

Resum

En el present document es realitza l'anàlisi, el control i la modelització d'un sistema de generació eòlica mitjançant un *software* informàtic de simulació. S'estudia el procés des del moment que el vent és captat per una turbina eòlica fins que l'energia elèctrica és generada i enviada a la xarxa elèctrica.

El treball es centra en el control de la velocitat de rotació d'un generador d'inducció de gàbia d'esquirol per poder obtenir la potència òptima segons la velocitat del vent que es doni en cada moment, i en l'adaptació de la xarxa elèctrica a la que es connectarà el parc a les condicions desitjades per l'aerogenerador.

Finalment es realitza una simulació de tot el sistema estudiat sota condicions que es podrien donar en la realitat per veure com es comportaria si es realitza un muntatge en un futur.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
SUMARI DE FIGURES	7
1. PREFACI	13
2. INTRODUCCIÓ	14
3. GENERACIÓ D'ENERGIA EÒLICA	15
3.1. La producció global d'energia eòlica	15
3.1.1. Producció d'energia eòlica a Espanya	16
3.2. L'aerogenerador	18
3.2.1. Components	18
3.2.2. Funcionament	19
3.3. Classificació d'aerogeneradors	19
3.3.1. Posició de l'eix	20
3.3.2. Posició del rotor	20
3.3.3. Número de pales	21
3.3.4. Control de potència	22
3.3.5. Control de la velocitat	23
3.1. Ubicació de l'aerogenerador	25
3.1.1. Instal·lacions <i>onshore</i>	25
3.1.2. Instal·lacions <i>offshore</i>	26
4. TURBINA DE VELOCITAT VARIABLE AMB CONVERTIDOR DE PLENA POTÈNCIA	27
4.1. Generador asíncron o d'inducció	28
4.1.1. Rotor bobinat	29
4.1.2. Rotor de gàbia d'esquirol	29
4.2. Convertidor <i>Back to Back</i>	30
5. MODELITZACIÓ DEL VENT	31
5.1. El vent	31
5.1.1. Gradient vertical de velocitats del vent o <i>Wind Shea</i>	33
5.2. Aprofitament de l'energia cinètica del vent	35
5.3. Modelització del vent	37
6. TRANSMISSIÓ MECÀNICA	41

6.1. Model matemàtic.....	41
6.2. Modelització	42
7. MÀQUINA ELÈCTRICA	45
7.1. Modelització	45
7.2. Control escalar V/f	50
7.2.1. Model matemàtic.....	50
7.2.2. Modelització	52
7.2.3. Resultats.....	53
7.3. Control vectorial	56
7.3.1. Model matemàtic.....	56
7.3.2. Modelització	57
7.3.3. Resultats.....	59
8. CONVERTIDOR ESTÀTIC DE POTÈNCIA	62
8.1. Classificació dels convertidors	62
8.2. Anàlisi i modelització del convertidor	63
8.2.1. Convertidor <i>Back to Back</i>	63
8.2.2. Convertidor VSC	64
8.2.3. Model simplificat del VSC	65
8.3. Convertidor VSC costat xarxa.....	66
8.3.1. Disseny del <i>Phase Locked Loop</i>	68
8.3.2. Disseny del control del llaç de corrent.....	70
8.3.3. Regulador del bus de contínua	74
8.4. Convertidor VSC costat màquina.....	77
9. SIMULACIONS I RESULTATS	80
9.1. Aerogenerador i <i>Back to Back</i>	80
9.2. Aerogenerador, control escalar i <i>Back to Back</i>	82
9.3. Aerogenerador, control vectorial i <i>Back to Back</i>	84
CONCLUSIONS	87
AGRAÏMENTS	89
BIBLIOGRAFIA	90
Referències bibliogràfiques	90
ANNEX	94
Transformada de Park.....	94
Transformada de Clarke.....	95

Sumari de figures

Figura 3.1 Evolució de nova capacitat de producció global d'energia eòlica. Font: GWEC [2]	15
Figura 3.2 Els 10 països que han instal·lat més aerogeneradors al llarg del 2015. Font: GWEC [2]	15
Figura 3.3 Evolució de la capacitat de producció global d'energia eòlica. Font: GWEC [2]	16
Figura 3.4 Els 10 països amb major producció d'energia eòlica. Font: GWEC [2]	16
Figura 3.5 Evolució de la potència eòlica instal·lada a Espanya en els últims 25 any. Font: AEE [3]	17
Figura 3.6 Components d'un aerogenerador. Font: Ariadna Carreño [5]	18
Figura 3.7 Aerogenerador d'eix vertical de rotor Darrieus. Font: Ecotimeblog [8]	20
Figura 3.8 Rotor a sobrevent i rotor a sotavent. Font: Conrado Moreno Figueredo [10]	21
Figura 3.9 Aerogenerador monopala, bipala i tripala. Font: Marman [12]	22
Figura 3.10 Turbina de velocitat fixa – SCIG. Font: [35]	24
Figura 3.11 Turbina de velocitat limitada. Font: [35]	24
Figura 3.12 Turbina de velocitat variable amb convertidor parcial – DFIG. Font: [35]	25
Figura 3.13 Turbina de velocitat variable amb convertidor de plena potència. Font: [35]	25
Figura 3.14 Parc eòlic offshore. Font: TESICNOR [16]	26
Figura 4.1 Generador d'inducció Font: Felipe Jerez [20]	27
Figura 4.2 Generador síncron Font: Felipe Jerez [20]	27
Figura 4.3 Generador síncron multipolar Font: Felipe Jerez [20]	28
Figura 4.4 Generador síncron multipolar d'imants permanents Font: Felipe Jerez [20]	28
Figura 4.5 Rotor bobinat. Font: Tuveras [19]	29
Figura 4.6 Gàbia d'esquirol. Font: Tuveras [19]	30

Figura 4.7 Esquema típic d'un Back to Back amb transistors IGBT	30
Figura 5.1 Distribució de Weibull per $c = 8$	32
Figura 5.2 Distribució de Rayleigh.....	33
Figura 5.3 Variació de la velocitat del vent en funció de l'alçada d'un aerogenerador de 80 m	34
Figura 5.4 Tub de corrent. Font: Danish wind industry association [24]	36
Figura 5.5 Corba C_p d'una turbina de 2 MW amb pitch angle fix a 0°	39
Figura 5.6 Disseny de la modelització de la turbina	40
Figura 5.7 Disseny de la modelització de la velocitat angular òptima de la turbina	40
Figura 6.1 Disseny de la transmissió.....	42
Figura 6.2 Potència de la turbina per diferents velocitats de vent.....	43
Figura 6.3 Velocitat angular del rotor per a diferents velocitats de vent.....	43
Figura 6.4 Perfil de velocitats variable del vent	44
Figura 6.5 Potència de la turbina amb velocitats de vent variable.....	44
Figura 7.1 Esquema elèctric de l'estator i el rotor.....	50
Figura 7.2 Gràfica Parell-Velocitat angular. Font: Bilal Akin and Nishant Garg [39]	51
Figura 7.3 Gràfica tensió-freqüència. Font: Bilal Akin and Nishant Garg [39].....	52
Figura 7.4 Disseny del control de velocitat mitjançant la regulació tensió-freqüència	53
Figura 7.5 Potència elèctrica amb un vent d'11 m/s a diferents freqüències	54
Figura 7.6 Velocitat angular del rotor amb un vent d'11 m/s a diferents freqüències.....	54
Figura 7.7 Potència mecànica vs potència elèctrica amb velocitat de vents variables	55
Figura 7.8 Velocitat angular del rotor amb velocitat de vent variable.....	55
Figura 7.9 Esquema control vectorial	56
Figura 7.10 Disseny del llaç de corrent del control vectorial.....	58

Figura 7.11 Disseny dels corrents d i q de referència de l'estator	58
Figura 7.12 Disseny del control vectorial de la velocitat de gir del SCIG	59
Figura 7.13 Potència elèctrica per diferents velocitats de vent	59
Figura 7.14 Velocitat angular del rotor per diferents velocitats de vent.....	60
Figura 7.15 Potència elèctrica pel perfil de velocitats del vent.....	60
Figura 7.16 Velocitat angular del rotor pel perfil de velocitats del vent	60
Figura 8.1 Estructura bàsica d'un convertidor electrònic d'energia.....	62
Figura 8.2 Convertidor Back to Back. Font: Ali M. Eltamaly, A. I. Alolah and Hassan M. Farh [37]	63
Figura 8.3 Sistema format pel VSC i les tres fases de la xarxa. Font: Pavel Zuniga-Haro, Juan Manuel Ramirez [38]	64
Figura 8.4 VSC amb la part DC modelat com una font de tensió	65
Figura 8.5 VSC amb la part DC modelat com font de corrent amb condensador en paral·lel	65
Figura 8.6 Model simplificat. Font: Agustí Egea Álvarez, Adrià Junyent Ferré i Oriol Gomis Bellmunt [34]	66
Figura 8.7 Esquema de control general del convertidor per a la generació d'energia renovable. Font: Agustí Egea Álvarez, Adrià Junyent Ferré i Oriol Gomis Bellmunt [34]	66
Figura 8.8 Model equivalent de la part AC del convertidor VSC.....	67
Figura 8.9 Modelització de la part AC del convertidor VSC	67
Figura 8.10 Esquema de Phase Locked Loop. Font: Agustí Egea Álvarez, Adrià Junyent Ferré i Oriol Gomis Bellmunt [34].....	68
Figura 8.11 Disseny del Phase Locked Loop	68
Figura 8.12 Simulacions amb diferents valors en funció del factor d'amortiment	70
Figura 8.13 Esquema de Current Loop. Font: Agustí Egea Álvarez, Adrià Junyent Ferré i Oriol Gomis Bellmunt [34]	72

Figura 8.14 Disseny del Current Loop.....	73
Figura 8.15 Intensitat I_q en front d'una consigna graó.....	73
Figura 8.16 Intensitat I_d en front d'una consigna graó.....	74
Figura 8.17 Esquema de regulador de bus de contínua amb balanç de potència.....	74
Figura 8.18 Esquema de regulador de bus de contínua sense balanç de potència.....	75
Figura 8.19 Disseny del regulador de tensió de contínua.....	76
Figura 8.20 Variació de la tensió del bus de contínua enfront d'una consigna graó.....	77
Figura 8.21 Esquema del circuit de la part DC.....	77
Figura 8.22 Disseny del circuit de la part DC.....	78
Figura 8.23 Disseny del balanç de potències.....	78
Figura 8.24 Resposta de la tensió del bus de contínua en front d'una consigna graó.....	79
Figura 9.1 Potència de la turbina.....	80
Figura 9.2 Potència elèctrica generada.....	80
Figura 9.3 Parell electromagnètic.....	81
Figura 9.4 Tensió del bus de contínua.....	81
Figura 9.5 Potència activa de la part AC.....	81
Figura 9.6 Tensions V_{al} , V_{bl} i V_{cl}	82
Figura 9.7 Potència de la turbina.....	82
Figura 9.8 Potència elèctrica generada.....	83
Figura 9.9 Parell electromagnètic.....	83
Figura 9.10 Velocitat angular del rotor.....	83
Figura 9.11 Tensió del bus de contínua.....	84
Figura 9.12 Perfil de velocitats variable del vent.....	84

Figura 9.13 Potència turbina	85
Figura 9.14 Potència elèctrica generada	85
Figura 9.15 Velocitat angular del rotor	85
Figura 9.16 Tensió del bus de contínua	86
Figura 9.17 Potència activa de la part AC	86
Figura 9.18 Tensions V_{al} , V_{bl} i V_{cl}	86
Figura 0.1 Representació del pla $qd0$	94
Figura 0.2 Representació del pla $\alpha\beta$	95

1. Prefaci

Cada cop hi ha més consciència de la importància de no dependre tant dels combustibles fòssils i optar per altres fonts d'energia alternatives com les energies renovables, fent que més empreses busquin la manera d'optimitzar la producció d'aquestes intentant, sempre que sigui possible, abaratir els seus costos.

L'auge de la producció de l'energia eòlica en els últims anys, ha aconseguit que cada cop més sectors vulguin invertir en la generació d'energia elèctrica utilitzant el vent com a font primària.

Tanmateix, la variabilitat i irregularitat del vent fa que l'obtenció d'energia resulti quelcom problemàtica en molts casos per a la xarxa elèctrica. Tampoc juga al seu favor les grans infraestructures necessàries i, per tant, l'impacte paisatgístic que poden provocar les turbines eòliques.

Per aquest motiu, l'ésser humà ha de seguir millorant la gestió de l'extracció d'energia del vent, per intentat pal·liar els seus inconvenients actuals. Així doncs, fruit de la voluntat per cercar més coneixement en aquest àmbit per poder aportar i ajudar posteriorment en la millora de la generació d'energia elèctrica mitjançant aerogeneradors, s'ha volgut establir una col·laboració amb el Departament d'Enginyeria Elèctrica a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona per estudiar l'optimització de la generació eòlica mitjançant màquines d'inducció.

2. Introducció

En aquest document es presenta un model de sistema de generació elèctrica mitjançant una turbina de vent de velocitat variable amb un generador d'inducció de gàbia d'esquirol.

L'objectiu i la finalitat d'aquest projecte és dissenyar, modelitzar i controlar un convertidor del tipus *Voltage Source Converter* (VSC) capaç d'adaptar l'energia elèctrica produïda, per ser enviada a la xarxa de subministrament elèctric.

S'estudia la forma de modelitzar i controlar de forma adient el sistema mitjançant el software informàtic de simulació, per després poder governar el procés de generació d'energia elèctrica i optimitzar l'energia elèctrica generada sota diferents condicions.

Per últim, es simula la modelització del sistema amb tots els components dissenyats en un entorn de simulació, aplicant unes condicions que es podrien donar en un entorn real.

Queda fora de l'abast d'aquest projecte la construcció física d'un model a escala reduïda del sistema modelitzat per manca de temps. Tot i així, no es descarta fer-ho en un futur si en sorgeix la possibilitat i el finançament necessari.

3. Generació d'energia eòlica

L'ésser humà cada cop és més conscient que el model energètic de segles passats, basat en l'explotació de combustibles fòssils ha quedat obsolet. Per aquest motiu, la producció de les energies renovables s'ha vist incrementada durant els darrers anys. Un clar exemple és l'energia eòlica, la producció del qual no ha fet més que augmentar durant aquets últims quinze anys tal com s'aprecia en la Figura 3.1 i en la Figura 3.3.

3.1. La producció global d'energia eòlica

La producció d'energia eòlica mundial a finals de de l'any 2015 era de 432.419 MW amb un increment de 63.013 MW respecte l'any anterior. En aquest sentit, la Xina va ser el país que va aconseguir el major augment de producció d'energia del vent (veure Figura 3.2), amb un increment de 30.500 MW respecte el 2014 [1]. El mercat nord-americà també va veure augmentat en 8.600 MW la seva producció, mentre que Alemanya va liderar l'augment de la producció europea amb un augment rècord de 6.000 MW a finals del 2015, incloent 2.300 MW de producció *offshore* (producció d'energia eòlica amb aerogeneradors situats al mar).

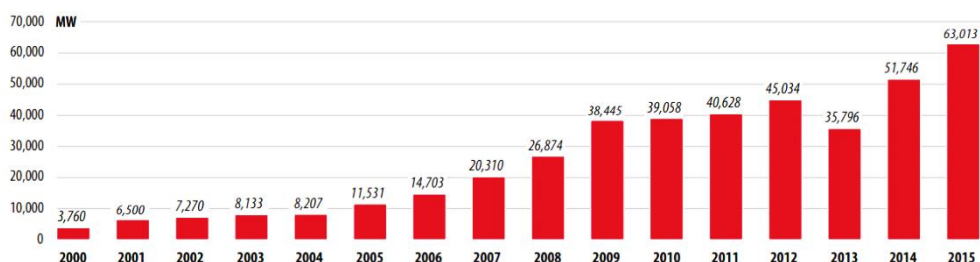


Figura 3.1 Evolució de nova capacitat de producció global d'energia eòlica. Font: GWEC [2]

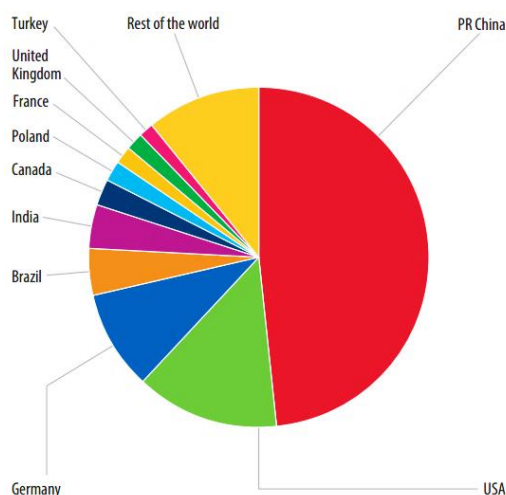


Figura 3.2 Els 10 països que han instal·lat més aerogeneradors al llarg del 2015. Font: GWEC [2]

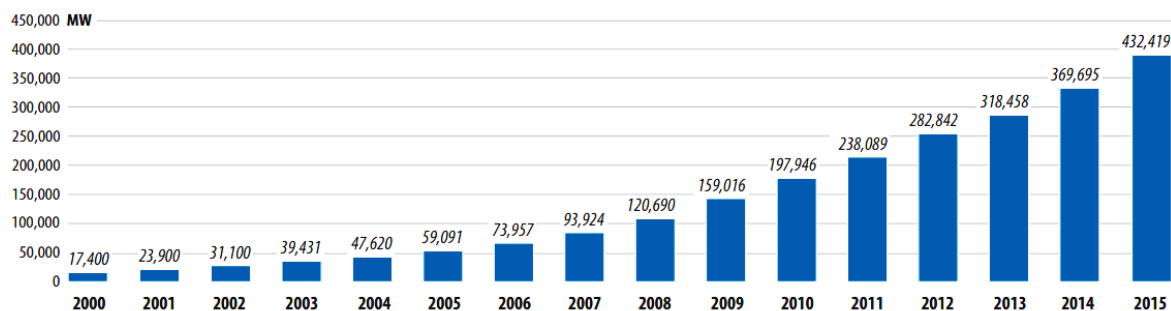


Figura 3.3 Evolució de la capacitat de producció global d'energia eòlica. Font: GWEC [2]

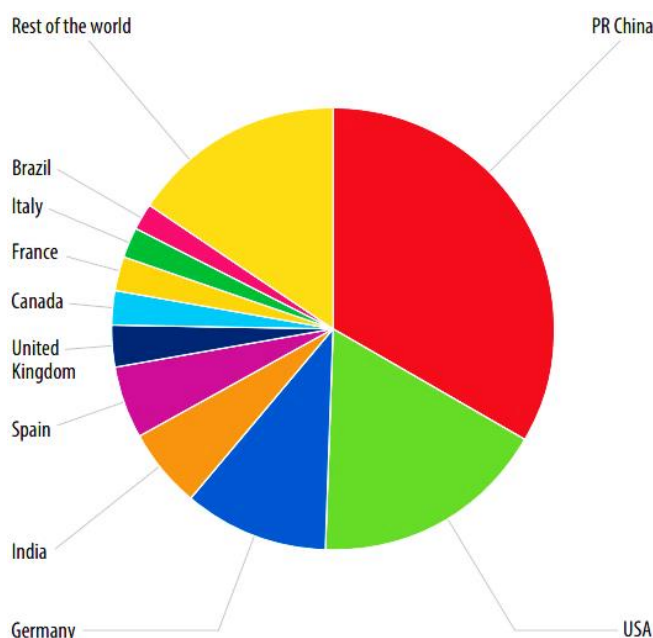


Figura 3.4 Els 10 països amb major producció d'energia eòlica. Font: GWEC [2]

3.1.1. Producció d'energia eòlica a Espanya

Malgrat el nul augment de la capacitat de producció d'energia eòlica a Espanya durant el 2015 (veure Figura 3.5), l'energia eòlica segueix sent la tercera font de generació elèctrica a Espanya a dia d'avui. Tal com es reflecteix a la Figura 3.4, Espanya és el cinquè país del món per potència eòlica instal·lada, per darrere de la Xina, els Estats Units, l'Alemanya i la Índia.

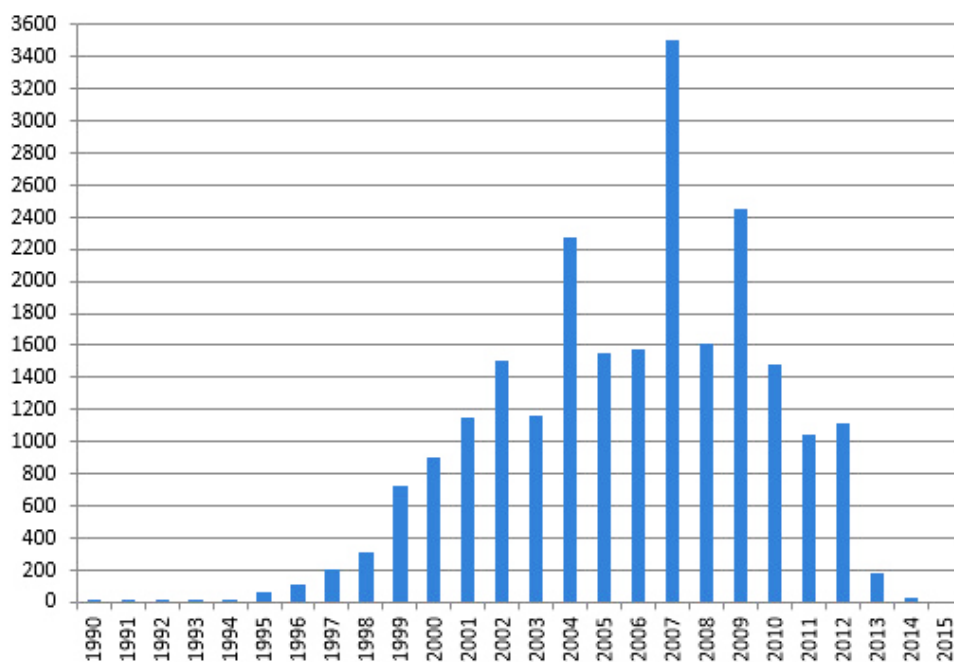


Figura 3.5 Evolució de la potència eòlica instal·lada a Espanya en els últims 25 any. Font: AEE [3]

La producció d'energia eòlica a Espanya es concentra principalment en les comunitats autònomes de Castella i Lleó, Castella La Manxa, Andalusia i Galícia (veure Taula 3.1).

COMUNIDAD AUTÓNOMA	Potencia acumulada a cierre de 2015 (MW)	Nº de parques
Castilla y León	5.561	241
Castilla-La Mancha	3.807	139
Andalucía	3.338	153
Galicia	3.328	161
Aragón	1.893	87
Cataluña	1.269	47
Comunidad Valenciana	1.189	38
Navarra	1.004	49
Asturias	518	21
La Rioja	447	14
Murcia	262	14
Canarias	177	56
País Vasco	153	7
Cantabria	38	4
Baleares	4	46
TOTAL	22.988	1.077

Taula 3.1 Repartiment de la potència instal·lada per Comunitats Autònomes a 2015. Font AEE [3]

3.2. L'aerogenerador

Un aerogenerador és una construcció capaç de convertir l'energia cinètica del vent en energia elèctrica. Les pales d'un aerogenerador poden girar entre 13 i 20 revolucions per minut i, segons la seva tecnologia, a una velocitat constant o bé a una velocitat variable, on la velocitat del rotor varia en funció del vent per tenir una major eficiència [4].

3.2.1. Components

Els aerogeneradors són construccions grans i complexes que poden arribar a mesurar 200 metres d'altura (pales incloses) i arribar a pesar 30 tones. Estan formats per una gran varietat de components il·lustrats en la Figura 3.6 i que s'explicaran a continuació.

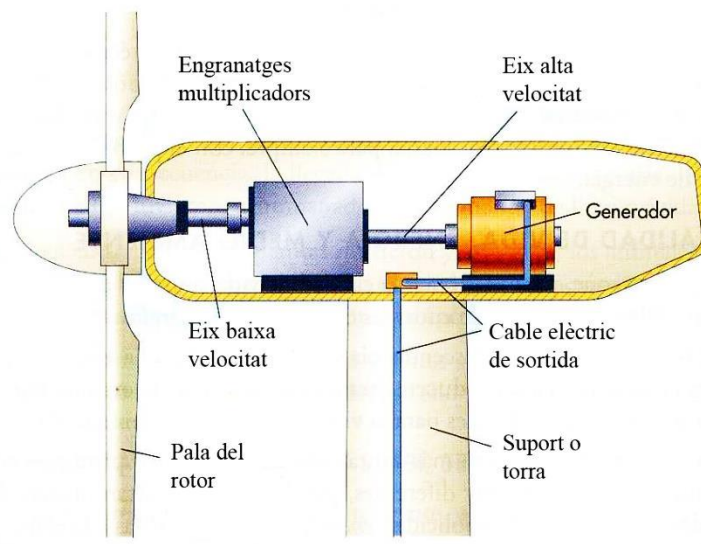


Figura 3.6 Components d'un aerogenerador. Font: Ariadna Carreño [5]

- **Torre:** Suporten esforços derivats de l'acció del vents de fins a 200 km/h incidint sobre la superfície del rotor. Pot arribar a pesar unes 30 tones i a tenir uns 45 metres d'alçada [6].
- **Pales:** Les pales són els elements més delicats pel que fa al disseny. Es troben sotmeses a intenses càrregues aerodinàmiques, degudes a les velocitats tangencials dels seus extrems i poden portar al límit la resistència del material, ja que els aerogeneradors estan preparats per resistir huracans.
- **Gòndola:** És l'element de l'aerogenerador on es troba l'equip mecànic i elèctric. Conté els equips necessaris per transformar l'energia mecànica de rotació de l'eix en energia elèctrica, a més dels sistemes de fre i orientació.

- **Multiplicador:** S'encarrega d'adaptar la baixa velocitat de rotació de l'eix del rotor a la velocitat necessària del generador elèctric. Està format per un conjunt d'engranatges que connecten l'eix de baixa velocitat amb l'eix d'alta velocitat. En alguns models, el multiplicador es substitueix per elements elèctrics o electrònics.
- **Generador:** El generador transforma l'energia mecànica de rotació, proporcionada pel rotor, en energia elèctrica.
- **Armaris:** És on s'ubica el sistema de regulació, control i condicionament d'energia. Un modern aerogenerador té un gran nombre de sensors (temperatura, pressió, vibracions, revolucions, direcció i velocitat de vent, etc.) que informen a un sistema de control que regula i optimitza de forma totalment automàtica el funcionament de la màquina, incloent-hi les condicions d'accés a la xarxa.

3.2.2. Funcionament

El funcionament d'un aerogenerador pot explicar-se en funció de les següents fases [4]:

- **Orientació automàtica:** L'aerogenerador s'orienta automàticament per aprofitar la màxima energia cinètica del vent, a partir de les dades registrades per un penell i un anemòmetre que incorpora en la part superior. La bancada gira sobre una corona situada al final de la torre.
- **Gir de les pales:** El vent fa girar les pales, que comencen a moure's amb velocitats de vent d'uns 3 m/s i proporcionen una potència màxima amb uns 11 m/s. Amb vents molt forts (25 m/s) les pales es col·loquen en bandera i l'aerogenerador es frena per evitar tensions excessives.
- **Multiplicació:** El rotor fa girar un eix de baixa velocitat connectat a una multiplicadora que eleva la velocitat de gir des d'unes 13 a unes 1500 revolucions per minut.
- **Generació:** La multiplicadora, a través d'un eix ràpid, transfereix la seva energia al generador acoblat per produir la electricitat.
- **Evacuació:** L'energia generada es conduïda per l'interior de la torre fins la base i, des d'allà, es condueix per línia fins la subestació on s'eleva la tensió per injectar-la a la xarxa elèctrica i distribuir-la a tots els punts de consum.

3.3. Classificació d'aerogeneradors

Els aerogeneradors es poden classificar segons la posició del seu eix, la posició del rotor, el número de pales, el tipus de control de potència i el tipus de control de velocitat.

3.3.1. Posició de l'eix

Segons la posició del seu eix, els aerogeneradors es poden classificar en [7]:

- **Aerogeneradors d'eix vertical:** Aquesta classe d'aerogenerador no necessita d'un sistema d'orientació al ser omnidireccional. Gràcies a que el generador, multiplicador, etc., s'instal·len arran de terra facilita el seu manteniment i fa disminuir els seus costos de muntatge. Tanmateix, tenen menors eficiències comparat amb altres tipus d'aerogeneradors a més de necessitar de sistemes exteriors d'arrencada en alguns models. El desmuntatge del rotor per tasques de manteniment fa necessària que tota la maquinària de l'aerogenerador sigui desmuntada. A la Figura 3.7 es pot veure un exemple d'un aerogenerador d'eix vertical.



Figura 3.7 Aerogenerador d'eix vertical de rotor Darrieus. Font: Ecotimeblog [8]

- **Aerogeneradors d'eix horitzontal:** Els aerogeneradors horitzontals tenen una major eficiència energètica i aconseguen majors velocitats de rotació pel que necessiten caixa d'engranatges amb menor relació de multiplicació de gir. A més, a causa de la construcció elevada aprofiten millor l'augment de la velocitat del vent amb l'altura.

3.3.2. Posició del rotor

Segons la posició del seu rotor, els aerogeneradors es poden classificar en [9]:

- **Rotor a sotavent:** Les màquines amb rotor a sotavent tenen el rotor situat a la cara a sotavent de la torre com es veu en la Figura 3.8. L'avantatge teòric que tenen és que poden ser construïts sense un mecanisme d'orientació si el rotor i la

gòndola tenen un disseny apropiat. L'inconvenient principal és la fluctuació de la potència eòlica, degut al pas del rotor per l'ombra de la torre, provocant majors fatiga en les pales.

- **Rotor a sobrevent:** Les màquines amb rotor a sobrevent tenen el rotor de cara al vent com es veu en la Figura 3.8. El principal avantatge d'aquest disseny és que eviten la influència de la ombra de la torre, tot i que sempre queda una petita influència i per tant, les càrregues de fatiga són menors. Els inconvenients d'aquests disseny són la necessitat d'un rotor flexible i d'un mecanisme d'orientació que mantingui el rotor de cara el vent.

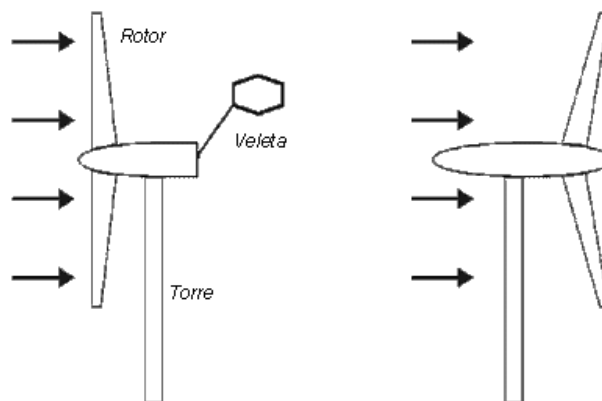


Figura 3.8 Rotor a sobrevent i rotor a sotavent. Font: Conrado Moreno Figueredo [10]

3.3.3. Número de pales

Actualment, s'eviten construir grans aerogeneradors amb un número imparell de pales i major de tres. La raó més important és la estabilitat de la turbina [11]. Un rotor amb un número imparell de pales pot ser considerat com un disc a l'hora de calcular les propietats dinàmiques de la màquina.

Un rotor amb un número parell de pales pot donar problemes d'estabilitat a una màquina que tingui una estructura rígida [11]. La raó és que en el precís instant en que la pala més alta es flexioni cap enrere, degut a que obté la màxima potència del vent, la pala més baixa passa per la ombra del vent de davant la torre.

Segons el número de pales, els aerogeneradors es poden classificar en [11]:

- **Tripala:** La majoria dels aerogeneradors moderns, tenen un disseny tripala, amb el rotor sobrevent i utilitzant motors elèctrics en els seus mecanismes d'orientació.

- **Bipala:** Els dissenys bipales tenen l'avantatge d'estalviar el cost d'una pala i el seu pes. Per contra, necessiten una major velocitat de gir per produir la mateixa energia de sortida. Aquest fet suposa un major impacte acústic i visual.
- **Monopala:** El disseny monopala estalvia el cost d'un altre pala i per conseqüència, en pes. Però tot i així, té els mateixos desavantatges que la pala bipala i a més, s'afegeix una dificultat extra en la construcció al necessitar un contrapès al costat oposat de la pala per equilibrar el rotor.

A la Figura 3.9 es mostren diferents aerogeneradors segons el seu nombre de pales.

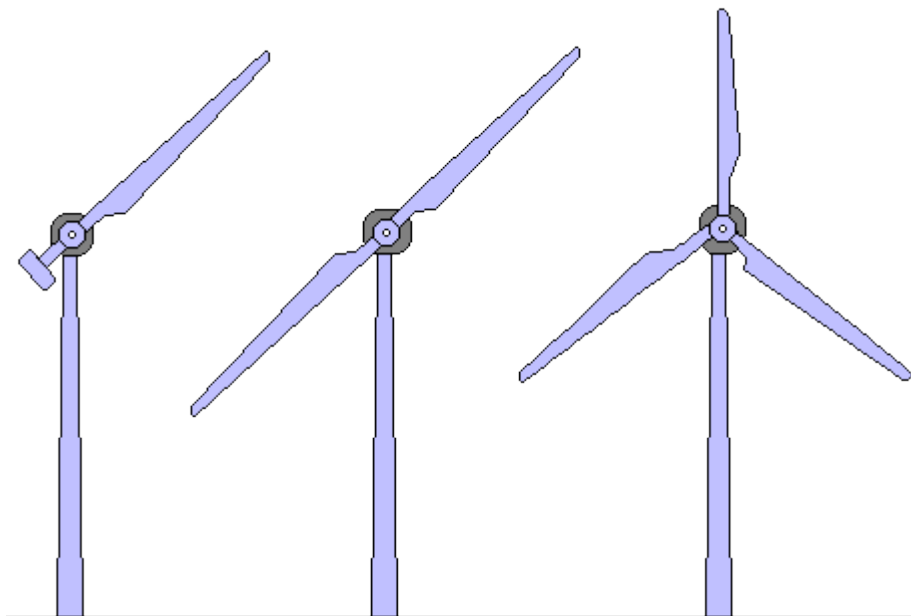


Figura 3.9 Aerogenerador monopala, bipala i tripala. Font: Marman [12]

3.3.4. Control de potència

Els aerogeneradors estan dissenyats per produir energia elèctrica de la forma més barata possible. Així doncs, estan generalment dissenyats per rendir al màxim amb les velocitats de vent més usuals, que solen estar situades al voltant dels 15 m/s depenent del lloc d'instal·lació del parc [13]. És millor no dissenyar aerogeneradors que maximitzin el seu rendiment a vents més forts, ja que els vents tan forts no són comuns.

En el cas de vents molt forts és necessari gastar part de l'excés de l'energia del vent per evitar danys en l'aerogenerador. Hi ha dues formes [13] de fer-ho amb seguretat en els moderns aerogeneradors:

- **Regulació per canvi d'angle de pas (*Pitch controlled*):** El controlador electrònic de la turbina comprova diverses vegades per segon la potència generada. Quan aquesta tingui un valor massa alt, el controlador envia una ordre al mecanisme de canvi de l'angle de pas, que immediatament fa girar les pales del rotor lleugerament fora del vent. Les pales són tornades cap al vent quan el vent disminueix de nou. El mecanisme de canvi de l'angle de pas sol funcionar de forma hidràulica.
- **Regulació per pèrdua aerodinàmica (*Stall controlled*):** El perfil de la pala ha estat dissenyat per assegurar que, al moment en què la velocitat del vent sigui massa alta, es crearà turbulència en la part de la pala que no dóna al vent. Aquesta pèrdua de sustentació evita que la força ascensional de la pala actuï sobre el rotor. El principal avantatge de la regulació per pèrdua aerodinàmica és que s'eviten les parts mòbils del rotor i un complex sistema de control. D'altra banda, la regulació per pèrdua aerodinàmica representa un problema de disseny aerodinàmic molt complex, i comporta reptes en el disseny de la dinàmica estructural de tota la turbina, per evitar les vibracions provocades per la pèrdua de sustentació. Al voltant de les dues terceres parts dels aerogeneradors que actualment s'estan instal·lant a tot el món són màquines de regulació per pèrdua aerodinàmica [13].

3.3.5. Control de la velocitat

Els diferents controls de velocitats s'implementen mitjançant màquines síncrones i asíncrones i l'ús de l'electrònica de potència. A continuació es mostren diferents sistemes de regulació de velocitat.

1. Turbina de velocitat fixa

Està formada per un rotor, una caixa de canvis i un generador d'inducció de gàbia d'esquirol o *Squirrel Cage Induction Generator* (SCIG), connectat a la xarxa elèctrica a través d'un transformador seguint l'esquema de la Figura 3.10 . Aquest tipus de màquina opera prop de la velocitat de sincronisme, que ve fixada per la xarxa elèctrica i per les característiques del generador. Durant el seu funcionament, el SCIG, absorbeix energia reactiva, que normalment es compensa afegint-hi un banc de condensadors. A més, per reduir els corrents inicials que es requereixen a la xarxa durant l'arrencada, s'utilitza algun sistema d'electrònica de potència.

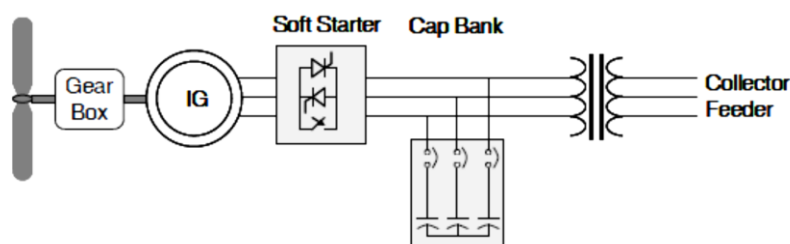


Figura 3.10 Turbina de velocitat fixa – SCIG. Font: [35]

2. Turbina de velocitat limitada

La següent màquina es conegut amb el terme anglès *Wound Rotor Induction Generator* (WRIG). Aquesta tecnologia, coneguda com *OptiSlip*, introdueix una resistència variable externa al rotor de la màquina controlada mitjançant un convertidor de potència com es pot veure en la Figura 3.11. D'aquesta manera es controla el lliscament de la màquina amb un marge de fins al 10%. La variació del lliscament implica el control de la potència de sortida del sistema. Aquesta variació s'aconsegueix amb una resistència, provocant pèrdues i per tant, no és eficient.

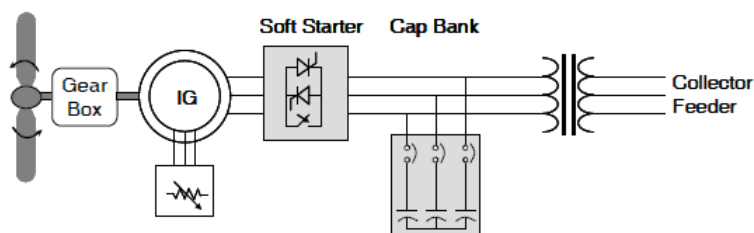


Figura 3.11 Turbina de velocitat limitada. Font: [35]

3. Turbina de velocitat variable amb convertidor parcial

Aquest sistema consisteix a connectar l'estator de la màquina a la xarxa a través d'un transformador i el rotor a través d'un convertidor de potència seguint l'esquema de la Figura 3.12. És el que es coneix amb el nom de generador d'inducció doblement alimentat o, *Doubly Feed Induction Generator* (DFIG). Aquest concepte, ens permet controlar la potència de sortida del generador mitjançant un convertidor entre el 20-30% de la potència nominal del generador. A més, ens proporciona un control de la màquina en un rang molt ampli de velocitats. Aquest concepte també incrementa les possibilitats del sistema respecte a la integració a xarxa, ja que es pot millorar el *ride-through*, que és la capacitat dels generadors de no desconnectar-se quan hi ha faltes a la xarxa on estan connectats, o el control d'energia reactiva i activa.

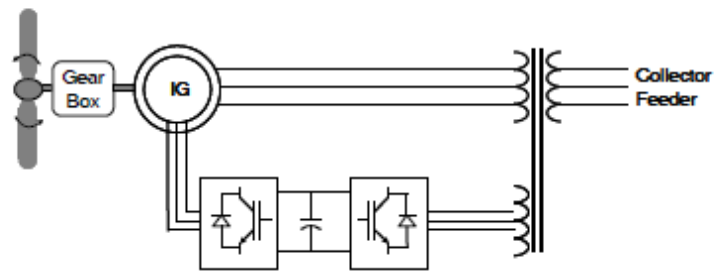


Figura 3.12 Turbina de velocitat variable amb convertidor parcial – DFIG. Font: [35]

4. Turbina de velocitat variable amb convertidor de plena potència

Si es modifica el sistema anterior afegint-hi un convertidor de plena potència com l'esquema de la Figura 3.13 es maximitza el rang d'operació de la màquina (que pot ser tant un generador d'inducció com un generador síncron). D'aquesta manera, es pot extreure el màxim de potència del vent dintre dels límits nominals de la màquina. A més, es poden satisfer els requeriments elèctrics de la xarxa. Un altre dels objectius que es persegueix amb la implementació d'aquestes màquines és eliminar la caixa de canvis del sistema, el que es coneix com a accionament directe o *direct drive*.

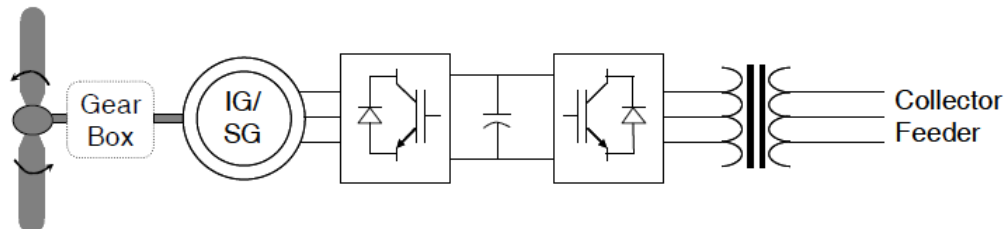


Figura 3.13 Turbina de velocitat variable amb convertidor de plena potència. Font: [35]

3.1. Ubicació de l'aerogenerador

Els aerogeneradors dels parcs eòlics poden instal·lar-se tant a terra ferma (*onshore*) com al mar (*offshore*).

3.1.1. Instal·lacions *onshore*

L'energia eòlica *onshore* correspon als sistemes ubicats físicament a terra ferma, generalment en zones costaneres o d'alta incidència de vents superficials. La potència màxima de generació d'un aerogenerador pot arribar a 7 MW per lo que la seva principal aplicació es la

connexió a la xarxa elèctrica [14]. Tot i així, també poden funcionar en sistemes aïllats de la xarxa.

Els principals requeriments d'aquesta tecnologia, tenen a veure amb la disponibilitat de grans àrees on existeixin suficient vent amb velocitats superiors a 11 m/s. Per contra, les barreres que han de superar són els costos d'inversió, la irregularitat del vent i les limitacions d'accés a la xarxa.

D'altra banda, els avantatges que presenta en comparació amb els aerogeneradors *offshore* poden ser una cimentació més econòmica, una integració a la xarxa elèctrica més barata així com la seva fàcil instal·lació i accés durant la fase de manteniment.

3.1.2. Instal·lacions *offshore*

En les instal·lacions *offshore* els costos són més alts, però es compensen amb un increment de la producció de no menys d'un 30% [15]. A més, els parcs eòlics marins requereixen d'un elevat nombre d'aerogeneradors grans (uns 5-6 MW) per compensar els costos d'instal·lació, de connexió a la xarxa de terra i la monitorització remota. A la Figura 3.14 es mostra un exemple d'un parc eòlic *offshore*.



Figura 3.14 Parc eòlic *offshore*. Font: TESICNOR [16]

Els aerogeneradors *offshore* han de ser molt fiables per minimitzar les operacions de manteniment. Això justifica la redundància de certs components i la monitorització sistemàtica de forma remota a través de sensors ubicats en les parts més crítiques.

A més, aquests aerogeneradors estan dissenyats per resistir l'ambient marítim. De fet, les estructures submarines es protegeixen contra la corrosió mitjançant protecció catòdica. L'aïllament de les parts elèctriques es reforcen i l'interior de la gòndola i de la torre es condicionen per evitar l'acumulació de condensació.

4. Turbina de velocitat variable amb convertidor de plena potència

El sistema que s'ha modelitzat en aquest projecte consta d'una turbina de velocitat variable capaç de controlar la potència del conjunt, generant l'energia elèctrica amb un generador d'inducció amb rotor de gàbia d'esquirol i injectant aquesta electricitat produïda a la xarxa passant pel convertidor *Back-to-Back* per controlar el flux de potència que hi arriba a la xarxa elèctrica.

L'ús de turbines eòliques de velocitat variable ofereix un gran ventall d'avantatges. Per exemple, la turbina eòlica pot augmentar o disminuir la velocitat si la velocitat del vent o el parell varien, significat menys desgast en la torre, en la caixa de canvis o en altres components del tren mecànic. Això comportarà treballar, sempre que sigui possible, en el punt de funcionament òptim de la màquina.

En aquest tipus de sistema, el generador queda desacoblat de la xarxa. El generador pot funcionar amb un ampli rang de freqüències per aconseguir un punt de funcionament òptim, permetent que la potència generada sigui enviada a la xarxa a través del convertidor. A més, permet controlar la potència activa i reactiva de forma independent millorant la resposta dinàmica. En les imatges següents es mostren quatre possibles configuracions [20] depenent del tipus de màquina elèctrica utilitzada, ja sigui la màquina d'inducció (veure Figura 4.1) o la màquina síncrona (veure Figura 4.2, Figura 4.3 i Figura 4.4).

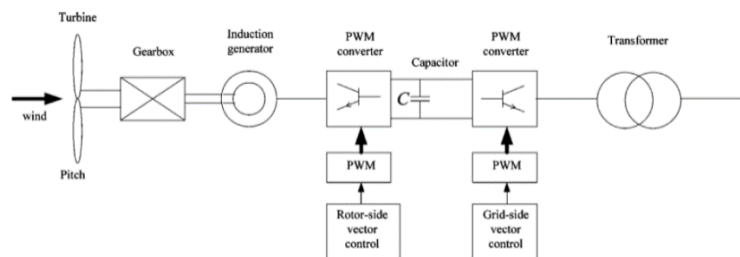


Figura 4.1 Generador d'inducció Font: Felipe Jerez [20]

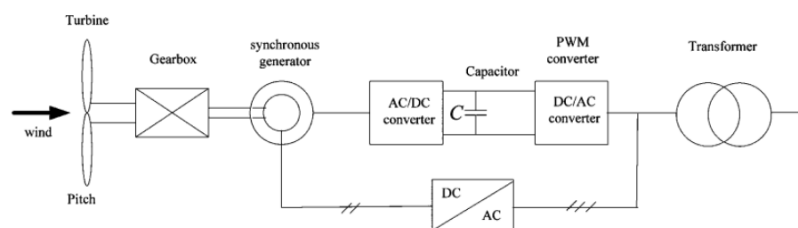


Figura 4.2 Generador síncron Font: Felipe Jerez [20]

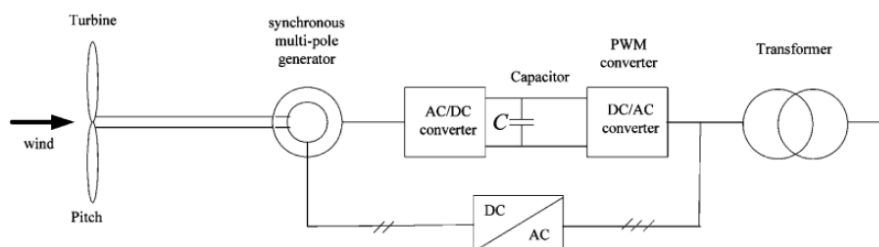


Figura 4.3 Generador síncron multipolar Font: Felipe Jerez [20]

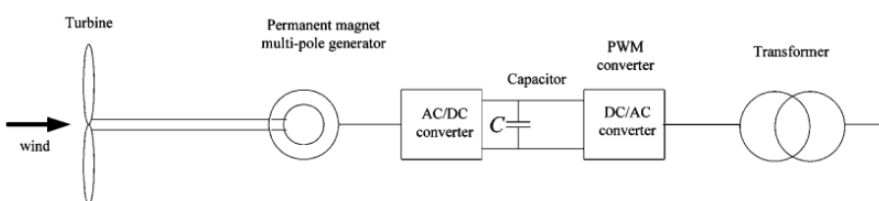


Figura 4.4 Generador síncron multipolar d'ímants permanents Font: Felipe Jerez [20]

4.1. Generador asíncron o d'inducció

Per el present projecte, s'ha utilitzat l'esquema descrit en la Figura 4.1. Aquest esquema utilitza un generador d'inducció que consta d'un estator que és alimentat per un camp magnètic rotatiu per produir tensió trifàsica.

Les màquines d'inducció s'anomenen també màquines asíncrones perquè giren per sota de la velocitat de sincronisme quan funcionen com a motor i per sobre de la velocitat de sincronisme quan aquestes funcionen com a generador. Per això, quan el rotor gira més ràpid que el seu funcionament normal produeix corrent altern.

A diferència dels generadors síncrons que han d'estar sincronitzats amb la xarxa elèctrica abans de ser capaços de generar energia, el generador asíncron pot estar connectat directament a la xarxa de subministrament elèctric i al rotor de la turbina, el qual funciona a velocitats variables.

Per contra, un generador d'inducció que es capaç de produir potència directament a la xarxa de subministrament necessitarà de potència reactiva per poder funcionar [36]. Aquesta potència la obté de la mateixa xarxa elèctrica, o en el cas d'estudi d'aquest projecte, de la xarxa creada pels convertidors en configuració *Back to Back*.

A continuació s'explicaran dos tipus de generadors asíncrons segons el tipus de rotor que s'utilitzi.

4.1.1. Rotor bobinat

El rotor bobinat està constituït per una sèrie de conductors bobinats sobre ell en una sèrie de ranures situades sobre una superfície tal i com s'aprecia en la Figura 4.5. D'aquesta forma s'obté un bobinat en l'interior del camp magnètic de l'estator, del mateix nombre de pols i en moviment. Aquest rotor permet l'accés al seu interior des de l'exterior mitjançant uns anells que són els que curtcircuiten els bobinats. Això permet la possibilitat d'utilitzar un reòstat d'arrancada [18] que permeti modificar la velocitat i el parell d'arrancada, així com reduir el corrent d'arrancada.

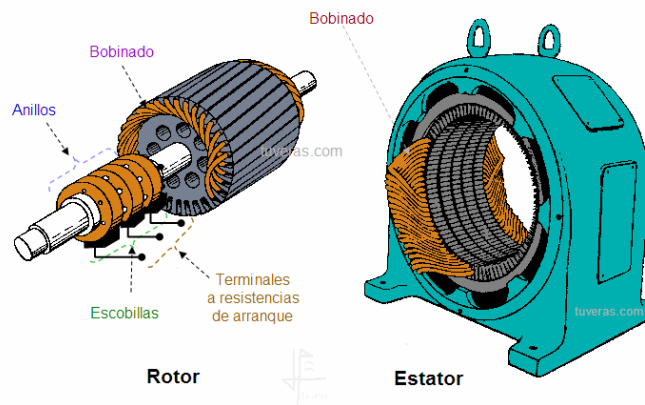


Figura 4.5 Rotor bobinat. Font: Tuveras [19]

4.1.2. Rotor de gàbia d'esquirol

El rotor de gàbia d'esquirol consta d'una sèrie de conductors metàl·lics (normalment d'alumini) disposats paral·lelament uns a altres i curtcircuitats en els seus extrems per uns anells metàl·lics. S'anomena així degut a la seva similitud gràfica amb una gàbia d'esquirol. A la Figura 4.6 es mostra un exemple d'un rotor gàbia d'esquirol.

Aquesta gàbia, s'omple de material, normalment de xapa aïllada. D'aquesta manera, s'aconsegueix un sistema n-fàsic de conductors, sent n el número de conductors, situat en el interior del camp magnètic giratori creat per l'estator [18]. Així doncs, s'obté un sistema molt eficaç, simple i molt robust que sol necessitar poc manteniment.

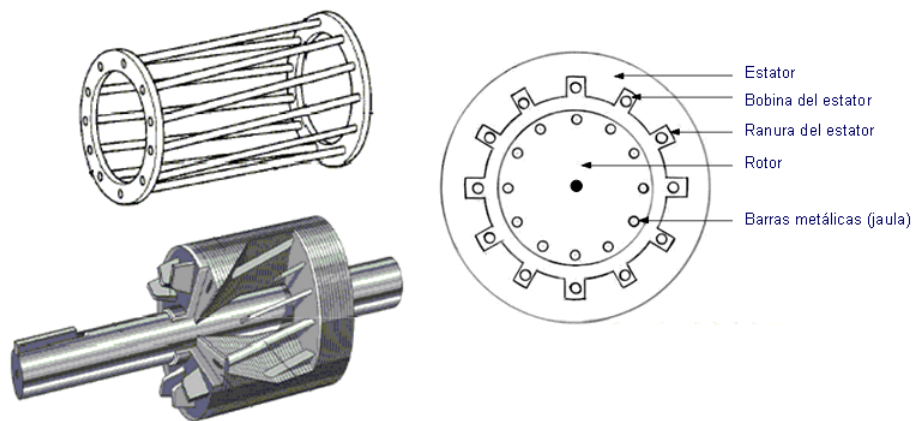


Figura 4.6 Gàbia d'esquirol. Font: Tuveras [19]

Finalment, per aquest projecte s'ha optat per el rotor gàbia d'esquirol degut a que la seva fabricació i posterior manteniment és més senzill que el rotor bobinat

4.2. Convertidor *Back to Back*

A fi de poder controlar el generador s'ha fet servir el sistema *Back to Back* que consta de dos convertidors AC/DC enllaçats a través del bus DC. D'aquesta manera s'aconsegueix independitzar el costat del generador del costat de la xarxa elèctrica amb l'objectiu de regular el consum de potència reactiva de la xarxa. A la Figura 4.7 es mostra l'esquema típic d'un convertidor *Back to Back*.

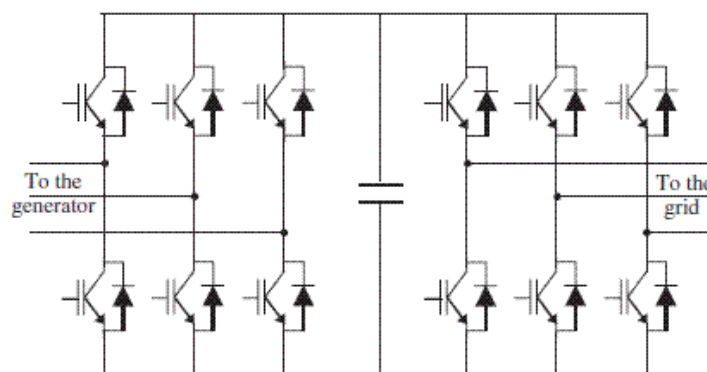


Figura 4.7 Esquema típic d'un Back to Back amb transistors IGBT

5. Modelització del vent

5.1. El vent

La causa que origina el vent és la diferència de pressions de les molècules d'aire a una mateixa alçada. Aquesta variació de pressió provoca que les masses d'aire a altes pressions es moguin cap a les zones de baixes pressions, causant el flux d'aire que denominem vent. La variació de pressions és deguda a la radiació solar que escalfa el sòl terrestre i els oceans, i aquests dissipen la calor a l'aire, augmentant-ne la seva temperatura i variant-ne la densitat. També influeixen altres factors com l'efecte de Coriolis, que accelera les partícules d'aire quan més properes es troben del centre de la Terra i les frena quan s'allunyen.

Com el vent depèn de molts factors, i molts d'aquests són variables és convenient utilitzar un model de freqüències de les velocitats del vent. Les distribucions de probabilitat més utilitzades són de la Weibull [21] i la de Rayleigh [25], ja que descriuen el model per una fórmula continua i no per una taula de valors discrets. La funció distribució de Weibull segueix la següent expressió:

$$f(x) = \frac{k}{c} \times \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \times \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right]$$

on

- k : paràmetre de forma ($1 \leq k \leq 3$)
- c : paràmetre d'escala
- x : velocitat del vent

La funció de distribució representa la probabilitat de que la velocitat del vent es trobi en un interval entre x i $x+dx$. L'àrea sota tota la corba $f(x)$ és la unitat, si es vol saber la probabilitat del vent que esta compresa entre x_0 i x_1 s'ha d'integrar entre aquests dos punts.

A la Figura 5.1 s'il·lustra la gràfica de la funció de distribució de Weibull per diferents valors del paràmetre k , observant que la probabilitat de que un vent tingui una velocitat determinada augmenta conforme s'augmenta aquest paràmetre.

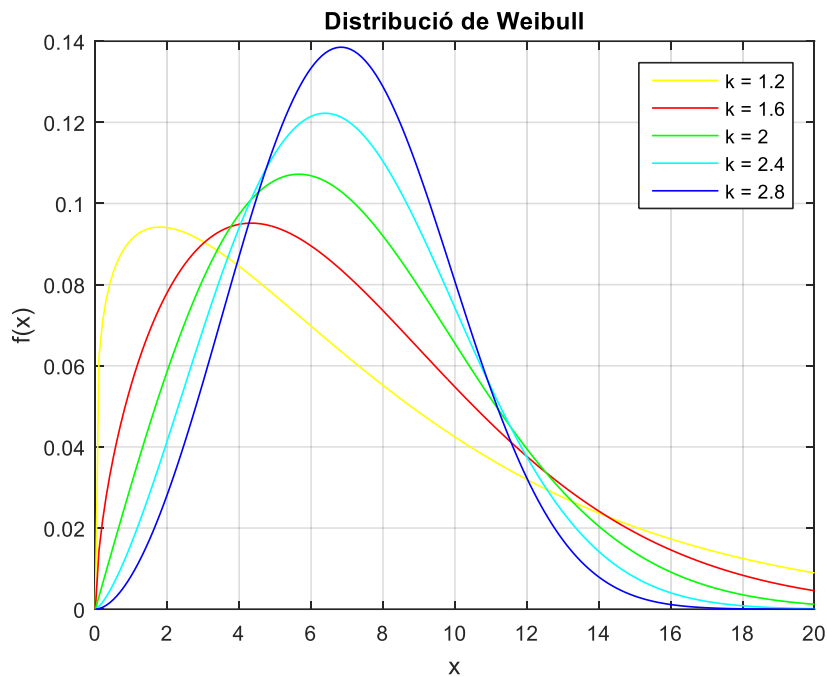


Figura 5.1 Distribució de Weibull per $c = 8$

Si es deriva la funció de Weibull i s'iguala a zero s'obté la següent expressió:

$$x_{\max} = c \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}}$$

que indicarà el valor de la velocitat pel qual la funció de distribució té el seu màxim i per tant la velocitat que té més probabilitat a donar-se.

Per la funció de distribució de Rayleigh es té la següent expressió:

$$f(x) = \frac{2x}{b^2} \times \exp\left(-\frac{x^2}{b^2}\right)$$

on

- b : paràmetre d'escala
- x : velocitat del vent

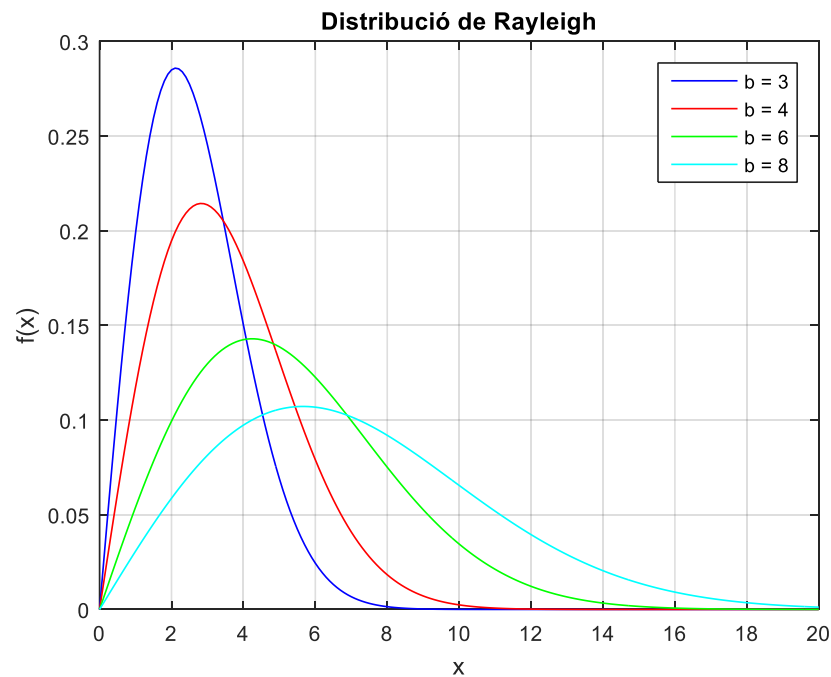


Figura 5.2 Distribució de Rayleigh

Com es pot veure a la Figura 5.2, la funció de distribució de Rayleigh és la mateixa que la funció de distribució de Weibull amb el paràmetre de forma $k = 2$. Això comporta que sigui menys versàtil, i només s'utilitza si es disposa de la velocitat mitja del vent en períodes llargs de temps.

L'expressió que permetrà saber la velocitat que dóna un màxim a la distribució de Rayleigh és la següent:

$$x_{\max} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}$$

5.1.1. Gradient vertical de velocitats del vent o *Wind Shea*

La definició simplificada és la variació de la velocitat del vent amb la altura respecte el nivell del terra. És un concepte que s'utilitza a l'hora de calcular la velocitat a l'alçada de la torre, i que depèn com s'ha dit de l'alçada de l'aerogenerador, una velocitat de referència coneguda per a una alçada de referència i la rugositat del terreny [23].

$$v = v_{ref} \times \left[\frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \right]$$

on

- z_0 : rugositat de la superfície ($0 \leq z_0 \leq 5$)
- z : alçada
- z_{ref} : alçada de referència
- v_{ref} : velocitat mitja del vent a l'alçada de referència z_{ref}
- v : velocitat del vent a l'alçada z

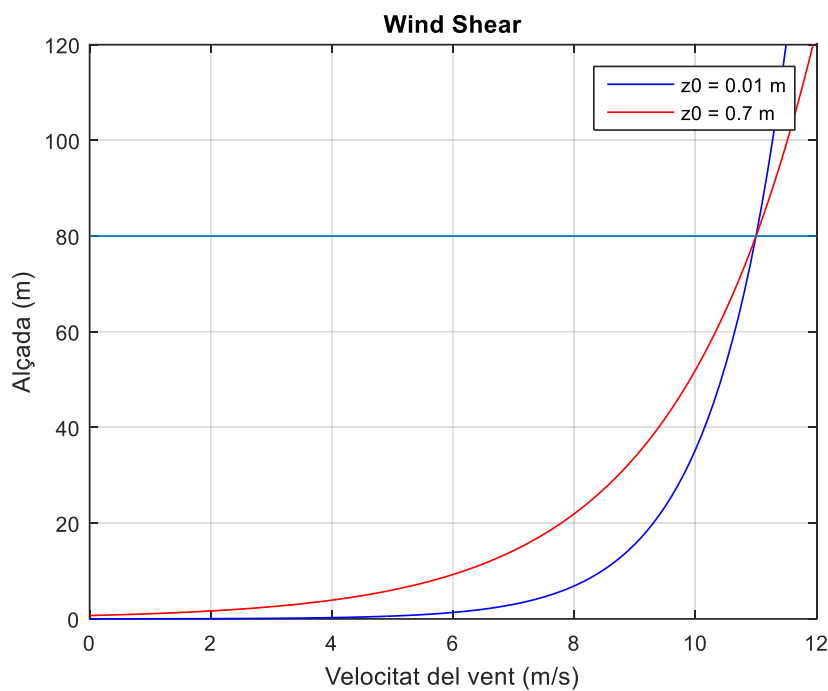


Figura 5.3 Variació de la velocitat del vent en funció de l'alçada d'un aerogenerador de 80 m

La velocitat que idealment es voldria obtenir, és la que es dona en un terreny amb una superfície molt poc rugosa ja que d'aquesta forma es tindria una corba amb un pendent quasi vertical. Això implicaria que no hi hauria pràcticament variació de la velocitat amb l'alçada. A la Figura 5.3 es pot apreciar aquest fenomen.

5.2. Aprofitament de l'energia cinètica del vent.

La energia cinètica que prové de la Segona Llei de Newton representa el treball necessari per accelerar un cos de massa, m , d'una velocitat inicial nul·la a una velocitat determinada v .

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Com l'energia no es crea ni es destrueix, l'objectiu és transformar l'energia cinètica del moviment de les molècules d'aire en energia rotacional de la turbina eòlica, que a la vegada pugui ser convertida en energia elèctrica pel generador amb les menors pèrdues possibles. Si es deriva i es substitueix el cabal màssic per $\dot{m} = \rho v A$ s'obté l'expressió de potència següent:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

on:

- ρ : densitat de l'aire
- A : secció per on passa l'aire
- V_1 : velocitat de l'aire

Aplicant la condició de continuïtat provinent de l'equació de conservació de la massa següent:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v}) = 0$$

i considerant la densitat constant i, únicament, la velocitat normal a l'àrea escombrada per les pales, s'obté que el flux d'aire que travessa les pales i que s'ha de conservar [24].

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = A v$$

on

- A_1 : secció de fluid abans de la turbina
- v_1 : velocitat del vent abans de la turbina
- A_2 : secció de fluid després de la turbina
- v_2 : velocitat del vent després de la turbina
- A : secció escombrada per les pales

A la Figura 5.4 es mostren les àrees d'interès per ser estudiades.

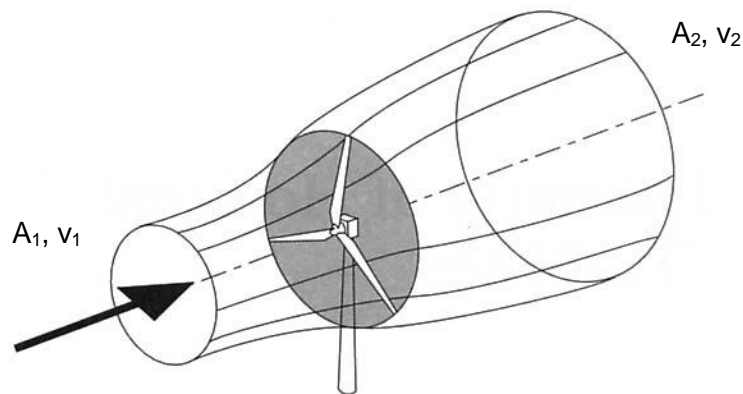


Figura 5.4 Tub de corrent. Font: Danish wind industry association [24]

Tenint en compte això, quan major sigui la potència extreta per l'aerogenerador, menor serà la velocitat a la part posterior d'aquest. Si s'adapta la fórmula de la potència del rotor resulta la següent expressió:

$$P_{\text{aprofitable_turbina}} = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2)$$

Seguidament, si es substitueix l'expressió:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

a l'equació de la potència, s'obté:

$$P_{\text{turbina}} = \rho A \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \left(\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right)$$

Idealment per extreure tota l'energia cinètica del vent, la velocitat just després de la turbina hauria de ser zero. Però com ja s'ha vist que la velocitat abans i després de la turbina estan relacionades [24], això comporta que la velocitat inicial també sigui nul·la. Per tant, s'observa que no es podrà extreure el 100% d'energia.

Com a conseqüència, s'estableix un Coeficient de Potència (C_p) que indica la proporció d'energia cinètica del vent que la turbina pot transformar en energia mecànica. El físic alemany Albert Betz va establir el coeficient màxim de potència, amb un valor de 0.593 [25].

$$C_p = \frac{P_{turbina}}{P_{vent}} = \frac{\rho A \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \left(\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right)}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3}$$

$$C_{p\max} = \frac{16}{27} \approx 0.593$$

Per tant, el Coeficient de Potència no és un valor constant, sinó que variarà en funció de la velocitat del vent [26]. A l'apartat 5.3, s'explicarà més extensament el significat del paràmetre C_p .

Finalment, l'equació que s'utilitzarà per modelar és la següent:

$$P_{turbina} = \frac{1}{2} C_p \rho A v_1^3$$

on

- $P_{turbina}$: potència de la turbina
- C_p : coeficient de potència
- ρ : densitat de l'aire
- A : secció escombrada per les pales
- v_1 : velocitat del vent abans de la turbina

5.3. Modelització del vent

Si s'escriu el coeficient de potència tenint en compte el coeficient de sustentació (C_L) i el coeficient d'arrossegament (C_D) i la forma de les pales, s'obté una expressió que depèn de l'angle d'orientació de les pales (\mathcal{G}_{pitch}), i de la relació de velocitat perifèrica o *tip speed ratio* (λ).

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

On *tip speed ratio* segueix la següent expressió:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + c_8 \mathcal{G}_{pitch}} - \frac{c_9}{1 + \mathcal{G}_{pitch}^3}$$

$$\lambda = \frac{w_t R}{v_v}$$

on

- v_v : velocitat del vent just quan incideix a les pales
- R: radi turbina
- w_t : velocitat angular de la turbina

Com es pot observar, el *tip speed ratio* relaciona la velocitat a la que gira el rotor i la velocitat del vent. Per turbines on les pales són d'orientació fixa es pot fer la següent simplificació:

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

Per calcular el valor de $C_p(\lambda, \mathcal{G}_{pitch})$, es consideren els coeficients constants recollits a la Taula 5.1, que són uns valors particulars de cada model de turbina.

Paràmetres	Velocitat constant
c1	0.44
c2	125
c3	0
c4	0
c5	0
c6	6.94
c7	16.5
c8	0
c9	-0.002

Taula 5.1 Valors de les constants del coeficient de potència

De cara la modelització del vent, s'imposa un *tip speed ratio* constant que permetrà obtenir el valor màxim de la corba de parell en funció de la velocitat angular, de forma que el sistema mecànic s'estabilitzi en el punt òptim d'extracció de potència del vent. És una manera simple de portar el sistema al punt d'òptim d'extracció de potència sense requerir d'una mesura fiable de la velocitat del vent. Malgrat tot, la seva naturalesa de llaç obert fa que no es garanteixi la màxima extracció de potència.

Per obtenir aquest valor de *tip speed ratio*, es deriva l'expressió del coeficient de potència de la turbina,

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

respecte el *tip speed ratio*, s'igual a zero i es resol l'equació obtinguda, obtenint el valor de λ_{opt} òptim en funció dels paràmetres c_i i de l'angle de pitch que corresponen a un màxim de C_p . Es considera un θ_{pitch} nul per simplificar els càlculs, d'aquesta manera s'obté la següent expressió:

$$\lambda_{opt} |_{\theta_{pitch}=0} = \frac{c_2 c_7}{c_2 c_7 c_9 + c_6 c_7 + c_2}$$

Si es substitueix aquesta expressió a l'expressió anterior del C_p , s'obté el valor del C_p òptim:

$$C_{P_{opt}} = \frac{c_1 c_2 e^{-\frac{c_4 c_7 \theta_{pitch}^{c_5} + c_3 c_7 \theta_{pitch} + c_6 c_7 + c_2}{c_2}}}{c_7}$$

Partint de que com a màxim només es pot obtenir el 59.3% de l'energia cinètica del vent tal i com va demostrar Albert Betz, s'ha d'intentar extreure la màxima potència disponible dins de les limitacions físiques del model de la turbina. Com es pot veure a la Figura 5.5, és important treballar amb el coeficient de potència òptim, perquè en cas de no poder controlar la velocitat de gir de les turbines s'obtidrien fàcilment valors de potència inferiors al 30% de la potencia del vent.

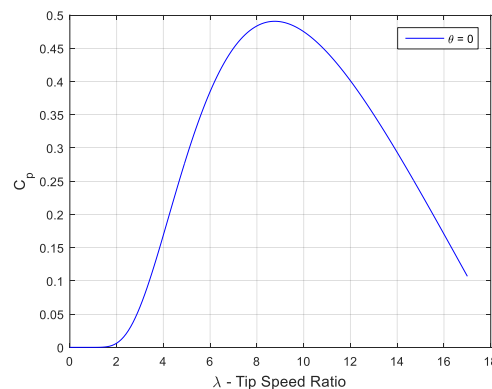


Figura 5.5 Corba Cp d'una turbina de 2 MW amb pitch angle fix a 0°

Un cop vist l'equació de la potència de la turbina i l'expressió del coeficient de potència òptim, es pot transcriure tal i com s'il·lustra Figura 5.6 per modelar la turbina:

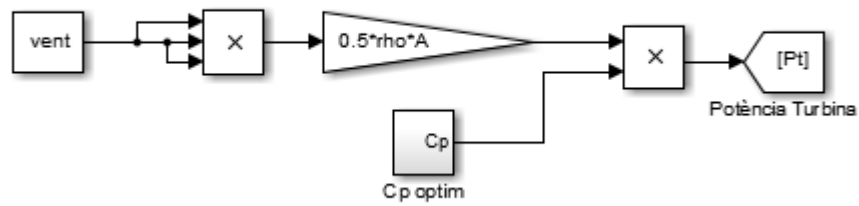


Figura 5.6 Disseny de la modelització de la turbina

A part d'obtenir la potència de la turbina també cal obtenir la velocitat angular òptima que ha de girar la turbina per extreure la major quantitat possible de potència. Utilitzant l'expressió que relaciona el *tip speed ratio* amb la velocitat angular de la turbina i l'expressió del *tip speed ratio* òptim, s'obté la modelització de la Figura 5.7.

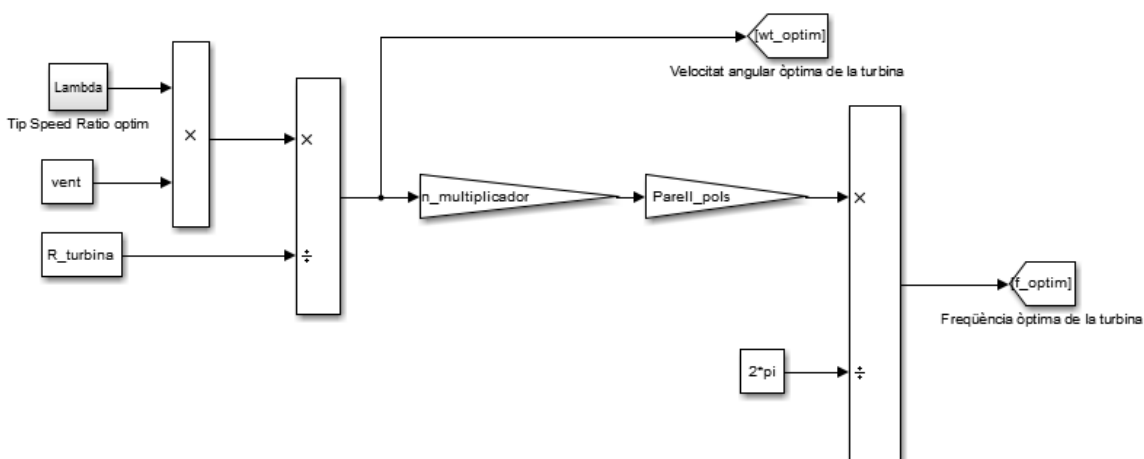


Figura 5.7 Disseny de la modelització de la velocitat angular òptima de la turbina

Els valors dels paràmetres utilitzats en les Figura 5.6 i Figura 5.7 queden recollits a la Taula 6.1.

6. Transmissió mecànica

6.1. Model matemàtic

Un cop vist com extreure potència de la turbina a partir de l'energia cinètica del vent, cal transmetre aquesta potència al generador per transformar l'energia mecànica en energia elèctrica a fi de poder subministrar la xarxa elèctrica.

A continuació es presenten les equacions del model de transmissió de l'aerogenerador. S'empra el model de transmissió senzill d'una sola massa, on la dinàmica mecànica del conjunt de la turbina, la transmissió multiplicadora i l'eix del generador es modelen com una inèrcia mecànica sobre la qual actuen dos parells: el de la turbina τ_t i el del generador τ_m de manera que:

$$\tau_t + v\tau_m = J_{tot} \frac{d}{dt} \omega_t$$

on:

- v : relació de multiplicació de la transmissió
- τ_m : parell que aplica el generador
- τ_t : parell que aplica la turbina
- ω_r : velocitat de l'eix del generador
- ω_t : velocitat de l'eix de la turbina
- J_{tot} : inèrcia del conjunt

i tenint en compte que la velocitat de gir de la turbina es relaciona amb la velocitat de gir del rotor mitjançant la relació de transmissió:

$$\omega_r = v\omega_t$$

En estat estacionari, el parell de la turbina més el parell del rotor per la relació de transmissió són iguals en mòdul però de signe oposat, indicant que en règim permanent, el sistema no s'accelera.

6.2. Modelització

A la Figura 6.1 es mostra els blocs del model de simulació de la transmissió.

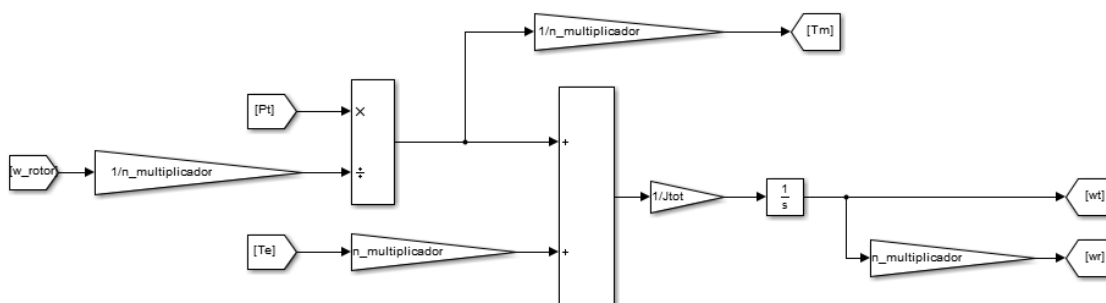


Figura 6.1 Disseny de la transmissió

Les variables w_{rotor} (velocitat angular del rotor) i T_e (parell electromagnètic) provenen de la màquina d'inducció i serveixen per realimentar el sistema de transmissió, actualitzant-se contínuament, per ajustar-se als requeriments de funcionament desitjats per obtenir la potència òptima.

Els valors dels diferents paràmetres queden recollits en la Taula 6.1.

Paràmetres	Valor	Unitats
Diàmetre del rotor	76	m
Velocitat nominal del rotor	16	min^{-1}
Moment d'inèrcia	$9 \cdot 10^6$	kgm^2
Coefficient d'esmoreïment	$7,5 \cdot 10^6$	Nm/rad
Relació de transmissió	80	-

Taula 6.1 Paràmetres aerodinàmics i mecànics d'un aerogenerador de 2MW

Cal recordar que la potència de la turbina i el coeficient de potència depenen del vent i del *tip speed ratio*, sent aquest últim funció de la velocitat de gir de la turbina. Per tant es conclou que la potència turbina també depèn de la velocitat del vent i la velocitat de gir de la turbina.

A la Figura 6.2 i Figura 6.3 es pot veure com varia la potència de la turbina i la velocitat angular del rotor en funció de la velocitat del vent.

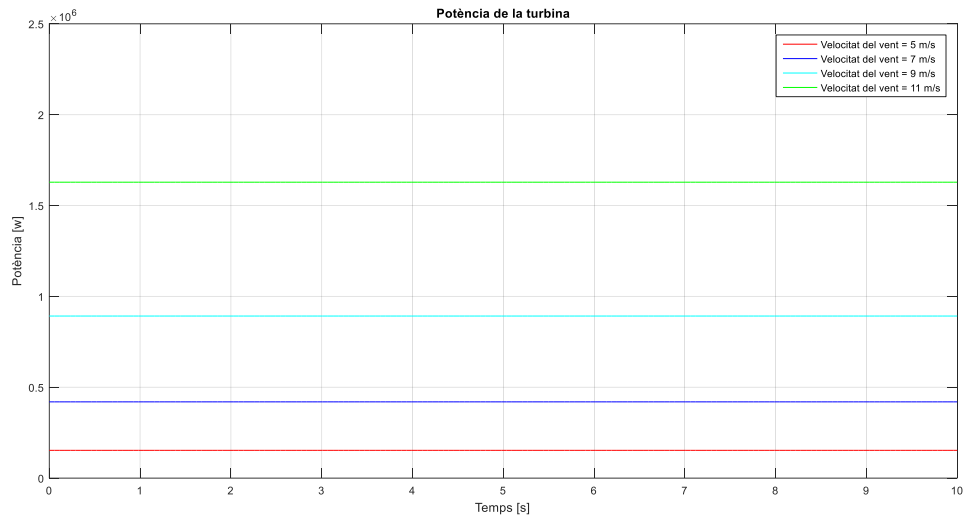


Figura 6.2 Potència de la turbina per diferents velocitats de vent

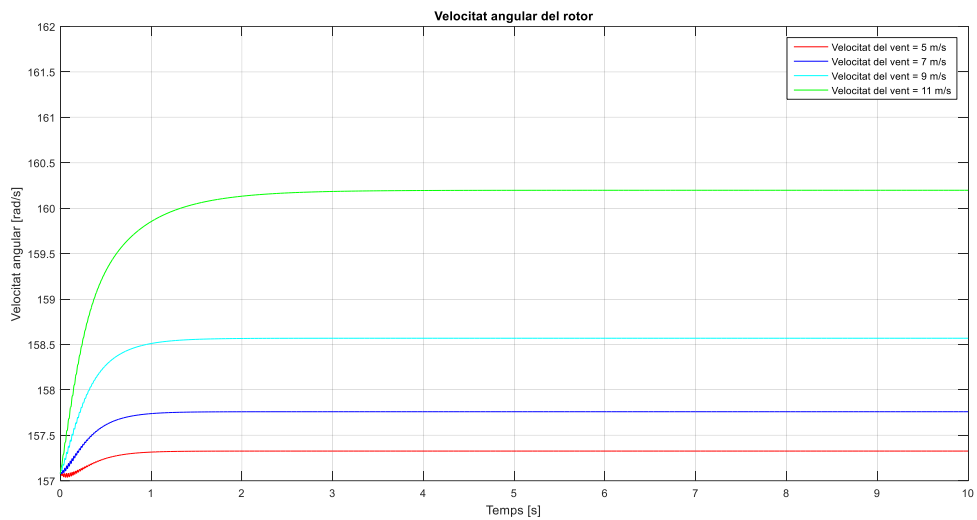


Figura 6.3 Velocitat angular del rotor per a diferents velocitats de vent

Per últim, s'han observat els resultats amb una consigna de vent variable que es mostra en la Figura 6.4, i es poden veure els resultats obtinguts de la potència de la turbina la il·lustració Figura 6.5. Aquest mateix perfil de vent s'ha utilitzat per treure resultats en els apartats posteriors.

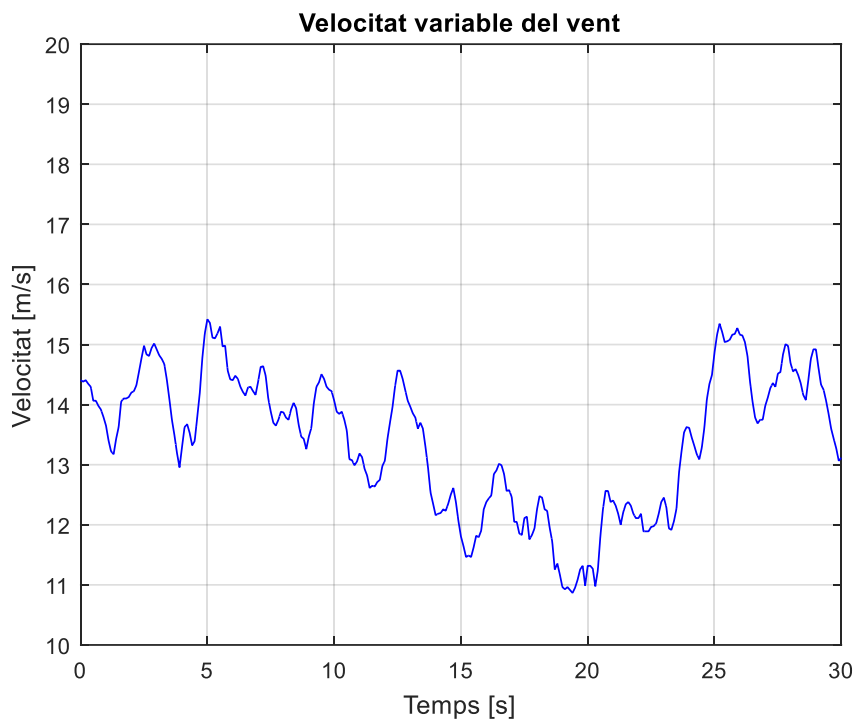


Figura 6.4 Perfil de velocitats variable del vent

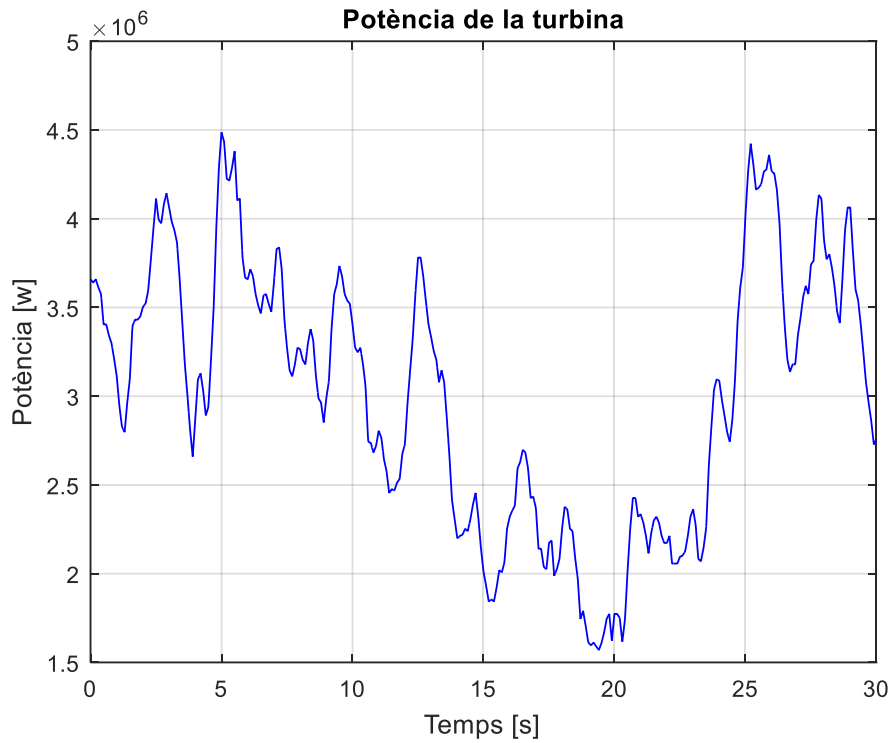


Figura 6.5 Potència de la turbina amb velocitats de vent variable

7. Màquina elèctrica

7.1. Modelització

Com ja s'ha explicat en apartats anteriors, per transformar l'energia mecànica de la turbina en energia elèctrica s'utilitzarà un generador asíncron d'inducció del tipus rotor de gàbia d'esquirol.

En aquest apartat es presenta les equacions de comportament elèctric del conjunt xarxa-generador. Els components elèctrics del model són únicament la xarxa elèctrica i la màquina d'inducció.

Per al cas d'estudi es considera que la xarxa és prou forta com perquè la tensió que veuen els terminals de l'estator de la màquina no depengui del corrent que entrega el generador. Per tant la tensió es considera de la forma:

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

D'altra banda es considera una màquina de gàbia d'esquirol, que equival a una màquina de rotor bobinat en curtcircuit, és a dir:

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

Les equacions dinàmiques de la màquina són les següents:

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

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

on:

- v_s^{abc} i v_r^{abc} són vectors de tensions d'estator i rotor
- i_s^{abc} i i_r^{abc} són vectors de corrents d'estator i rotor
- λ_s^{abc} i λ_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

L'expressió del flux concatenat, considerant un sistema magnètic lineal, és la següent:

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

amb

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

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

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

on

- L_{ls} i L_{lr} són les inductàncies de dispersió de l'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 de la màquina és de la forma:

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

amb

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

Aquestes expressions són poc pràctiques per a la integració numèrica i sovint s'implementen transformades a través de la matriu de canvi de variables de Park T (veure Annex Transformada de Park). Així doncs, aplicant la transformada de Park a les equacions anteriors i operant es pot obtenir:

$$\begin{bmatrix} v_s^{qd} \\ v_r^{qd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls} & 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls} & 0 & \frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls} \\ \frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls} & 0 & \frac{3}{2}L_{mr} + L_{lr} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls} & 0 & \frac{3}{2}L_{mr} + L_{lr} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s^{qd} \\ i_r^{qd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & \left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ms}\right)\dot{\theta} & 0 & \frac{3}{2}L_{sr}\dot{\theta} \\ -\left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ms}\right)\dot{\theta} & r_s & -\frac{3}{2}L_{sr}\dot{\theta} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr}(\dot{\theta} - \omega_r) & r_r & \left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right)(\dot{\theta} - \omega_r) \\ -\frac{3}{2}L_{sr}(\dot{\theta} - \omega_r) & 0 & -\left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right)(\dot{\theta} - \omega_r) & r_r \end{bmatrix}$$

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

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

$$T_m = \frac{9}{4} P L_{sr} (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq})$$

on

- T_m : Parell electromecànic del generador
- P : parell de pols
- i_{sq}, i_{sd} : corrents del estator en qd
- i_{rq}, i_{rd} : corrents del estator en qd

Per simplificar aquestes expressions es defineix:

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

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

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

Substituint per zero les tensions del rotor i aplicant les simplificacions esmenades, l'equació resulta:

$$T_m = \frac{3}{2}PM(i_{sq}i_{rd} - i_{sd}i_{rq})$$

$$\begin{bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & L_s \dot{\theta} & 0 & M \dot{\theta} \\ -L_s \dot{\theta} & r_s & -M \dot{\theta} & 0 \\ 0 & M(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) & r_r & L_r(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) \\ -M(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) & 0 & -L_r(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix}$$

Si es suposa que la corrent es constant amb el temps, es pot negligir els termes de corrent magnetitzant, quedant

$$\begin{bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & L_s \dot{\theta} \\ -L_s \dot{\theta} & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix}$$

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

Fent la transformació de Laplace s'obté:

$$\begin{bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + L_s s & L_s \dot{\theta} \\ -L_s \dot{\theta} & r_s + L_s s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix}$$

Aquestes equacions s'han considerat per a dissenyar el control del generador. D'altra banda, per al model d'estudi que s'ha realitzat, s'ha agafat el model que proporciona el programari Simulink, que segueix les equacions esmentades.

Paràmetres	Valor	Unitats
Potència	2	MW
Tensió nominal	960	V
Freqüència nominal	50	Hz
Corrent nominal	1300	A
Connexió	Delta	-
Parelles de pols	2	-
Velocitat nominal	1500	min ⁻¹
Moment d'inèrcia	90	kgm ²
Resistència estator	0.005	Ω
Inductància de dispersió estator	4·10 ⁻⁴	H
Resistència rotor	0,009	Ω
Inductància de dispersió rotor	3·10 ⁻⁴	H
Inductància magnetitzant	15·10 ⁻³	H
Resistència branca del ferro	140	Ω

Taula 7.1 Paràmetres elèctrics de l'aerogenerador de 2MW

Els resultats obtinguts en el control escalar i vectorial, es considera que es té la capacitat de controlar la tensió (mòdul i freqüència) i/o la corrent aplicada al generador tal i com s'explica en els següents apartats.

7.2. Control escalar V/f

7.2.1. Model matemàtic

S'ha decidit emprar el control escalar o tensió-freqüència, un dels controls més comuns i d'ampli ús degut a la seva fàcil implementació. Amb el control escalar, la velocitat de la màquina d'inducció es controlada per les magnituds ajustables de l'estator, tensió i freqüència, amb l'objectiu de mantenir un valor desitjat de flux constant.

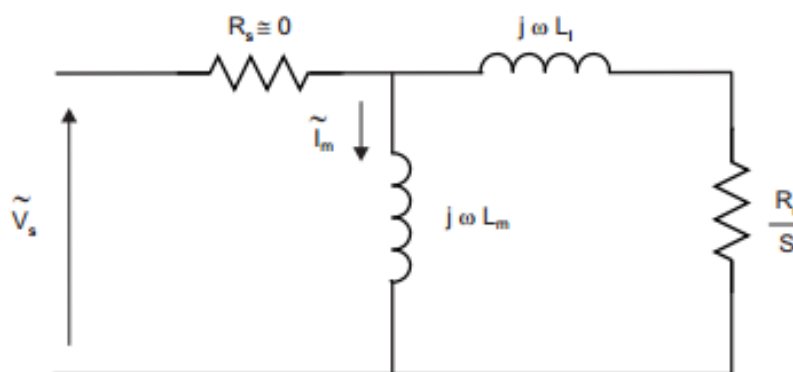


Figura 7.1 Esquema elèctric de l'estator i el rotor

Tal i com es mostra en la Figura 7.1, el circuit de la màquina elèctrica simplificat considera que la resistència del estator R_s és negligible, i que la inductància de l'estator es troba incrustada a la inductància del rotor L_r .

L'objectiu del control escalar és aconseguir el parell electromagnètic requerit en cada punt de l'operació amb el mínim corrent possible. Utilitzant les lleis de Kirchoff i prenent la inductància magnetitzant L_m com la més representativa, es pot aproximar a la següent equació:

$$I_m \cong \frac{V_s}{j\omega L_m}$$

Quan la màquina d'inducció és troba treballant en la regió lineal magnètica, la inductància magnetitzant roman constant, quedant la següent expressió:

$$I_m = \frac{V}{(2\pi f)L_m}$$

$$\frac{V}{f} \cong 2\pi I_m L_m$$

Recordant la suposició de l'apartat 7.1, que deia que el corrent no varia amb el temps, es pot apreciar de l'equació anterior que si mantenim el rati V/f constant per qualsevol canvi de f , llavors el flux també romandrà constant i com a conseqüència, el parell també esdevindrà constant independentment de la freqüència subministrada.

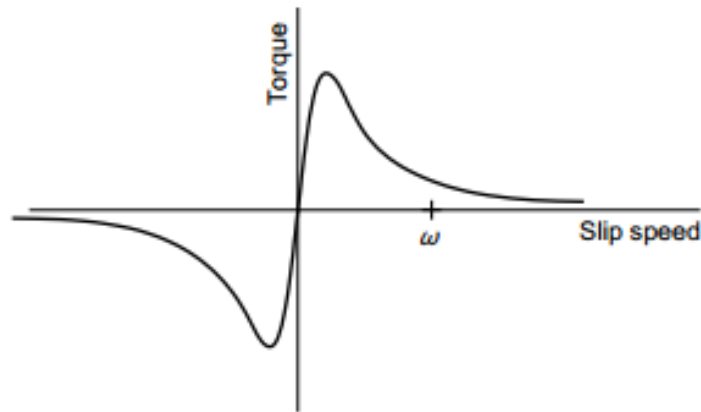


Figura 7.2 Gràfica Parell-Velocitat angular. Font: Bilal Akin and Nishant Garg [39]

Qualsevol màquina elèctrica segueix la corba de la Figura 7.2, on depenent de la zona de treball, ja sigui la regió de generació o la de motor, la màquina presentarà un parell negatiu o positiu respectivament. Si es pretén obtenir la màxima potència caldrà maximitzar tant com es pugui el parell i per això caldrà fer girar la màquina a una velocitat angular determinada en funció de la velocitat del vent que mou la turbina.

Per tant si a la següent equació,

$$\frac{V_{nom}}{f_{nom}} = K \rightarrow V = K \times f$$

on

- V_{nom} : tensió nominal
- f_{nom} : freqüència nominal

es substitueix la, f , per la freqüència òptima s'obtindrà la tensió amb la que s'ha d'alimentar l'estator de la màquina perquè el rotor giri a la freqüència òptima.

$$f_{opt} = \frac{\omega_{t_opt} vP}{2\pi}$$

on

- ν : relació transmissió
- P : parell de pols
- $w_{t_opt} = \frac{\lambda_{opt} v_v}{R}$

Per tant si la velocitat del vent i, en conseqüència, la freqüència del rotor augmenten, les tensions de l'estator han de ser proporcionalment incrementades, fins arribar a la zona de debilitament de camp (veure Figura 7.3) . Un cop en aquesta zona [39], per més que la freqüència augmenti la tensió es mantindrà constant i de valor igual a la tensió nominal.

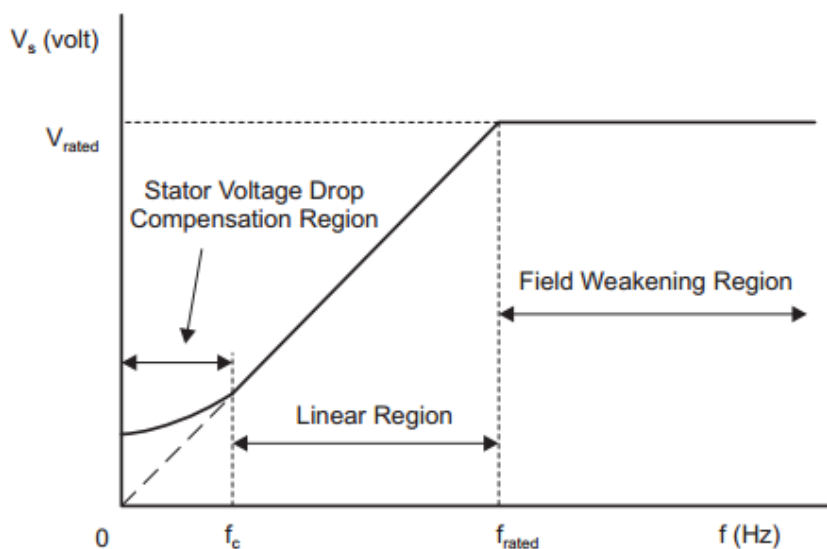


Figura 7.3 Gràfica tensió-freqüència. Font: Bilal Akin and Nishant Garg [39]

S'ha de considerar però, que la freqüència f no és l'autèntica freqüència del rotor degut al lliscament [39]. La compensació d'aquest lliscament pot ser afegida mitjançant la mesura d'un sensor, obtenint així, un sistema de llaç tancat.

S'ha optat per no implementar el llaç tancat al tensió-freqüència perquè el control de velocitat que s'aplicarà finalment, és el control vectorial, ja que presenta un *Current Loop* que permet un millor control.

7.2.2. Modelització

A la Figura 7.4 es veuen els blocs emprats per fer el model de simulació i a la Taula 7.2 queden recollits els valors dels paràmetres del control escalar.

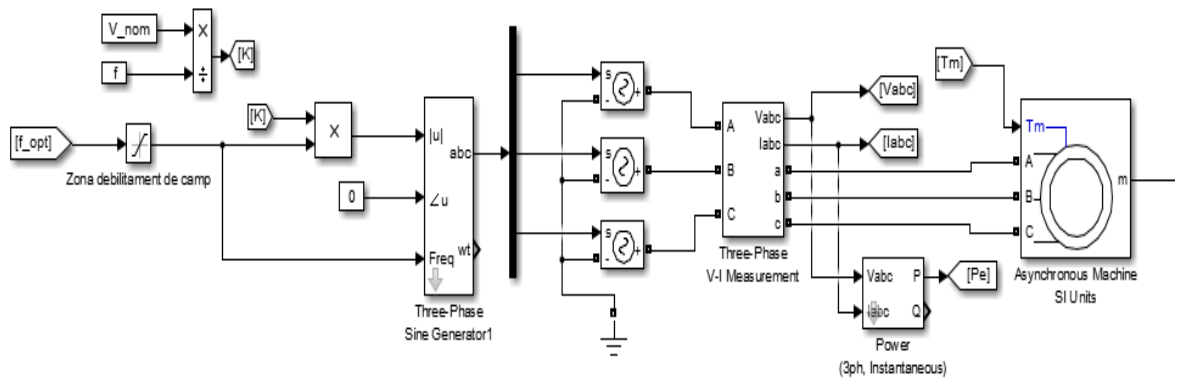


Figura 7.4 Disseny del control de velocitat mitjançant la regulació tensió-freqüència

Paràmetres	Valor	Unitats
Tensió nominal	960	v
Freqüència nominal	50	Hz
V/f	19,2	V/Hz

Taula 7.2 Paràmetres Control tensió-freqüència

La variable T_m (parell mecànic del rotor) fa referència al parell de la turbina reduït al rotor mentre que la variable f_{opt} (freqüència òptima) representa la freqüència del rotor que dona un potència elèctrica màxima.

7.2.3. Resultats

A la Figura 7.5 es pot observar la variació de la potència elèctrica generada en funció del temps. Es pot apreciar un pendent inicial en la simulació degut a que s'ha inicialitzat el parell amb una consigna rampa per ajudar a estabilitzar el sistema durant el transitori.

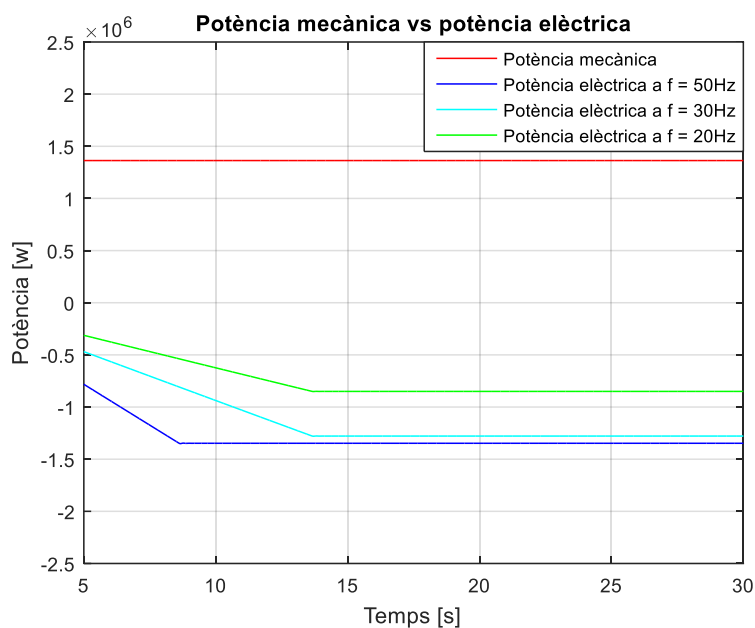


Figura 7.5 Potència elèctrica amb un vent d'11 m/s a diferents freqüències

En aquest cas, es consigna una velocitat de vent d'11 m/s, que proporciona una potència mecànica a la turbina de 1,414 MW. En aquestes condicions, la freqüència òptima de gir és de 58,72 Hz però com es trobaria en la zona de debilitament de camp, es satura a la freqüència nominal de 50 Hz. Per tant es comprova que a mesura que la freqüència s'allunya del seu valor òptim, la potència elèctrica generada es redueix progressivament.

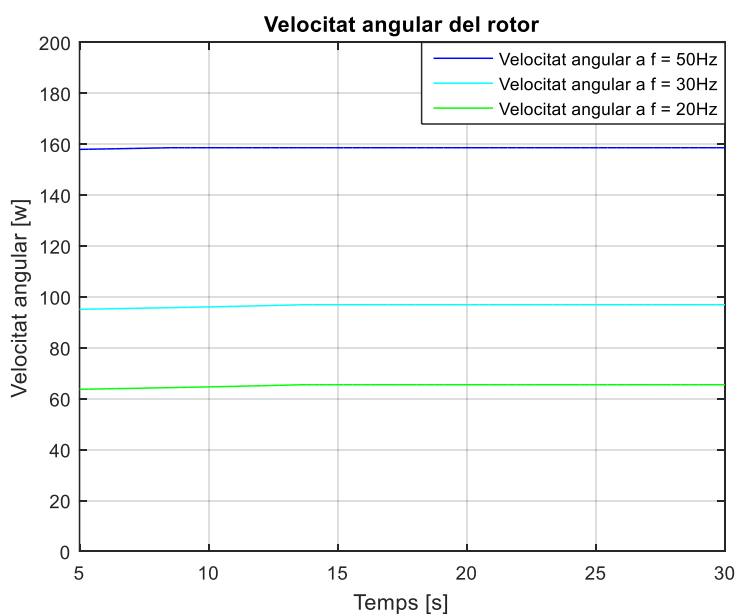


Figura 7.6 Velocitat angular del rotor amb un vent d'11 m/s a diferents freqüències

A la Figura 7.6 es veu la correlació entre la freqüència imposada i la velocitat de gir del rotor, que al disposar d'una màquina amb dos parells de pols es veu reduït a la meitat.

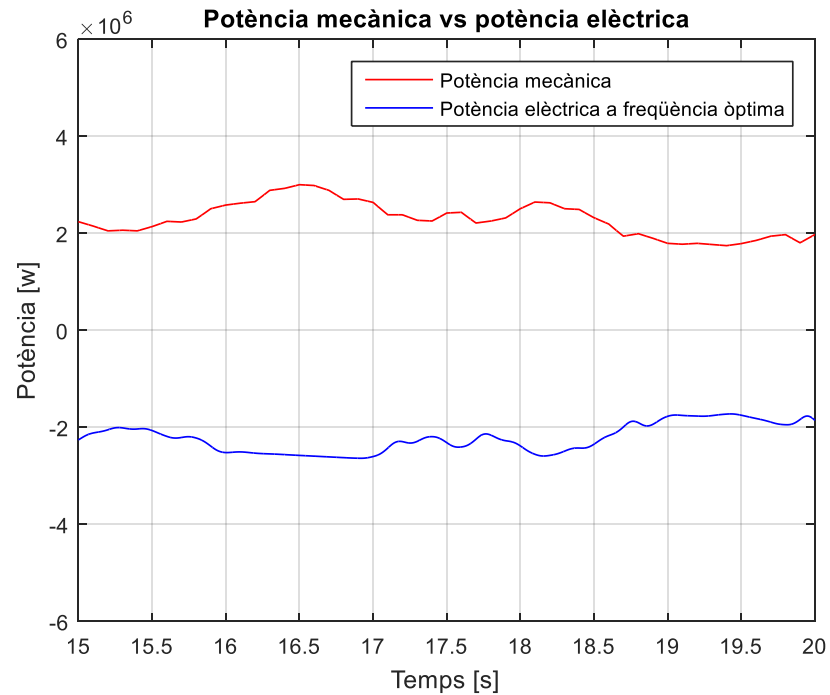


Figura 7.7 Potència mecànica vs potència elèctrica amb velocitat de vents variables

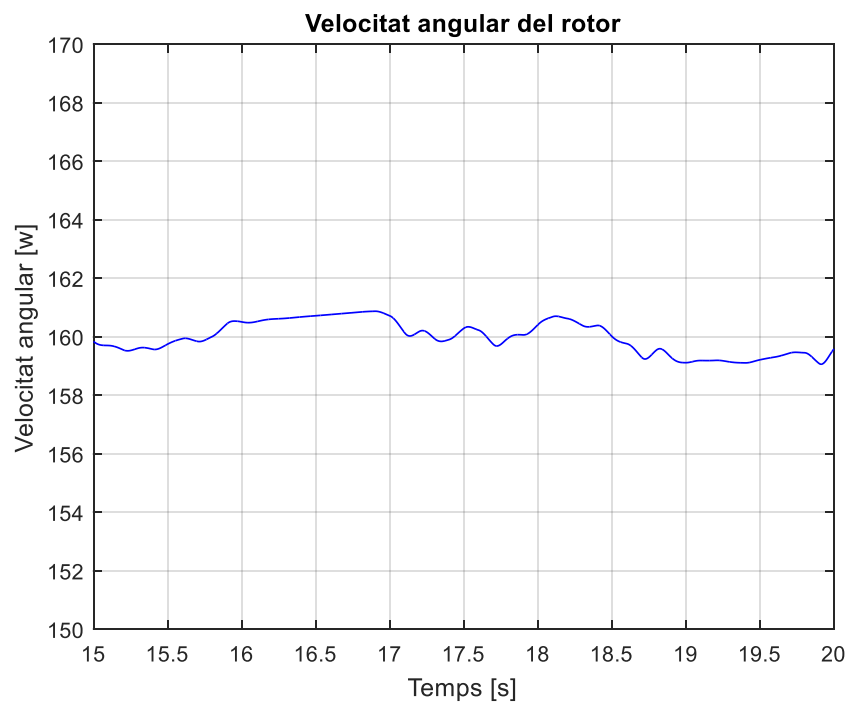


Figura 7.8 Velocitat angular del rotor amb velocitat de vent variable

A la Figura 7.7 i la Figura 7.8, s'observa la variació de potència generada i la velocitat de gir del rotor en funció del perfil de velocitat de vent de la Figura 6.4.

7.3. Control vectorial

7.3.1. Model matemàtic

El control vectorial s'utilitza per variar en un rang molt ampli, la velocitat d'un motor d'inducció. Per fer-ho, compara el corrent de l'estator en la referència qd amb la provinent de dos llocs diferents; una d'elles és el responsable del flux en el motor, i l'altre la que controla la producció del parell. Al fer el canvi de referència es transforma les ones sinusoidals en valors constants i això permet facilitar el control dels corrents mitjançant controladors PI (*Proportional Integral*). De fet aquesta operativa va ser concebuda per semblar-se al control d'un motor de continua.

El control vectorial ofereix bastants punts favorables com el control de la velocitat, una gran precisió en la regulació de la velocitat, una ràpida resposta dinàmica, i unes operacions per sobre de la velocitat normal de treball. Tenint en compte els beneficis que aporta, tot i haver modelat el control tensió freqüència, es va optar per implementar el control vectorial i analitzar els resultats per veure la progressió en la optimització d'extracció de la potència.

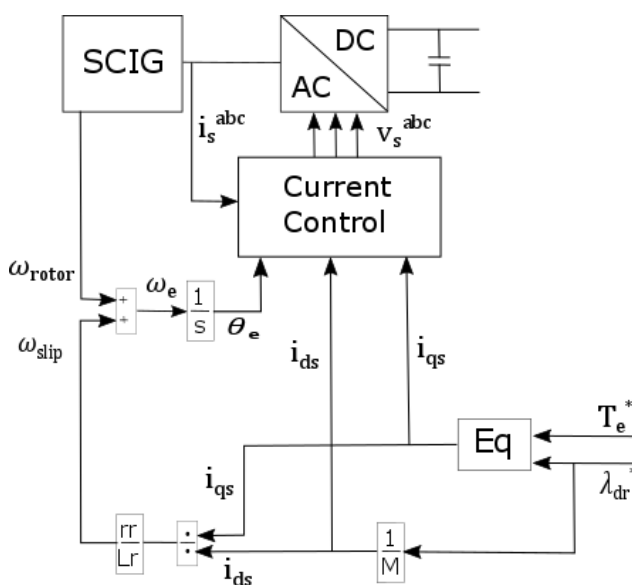


Figura 7.9 Esquema control vectorial

Per fer el control del parell i la velocitat del generador d'inducció s'usarà el IMC (*Internal Model Control*) perquè és molt poc sensible als canvis de paràmetres i permet afinar fàcilment els controladors.

Com ja s'ha dit a l'apartat 7.2, al igual que el control tensió freqüència s'han de buscar les tensions que facin girar el rotor a la velocitat desitjada. Per dissenyar el llaç de corrent es parteix de les equacions de la màquina, on es disposa de les tensions de l'estator en dq aïllades.

$$\begin{bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + L_s s & L_s \dot{\theta} \\ -L_s \dot{\theta} & r_s + L_s s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix}$$

Seguidament es troben les corrents i_{sq}^* i i_{sd}^* de referència,

$$i_{ds}^* = \frac{1}{M} \lambda_{dr}^*$$

on:

- M : Inductància Mutua
- $\lambda_{dr}^* = \frac{U_{nominal}}{f_{nominal}}$ component d del flux del rotor

$$i_{qs}^* = \frac{2L_r}{3PM} \cdot \frac{T_m}{\lambda_{dr}^*}$$

on:

- L_r inductància del rotor
- $\lambda_{dr}^* = \frac{U_{nominal}}{f_{nominal}}$ component d del flux del rotor
- T_m parell mecànic del generador
- P : parell de pols

Amb el llaç de corrent s'imposa que el valor d'aquestes corrents de referència s'ajustin als valors reals de les corrents que circulen per l'estator.

7.3.2. Modelització

A continuació es presenten els blocs emprats per dissenyar el control vectorial basat en l'esquema de la Figura 7.9. Primerament, a la Figura 7.10 es presenta el llaç de corrent amb els corresponents desacoblaments de les tensions v_d i v_q , obtinguts a partir de les corrents en dq procedents de l'estator, i de la velocitat del camp giratori de l'estator.

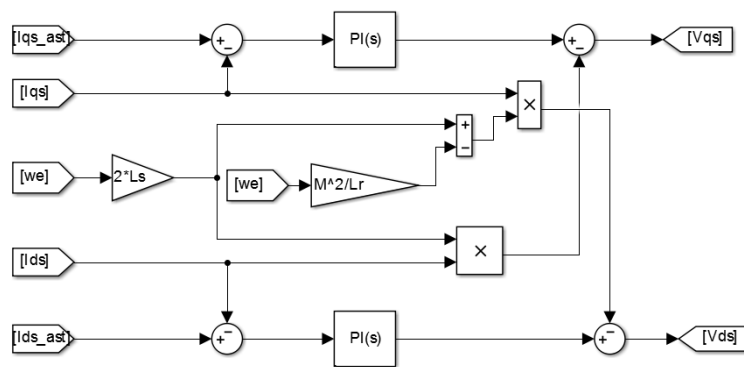


Figura 7.10 Disseny del laç de corrent del control vectorial

A la Figura 7.11 s'il·lustra la procedència dels corrents de referència.

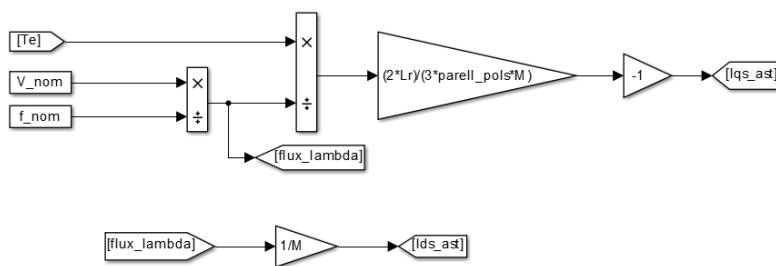


Figura 7.11 Disseny dels corrents d i q de referència de l'estator

Per últim, a la Figura 7.12 es mostra el sistema compost per la xarxa, la màquina d'inducció i el control vectorial.

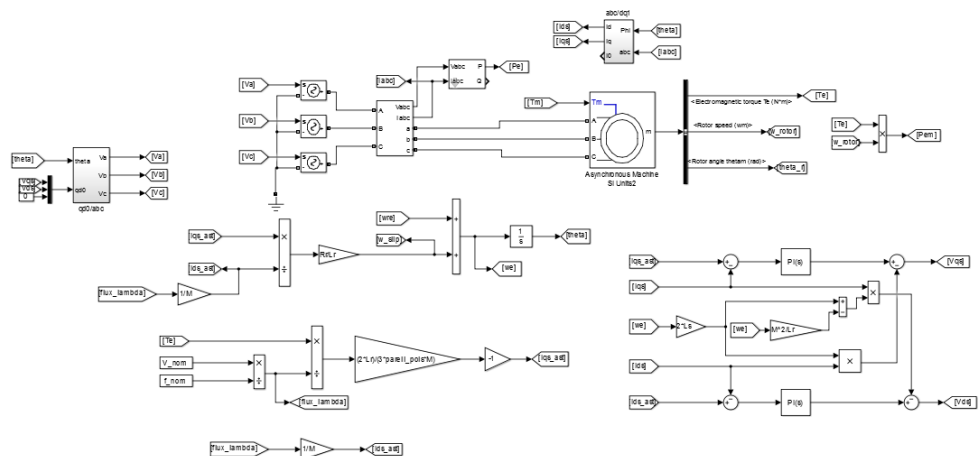


Figura 7.12 Disseny del control vectorial de la velocitat de gir del SCIG

7.3.3. Resultats

A la Figura 7.13 es pot observar la variació de la potència elèctrica generada en funció del temps. Es pot apreciar un pendent inicial en la simulació degut a que s'ha inicialitzat el parell amb una consigna rampa per ajudar a establir el sistema durant el transitori.

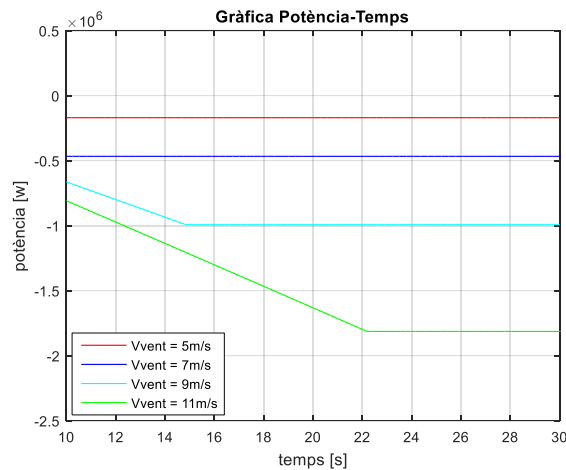


Figura 7.13 Potència elèctrica per diferents velocitats de vent

A la Figura 7.14 es pot veure la velocitat angular del rotor per diferents velocitats de vent. S'utilitzen les mateixes velocitats del vent que en la Figura 6.3, on els resultats obtinguts mostren que per aquestes velocitats, no cal girar a unes velocitats tant altes per obtenir la mateixa potència.

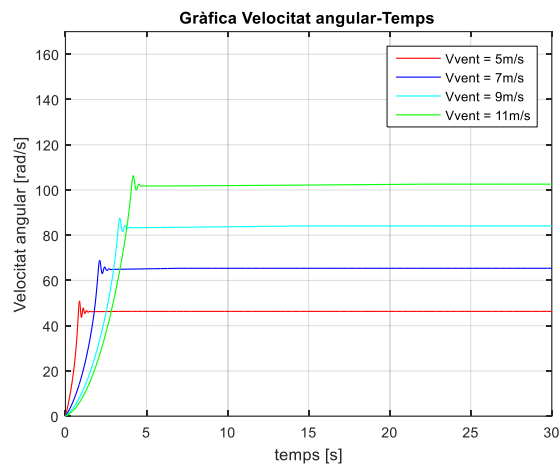


Figura 7.14 Velocitat angular del rotor per diferents velocitats de vent

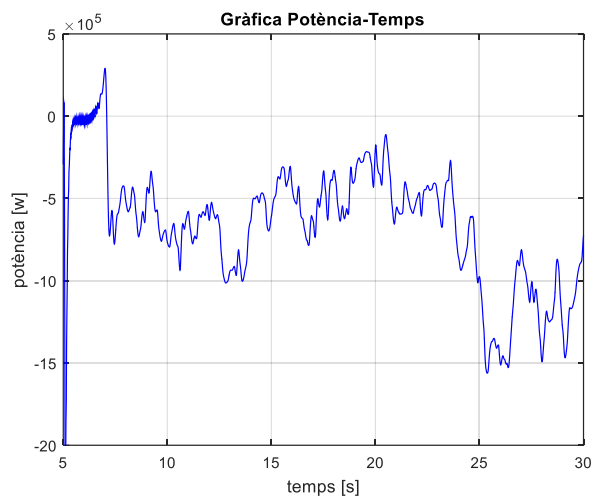


Figura 7.15 Potència elèctrica pel perfil de velocitats del vent

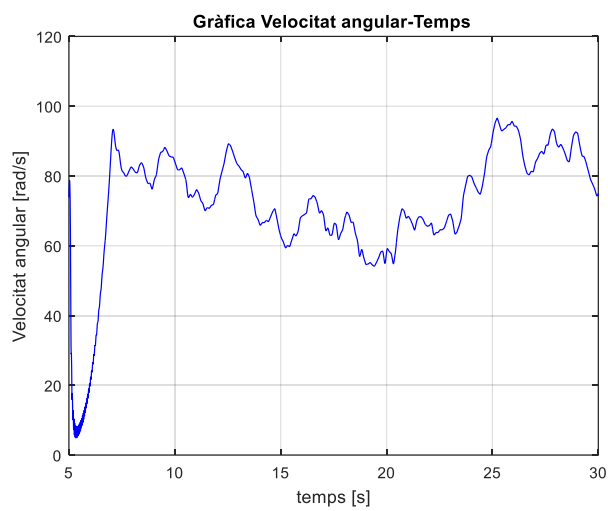


Figura 7.16 Velocitat angular del rotor pel perfil de velocitats del vent

A les il·lustracions Figura 7.15 i Figura 7.16 es mostra la resposta de la potència elèctrica i la velocitat angular del rotor per un perfil de vents variable. Com la màquina està dissenyada per treballar sota velocitats al voltant dels 10 m/s, s'ha adaptat el perfil de velocitats de la Figura 6.4 en un valor mig de 8 m/s amb una desviació estàndard de 2 m/s per realitzar les simulacions pertinents. D'aquesta forma, es pretén evitar la zona de debilitament de camp i poder treure el màxim profit del control vectorial.

8. Convertidor estàtic de potència

Un convertidor d'energia és un sistema o equip electrònic que té per objectiu la conversió d'energia elèctrica entre dos formats diferents, com es mostra en la Figura 8.1. Per exemple, un convertidor és capaç d'obtenir corrent continua a partir de corrent alterna.

El concepte inicial de convertidor pot estendre's per incloure diferents aspectes tals com l'eficiència, la reversibilitat, el grau d'idealització, la fiabilitat, el volum o la tecnologia per citar les més importants [28].

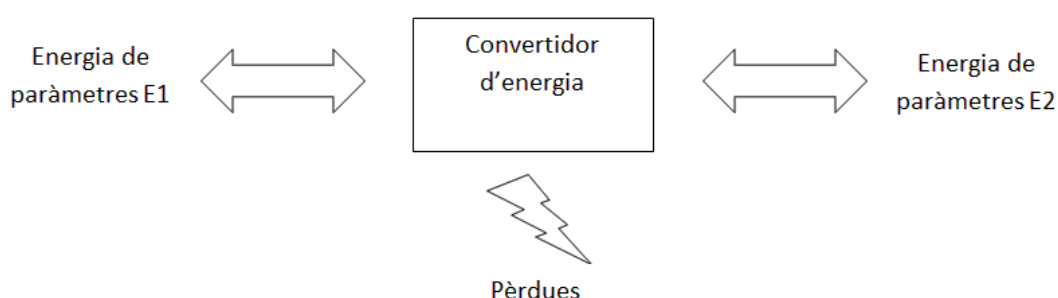


Figura 8.1 Estructura bàsica d'un convertidor electrònic d'energia

8.1. Classificació dels convertidors

Els convertidors es poden classificar segons diferents criteris. Un dels més comunament utilitzats és agrupar-los segons el format de les energies d'entrada i de sortida. Bàsicament i segons aquest criteri es poden establir quatre grans grups [28]:

- **Convertidors ca/cc o rectificadors:** aquest tipus de convertidors transformen corrent alterna monofàsica o trifàsica, en continua.
- **Convertidors cc/cc:** transformen un determinat valor de corrent contínua d'entrada a un valor de sortida diferent.
- **Convertidors cc/ca o inversors:** realitzen una conversió de corrent contínua en corrent alterna, amb la possibilitat de controlar tant la freqüència com el valor eficaç de la tensió o la intensitat de sortida.
- **Convertidors ca/ca:** la seva funció és modificar el valor eficaç d'entada, conservant la freqüència, tot i que també pot aconseguir una tensió de sortida amb una freqüència múltiple de la d'entrada.

Tanmateix, tot i existeixin més tipus de classificacions, per la modelització del sistema cal centrar-se en la manera en que el convertidor es connecta a la xarxa. Els convertidors encarregats d'injectar la potència a la xarxa elèctrica es poden classificar [29],[30],[31] segons el tipus de semiconductor utilitzat:

- **Voltage Sourced Converters (VSC):** És un convertidor basat en transistors bipolars de porta aïllada (IGBT, *Insulated-Gate Bipolar Transistor*) o alguna tecnologia similar que sigui capaç de controlar l'obertura i els tancament de l'interruptor i ajustar la tensió al valor desitjat. Això concedeix dos graus de llibertat, permetent controlar tan la potència activa com la reactiva de forma independent. Aquests convertidors poden controlar de forma independent la potència activa i reactiva. A més, com injecten harmònics de corrent més reduïts necessiten filtres més petits. Tanmateix, l'alta freqüència de commutació en que treballen els hi genera grans pèrdues.
- **Line Commuted Converters (LCC):** És un convertidor basat en tiristors o tecnologies similars que requereixen d'una xarxa per poder funcionar. Poden controlar la potència activa mentre consumeixen una potència reactiva no controlada. Per aquest motiu, necessiten d'una xarxa i de grans filtres per als harmònics de corrents que generen. L'avantatge que té és que pot funcionar per a altes tensions i potències, produint poques pèrdues degut a que commuten a una freqüència més baixa.

8.2. Anàlisi i modelització del convertidor

8.2.1. Convertidor *Back to Back*

Com ja s'ha explicat a l'apartat 4.2, el convertidor que es farà servir per la modelització del sistema serà el convertidor *Back to Back*. Aquest segueix l'esquema de la Figura 8.2 on es pot observar que el convertidor en qüestió consta de dos convertidors VSC enllaçats per el bus de contínua.

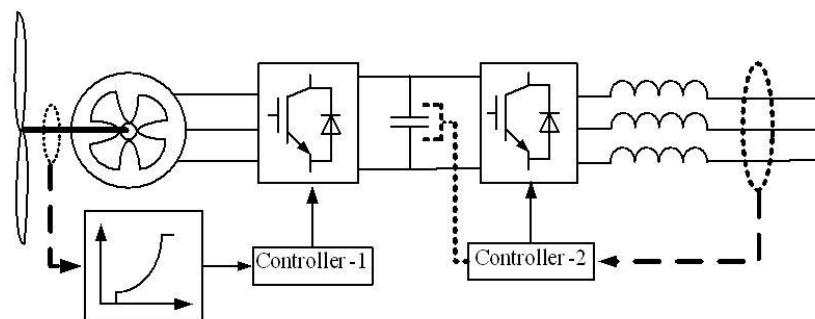


Figura 8.2 Convertidor *Back to Back*. Font: Ali M. Eltamaly, A. I. Alolah and Hassan M. Farh [37]

8.2.2. Convertidor VSC

Per les característiques descrites en l'apartat 8.1, la modelització de la turbina de velocitat variable amb convertidor de plena potència i la construcció del convertidor *Back to Back* explicat en l'apartat 8.2.1, s'utilitzarà el convertidor VSC.

El VSC s'encarrega d'intercanviar la potència entre la part alterna i la part contínua del sistema. Està format per tres branques amb dos IGBT en cada branca, el punt del mig dels quals està connectada a la xarxa mitjançant inductàncies d'acoblament. Donat les consignes adequades i utilitzant una tècnica de modulació, es poden generar els voltatges desitjats a la part d'alterna tot controlant la potència activa i reactiva.

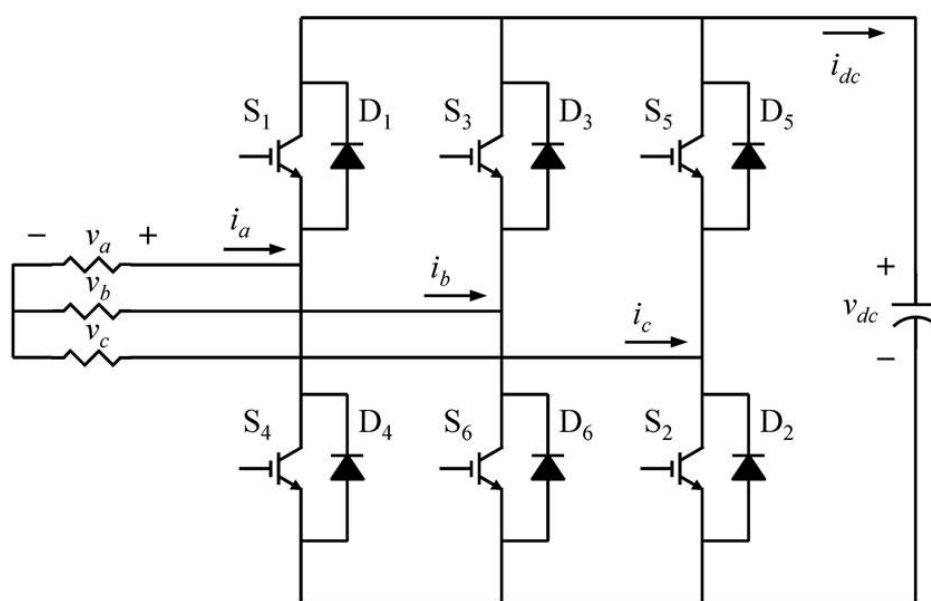


Figura 8.3 Sistema format pel VSC i les tres fases de la xarxa. Font: Pavel Zuniga-Haro, Juan Manuel Ramirez [38]

Com es veu a la Figura 8.3, el bus DC està connectat a la part de contínua. Aquesta part pot ser modelitzada com una font de tensió (veure Figura 8.4) o una font de corrent amb un condensador en paral·lel (veure Figura 8.5). En canvi, la part d'alterna es modelitza amb l'equivalent de Thevenin o, en un sistema molt simplificat com un font de tensió alterna.

Cal remarcar que un VSC sol pot comportar-se com una font de tensió alterna, però si es consideren també les inductàncies pot arribar a comportar-se com una font de corrent i , per tant, es podria connectar a la xarxa sense cap problema. Per aquest motiu, es col·loquen les inductàncies d'acoblament al sistema modelitzat.

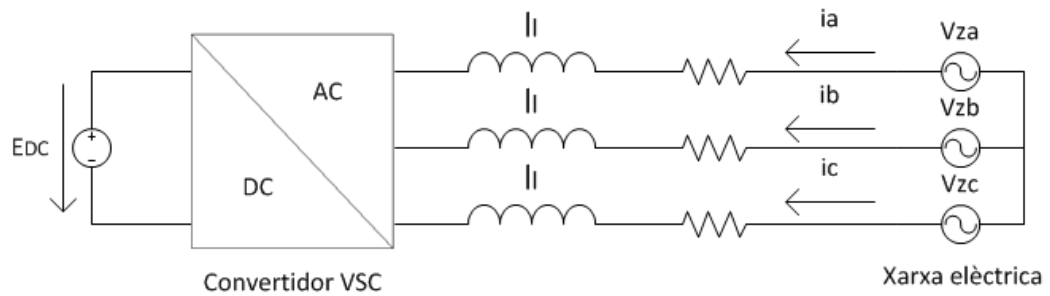


Figura 8.4 VSC amb la part DC modelat com una font de tensió

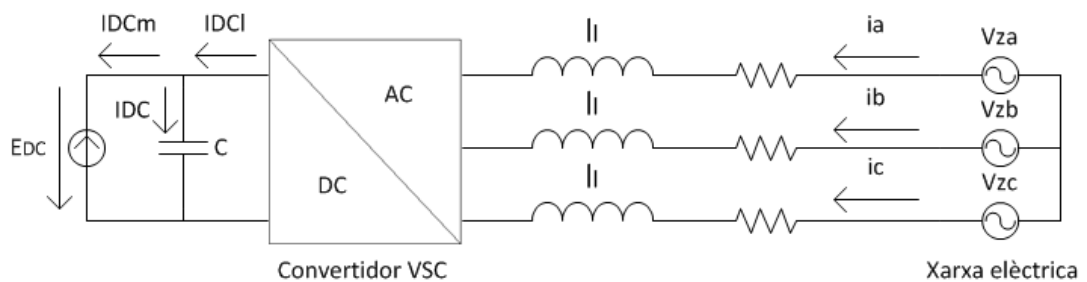


Figura 8.5 VSC amb la part DC modelat com font de corrent amb condensador en paral·lel

El VSC permet controlar dues variables elèctriques en la base $qd0$ permetent controlar de forma independent la potència activa i reactiva. La potència reactiva referència pot ser obtinguda mitjançant un sistema de control d'alt nivell o es pot fixar a un valor concret. En canvi, la potència activa referència depèn de la naturalesa de la font connectada a la part de contínua. En els sistemes d'energia renovables, la potència activa s'ajusta regulant el bus de contínua de manera que es compleixi el principi de conservació d'energia entre la xarxa i el generador de potència.

8.2.3. Model simplificat del VSC

Tot i que el VSC està basat en estats discrets de la commutació dels IGBT, per dissenyar els controls és millor treballar amb un sistema simplificat equivalent al model original.

Per obtenir aquest nou model, es separa la part contínua i la part alterna del convertidor. La part contínua es simplifica amb una font de corrent i un condensador mentre que la part alterna es converteix amb fonts de corrent alterna.

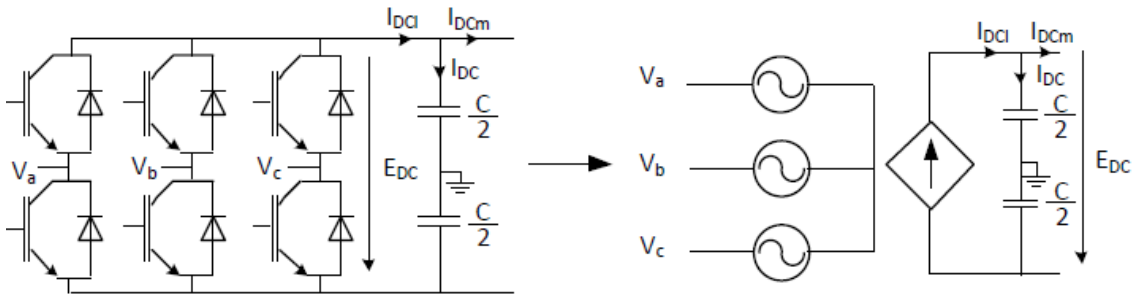


Figura 8.6 Model simplificat. Font: Agustí Egea Álvarez, Adrià Junyent Ferré i Oriol Gomis Bellmunt [34]

La font de corrent de la part contínua simbolitza la potència activa intercanviada entre la part alterna i la part contínua i assegura el balanç energètic del sistema.

Tanmateix, modelar el sistema de la Figura 8.6 sense cap mena de control pot comportar el ràpid deteriorament del circuit. Per això, és necessari l'ús de controladors que permetin regular la quantitat de corrent que circula en cada branca per assegurar el seu funcionament òptim. En la Figura 8.7 es mostra l'esquema general del control a aplicar al convertidor VSC.

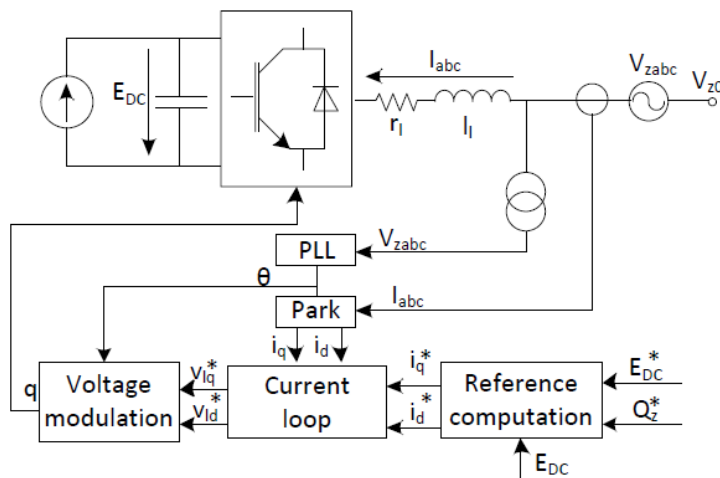


Figura 8.7 Esquema de control general del convertidor per a la generació d'energia renovable. Font: Agustí Egea Álvarez, Adrià Junyent Ferré i Oriol Gomis Bellmunt [34]

En apartats posteriors s'explicaran de forma acurada la manera de dissenyar-los i implementar-los en el sistema modelitzat.

8.3. Convertidor VSC costat xarxa

La part alterna està composta per la xarxa trifàsica que subministra les tensions V_{za} , V_{zb} i V_{zc} i, en cada branca, una inductància L_i amb una resistència paràsita r_i . Al final de les branques es troben les tensions V_{la} , V_{lb} i V_{lc} que són el resultat d'haver realitzat els controls i la modulació

pertinents sobre el sistema. L'esquema resultant és el de la Figura 8.8 mentre que a la Figura 8.9 es reflexa l'esquema modelitzat en el software de simulació. Els paràmetres de l'esquema queden recollits en la Taula 8.1.

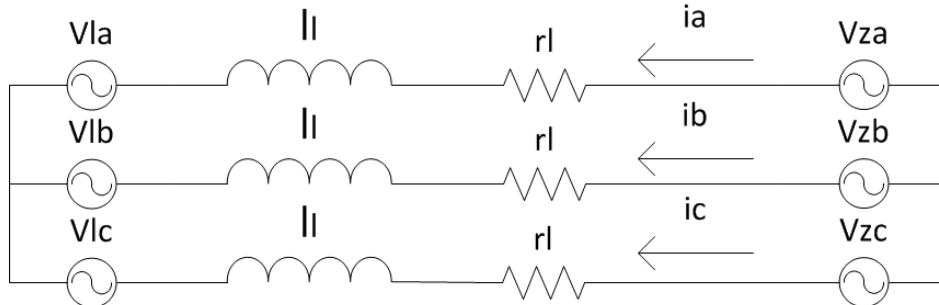


Figura 8.8 Model equivalent de la part AC del convertidor VSC

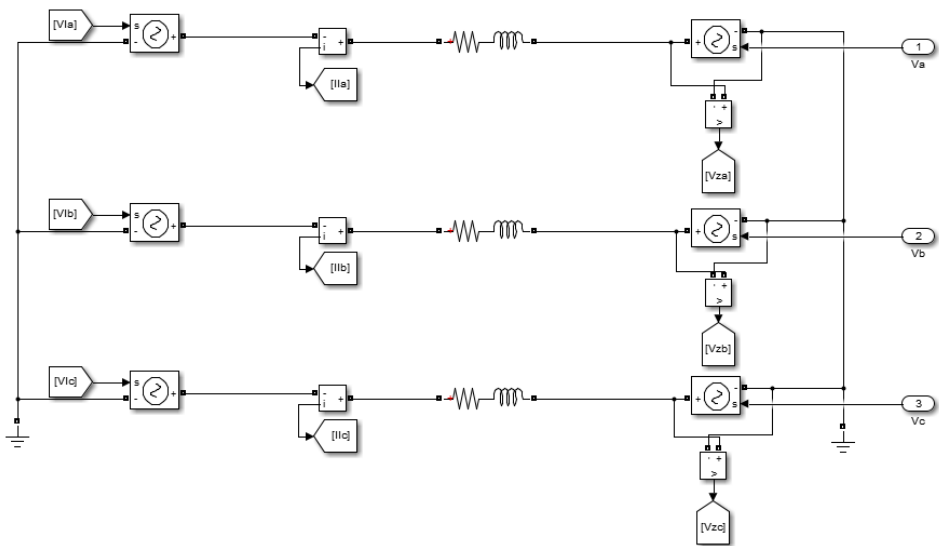


Figura 8.9 Modelització de la part AC del convertidor VSC

Paràmetres	Valor	Unitats
Resistència paràsita	0.5	Ω
Inductància d'acoblament	5,4	mH
Tensió	400	V
Freqüència	50	Hz

Taula 8.1 Taula de valors dels paràmetres de la part alterna del VSC

8.3.1. Disseny del Phase Locked Loop

El *Phase Locked Loop* (PLL) s'utilitza per determinar la fase i la velocitat angular de la xarxa elèctrica. Per fer-ho es realimenta la component V_{zd} de la transformada de Park i s'imposa que el seu valor sigui igual a zero (veure Figura 8.10). Gràcies a la transformada de Park, es pot treballar tant amb controladors P com PI i no amb altres més complexos. D'aquesta forma s'aconsegueix simplificar el sistema ja que es passa de treballar amb tres components, a només una. La sortida del controlador PI correspon a la velocitat angular de la xarxa, i la integral d'aquesta senyal correspon a la fase de la xarxa.

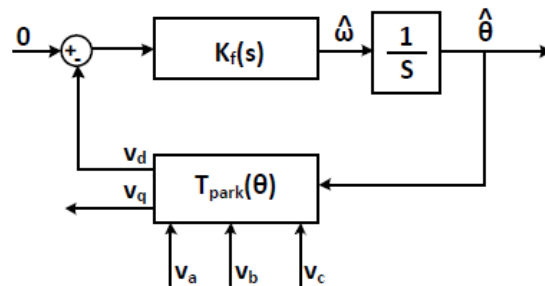


Figura 8.10 Esquema de Phase Locked Loop. Font: Agustí Egea Álvarez, Adrià Junyent Ferré i Oriol Gomis Bellmunt [34]

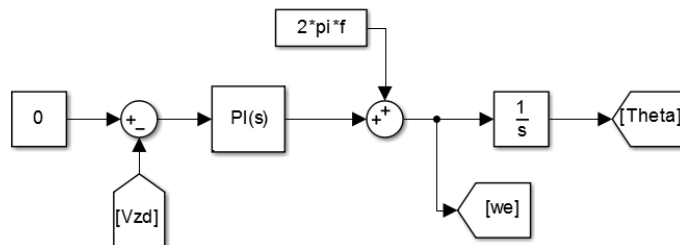


Figura 8.11 Disseny del Phase Locked Loop

Per estudiar el disseny del controlador PLL, cal linealitzar el sistema assumint que l'error de l'angle serà molt petit. Així doncs, s'obté la següent funció de transferència de segon ordre:

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

on $\hat{\theta}(s)$ és l'angle de la xarxa estimada i $\theta(s)$ és l'angle real de la xarxa.

El controlador PI del PLL de la Figura 8.11 pot definir-se com:

$$K_f(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left(\frac{1}{\tau_{PLL}} + s \right) = K_p + \frac{K_p}{\tau_{PLL}s}$$

on τ_{PLL} és la constant de temps del PLL.

Els paràmetres del controlador PI del PLL es poden calcular resolent el següent sistema d'equacions:

$$w_n = \sqrt{\frac{K_p E_m}{\tau_{PLL}}}$$

$$\xi = \frac{\sqrt{\tau_{PLL} K_p E_m}}{2}$$

on E_m el valor de la tensió de pic admissible, ξ és el factor d'amortiment i w_n és la velocitat angular de la xarxa elèctrica.

	w_n	ξ	E_m	K_p	τ_{PLL}	K_i
Modelització de sistema	314,159	0.707	326,599	1,3599	0,00450	302,194
Prova 1	314,159	0.1	326,599	0,192	0,000637	302,194
Prova 2	314,159	0.5	326,599	0,962	0,00318	302,194
Prova 3	314,159	0.9	326,599	1,731	0,00573	302,194

Taula 8.2 Valors per simular els el PLL en funció del factor d'amortiment

En la Taula 8.2 es recullen els valors (en SI) que s'han adoptat per realitzar les simulacions il·lustrades en la Figura 8.12.

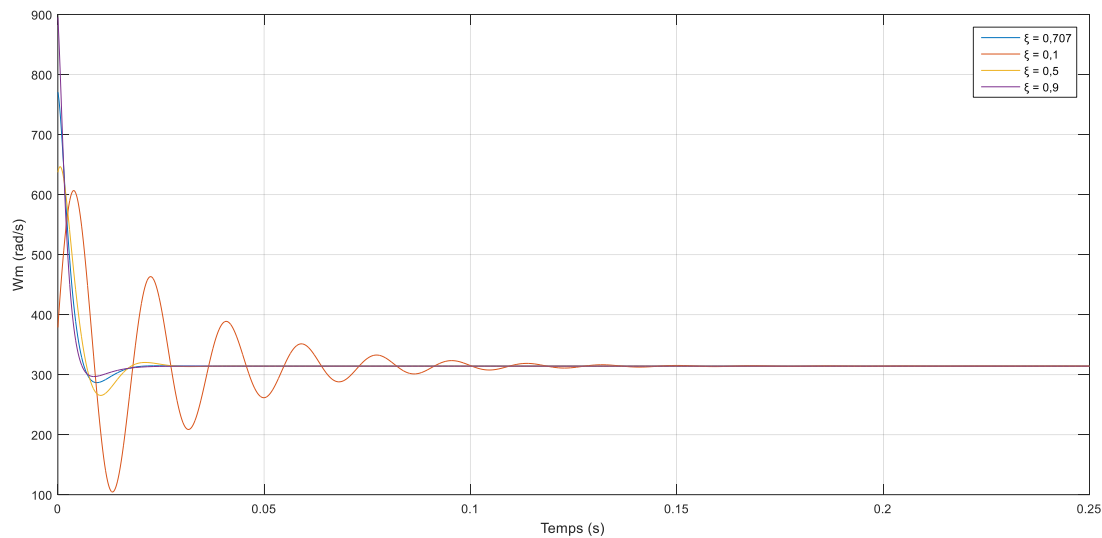


Figura 8.12 Simulacions amb diferents valors en funció del factor d'amortiment

Per realitzar les diferents simulacions, s'ha mantingut constant la freqüència de la xarxa elèctrica i el valor de la tensió de pic admissible. Només s'ha variat el factor d'amortiment per observar la velocitat en que s'assoleix la freqüència de la xarxa per diferents valors de disseny del controlador PI del PLL.

Tal i com es pot veure a la Figura 8.12, per a ξ baixes la sortida inicialment pateix notables oscil·lacions fins arribar a estabilitzar-se. Aquest fet no ens interessa perquè pot comportar mal funcionaments del convertidor. En canvi, a mesura que augmentem el valor de la ξ , les oscil·lacions inicials van disminuint, però per contra, el valor inicial per a $t = 0$ s comencen a augmentar de forma brusca, fet que tampoc ens interessa. Per això, s'ha agafat un valor que no provoqui moltes oscil·lacions en el tram inicial ni tampoc una ξ que suposi una resposta inicial molt elevat.

8.3.2. Disseny del control del llaç de corrent

Les equacions de tensió en trifàsic poden ser escrites com:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \cdot r + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \cdot l$$

Assumint el valor $v_{zd} = 0$ V imposat durant la modelització del sistema *Phase Locked Loop* dissenyat a l'apartat 8.3.1 i aplicant la transformada de Park s'obté un sistema d'equacions més simple que en trifàsic per una posterior modelització i la realització dels càlculs pertinents.

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

Com es pot comprovar existeix una estreta relació entre els components q i d de les tensions i intensitats. Amb la finalitat de controlar el corrent i_q i i_d que s'injectarà després a la xarxa, es separen i es controlen de forma independent aquests dos components:

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\widehat{v}_{lq} + v_{zq} - l_l w_e i_{ld} \\ -\widehat{v}_{ld} + l_l w_e i_{lq} \end{bmatrix}$$

amb

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

on \widehat{v}_{lq} i \widehat{v}_{ld} són les sortides dels controladors PI del *Current Loop* i v_{lq} i v_{ld} són les tensions aplicades al convertidor VSC.

Aplicant la transformada de Laplace al sistema d'equacions de \widehat{v}_{lq} i \widehat{v}_{ld} s'obté les següents relacions:

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

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

Per tal de dissenyar el controlador que ens permeti regular el corrent que circula per les branques de la part AC del convertidor, es decideix utilitzar la mateixa estructura de controlador PI que l'apartat 8.3.1:

$$G_{ciq}(s) = G_{cid}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

on les constants es calculen mitjançant el mètode del IMC tal i com s'explica en diferents documents trobats sobre el control de VSC [34], [40], [41].

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

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

on la τ és la constant de temps del sistema elèctric. Aquesta constant ha de ser escollida tenint en compte les restriccions físiques del convertidor. Per això, és usual definir aquest valor com un nombre de vegades (10 per exemple) més lent, i com a mínim que el convertidor de commutació de freqüència.

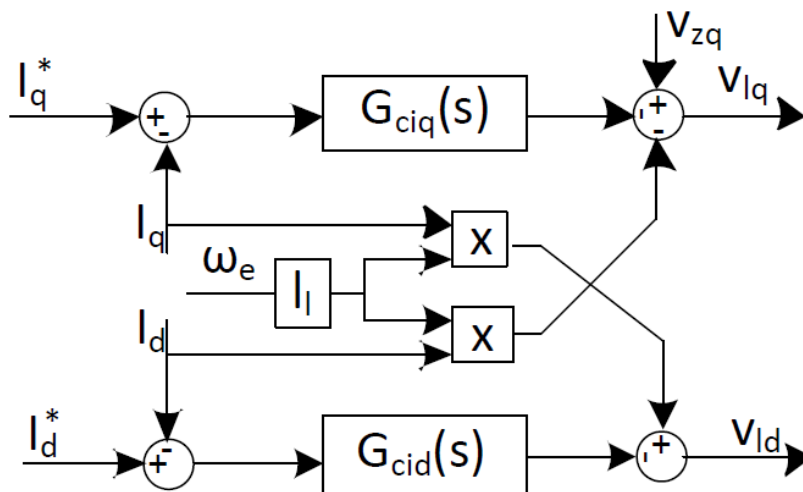


Figura 8.13 Esquema de Current Loop. Font: Agustí Egea Álvarez, Adrià Junyent Ferré i Oriol Gomis Bellmunt [34]

Tenint present la Figura 8.7, es pot anar desglossant la procedència de les entrades del controlador de corrents de la Figura 8.13. La I_q i la I_d són el resultat d'aplicar la transformada de Park a les intensitats trifàsiques I_a, I_b i I_c que circulen en cada branca de l'esquema d'alterna. La velocitat angular ω_e prové de la sortida del *Phase Locked Loop* de l'apartat 8.3.1, abans d'aplicar-li l'integrador. I per últim, la I_q^* i la I_d^* s'obtenen del control del bus de contínua explicat a l'apartat 8.3.3.

Les sortides del *Current Loop* són dos tensions V_{Iq} i V_{Id} que resulten de desacoblar les variables \widehat{v}_{Iq} i \widehat{v}_{Id} . Aquestes tensions són el resultat d'haver realitzat el control sobre la part AC del convertidor i serviran per assegurar el balanç de potència entre la part contínua i la part alterna del convertidor VSC.

A la Figura 8.14 es pot veure com s'ha modelitzat el model teòric de la Figura 8.13.

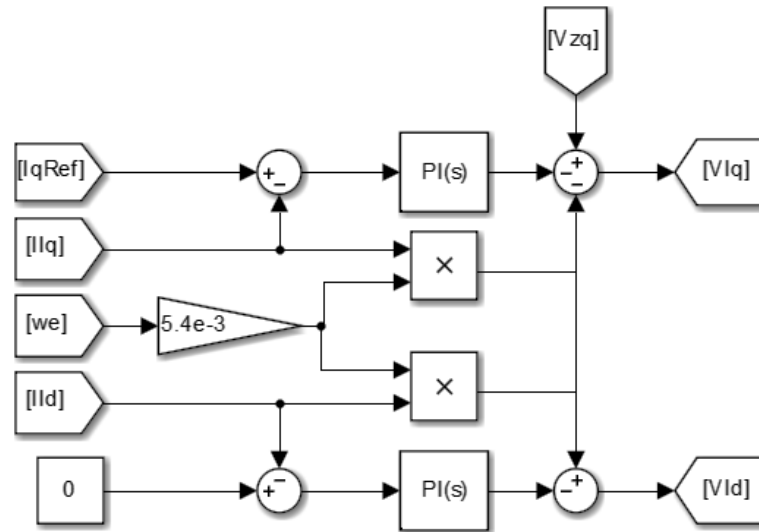


Figura 8.14 Disseny del Current Loop

A les il·lustracions Figura 8.15 i Figura 8.16, es pot veure l'actuació del control PI del laç de corrent en front d'una consigna graó de la variable I_q^* . A partir de l'instant zero, I_q^* adopta un valor de 1000 A i a partir l'instant 0,25 s, passa a valdre 2000 A. Es pot observar com al aplicar aquest canvi, a causa del controlador, la sortida es comporta com un sistema de primer ordre.

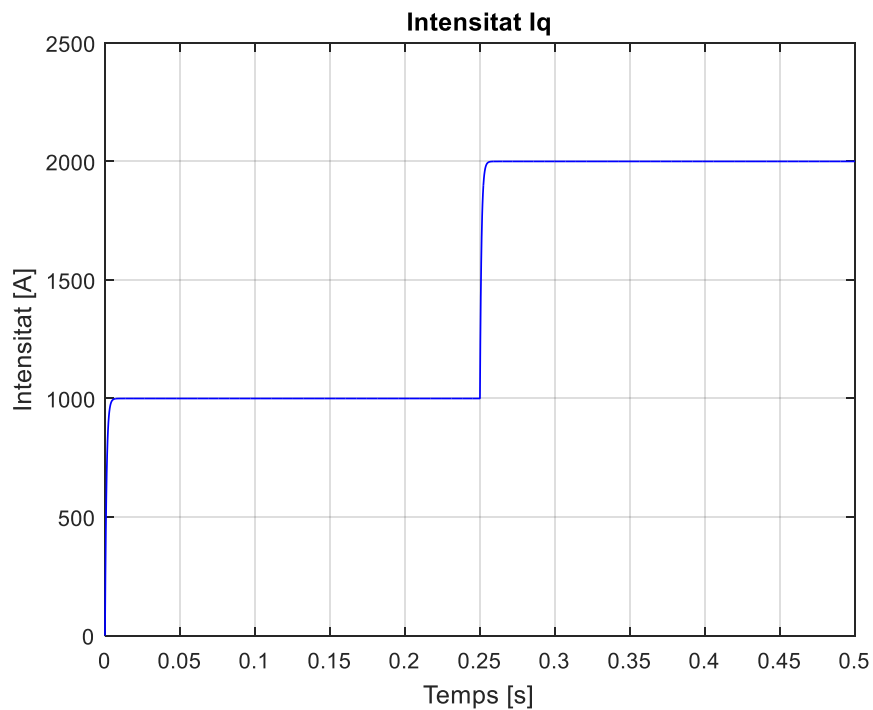


Figura 8.15 Intensitat I_q en front d'una consigna graó

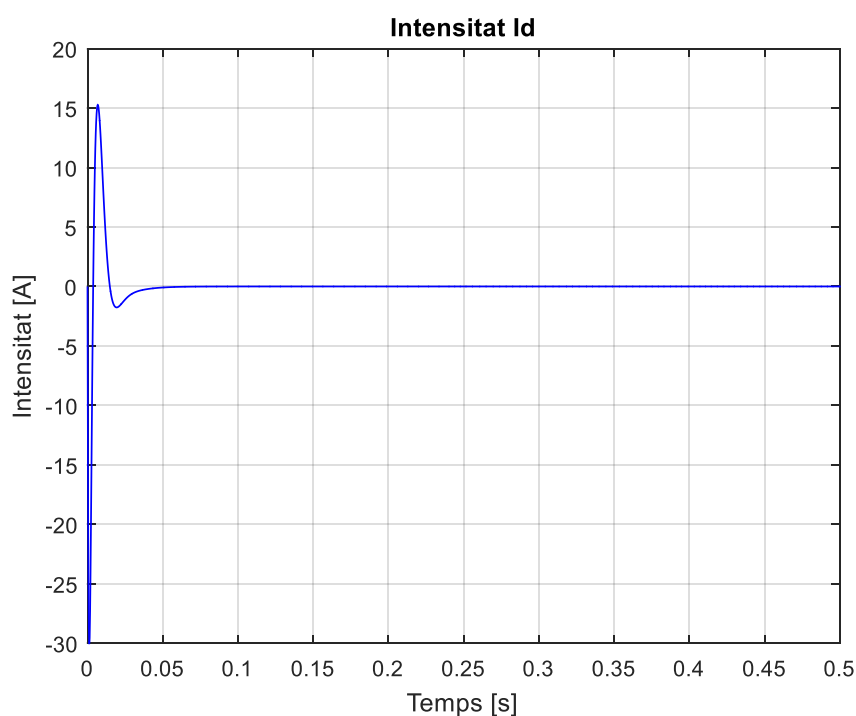


Figura 8.16 Intensitat Id en front d'una consigna graó

8.3.3. Regulador del bus de contínua

El regulador del bus de contínua s'encarrega de controlar la tensió del bus DC assegurant que es compleixi el balanç de potència entre la font de generació i la potència injectada a la xarxa. La sortida d'aquest controlador ens aportarà el corrent de referència I_q^* necessari al *Current Loop* tal i com es mostra en la Figura 8.17.

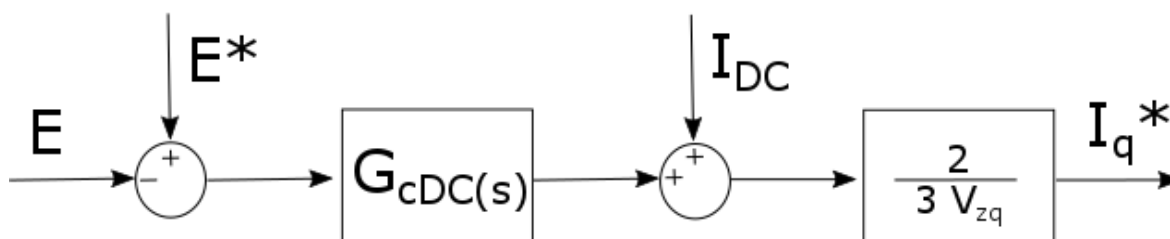


Figura 8.17 Esquema de regulador de bus de contínua amb balanç de potència

Per tal de garantir que tota la potència que genera la font es transmeti a la xarxa elèctrica (negligint les possibles pèrdues) i que es transmeti la corrent desitjada, s'ha de controlar la tensió del bus de contínua, imposant un valor de referència al qual es vol obtenir. Llavors, en

el moment que el bus de contínua rebí més o menys potència farà que la tensió del bus sofreixi una certa variació respecte el valor de referència. Però gràcies al controlador, aquest aconseguirà que la tensió del bus torni al valor de referència.

El control del bus de contínua es pot implementar utilitzant diferents tipus de controladors. Els més utilitzats són el controlador P i el controlador PI.

L'inconvenient del controlador de tipus P, es que pot tenir error en estat estacionari. Aquest fet es pot corregir utilitzant un controlador PI ja que aquest augmenta el tipus del sistema.

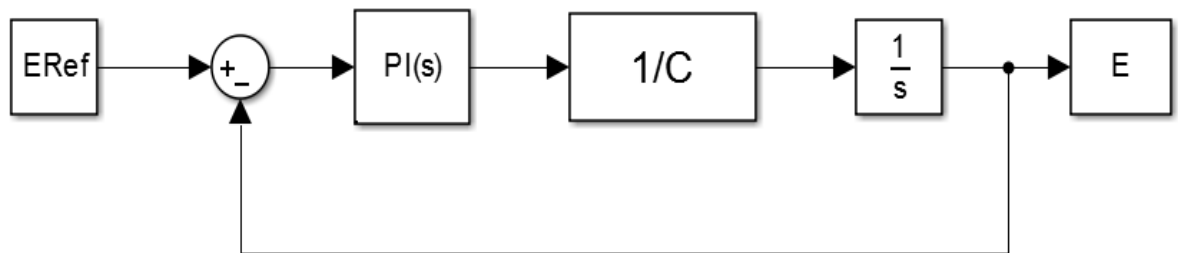


Figura 8.18 Esquema de regulador de bus de contínua sense balanç de potència

El controlador PI que s'utilitza en la Figura 8.18 és el mateix que el dissenyat en anteriors apartats canviant el valor dels seus paràmetres.

$$G_{cDC}(s) = K_{pDC} + \frac{K_{iDC}}{s}$$

Per treure els valors dels paràmetres es parteix de la funció de transferència del sistema que té la següent forma:

$$\frac{E}{E^*} = \frac{GH}{1 + GH} = \frac{\left(K_{pDC} + \frac{K_{iDC}}{s}\right) \cdot \frac{1}{C \cdot s}}{1 + \left(K_{pDC} + \frac{K_{iDC}}{s}\right) \cdot \frac{1}{C \cdot s}}$$

Si s'opera el denominador de la funció de transferència s'obté la següent expressió:

$$1 + GH = s^2 + \frac{K_{pDC}s}{C} + \frac{K_{iDC}}{C}$$

Finalment, si s'igualava l'expressió anterior terme a terme amb l'estructura típica de $1 + GH$ s'obtenen els paràmetres desitjats:

$$s^2 + \frac{K_{pDC}s}{C} + \frac{K_{iDC}}{C} = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2$$

$$K_{pDC} = \frac{2\xi\omega_n}{C}$$

$$K_{iDC} = \omega_n^2 C$$

Per aquest controlador s'adopta un factor d'amortiment de valor 0,5 i una velocitat angular de freqüència 100 Hz.

Com es pot veure en la Figura 8.19 el regulador del bus de contínua compara la diferència de potencial del condensador amb la tensió de referència imposat de valor 800 V. En cas de que difereixin aquests dos valors, actua el controlador PI per tal de corregir l'error.

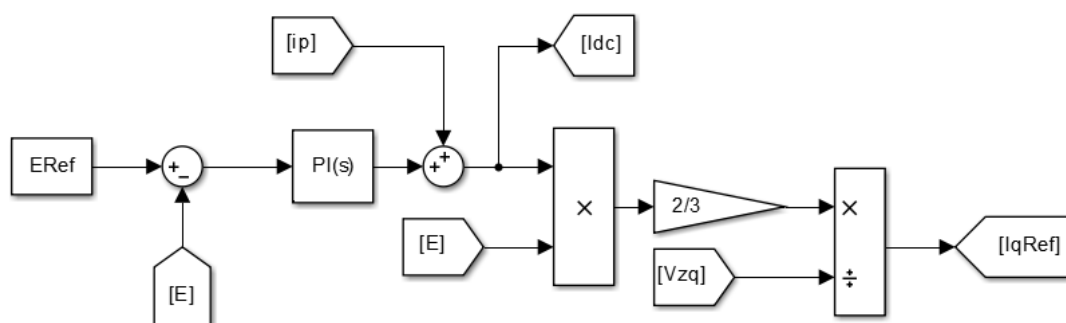


Figura 8.19 Disseny del regulador de tensió de contínua.

De la sortida del PI s'obté la intensitat I_{DC} que s'injecta a la Figura 8.22 i aplicant la igualtat de potències entre la part contínua i la part alterna s'obté el corrent de referència i_q^* .

$$P_{DC} = E \cdot I_{DC}$$

$$P_{DC} = P_{AC}$$

$$P_{AC} = \frac{3}{2} \cdot v_{zq} \cdot i_q^*$$

A la Figura 8.20 s'observa com varia la tensió del bus de contínua enfront d'una consigna rampa de la variable E^* . A l'instant 0,25 s, aquesta variable passa de valer 800 V a valer 900 V. El regulador del bus de contínua, actua de tal manera que aconseguix estabilitzar el sistema davant d'aquest canvi.

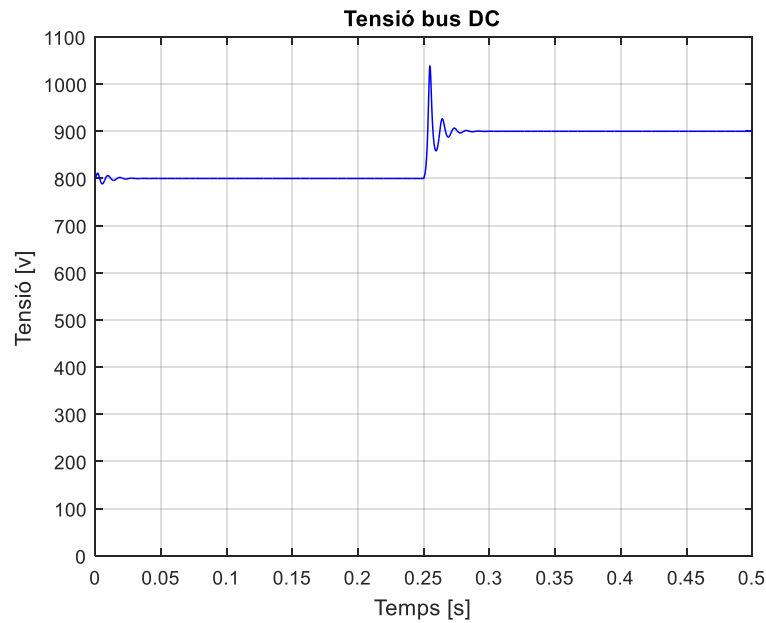


Figura 8.20 Variació de la tensió del bus de contínua enfront d'una consigna graó

8.4. Convertidor VSC costat màquina

El circuit de la part de contínua està composta per dos fonts de corrent i un condensador en paral·lel entre elles. Una font de corrent representa la generació a la qual està connectada la part de contínua mentre que l'altre font de corrent fa d'enllaç amb la part d'alterna. El condensador, de valor 1 mF, situat enmig de les dues fonts de corrent s'encarrega de mantenir constant la diferencia de potencial.

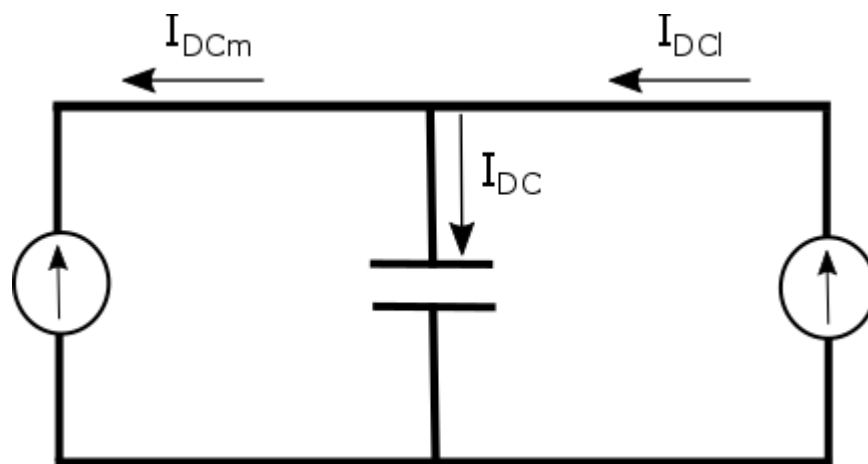


Figura 8.21 Esquema del circuit de la part DC

En la Figura 8.21 es pot veure l'esquema del circuit de la part DC del convertidor mentre que en la Figura 8.22 es pot veure el disseny en blocs d'aquest mateix circuit.

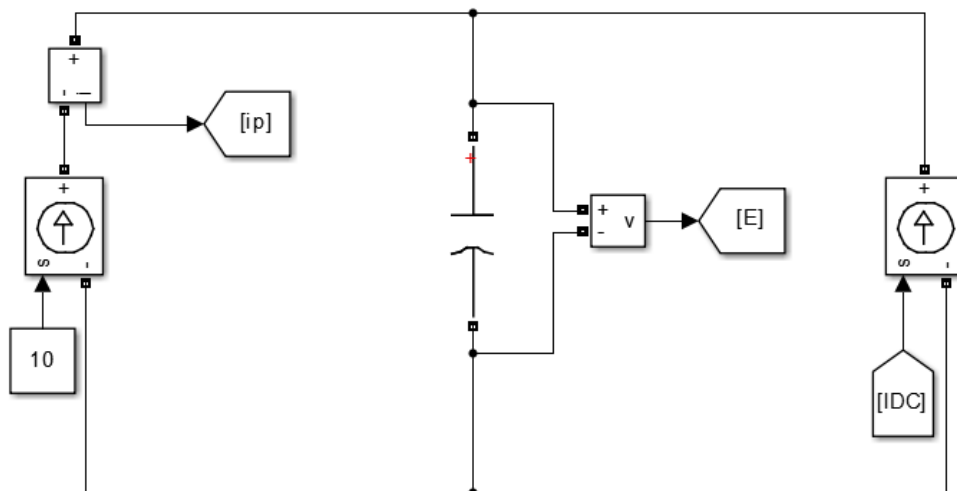


Figura 8.22 Disseny del circuit de la part DC

Tot i que amb el disseny de la Figura 8.19 ja es tindria suficient per controlar el bus de contínua, per assegurar que el balanç de potències es compleixi de forma efectiva s'injecta a la font de corrent I_{DC} la intensitat resultant del balanç de potència provinent de la part alterna esquematitzat en la Figura 8.23.

$$P_{AC} = \frac{3}{2} \cdot (v_{lq} \cdot I_{lq} + v_{ld} \cdot I_{ld})$$

$$P_{AC} = P_{DC}$$

$$P_{DC} = E \cdot I_{DC}$$

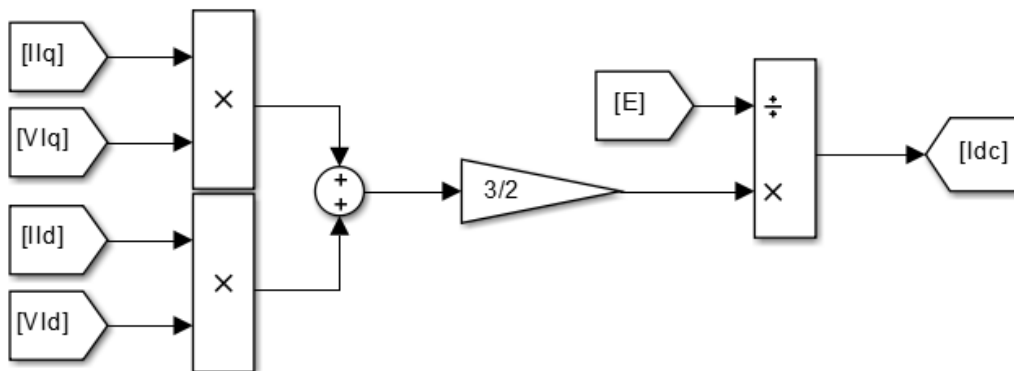


Figura 8.23 Disseny del balanç de potències

A continuació es pot observar a la Figura 8.24 com es manté constant la tensió del bus de contínua en front d'una consigna graó de la intensitat I_{DCm} de la Figura 8.22. En aquest cas, a l' instant 0,25 s, la intensitat de valor 10 A passa a valdre 20 A.

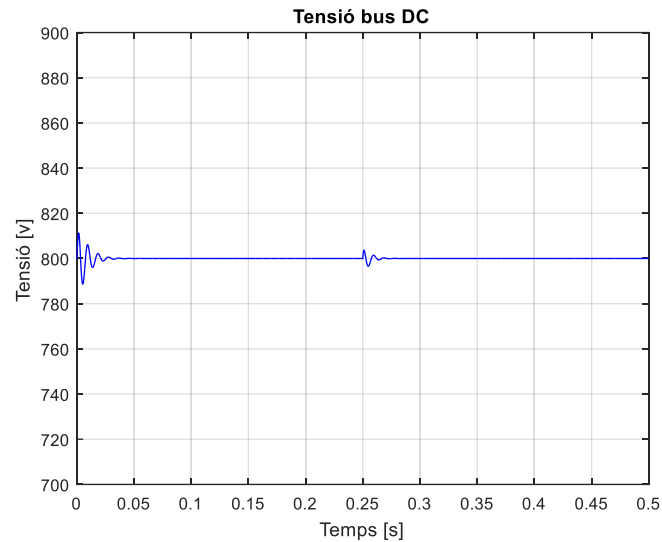


Figura 8.24 Resposta de la tensió del bus de contínua en front d'una consigna graó

9. Simulacions i resultats

A continuació es presenten els resultats de les simulacions en tres escenaris diferents unificant tots els elements que s'han explicat detalladament al llarg del projecte. El primer escenari a considerar és el més simple, compost pel sistema aerogenerador (turbina, transmissió i generador d'inducció) i el *Back to Back*, sense cap control de velocitat. Pel segon escenari es consideren els elements anteriors i s'afegeix el control escalar. Per últim, es substitueix el control escalar per un control vectorial.

Per els dos primers casos, es considera un perfil de vents variable representat en la Figura 6.4. Per el tercer cas, es considera el perfil de velocitats de la Figura 9.12 ja que és més adequat per treure-li el màxim profit al control vectorial.

9.1. Aerogenerador i *Back to Back*

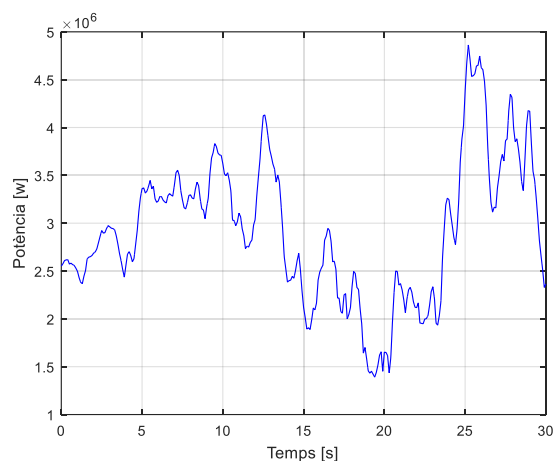


Figura 9.1 Potència de la turbina

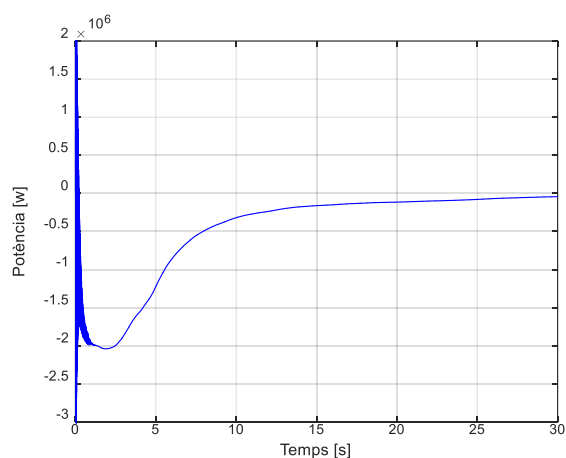


Figura 9.2 Potència elèctrica generada

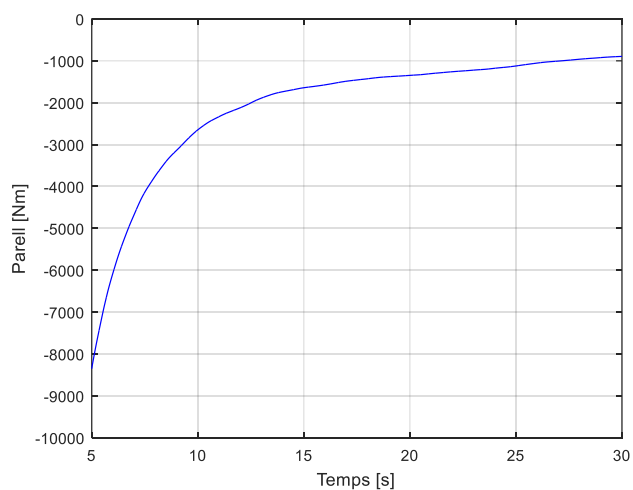


Figura 9.3 Parell electromagnètic

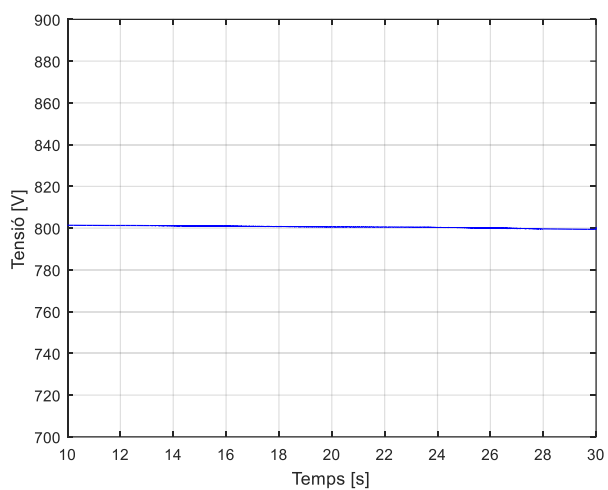


Figura 9.4 Tensió del bus de contínua

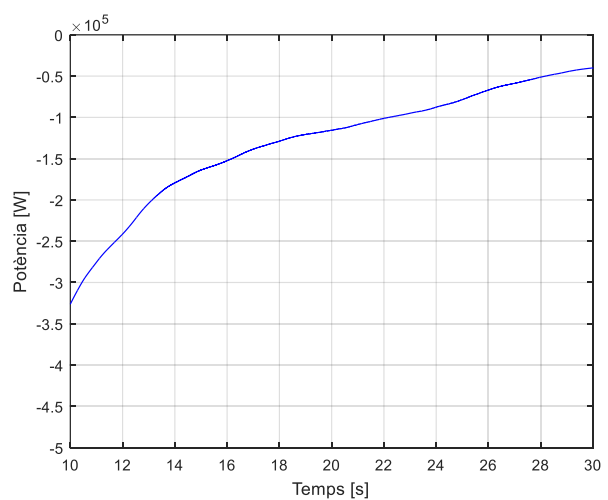


Figura 9.5 Potència activa de la part AC

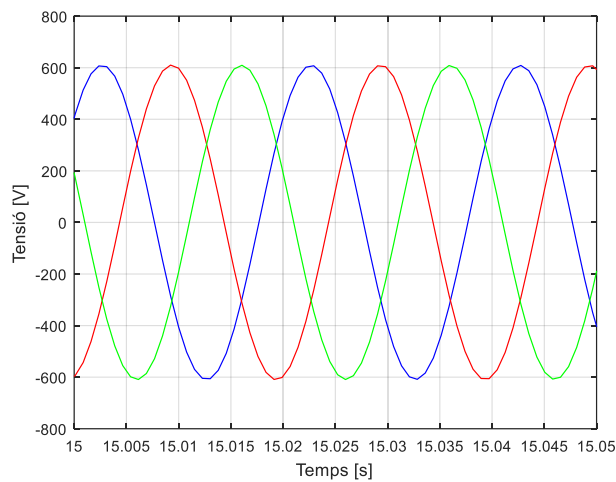


Figura 9.6 Tensions V_{a1} , V_{b1} i V_{c1}

S'aprecien diferències entre les potències de les gràfiques Figura 9.1 i Figura 9.2. Les variacions entre les dues respostes són degudes a la velocitat de gir del rotor. Al no existir un control de velocitat, la màquina girarà sempre a la freqüència nominal, diferint amb les freqüències provinents de la distribució de vent consignada que són sempre superiors.

A la Figura 9.4 es pot veure com la tensió del bus de contínua roman constant davant de les variacions del vent.

9.2. Aerogenerador, control escalar i *Back to Back*

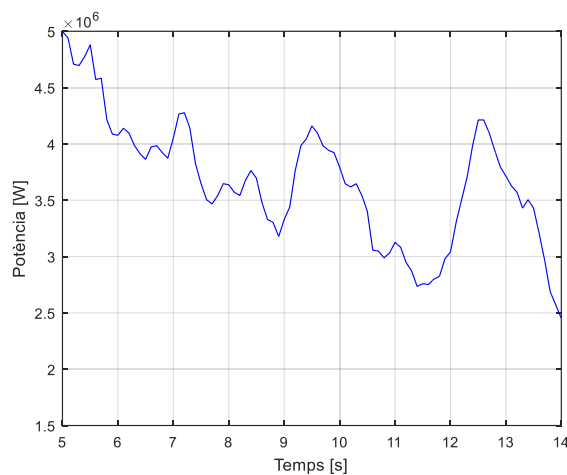


Figura 9.7 Potència de la turbina

Les discrepàncies entre la Figura 9.7 i Figura 9.8 són degudes a la inicialització necessària del parell amb una consigna rampa, a fi de poder estabilitzar el sistema progressivament. Per això, es pot veure que fins el segon 14 no arriben a coincidir els valors de potència.

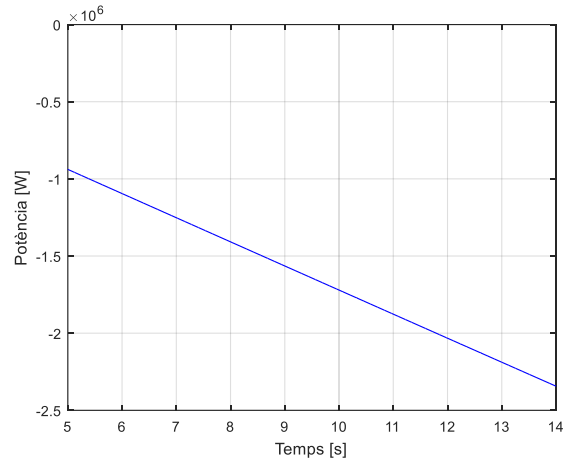


Figura 9.8 Potència elèctrica generada

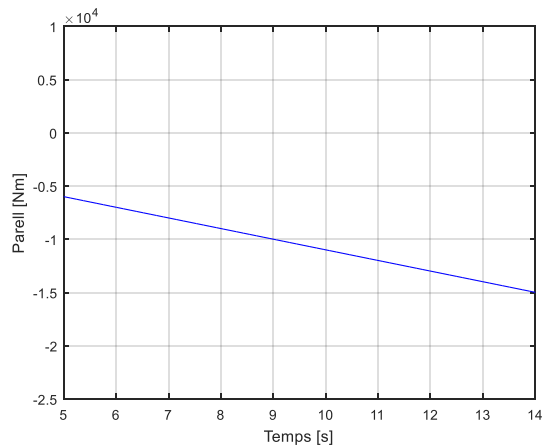


Figura 9.9 Parell electromagnètic

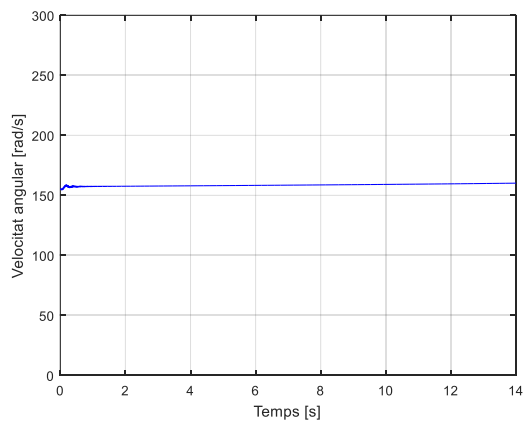


Figura 9.10 Velocitat angular del rotor

Per les mateixes causes que el primer escenari, davant d'un perfil de velocitats amb un valor mig superior a la velocitat nominal, per no entrar en la zona de debilitament de camp, es satura a la freqüència nominal (veure Figura 9.10).

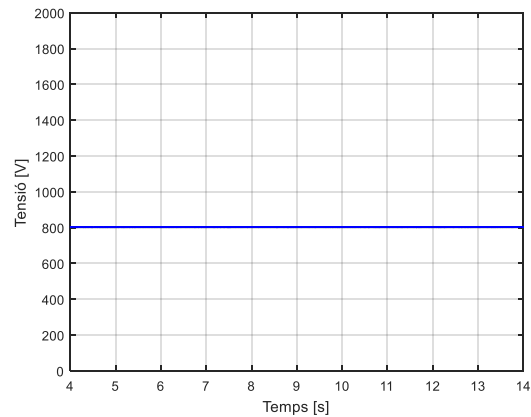


Figura 9.11 Tensió del bus de contínua

A la Figura 9.11 es pot veure com la tensió del bus de contínua roman constant davant de les variacions del vent.

9.3. Aerogenerador, control vectorial i Back to Back

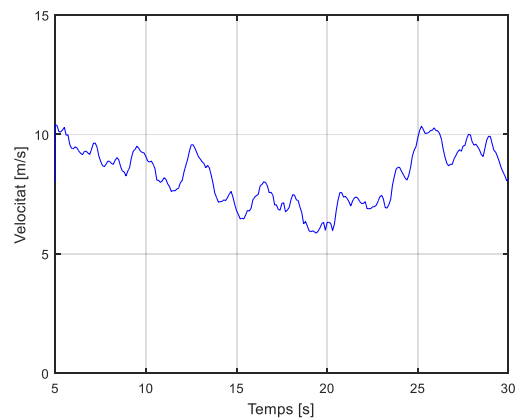
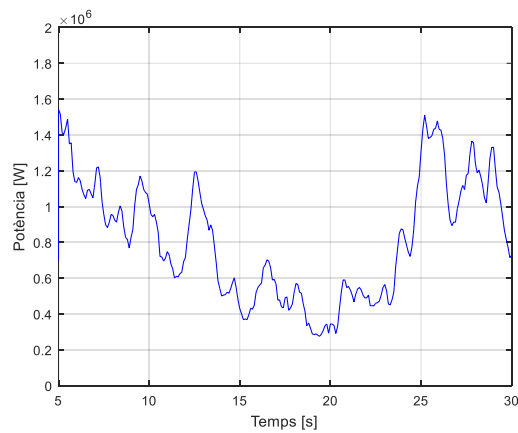
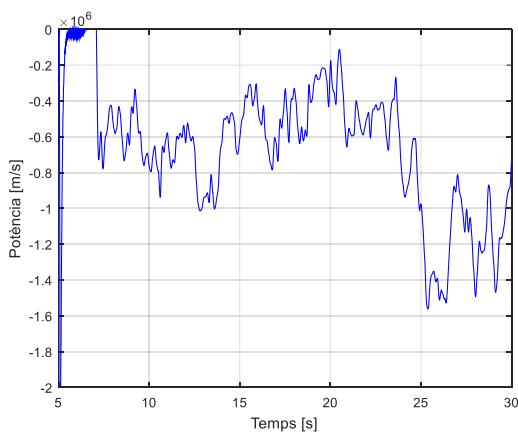
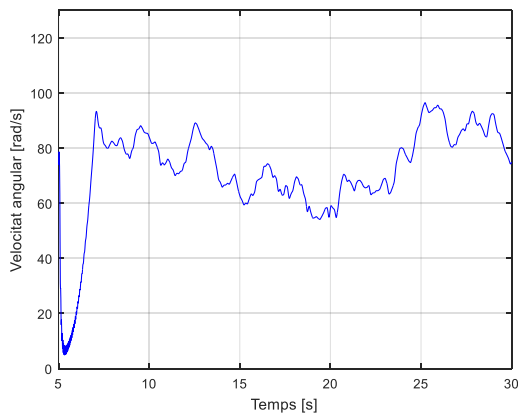


Figura 9.12 Perfil de velocitats variable del vent

Com s'ha comentat a l'inici de l'apartat, s'ha modificat el perfil de vent per treure el màxim profit de control vectorial i no entrar en la zona de debilitament de camp (veure Figura 9.12).

**Figura 9.13 Potència turbina****Figura 9.14 Potència elèctrica generada**

En la Figura 9.13 i Figura 9.14 es pot observar la simetria de les potències, obtenint potències negatives quan la màquina d'inducció genera energia, d'acord amb el criteri de signe establert. En la Figura 9.15 es pot observar la correlació entre la velocitat del vent i la velocitat angular del rotor, una disminució de la velocitat del vent es tradueix amb una menor velocitat de gir del rotor.

**Figura 9.15 Velocitat angular del rotor**

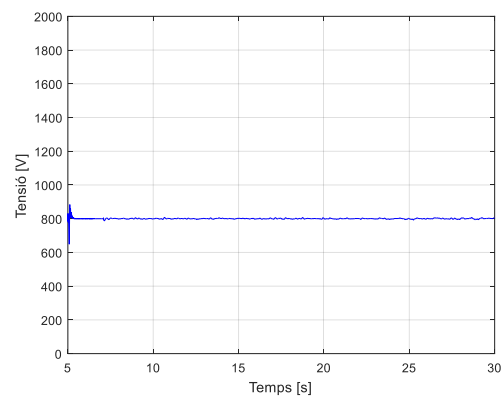


Figura 9.16 Tensió del bus de contínua

A la Figura 9.16 es pot veure com la tensió del bus de contínua roman constant davant de les variacions del vent.

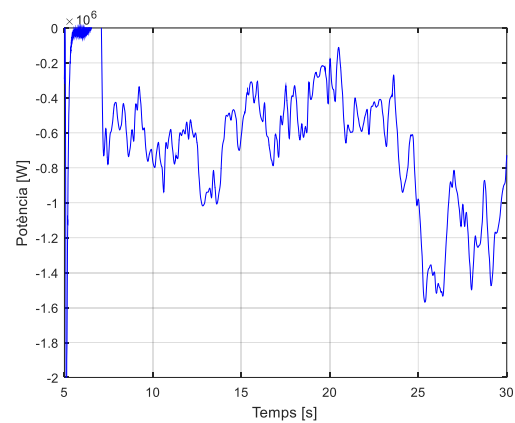


Figura 9.17 Potència activa de la part AC

A la Figura 9.17 es pot observar com la potència generada es transmet completament a la xarxa, menystenint pèrdues. Les tensions de la Figura 9.18 estan mesurades a la part d'alterna del costat xarxa.

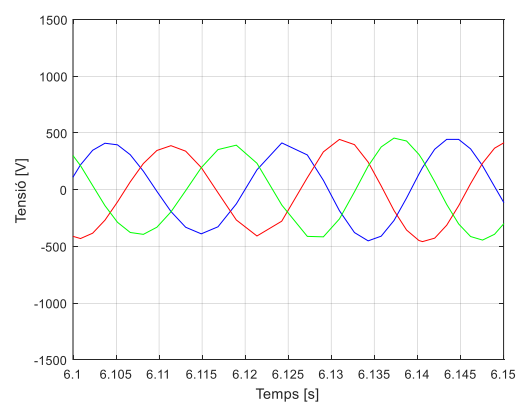


Figura 9.18 Tensions V_a , V_b i V_c

Conclusions

Aquest projecte presenta dos controls diferents de velocitat per governar la màquina d'inducció gàbia d'esquirol connectada a la xarxa elèctrica mitjançant un convertidor *Back to Back*, per aconseguir independitzar el costat generador del costat xarxa. S'ha explicat detalladament els controls de velocitat utilitzats en les simulacions. El control escalar permet mantenir constant el flux magnètic augmentant el voltatge a mesura que augmenta la freqüència. Però l'inconvenient del control escalar és el poc control sobre el flux que ofereix. Per tant s'ha optat per dissenyar el control vectorial perquè garanteix una gran precisió en la regulació de la velocitat, una ràpida resposta dinàmica, i unes operacions per sobre de la velocitat normal de treball. L'estratègia de control s'ha avaluat satisfactòriament en les simulacions de Matlab/Simulink.

Agraïments

Agraïm el suport i l'orientació que ens ha donat el Ricard Ferrer, de qui hem après molt en el decurs d'aquest projecte.

Agraïm també a l'Oriol Gomis per haver-nos donat l'oportunitat de poder realitzar el projecte amb el Departament d'Enginyeria Elèctrica.

Agraïm a CITCEA per proporcionar-nos un espai de treball on hem pogut realitzar les simulacions pertinents.

Finalment, agraïm també a les nostres famílies pel seu suport incondicional i per haver-nos encoratjat a arribar fins el final dels nostres estudis.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] LAUHA FRIED. *China Wind Power Blows Past EU*. Brusseles, 2016. [<http://myemail.constantcontact.com/China-Wind-Power-Blows-Past-EU---Global-Wind-Power-Statistics-release.html?soid=1102949362881&aid=x4fuGfJjtXU>, 30 d'abril de 2016].
- [2] LAUHA FRIED. *Global Wind Statistics 2015*. [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-PRstats-2015_LR.pdf, 30 d'abril de 2016]
- [3] ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA. *Potencia instalada*. [<http://www.aeeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/potencia-instalada/>, 30 d'abril de 2016]
- [4] ACCIONA. *Aerogeneradores*. [<http://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/>, 30 d'abril de 2016]
- [5] ARIADNA CARREÑO. *Energía eólica*. [<https://ariadnaenergiaeolica.wordpress.com/que-es/1-5-aerogeneradores/1-7-parts-dun-aerogenerador-deix-horitzontal/>, 30 d'abril de 2016]
- [6] EOLICC. *Els aerogeneradors*. [<https://eolicc.wordpress.com/els-aerogeneradors/>, 30 d'abril de 2016]
- [7] OPEX ENERGY. *Eólica*. [http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html, 30 d'abril de 2016]
- [8] ECOTIMEBLOG. *Diferentes tipos de sistemas eólicos*. [<http://ecotimeblog.com/sistemaseolicos.html>, 30 d'abril de 2016]
- [9] DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. *Aerogeneradores: ¿con rotor a barlovento o a sotavento?* [http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/design/updown.htm, 30 d'abril de 2016]
- [10] CONRADO MORENO FIGUEREDO. *La veleta en los molinos*. [<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia58/HTML/articulo02.htm>, 30 d'abril de 2016]

- [11] DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. *Aerogeneradores: ¿Cuántas palas?*. [http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/design/concepts.htm, 30 d'abril de 2016]
- [12] MARMAN. *Conceptos básicos*. [http://usuarios.arnet.com.ar/marman/marman/proyecto/conceptos_basicos.htm, 30 d'abril de 2016]
- [13] DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. *Control de potencia en aerogeneradores*. [http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/powerreg.htm, 30 d'abril de 2016]
- [14] LEANDRO AGUAYO CALDERÓN. *Propuesta de optimización estructural de torre eólica metálica sometida a cargas estáticas*. Pàgina 19 [http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/745/1/T-SENESCYT-0330.pdf, 30 d'abril de 2016]
- [15] ABB. *Cuaderno de aplicaciones técnicas n.o 12. Plantas eólicas*. Pàgina 16,17. [http://www.edu.xunta.es/centros/cifpcoroso/gl/system/files/Cuaderno+Tecnico_num+12_Plantas+eolicas.pdf, 30 d'abril de 2016]
- [16] TESICNOR. *Descenso de emergencia en aerogeneradores offshore: ¿Aterrizamos o amerizamos?* [http://prevencioneolico.tesicnor.com/descenso-de-emergencia-en-aerogeneradores-offshore-aterrizamos-o-amerizamos/, 30 d'abril de 2016]
- [17] DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. *Generadores asíncronos (o de inducción)*. [http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/async.htm, 3 de maig de 2016]
- [18] OPEX ENERGY. *Generadores Síncronos y Asíncronos*. [http://opex-energy.com/eolica/generador_sincrono_y_asincrono.html, 3 de maig de 2016]
- [19] TERVERAS, *Motor Asíncrono*. [http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono1.htm, 3 de maig de 2016]
- [20] FELIPE JEREZ. *Estado del arte de convertidores de potencia back to back basados en componentes activos de carburo de silicio*. [http://www.cacsem.org/wp-content/blogs.dir/15/files/2013/06/Informe-E1.pdf, 3 de maig de 2016]
- [21] FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES. *Función distribución de Weibull*. [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/viento/datos/estadistica.html]
- [22] FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES. *Función distribución de Rayleigh*. [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/viento/datos/estadistica.html]

- [23] SGUR ENERGY. *Wind shear and its effects on wind turbine noise assessment*. [<http://www.sgurrenergy.com/wp-content/uploads/2013/03/Wind-shear-report.pdf>]
- [24] DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. *La desviación del viento*. [<http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/tube.htm>]
- [25] BETZ, ALBERT. *Wind-Energie (1926)*. Alemania. La ley de Betz. [<http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/betz.htm>]
- [26] Hau, Erich. 2006. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*.
- [27] JANETH ALCALÁ, SAIDA CHARRE, MIGUEL DURÁN, JORGE GUDIÑO. *Análisis del Convertidor CA/CD/CA (Back to Back) para la Gestión del Flujo de Potencia* [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642014000600014&script=sci_arttext, 2 de maig de 2016]
- [28] UNIVERSITAT DE CANTABRIA. MARIO MAÑANA CANTELI. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA. *Regulación, control y protección de máquinas eléctricas*. [<http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/maquinas-electricas/materiales/convertidores.pdf>, 2 de maig de 2016]
- [29] MOHAN, N., UNDELAND, T., ROBBINS, W.P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. Wiley, Chichester (1995)
- [30] BOSE, B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs (2001)
- [31] KAZMIERKOWSKI, M.P., KRISHNAN, R., BLAABJERG, F. *Control in power electronics*. Elsevier, Amsterdam (2002)
- [32] Clarke, E.: *Circuit Analysis of AC Power*. John Wiley and Sons, Chichester (1941)
- [33] Park, R.H.: Two-reaction theory of synchronous machines. *AIEE Transactions* 48, 716–730 (1929)
- [34] AGUSTÍ EGEA-ALVAREZ, ADRIÀ JUNYENT-FERRÉ, AND ORIOL GOMIS-BELLMUNT. *Active and Reactive Power Control of Grid Connected Distributed Generation Systems*. Barcelona, 2011.
- [35] E.H. Camm, M. R. Behnke, O. Bolado, M. Bollen, M. Bradt, C. Brooks, W. Dilling, M. Edds, W. J. Hejdak, D. Houseman, S. Klein, F. Li, J. Li, P. Maibach, T. Nicolai, J. Patiño, S. V. Pasupulati, N. Samaan, S. Saylor, T. Siebert, T. Smith, M. Starke, R. Walling. *Characteristics of Wind Turbine Generators for Wind Power Plants*. Tennessee, 2009.

- [36] ALTERNATIVE ENERGY TUTORIALS, Induction Generator [<http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/induction-generator.html>, 6 de juny de 2016]
- [37] ALI M. ELTAMALY, A. I. ALOLAH AND HASSAN M. FARH, Maximum Power Extraction from Utility-Interfaced Wind Turbines [<http://www.intechopen.com/books/new-developments-in-renewable-energy/maximum-power-extraction-from-utility-interfaced-wind-turbines>, 8 de juny de 2016]
- [38] PAVEL ZUNIGA-HARO I JUAN MANUEL RAMIREZ. Modeling of Multi-Pulse VSC Based SSSC and STATCOM [http://file.scirp.org/Html/5-9800199_1541.htm, 8 de juny de 2016]
- [39] BILAL AKIN AND NISHANT GARG. Scalar (V/f) Control of 3-Phase Induction Motors. [<http://www.ti.com/lit/an/sprabq8/sprabq8.pdf>, 16 de juny de 2016]
- [40] JOSÉ LUIS DOMÍNGUEZ GARCÍA. *Modeling and control of Squirrel Cage Induction Generator with Full Power Converter applied to windmills*. Oulun, 2009.
- [41] LLUC ULLDEMOLINS I NOLLA. *Disseny del control d'un aerogenerador*. Barcelona, 2014.

Annex

Transformada de Park

La transformació de Park converteix les components 'abc' del sistema trifàsic a un altre sistema de referència 'dq0' (veure Figura 0.1). L'objectiu de la transformació consisteix en convertir els valors trifàsics 'abc', que són variables sinusoidals en el temps, a valors constants 'dq0' en règim permanent. El vector amb els components del nou sistema de referència s'obté multiplicant el vector de coordenades trifàsiques per la matriu de transformació,

$$[x_{dq0}] = [T_{dq0}] \cdot [x_{abc}]$$

i la seva inversa:

$$[x_{abc}] = [T_{dq0}]^{-1} \cdot [x_{dq0}]$$

L'expressió de la matriu de transformació $[T]$ [33] és la següent:

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

i la seva inversa [33]:

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

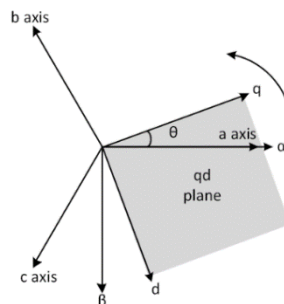


Figura 0.1 Representació del pla qd0

Transformada de Clarke

La transformació de Clarke és un cas particular de la transformada de Park (amb angle 0) i serveix per descompondre/projectar un vector en un sistema de referència ortogonal i estacionari (immòbils) anomenat $\alpha\beta$ en sistemes simètrics i equilibrats. Aquest vector realitza una trajectòria circular respecte l'origen de coordenades del sistema de referència $\alpha\beta$ (veure Figura 0.2). El principal avantatge respecte el sistema de referència trifàsic és la reducció del nombre de variables del problema, simplificant-se tant els models com els càlculs associats.

La transformada de Clarke es defineix com:

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

i la seva inversa:

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

L'expressió de la matriu de transformació $[T]$ [32] és la següent:

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

i la seva inversa [32]:

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

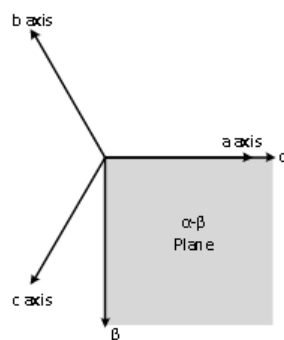


Figura 0.2 Representació del pla $\alpha\beta$