

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Modelització, disseny i control d'un generador eòlic utilitzant diferents metodologies de control

MEMÒRIA

Autor: Ona Renom Estragués
Director: Joan Sau Bassols
Codirector: Ricard Ferrer San José
Ponent: Oriol Gomis Bellmunt
Convocatòria: Gener 2017



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En aquest treball es presenta la modelització, disseny i control d'un generador eòlic d'inducció de tipus gàbia d'esquirol (SCIG) considerant diferents metodologies de control sobre aquest.

Primerament, es realitza la modelització d'una turbina eòlica, des de la captació del vent fins a l'obtenció de potència elèctrica a través del generador, connectant aquest a la xarxa. Posteriorment, aquest primer model es simula i s'estudia el seu comportament.

A continuació, s'introdueix un convertidor estàtic de potència del tipus *Voltage Source Converter* (VSC) entre la màquina d'inducció i la xarxa elèctrica i s'implementen dues metodologies de control sobre aquest convertidor: el control Tensió-Freqüència i el Control Vectorial. Tot seguit, s'estudia el comportament cada un dels models obtinguts (un per a cada tipus de control).

Finalment, es realitza una comparativa entre els tres models estudiats. L'estudi de cada model es realitza mitjançant simulació amb un software del tipus EMTP (*ElectroMagnetic Transients Program*).

Sumari

RESUM	1
SUMARI	2
SUMARI DE FIGURES	5
SUMARI DE TAULES	10
1. GLOSSARI	11
1.1. Símbols	11
1.2. Símbols grecs	13
1.3. Subíndexs	14
1.4. Acrònims	14
2. PREFACI	15
3. INTRODUCCIÓ	17
3.1. Objectius del projecte	17
3.2. Abast del projecte	18
4. GENERALITATS DE L'ENERGIA EÒLICA	19
4.1. Estat actual de la producció d'energia eòlica	19
4.1.1. Producció d'energia eòlica a Espanya	20
4.2. Tipologia de turbines eòliques	22
4.2.1. Tipus 1: Turbina de velocitat fixa	22
4.2.2. Tipus 2: Turbina de velocitat limitada	23
4.2.3. Tipus 3: Turbina de velocitat variable amb convertidor parcial	23
4.2.4. Tipus 4: Turbina de velocitat variable amb convertidor total	24
4.3. Màquines asíncrones o d'inducció	25
4.3.1. Màquina de tipus gàbia d'esquirol	28
4.4. Convertidors estàtics de potència	29
4.4.1. Sistema <i>Back to Back</i>	30
5. MODELITZACIÓ DEL SISTEMA	31
5.1. Modelització del vent	31
5.2. Modelització de l'aerogenerador	33
5.2.1. Modelització sistema aerodinàmic	34
5.2.1.1. Criteri Potència màxima	37
5.2.2. Modelització sistema mecànic	37

5.2.3.	Modelització sistema elèctric de la màquina d'inducció	38
5.3.	Modelització d'un convertidor VSC	43
6.	METODOLOGIES DE CONTROL	45
6.1.	Connexió de l'aerogenerador directament a la xarxa.....	46
6.2.	Control del VSC del costat xarxa.....	46
6.2.1.	Disseny del PLL (<i>Phase Locked Loop</i>)	47
6.2.2.	Disseny del llaç de corrent intern	49
6.2.3.	Disseny del llaç de tensió extern.....	51
6.3.	Control Tensió-Freqüència del VSC del costat generador.....	55
6.4.	Control Vectorial del VSC del costat generador.....	57
6.4.1.	Llaç de corrent	60
7.	SIMULACIONS I RESULTATS	62
7.1.	Connexió del generador directament a la xarxa elèctrica	63
7.1.1.	Resposta davant d'un graó de vent.....	63
7.1.2.	Resposta davant d'un perfil de vent.....	65
7.2.	Control Tensió-Freqüència del VSC del costat generador.....	66
7.2.1.	Resposta davant d'un graó de vent.....	66
7.2.1.1.	Comportament de les variables de la turbina i del generador.....	66
7.2.1.2.	Comportament de la tensió del bus de continua	69
7.2.1.3.	Comportament de les variables de la xarxa elèctrica	69
7.2.2.	Resposta davant d'un perfil de vent.....	70
7.3.	Control Vectorial del VSC del costat generador.....	72
7.3.1.	Resposta davant d'un graó de vent.....	72
7.3.1.1.	Comportament de les variables de la turbina i del generador.....	72
7.3.1.2.	Comportament de les variables del bus de continua	75
7.3.1.3.	Comportament de les variables de la xarxa elèctrica	76
7.4.	Comparativa	78
7.4.1.	Resposta davant d'un graó de vent.....	78
7.4.2.	Resposta davant d'un perfil de vent.....	81
8.	PRESSUPOST DEL PROJECTE.....	83
8.1.	Recursos humans	83
8.2.	Recursos materials.....	84
8.3.	Cost total	84
9.	IMPACTE AMBIENTAL.....	85

9.1. Impacte ambiental dels parcs eòlics <i>Onshore</i>	85
9.2. Impacte ambiental dels parc eòlics <i>Offshore</i>	86
CONCLUSIONS	87
AGRAÏMENTS	88
ANNEX A	89
Transformades de Park i de Clarke.....	89
A.1. Transformada de Park	89
A.2. Transformada de Clarke	90
BIBLIOGRAFIA	92

Sumari de Figures

Figura 4.1. Capacitat de potència instal·lada acumulada d'energies renovables mundialment, Font [6].	19
Figura 4.2. Capacitat de potència d'energia eòlica instal·lada acumulada mundialment, Font [7].	20
Figura 4.3. Capacitat de potència en GW d'energia eòlica instal·lada acumulada a la UE, Font [2].	20
Figura 4.4. Estructura de la generació d'energia elèctrica peninsular durant el 2014 i 2015, Font [3].	21
Figura 4.5. Capacitat de producció d'energia eòlica instal·lada als països de la UE, Font [2].	21
Figura 4.6. Esquema de control de la Turbina eòlica de velocitat fixa, Font [8].	22
Figura 4.7. Esquema de control de la Turbina eòlica de velocitat limitada, Font [8].	23
Figura 4.8. Esquema de control de la Turbina eòlica de de velocitat variable amb convertidor parcial, Font [8].	24
Figura 4.9. Esquema de control de la Turbina eòlica de de velocitat variable amb convertidor total, Font [8].	25
Figura 4.10. Representació del punts de funcionament de la màquina d'inducció.	26
Figura 4.11. Regions de d'operació d'una màquina d'inducció, Font [13].	27
Figura 4.12. Representació d'una màquina d'inducció de tipus gàbia d'esquirol, Font [18].	29
Figura 4.13. Tecnologies de convertidors d'electrònica de potència.	30
Figura 4.14. Esquema d'un sistema Back to Back.	30
Figura 5.1. Freqüència de distribució de diferents models de vent utilitzant la distribució de Weibull amb $A_w=8$.	32
Figura 5.2. Freqüència de distribució de diferents velocitats mitjanes utilitzant la distribució de Rayleigh.	32
Figura 5.3. Perfil de vent utilitzat.	33
Figura 5.4. Model d'una turbina eòlica connectada directament a la xarxa, Font [22].	33
Figura 5.5. Relació entre els paràmetres de la turbina λ i C_p per a $\theta=0$.	36
Figura 5.6. Model i simplificació d'un convertidor VSC.	43

Figura 5.7. Model equivalent de la part alterna del convertidor VSC	44
Figura 6.1. Esquema de l'aerogenerador connectat directament a la xarxa.	45
Figura 6.2. Esquema de l'aerogenerador connectat a la xarxa a través d'un sistema Back to Back.....	45
Figura 6.3. Esquema detallat de l'aerogenerador connectat directament a la xarxa.	46
Figura 6.4. Esquema de control d'un convertidor VSC.	47
Figura 6.5. Esquema de la PLL del convertidor VSC.....	48
Figura 6.6. Resposta de la variable ω_{PLL} (blau) de la PLL a l'iniciar el sistema envers la freqüència angular real, ω_{real} (blau), de la xarxa.	49
Figura 6.7. Esquema del llaç intern de corrent del convertidor VSC del costat xarxa.	50
Figura 6.8. Resposta de les components i_{zq} (blava) i i_{zd}^* (vermella) del llaç de corrent davant d'un canvi de consigna de i_{zq}^* (blava discontinua) i i_{zd}^* (vermella discontinua).....	51
Figura 6.9. Esquema del llaç de tensió extern del convertidor VSC del costat xarxa.....	52
Figura 6.10. Esquema simplificat del bus DC del convertidor VSC.....	53
Figura 6.11. Evolució del valor de tensió del bus DC (blau) durant un canvi en la consigna de referència, EDC^* (vermell).....	54
Figura 6.12. Evolució del valor de tensió del bus DC (blau) i del valor de referència de tensió consigna (vermell) durant un graó de potència elèctrica de 500 W a 100 W....	54
Figura 6.13. Esquema del control Tensió-Freqüència del VSC connectat al generador.	55
Figura 6.14. Esquema del control Vectorial del VSC connectat al generador.....	58
Figura 6.15. Esquema de control del llaç de corrent del control Vectorial del VSC del costat generador.....	61
Figura 7.1. Perfil de vent utilitzat durant les simulacions.....	62
Figura 7.2. Potència mecànica de la turbina (blau) i Potència elèctrica generada (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	63
Figura 7.3. Velocitat angular de la turbina (figura superior) i del generador (figura inferior) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.....	64
Figura 7.4. Evolució dels paràmetres λ (figura superior) i C_p (figura inferior) de la turbina en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.....	64
Figura 7.5. Potència mecànica de la turbina (blau) i Potència elèctrica generada	

(vermell) en aplicar el perfil de vent com a entrada.	65
Figura 7.6. Velocitat de rotació del rotor del generador en aplicar el perfil de vent com a entrada.	65
Figura 7.7. Potència elèctrica generada (vermell) i potència mecànica de la turbina (blau) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	66
Figura 7.8. Velocitat de rotació de la turbina (figura superior) i velocitat de rotació del rotor de la màquina d'inducció (figura interior) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	67
Figura 7.9. Evolució del paràmetre λ de la turbina (vermell) respecte al seu valor òptim λ_{opt} (blau) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	67
Figura 7.10. Components de tensió V_{sd} (vermell) i V_{sq} (blau). en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	68
Figura 7.11. Evolució de la freqüència angular elèctrica, ω_e , en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	68
Figura 7.12. Components de corrent I_{sq} (blau) i I_{sd} (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	69
Figura 7.13. Evolució del valor de tensió del bus DC (blau) i del valor de referència de tensió consignat (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	69
Figura 7.14. Evolució de la potència elèctrica de la xarxa en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	70
Figura 7.15. Evolució de les components de corrent I_{zq} (blau) i I_{zd} (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	70
Figura 7.16. Evolució de la potència elèctrica generada (vermell) i de la potència mecànica de la turbina (blau) en aplicar el perfil de vent com a entrada.	71
Figura 7.17. Evolució de la potència elèctrica injectada a la xarxa elèctrica en aplicar el perfil de vent com a entrada.	71
Figura 7.18. Evolució de la freqüència angular elèctrica en aplicar el perfil de vent com a entrada.	71
Figura 7.19. Evolució de la velocitat de rotació del rotor (línia contínua) i de la velocitat de rotació òptima del rotor (línia discontinua) en aplicar el perfil de vent com a entrada.	72
Figura 7.20. Evolució de la potència elèctrica generada (vermella), de la potència mecànica de la turbina (blava contínua) i del seu valor òptim (blava discontinua) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	73

Figura 7.21. Evolució del valor de consigna de la component d del flux del rotor, $\lambda_{rd} *$, en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.....	73
Figura 7.22. Evolució del parell electromecànic (vermell) i del parell electromecànic òptim (blau) de la màquina d'inducció en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.....	74
Figura 7.23. Evolució de la velocitat de rotació del rotor en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.....	74
Figura 7.24. Components de tensió V_{sd} (vermell) i V_{sq} (blau). en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.....	75
Figura 7.25. Evolució de les components I_{sd} (vermella de la figura superior), $I_{sd} *$ (blava de la figura superior) i I_{sq} .(vermella de la figura inferior) i $I_{sq} *$ (blava de la figura inferior) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.....	75
Figura 7.26. Evolució del valor de tensió del bus DC (blau) i del valor de referència de tensió consignat (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.	76
Figura 7.27. Evolució de la potència elèctrica de la xarxa en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.....	76
Figura 7.28. Evolució de les components de corrent I_{zq} (blau) i I_{zd} (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.....	77
Figura 7.29. Evolució de la potència elèctrica generada (vermell) i de la potència mecànica de la turbina (blau) en aplicar el perfil de vent com a entrada.	77
Figura 7.30. Evolució de la freqüència angular elèctrica de la màquina d'inducció en aplicar el perfil de vent com a entrada.	78
Figura 7.31. Evolució de la velocitat de rotació del rotor de la màquina d'inducció en aplicar el perfil de vent com a entrada.	78
Figura 7.32. Evolució de la potència elèctrica generada dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar una entrada graó de 9 a 11 m/s.	79
Figura 7.33. Evolució de la potència mecànica de la turbina dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar una entrada graó de 9 a 11 m/s.	79
Figura 7.34. Evolució del paràmetre C_p de la turbina dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar una entrada graó de 9 a 11 m/s.....	80
Figura 7.35. Evolució de la velocitat del rotor del generador dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb	

Control Vectorial (vermell) en aplicar una entrada graó de 9 a 11 m/s. 80

Figura 7.36. Evolució de la freqüència angular elèctrica de la màquina d'inducció dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar una entrada graó de 9 a 11 m/s. 81

Figura 7.37. Evolució de la potència elèctrica generada dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar el perfil de vent com a entrada. 81

Figura 7.38. Evolució de la potència mecànica de la turbina dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en el perfil de vent com a entrada. 82

Figura 7.39. Evolució Paràmetre C_p de la turbina mecànica de la turbina dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar el perfil de vent com a entrada. 82

Sumari de Taules

Taula 5.1. Valors paràmetres físics de l'aerogenerador.	36
Taula 5.2. Valor dels paràmetres de la màquina d'inducció.	42
Taula 6.1. Paràmetres i valors utilitzats en la PLL.	49
Taula 6.2. Paràmetres i valors utilitzats en el llaç intern de corrent del VSC del costat xarxa.	51
Taula 6.3. Valors utilitzats del paràmetres del llaç de tensió extern.	53
Taula 8.1. Pressupost dels Recursos humans.	83
Taula 8.2. Pressupost dels Recursos materials.	84
Taula 8.3. Pressupost total del projecte.	84

1. Glossari

1.1. Símbols

A	Àrea escombrada per la turbina
A_w	Paràmetre d'escala de la funció de distribució de Weibull
C	Capacitat del condensador del bus de contínua del sistema <i>Back to Back</i>
C_p	Coefficient de potència
$C_{p_{opt}}$	Coefficient de potència òptim
$c_{1...9}$	Paràmetres propis de la turbina eòlica.
E_c	Energia cinètica
E_{DC}	Tensió del bus de contínua del sistema <i>Back to Back</i>
f	Freqüència elèctrica de la xarxa
f_s	Freqüència del voltatge subministrat a l'estator de la màquina d'inducció
f_{nom}	Freqüència nominal de la màquina d'inducció
f_{opt}	freqüència òptima de la tensió induïda a l'estator obtinguda a partir del <i>Tip-speed ratio òptim</i>
$G_c(s)$	Funció de transferència del controlador
I_{DC}	Intensitat que entra al condensador del bus DC.
I_{DCI}	Intensitat de la font de corrent
I_{DCm}	Intensitat que circula pel bus DC
i_r	Corrents del rotor.
i_s	Corrents de l'estator
J_t	Inèrcia de la turbina
J_{tot}	Inèrcia total del sistema vista des de l'eix lent
K	Pendent de la recta Tensió-Freqüència de la regió lineal de la màquina d'inducció
K_{Cp}	Coefficient que relaciona el parell òptim amb el quadrat de la velocitat de rotació
K_f	Controlador de la PLL
k_i	Constant integral del controlador

k_p	Constant proporcional del controlador
k_w	Paràmetre de forma de la funció de distribució de Weibull
L_{ls}	Inductància de dispersió d'estator
L_{lr}	Inductància de rotor
L_{ms}	Inductància d'un debanat d'estator deguda al flux que travessa l'entreferro
L_{mr}	Inductància d'un debanat de rotor deguda al flux que travessa l'entreferro
l_l	Inductància d'acoblament
m	massa d'aire
\dot{m}	cabal màssic d'una massa d'aire
N	Número d'espires
P	Potència activa
P_{AC}	Potència de la banda alterna del convertidor
P_{nom}	Potència nominal de la màquina d'inducció (SCIG)
P_e	Potència elèctrica generada
P_t	Potència mecànica de la turbina
P_{vent}	Potència cinètica del vent
p	Nombre de parelles de pols de la màquina d'inducció
Q	<i>Potència reactiva</i>
R	<i>Radi de la turbina</i>
r_l	Resistència de la inductància d'acoblament
r_r	Resistència dels debanats de rotor
r_s	Resistència dels debanats d'estator
s	Slip o paràmetre de lliscament de la màquina d'inducció
V_{nom}	Tensió nominal de la màquina d'inducció
V_s	Tensió induïda a l'estator
\bar{v}	Velocitat mitjana del vent
v_l	Voltatges AC del convertidor
v_r	Tensió del rotor
v_s	Tensió de l'estator

v_{vent}	Velocitat del vent.
v_z	Tensió de la xarxa elèctrica

1.2. Símbols grecs

ξ	Constant de la bobina
Γ_e	parell electromecànic del generador
Γ_m	parell de la màquina d'inducció
Γ_t	Parell de la turbina
Γ_{eopt}	parell electromecànic òptim
Γ_{top}	Parell de la turbina òptim
ν	Relació de transmissió
λ	<i>Tip-speed ratio</i>
λ_{opt}	<i>Tip-speed ratio</i> òptim
λ_r	Flux concatenat del rotor
λ_s	Flux concatenat de l'estator
ω_e	Velocitat angular elèctrica
ω_g	Velocitat de rotació del generador
ω_m	Velocitat de rotació de la màquina d'inducció
ω_s	Velocitat de sincronisme de la màquina d'inducció
ω_t	Velocitat de gir de la turbina
ψ_s	Flux magnètic de l'estator.
ρ	Densitat de l'aire
τ	constant de temps
θ	Angle de pitch
θ_e	Angle de la xarxa elèctrica
$\hat{\theta}_e$	Angle estimat de la xarxa elèctrica
θ_r	Angle del rotor vist pel circuit elèctric.

1.3. Subíndexs

<i>abc</i>	En la referència de les magnituds trifàsiques sinusoidals
<i>DC</i>	Referent al llaç de tensió extern
<i>int</i>	Referent al llaç intern
<i>PLL</i>	Referent a la PLL
<i>qd0</i>	En la referència qd0

1.4. Acrònims

AC	Alternatig Current (Corrent Altern)
DC	Direct Current (Corrent Continu)
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
HVDC	High Voltage DC Current
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IMC	Internal Model Control
LCC	Line Commutated Converter
PI	Controlador amb part proporcional i integral
PLL	Phase Locked Loop
PMSG	Permanent Magnets Synchronous Generator
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator
UE	Unió Europea
VSC	Voltage Source Converter
WRIG	Wound Rotor Induction Generator
WRIG	Wound Rotor Synchronous Generator

2. Prefaci

Un dels grans problemes que s'ha d'afrontar en l'actualitat és el canvi climàtic. Des de fa uns anys la població mundial està patint les conseqüències d'utilitzar combustibles fòssils en excés. A més de ser contaminants, aquests combustibles són finits. Per evitar agreujar les conseqüències que aquests produeixen, i, alhora, reduir el seu consum com a principal eina per a la generació d'energia elèctrica, la utilització d'energies renovables és una bona alternativa. Cada cop són més els països que aposten per les energies renovables com a fonts de generació d'energia elèctrica, entre elles, l'energia eòlica.

A dia d'avui, l'energia eòlica és l'energia renovable més aprofitada i actualment subministra més del 3% del consum mundial d'electricitat [1]. Això es veu reflectit en el fet que a l'any 2015, la capacitat instal·lada a la Unió Europea era de 141,6 GW [2]. A Espanya, l'energia eòlica també ha anat guanyant terreny, esdevenint la primera energia renovable en la producció d'energia elèctrica [3]. Aquest fet ha sigut la motivació d'encarar aquest treball a l'energia eòlica, davant qualsevol altra font d'energia renovable.

Des de 1887, any en què es va construir la primera turbina eòlica a Escòcia [4], la tecnologia per generar energia elèctrica a partir d'aerogeneradors ha evolucionat amb l'objectiu de maximitzar l'aprofitament d'energia provinent del vent. Actualment, una turbina eòlica pot produir fins a 8 MW de potència [5]. Existeixen diferents tipus de turbines eòliques amb diferents tipus de màquines (màquines síncrones i màquines asíncrones) i diferents metodologies de control que permeten maximitzar la potència extreta del vent.

3. Introducció

Aquest treball recull la modelització, el control i la simulació d'un generador eòlic mitjançant diverses metodologies de control. Primerament, es realitza la modelització d'una turbina eòlica connectada directament a la xarxa sense cap element d'electrònica de potència. Seguidament s'introdueix un convertidor estàtic de potència, en el sistema anterior, format per dos convertidors de tipus *Voltage Source Converter* (VSC) i es realitzen dos controls sobre el sistema. Aquests són: el control Tensió-Freqüència i el control Vectorial. El generador emprat per a la modelització i simulació del sistema és un generador d'inducció (asíncron) de tipus gàbia d'esquirol.

En el capítol 4 es fa una breu introducció a la situació actual de l'energia eòlica, els tipus de turbines eòliques i a la tecnologia d'electrònica de potència utilitzada actualment. A continuació, en el capítol 5, es modelitzen els sistemes que formen l'aerogenerador i es modelitza un convertidor VSC. Seguidament, en el capítol 6, es dissenya el control del convertidor VSC, així com de les tres metodologies de control aplicades sobre l'aerogenerador. En el capítol 7 es presenten els resultats de les simulacions al aplicar cada un dels tres controls. A continuació, en els capítols 8 i 9, s'exposen l'estudi d'impacte ambiental i el pressupost del projecte. Finalment s'exposen les conclusions del treball.

3.1. Objectius del projecte

Un dels objectius principals d'aquest treball és modelitzar els diversos sistemes que formen part d'un aerogenerador (part aerodinàmica, part mecànica i part elèctrica), incloent també els convertidors VSC.

D'altra banda, un altre dels objectius principals és dissenyar i analitzar el control de l'aerogenerador des del punt de vista dels convertidors VSC.

Els models finals obtinguts podran ser inclosos en sistemes més grans de xarxes, com per exemple, parc eòlics *offshore* connectats per HVDC (*High-Voltage Direct Current*) i mirar com es comporta el sistema davant de diferents contingències del sistema.

3.2. Abast del projecte

L'abast del treball inclou la modelització d'una turbina eòlica. També inclou la modelització del convertidor VSC mitjançant models promitjats. A més, l'abast inclou el disseny i l'anàlisi diferents metodologies diferents per al seu control.

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

4. Generalitats de l'energia eòlica

En l'apartat 4.1 es fa referència a l'estat actual de l'energia eòlica, començant per la producció mundial i acabant per la de l'estat espanyol. En l'apartat 4.2 s'expliquen els diferents tipus de turbines existents actualment depenent del control aplicat sobre aquestes. En l'apartat 4.3 es defineix la màquina asíncrona o d'inducció, concretament la de tipus gàbia d'esquirol. Finalment, en l'apartat 4.4 s'introdueixen diferents tipus de convertidors de potència.

4.1. Estat actual de la producció d'energia eòlica

L'energia eòlica està guanyant terreny en l'àmbit de producció d'energia elèctrica i s'ha posicionat com una de les líders en el sector de les energies renovables. Figura 4.1 mostra l'evolució de la capacitat instal·lada d'energies renovables en el període comprès entre l'any 2000 i l'any 2014. Durant aquest període, s'aprecia com aquesta capacitat ha augmentat exponencialment, concretament l'energia eòlica és la que més augment presenta.

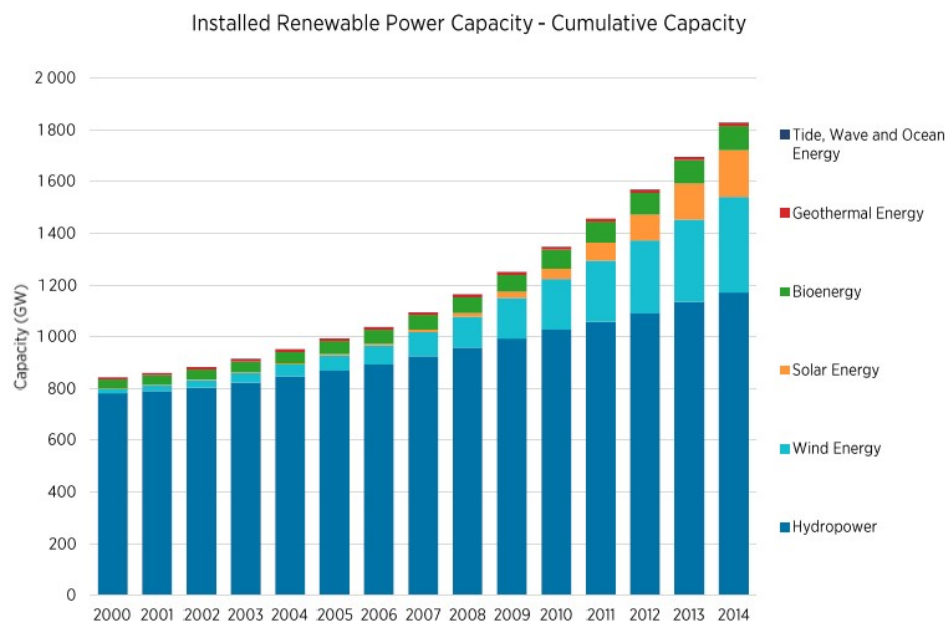


Figura 4.1: Capacitat de potència instal·lada acumulada d'energies renovables mundialment, Font [6].

Per ser més específics, en Figura 4.2, es pot comprovar que la capacitat instal·lada ha passat de ser de 17,4 GW a l'any 2000, a ser de 432,833 GW al 2015 [7], representant un augment de 415,483 GW.

Concretament, l'evolució d'aquesta energia a la Unió Europea és mostra a la Figura 4.3. La capacitat instal·lada ha passat de 12,9 GW a l'any 2000, a 141,6 GW a l'any 2015. A l'any 2015 hi va haver un augment del 9% respecte a la capacitat instal·lada de l'any anterior, el 2014.

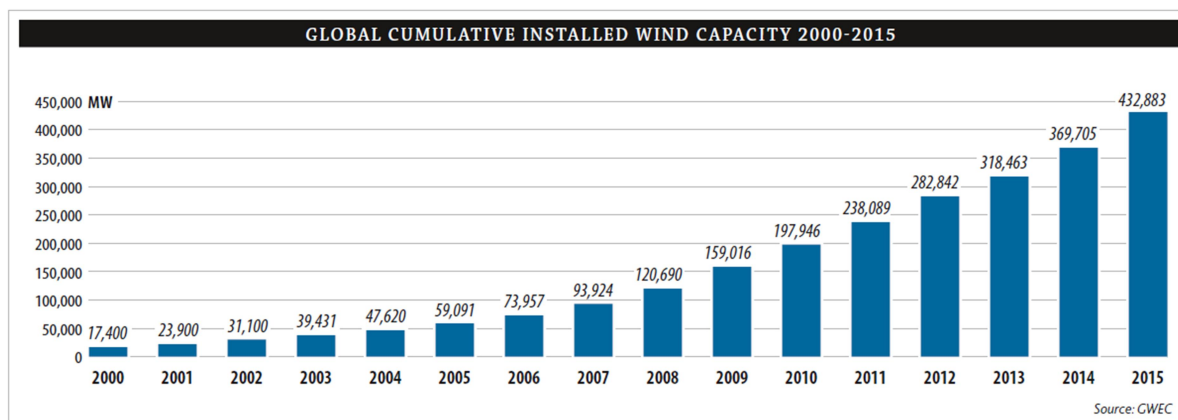


Figura 4.2. Capacitat de potència d'energia eòlica instal·lada acumulada mundialment, Font [7].

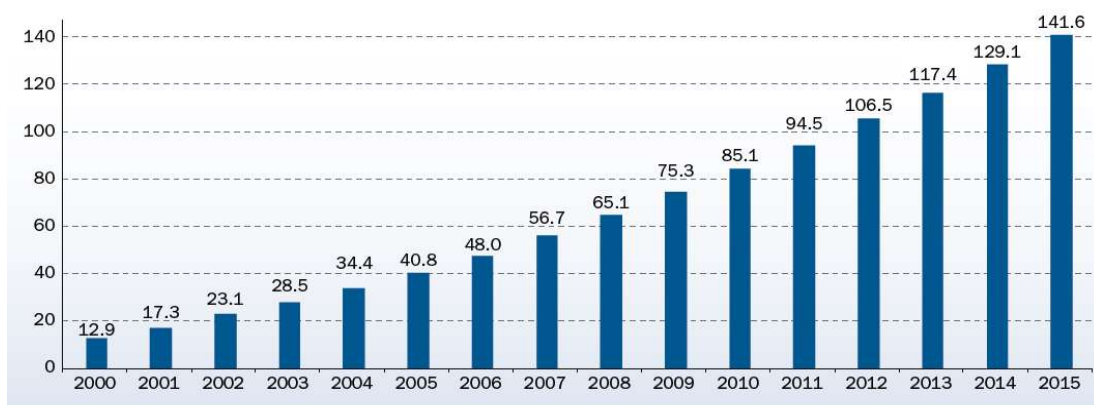


Figura 4.3. Capacitat de potència en GW d'energia eòlica instal·lada acumulada a la UE, Font [2].

4.1.1. Producció d'energia eòlica a Espanya

Espanya també aposta per energies renovables, tal com s'aprecia en la Figura 4.4. Estructura de la generació d'energia elèctrica peninsular durant el 2014 i 2015, Font [3]. A l'any 2015 les energies renovables suposaven un 36,9% del total de la generació d'energia elèctrica a Espanya [3]. L'energia renovable amb més pes dins d'aquest percentatge és l'energia eòlica a la que li correspon un 19% d'aquest percentatge, o el que és el mateix, li correspon un percentatge del 51,4% dins l'àmbit de les energies renovables.

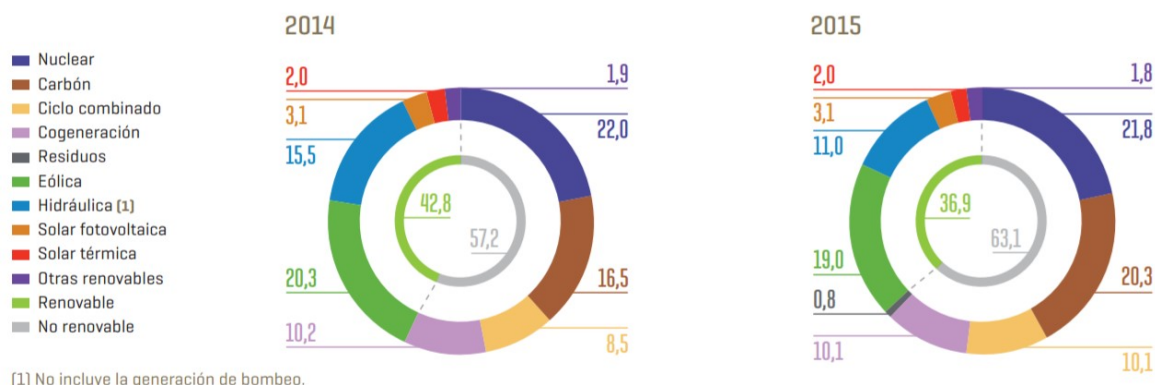


Figura 4.4. Estructura de la generació d'energia elèctrica peninsular durant el 2014 i 2015, Font [3].

Actualment Espanya és el segon país de la Unió Europea amb més capacitat instal·lada amb 23 GW (Figura 4.5), per darrere d'Alemanya que té una capacitat instal·lada molt superior a la resta de països de la UE.

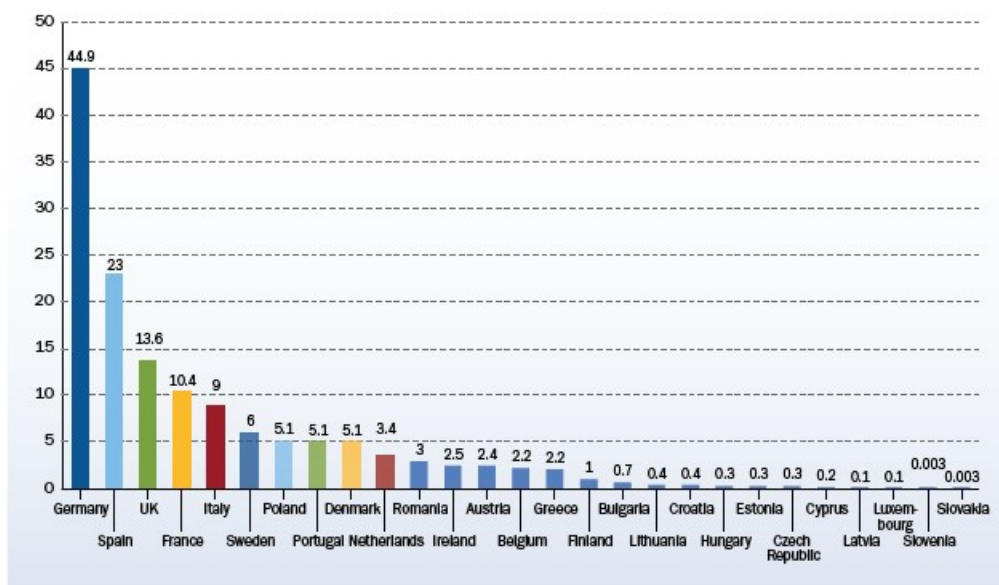


Figura 4.5. Capacitat de producció d'energia eòlica instal·lada als països de la UE, Font [2].

4.2. Tipologia de turbines eòliques

El principi d'operació d'una turbina eòlica es basa en dos processos: el de conversió de l'energia cinemàtica del vent a energia mecànica i el de convertir aquesta energia mecànica en energia elèctrica. Depenent del control de la turbina sobre diferents paràmetres com la velocitat i la potència mecànica aquestes poden classificar-se en 4 tipus 0:

- Tipus 1: Turbina de velocitat fixa
- Tipus 2: Turbina de velocitat limitada
- Tipus 3: Turbina de velocitat variable amb convertidor parcial
- Tipus 4: Turbina de velocitat variable amb convertidor total

4.2.1. Tipus 1: Turbina de velocitat fixa

La turbina de velocitat fixa era la més utilitzada en la dècada dels 80 i 90 [9]. Aquesta està implementada per un rotor de tres pales, una caixa de canvis i un generador de tipus gàbia d'esquirol o *Squirrel Cage Induction Generator* (SCIG). El SCIG està connectat directament a la xarxa elèctrica mitjançant un transformador seguint l'esquema de la Figura 4.6. Aquest transformador està present en totes les tipologies de turbines per adaptar les tensions de treball del generador amb les tensions de la xarxa.

Aquesta tipologia és operada al voltant de la velocitat de sincronisme, amb la velocitat de la turbina fixada amb la freqüència de la xarxa elèctrica, on la màquina d'inducció treballa com a generador.

Durant l'operació, el generador de tipus gàbia d'esquirol necessita absorbir potència reactiva per a magnetitzar-se, que és aportada mitjançant un banc capacitiu. Per controlar els corrents a l'arrencada, aquestes màquines normalment inclouen un sistema d'arrencada suau o *soft-starter* basat en tiristors.

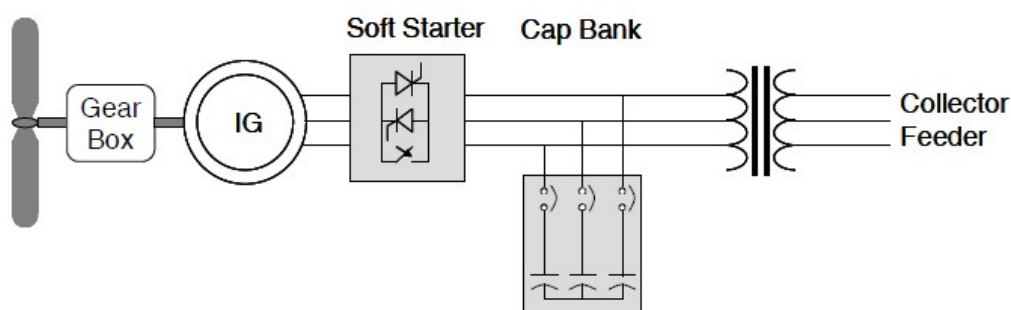


Figura 4.6. Esquema de control de la Turbina eòlica de velocitat fixa, Font 0.

4.2.2. Tipus 2: Turbina de velocitat limitada

La turbina de velocitat limitada va aparèixer a la dècada dels 90 [9]. Aquest tipus de turbines es caracteritzen per tenir un generador d'inducció de tipus rotor bobinat o *Wound Rotor Induction Generator (WRIG)*. Aquesta tecnologia és semblant a l'anterior, però introdueix resistències variables al rotor (Figura 4.7). Amb la variació d'aquesta resistència es pot variar el paràmetre de lliscament o *Slip* (s) i, així, exercir un control sobre la velocitat, permetent una variació de fins a un 10% en el seu valor. D'aquesta manera s'aconsegueix fer girar la turbina a una velocitat més pròxima a l'òptima en funció de la velocitat del vent. Aquesta millora, però, s'aconsegueix a partir de resistències que comporten fortes pèrdues elèctriques 0.

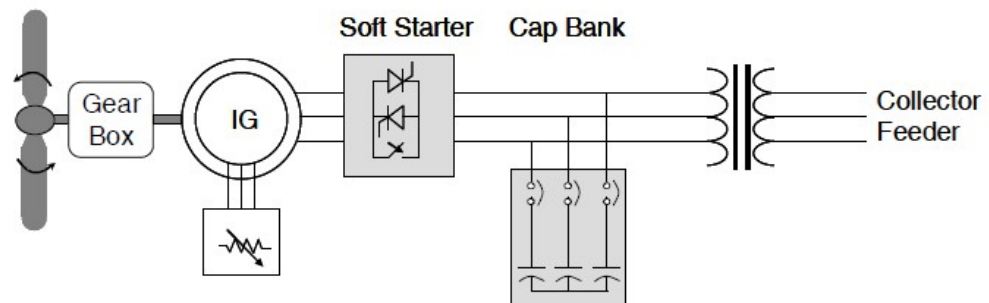


Figura 4.7. Esquema de control de la Turbina eòlica de velocitat limitada, Font 0.

4.2.3. Tipus 3: Turbina de velocitat variable amb convertidor parcial

Aquest tipus de turbines van aparèixer amb la finalitat d'augmentar el rang de funcionament de les turbines eòliques [9]. El Tipus 3 consisteix en connectar el generador de tipus rotor bobinat directament a la xarxa a través de l'estator, mentre que el rotor es connecta a un convertidor parcial que l'enllaça el amb la xarxa elèctrica seguint l'esquema de la Figura 4.8. El generador resultant de realitzar aquesta operació es l'anomenat Generador d'inducció doblement alimentat o *Doubly Fed Induction Generator (DFIG)*.

En referència al convertidor parcial utilitzat, aquest és un sistema anomenat *Back to Back*, que està compost per dos convertidors VSC. Aquesta configuració permet controlar la potència activa i reactiva per separat i, d'aquesta manera, optimitzar la potència extreta del vent, sense introduir un convertidor del 100% de la potència de la màquina.

La part de la xarxa es controla independentment de la part del motor, permetent obtenir una millor capacitat *ride-through*, que té com a finalitat que el generador no es desconnecti quan hi hagi una fallida a la xarxa 0.

Tot i això, per extreure potència del rotor es necessiten anells de lliscament que poden causar problemes en el funcionament de la màquina.

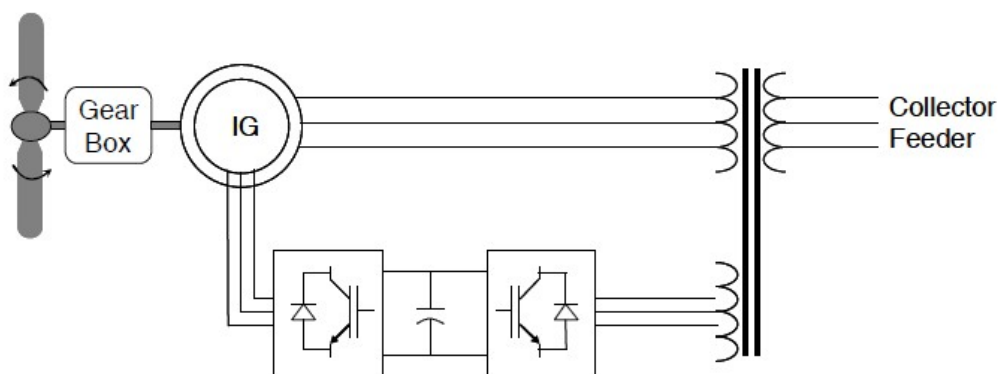


Figura 4.8. Esquema de control de la Turbina eòlica de de velocitat variable amb convertidor parcial, Font 0.

4.2.4. Tipus 4: Turbina de velocitat variable amb convertidor total

La turbina de velocitat variable amb convertidor total maximitza el rang de funcionament de la velocitat de la màquina respecte els altres tres tipus. A diferència de les tres tipologies anteriors de turbines que només permeten introduir un generador d'inducció (asíncron), la turbina eòlica de Tipus 4 permet introduir tant un generador asíncron com un de síncron. En concret, els generadors en aquest tipus de turbines poden ser de gàbia d'esquirol (SCIG), de rotor bobinat (WRSG) o d'imants permanents (PMSG) [9].

En aquest tipus de turbines el generador està completament aïllat de la xarxa elèctrica, permetent el control total de la velocitat d'aquest. Aquest aïllament es realitza mitjançant la connexió de dos convertidors del tipus VSC *Back to Back* de plena potència entre el transformador i l'estator, seguint l'esquema de la Figura 4.9. La potència reactiva necessària pel funcionament de la màquina també pot ser aportada per la banda del convertidor.

La configuració *Back to Back* permet controlar la potència activa i reactiva per separat i, d'aquesta manera, optimitzar la potència extreta del vent.

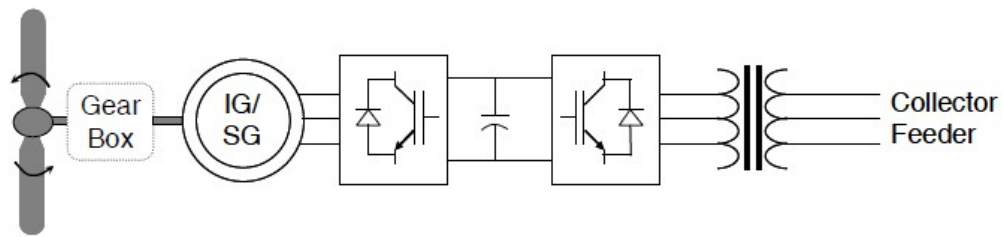


Figura 4.9. Esquema de control de la Turbina eòlica de de velocitat variable amb convertidor total, Font 0.

4.3. Màquines asíncrones o d'inducció

Les màquines asíncrones, també anomenades màquines d'inducció, es caracteritzen per tenir una robustesa elevada. Realitzen la seva funció durant molts anys amb un mínim manteniment i s'adapten a diferents requeriments de producció [10]. Aquests motors trifàsics són els més estesos a nivell industrial.

El primer motor d'inducció va ser un motor bifàsic, creat per Galileo Ferraris l'any 1885, el qual tenia una eficiència inferior al 50%. No va ser fins l'any 1889, que Michael Dolivo-Dobrowolsky, a partir de les idees de Tesla i Ferraris, inventa el primer motor trifàsic d'inducció [11].

La màquina d'inducció està formada per una part fixa, anomenada estator i, una part mòbil, anomenada rotor. Depenent del tipus de configuració del rotor aquestes màquines poden ser de dos tipus: de gàbia d'esquirol i de rotor bobinat. La màquina utilitzada en aquest treball és una màquina de tipus de gàbia d'esquirol, la qual s'explica a continuació, en l'apartat 4.3.1.

Aquests tipus de màquines reben el nom d'asíncrones, ja que tenen una velocitat de funcionament inferior a la velocitat de sincronisme quan treballen com a motor i, una velocitat de funcionament superior a la de sincronisme quan treballen com a generador. La velocitat de sincronisme es defineix com la velocitat de rotació del camp magnètic en una màquina rotatòria. El comportament de la màquina d'inducció utilitzada en aquest treball, mantenint els paràmetres de tensió i freqüència constants, s'il·lustra a la Figura 4.10. Els paràmetres d'aquesta màquina s'han agafat de la Taula 5.2 de l'apartat 5.2.3.

D'aquesta manera aquestes es poden utilitzar per a la generació d'energia elèctrica. Seguint aquest principi, aquestes màquines s'han utilitzat en els diferents models de turbines eòliques des de la turbina de velocitat fixa, a la turbina de velocitat variable amb convertidor total [12].

En una màquina d'inducció, la velocitat de rotació de la màquina es pot obtenir a partir de la següent equació:

$$\omega_m = \omega_s(1 - s)$$

On,

ω_m és la velocitat de rotació del motor.

s és el paràmetre de lliscament o *Slip*.

ω_s és la velocitat de sincronisme.

La velocitat de sincronisme és defineix com:

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p}$$

On,

f és la freqüència elèctrica.

p és el número de parell de pols de la màquina.

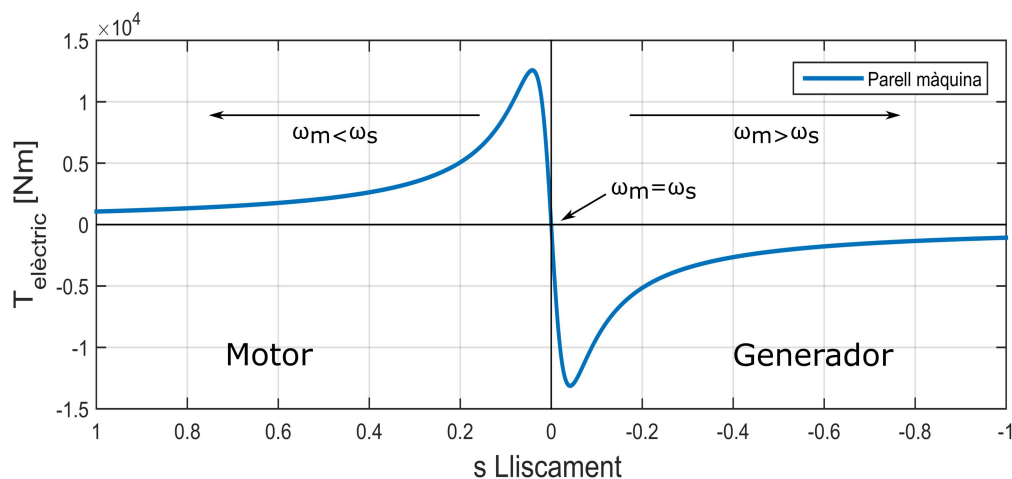


Figura 4.10. Representació del punts de funcionament de la màquina d'inducció.

Actualment, per a realitzar un control sobre la màquina elèctrica, els paràmetres de tensió i freqüència de l'estator es van variant al llarg de l'operació. Així doncs, s'obté el regim d'operació mostrat a la Figura 4.11.

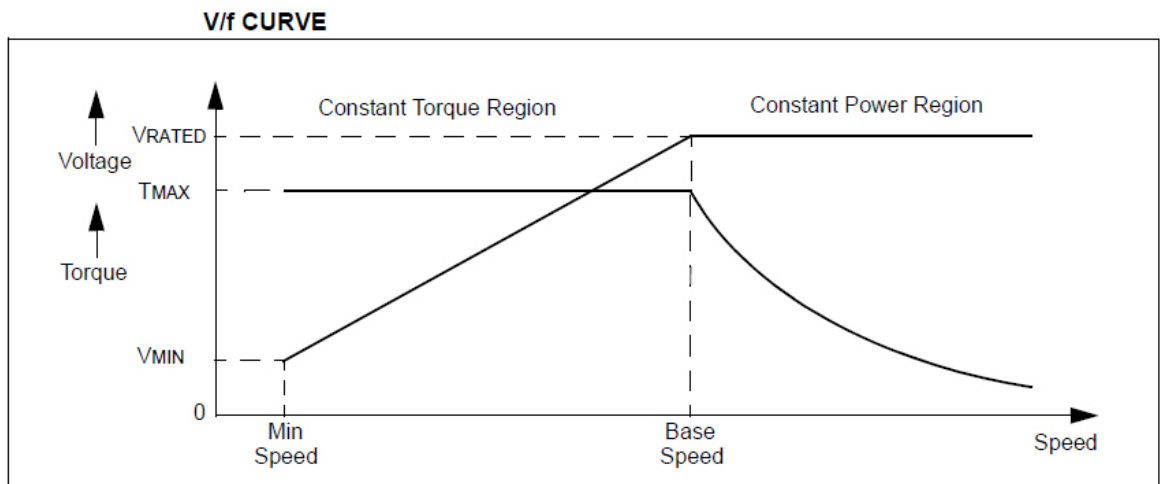


Figura 4.11. Regions de d'operació d'una màquina d'inducció, Font [13].

A la Figura anterior es pot veure que existeixen tres regions d'operació. Aquests són [14]:

- **Regió de compensació de la caiguda de tensió de l'estator.** Aquesta regió està compresa entre 0 i f_{\min} (*Min Speed* a la figura anterior). En aquest interval, la relació V-F no és lineal, ja que es necessita un voltatge per compensar la caiguda de tensió de l'estator.
- **Regió Lineal.** Aquesta regió correspon a l'interval comprès entre el valor f_{\min} i f_{nom} . El valor f_{\min} es pot calcular a partir de l'estudi de la màquina en estat estacionari, mentre que f_{nom} (*Base Speed* a la figura anterior), és la freqüència nominal de la màquina. En aquesta regió la relació entre la tensió i la freqüència es lineal i, el pendent d'aquesta recta es pot expressar com:

$$K = \frac{V_{\text{nom}}}{f_{\text{nom}}}$$

K és el pendent de la recta.

V_{nom} és la tensió nominal.

f_{nom} és la freqüència nominal.

D'altra banda, en una màquina d'inducció, la relació entre els paràmetres de tensió, freqüència i flux ve definida per l'equació descrita a continuació, on s'observa que el flux es manté constant quan el quocient V/f és de valor constant [15]:

$$\frac{V_s}{f_s} = 4.44 \cdot N \cdot \psi_s \cdot \xi$$

On,

V_s és la tensió induïda a l'estator.

f_s és la freqüència del voltatge subministrat.

N és el número d'espines.

ψ_s és el flux magnètic de l'estator.

ξ és la constant de la bobina.

Per tant, en la regió lineal el flux es manté constant, provocant que el parell electromecànic sigui independent a canvis en la freqüència, obtenint una corba com la il·lustrada a la Figura 4.10.

- **Regió de debilitament de camp.** Per valors superiors al valor de la f_{nom} , la màquina es troba treballant en la regió de debilitament de camp. En aquesta regió, la freqüència segueix augmentant, però la tensió queda fixada al valor nominal, V_{nom} .

D'altra banda, en aquesta regió, tant el parell electromotriu com el flux disminueixen respecte al valor de la zona lineal.

Així doncs, a l'hora de realitzar els posteriors controls, s'ha de tenir en compte la regió d'operació en la que es troba la màquina en cada instant, sobretot si es tracta de la regió lineal o de la regió de debilitament de camp. No s'ha considerat la regió de compensació de la caiguda de tensió de l'estator en el disseny del control, ja que en cap moment es fa treballar la màquina d'inducció a valors tant baixos de tensió i freqüència.

4.3.1. Màquina de tipus gàbia d'esquirol

El rotor d'aquesta màquina consisteix en un nucli cilíndric laminat envoltat per una sèrie de conductors metàl·lics (coure i alumini) disposats paral·lelament entre ells. Aquests conductors tenen un dels seus extrems curtcircuitats per uns anells metàl·lics, provocant una semblança amb una gàbia d'esquirol i, per això, rep aquest nom [16]. El nucli cilíndric es compon de material metàl·lic, aconseguint, així, un sistema n-fàsic de conductors situat a l'interior del camp magnètic giratori creat per l'estator. A la Figura 4.12 es mostra la representació de l'estator i el rotor d'una màquina de gàbia d'esquirol [17].

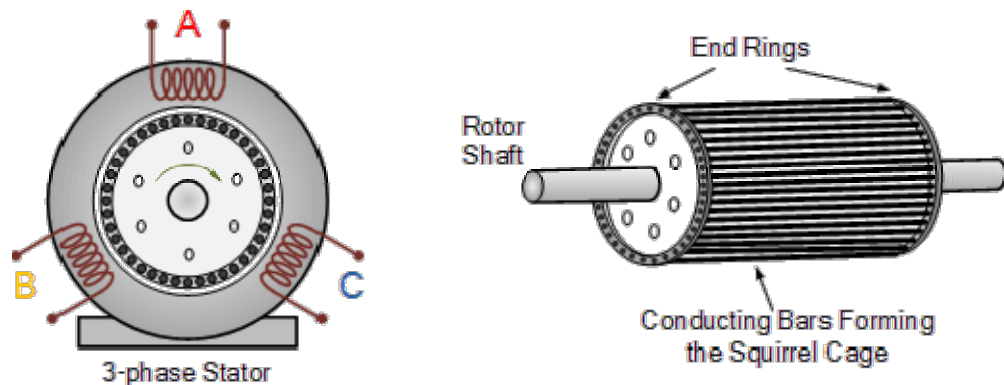


Figura 4.12. Representació d'una màquina d'inducció de tipus gàbia d'esquirol, Font [18].

És important notar que els anells estan curtcircuitats permanentment impossibilitant l'addició de resistències externes en sèrie al circuit del rotor.

Aquesta màquina és molt utilitzada degut a la senzillesa en el procés de fabricació i la robustesa que presenta un cop instal·lada en un circuit elèctric.

4.4. Convertidors estàtics de potència

Fins al 1997, els convertidors estàtics de potència més utilitzats eren els *Line Commutated Converters* (LCC), basats en tiristors. Aquests dispositius, però, tot i ser madurs i fiables, presenten una sèrie d'inconvenients. En primer lloc, es pot controlar el seu tancament, però no la seva obertura, que es realitza mitjançant una xarxa d'alterna[19]. Aquest fet implica que aquests convertidors sempre necessiten una xarxa de corrent altern (AC) per funcionar. Per últim, no permeten el control de potència activa i potència reactiva per separat degut al fet de tenir un únic grau de llibertat [19].

Aquests convertidors actuen com a font de corrent i la intensitat de contínua sempre té el mateix sentit, però no el voltatge, que pot anar en els dos sentits (Figura 4.13).

Actualment, els convertidors estàtics més implementats són els VSC (*Voltage Source Converter*), basats en IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*), que sí que permeten ser tant oberts com tancats quan es desitja. Amb aquesta opció s'obté un grau de llibertat més, que permetrà, per exemple, realitzar el control de la potència activa i reactiva independentment [19].

Aquest tipus de convertidor actua, a diferència del LCC, com a font de tensió, permetent que el corrent vagi en dos sentits, però el voltatge només en un (Figura 4.13).

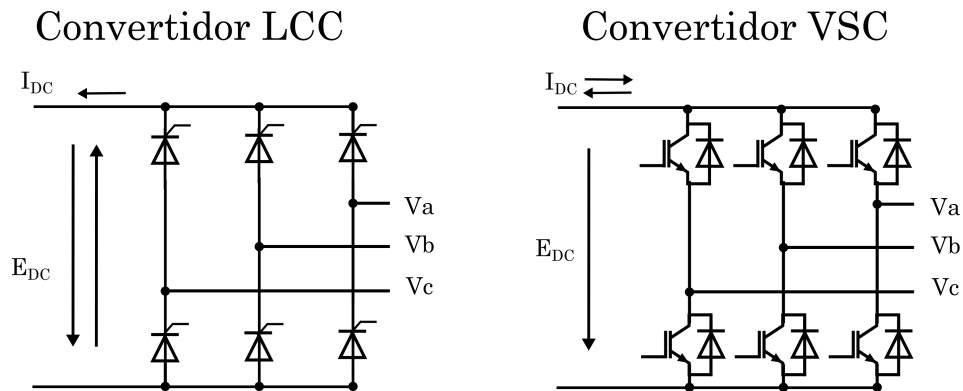


Figura 4.13. *Tecnologies de convertidors d'electrònica de potència.*

Així doncs, en aquest treball en la modelització dels sistemes, els convertidor utilitzats són de tipus VSC.

4.4.1. Sistema *Back to Back*

El sistema *Back to Back* es basa en la unió de dos convertidors estàtics de potència mitjançant el bus de contínua, seguint l'esquema de la Figura 4.14. D'aquesta manera, es passa de tenir un ondulador (convertidor AC/DC) a un convertidor de tipus AC/AC. Aquesta configuració permet transmetre la potència a la xarxa i, alhora, desacobla les dues xarxes AC.

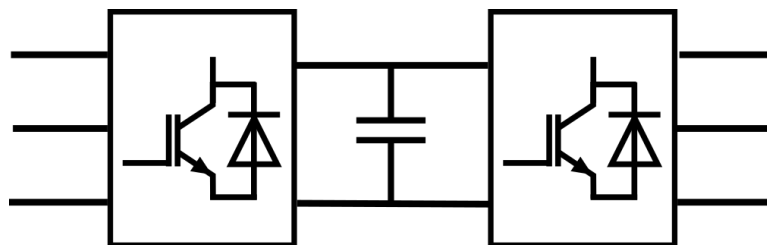


Figura 4.14. *Esquema d'un sistema Back to Back.*

5. Modelització del sistema

En aquest apartat es tracta la modelització del sistema estudiat, format per l'aerogenerador i el convertidor VSC. En l'apartat 5.1, s'expliquen diverses distribucions per modelitzar el vent. A continuació, en l'apartat 5.2, es realitza la modelització d'un aerogenerador compost per un generador d'inducció del tipus gàbia d'esquirol. Finalment, en l'apartat 5.3 es descriu la modelització d'un convertidor de tipus VSC.

5.1. Modelització del vent

El vent es pot modelitzar matemàticament mitjançant diverses distribucions. La més utilitzada actualment és la funció de distribució de *Weibull*, que representa la distribució de probabilitat de la velocitat de vent d'una determinada zona. Aquesta distribució es defineix com [20]:

$$h_w(v) = \frac{k_w}{A_w} \left(\frac{v}{A_w}\right)^{k_w-1} e^{-\left(\frac{v}{A_w}\right)^{k_w}}$$

On,

A_w és el paràmetre d'escala de velocitat del vent comprès entre 3.5 i 8 m/s.

k_w és el paràmetre de forma que descriu la forma de la corba de la distribució. Aquest paràmetre pot prendre valors entre 1 i 3.

v són els diferents valors de vent.

Coneixent els factors de *Weibull*, es pot estimar la velocitat mitjana de la zona d'estudi, que té per valor la següent expressió:

$$\bar{v} = A_w \left(0.568 + \frac{0.434}{k_w}\right)^{1/k_w}$$

A la Figura 5.1, s'il·lustren les corbes de freqüència de *Weibull* obtingudes al variar el paràmetre de forma de 1.2 a 2.8, però no el paràmetre d'escala, que es manté fix a 8 m/s en aquest cas. S'observa que a mesura que el paràmetre de forma, k , augmenta, l'amplada de la corba de distribució va disminuint i, en conseqüència, la probabilitat a que el vent tendeixi a un valor concret es veu incrementada.

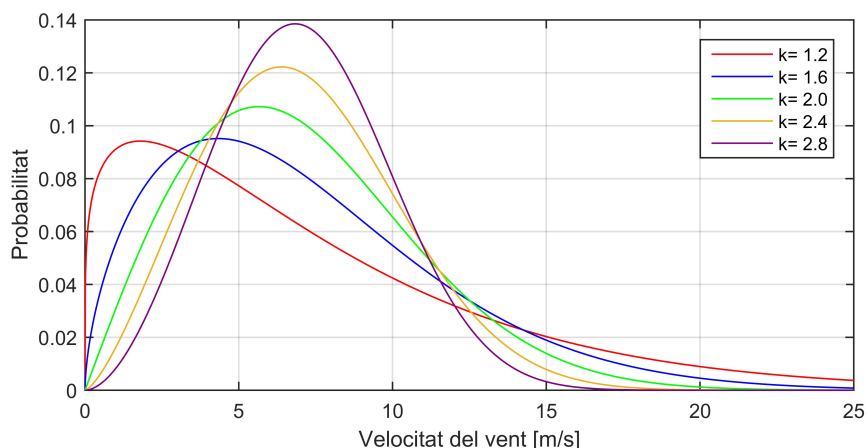


Figura 5.1. Freqüència de distribució de diferents models de vent utilitzant la distribució de Weibull amb A=8.

Un altre funció utilitzada en la modelització del vent és la funció de distribució de *Rayleigh*, il·lustrada a la Figura 5.2 per a diferents velocitats mitjanes de vent. Aquesta es tracta d'un cas simplificat de la distribució de *Weibull* fixant el paràmetre k a 2, valor característic de les regions de l'Europa Central [20]. Amb aquesta consideració, la distribució de *Rayleigh* s'expressa com [20]:

$$h_r(v) = \frac{\pi v}{2 (\bar{v})^2} e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2}$$

On,

\bar{v} és la velocitat mitjana del vent.

v són les diferents velocitats que adquireix el vent.

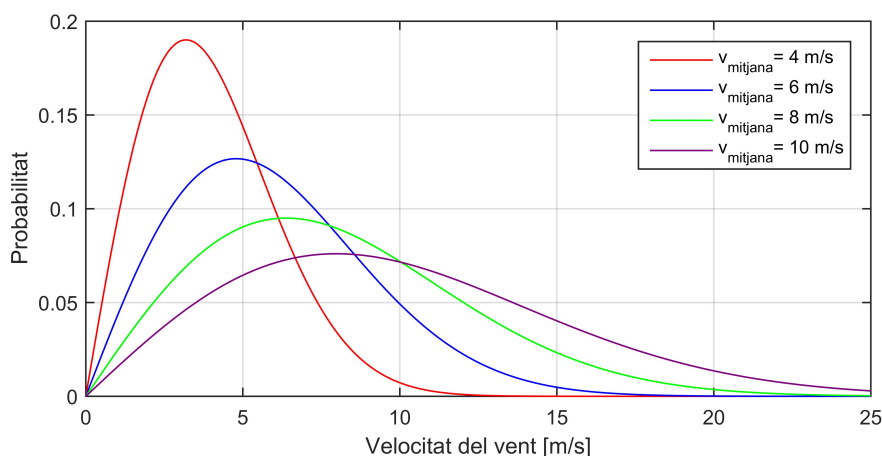


Figura 5.2. Freqüència de distribució de diferents velocitats mitjanes utilitzant la distribució de Rayleigh.

Per a la realització d'aquest treball s'han pres els 25 primers segons del perfil de vent representat a la Figura 5.3. Aquest correspon a una distribució de *Rayleigh* amb una velocitat mitjana de 8.2 m/s.

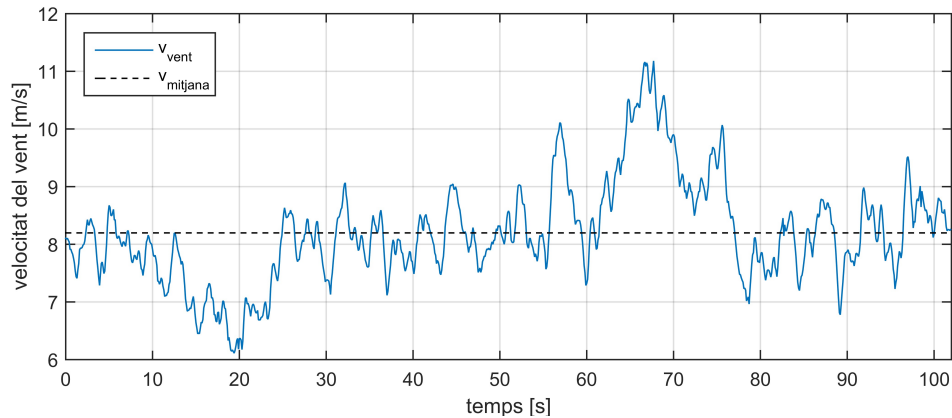


Figura 5.3. Perfil de vent utilitzat.

5.2. Modelització de l'aerogenerador

Els diversos components que formen un aerogenerador es poden agrupar en tres sistemes segons la funció que realitzen en l'obtenció d'energia elèctrica [21].

El primer sistema és l'aerodinàmic i està format per la turbina eòlica, que transforma l'energia cinètica del vent en energia mecànica. El segon, és el bloc mecànic que engloba la transmissió. Finalment, podem distingir el bloc elèctric, compost pel generador d'inducció, que s'encarrega de transformar l'energia mecànica en energia elèctrica. A la Figura 5.4 es mostra l'esquema d'un aerogenerador, sense la implementació de cap control sobre aquest.

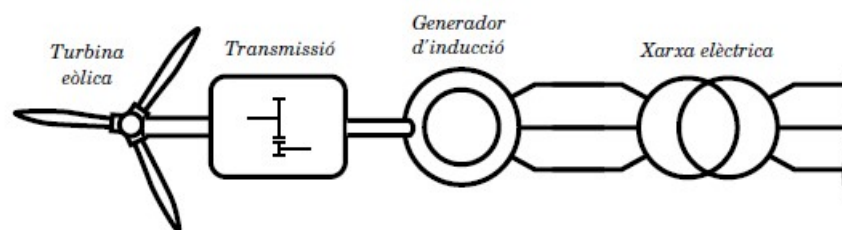


Figura 5.4. Model d'una turbina eòlica connectada directament a la xarxa, Font [22].

5.2.1. Modelització sistema aerodinàmic

L'energia cinètica d'una massa d'aire, m , amb velocitat v_{vent} , es pot definir, segons la Segona Llei de Newton com:

$$E = \frac{1}{2} m v_{vent}^2$$

L'aerogenerador, transforma aquesta energia cinètica del vent en energia mecànica a través de la rotació de les pales.

Derivant l'expressió de l'energia cinètica s'obté la potència del vent:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \dot{m} v_{vent}^2$$

El cabal màssic es pot definir com:

$$\dot{m} = \rho v_{vent} A$$

On, ρ i v_{vent} són, respectivament, la densitat i velocitat de l'aire i A és la secció d'estudi, en aquest cas, l'àrea delimitada per les pales.

D'aquesta manera, l'expressió de la potència del vent que travessa les pales es pot expressar com [23]:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho A v_{vent}^3$$

Finalment l'expressió de la potència obtinguda per la turbina es pot expressar com [23]:

$$P_t = C_p P_{vent} = \frac{1}{2} C_p \rho A v_{vent}^3$$

On,

ρ és la densitat de l'aire.

v_{vent} és la velocitat de l'aire.

A és l'àrea delimitada per les pales.

C_p és el coeficient adimensional de potència.

El coeficient adimensional de potència, C_p , és defineix com la relació entre la potència extreta per la turbina i la potència total del vent, és a dir, el rendiment aerodinàmic de la turbina. Aquest coeficient depèn de la velocitat del vent, de la velocitat de rotació de la turbina, de les característiques de la turbina, així com del radi de les pales i l'angle d'orientació d'aquestes. El científic Albert Betz va estimar el valor màxim d'aquest coeficient a 0,59 (Límit de Betz) [23].

$$C_p = \frac{P_t}{P_{vent}}$$

El coeficient de potència és pot modelar mitjançant les equacions descrites a continuació [23]:

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

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + c_8 \theta} - \frac{c_9}{1 + \theta^3}$$

$$\lambda = \frac{\omega_t R_t}{v_{vent}}$$

On,

$c_1 \dots c_9$ són paràmetres propis de la turbina.

λ és el *Tip-speed ratio* que és la relació entre la velocitat a la punta de les pales de la turbina i la velocitat del vent.

θ és l'angle de Pitch que és l'angle d'orientació de les pales respecte el seu eix longitudinal.

Per a la realització d'aquest treball s'ha considerat un angle de Pitch igual a 0. En aquest cas, és pot considerar la següent simplificació:

$$\frac{1}{\Lambda} \sim \frac{1}{\lambda}$$

Si, després d'aplicar l'anterior simplificació, es grafica la relació entre el *Tip-speed ratio* i el coeficient de potència (C_p), utilitzant els paràmetres exposats a la Taula 5.1, s'obté la gràfica de la Figura 5.5. A la gràfica s'aprecia com hi ha un valor de λ que maximitza el valor de C_p .

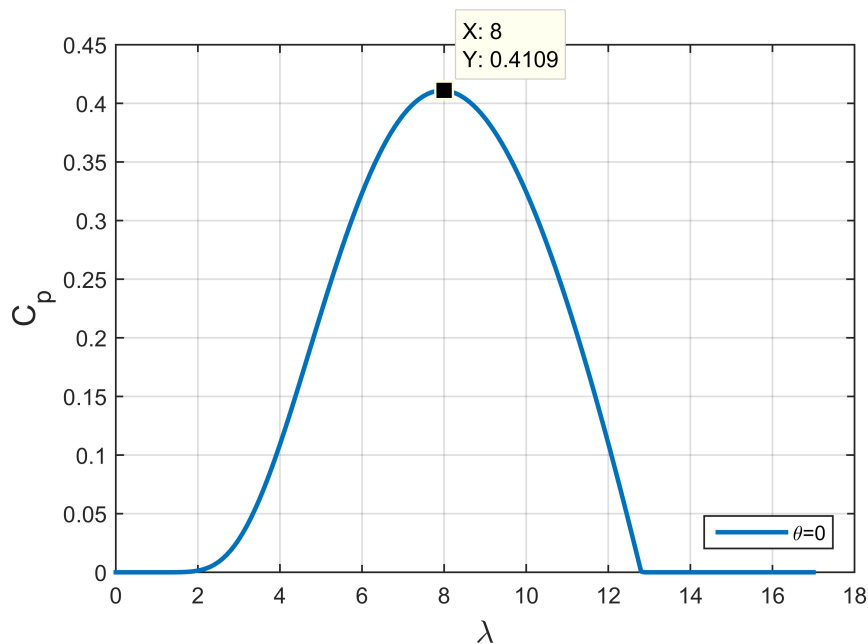


Figura 5.5. Relació entre els paràmetres de la turbina λ i C_p per a $\theta=0$.

Els valors dels paràmetres físics de la turbina eòlica es mostren a la Taula 5.1. Per als coeficients $c_1 \dots c_9$ s'escullen els corresponents al Tipus Heier [24]:

Constants	Valor
$R_{turbina}$	38 [m]
Velocitat nominal (N_{nom})	16 [min^{-1}]
Inèrcia Turbina (J_t)	$9 \cdot 10^6$ [kgm^2]
Relació de Transmissió (v)	80
c_1	0.5
c_2	116
c_3	0.4
c_4	0
c_5	—
c_6	5
c_7	21
c_8	0.08
c_9	0.035

Taula 5.1. Valors paràmetres físics de l'aerogenerador.

5.2.1.1. Criteri Potència màxima

En els posteriors controls sobre el generador serà de gran importància maximitzar la potència extreta de la turbina donada una certa velocitat del vent. Existeix una velocitat de rotació òptima de la turbina donada una velocitat del vent que maximitza l'extracció de potència.

Per a aconseguir la potència òptima de la turbina, es deriva l'expressió del coeficient de potència (C_p) en funció de λ , fixant l'angle de pitch a 0° . Tot seguit aquesta equació s'igualava a 0 i s'aïlla el paràmetre λ que serà l'òptim, que té l'expressió següent:

$$\lambda_{opt} = \frac{c_2 c_7}{c_2 c_7 c_9 + c_6 c_7 + c_2}$$

Substituint aquest valor en l'expressió del coeficient de potència s'obté:

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

El valor òptim d'aquests paràmetres es correspon amb el valor indicat a la Figura 4.1. Substituint els valors anteriors de coeficient de potència i de *Tip-speed ratio* a l'expressió del parell de la turbina, s'obté el valor òptim d'aquest per a cada velocitat del vent.

$$\Gamma_{opt} = \frac{c_1 e^{-\frac{c_6 c_7 + c_2}{c_2}} (c_2 c_7 c_9 + c_6 c_7 + c_2)^3}{c_2^2 c_7^4} \frac{1}{2} \rho A R^3 \omega_t^2 = K_{Cp} \omega_t^2$$

Si es consigna el parell com el de l'expressió anterior, i seguint les consideracions explicades a [25], s'obté un sistema asimptòticament estable i el parell del generador s'aproxima al parell òptim.

5.2.2. Modelització sistema mecànic

Un cop s'ha transformat l'energia del vent en energia mecànica a partir de la rotació de la turbina, aquesta energia mecànica s'ha de transmetre al generador per acabar produint energia elèctrica.

En la realització d'aquest treball s'ha emprat un model de transmissió d'una sola massa, on la inèrcia mecànica es modela com el conjunt format per la transmissió multiplicadora, la dinàmica mecànica del conjunt de la turbina i l'eix del generador. Sobre aquesta inèrcia hi actuen el parell de la turbina (Γ_t) i el parell del generador (Γ_e) seguint l'expressió següent [22]:

$$\Gamma_t + v\Gamma_e = J_{tot} \frac{d}{dt} \omega_t$$

On,

Γ_t és el parell de la turbina.

v és la relació de transmissió.

Γ_e és el parell del motor. Aquest parell serà negatiu quan la màquina actuï com a generador.

J_{tot} és la inèrcia del conjunt vista des de l'eix lent.

ω_t és la velocitat de rotació de la turbina.

La velocitat del rotor es relaciona amb la velocitat de rotació de la turbina mitjançant la relació de transmissió, v , seguint l'equació.

$$\omega_g = v\omega_t$$

5.2.3. Modelització sistema elèctric de la màquina d'inducció

El sistema elèctric de l'aerogenerador el formen la xarxa elèctrica i el generador asíncron d'inducció de tipus gàbia d'esquirol, l'equivalent a una màquina de rotor bobinat en curtcircuit [22]:

$$v_r^{abc} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Aquest generador s'encarrega de transformar l'energia mecànica que prové de la transmissió en energia elèctrica i es modela seguint el procediment descrit a [26].

Es considera una xarxa prou forta perquè la tensió dels terminals de l'estator no depengui del corrent que entrega el generador. La tensió de la xarxa es modela seguint la següent equació:

$$v_s^{abc} = A \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

D'altra banda, el generador d'inducció es modela seguint les següents equacions dinàmiques:

$$v_s^{abc} = r_s i_s^{abc} + \frac{d}{dt} \lambda_s^{abc}$$

$$v_r^{abc} = r_r i_r^{abc} + \frac{d}{dt} \lambda_r^{abc}$$

On,

v_s^{abc}, v_r^{abc} són els vectors de tensions d'estator i rotor.

i_s^{abc}, i_r^{abc} són els vectors de corrents d'estator i rotor.

$\lambda_s^{abc}, \lambda_r^{abc}$ són vectors de fluxos concatenats d'estator i rotor.

r_s és la resistència dels debanats d'estator.

r_r és la resistència dels debanats de rotor.

Els vectors de fluxos concatenats, $\lambda_s^{abc}, \lambda_r^{abc}$, considerant un sistema magnètic ideal, es poden expressar de la següent manera:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix}$$

Amb,

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix}$$

$$L_{sr}^{abc} = \{L_{rs}^{abc}\}^t = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

On,

- L_{ls} i L_{lr} són les inductàncies de dispersió d'estator i de rotor.
 L_{ms} és la inductància d'un debanat d'estator deguda al flux que travessa l'entreferro.
 L_{mr} és la inductància d'un debanat de rotor deguda al flux que travessa l'entreferro.
 L_{sr} és el màxim valor de la inductància d'acoblament entre debanats d'estator i rotor.
 θ_r és l'angle del rotor vist pel circuit elèctric.

El parell del generador s'expressa amb la següent equació:

$$\Gamma_m = \frac{p}{2} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} 0 & N_{sr}^{abc} \\ N_{rs}^{abc} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix}$$

amb

$$N_{sr}^{abc} = \{N_{rs}^{abc}\}^t = -L_{sr} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix}$$

I on p correspon al nombre de parells de pols de la màquina.

Per simplificar la integració, s'utilitza la Transformada de *Park*, descrita a l'Annex A.1. Transformada de Park, s'obtenen les expressions de les tensions del generador d'inducció i l'expressió del parell en referència qd0.

$$\begin{bmatrix} v_s^{qd} \\ v_r^{qd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls} & 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls} & 0 & \frac{3}{2}L_{sr} \\ \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & \frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & \frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s^{qd} \\ i_r^{qd} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} r_s & \left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right)\dot{\theta} & 0 & \frac{3}{2}L_{sr}\dot{\theta}_e \\ -\left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right)\dot{\theta}_e & r_s & -\frac{3}{2}L_{sr}\dot{\theta}_e & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr}(\dot{\theta}_e - \omega_r) & r_r & \left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right)(\dot{\theta}_e - \omega_r) \\ -\frac{3}{2}L_{sr}(\dot{\theta}_e - \omega_r) & 0 & -\left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right)(\dot{\theta}_e - \omega_r) & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{qd} \\ i_r^{qd} \end{bmatrix}$$

$$v_{s0} = L_{ls} \frac{di_{s0}}{dt} + r_s i_{s0}$$

$$v_{r0} = L_{lr} \frac{di_{r0}}{dt} + r_r i_{r0}$$

Per simplificar les expressions anteriors es defineix:

$$L_s \triangleq \frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}$$

$$L_r \triangleq \frac{3}{2}L_{ms} + L_{lr}$$

$$M \triangleq \frac{3}{2}L_{sr}$$

Així doncs, obtenim:

$$\begin{bmatrix} v_s^{qd} \\ v_r^{qd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s^{qd} \\ i_r^{qd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & L_s \dot{\theta}_e & 0 & M \dot{\theta}_e \\ -L_s \dot{\theta}_e & r_s & -M \dot{\theta}_e & 0 \\ 0 & M(\dot{\theta}_e - \omega_r) & r_r & L_r(\dot{\theta}_e - \omega_r) \\ -M(\dot{\theta}_e - \omega_r) & 0 & -L_r(\dot{\theta}_e - \omega_r) & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{qd} \\ i_r^{qd} \end{bmatrix}$$

$$v_{s0} = L_{ls} \frac{di_{s0}}{dt} + r_s i_{s0}$$

$$v_{r0} = L_{lr} \frac{di_{r0}}{dt} + r_r i_{r0}$$

$$\Gamma_m = \frac{3}{2} p M (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq})$$

On $(\dot{\theta}_e - \omega_r) = \omega_{slip}$.

Els valors dels paràmetres de la màquina d'inducció emprats en aquest treball es mostren a la Taula 5.2 [22]:

Paràmetres	Valor
Potència nominal (P_{nom})	2 [MW]
Tensió nominal (V_{nom})	960 [V_{ph-ph}]
Corrent nominal (I_{nom})	1300 [A]
Connexió	Wye
Parelles de pols (p)	2
Velocitat nominal (50Hz)	1500 [min^{-1}]
Moment d'inèrcia (J_m)	90 [kgm^2]
Resistència estator (r_s)	0.005 [Ω]
Inductància dispersió estator (L_{ls})	$4 \cdot 10^{-4}$ [H]
Resistència rotor (r_r)	0.009 [Ω]
Inductància dispersió rotor (L_{lr})	$3 \cdot 10^{-4}$ [H]
Resistència branca del ferro (r_{Fe})	140 [Ω]
Inductància magnetitzant (L_m)	$15 \cdot 10^{-3}$ [H]

Taula 5.2. Valor dels paràmetres de la màquina d'inducció.

5.3. Modelització d'un convertidor VSC

El convertidor VSC que es modela en aquest treball és de tipus CA/CC. Aquest connecta un sistema de corrent continu (CC) amb un de corrent altern (CA).

Com s'ha comentat anteriorment, els convertidors VSC estan formats per sis IGBTs (dos IGBT per fase). Per simplificar el control del convertidor, s'utilitza un model més simplificat de VSC [27]. Aquest es divideix en dues parts: la part contínua i la part alterna. La part alterna es modelitza com a tres fonts de tensió trifàsiques i la part contínua com una font de corrent controlada, com es mostra a l'esquema de la Figura 5.6.

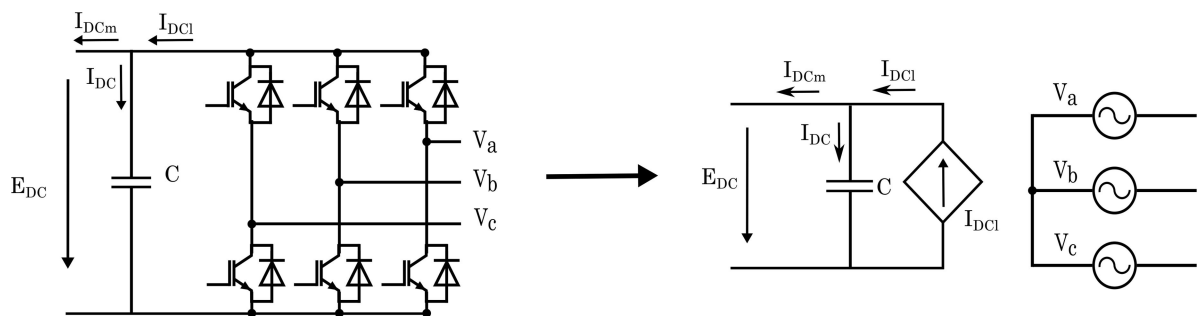


Figura 5.6. Model i simplificació d'un convertidor VSC.

Les dues parts del convertidor estan connectades considerant que la potència de la part alterna i de la part contínua és la mateixa. Així doncs, el valor de la font de corrent es pot expressar com [27]:

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

On,

I_{DCi} és la intensitat de la font de corrent.

P_{AC} és la potència de la banda d'alterna del convertidor.

E_{DC} és la tensió de la banda de contínua.

Per connectar la part d'alterna a la xarxa, s'afegeixen tres inductàncies (les quals tindran una resistència associada) entre les fonts de tensió per no tenir fonts de la mateixa naturalesa enllaçades, convertint, així, les fonts de tensió en fonts de corrent [27]. D'altra banda, a la part de contínua s'ha d'afegir un condensador per aconseguir una font de tensió a la part de contínua (Figura 5.7).

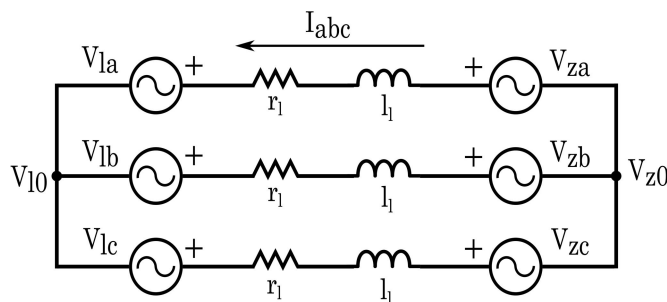


Figura 5.7. Model equivalent de la part alterna del convertidor VSC

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

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

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

On,

- v_{za}, v_{zb}, v_{zc} són els voltatges de la xarxa.
- v_{la}, v_{lb}, v_{lc} són els voltatges AC del convertidor.
- r_l és el valor de la resistència de la inductància d'acoblament.
- l_l és el valor de la inductància d'acoblament.
- i_{za}, i_{zb}, i_{zc} són els corrents de la part alterna del sistema.
- $v_{l0} - v_{z0}$ és la diferència de voltatge entre el neutre del convertidor i el neutre la xarxa. En el cas de tenir un sistema equilibrat i sense neutre, aquesta diferència és nul·la.
- $v_{zq}, v_{zd}, v_{lq}, v_{ld}$ són els voltatges expressats en referència qd0.
- i_{zq}, i_{zd} són els corrents expressats en referència qd0.
- ω_e és la velocitat angular elèctrica.

6. Metodologies de Control

En aquest apartat es tracten els controls dels diferents subsistemes que componen el sistema estudiat. Primerament, a l'apartat 6.1 s'exposa el model d'una turbina eòlica connectada directament a xarxa sense cap element d'electrònica de potència o control sobre la màquina elèctrica (Figura 6.1).

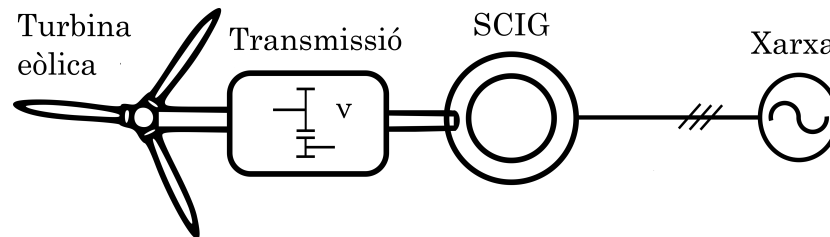


Figura 6.1. Esquema de l'aerogenerador connectat directament a la xarxa.

A continuació, s'introdueix un sistema *Back to Back* entre la màquina d'inducció i la xarxa elèctrica per a poder implementar dues metodologies de control, seguint l'esquema de la Figura 6.2.

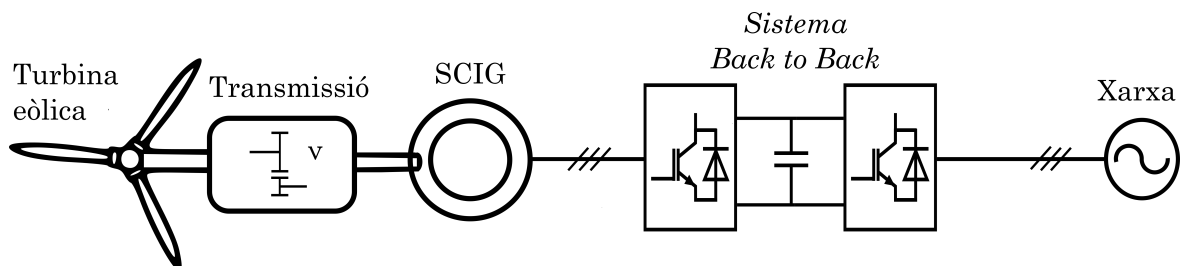


Figura 6.2. Esquema de l'aerogenerador connectat a la xarxa a través d'un sistema *Back to Back*.

A l'apartat 6.2 s'explica el control aplicat al VSC, d'aquest model, per la banda de la xarxa. Tot seguit, als apartats 6.3, 6.4 es detallen els diferents controls aplicats al VSC de la banda del generador. Aquests són el control tensió-freqüència i el control vectorial respectivament.

Els resultats obtinguts per cada un dels sistemes descrits en aquest capítol es presenten en el capítol 7.

6.1. Connexió de l'aerogenerador directament a la xarxa

En aquest apartat, es realitza la modelització d'una turbina eòlica sense cap element d'electrònica de potència o control sobre la màquina elèctrica. Aquesta es connecta directament a la xarxa elèctrica a través de l'estator, sense introduir cap convertidor VSC *Back to Back* entre ells, seguint l'esquema que es mostra a la Figura 6.3. Aquesta configuració correspon a la d'una turbina de tipus 1, també anomenada Turbina de velocitat fixa.

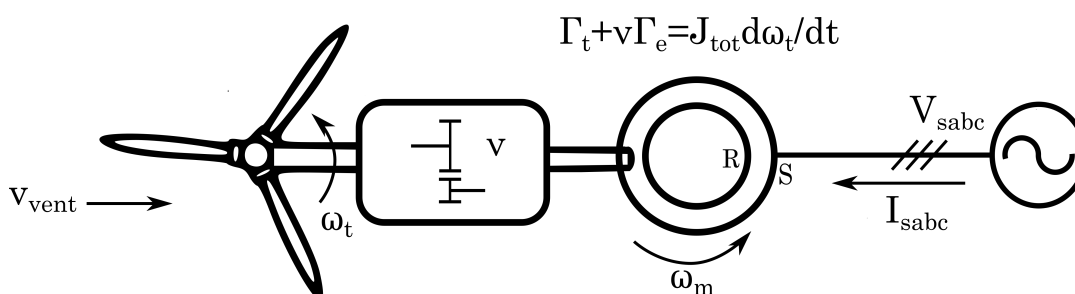


Figura 6.3. Esquema detallat de l'aerogenerador connectat directament a la xarxa.

Aquest cas serveix per il·lustrar la potència extreta del vent que s'injecta a la xarxa elèctrica, sense buscar el punt òptim de treball. La potència s'extreu del vent a través de la turbina eòlica i es transmet al generador d'inducció que s'encarrega de transformar-la en potència elèctrica.

6.2. Control del VSC del costat xarxa

A la Figura 6.4 és mostra l'esquema de control del convertidor VSC pel costat de la xarxa. Aquest convertidor s'encarrega de mantenir el valor de la tensió del bus de contínua (E_{DC}) al valor de consigna (E_{DC}^*), així com injectar la potència reactiva de valor constant (Q_z^*).

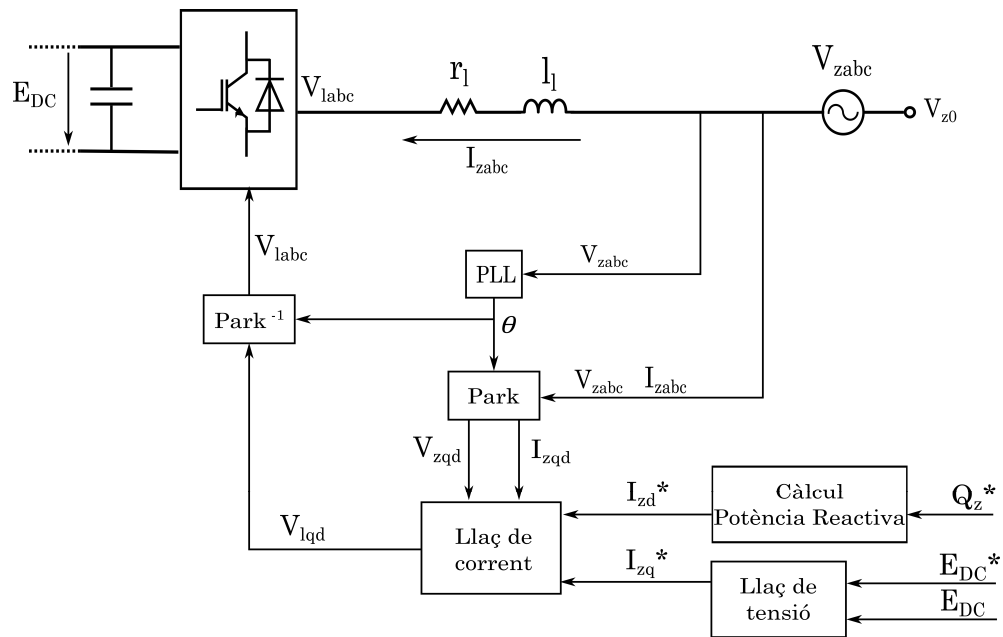


Figura 6.4. Esquema de control d'un convertidor VSC.

El sistema de control es basa en dos controladors en cascada [27]. El controlador més intern (Llaç de corrent), permet regular les components de la intensitat AC (I_{zqd}) en referència qd, mentre que el controlador més extern (Llaç de tensió) permet controlar la tensió del bus DC.

Els controls aplicats en aquest apartat es dissenyen a partir de la metodologia descrita a [27]. Per treballar en referència qd0 es necessita fer un seguiment de l'angle de la xarxa. Per aquest motiu s'implementa una PLL (*Phase Locked Loop*) que manté un seguiment sobre aquest.

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

6.2.1. Disseny del PLL (*Phase Locked Loop*)

La PLL s'utilitza per determinar l'angle i la velocitat angular de la xarxa elèctrica. El disseny d'aquesta es realitza seguint la metodologia explicada a [28]. La PLL consisteix en la realimentació de la component d del voltatge, filtrada mitjançant un controlador PI, seguint l'esquema de la Figura 6.5. La sortida del controlador és la velocitat angular estimada de la xarxa i, integrant aquesta, s'obté l'angle estimat.

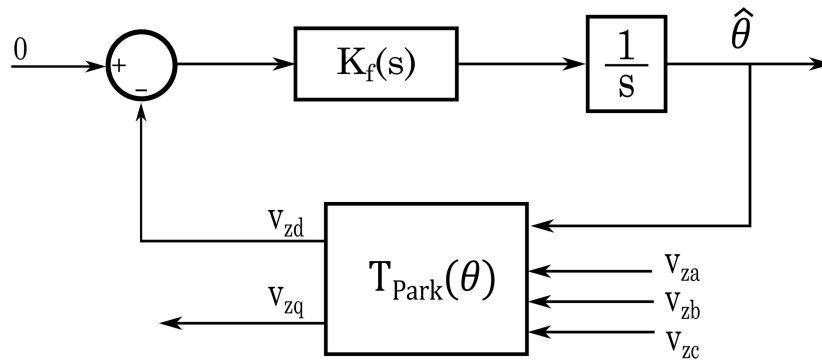


Figura 6.5. Esquema de la PLL del convertidor VSC.

Si s'assumeix que l'error entre l'angle estimat ($\hat{\theta}_e(s)$) i l'angle real ($\theta_e(s)$) és petit, s'obté el següent sistema de segon:

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

El controlador de la PLL es defineix com un PI amb la següent expressió:

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

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

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

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

A la Taula 6.1 es mostren els valors dels paràmetres emprats per a representar els resultats obtinguts en la Figura 6.6. Es pot observar com el valor de la freqüència angular estimada per la PLL s'estabilitza ràpidament sobre el valor de la freqüència de la xarxa. Integrant aquest valor, s'obté l'angle que s'utilitza en l'aplicació de la transformada de *Park*.

Paràmetres	Valor
ξ	$1/\sqrt{2}$
ω_n	$2\pi 50$ [rad/s]
E_m	$960\sqrt{2}/\sqrt{3}$ [V]
$k_{p,PLL}$	$2\xi\omega_n/E_m$
τ_{PLL}	$2\xi/\omega_n$ [s]
$k_{i,PLL}$	$k_{p,PLL}/\tau_{PLL}$

Taula 6.1. Paràmetres i valors utilitzats en la PLL.

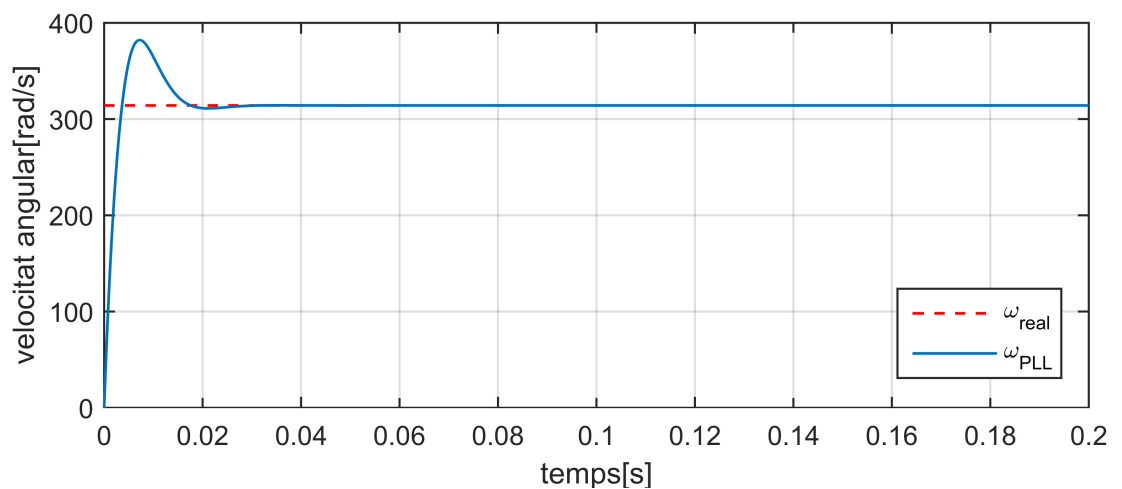


Figura 6.6. Resposta de la variable ω_{PLL} (blau) de la PLL a l'iniciar el sistema envers la freqüència angular real, ω_{real} (blau), de la xarxa.

6.2.2. Disseny del llaç de corrent intern

La PLL a part de fer un seguiment de l'angle elèctric, també fixa la component d del voltatge, v_{zd} , a 0. Amb aquesta consideració, les equacions de voltatge del sistema en referència qd0, exposades prèviament a l'apartat 5.3, es descriuen com:

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

Com s'aprecia en les equacions dels voltatges, les components v_d i v_q dels voltatges depenen, ambdues, tant de i_{zq} com de i_{zd} . Per a controlar les components q i d del corrent per separat, s'aplica el desacoblament seguit a [27]:

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

On \hat{v}_{lq} i \hat{v}_{ld} es defineixen com:

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

Aplicant la transformada de *Laplace* al sistema d'equacions anterior, la de transferència del sistema que s'obté és:

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

Per al disseny dels controladors s'utilitza la tècnica IMC (*Internal Model Control*) [29]. En aquest cas ambdós controladors són iguals i són de tipus PI:

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

On les constants $k_{p,int}$ i $k_{i,int}$ són:

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

Figura 4.1 es mostra l'esquema del llaç de corrent intern.

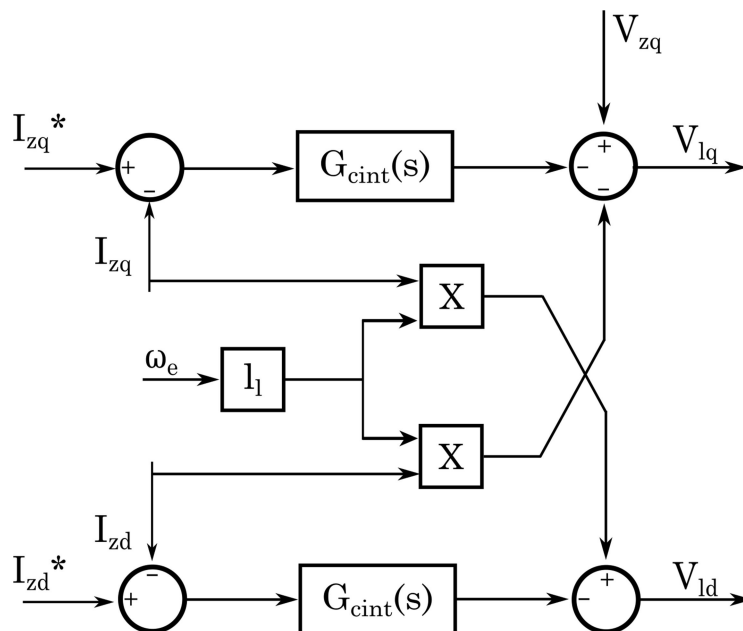


Figura 6.7. Esquema del llaç intern de corrent del convertidor VSC del costat xarxa.

A la Figura 6.8 es mostra la resposta del control del llaç de corrent davant de canvis de tipus graó als valors de consigna i_{zq}^* i i_{zd}^* . Els valors dels paràmetres utilitzats per a realitzar la simulació es mostren a la Taula 6.2. S'aprecia com i_{zq}^* i i_{zd}^* es poden controlar independentment l'una de l'altra. També s'observa com s'obté la resposta pròpia d'un sistema de primer ordre amb una constant de temps, τ , igual a 1 ms.

Paràmetres	Valor
l_l	0.0054 [H]
r_l	0.5 [Ω]
τ	1 [ms]

Taula 6.2. Paràmetres i valors utilitzats en el llaç intern de corrent del VSC del costat xarxa.

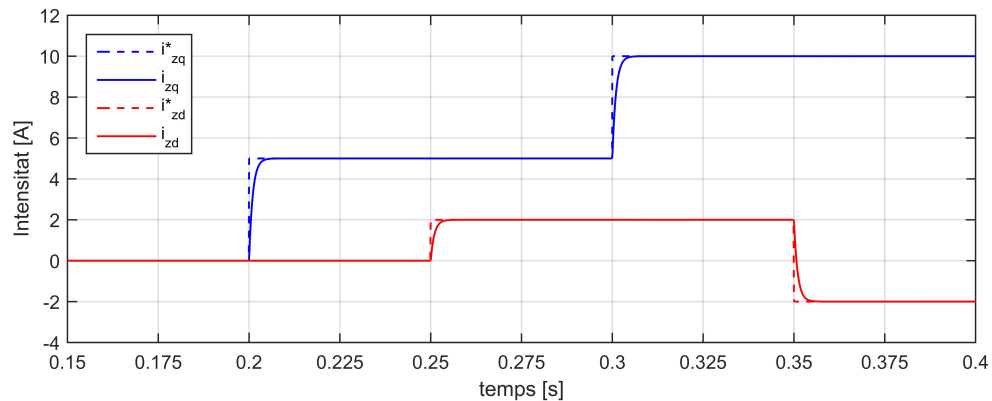


Figura 6.8. Resposta de les components i_{zq} (blava) i i_{zd} (vermella) del llaç de corrent davant d'un canvi de consigna de i_{zq}^* (blava discontinua) i i_{zd}^* (vermella discontinua).

6.2.3. Disseny del llaç de tensió extern

Els valors de consigna i_{zq}^* i i_{zd}^* es poden obtenir de les expressions de la potència activa i reactiva. Aquestes expressions són [27]:

$$P_z = \frac{3}{2} (v_{zq} i_{zq} + v_{zd} i_{zd})$$

$$Q_z = \frac{3}{2} (v_{zq} i_{zd} + v_{zd} i_{zq})$$

Tenint en compte que la component v_{zd} és igual a 0, les expressions anteriors es poden reescriure com:

$$P_z = \frac{3}{2} v_{zq} i_{zq}$$

$$Q_z = \frac{3}{2} v_{zq} i_{zd}$$

Finalment, aïllant els termes dels corrents en les equacions anteriors, s'obtenen les expressions dels valors de consigna i_{zd}^* i i_{zq}^* :

$$i_{zd}^* = \frac{2 Q_z^*}{3 v_{zq}}$$

$$i_{zq}^* = \frac{2 P_z^*}{3 v_{zq}}$$

En aquest cas, es consigna sempre i_{zd}^* sigui igual a 0, és a dir, la potència reactiva injectada a la xarxa serà nul·la. El valor consigna i_{zq}^* s'obté a partir de la regulació de tensió del bus DC. Aquest control es basa en mantenir la tensió DC constant, de manera que la potència generada s'injecta a la xarxa. Aquest control es veu reflectit en l'esquema de la Figura 6.9.

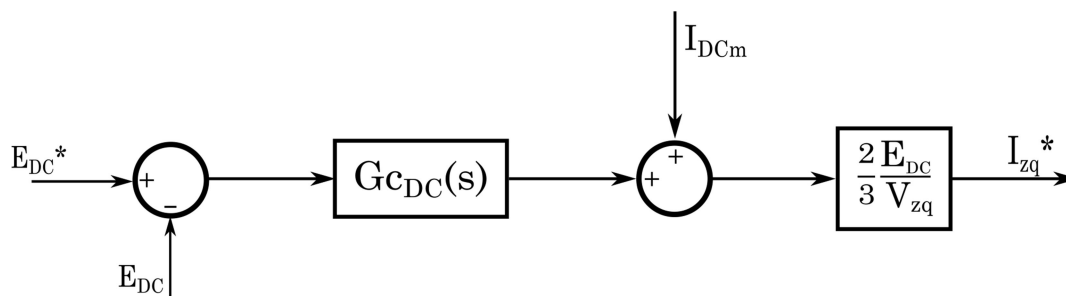


Figura 6.9. Esquema del llaç de tensió extern del convertidor VSC del costat xarxa.

Les entrades d'aquest llaç de control són la tensió de contínua de referència que es vol mantenir, E_{DC}^* , i la tensió de contínua mesurada en el bus DC, E_{DC} . La sortida d'aquest llaç és el valor consigna i_{zq}^* . Per trobar el valor de la funció de transferència $G_{c_{DC}}$, s'ha d'estudiar el bus DC, que es mostra representat en la Figura 6.10:

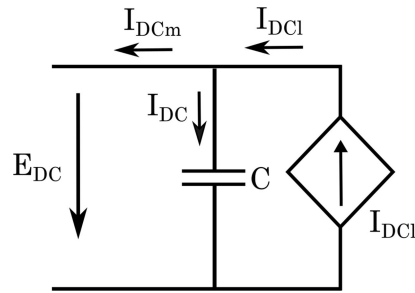


Figura 6.10. Esquema simplificat del bus DC del convertidor VSC.

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

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

D'aquesta manera s'obté la següent funció de transferència per a la planta:

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

Es decideix implementar un controlador PI utilitzant la tècnica IMC, a l'igual que en el cas del llaç de corrent, aconseguint el següent sistema de segon ordre:

$$\frac{k_{p,DC}s + k_{i,DC}}{Cs^2 + k_{p,DC}s + k_{i,DC}}$$

Tenint en compte que l'expressió pròpia d'un sistema de segon ordre és la mostrada a continuació i, comparant aquesta amb l'obtinguda anteriorment, els paràmetres de control de $G_{C_{DC}}$ són:

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

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

A Taula 6.3 es mostren els valors utilitzats en la simulació del llaç extern de tensió. En el cas de la freqüència natural, s'ha agafat un període major al període agafat en llaç de corrent, ja que aquest últim ha de ser més ràpid.

Paràmetres	Valor
C	2.04 [mF]
ξ	$1/\sqrt{2}$
ω_n	$2\pi/0.002$ [rad/s]

Taula 6.3. Valors utilitzats del paràmetres del llaç de tensió extern

A la Figura 6.11 es mostra la resposta en la tensió del bus DC (E_{DC}) en aplicar un canvi de tipus graó en la tensió de referència (E_{DC}^*). S'aprecia que la tensió arriba al valor de consigna transcorreguts 20 ms.

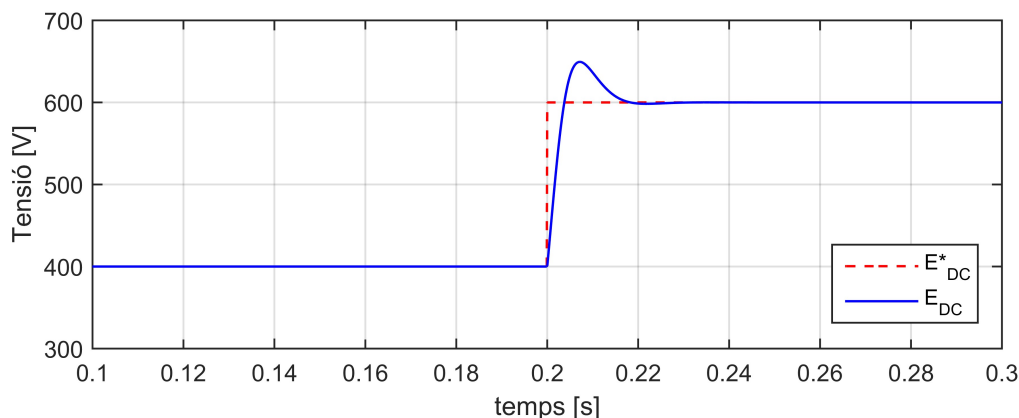


Figura 6.11. Evolució del valor de tensió del bus DC (blau) durant un canvi en la consigna de referència, E_{DC}^* (vermell).

A la Figura 6.12 es mostra la resposta de la tensió del bus DC en aplicar un canvi de tipus graó en la potència elèctrica generada. El graó simulat és un increment de potència d'un valor de 500 W a un valor de 1000 W als 0.5 s de simulació. S'aprecia que després de produir-se aquest canvi, la tensió arriba al valor de consigna transcorreguts 20 ms.

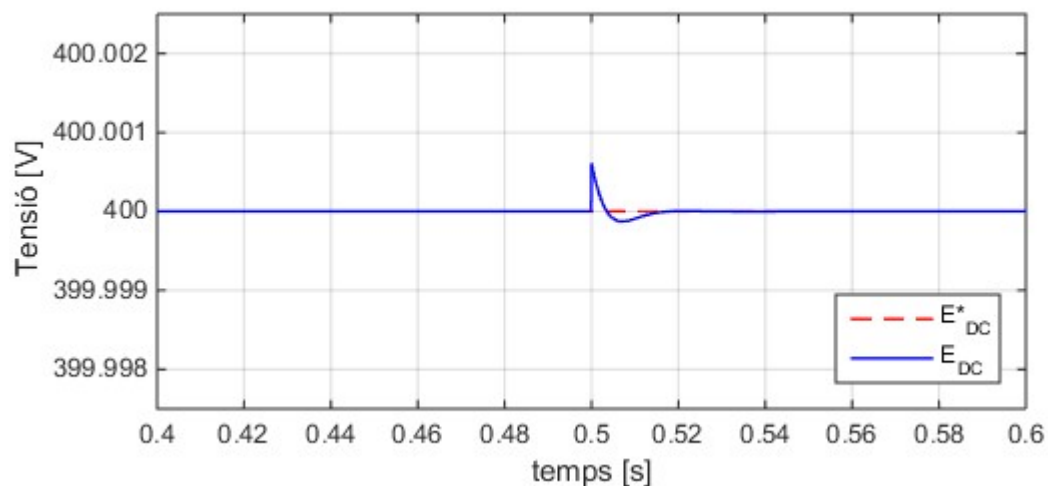


Figura 6.12. Evolució del valor de tensió del bus DC (blau) i del valor de referència de tensió consignat (vermell) durant un graó de potència elèctrica de 500 W a 100 W.

6.3. Control Tensió-Freqüència del VSC del costat generador

En aquest apartat s'explica el control Tensió-Freqüència del convertidor *Back to Back* de la banda del generador d'inducció de gàbia d'esquirol. En concret, s'explica la tècnica de control Tensió-Freqüència en llaç obert [15].

En aquest control, es busca mantenir el flux de l'estator constant, i, d'aquesta manera, mantenir el valor del parell electromecànic constant i de valor màxim en estat estacionari [14]. Per aconseguir aquest objectiu, es realitza un control sobre la tensió i la freqüència de la part AC del VSC connectat a l'estator.

Aquest control s'implementa seguint l'esquema de la Figura 6.13. En aquest control s'ha de tenir present la regió d'operació en la que es troba la màquina d'inducció a cada instant de temps, i aplicar les consideracions descrites a l'apartat 4.3.

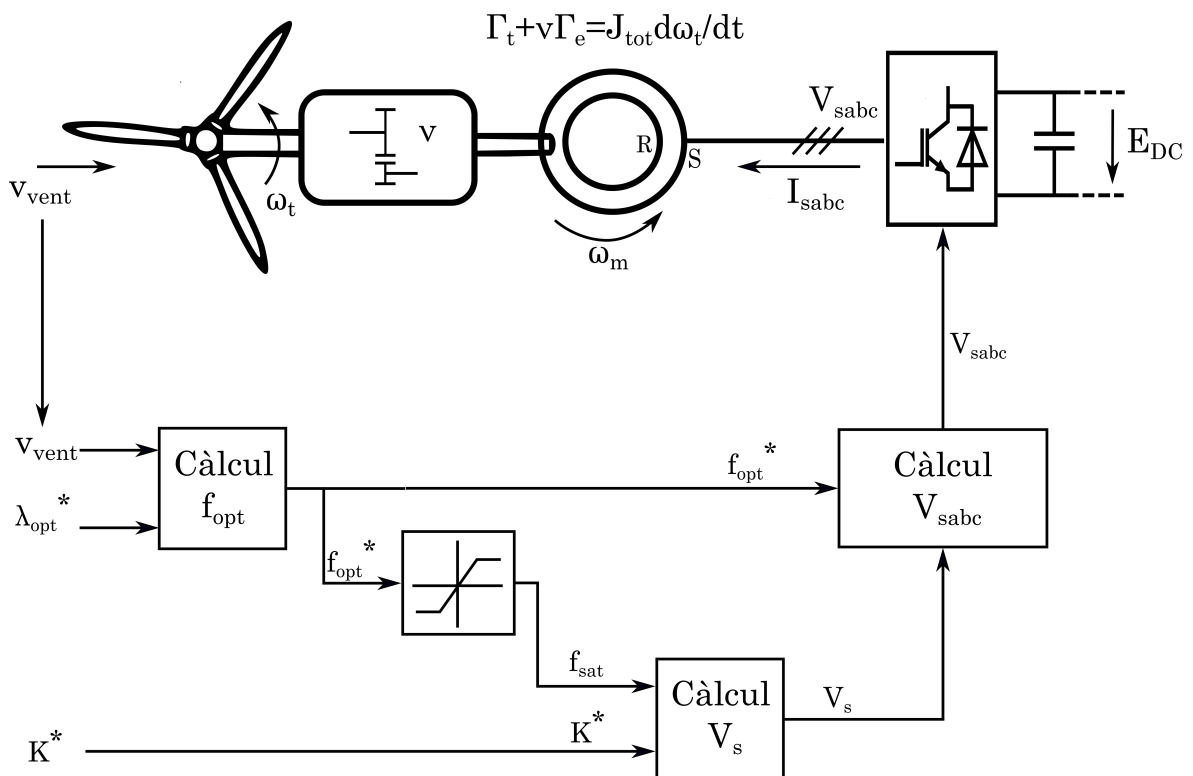


Figura 6.13. Esquema del control Tensió-Freqüència del VSC connectat al generador.

La consigna de la freqüència òptima de treball, s'obté a partir d'aplicar el criteri de tensió màxima, explicat en l'apartat 0, a partir del qual s'extreu el *Tip-speed ratio* òptim, λ_{opt} . Aquest es relaciona amb la velocitat de la turbina seguint la següent equació:

$$\omega_{t_{opt}} = \frac{\lambda_{opt} v_{vent}}{R_{turbina}}$$

D'altra banda, la velocitat angular de la màquina d'inducció, ω_g es defineix com:

$$\omega_g = \frac{\omega_e}{p}$$

I, sabent que ω_g i ω_t estan relacionades a través la relació de transmissió, s'obté l'expressió de la f_{opt} següent:

$$f_{opt} = \frac{\lambda_{opt} v_{vent} \cdot p}{2\pi R_{turbina}}$$

Aquest control integra tant la regió de debilitament de camp, com la regió lineal de treball. En la regió lineal ($f_{opt} \leq f_{nom}$), la relació V/f és manté constant i dona lloc al valor consigna de la constant del llaç de control, K^* , que es defineix com:

$$K^* = \frac{V_{nom}}{f_{nom}}$$

On,

K^* és el pendent de la recta.

V_{nom} és la tensió nominal de la màquina d'inducció.

f_{nom} és la freqüència nominal de la màquina d'inducció.

A partir de l'equació anterior, es dedueix l'equació de la tensió V_s durant aquest règim. Aquesta tensió es defineix com:

$$V_s = K^* f_{opt}$$

D'altra banda, si la màquina d'inducció es troba treballant en la regió de debilitament de camp ($f_{opt} > f_{nom}$), s'obté:

$$V_s = V_{nom}$$

Per implementar aquesta condició en el model de control, es limita la freqüència al valor nominal d'aquesta, seguint l'esquema de la Figura 6.13.

Finalment, un cop obtinguts els valors de tensió, V_s , i de freqüència, f_{opt} , es defineixen les tensions trifàsiques V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} . Aquestes s'expressen com:

$$V_{sa} = \sqrt{2} \frac{V_s}{\sqrt{3}} \cos(2\pi f_{opt} t)$$

$$V_{sb} = \sqrt{2} \frac{V_s}{\sqrt{3}} \cos\left(2\pi f_{opt} t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V_{sc} = \sqrt{2} \frac{V_s}{\sqrt{3}} \cos\left(2\pi f_{opt} t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

6.4. Control Vectorial del VSC del costat generador

En aquest apartat es tracta el control vectorial del convertidor *Back to Back* de la banda del generador d'inducció de gàbia d'esquirol, l'última metodologia de control que s'aplica en aquest treball. Aquest control es realitza seguint les metodologies explicades a [30] i [31].

L'objectiu d'aquest control és maximitzar la potència elèctrica generada a partir de la captació del vent. Es busca optimitzar l'aprofitament del vent en cada instant de temps mitjançant la variació de corrent que passa per l'estator. Per assolir aquest objectiu, s'utilitza el mètode d'orientació indirecta de camp o *Indirect field-orientation* [32], amb els voltatges referenciats en un marc qd.

A la Figura 6.14 es mostra l'esquema del control implementat. Aquest sistema de control es basa únicament en un controlador, el llaç de corrent, que permet regular les components de corrent I_{sabc} en referència qd.

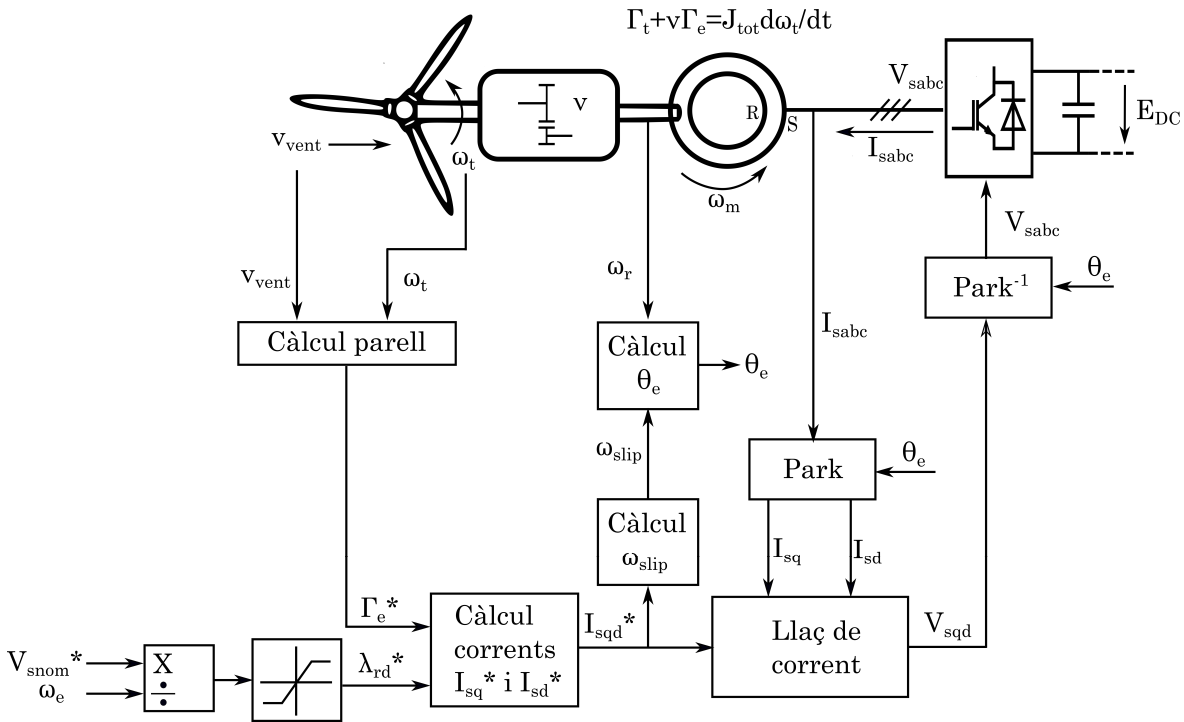


Figura 6.14. Esquema del control Vectorial del VSC connectat al generador.

Per implementar aquest control, primerament, es calculen els valors consigna de parell i de flux del rotor. Per obtenir el valor consigna del flux del rotor, s'ha de tenir en compte la regió de treball del generador, ja que el valor del flux variarà depenent de la zona de treball.

El flux del rotor en la regió lineal és constant i de valor:

$$\lambda_{rd}^* = \frac{V_{snom}^*}{\omega_{enom}}$$

On,

λ_{rd}^* és el flux de la component d del rotor.

V_{snom} és la tensió nominal de pic de la part AC del convertidor. Aquesta tensió es defineix com:

$$V_{snom} = \frac{V_{nom}}{\sqrt{3}} \sqrt{2}$$

ω_{enom} és la freqüència angular nominal de la part AC del convertidor ($2\pi 50$).

En canvi, en la zona de debilitament de camp, el flux disminueix, i s'expressa com:

$$\lambda_{rd} = \frac{V_{snom}}{\omega_e}$$

Sent ω_e la freqüència angular de la part AC del convertidor.

Així doncs, per obtenir el valor consigna λ_{rd}^* , es limita el valor màxim del flux i al valor que aquest té a la regió lineal d'operació, seguint l'esquema de la Figura 6.14.

D'altra banda, per obtenir el valor consigna del parell del generador, s'utilitza el criteri de Potència màxima, explicat anteriorment en el punt 5.2.1.1. Seguint aquest criteri s'obtenen els valors de $C_{p_{opt}}$ i λ_{opt} que maximitzen el parell de la turbina i, en conseqüència, la potència d'aquesta. I, a partir d'aquestes expressions, s'obté l'expressió del parell màxim del generador :

$$\Gamma_e^* = -\frac{K_{cp}\omega_t^2}{v}$$

Aquest parell pren un valor negatiu quan la màquina d'inducció funciona com a generador, i, pren un valor positiu quan aquesta treballa com a motor.

A partir de les equacions de parell i de flux, s'obtenen les expressions que defineixen els valors consigna dels corrents en referència qd0:

$$i_{sq}^* = \frac{2 L_r \Gamma_e^*}{3 p M \lambda_{rd}^*}$$

$$i_{sd}^* = \frac{1}{M} \lambda_{rd}^*$$

Aquests valors permeten obtenir l'angle, θ_e , que s'utilitza en les transformades de Park. Aquest angle es defineix com:

$$\theta_e = \int \omega_e dt$$

On ω_e és la velocitat angular síncrona. Aquesta velocitat es pot expressar com:

$$\omega_e = \omega_{slip} + \omega_r$$

On,

ω_r és la velocitat angular del rotor que és la velocitat angular del generador multiplicada pel nombre de parell de pols d'aquest ($p\omega_m$).

ω_{slip} és la velocitat angular del paràmetre de lliscament, s. Aquesta velocitat es descriu com:

$$\omega_{slip} = \omega_e - \omega_r = \frac{r_r i_{sq}^*}{L_r i_{sd}^*}$$

6.4.1. Llaç de corrent

El llaç de corrent s'obté a partir de les equacions que descriuen el generador d'inducció en referència qd descrites anteriorment a l'apartat 5.2.3. Tenint en compte les consideracions explicades a [31], les equacions de tensió de l'estator en referència qd es poden expressar com:

$$\begin{bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & L_s \omega_e \\ -\left(L_s - \frac{M^2}{L_r}\right) \omega_e & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s - \frac{M^2}{L_r} & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix}$$

Com s'aprecia en les equacions anterior, les components v_d i v_q dels voltatges depenen, ambdues, tant de i_{sq} com de i_{sd} , tal com passa en el llaç de corrent intern del VSC del costat de la xarxa. Per a controlar les components q i d del corrent per separat, s'aplica el següent desacoblament:

$$\begin{bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_{sq} + L_s \omega_e i_{sd} \\ \hat{v}_{sd} - \left(L_s - \frac{M^2}{L_r}\right) \omega_e i_{sq} \end{bmatrix}$$

Així, aplicant aquesta substitució a l'equació dels voltatges, s'obté:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{sq} \\ \hat{v}_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s - \frac{M^2}{L_r} & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix}$$

Aplicant la transformada de *Laplace* al sistema d'equacions anterior, la de transferència del sistema que s'obté és:

$$\frac{i_{sq}(s)}{\hat{v}_{sq}(s)} = \frac{1}{\left(L_s - \frac{M^2}{L_r}\right)s + r_s} \quad \frac{i_{sd}(s)}{\hat{v}_{sd}(s)} = \frac{1}{L_s s + r_s}$$

Utilitzant, novament, la tècnica IMC (*Internal Model Control*). S'obtenen els següents dos controladors de tipus PI:

$$G_{cvq}(s) = \frac{k_{p,cvq}s + k_{i,cv}}{s} \quad G_{cvd}(s) = \frac{k_{p,cvd}s + k_{i,cv}}{s}$$

On les constants $k_{p,cvq}$, $k_{p,cvd}$ i $k_{i,cv}$ són:

$$k_{p,cvq} = \frac{L_s - \frac{M^2}{L_r}}{\tau_{cv}} \quad k_{p,cvd} = \frac{L_s}{\tau_{cv}} \quad k_{i,cv} = \frac{r_s}{\tau_{cv}}$$

Sent τ_{cv} el paràmetre de control.

A la Figura 6.15 es mostra l'esquema del llaç de corrent intern, obtingut a partir del procediment explicat anteriorment. Les entrades d'aquest llaç de corrent són, d'una banda, les consignes de corrent i_{sq}^* i i_{sd}^* obtingudes del flux del rotor i del parell del generador i, d'altra banda, les corrents i_{sq} i i_{sd} mesurades i expressades en referència qd. Les sortides són les tensions de l'estator en referència qd.

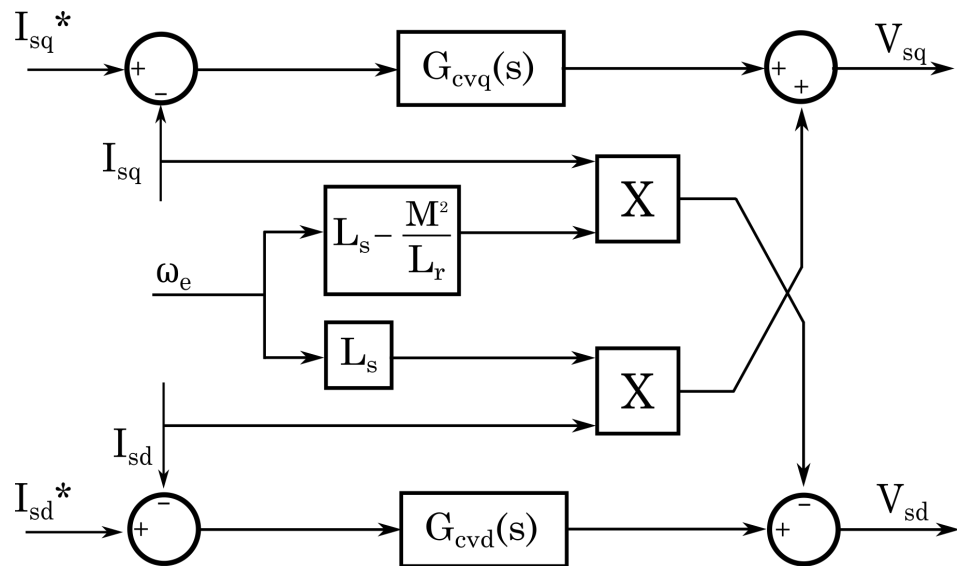


Figura 6.15. Esquema de control del llaç de corrent del control Vectorial del VSC del costat generador.

7. Simulacions i resultats

En aquest capítol es simulen els diferents controls aplicats sobre el generador i que han estat estudiats en aquest treball. Una vegada finalitzades les simulacions s'analitzen els resultats obtinguts i, a continuació s'analitzen els resultats obtinguts. A l'apartat 7.1 es simula el model constituït per l'aerogenerador directament connectat a la xarxa elèctrica.

Tot seguit, a l'apartat 7.2, es realitza la simulació del model que incorpora el sistema de control Tensió-Freqüència al convertidor VSC del sistema *Back to Back* de la banda del generador. A l'apartat 7.3, es duu a terme la simulació de l'últim model, que inclou el sistema de control Vectorial sobre el VSC connectat al generador. Finalment, a l'apartat 7.4, es fa una breu comparativa dels tres sistemes.

Per tal de comprovar el funcionament d'aquests tres models, primerament, es simula una entrada de vent de tipus graó. El graó de vent s'aplica als 15 s d'haver començat la simulació, partint d'un valor inicial de 9 m/s i arribant a un valor final de 11 m/s. A continuació, es simulen els diferents models introduint el perfil de vent de la Figura 7.1 com a entrada, per a obtenir una resposta més realista.

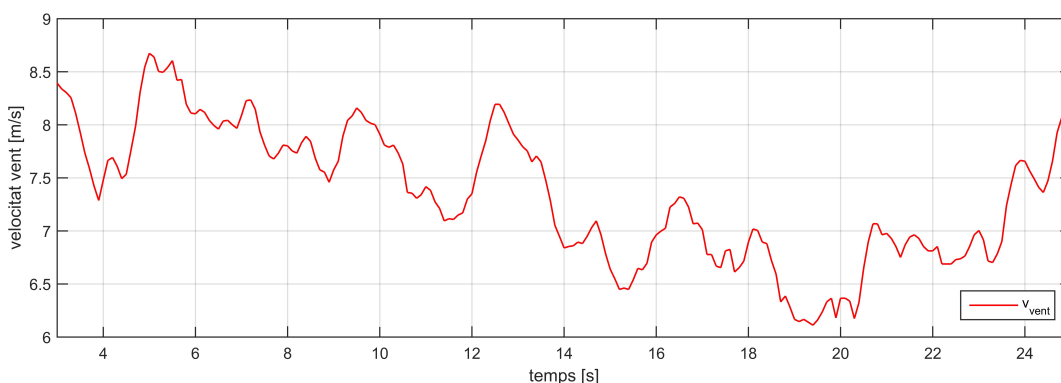


Figura 7.1. Perfil de vent utilitzat durant les simulacions.

La xarxa elèctrica trifàsica simulada té una tensió de 960 V i una freqüència de 50 Hz. S'agafa aquest valor de tensió, ja que no es té en compte cap transformador que connecti el generador a la xarxa. D'altra banda, el generador s'implementa amb un bloc existent en el programa *EMTP-RV* on l'entrada de control és la velocitat de rotació del motor, ω_m .

7.1. Connexió del generador directament a la xarxa elèctrica

7.1.1. Resposta davant d'un graó de vent

A la Figura 7.2 es mostren representades la potència elèctrica generada i la potència mecànica de la turbina. Es pot observar com, en augmentar la velocitat del vent, tant la potència extreta de la turbina com la potència elèctrica generada augmenten fins a un valor pròxim a 1,5 MW. No obstant, el valor de la potència elèctrica generada es inferior a al valor de la potència mecànica de la turbina i la diferència entre aquests paràmetres augmenta a l'augmentar la velocitat del vent.

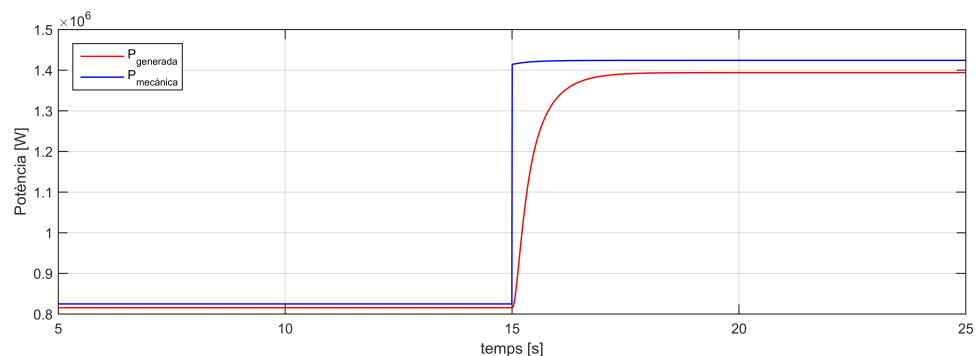


Figura 7.2. Potència mecànica de la turbina (blau) i Potència elèctrica generada (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

A la Figura 7.3 es representen les velocitats angulars del generador i de la turbina. S'observa, que al no realitzar cap control sobre la màquina d'inducció, aquestes velocitats pràcticament no varien, romanent constants al voltant de la velocitat de sincronisme. La petita variació que es produeix es deu al canvi en el punt de treball de la màquina d'inducció. També s'observa com les velocitats angulars segueixen la relació de transmissió.

Tot seguit, a la Figura 7.4, mostrada a continuació, correspon a les variables *Tip-speed ratio* i C_p . Es pot observar com aquests dos paràmetres s'allunyen del seu valor òptim (8 en el cas de λ i 0.4109 en el cas de C_p) a l'augmentar la velocitat del vent.

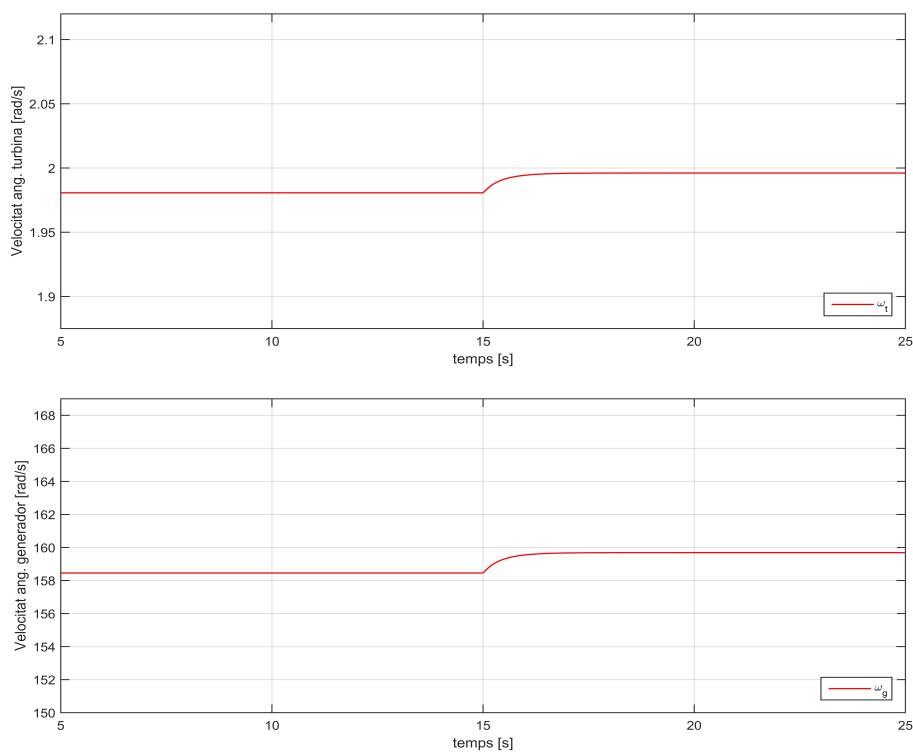


Figura 7.3. Velocitat angular de la turbina (figura superior) i del generador (figura inferior) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

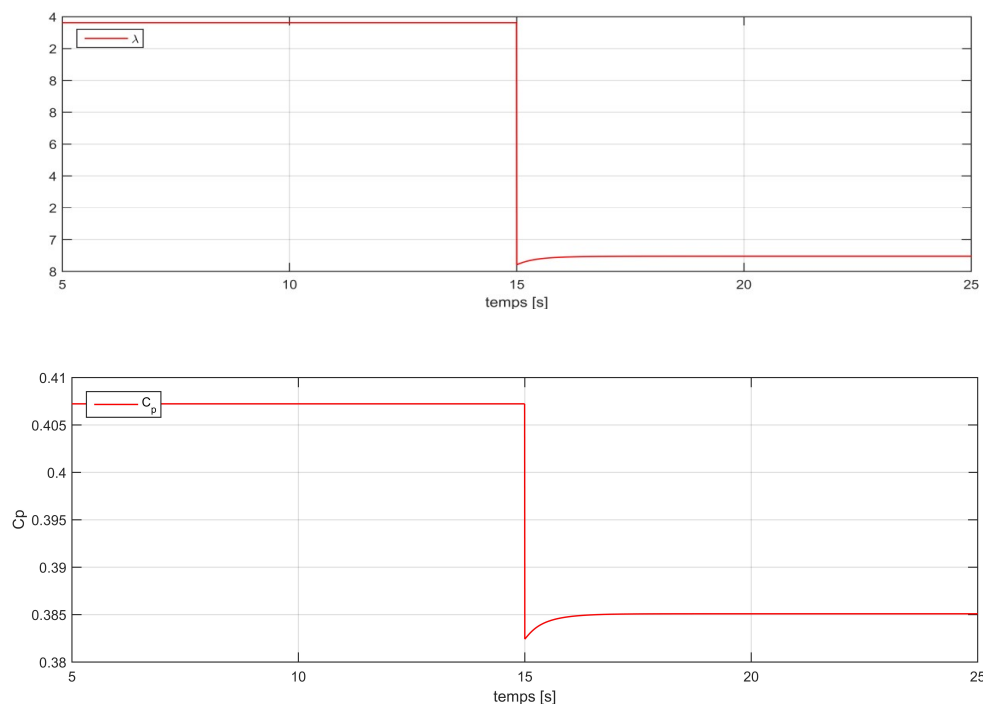


Figura 7.4. Evolució dels paràmetres λ (figura superior) i C_p (figura inferior) de la turbina en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

7.1.2. Resposta davant d'un perfil de vent

En la Figura 7.5 es mostra l'evolució de la potència elèctrica i potència mecànica de la turbina al llarg del perfil de vent. S'observa, que aquestes disminueixen al disminuir la velocitat del vent i, que el mínim de potència s'obté a una velocitat del vent d'aproximadament 6 m/s. També s'observa que la potència elèctrica evoluciona més lentament que la potència mecànica de la turbina.

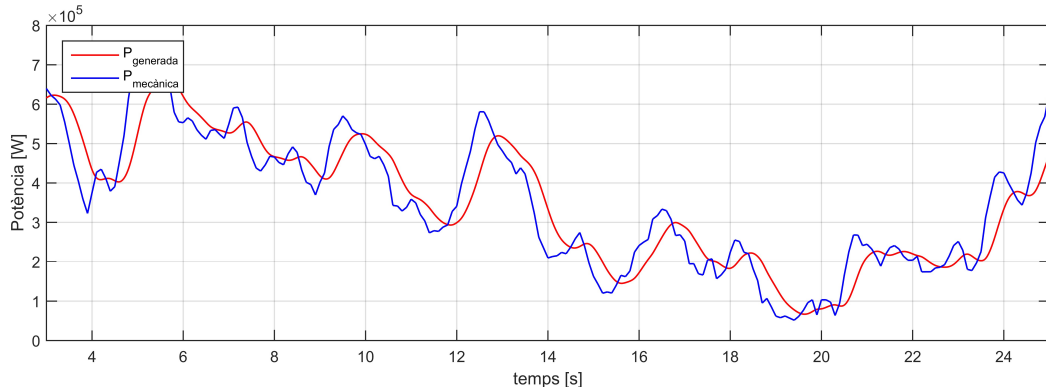


Figura 7.5. Potència mecànica de la turbina (blau) i Potència elèctrica generada (vermell) en aplicar el perfil de vent com a entrada.

Finalment, a la Figura 7.6 s'observa com la velocitat de rotació del rotor es manté pràcticament constant al llarg de la simulació i, a l'igual que a l'apartat anterior, pròxima a la velocitat de sincronisme de la màquina d'inducció.

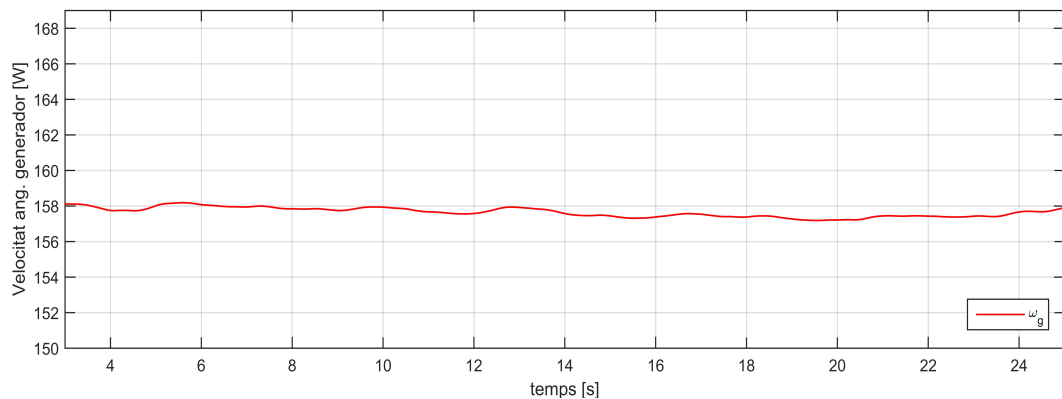


Figura 7.6. Velocitat de rotació del rotor del generador en aplicar el perfil de vent com a entrada.

7.2. Control Tensió-Freqüència del VSC del costat generador

7.2.1. Resposta davant d'un graó de vent

En aquest apartat, primerament, es mostra la resposta de les variables corresponents a la turbina i al generador. A continuació, s'exposa el comportament del bus de contínua al fer front a aquesta entrada. Finalment, s'il·lustra el comportament de les variables que formen part de la xarxa d'alterna.

Per evitar que la resposta del sistema obtinguda sigui brusca, s'introdueix un filtre de primer ordre en la velocitat de rotació òptima.

7.2.1.1. Comportament de les variables de la turbina i del generador

A la Figura 7.7 es mostra la resposta obtinguda en els paràmetres de potència elèctrica generada i potència mecànica de la turbina després d'aplicar l'entrada de tipus graó. S'observa que en augmentar la velocitat del vent, els valors dels dos paràmetres augmenta, però que a la vegada que es produeix aquest augment, la diferència entre els seus valors es veu incrementada.

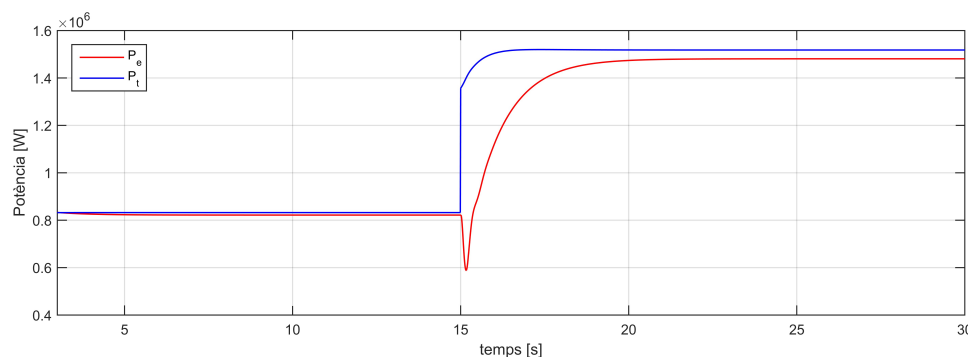


Figura 7.7. Potència elèctrica generada (vermell) i potència mecànica de la turbina (blau) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

Les respostes de la velocitat de rotació del rotor de la màquina d'inducció i de la velocitat de rotació de la turbina davant d'aquesta entrada graó es mostren a la Figura 7.8. S'observa que aquestes velocitats augmenten en incrementar la velocitat del vent. També s'observa que el valor obtingut tendeix al valor òptim, però sent sempre superior a aquest.

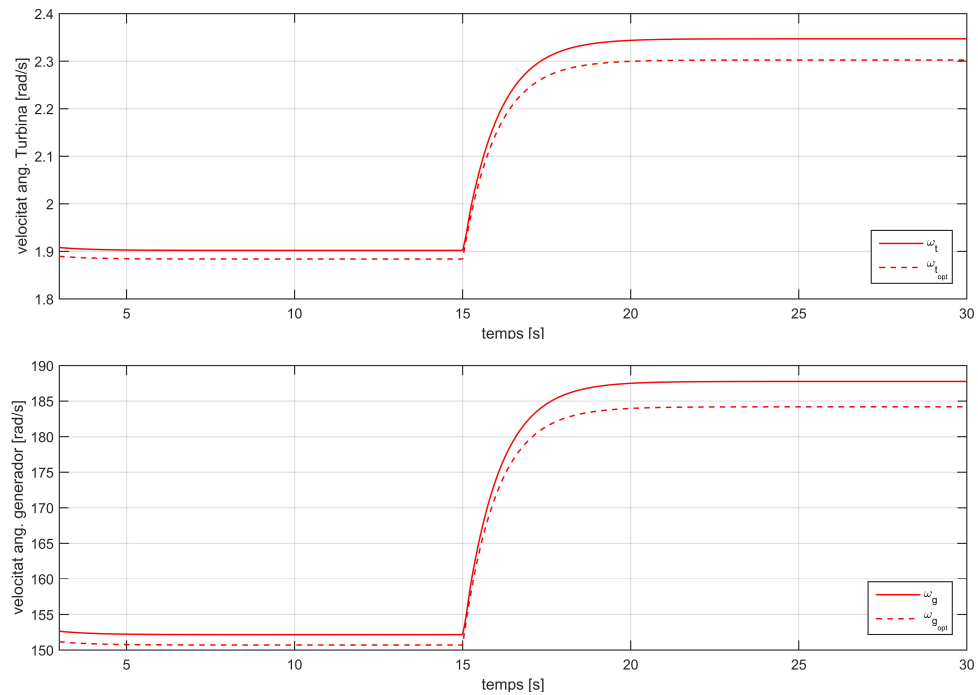


Figura 7.8. Velocitat de rotació de la turbina (figura superior) i velocitat de rotació del rotor de la màquina d'inducció (figura interior) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

A continuació, en la Figura 7.9, es representa el paràmetre de *Tip-speed ratio* de la turbina obtingut al durant la simulació i el valor òptim d'aquest. S'aprecia com el valor final de λ és superior al valor òptim i que aquesta diferència es veu incrementada en augmentar la velocitat del vent. Alhora s'observa com al realitzar el canvi en la consigna, el valor d'aquest paràmetre cau fins a un valor de 6.6 abans de tornar a créixer fins a adoptar el seu valor final, proper al valor òptim.

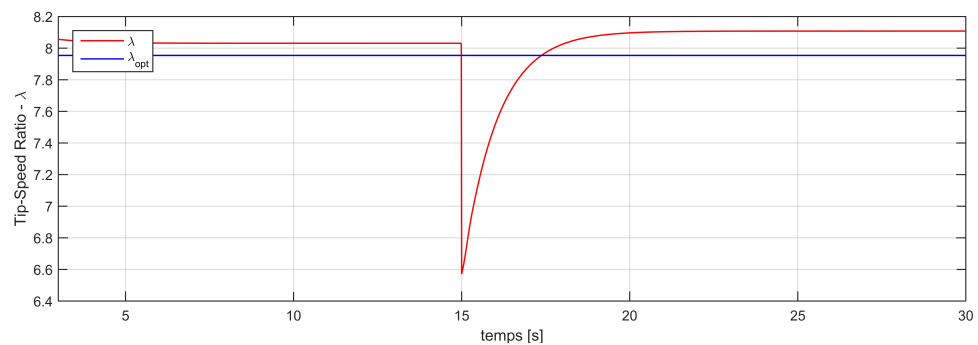


Figura 7.9. Evolució del paràmetre λ de la turbina (vermell) respecte al seu valor òptim λ_{opt} (blau) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

Finalment es grafiquen les components de tensió del estator de la màquina d'inducció en referència qd i les components del corrent induït a l'estator, també en referència qd.

A la Figura 7.10 es poden observar les dues regions d'operació de la màquina d'inducció. S'aprecia que per a una entrada de vent de 9 m/s, la màquina es troba en el règim lineal d'operació, i, per tant, el valor de la tensió és proporcional a la freqüència elèctrica de l'estator. D'altra banda, s'observa que a la velocitat de 11 m/s, la tensió obtinguda equival a la tensió nominal de la màquina d'inducció. Aquest fet es degut a que la màquina opera a la regió de debilitament de camp.

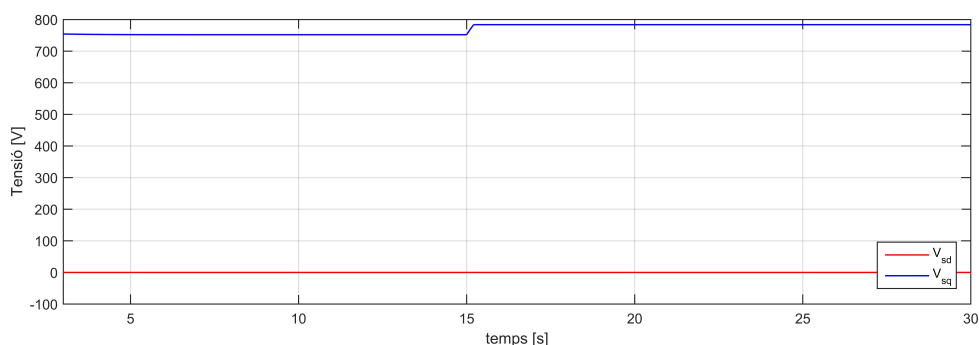


Figura 7.10. Components de tensió V_{sd} (vermell) i V_{sq} (blau). en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

A la **Figura 7.11** es representa la resposta de la freqüència elèctrica davant de l'entrada graó. S'observa que aquesta augmenta independentment de la regió de treball en què es trobi la màquina.

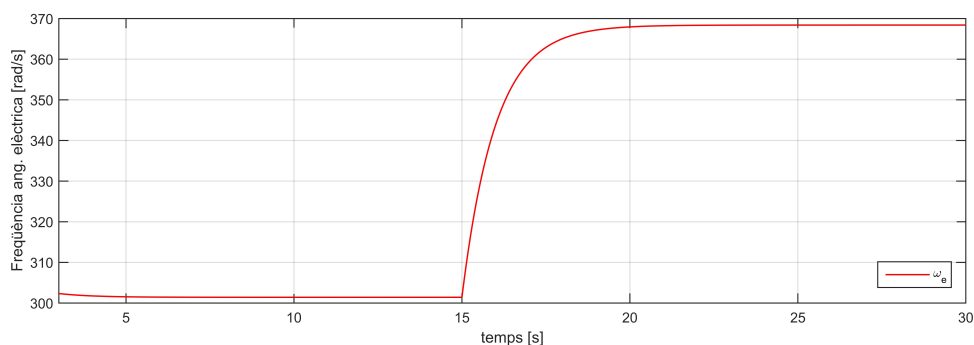


Figura 7.11. Evolució de la freqüència angular elèctrica, ω_e , en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

Per acabar, a la Figura 7.12, s'il·lustren els corrents induïts a l'estator. S'observa que els valors d'aquests augmenten a l'incrementar la velocitat del vent.

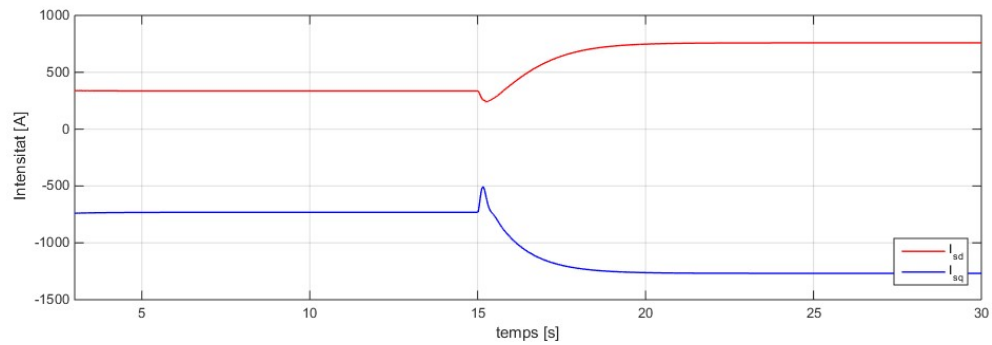


Figura 7.12. Components de corrent I_{sq} (blau) i I_{sd} (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

7.2.1.2. Comportament de la tensió del bus de continua

S'observa, a la Figura 7.13, que al canviar la velocitat del vent de 9 m/s a 11 m/s la tensió del bus DC, es produeix variació mínima (de menys d'un 0.001%) en el valor de la tensió d'aquest. No obstant això, el valor es torna a establitzar a la tensió de referència del bus en poc temps.

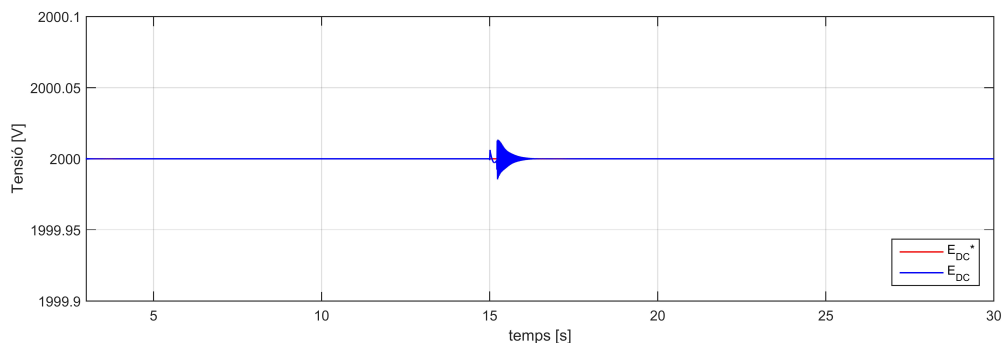


Figura 7.13. Evolució del valor de tensió del bus DC (blau) i del valor de referència de tensió consigna (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

7.2.1.3. Comportament de les variables de la xarxa elèctrica

A la Figura 7.14 s'il·lustra la potència injectada a la xarxa elèctrica. S'observa que aquest valor és igual al valor de potència generada per la màquina d'inducció. Aquest fet es deu a que es considera un sistema ideal sense pèrdues en el sistema *Back to Back*.

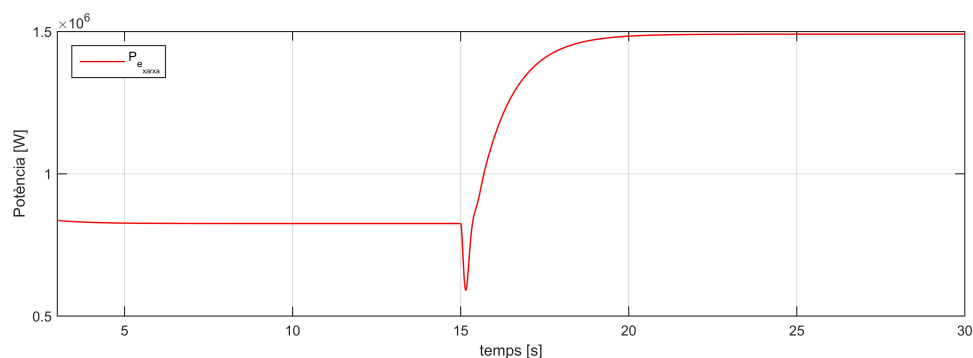


Figura 7.14. Evolució de la potència elèctrica de la xarxa en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

Finalment, a la Figura 7.15 s'il·lustren els corrents de la xarxa en referència qd. S'aprecia com la component d del corrent és nul·la i, en conseqüència la potència reactiva injectada a la xarxa també ho és. D'altra banda s'observa que en augmentar la velocitat del vent, la component q del corrent també augmenta.

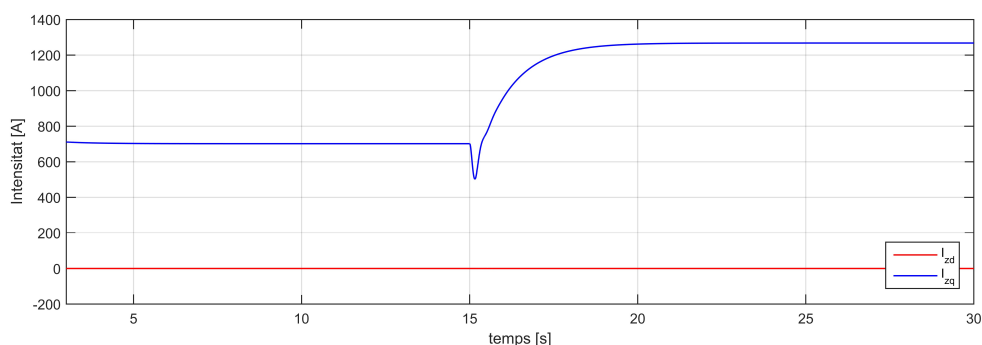


Figura 7.15. Evolució de les components de corrent I_{zq} (blau) i I_{zd} (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

7.2.2. Resposta davant d'un perfil de vent

Un cop validat el comportament del control Tensió-Freqüència mitjançant una entrada graó, s'avalua el comportament d'aquest sistema davant d'un perfil de vent més realista.

A la Figura 7.16 s'observen tant la potència elèctrica generada mitjançant aquest control com la potència mecànica de la turbina. S'observa que aquestes dos paràmetres presenten discrepàncies. Això es deu a què a l'aplicar un control sobre el sistema, aquest esdevé més lent. Tot i això, s'observa que els valors obtinguts són superiors als obtinguts amb el model anterior.

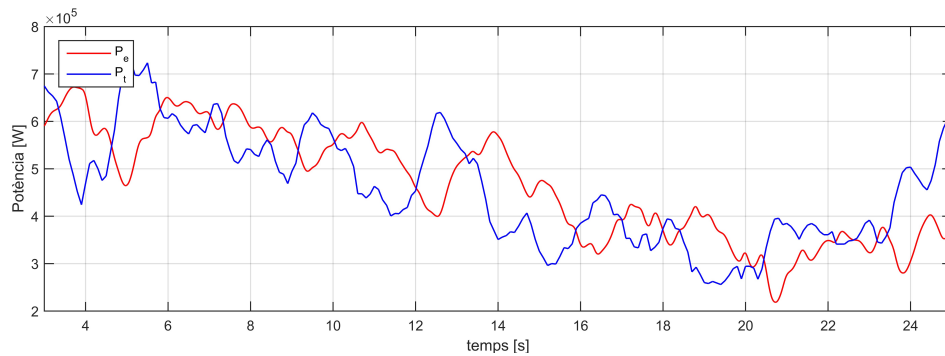


Figura 7.16. Evolució de la potència elèctrica generada (vermell) i de la potència mecànica de la turbina (blau) en aplicar el perfil de vent com a entrada.

En la Figura 7.17 es mostra la potència injectada a la xarxa a l'entrar el perfil de vent de la Figura 7.1. S'observa com aquesta potència és igual a la potència elèctrica generada per la màquina d'inducció. Aquest fet es deu a que les pèrdues del sistema *Back to Back* es consideren nul·les.

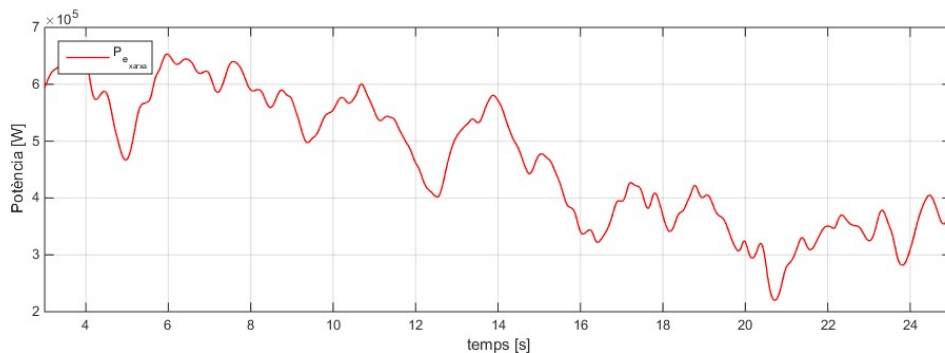


Figura 7.17. Evolució de la potència elèctrica injectada a la xarxa elèctrica en aplicar el perfil de vent com a entrada.

A la Figura 7.18, s'il·lustra freqüència angular elèctrica que s'introdueix a l'estator de la màquina. S'observa com aquesta és sempre inferior a la freqüència elèctrica nominal i, per tant, la màquina es troba treballant, en tot moment, dins la regió lineal.

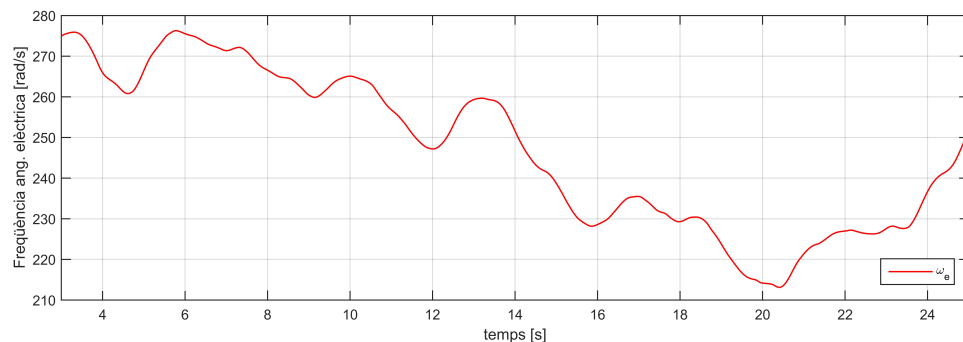


Figura 7.18. Evolució de la freqüència angular elèctrica en aplicar el perfil de vent com a entrada.

Finalment, a la Figura 7.19 s'observa el comportament de la velocitat de rotació de la màquina davant del perfil de vent. S'observa que aquesta velocitat augmenta en augmentar la velocitat del vent i disminueix quan aquest també ho fa. També, s'aprecia que la velocitat del rotor segueix el comportament de la velocitat òptima de gir del rotor.

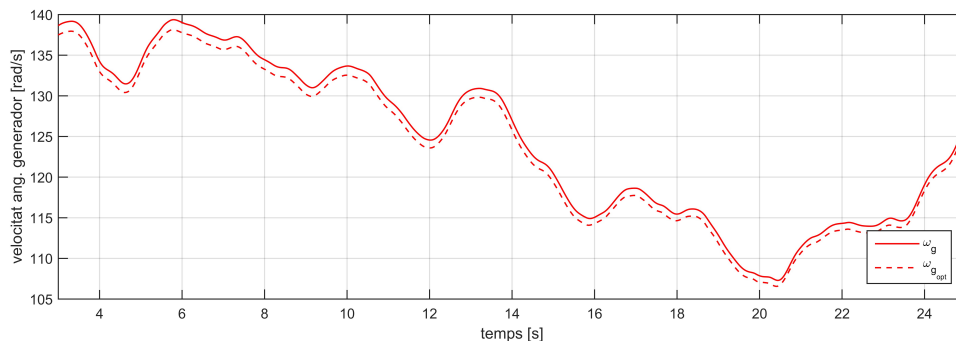


Figura 7.19. Evolució de la velocitat de rotació del rotor (línia contínua) i de la velocitat de rotació òptima del rotor (línia discontinua) en aplicar el perfil de vent com a entrada..

7.3. Control Vectorial del VSC del costat generador

7.3.1. Resposta davant d'un graó de vent

En aquest apartat, en primer lloc, es mostra la resposta de les variables corresponents a la turbina i al generador. A continuació, s'exposa el comportament del bus de contínua al fer front a aquesta entrada. Finalment, s'il·lustra el comportament de les variables que formen part de la xarxa d'alterna.

7.3.1.1. Comportament de les variables de la turbina i del generador

A la Figura 7.20 es mostra la resposta dels paràmetres de potència elèctrica generada i de potència mecànica de la turbina. S'aprecia com els valors d'aquestes variables, igual que en els models anteriors, augmenten a l'incrementar la velocitat del vent. També s'observa que la potència elèctrica generada arriba més lentament al valor final.

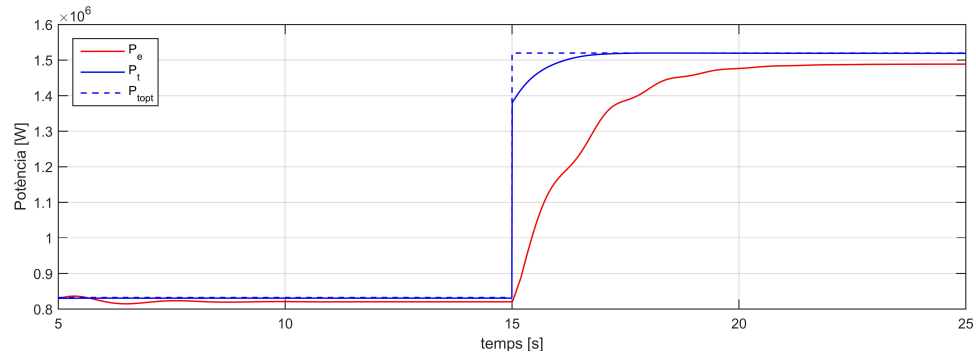


Figura 7.20. Evolució de la potència elèctrica generada (vermella), de la potència mecànica de la turbina (blava contínua) i del seu valor òptim (blava discontinua) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

A continuació, en la Figura 7.21, s'il·lustra el comportament del flux de la component d del rotor de la màquina d'inducció. S'observa que per la velocitat del vent de 9 m/s, aquest flux es manté constant al valor òptim. Això es degut a que la màquina a 9 m/s treballa en la regió lineal. D'altra banda, als 11 m/s la màquina es troba treballant a la regió de debilitament de camp i, per tant, el flux disminueix.

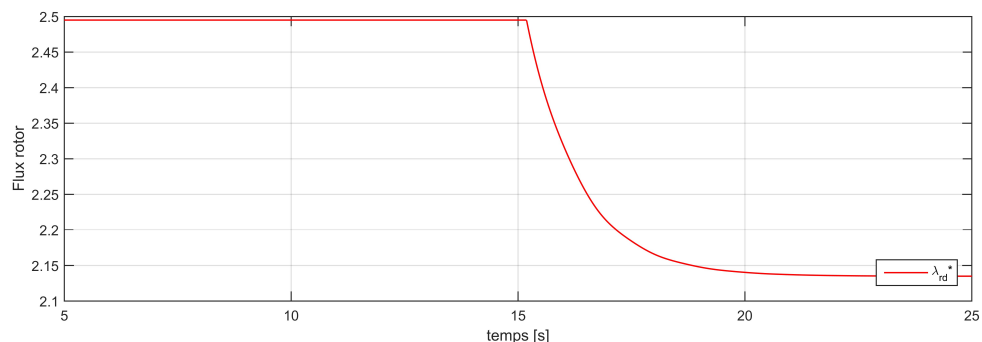


Figura 7.21. Evolució del valor de consigna de la component d del flux del rotor, λ_{rd}^* , en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

En la Figura 7.22, s'observa la resposta del parell en fer front a l'entrada graó. S'observa que, en valor absolut, aquest augmenta de valor en augmentar la velocitat del vent. La diferència que s'aprecia entre el parell electromecànic i el seu valor òptim es deu a la manca d'un llaç de control entre aquests dos paràmetres.

Més endavant, a la Figura 7.23 es mostra la resposta de la velocitat de rotació del rotor. S'observa com aquesta velocitat augmenta al produir-se un increment en la velocitat del vent, arribant a una velocitat per sobre la velocitat de sincronisme de la màquina.

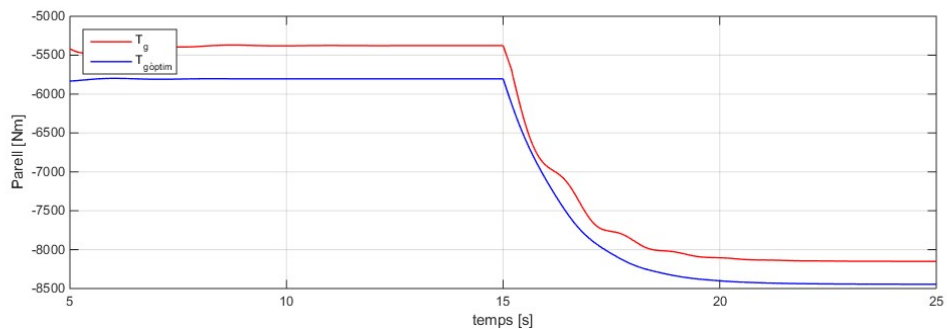


Figura 7.22. Evolució del parell electromecànic (vermell) i del parell electromecànic òptim (blau) de la màquina d'inducció en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s..

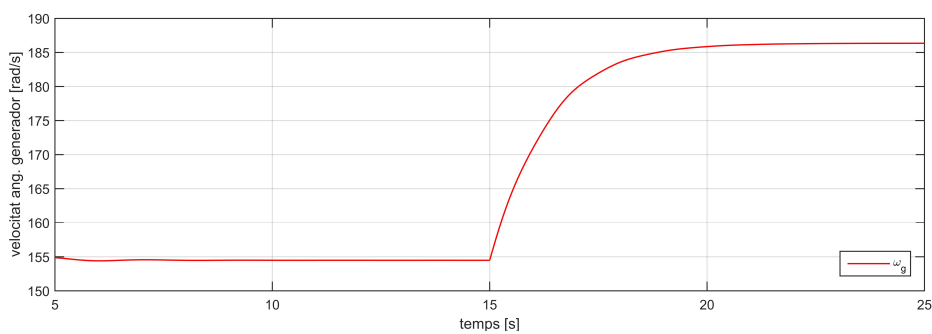
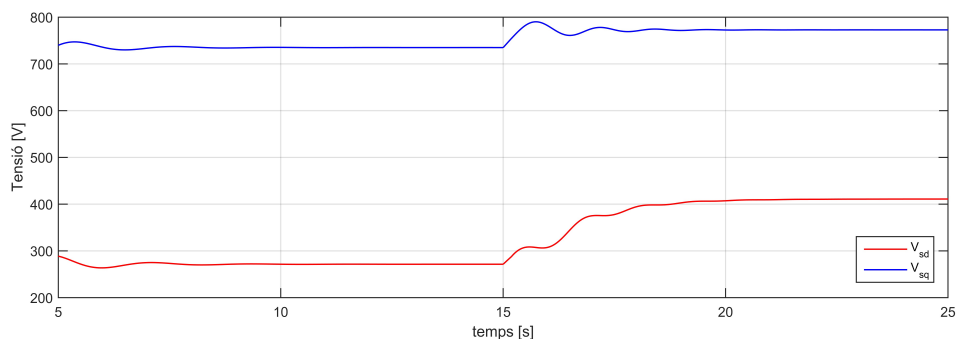


Figura 7.23. Evolució de la velocitat de rotació del rotor en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.



A

la

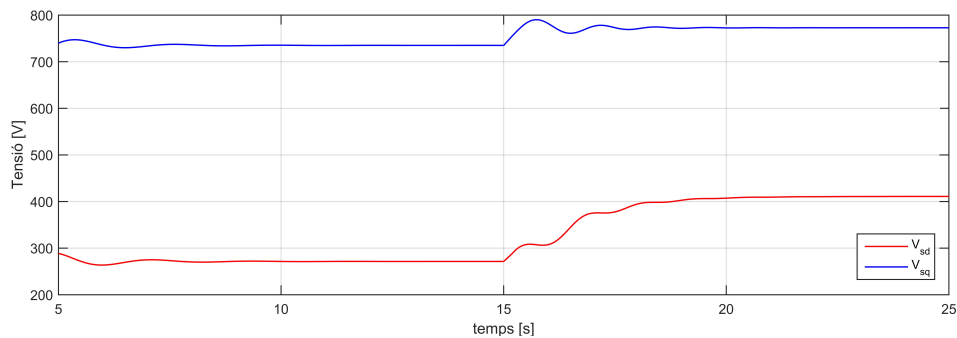


Figura 7.24. s'il·lustra la resposta de les components de tensió de l'estator de la màquina d'inducció. S'observa com ambdues augmenten el seu valor a l'augmentar la velocitat del vent a 11 m/s.

Finalment, a la Figura 7.25 es mostren representades els corrents de l'estator en referència qd. S'observa com aquests segueixen el valor de consigna i que a l'aplicar l'entrada graó, la component I_{sd} disminueix. Això es degut a la disminució de la component d del flux del rotor. També s'observa que la component I_{sq} del corrent creix a l'augmentar la velocitat del vent.

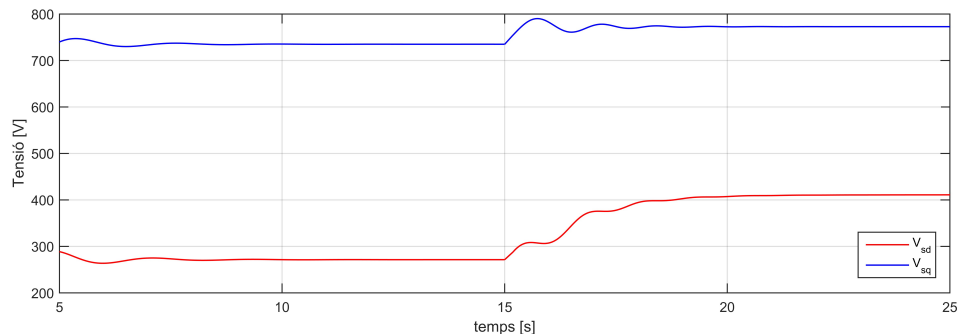


Figura 7.24. Components de tensió V_{sd} (vermell) i V_{sq} (blau). en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

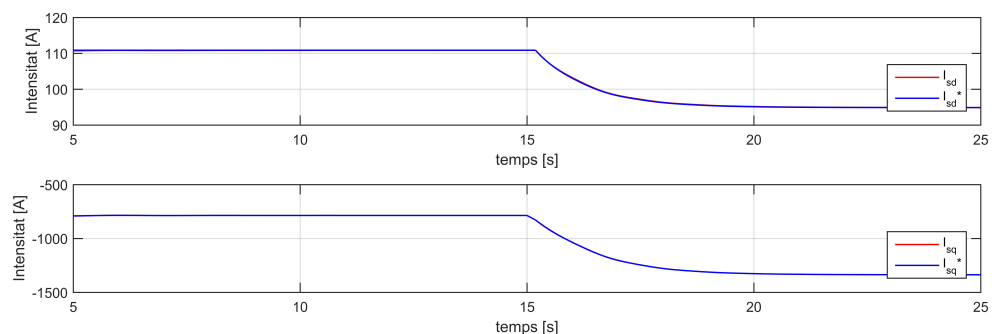


Figura 7.25. Evolució de les components I_{sd} (vermella de la figura superior), I_{sd}^* (blava de la figura superior) i I_{sq} (vermella de la figura inferior) i I_{sq}^* (blava de la figura inferior) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

7.3.1.2. Comportament de les variables del bus de continua

A la Figura 7.26 es mostra el comportament de la tensió del bus de contínua davant d'aquesta entrada. S'observa com a l'instant de canvi de consigna, a l'igual que en el model amb el control Tensió-Freqüència, és produeix una variació mínima (de menys d'un 0.00002%) en la tensió. No obstant això, transcorreguts menys de 5 segons, aquest valor torna a ser igual al valor de referència.

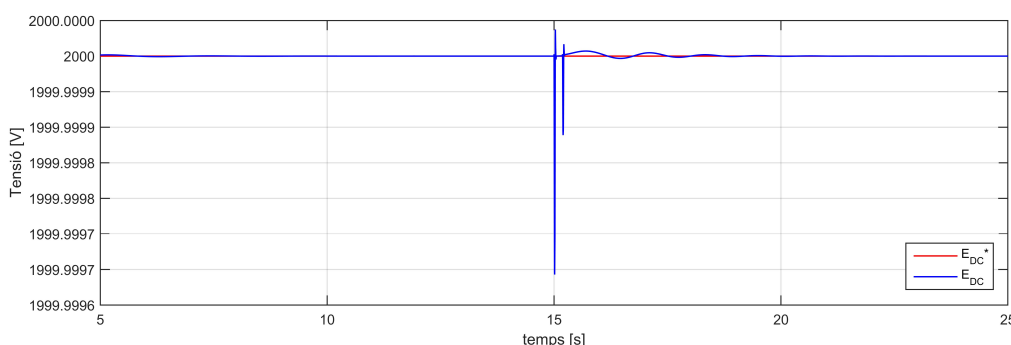


Figura 7.26. Evolució del valor de tensió del bus DC (blau) i del valor de referència de tensió consignat (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

7.3.1.3. Comportament de les variables de la xarxa elèctrica

Finalment a la Figura 7.27 i a la Figura 7.28 es mostren, respectivament, els resultats obtinguts dels paràmetres de potència i corrent davant de la consigna de vent de tipus graó. S’observa que la potència elèctrica obtinguda és la mateixa que la potència elèctrica generada per la màquina d’inducció. Això és degut, igual que en el model amb control Tensió-Freqüència, a què es considera un sistema *Back to Back* ideal.

D’altra banda, en la Figura 7.28 s’observen els paràmetres del corrent de la xarxa elèctrica en referència qd. S’aprecia que la component I_{zq} del corrent augmenta en augmentar la velocitat del vent, mentre que la component d del corrent roman constant a 0. D’aquesta manera la potència reactiva injectada a la xarxa és nul·la.

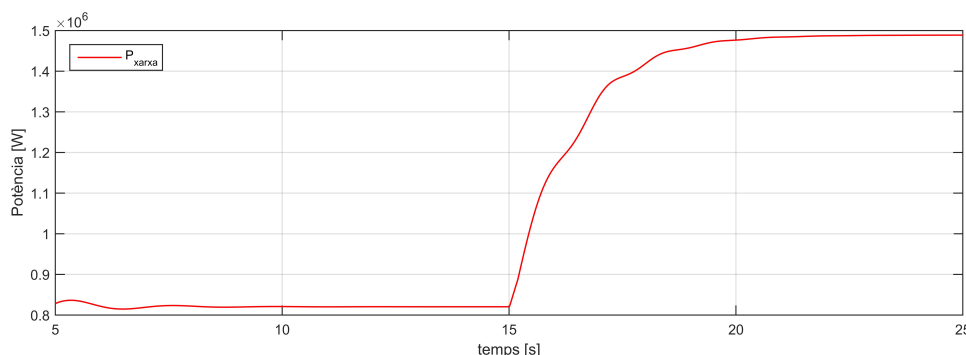


Figura 7.27. Evolució de la potència elèctrica de la xarxa en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

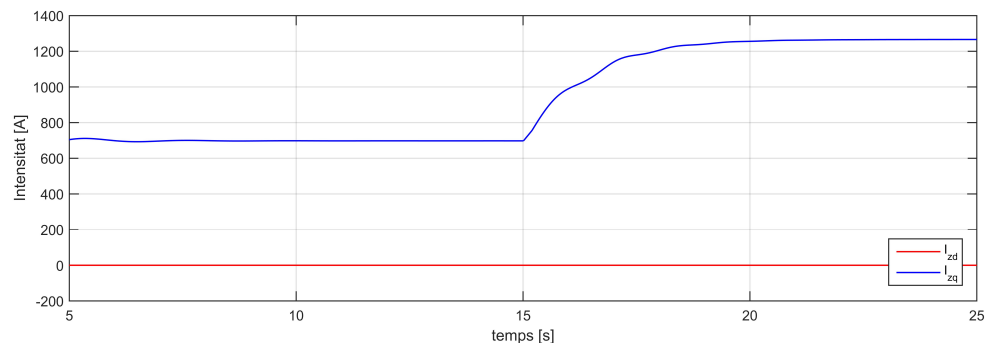


Figura 7.28. Evolució de les components de corrent I_{zq} (blau) i I_{zd} (vermell) en aplicar un graó de vent de 9 a 11 m/s.

A la Figura 7.29 es mostren representades la potència mecànica de la turbina i la potència elèctrica de la màquina d'inducció. S'observa com la potència elèctrica evoluciona més lentament que la potència mecànica.

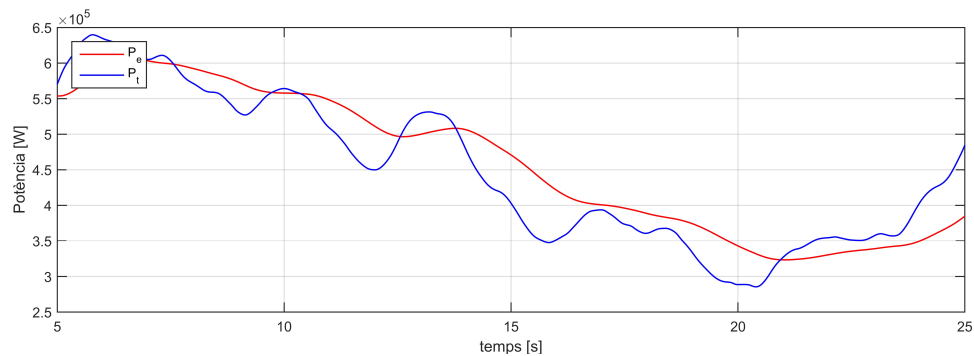


Figura 7.29. Evolució de la potència elèctrica generada (vermell) i de la potència mecànica de la turbina (blau) en aplicar el perfil de vent com a entrada.

Tot seguit, a la Figura 7.30 i a la Figura 7.31 es mostren representades la freqüència angular i la velocitat de rotació del rotor de la màquina d'inducció. S'observa com aquests paràmetres evolucionen suaument al llarg de la simulació.

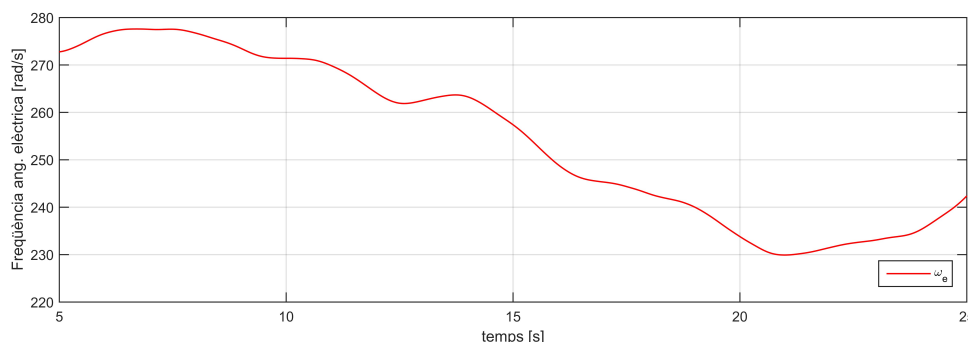


Figura 7.30. Evolució de la freqüència angular elèctrica de la màquina d'inducció en aplicar el perfil de vent com a entrada.

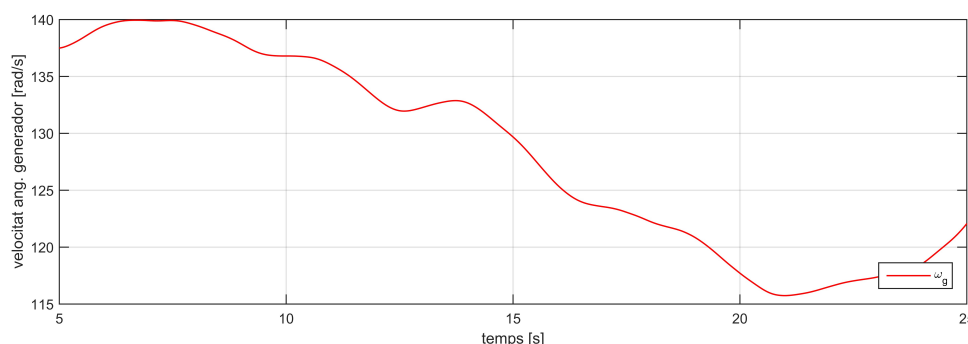


Figura 7.31. Evolució de la velocitat de rotació del rotor de la màquina d'inducció en aplicar el perfil de vent com a entrada.

7.4. Comparativa

7.4.1. Resposta davant d'un graó de vent

A la Figura 7.32 s'observa la comparació entre les potències elèctriques de la xarxa de cada sistema. Es comprova que a l'augmentar la velocitat del vent de 9 m/s a 11 m/s, la potència elèctrica obtinguda amb el sistema connectat directament a la xarxa, es inferior a la obtinguda amb les dues metodologies de control aplicades en aquest treball. A la vegada s'observa que la potència en aquest model arriba abans al valor final després d'aplicar el canvi en l'entrada. Això es deu a què aquest model no presenta cap metodologia de control que provoqui un retard en la resposta del sistema.

D'altra banda, s'observa que a l'aplicar l'entrada graó, la potència elèctrica obtinguda mitjançant el control vectorial arriba d'una manera més suau al seu valor final que la potència obtinguda mitjançant el control Tensió-Freqüència.

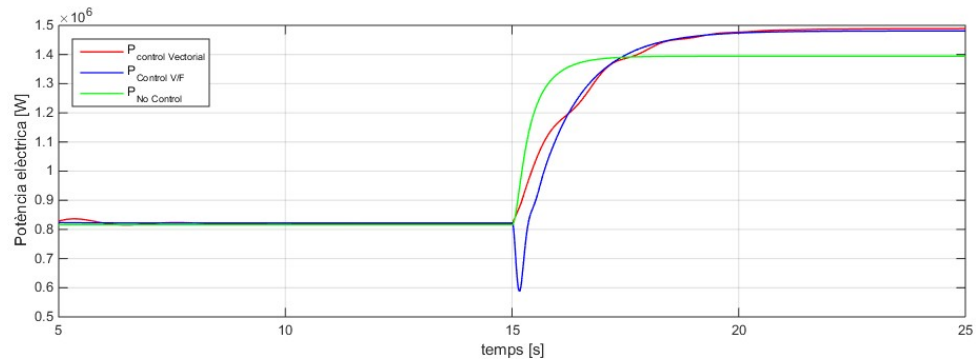


Figura 7.32. Evolució de la potència elèctrica generada dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar una entrada graó de 9 a 11 m/s.

A continuació, a la Figura 7.33, es representen les potències mecàniques de la turbina obtingudes amb els tres sistemes. Com en el cas de la potència elèctrica, s'observa que els dos sistemes que presenten algun tipus de control sobre el generador, obtenen una potència superior en augmentar la velocitat del vent. Aquesta diferència es d'aproximadament 0.1 MW. També s'aprecia que el sistema connectat directament a la xarxa té una resposta més ràpida pel motiu explicat anteriorment.

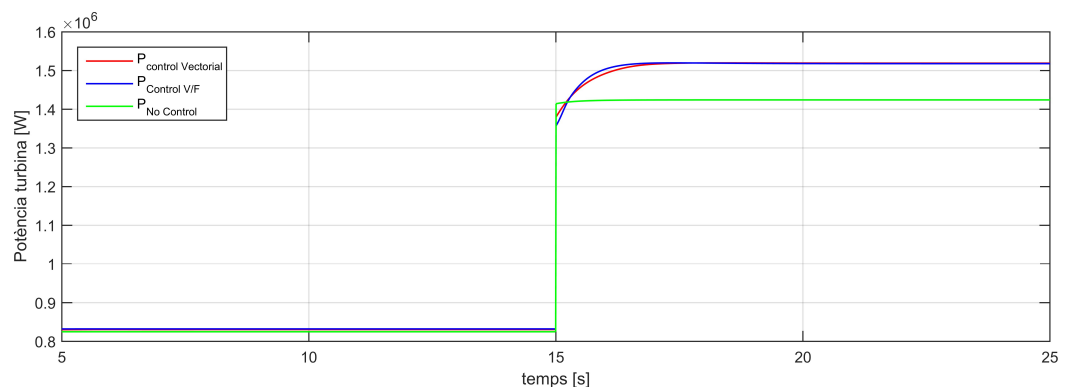


Figura 7.33. Evolució de la potència mecànica de la turbina dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar una entrada graó de 9 a 11 m/s.

A la Figura 7.34 s'observa l'evolució del paràmetre C_p de la turbina. Com en les gràfiques anteriors, s'obté que el sistema més ràpid és el sistema connectat directament a la xarxa. No obstant això, s'observa com després d'aplicar l'entrada graó, els sistemes controlats mitjançant el control Vectorial i el control Tensió-Freqüència, tendeixen al valor òptim d'aquest paràmetre, mentre que el sistema de l'aerogenerador connectat directament a xarxa adopta un valor inferior a l'òptim.

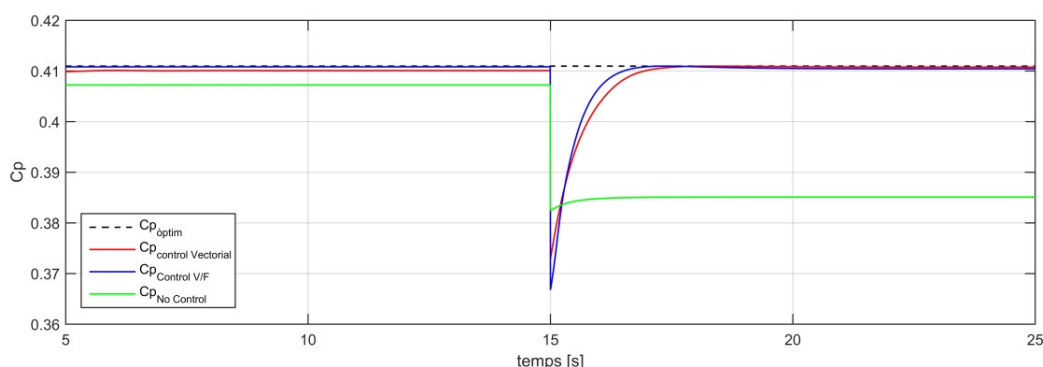


Figura 7.34. Evolució del paràmetre C_p de la turbina dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar una entrada graó de 9 a 11 m/s.

A continuació, es realitza la comparació entre les velocitats de rotació del rotor del generador. Aquesta es representa, a continuació, a la Figura 7.35. A la figura s’observa com les velocitats de rotació del sistema amb control vectorial i del sistema amb control Tensió-Freqüència augmenten. En canvi, el sistema amb l’aerogenerador connectat directament a la xarxa roman constant a una velocitat propera a la velocitat de sincronisme. Aquest fet es deu a que en el model de la turbina connectada directament a la xarxa, la freqüència elèctrica sempre roman constant a 50 Hz.

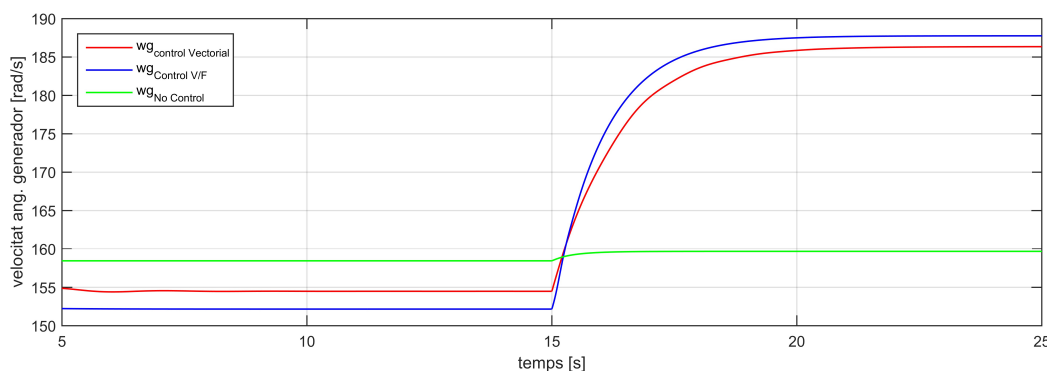


Figura 7.35. Evolució de la velocitat del rotor del generador dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar una entrada graó de 9 a 11 m/s.

Finalment, a la Figura 7.36 es comparen les velocitats angulars elèctriques amb les que s’alimenta l’estator de la màquina elèctrica. S’observa que la freqüència angular obtinguda amb el model de l’aerogenerador connectat directament a la xarxa roman constant a 50 Hz. En canvi, els paràmetres de freqüència obtinguts mitjançant les dues metodologies de control augmenten al produir-se un augment en la velocitat.

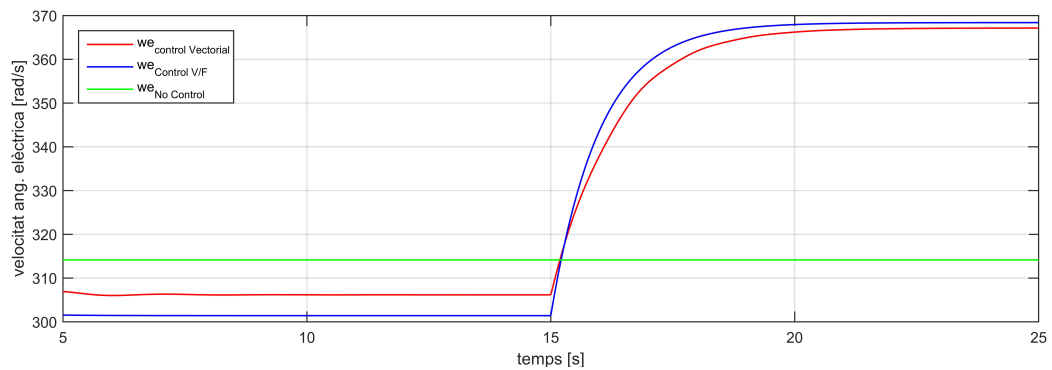


Figura 7.36. Evolució de la freqüència angular elèctrica de la màquina d'inducció dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar una entrada graó de 9 a 11 m/s.

7.4.2. Resposta davant d'un perfil de vent

A la Figura 7.37 es mostra la comparació entre les tres potències elèctriques del generador que es corresponen amb la potència elèctrica injectada a la xarxa. S'observa com la potència elèctrica generada pel model de l'aerogenerador connectat directament a la xarxa és inferior a la obtinguda amb els models que inclouen una metodologia de control.

D'altra banda, s'observa que la potència generada pel model amb control Vectorial és el model més lent. Això es deu a que aquesta metodologia de control és més complexa que la de Tensió-Freqüència.

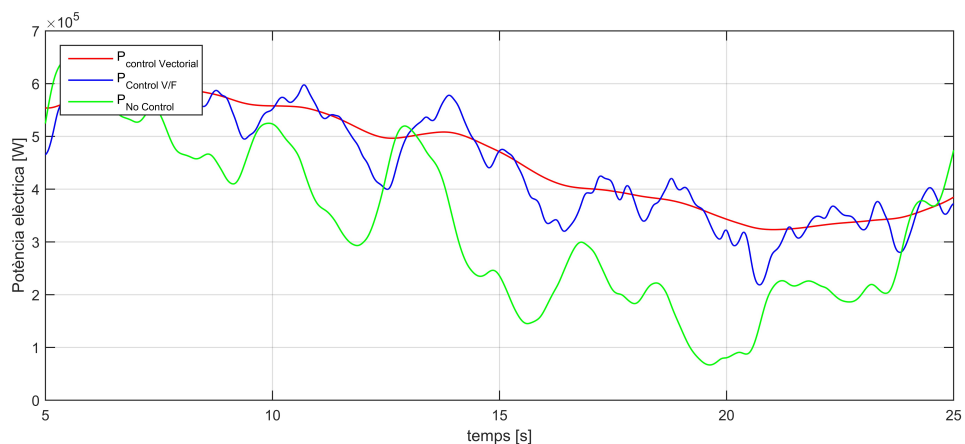


Figura 7.37. Evolució de la potència elèctrica generada dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar el perfil de vent com a entrada.

La comparació entre les potències de la turbina obtingudes mitjançant cada un dels models es mostra a la Figura 7.38. S'observa que a l'introduir un filtre al perfil de vent del model amb el Control Vectorial, la potència de la turbina és més suau que la dels altres dos models.

Finalment, a la Figura 7.39 es mostra la comparació entre el paràmetre C_p de la turbina. S'aprecia com en els models que estan subjectes a una metodologia de control aquest paràmetre tendeix al valor òptim de 0.4109; mentre que en el model amb el generador connectat directament a la xarxa, aquest paràmetre no hi tendeix.

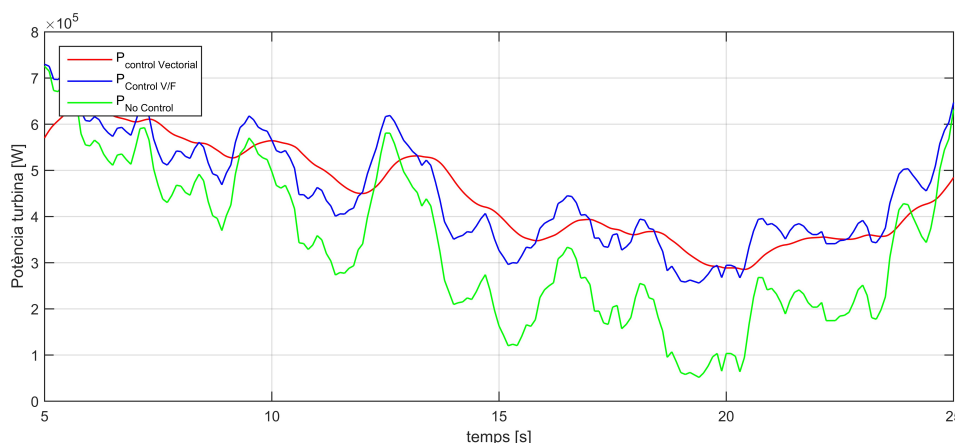


Figura 7.38. Evolució de la potència mecànica de la turbina dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en el perfil de vent com a entrada.

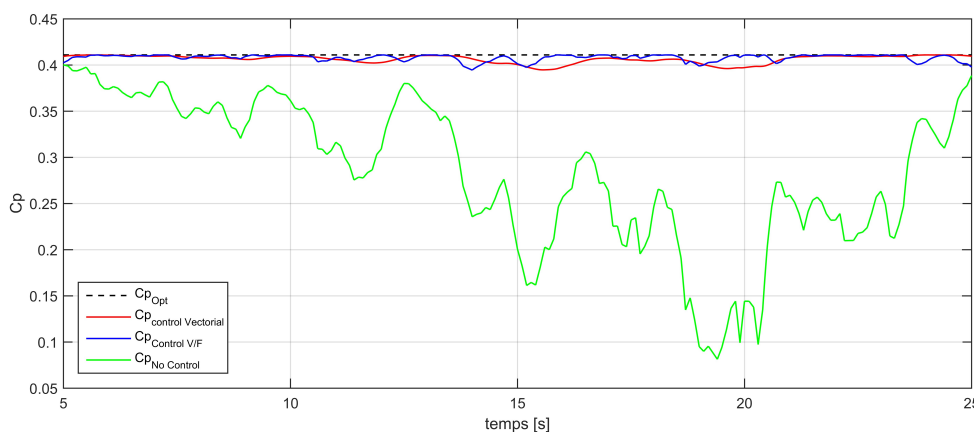


Figura 7.39. Evolució Paràmetre C_p de la turbina mecànica de la turbina dels tres models: model sense control (verd), model amb control Tensió Freqüència (blau) i model amb Control Vectorial (vermell) en aplicar el perfil de vent com a entrada.

8. Pressupost del projecte

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

8.1. Recursos humans

En aquesta partida es consideren totes les hores dedicades al projecte. Aquest temps es divideix en:

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

El cost d'aquesta partida es mostra desglossat, a continuació, en la Taula 8.1, aplicant el IVA corresponent.

Concepte	Preu [€/hora]	Temps dedicat [h]	Cost total [€]
Investigació	35	150	5.250
Simulació	35	150	5.250
Redacció memòria	20	120	2.400
Subtotal		420	12.900
IVA(21%)			2.709
TOTAL			15.609

Taula 8.1. Pressupost dels Recursos humans

8.2. Recursos materials

En aquesta partida s'agrupen el maquinari i el programari utilitzats en la elaboració d'aquest projecte. En el cas del maquinari, s'ha considerat un període d'amortització de 6 mesos, que es correspon amb la duració del projecte. En el cas del programari utilitzat en aquest projecte, s'ha considerat que la llicència d'aquests programes es gratuïta al ser estudiant de la UPC. Aquesta partida es mostra desglossada, a continuació, en la Taula 8.2.

Concepte	Preu unitari [€]	Unitats	Cicle de vida [anys]	Amortització
Ordinador Personal	780	1	4	97,5
Ratolí	16	1	4	2
Matlab 2016	0	1	-	0
EMTP-RV	0	1	-	0
TOTAL (IVA inclòs)				97,5

Taula 8.2. Pressupost dels Recursos materials

8.3. Cost total

Finalment, ambdues partides se sumen, donant lloc al pressupost definitiu del projecte. Aquest es recull en la Taula 8.3.

Partida	Cost [€]
Recursos humans	21.740
Recursos materials	97,5
TOTAL (IVA Inclòs)	15.706,5

Taula 8.3. Pressupost total del projecte.

9. Impacte ambiental

En aquest capítol es fa menció a l'impacte ambiental de les turbines eòliques. Per avaluar aquest, s'estudia l'impacte ambiental que de la instal·lació de parcs eòlics tant *Onshore* com *Offshore*. A l'apartat 9.1 s'explica l'impacte que causaria una instal·lació *Onshore* i, a l'apartat 9.2, l'impacte d'una instal·lació *Offshore*.

9.1. Impacte ambiental dels parcs eòlics *Onshore*

En cas d'instal·lar-se la turbina eòlica estudiada en aquest treball en un parc eòlic *Onshore*, s'han de tenir en compte diferents impactes que aquesta instal·lació pot causar en la topografia del medi.

Primerament, s'ha de considerar l'impacte visual que la instal·lació *Onshore* provocarà en el paisatge. Si un parc eòlic s'instal·la a prop d'una població, aquesta pot veure com les turbines eòliques passen a ser un element predominant del paisatge i, en conseqüència, oposar-se a la seva construcció. La ubicació ideal del parc seria en zones deshabitades, però aquest és un requisit molt difícil de complir.

Per indicar l'impacte visual del parc, s'indica la zona de visibilitat teòrica o *Zone of Theoretical Visibility* (ZTV) en l'estudi d'impacte ambiental [33]. Aquestes zones es numeren de la I a la IV, zones que causen un major i un menor impacte visual en la topografia de paisatge respectivament.

No obstant, els parcs eòlics acostumen a tenir una vida útil al voltant dels 25 anys i, per tant, després del seu desmantellament, el medi pot tornar a recuperar el seu estat original. Però, abans de realitzar el desmantellament del parc, s'haurà de realitzar un estudi sobre la maquinaria utilitzada en el procés i el posterior reciclatge dels diferents materials que conformen l'aerogenerador.

Un segon aspecte que s'ha de tenir en compte al realitzar l'estudi d'impacte ambiental és l'impacte causat pel soroll. Les turbines eòliques actuals generen soroll durant el seu funcionament que provoca queixes per part de la població més propera. Per evitar aquestes queixes, s'ha de triar la localització del parc tenint en compte la normativa del país o regió sobre el nivell permès de soroll [34].

Un altre aspecte a considerar és l'impacte en l'ecosistema, tant en produït sobre el terreny com el causat sobre els animals autòctons de la zona. La localització del parc ha d'estar subjecta a la política de conservació de la natura. També s'ha de tenir en compte, que els aerogeneradors en ser estructures verticals amb elements mòbils, representen un perill

sobre els ocells, tant residents de la zona com en període de migració.

Finalment, un últim aspecte que s'ha de tenir en consideració és les interferències amb les ones electromagnètiques senyals de Radio i Televisió. Aquestes interferències s'expliquen a [34].

9.2. Impacte ambiental dels parc eòlics *Offshore*

La velocitat mitjana anual del vent és més elevada en localitzacions *Offshore* que en les localitzacions *Onshore*. Per això el desenvolupament cap a localitzacions *Offshore* està esdevenint més atractiu. No obstant, en la instal·lació de parcs *Offshore*, a l'igual que en la instal·lació de parcs eòlics *Onshore*, s'han de tenir en compte l'impacte ambiental que aquesta instal·lació comporta.

A l'hora d'escollir la localització del parc, s'han de tenir en compte diversos factors. Entre aquests factors es troba l'impacte sobre l'ecosistema marí, tant la flora com la fauna. De les possibles localitzacions s'han d'excloure les zones protegides. La instal·lació suposa danyar el fons marí, ja que les turbines eòliques necessiten ser fixades mitjançant cimentació.

D'altra banda, s'ha d'estudiar l'impacte que la instal·lació tindrà sobre les aus migratòries, ja que aquestes poden xocar contra els aerogeneradors. També cal estudiar les rutes de peixos, mamífers marins de la zona per minimitzar el dany en l'ecosistema marí [35].

Un altre factor a tenir en compte a l'hora d'escollir la localització és el tràfic marí. S'han d'estudiar si la localització proposada interfereix amb les rutes marítimes de la zona, tant pesqueres com comercials. En cas afirmatiu, s'haurien de prendre mesures per evitar col·lisions de les embarcacions amb el parc.

També es important fer un estudi de l'impacte visual que el parc tindrà sobre la població costanera. Aquest impacte serà menor que l'impacte produït per un parc *Onshore*, ja que aquests parcs s'instal·len a distàncies grans que fan que el parc sigui gairebé imperceptible als ulls de la població. Anàlogament, l'impacte degut al soroll també serà mínim que en el cas d'una instal·lació *Onshore*.

Finalment, s'ha de tenir en compte que tant durant la instal·lació del parc com en el desmantellament d'aquest, es requerirà maquinaria especialitzada i s'alterarà, considerablement, l'activitat de la zona. També s'ha de realitzar un estudi sobre el reciclatge dels diferents materials utilitzats en els aerogeneradors.

Conclusions

En aquest projecte s'ha presentat la modelització de la part mecànica, la part elèctrica i la part d'electrònica de potència d'una turbina eòlica. També s'ha realitzat el control d'aquest model mitjançant dues metodologies de control: el control Tensió-Freqüència i el control Vectorial. A la vegada, s'ha realitzat la modelització d'una turbina eòlica connectada directament a la xarxa elèctrica sense cap element d'electrònica de potència. Finalment, s'ha realitzat una simulació de cadascun dels models per comprovar el seu funcionament.

S'ha comprovat que els models amb una metodologia de control aplicada maximitzen l'extracció de potència envers al model sense cap mena de control aplicat sobre ell. També s'ha verificat que els llaços de control de les dues metodologies de control funcionen correctament, arribant a la consigna imposada.

Per a futures línies de treball, es presenten diferents opcions. Primerament, millorar el control Vectorial aplicat al sistema, afegint un controlador al parell electromecànic de la màquina d'inducció. En segon lloc, canviar el model simplificat del convertidor VSC pel model real format per sis IGBT i controlant l'obertura d'aquests. En tercer lloc, incloure el model realitzat en una simulació d'un sistema complet i estudiar el comportament d'aquest sistema davant de faltes en la xarxa amb el programa *EMTP-RV*. En quart lloc, executar els mateixos models mitjançant altres softwares de simulació. Finalment, una última futura línia de treball seria intentar implementar els controls dissenyats en una plataforma real.

Agraïments

En primer lloc, vull agrair a l'Oriol Gomis per brindar-me l'oportunitat de poder realitzar aquest treball en l'àmbit de l'energia eòlica. També vull donar les gràcies al Joan Sau, director del treball i , en especial, Ricard Ferrer, codirector, per la seva implicació, paciència i suport proporcionat durant l'elaboració d'aquest treball. Sense la seva direcció aquest treball no hagués estat possible.

Vull donar les gràcies als companys i companyes del despatx pel suport i la bona companyia proporcionats i per fer-me sentir una més.

Finalment, vull agrair a la meva família i amics, en especial a la meva mare, el suport incondicional rebut durant el transcurs dels estudis universitaris i durant aquest treball. Sense vosaltres mai hagués pogut arribar tant lluny.

Annex A

Transformades de Park i de Clarke

A.1. Transformada de Park

En molts estudis elèctrics, les variables en referència abc són de naturalesa oscil·lant, fet que pot dificultar el seu control. Per aquest motiu, és útil tenir valors constants a l'hora de dissenyar el control. La transformada de Park transforma les variables en referència abc a referència $qd0$, obtenint variables amb valors constants (veure Figura A1) [36].

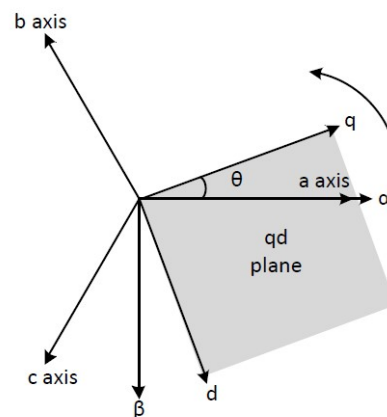


Figura A.1. Representació pla qd , Font [27].

Existeixen diferents tipologies de transformades de Park, però la utilitzada al llarg d'aquest projecte és la següent:

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

On,

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

Aquesta matriu és invertible, i, per tant, és pot aplicar l'operació inversa per passar d'una referència $qd0$ a una referència abc . Aquesta operació és realitza de la següent manera:

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

On,

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

Un cop aplicada la Transformada de Park, s'obtenen els següents fasors de tensió i de corrent:

$$\underline{V}^{qd} = \frac{v_q - jv_d}{\sqrt{2}} \quad \underline{I}^{qd0} = \frac{i_q - ji_d}{\sqrt{2}}$$

La potència del sistema trifàsic es pot expressar com:

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

A partir de l'expressió anterior, la potència activa i reactiva es poden expressar com:

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

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

Un exemple de l'aplicació de la transformada de Park es mostra en Figura A.2.

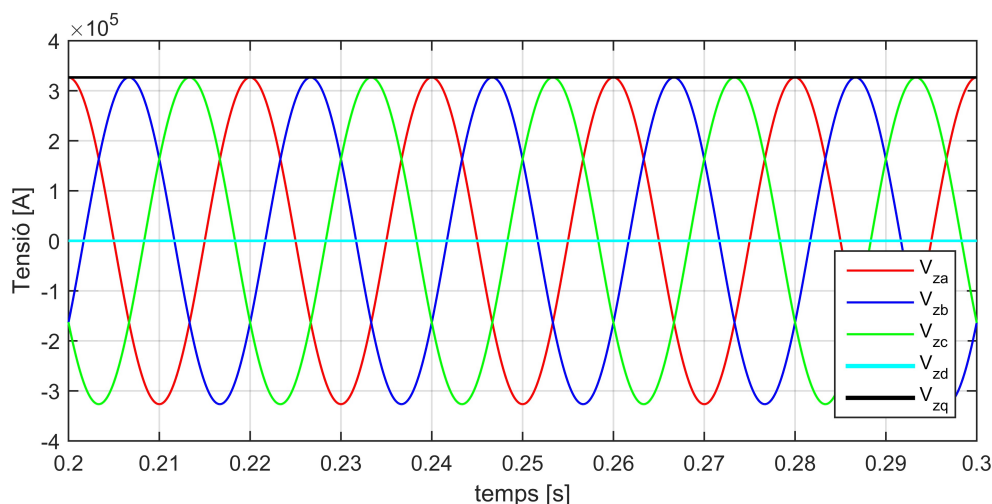


Figura A.2. Representació Transformada de Park.

A.2. Transformada de Clarke

La transformada de Clarke transforma els valors elèctrics trifàsics expressats en referència abc , a valors en una referència ortogonal $\alpha\beta 0$ [37]. A la Figura A.3 es mostra la transformació geomètrica que es produeix al aplicar la transformada de Clarke.

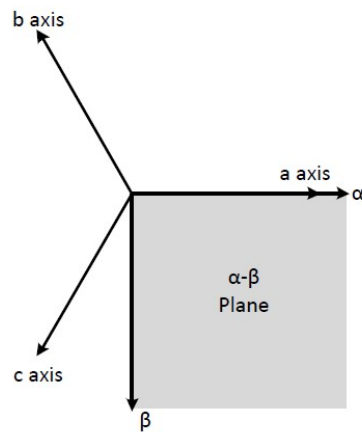


Figura A.3. Representació pla $\alpha\beta$, Font [27].

Aquesta transformada es defineix com:

$$[x_{\alpha\beta 0}] = T_{Clarke}[x_{abc}]$$

On,

$$T_{Clarke} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Aquesta matriu també es invertible, permetent que es pugui realitzar l'operació inversa:

$$[x_{abc}] = T_{Clarke}^{-1}[x_{\alpha\beta 0}]$$

On,

$$T_{Clarke}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

Bibliografia

- [1] ACCIONA. *Energia eólica*. 2011 [http://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/?gclid=CJLBgP_YidACFUG4GwodglsC4w].
- [2] THE EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION. *Wind in Power: 2015 European Statistics*. Febrer 2016.
- [3] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA. *Informe del sistema eléctrico espanyol 2015*. Juny 2016.
- [4] Shahan, Z. *History of Wind Turbines*. 21 Novembre 2014. [<http://www.renewableenergyworld.com/ugc/blogs/2014/11/history-of-wind-turbines.html>].
- [5] Vestas Wind Systems A/S . *V164-8.0 MW*. [http://www.homepages.ucl.ac.uk/~uceseug/Fluids2/Wind_Turbines/Turbines/V164-8MW.pdf].
- [6] IRENA. *Renewable Energy Capacity Statistics 2015 (slide deck)*. 2015.
- [7] Fried, L., Qiao, L., and Sawyer, S. *Global Wind Statistics 2015*. Abril 2016.
- [8] Camm, E.H., Behnke, M.R., Bolado, O., Bollen, M., Brandt, M., Brooks, C., Dilling, W., Edds, M., Hejdak, W. J., Houseman, D., Klein, S., Li, F., Li, J, Maibach, P., Nicolai, T., Patiño, J., Pasupulati, S. V., Samaan, N., Saylor, S., Siebert, T., Smith, T, Strake, M., and Walling, R. *Characteristics of Wind Turbine Generators for Wind Power Plant*. IEEE PES Wind Plant Collector System Design Working Group. Octubre 2016.
- [9] Prieto-Araujo, E. *Power converter control for offshore wind energy generation and transmission*. PhD Thesis, Abril 2016.
- Maquina induccio
- [10] ABB SACE. Technical Application Papers. Three-phase asynchronous motors . Juliol 2008. [<https://library.e.abb.com/public/5e6a1c128ae4fab1c1257b490033f301/1SDC007106G0201.pdf>].
- [11] KIT – The Research University in the Helmholtz Association. *The invention of the electric motor 1856-1983*. Setembre 2014. [<https://www.eti.kit.edu/english/1390.php>].

- [12] Danish Wind Industry Association. *Generadores asincronos (o de inducción)*. Maig 2003.
[http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/async.htm]
- [13] Parekh, R. *VF Control of 3-Phase Induction Motors Using PIC16F7X7 Microcontollers*. 2004.
[<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00889b.pdf>]
- [14] Akin, B., Garg, N. *Scalar (V/f) Control of 3-Phase Induction Motors*. Juliol 2016.
[<http://www.ti.com/lit/an/sprabq8/sprabq8.pdf>]
- [15] Kohleusz, G., and Fodor, D. *Comparison of Scalar and vector control strategies of induction motors*. Hungarian Journal of Industrial Chemistry Veszprém Vol.39(2) pp. 265-270. 2011.
[<http://mkweb.uni-pannon.hu/hjic/index.php/hjic/article/viewFile/422/390>]
- SCIG
- [16] Sleight, K. *How are Squirrel Cage Induction Motors Constructed?*. 2011.
[<http://www.brighthubengineering.com/diy-electronics-devices/43723-how-are-squirrel-cage-induction-motors-constructed/>].
- [17] OPEXenergy. *Generadores Síncronos y Asíncronos*.
[http://opex-energy.com/eolica/generador_sincrono_y_asincrono.html].
- [18] Alternative Energy Tutorials. *Induction Generator*. 2016. [<http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/induction-generator.html>]
- [19] Adapa,R. *High-Wire Act*. IEE Power and Energy Magazine. Novembre 2012.
[<http://magazine.ieee-pes.org/files/2012/11/10mpe06-adapa-2213011-x.pdf>]
- [20] Gasch, R., Twele, J. *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Springer. 2012.
- [21] Singh,M. And Santoso, S. *Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants*.Maig 2011.
- [22] Gomis, O. And Prieto, E. *El model de simulació d'aerogenerador de velocitat fixa*. Generació Elèctrica: Pràctiques. 10 d'abril de 2012.
- [23] ABB. *Cuaderno de aplicaciones técnicas n.º12. Plantas eólicas*. 2012.
[http://www.edu.xunta.gal/centros/cifpcoroso/gl/system/files/Cuaderno+Tecnico_nu_m+12_Plantas+eolicas.pdf].
- [24] Ackermann, T. *Wind Power in Power Systems*. 2005.

- [25] Junyent Ferré, A. *Modelització i control d'un sistema de generació elèctrica de turbina de vent*. Master's thesis, ETSEIB-UPC, 2007.
- [26] Junyent-Ferré, A. and Gomis-Bellmunt, O. *Wind generation Systems modelling for Integration in power Systems*. Juny 2009.
- [27] Egea-Alvarez, A., Junyent-Ferré, A. and Gomis-Bellmunt, O. *Distributed Power Control of Grid Connected Distributed Generation Systems*. 2011.
- [28] Chung,S.-K.: *A phase tracking System for three phase utility interface inverters*. IEEE Transactions on Power Electronics 15, 431-438. 2000.
- [29] Harnefors, L. and Nee, H.P. *Model-Based Current Control of AC Machines Using the Internal Model Control Method*. Febrer 1998.
- [30] Domínguez-García, J.L., O. Gomis-Bellmunt, L. Trilla-Romero, A. Junyent-Ferré, *Vector control of squirrel cage induction generator for wind power*. XIX International Conference on Electrical Machines in Rome, 2010.
- [31] J.L. Domínguez-García, O. Gomis-Bellmunt, L. Trilla-Romero, A. Junyent-Ferré, *Indirect vector control of squirrel cage induction generator wind turbine*.2012.
- [32] Maher, R., Emar, W., Awad, M. *Indirect Field Oriented Control of an Induction Motor Sensing DC-link Current with PI Controller*. International Journal of Control Science and Engineering. 2012.
- [33] www.wind-energy-the-facts.org.
- [34] Hau, E. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer. 2006.
- [35] Köller, J., Köppel, J., Peters, W. *Offshore Wind Energy: Research on Environmental Impact*. Springer, 2006.
- [36] Park, R.H. *Two-reaction theory of synchronous Machines*. AIEE Transactions 48, 716-730. 1929.
- [37] Clarke,E. *Circuit Analysis of AC Power*. John Wiley and Sons, Chichester. 1941.