permet que control mitjançant tècniques conegudes, com un controlador PI.

Seguint el model d' Anaya-Lara, O., O Tande, J., Uhlen, K., Merz, K.(2018), el sistema de control consta d'un filtre passa-baixa, seguit d'un controlador PI. Els valors dels guany es calculen de la següent manera:

$$K_{p\beta} = 1 - 2.541\beta - 7.814\beta^2 + 46.281\beta^3 - 59.871\beta^4$$

$$K_{i\beta} = 0.351 - 2.405\beta + 13.128\beta^2 - 31.296\beta^3 + 27.689\beta^4 \quad (\text{Eq. 4.21})$$

I la freqüència de pas és de 0.5.

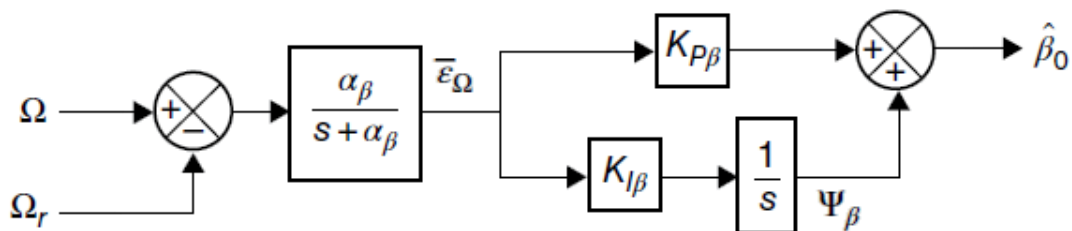


Fig. 4.9. Esquema control de pitch
(Anaya-Lara, O., O Tande, J., Uhlen, K., Merz, K., 2018, p.186)

5. Simulacions

5.1. Costat xarxa del convertidor

Per a simular el convertidor s'han considerat diversos casos. Per cada cas s'ha simulat primer un model promitjat, on es negligien les commutacions del convertidor i s'utilitza la seva simplificació vista a l'apartat 3.1.3, i més tard s'ha simulat un model amb commutacions. La xarxa a la que està connectada el sistema té un voltatge entre fases de 400V i una freqüència de 50Hz.

5.1.1. Sistema d'emmagatzament

En aquest cas es connecta el sistema a una font de tensió constant. L'objectiu amb aquestes simulacions és controlar les potència activa i reactiva generades pel circuit. Per a fer això s'han introduït potències de referència i s'ha prescindit del regulador de voltatge.

Els valors de les potències es troben en la taula inferior. Les potències no són constants en el temps, d'aquesta manera es pot veure si realment el sistema respon correctament als canvis.

Temps [s]	Potència activa [kW]	Potència reactiva [kVar]
0	-3	0
0.2	-6	-5
0.4	-1	0
0.6	-7	2
0.8	-7	-7

Taula 5.1. Valors referència potència activa i reactiva

Per a fer la simulació es tria una constant de temps per al llaç de control de corrent de 10ms.

5.1.1.1. Resultats

A la figura següent es mostra l'evolució de les potències en comparació amb els valors de referència. S'observa un pic a l'inici de cada interval de temps.

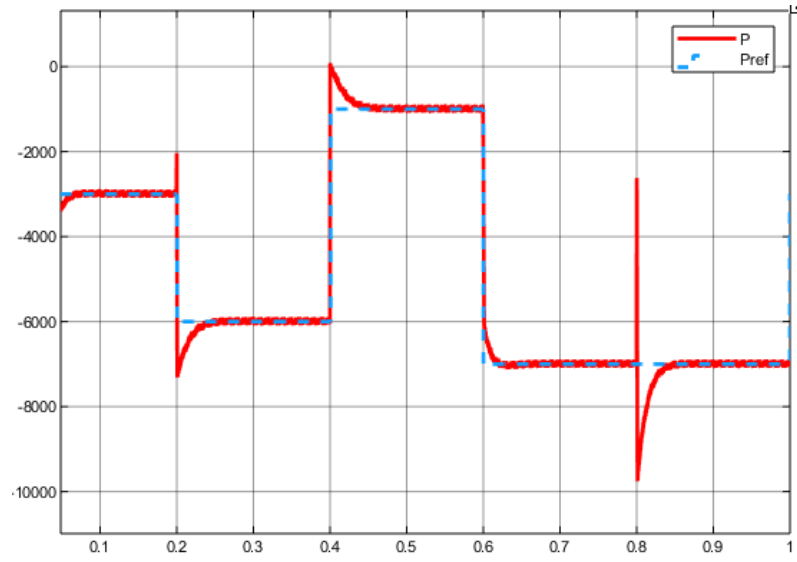


Fig. 5.34. Resposta potència activa

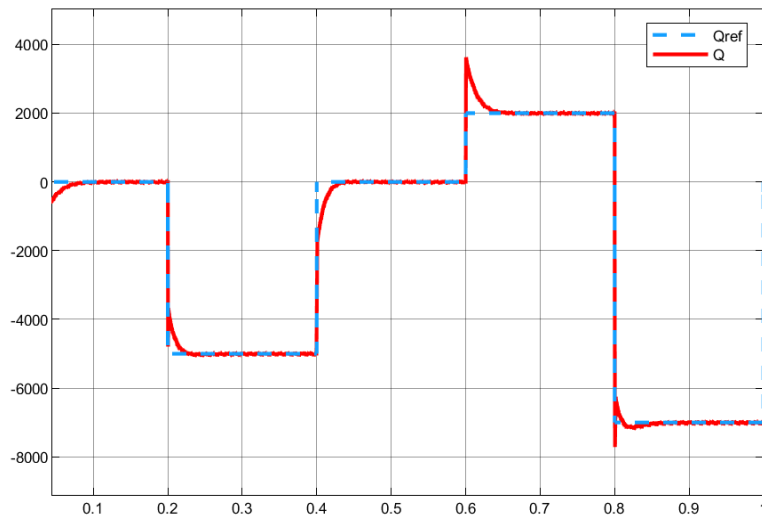


Fig. 5.2. Resposta potència reactiva

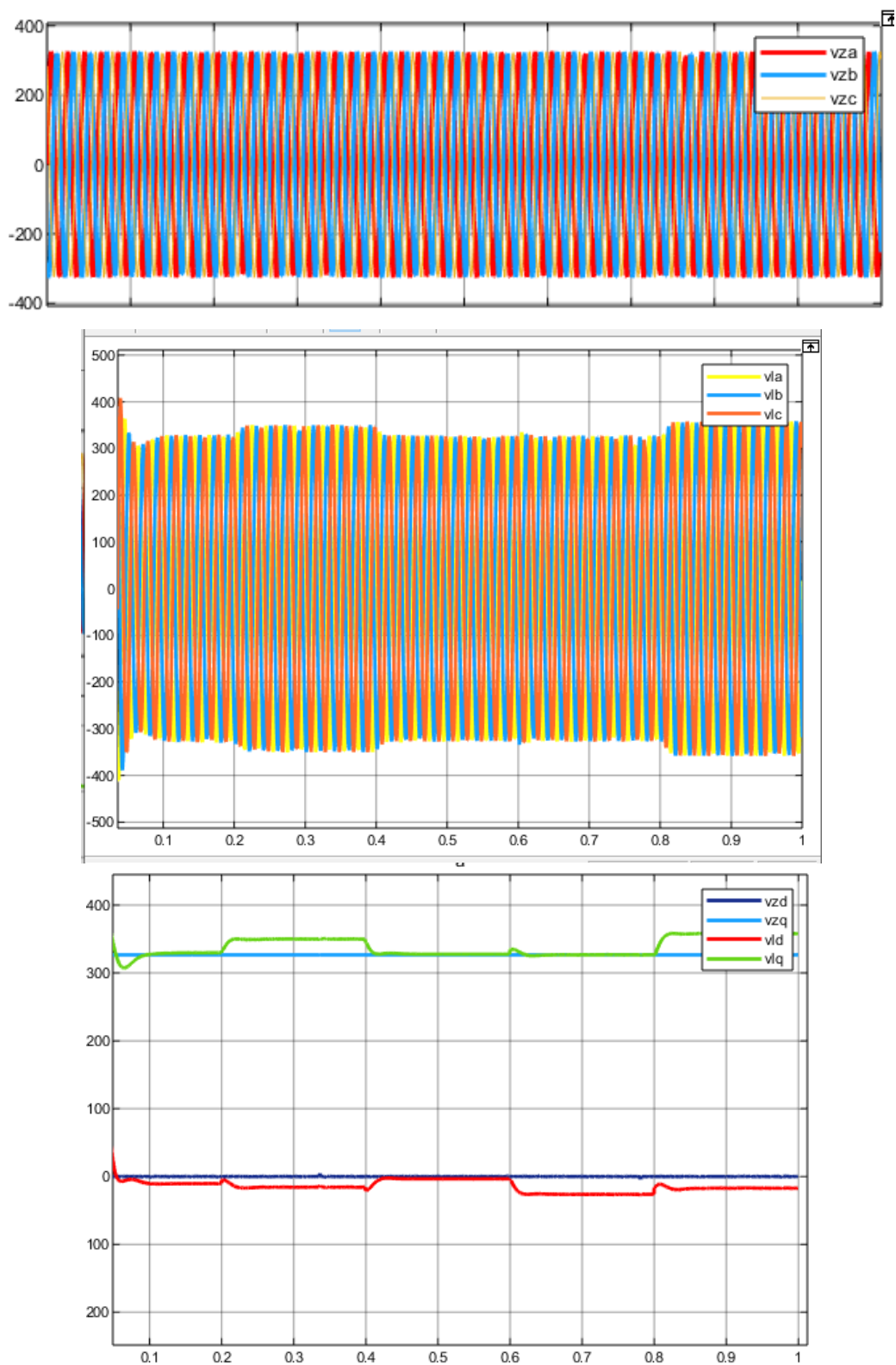


Fig. 5.3. Voltatge en referència abc i qd

S'observa una pujada de tensió en el segon i últim interval (0.2s-0.4s, 0.8s-1s). Aquest és provocat per la demanda de potència reactiva.

A continuació es mostra la resposta del corrent. Aquest augmenta en funció de la demanda de potència

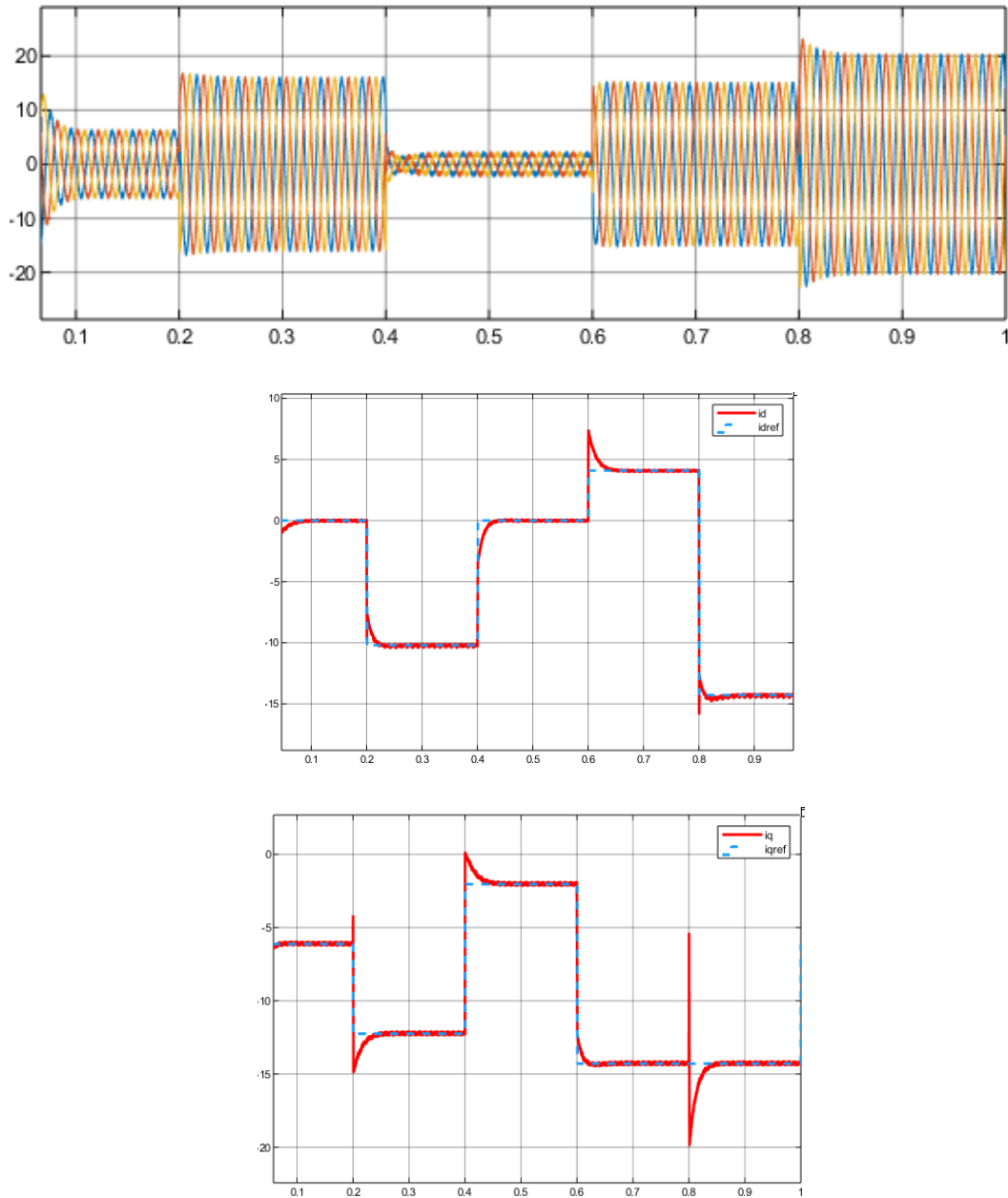


Fig. 5.4. Corrent en referència abc i qd

5.1.2. Sistema d'energia renovable

El convertidor es connecta a una font de corrent i a un condensador connectat en paral·lel. En aquestes simulacions l'objectiu és regular la tensió del bus de contínua, i assegurar el balanç de potències. En aquestes simulacions s'incorporarà el regulador de voltatge al circuit.

La potència reactiva ve donada, però fent variar la injecció de corrent al bus de contínua es genera una potència activa variant. Amb les simulacions es comprovarà si el sistema respon mantenint el balanç de potències i el voltatge a la banda de contínua. Les entrades del sistema es mostren a la taula següent

Temps [s]	Intensitat bus DC [A]	Potència reactiva [kVar]
0	3	0
0.2	10	0
0.4	5	-5
0.6	7.5	-5
0.8	10	0

Taula 5.2. Valors referència intensitat i potència reactiva

Per a fer la simulació es tria una constant de temps per al llaç de control de corrent d'1ms. La ω del regulador de voltatge triada és de 45rad/s i el factor d'esmoreïment de 0.707.

5.1.2.1. Resultats

El corrent i_d varia amb la potència reactiva i el corrent i_q amb la intensitat injectada al bus DC. Com s'ha explicat abans, el regulador de voltatge és de tipus *feed-forward*. Per a mantenir la estabilitat aquest sistema té una resposta més lenta que el llaç de corrent. Per això la intensitat i_q presenta un temps d'establiment més llarg per a cada interval.

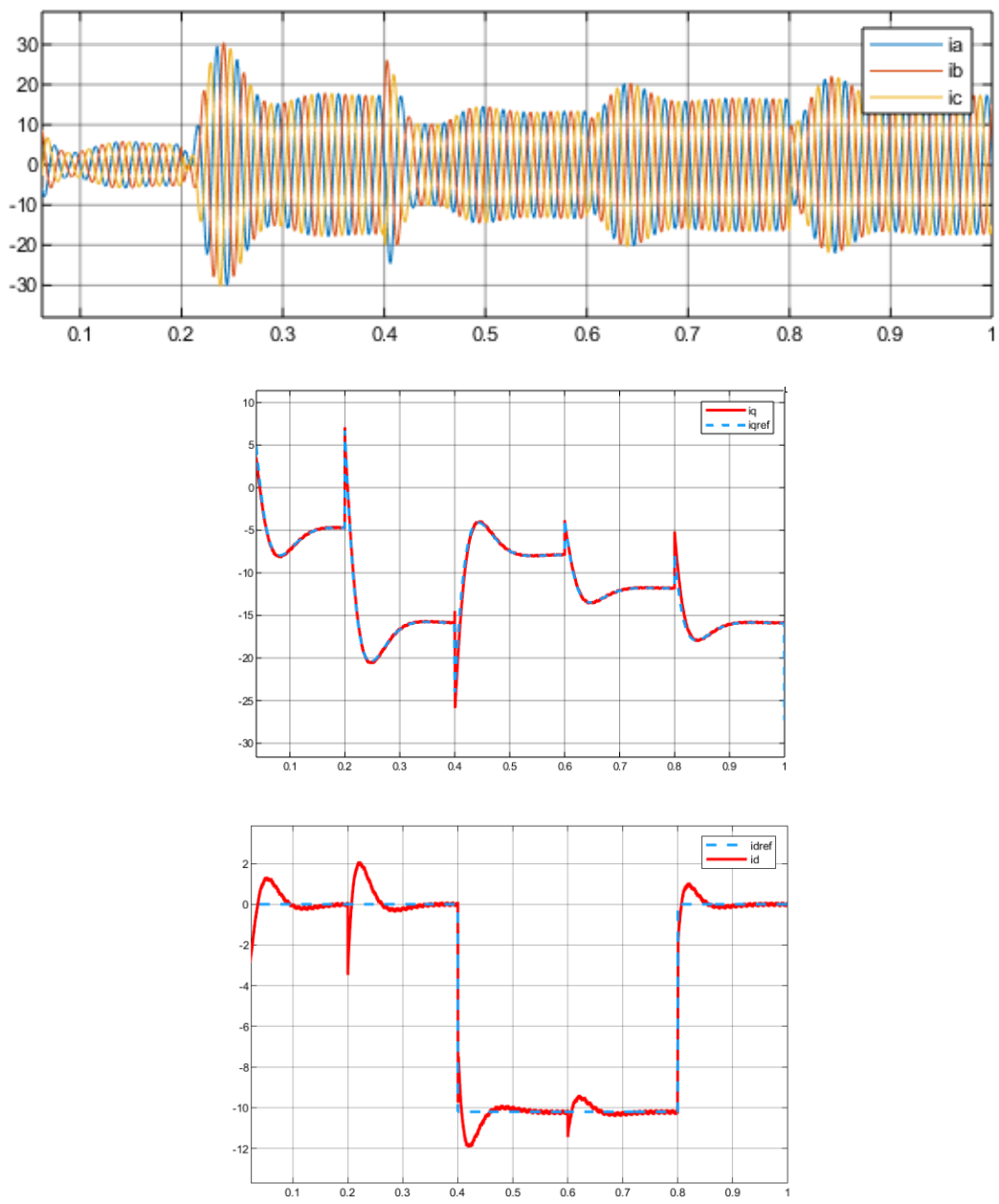


Fig. 5.5. Corrent en referència abc i qd

A continuació es mostren les tensions al convertidor.

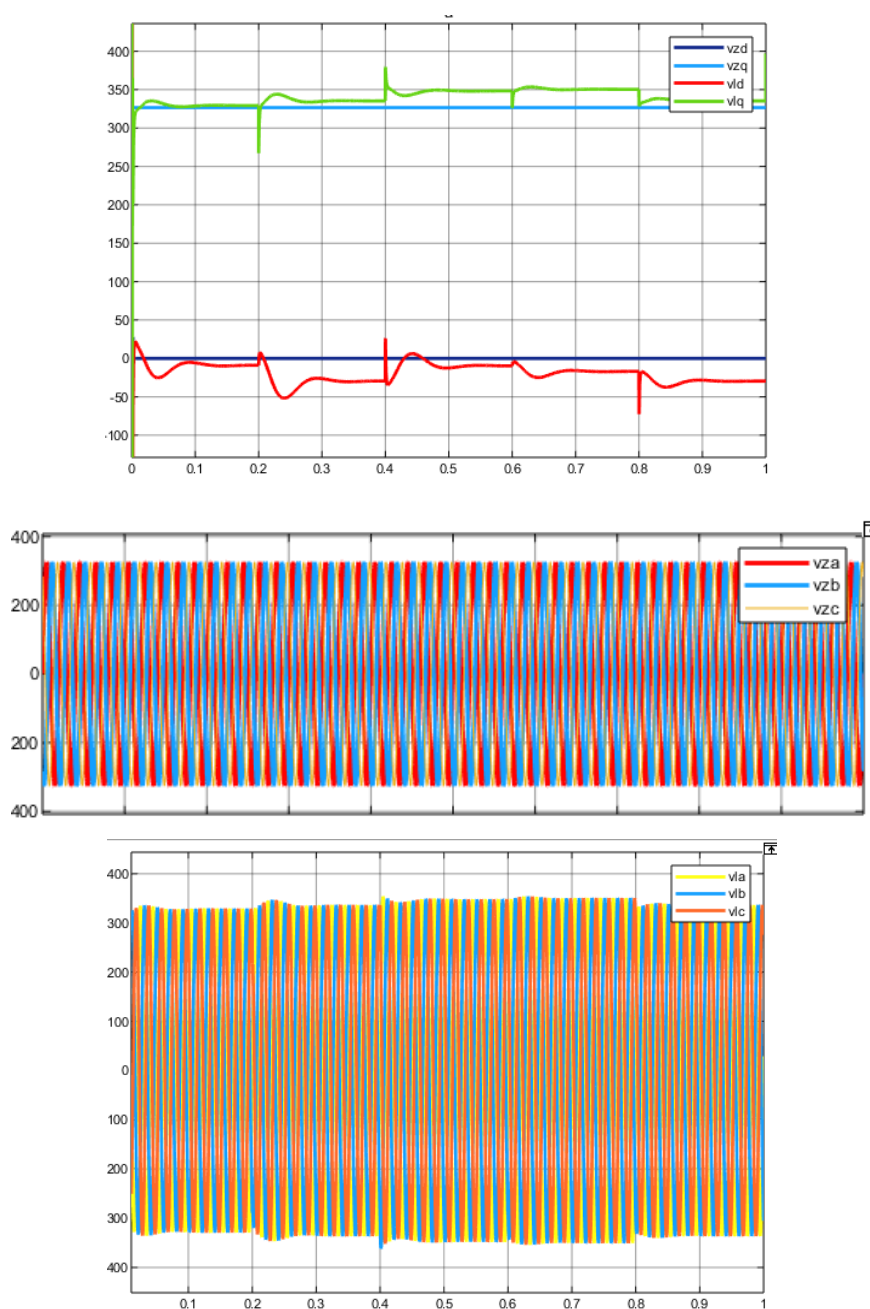


Fig. 5.6. Voltatge en referència abc i qd

El voltatge a la banda del convertidor (v_l) augmenta amb l'injecció de potència reactiva (0.4s-0.8s).

A continuació es mostra la tensió el bus de contínua

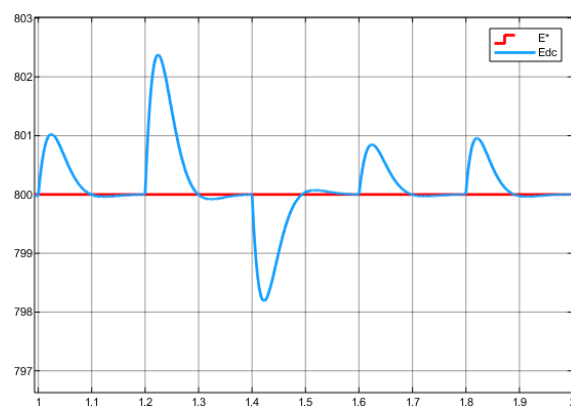


Fig. 5.7. Voltatge bus DC

Amb cada canvi d'intensitat injectada es genera un pic, i ràpidament s'estabilitza la senyal. Els pics són més grans en funció de la diferència entre la nova intensitat i la anterior (instant 0.2s, passa de 3A a 10A). També varia la seva direcció en funció de si la intensitat creix o decreix (instant 0.4s, passa de 10A a 5A).

El sistema respon correctament a la variació de potència reactiva.

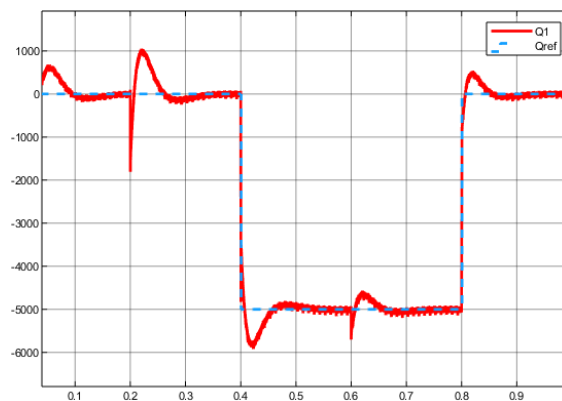


Fig. 5.8. Resposta potència reactiva

5.1.3. Sot de tensió

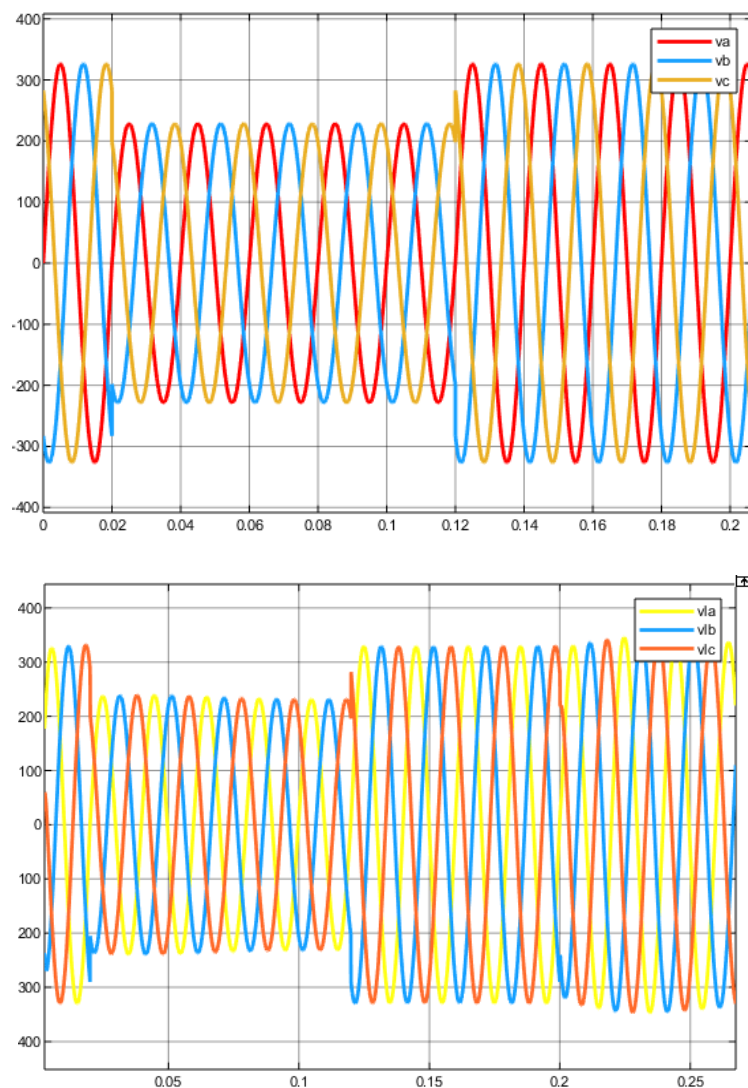
En aquest cas es simula la resposta del sistema al produir-se un sot de tensió (*voltatge sag*). Es considera un sot de tensió a la disminució brusca del voltatge, seguida d'una recuperació de la tensió nominal. L'objectiu d'aquesta simulació és veure si el sistema podria seguir funcionant en cas de que es produís un curtcircuit a la xarxa.

El sot de tensió programat en aquesta simulació és de 0.7 p.u., això vol dir que la tensió a la xarxa disminueix un 30%, i té una duració de 100ms. El sot de tensió estudiat en aquest treball és equilibrat, és a dir, afecta a les tres fases per igual.

Els paràmetres del sistema es mantenen respecte el cas anterior, ja que s'estudia el comportament d'un sot de tensió en un sistema d'energia renovable.

5.1.3.1. Resultats

A continuació es mostren les tensions de la xarxa i del convertidor en referències abc i qd. La caiguda de la tensió provoca la disminució de les components q de la tensió.



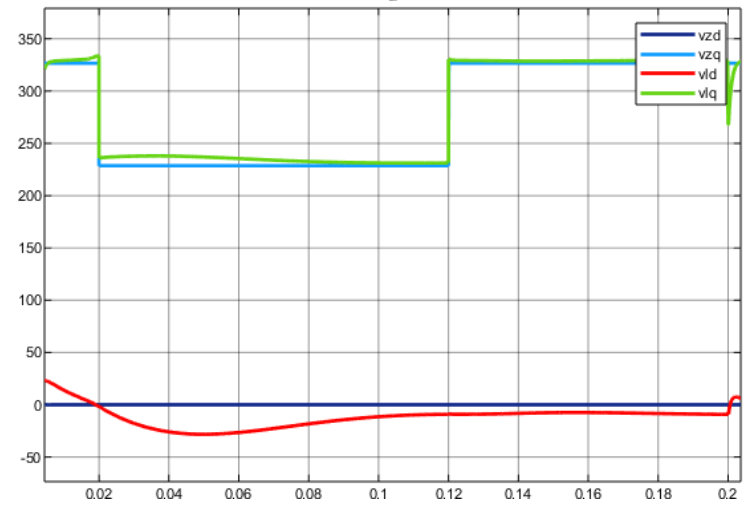
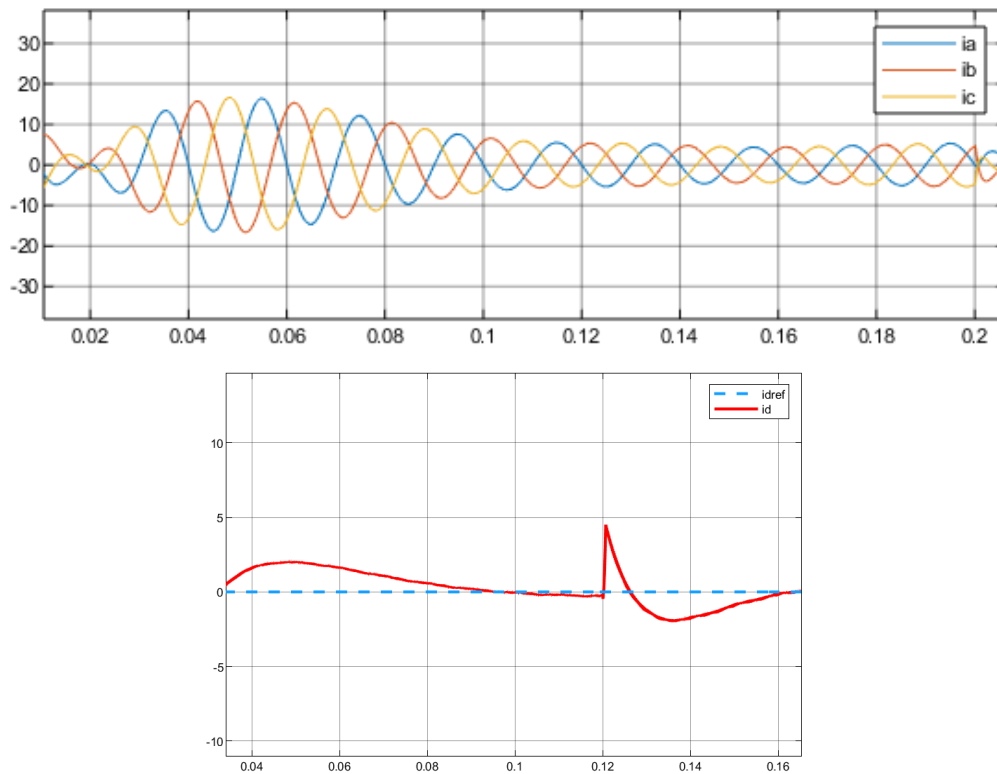


Fig. 5.9. Voltatge en referència abc i qd

La component q està relacionada amb la potència activa. Per a mantenir la potència activa del circuit, s'injecta més corrent. La intensitat i_d es manté, però el mòdul del corrent i_q augmenta.



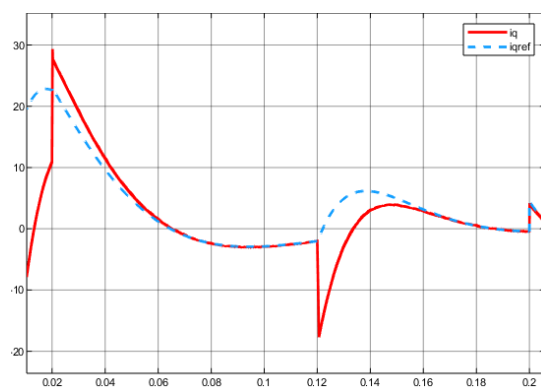


Fig. 5.10. Corrent en referència abc i qd

Amb aquesta injecció de corrent es manté el nivell de potència i la tensió del bus de contínua s'estabilitza ràpidament.

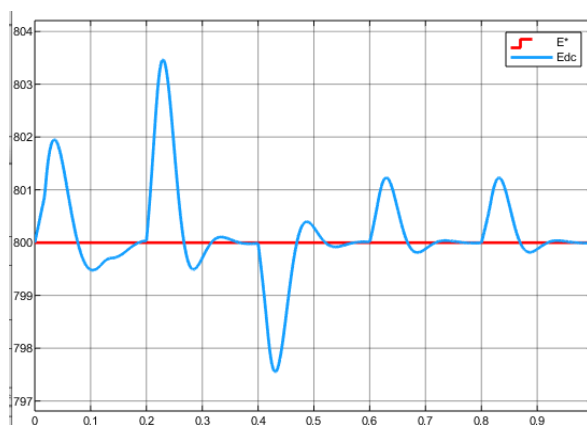


Fig. 5.11. Voltatge bus DC

5.2. Costat màquina del convertidor

Amb aquest sistema també s'han estudiat diversos casos. Els generadors d'imants permanents treballen a freqüències inferiors a la de la xarxa. En aquest cas la freqüència del sistema és de 20 Hz. A l'hora de triar els paràmetres del generador, el seu nombre de parells de pols i la seva velocitat nominal, es treballa amb l'equació de velocitat síncrona

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

on n són les revolucions per minut, f la freqüència, i p el parell de pols. Aquesta equació també pot ser reescrita en funció de la velocitat de gir, w_m :

$$w_m = \frac{2\pi \cdot f}{p} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Es tria una velocitat de 20 rpm, 2.1 rad/s, i el nombre de parell de pols resultant és de 60. L'angle de pitch amb el que es treballa a la velocitat de vent òptima és de 0 graus.

5.2.1. Velocitat constant

Amb un angle de pitch de 0 graus, la velocitat òptima de treball de la turbina és de 12m/s, com mostra la següent figura

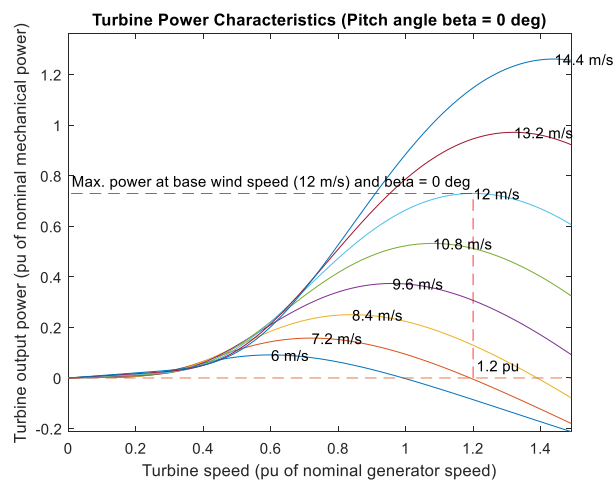


Fig. 5.352. Característiques turbina

Aquest sistema es simula durant 5 segons, i s'estudien els resultats del seu estat estacionari.

5.2.1.1. Resultats

La freqüència de les intensitats i les tensions del generador es correspon a la desitjada, amb una distància entre pics de 0.05s. Veiem que la transformada de Park en base qd0 és correcta, sent la component d del corrent i de la tensió nul·la.



Fig. 5.13. Intensitats generador en referència abc i qd

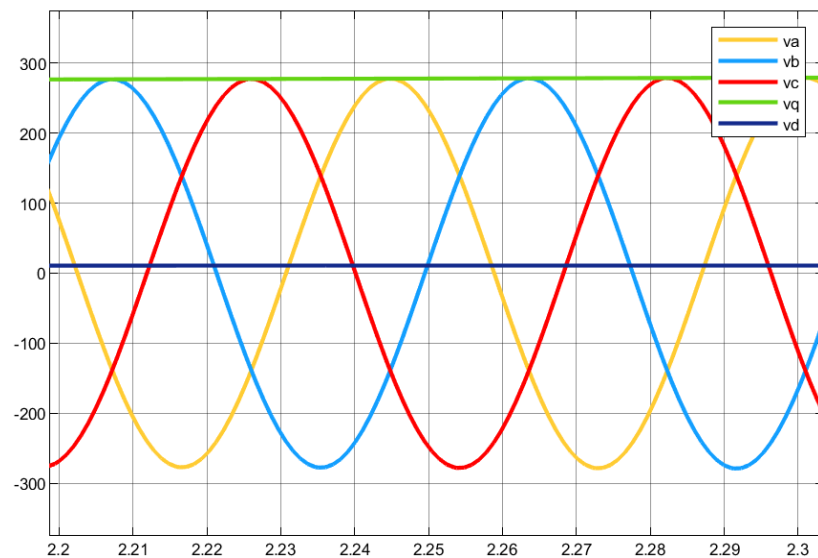


Fig. 5.14. Tensions generador en referència abc i qd

El comportament del parell mecànic i del parell elèctric del generador és lineal

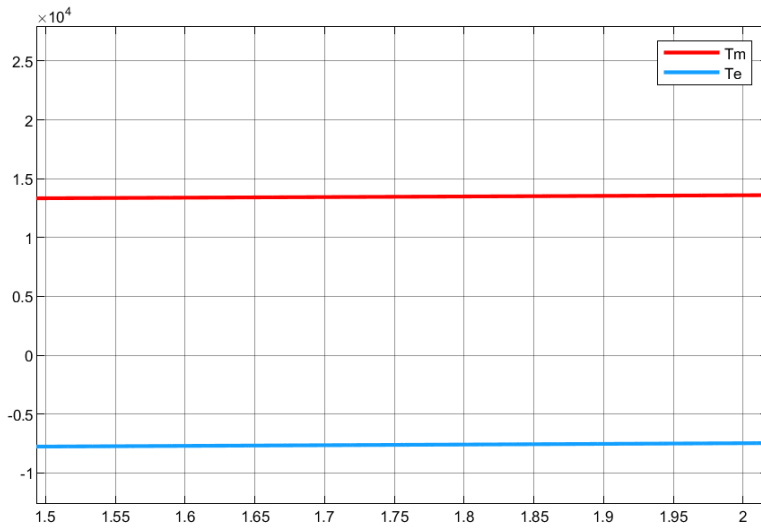


Fig. 5.15. Parell mecànic i parell elèctric del generador

Per últim, la tensió al bus de contínua es manté constant a 800 V.

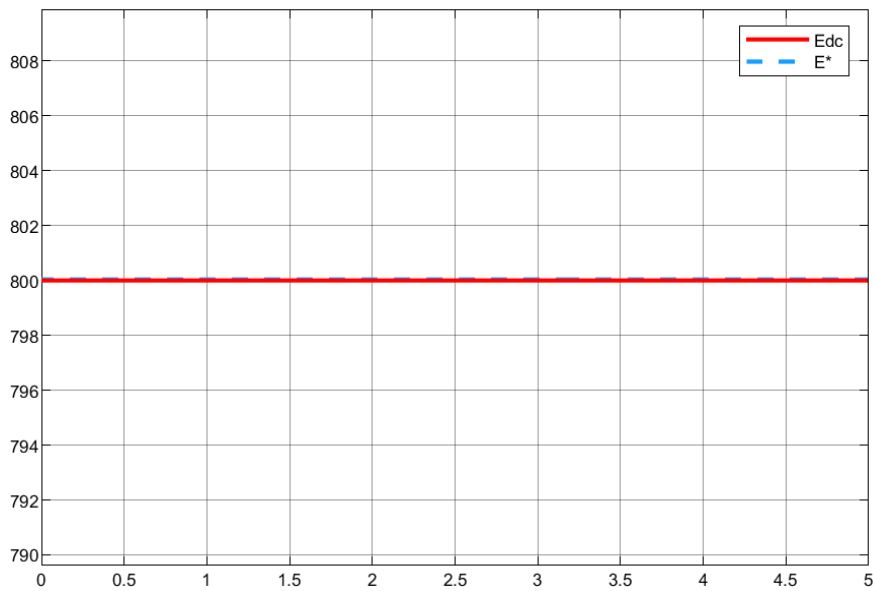


Fig. 5.16. Tensió bus contínua

5.2.2. Graó de velocitat

En aquesta situació es simula un canvi bruscat de velocitat del vent. Tot i que aquest canvi no tindria forma de graó en la vida real, aquest cas permet veure com s'adapta el sistema a canvis sobtats. La velocitat varia dels 14 m/s a 9 m/s.

5.2.2.1. Resultats

Es produeix un lleuger descens a les tensions i corrents del generador. El canvi de velocitat és més apreciable en el parell mecànic, que disminueix bruscament. El parell electromagnètic té un comportament similar, però a millor escala.

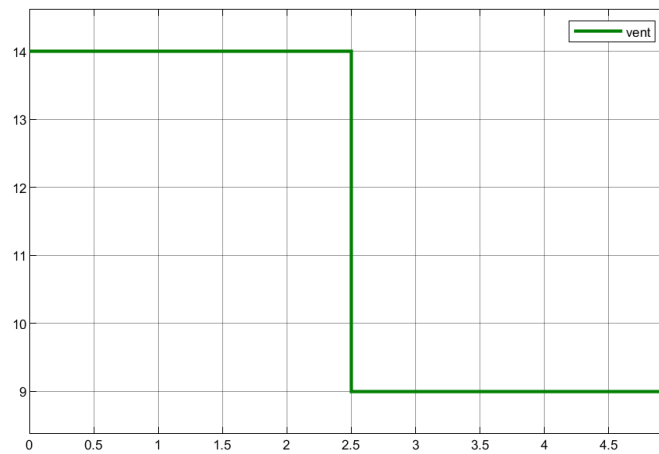


Fig. 5.17. Velocitat vent

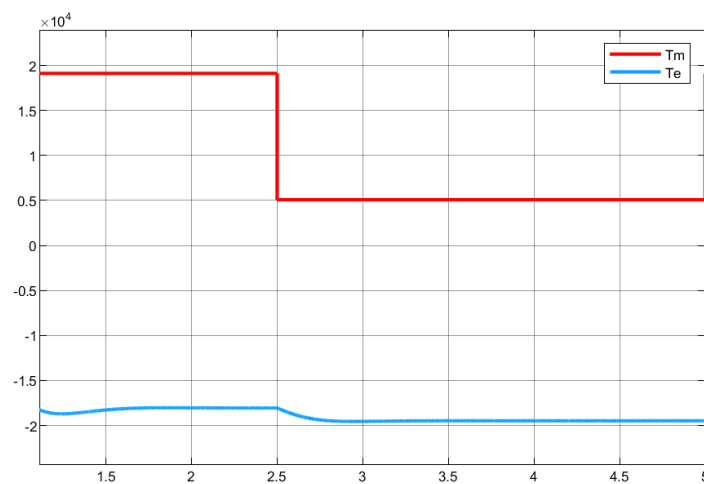


Fig. 5.18. Parell mecànic i parell elèctric del generador

Al treballar a velocitats properes a l'òptima, el coeficient de potència pren sempre valors relativament elevats. Tot i així, s'observa com se creix a velocitats superiors a 12m/s i incrementa a quan la velocitat del vent és de 10m/s.

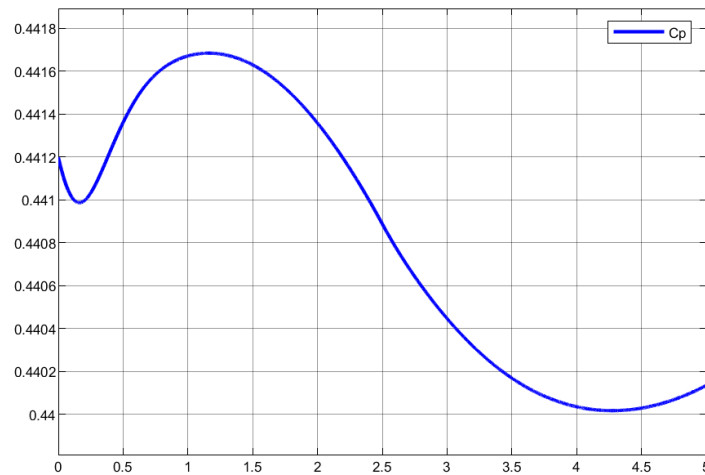


Fig. 5.19. Coeficient de potència de la turbina

Per sobre de velocitats òptimes, l'angle de pitch augmenta. Un cop es baixa la velocitat del vent, el valor de β disminueix.

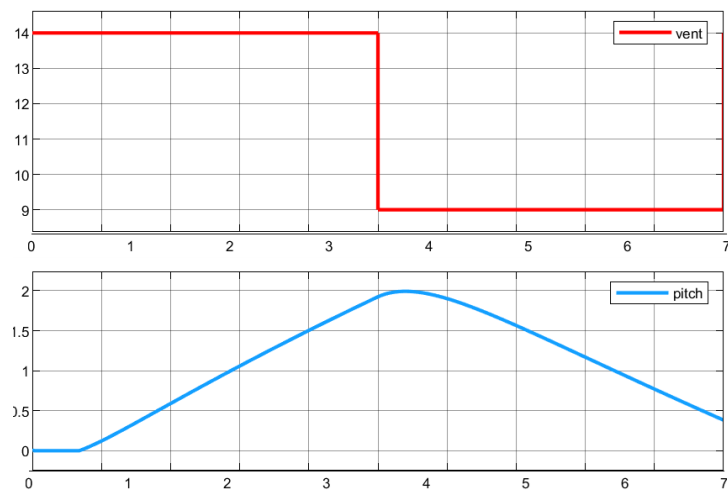


Fig. 5.20. Angle de pitch respecte velocitat del vent

5.2.3. Rampa de velocitat

En aquest cas s'estudia una velocitat amb variació constant. En aquest cas l'angle de pitch s'ajusta per a poder mantenir un C_p òptim per a cada velocitat. La velocitat del vent augmenta constantment des dels 10m/s fins als 20m/s.

5.2.3.1. Resultats

Un cop assolit el règim estacionari es pot observar l'increment en el parell del generador. De nou, el parell elèctric del generador té el mateix comportament que el parell mecànic.

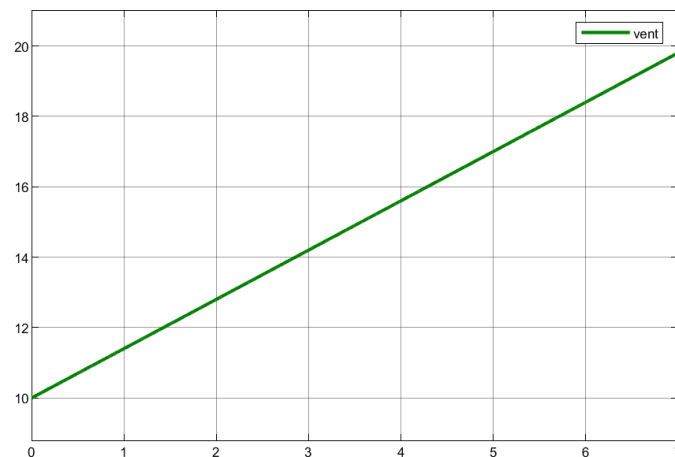


Fig. 5.21. Velocitat vent

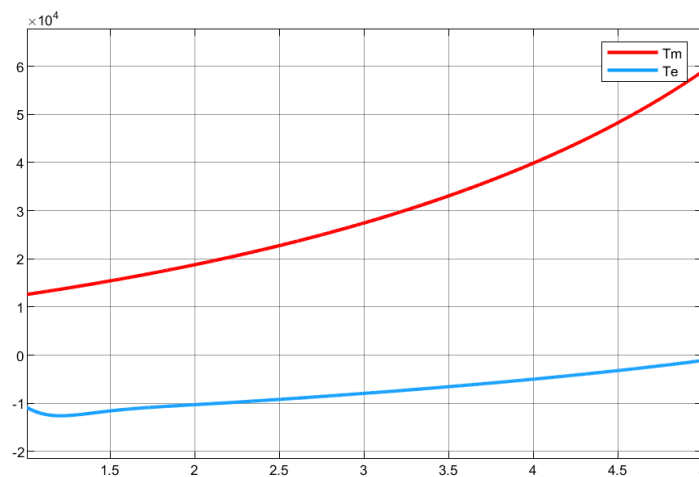


Fig. 5.22. Parell mecànic i parell elèctric del generador

El coeficient de potència augmenta progressivament fins que s'arriba a la velocitat òptima, de 12m/s. A partir d'aquest punt es redueix.

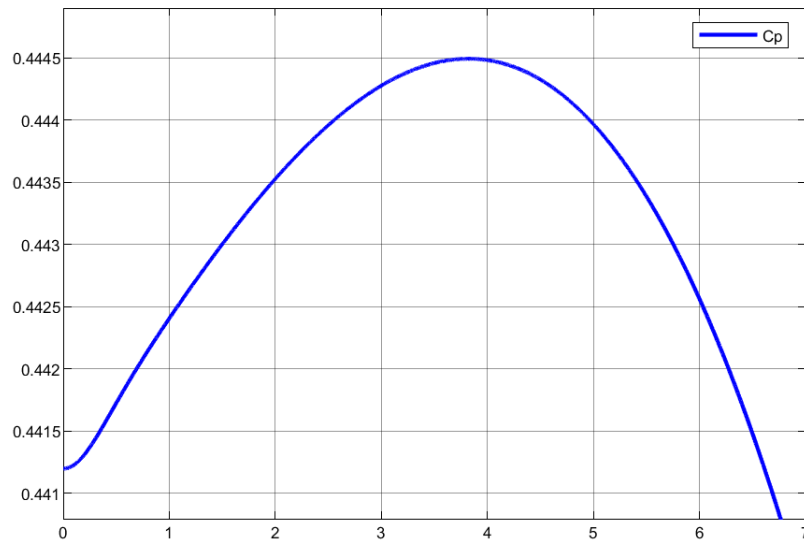


Fig. 5.23. Coeficient de potència de la turbina

Per a velocitats inferiors a l'òptima, l'angle de pitch ha estat de 0°. Un cop s'han superat els 12m/s aquest s'ha ajustat per a garantir el funcionament de l'aerogenerador.

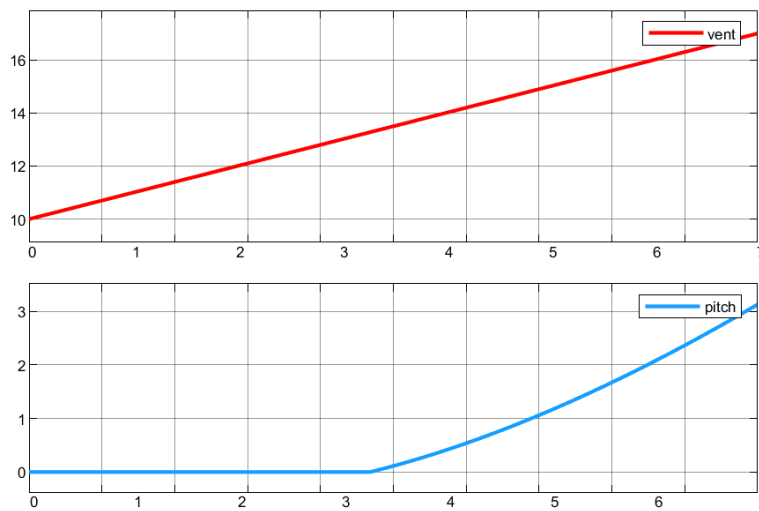


Fig. 5.24. Angle de pitch respecte velocitat del vent

5.3. Sistema complet

Un cop s'han validat les dues parts del sistema, es fan les simulacions amb el sistema complet, per validar el seu funcionament. S'estudia el cas del sistema d'energia renovable (4.2) per a una entrada de vent constant, i més tard s'analitza el comportament del sistema davant d'un sot de tensió.

5.3.1. Velocitat constant

Com en el punt 5.1, es tria la velocitat òptima de 12m/s. En aquesta ocasió és interessant comprovar que les dues parts del sistema funcionen a la freqüència corresponent, 20Hz per a la màquina i 50Hz per a la xarxa, tant en intensitats com en tensions. També s'ha de garantir el manteniment de tensió al bus de contínua.

Al costat xarxa del sistema, la senyal d'entrada és la potència reactiva Q_{ref} . Aquesta es fa variar en funció del temps seguint la següent taula:

Temps [s]	Potència reactiva [kVar]
0	-3
1	-6
2	-5
3	-5
4	-2

Taula 5.3.Valors referència potència reactiva

5.3.1.1. Resultats

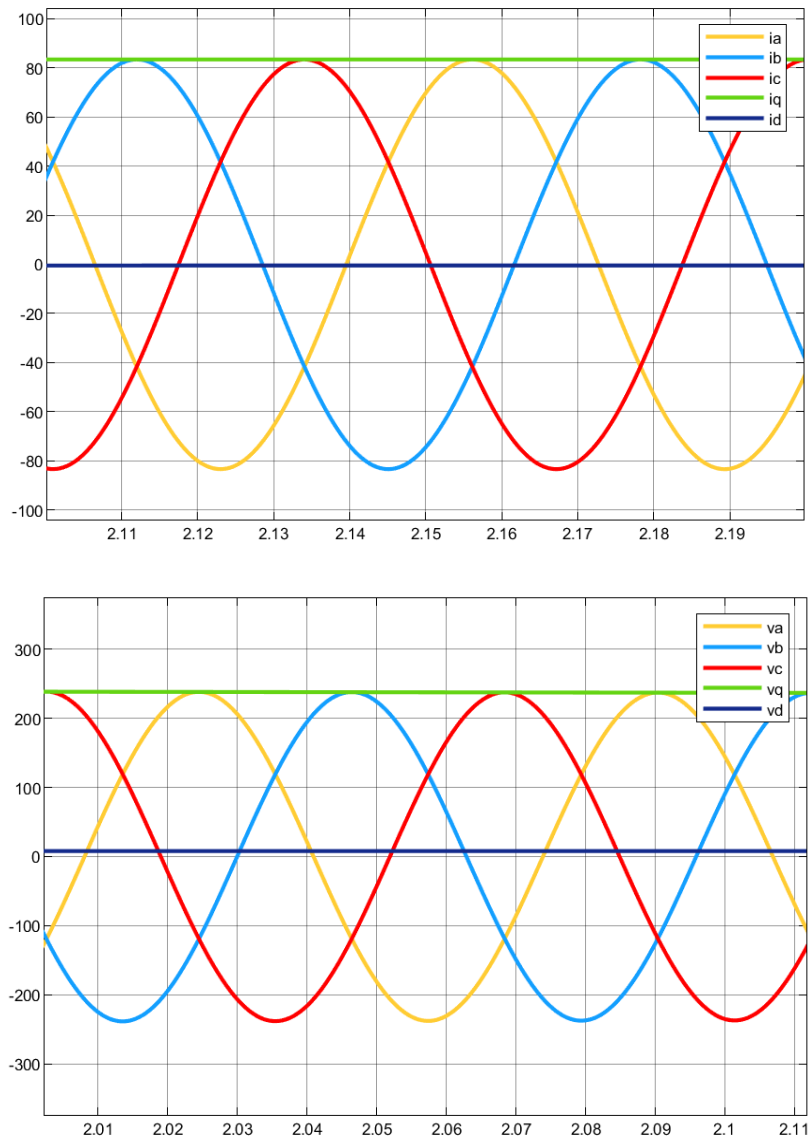


Fig. 5.25. Intensitats i tensions al generador

La distància entre pics demostra que la freqüència és la desitjada. Les transformades de Park són correctes, ja que tant la component d de les tensions com la de les intensitats es 0.

La tensió del bus DC es manté constant a 800V, amb petits pics generats pel canvi de potència reactiva.

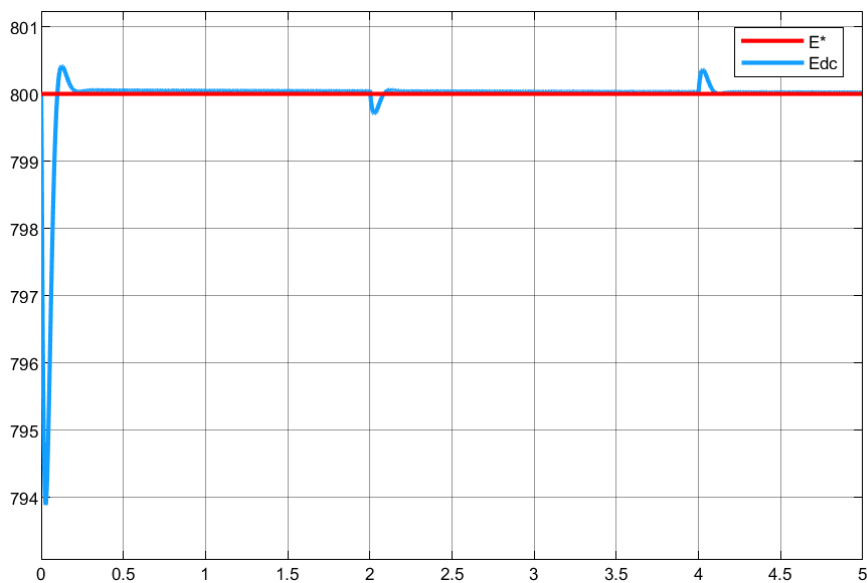
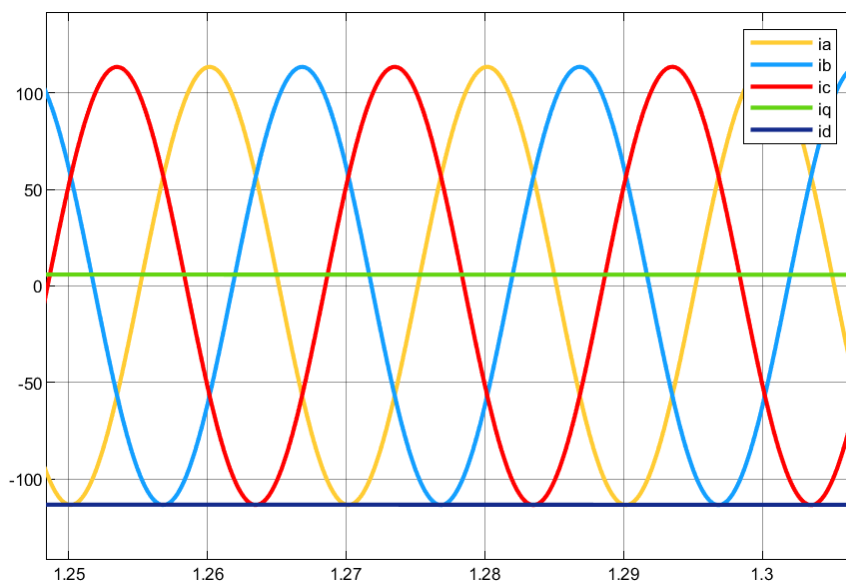


Fig. 5.26. Tensió bus contínua

Observant les intensitats i corrents de la xarxa s'aprecia la diferència entre freqüències amb la part de la màquina.



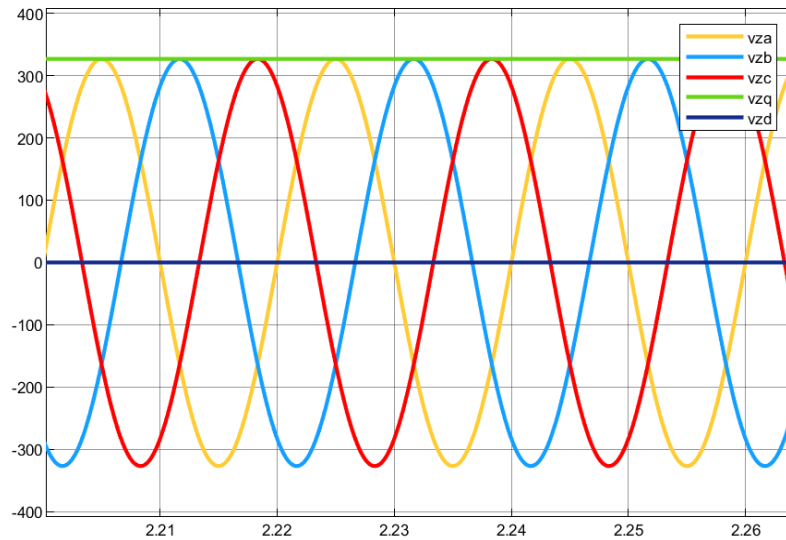


Fig. 5.27. Intensitats i tensions a la xarxa

En aquest cas la component d de la intensitat depèn de la potència reactiva subministrada, per aquest cas no és 0 en cap instant.

Per últim es fa una comparació de les potències transmeses dins del sistema. Tenint en compte les pèrdues generades durant les conversions és lògic que la potència generada a la turbina sigui superior a la utilitzada pel generador, i que aquesta sigui més gran en mòdul que la que es transmet a la xarxa. El criteri de signes triat indica com a positives les potències generades.

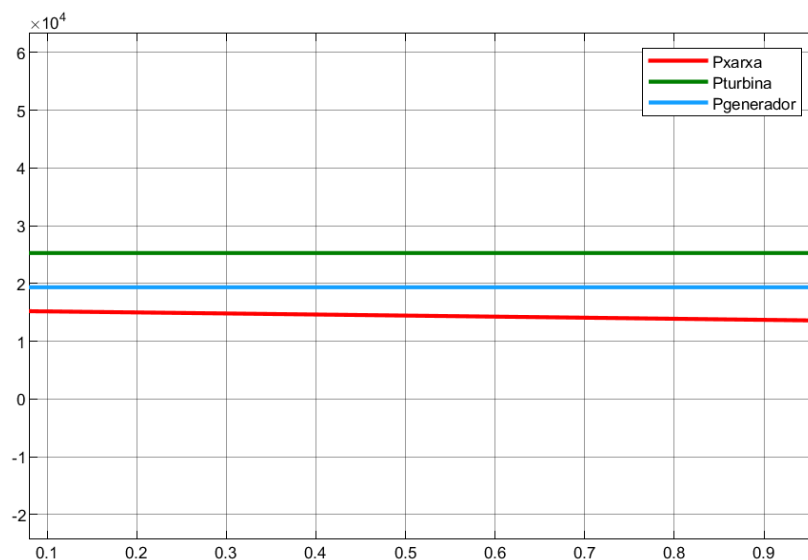


Fig. 5.28. Potències del sistema

5.3.2. Sot de tensió

En aquest cas el sot de tensió és inferior, de 0.8 p.u., però dura 200ms. Es pretén comprovar si el sistema complet és capaç de recuperar-se després d'una pèrdua de tensió més prolongada.

5.3.2.1. Resultats

En aquesta figura s'aprecia el sot de tensió, i en la següent com afecta només a la component q de la intensitat, ja que la component d depèn de la potència reactiva. Per a fer aquest fet més visible, durant el sot de tensió s'injecta una potència reactiva baixa, de forma que la intensitat és menor i s'aprecien millor els canvis.

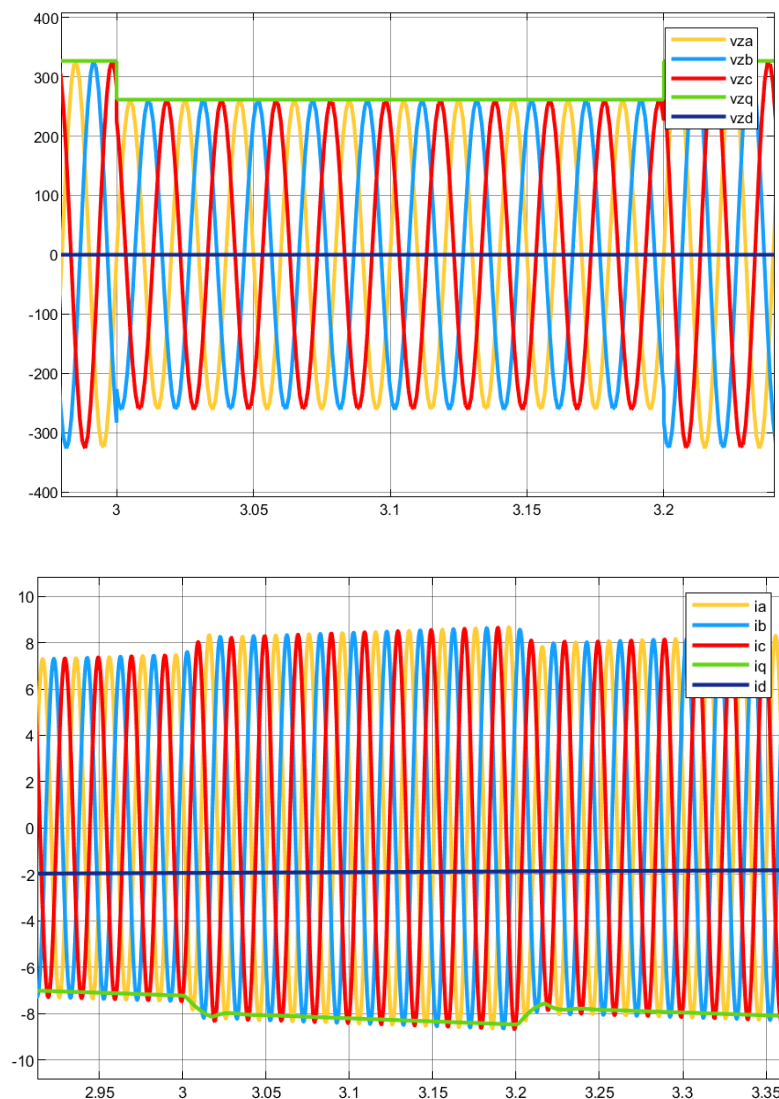


Fig. 5.29. Intensitats i tensions a la xarxa

De nou, la baixada de tensió a la xarxa genera una pèrdua de potència activa, que el sistema intenta compensar amb un augment de la intensitat, més concretament de la component q .

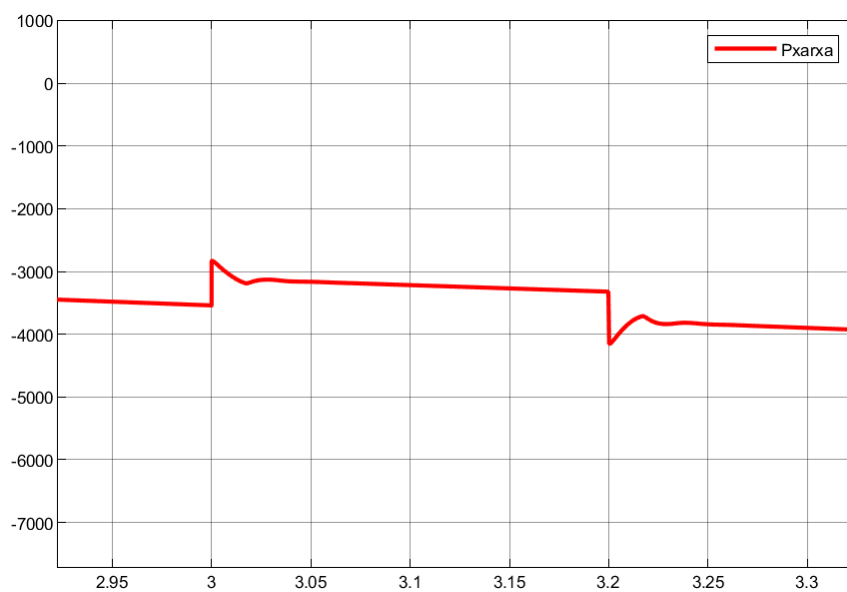


Fig. 5.30. Potència activa a la xarxa

Conclusions

L'objectiu del treball l'estudi del funcionament d'un aerogenerador, per a continuació modelitzar i simular un model *offshore*, ja que degut a la seva localització i a la qualitat del vent al mar aquesta nova tipologia d'aerogeneradors suposa una millora d'eficiència a l'hora d'obtenir energia.

L'estudi de les diferents parts de l'aerogenerador s'ha centrat principalment en el convertidor, de tipus *back-to-back*. Aquest permet treballar sense la necessitat d'una caixa de transmissió que faci variar la velocitat de la turbina. El convertidor permet també treballar en dues freqüències diferents alhora.

S'han estudiat les dues parts del convertidor per separat, analitzant el seu comportament en diverses situacions, diferents ràfegues de vent, sots de tensió), i més tard s'ha comprovat el funcionament del sistema complet. És especialment interessant l'estudi del sistema sota un sot de tensió, ja que pot ajudar a prevenir una aturada en cas de curtcircuit o fallida elèctrica.

Per a realitzar un control més realista, s'ha fet servir la modulació per amplada de polsos amb vector espacial (SVPWM), que mitjançant la commutació dels IGBT ha permès un control de més qualitat que el model simplificat.

A més de l'estudi del comportament del model, en aquest treball també s'ha fet una descripció dels diferents components que formen un aerogenerador. També s'ha volgut donar un context dins de l'energia eòlica, i més concretament de la *offshore*, explicant el sistema de fixació de les turbines dins del mar.

En resum, aquest treball ha servit per donar una primera visió de l'energia eòlica *offshore* i del seu mecanisme de control. A partir d'aquest model es poden desenvolupar millores en l'estudi d'aquest tipus d'aerogeneradors.

Com a possibles línies de desenvolupament al treball realitzat es podrien incloure altres factors que aquí s'han simplificat, i d'aquesta forma aconseguir una millora en el model. Per una banda es podria incloure el factor de la turbulència del vent. En aquest treball s'ha assumit la seva linealitat. També es podria estudiar el comportament del sistema en casos de sots de tensions desequilibrats, i altres tipus d'incidències.

Annex

A. Transformacions

A.1 Transformada de Clarke

La transformada de Clark permet fer un canvi de base. Es parteix d'un sistema trifàsic amb tres coordenades abc i es passa a un sistema amb dues coordenades $\alpha\beta 0$.

La transformació de Clarke es defineix com

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

on $x_{\alpha\beta 0}$ és el vector en la referència de Clarke, x_{abc} el vector en trifàsic, i substituint la matriu $T_{\alpha\beta 0}$ es pot escriure com

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

La inversa de la transformada es defineix com

$$x_{abc} = T_{\alpha\beta 0}^{-1} x_{\alpha\beta 0} \quad (\text{Eq. A.3})$$

I substituint la matriu invertida $T\alpha\beta 0^{-1}$ s'escriu com

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

(Eq. A.4)

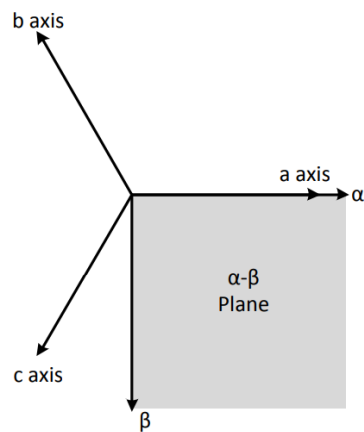


Fig. A.1. Representació pla $\alpha\beta$ dins l'espai abc
(Egea, Junyent, Gomis, 2012, p.53)

A.2 Transformada de Park

La transformada de Clark permet fer un canvi de base. Es parteix d'un sistema trifàsic amb tres coordenades abc i es passa a un sistema amb dues coordenades qd0.

La transformada de Park es defineix com

$$x_{qd0} = T_{qd0} x_{abc} \quad (\text{Eq. A.19})$$

on x_{qd0} és el vector en la referència de Park, x_{abc} el vector en trifàsic, i substituint la

matriu T_{qd0} es pot escriure com

$$\begin{bmatrix} x_q \\ x_d \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. A.6})$$

La inversa de la transformada es defineix com

$$x_{abc} = T_{qd0}^{-1} x_{qd0} \quad (\text{Eq. A.7})$$

I substituint la matriu invertida $T\alpha\beta 0^{-1}$ s'escriu com

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_q \\ x_d \\ x_0 \end{bmatrix}$$

(Eq. A.8)

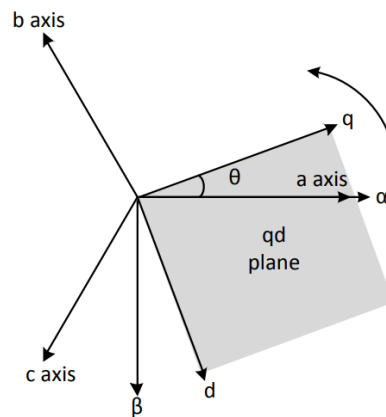


Fig. A.2. Representació pla qd amb rotació θ dins l'espai abc
(Egea, Junyent, Gomis, 2012, p.56)

B. Modulació

La modulació és un procés que permet obtenir el senyal de sortida desitjat durant l'etapa de control, millorant així la precisió i estabilitat del sistema. La tècnica més utilitzada per a la modulació és la modulació per amplada de polsos. En aquest treball s'utilitza la modulació per amplada de polsos amb vector espacial, *Space Vector Pulse Width Modulation* (SVPWM).

B.1 SVPWM

Aquesta tècnica està basada en la projecció del vector espacial a la banda alterna dels convertidors de voltatge. Considerant que es treballa amb un convertidor trifàsic de dos nivells VSC, es tenen els següents estats.

Vector	q1	q2	q3	$V_{l0} - V_{la}$	$V_{l0} - V_{lb}$	$V_{l0} - V_{lc}$	$V_{z0} - V_{la}$	$V_{z0} - V_{lb}$	$V_{z0} - V_{lc}$
0	0	0	0	$-E_{DC}/2$	$-E_{DC}/2$	$-E_{DC}/2$	0	0	0
1	1	0	0	$E_{DC}/2$	$-E_{DC}/2$	$-E_{DC}/2$	$2E_{DC}/3$	$-E_{DC}/3$	$-E_{DC}/3$
2	1	1	0	$E_{DC}/2$	$E_{DC}/2$	$-E_{DC}/2$	$E_{DC}/3$	$E_{DC}/3$	$-2E_{DC}/3$
3	0	1	0	$-E_{DC}/2$	$E_{DC}/2$	$-E_{DC}/2$	$-E_{DC}/3$	$2E_{DC}/3$	$-E_{DC}/3$
4	0	1	1	$-E_{DC}/2$	$E_{DC}/2$	$E_{DC}/2$	$-2E_{DC}/3$	$E_{DC}/3$	$E_{DC}/3$
5	0	0	1	$-E_{DC}/2$	$-E_{DC}/2$	$E_{DC}/2$	$-E_{DC}/3$	$-E_{DC}/3$	$2E_{DC}/3$
6	1	0	1	$E_{DC}/2$	$-E_{DC}/2$	$E_{DC}/2$	$E_{DC}/3$	$-2E_{DC}/3$	$E_{DC}/3$
7	1	1	1	$E_{DC}/2$	$E_{DC}/2$	$E_{DC}/2$	0	0	0

Taula B.1. Estats i voltatges del procés SVPWM
(Egea, Junyent, Gomis, 2012, p.66)

Representant els estats dins de l'espai $\alpha\beta$ s'obté un hexàgon de voltatges. Els vectors 0 i 7 s'anomenen vectors zero, i la resta s'anomenen vectors actius. L'espai entre dos vectors s'anomena sector.

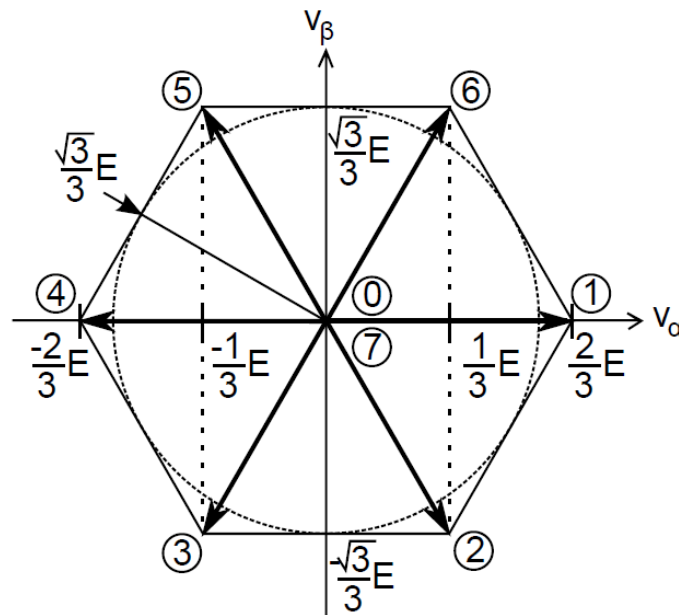


Fig. B.1. Hexàgon vectors de voltatge
(Egea, Junyent, Gomis, 2012, p.67)

La SVPWM consisteix en l'aplicació dels vectors actius i zero durant un període de temps. La duració d'aquest període es calcula com la inversa de la freqüència de canvi. Per tant, com més alta sigui la freqüència, millor qualitat tindrà la modulació.

Per calcular el temps en que cada vector està connectat, primer es troben el mòdul i l'angle del voltatge:

$$V_{sum} = \sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2}$$

$$\theta_{sum} = \arctan\left(\frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}}\right)$$

(Eq. B.1)

Per garantir que l'angle es trobi sempre al primer sector s'utilitza

$$\theta_{sec1} = \theta_{sum} - \frac{\pi}{3}(n - 1)$$

(Eq. B.2)

on n és el sector on inicialment es trobava l'angle. Per a calcular el temps que es connecta els vectors 1 i 2 del primer sector, i els seus equivalents en altres sectors, s'utilitzen

$$t_1 = \frac{\sqrt{3}V_{sum}}{2E_{DC}} T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{sec1}\right)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{3}V_{sum}}{2E_{DC}} T_s \sin(\theta_{sec1}) \quad (\text{Eq. B.3})$$

El temps restant de cada període es connecta el vector zero, o el seu equivalent en un altre sector

$$t_0 = t_7 = \frac{T - t_1 - t_2}{2} \quad (\text{Eq. B.4})$$

Bibliografia

Anaya-Lara, O., O Tande, J., Uhlen, K., Merz, K., 2018, *Offshore wind energy technology*, Wiley Online Library All Obooks

Egea, A., Junyent, A., Gomis, O., 2012, *Modeling and control of sustainable power systems: Towards smarter and greener electric grids*, Edited by Lingfeng Wang, Berlin: Springer.

Hau, E., 2006, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics.* Berlin: Springer.

Junyent, A., 2011, *Control of power electronic converters for the operation of wind generation*, Thesis

Liatkher, V. M., 2014, *Wind power: turbine design, selection, and optimization*, Wiley Blackwell.

Maalawi, K., 2011, *Special Issues on Design Optimization of Wind Turbine Structures*, inTech

Masters, Gilbert M., 2004, *Renewable and efficient electric power Systems*, John Wiley & Sons.

Mitjà, A., 198-, *El Parc eòlic pilot de l'Empordà*, Departament d'Indústria i Energia. Direcció General de Política Energètica

Uzunoglu, E., Karmakar, D., Guedes Soares, C., 2016, *Floating Offshore Wind Platforms*, Edited by Laura Castro-Santos, Vicente Diaz-Casas, Springer Complete eBooks

Yazdani, A., Iravani, R., 2010, *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*, IEEE-Wiley eBooks 2010 (IEEE Xplore)