

Resum

El present projecte s'emmarca dins el camp de les energies renovables (particularment l'eòlica), la tecnologia elèctrica i l'electrònica de potència. L'elevada penetració de l'energia eòlica i la proliferació de nous parcs eòlics, constituint una de les poques alternatives viables actualment a l'ús dels combustibles fòssils, obliga a plantejar noves mesures per al correcte funcionament i l'estabilitat de la xarxa elèctrica. Específicament, el projecte *Aplicació de dispositius de transmissió AC flexibles per al suport a la xarxa elèctrica* es centra en l'aplicació d'aquests dispositius de nova tecnologia a la xarxa i l'anàlisi de la seva capacitat de suport, tant en règims nominals com en casos de contingència, en una xarxa amb un gran percentatge de generació eòlica amb generadors d'inducció de gàbia d'esquirol.

Per a l'elaboració del present projecte s'ha realitzat primer un estudi de les tecnologies d'aerogenerador i un anàlisi de les problemàtiques que provoquen les perturbacions elèctriques. A continuació, al tractar-se de tecnologies recents, s'ha generat un estudi dels dispositius de transmissió AC flexibles (FACTS). S'han analitzat les seves característiques i com es poden aplicar a una xarxa per tal de donar-li suport. Per tal de poder comprovar aquesta capacitat, s'ha dissenyat una xarxa de prova pròpia en la qual es pogués observar clarament quins en són els efectes. S'ha simulat una sèrie de casos que podrien donar-se a la realitat i s'ha analitzat els resultats obtinguts i els problemes apareguts en cada cas. El següent pas ha estat donar el suport necessari per tal d'evitar-los. Primer, amb l'aplicació d'un STATCOM, un dispositiu FACTS paral·lel que, connectat a la sortida del parc, permet evitar que es desconnecti. S'ha tornat a analitzar els casos i s'ha pogut comprovar com aquest dispositiu, degudament configurat, és capaç de donar suport a la xarxa i al parc, evitant-ne la desconexió. No obstant, han aparegut nous problemes, derivats de la pèrdua de línies en casos de contingència, que involucren sobrecàrregues en altres línies. Per a solucionar-ho s'ha aplicat un SSSC, que és capaç de variar el flux de potència a la branca on s'ha instal·lat i que, amb els valors adequats, pot proporcionar el suport necessari per tal de mitigar els problemes de sobrecàrrega, sempre que caiguin dins el seu rang de funcionament.

S'han obtingut els resultats esperats sobre el suport que aquests dispositius poden donar a la xarxa. Per una banda, l'STATCOM és capaç d'actuar de forma ràpida i efectiva sobre la sortida del parc eòlic, proporcionant un suport a la tensió i al consum de potència reactiva que evita que el parc es desconnecti davant les contingències tractades. Per altra banda, l'aplicació de l'SSSC permet aconseguir un control addicional sobre la xarxa, variant el flux de potència per tal d'evitar sobrecàrregues en algunes línies que podrien ser tant o més perilloses que la pròpia contingència que les provoca.

Finalment, els resultats posen de manifest que l'aplicació de dispositius de transmissió AC flexibles permeten donar el suport necessari a la xarxa elèctrica i que, a més a més, són una interessant possibilitat a l'hora de donar major fiabilitat als parcs amb generadors d'inducció de gàbia d'esquirol ja existents. Davant d'una encara major penetració eòlica podrien convertir-se en elements absolutament indispensables.





Índex

Resum	1
Índex	3
Índex de figures	7
Prefaci	11
Introducció	13
Objectius	13
Abast	13
Referències	14
1 Integració de l'energia eòlica a la xarxa elèctrica	15
1.1 L'energia eòlica	15
1.2 Tecnologies d'aerogeneradors	16
1.2.1 Aerogeneradors de velocitat fixa	18
1.2.2 Aerogeneradors d'inducció doblement alimentats	19
1.2.3 Aerogeneradors de màquina síncrona amb convertidor	19
1.3 Integració a la xarxa	19
1.3.1 Integració de generació eòlica a la xarxa	20
1.3.2 Problemàtiques de la integració de generació eòlica a la xarxa	22
1.3.3 Impacte de la generació eòlica de velocitat fixa en l'estabilitat de la xarxa	23
1.3.4 Normativa	25
2 FACTS: dispositius de transmissió AC flexibles	27
2.1 Definició	27
2.1.1 Aplicacions	27
2.1.2 Classificació	28



2.2	Fonaments teòrics	29
2.2.1	Cas base	29
2.2.2	Fonaments de compensació paral·lel	30
2.2.3	Fonaments de compensació serie	31
2.3	STATCOM	32
2.3.1	Esquema de control	36
2.4	SSSC	37
2.4.1	Esquema de control	39
3	Cas d'estudi	41
3.1	Funcionament a velocitat nominal del vent	43
3.2	Resposta davant un petit increment de la velocitat del vent	44
3.3	Resposta davant un gran increment de la velocitat del vent	46
3.4	Resposta davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)	47
3.5	Resposta davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)	51
4	Aplicació d'un STATCOM a la xarxa	55
4.1	Funcionament a velocitat del vent nominal	56
4.1.1	Aportació de l'STATCOM	56
4.2	Resposta davant un petit increment de la velocitat del vent	57
4.2.1	Aportació de l'STATCOM	59
4.3	Resposta davant un gran increment de la velocitat del vent	60
4.3.1	Aportació de l'STATCOM	62
4.4	Resposta davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)	63
4.4.1	Aportació de l'STATCOM	66
4.5	Resposta davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)	67
4.5.1	Aportació de l'STATCOM	70
5	Aplicació d'un STATCOM i un SSSC a la xarxa	71
5.1	Resposta davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)	73
5.1.1	Aportació de l'SSSC	76
5.2	Resposta davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)	76
5.2.1	Aportació de l'SSSC	79



Aplicació de dispositius de transmissió AC flexibles per al suport a la xarxa elèctrica	5
6 Estratègia de control	81
6.1 Consideracions generals	81
6.2 Càlcul del flux per a mínimes pèrdues en el cas d'estudi	82
6.3 Disseny del control	82
6.4 Implementació del control	84
6.5 Verificació de la resposta en el cas nominal	85
6.6 Verificació de la resposta davant de variacions en el cas d'estudi	85
6.6.1 Canvi en la generació	86
6.6.2 Canvi en les càrregues	87
6.7 Cas de contingència	89
7 Pressupost	91
7.1 Introducció	91
7.2 Pressupost per a l'anàlisi de l'aplicació de dispositius de transmissió AC flexibles per al suport a la xarxa elèctrica	91
7.2.1 Hardware	91
7.2.2 Software	92
7.2.3 Mà d'obra	92
7.2.4 Agregat	92
8 Impacte Mediambiental	93
Conclusions	95
Agraïments	97
Bibliografia	99
A Transformació dq0	103
A.1 Transformada dq0	103
A.2 Transformada de Park	104
B Sistema p.u.	105
B.1 Magnituds elèctriques	105
B.1.1 Sistema monofàsic	105
B.1.2 Sistema trifàsic	106
C Llei de Betz	107





Índex de figures

1.1	Secció d'un aerogenerador típic	16
1.2	Eficiència de conversió en un aerogenerador d'1 MW de potència nominal . . .	17
1.3	Procés de conversió de l'energia del vent en energia elèctrica utilitzant un aerogenerador	18
1.4	Aerogenerador de velocitat fixa	18
1.5	Aerogenerador de velocitat variable DFIG	19
1.6	Aerogenerador de velocitat variable de màquina síncrona i convertidor de plena potència	20
1.7	Sistema de potència d'exemple	21
1.8	Relació entre la potència activa i reactiva i la velocitat del rotor en un generador de gàbia d'esquirol, amb la tensió als terminals, U_T , com a paràmetre. . .	23
1.9	Normativa per a la recuperació de la tensió després d'una falta [1]	26
1.10	Normativa dels requisits de potència reactiva davant una falta [1]	26
2.1	Classificació general dels dispositius de control de flux de potència	28
2.2	Transmissió en una línia sense pèrdues	29
2.3	Model de dispositiu connectat en paral·lel	31
2.4	Model de dispositiu connectat en serie	32
2.5	Estructura constructiva d'un STATCOM i característica tensió/corrent en regulació de tensió	33
2.6	Esquema d'operació de l'STATCOM	34
2.7	Model de funcionament a nivell de xarxa d'un STATCOM i diagrama fasorial . . .	35
2.8	Esquema de control d'un STATCOM	37
2.9	Estructura constructiva d'un Compensador Serie Estàtic Síncron (SSSC)	38
2.10	Esquema d'un Compensador Serie Estàtic Síncron (SSSC)	38
2.11	Esquema de control d'un SSSC	40
3.1	Xarxa d'estudi	41
3.2	Geografia i distribució de la xarxa d'estudi	42



3.3	Flux de potència nominal al cas d'estudi	43
3.4	Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant un petit increment de la velocitat del vent . . .	44
3.5	Evolució de velocitat del rotor (a), velocitat del vent (b) i angle de pitch (c) a ambdós sub-parcs davant un petit increment de la velocitat del vent	45
3.6	Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant un gran increment de la velocitat del vent . . .	46
3.7	Evolució de velocitat del rotor (a), velocitat del vent (b) i angle de pitch (c) a ambdós sub-parcs davant un gran increment de la velocitat del vent	47
3.8	Flux de potència després de la pèrdua de la línia 4-5 (A)	48
3.9	Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)	49
3.10	Evolució de la transmissió de potència a la línia 4-5 (A) (a), a la línia 4-5 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)	50
3.11	Evolució de la circulació d'intensitat a la línia de connexió del parc davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)	50
3.12	Flux de potència després de la pèrdua de la línia 3-7 (B)	51
3.13	Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)	52
3.14	Evolució de la transmissió de potència a la línia 3-7 (A) (a), a la línia 3-7 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)	53
3.15	Evolució de la circulació d'intensitat a la línia de connexió del parc davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)	54
3.16	Evolució de la velocitat del rotor (a) i del consum de potència reactiva (b) als parcs eòlics P_W	54
4.1	Xarxa d'estudi amb l'aplicació d'un STATCOM	55
4.2	Flux de potència nominal al cas d'estudi amb un STATCOM a la xarxa . . .	56
4.3	Evolució de la tensió mesurada (a), aportació de reactiva (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al STATCOM en circumstàncies de funcionament nominal	57
4.4	Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant un petit increment de la velocitat del vent amb un STATCOM a la xarxa. En taronja i discontinu es compara el cas sense STATCOM.	58
4.5	Evolució de velocitat del rotor (a), velocitat del vent (b) i angle de pitch (c) a ambdós sub-parcs davant un petit increment de la velocitat del vent amb un STATCOM a la xarxa	59
4.6	Evolució de la tensió mesurada (a), aportació de reactiva (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al STATCOM davant un petit increment de la velocitat del vent . . .	60
4.7	Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant un gran increment de la velocitat del vent amb un STATCOM a la xarxa. En taronja i discontinu es compara el cas sense STATCOM.	61



4.8	Evolució de velocitat del rotor (a), velocitat del vent (b) i angle de pitch (c) a ambdós sub-parcs davant un gran increment de la velocitat del vent amb un STATCOM a la xarxa	62
4.9	Evolució de la tensió mesurada (a), aportació de reactiva (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al STATCOM davant un gran increment de la velocitat del vent . . .	63
4.10	Flux de potència després de la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb un STATCOM a la xarxa	63
4.11	Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb un STATCOM a la xarxa. En taronja i discontinu es compara el cas sense STATCOM. . . .	64
4.12	Evolució de la transmissió de potència a la línia 4-5 (A) (a), a la línia 4-5 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb un STATCOM a la xarxa	65
4.13	Evolució de la circulació d'intensitat a la línia de connexió del parc davant la pèrdua de la línia 4-5 (A), sense STATCOM (en taronja i discontinu) i amb STATCOM (blau)	66
4.14	Evolució de la tensió mesurada (a), aportació de reactiva (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al STATCOM davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)	66
4.15	Flux de potència després de la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb un STATCOM a la xarxa	67
4.16	Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb un STATCOM a la xarxa. En taronja i discontinu es compara el cas sense STATCOM. . . .	68
4.17	Evolució de la transmissió de potència a la línia 3-7 (A) (a), a la línia 3-7 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb un STATCOM a la xarxa	69
4.18	Evolució de la circulació d'intensitat a la línia de connexió del parc davant la pèrdua de la línia 3-7 (B), sense STATCOM (en taronja i discontinu) i amb STATCOM (blau)	69
4.19	Evolució de la tensió mesurada (a), aportació de reactiva (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al STATCOM davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)	70
5.1	Xarxa d'estudi amb l'aplicació d'un STATCOM i un SSSC	71
5.2	Increment en el flux de potència a la línia 3-8 provocat per l'injecció de tensió de l'SSSC	72
5.3	Flux de potència després de la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb un STATCOM i un SSSC a la xarxa	74
5.4	Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb un STATCOM i un SSSC a la xarxa	74
5.5	Evolució de la transmissió de potència a la línia 4-5 (A) (a), a la línia 4-5 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb únicament un STATCOM (taronja) i amb ambdós dispositius (blau) a la xarxa	75
5.6	Evolució de la tensió injectada (a), flux de potència (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al SSSC davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)	76



5.7	Flux de potència després de la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb un STATCOM i un SSSC a la xarxa	77
5.8	Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb un STATCOM i un SSSC a la xarxa	78
5.9	Evolució de la transmissió de potència a la línia 3-7 (A) (a), a la línia 3-7 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb únicament un STATCOM (taronja) i amb amdots dispositius (blau) a la xarxa	79
5.10	Evolució de la tensió injectada (a), flux de potència (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al SSSC davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)	80
6.1	Relació entre la injecció de tensió de l'SSSC i les pèrdues en el cas d'estudi	83
6.2	Esquema de control per a l'algoritme	83
6.3	Comanda d'injecció de tensió per a l'SSSC en el cas nominal de funcionament	85
6.4	Pèrdues en el cas nominal amb control (verd) i sense (taronja)	86
6.5	Comanda d'injecció de tensió per a l'SSSC en el cas de l'increment del vent	86
6.6	Pèrdues davant un increment del vent amb control (verd) i sense (taronja)	87
6.7	Comanda d'injecció de tensió per a l'SSSC en el cas de canvis de càrrega a la xarxa	88
6.8	Pèrdues davant dels canvis de càrrega amb control (verd) i sense (taronja)	88
6.9	Comanda d'injecció de tensió per a l'SSSC en el cas de pèrdua de la línia 3-7 (B)	89
6.10	Pèrdues davant la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb control (verd) i sense (taronja)	90
6.11	Flux de potència activa per la línia 3-7 (A) en cas de pèrdua de la línia 3-7 (B) amb control (verd) i sense (taronja)	90
A.1	Transformació de referència abc (estàtica) a dq0 (rotativa)	104
C.1	Gràfica de $\frac{P}{P_0}$ en funció de $\frac{v_2}{v_1}$	108



Prefaci

Actualment, l'energia eòlica té un paper molt important a nivell estatal, europeu i mundial. Segons les últimes xifres del sistema elèctric espanyol¹, un 16,6% de la potència de generació instal·lada a 31 de desembre de 2008 és eòlica. A més a més, aquesta xifra s'assoleix després de presentar un increment del 12,4%, que la converteix en la font d'energia amb més creixement del 2008. A nivell d'energia, a partir del vent s'obté un 11,3% de les necessitats dels usuaris de l'Estat, i la tendència és a l'alça.

En el context europeu, les dades són clares²: si al 2005 es disposava de 40.000 MW eòlics instal·lats, les dades de 2008 s'acosten als 65.000 MW de potència. Un increment de més del 60% en tres anys parla per si sol. Espanya segueix la tendència, passant dels 10.000 MW de 2005 a prop de 17.000 MW actuals, creixent una mica més que la mitjana europea i consolidant-se en la segona posició de la Unió Europea en potència instal·lada, només per darrera del mercat alemany.

Aquest destacat creixement ha estat possible gràcies a les noves tecnologies desenvolupades en el camp de la generació eòlica - que ha permès desenvolupar aerogeneradors més eficients i potents - així com gràcies a la política i les legislacions que, en recerca d'un espectre energètic més sostenible, han sabut incentivar la instal·lació de generadors eòlics com a alternativa a la tèrmica convencional.

Ara bé, cal considerar que el vent és una font extremament variable. Aquest fet és altament perjudicial per a la xarxa elèctrica i, amb la proliferació de generació d'aquest tipus, es converteix en un problema molt important a tractar. Per altra banda, la regulació sobre la qualitat del subministrament s'ha endurit progressivament i ha motivat una creixent preocupació per a la correcta gestió i control dels parcs eòlics connectats a la xarxa, i la seva resposta davant de contingències al sistema.

Els dispositius FACTS³ són un conjunt d'elements d'electrònica de potència que tenen la capacitat d'alleugerir o solucionar aquesta problemàtica, proporcionant una major capacitat de control sobre la xarxa elèctrica. Entre d'altres, aquest projecte sorgeix de la necessitat de donar suport als parcs eòlics connectats a la xarxa elèctrica, així com de la voluntat de millorar les infraestructures ja existents per tal de, simultàniament, poder també donar suport a la xarxa elèctrica.

¹Font: *El sistema eléctrico español, Avance del informe 2008, Red Eléctrica de España (REE)*[2]

²Font: *European Wind Map 2008, European Wind Energy Association (EWEA)*[3]

³*Flexible AC Transmission Systems*





Introducció

Objectius

L'objectiu del projecte és l'aplicació de dispositius FACTS (sistemes de transmissió AC flexibles) per al suport a la xarxa elèctrica en el punt de connexió d'un parc eòlic amb generadors d'inducció (velocitat fixa), donant suport tant al parc com a la xarxa sencera en cas de contingència. Els objectius parcials es resumeixen en:

- Realitzar un estudi de l'energia eòlica, tecnologies d'aerogenerador i problemàtiques d'integració a la xarxa elèctrica.
- Realitzar un estudi de l'art sobre dispositius FACTS i comprendre el seu funcionament.
- Modelar una xarxa elèctrica pròpia i estudiar-ne els problemes derivats de la integració d'una alta proporció d'energia eòlica, generada a partir de generadors de velocitat fixa.
- Instal·lar un STATCOM a la xarxa de prova, estudiada prèviament, amb un parc eòlic amb generadors de velocitat fixa.
- Utilitzar un STATCOM per a assolir el correcte funcionament del parc i de la xarxa, en la mesura que el dispositiu en sigui capaç.
- Instal·lar un SSSC a la xarxa de prova, estudiada prèviament, amb un parc eòlic amb generadors de velocitat fixa.
- Utilitzar ambdós dispositius per a mitigar els efectes de defectes concrets que puguin aparèixer a la xarxa.
- Controlar-los a partir d'informació de diversos punts de la xarxa, per a aconseguir un suport complet a la xarxa elèctrica, minimitzant, si és possible, les pèrdues.

Abast

En aquest projecte es treballarà amb parcs de velocitat fixa (generadors d'inducció), que presenten problemes més acusats que d'altres tecnologies, sobretot en la resposta enfront canvis en la velocitat del vent o en baixades de tensió a la xarxa.

D'altra banda, no s'aprofundirà en modelització: tant per als generadors com per als FACTS s'utilitzaran llibreries estàndard de les diferents distribucions de *MATLAB* i la seva extensió *SimPowerSystems*, per estar suficientment validats, tot i que es descriurà quin és el seu funcionament i les equacions que els regeixen.



Referències

L'estudi entorn de la temàtica dels dispositius FACTS està basat en el llibre *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, de Hingorani i Gyugyi [4]. També s'ha fet ús del document escrit per Gabriela Glanzmann, *FACTS: Flexible AC Transmission Systems* [5]. Les problemàtiques derivades de la gran penetració de l'energia eòlica a les xarxes actuals s'han basat en els estudis de Vladislav Akhmatov en la seva tesi doctoral, *Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power* [6].

Pel que fa a l'aplicació de FACTS paral·lel per al suport de la xarxa elèctrica, tenim múltiples fonts i articles que descriuen els efectes beneficiosos. *Benefits of SVC and STATCOM for Electric Utility Application* [7] n'és només una mostra. Però per al que més toca a aquest projecte, la combinació d'aquests elements amb xarxes elèctriques i parcs eòlics, la literatura és abundant, tot i que molt recent, i en general, centrant-se en el suport de tensió al parc. Entre d'altres, *Effects of FACTS Devices on a Power System Which Includes a Large Wind Farm* [8], que es centra en l'ús d'un STATCOM (paral·lel) i un SSSC (serie) per a mitigar diverses problemàtiques, *Power Quality and Dynamic Performance Improvement of Wind Farms Using a STATCOM*, que es centra precisament en donar suport a un parc en el PCC (Punt de Connexió Comuna), i altres diversos de temàtica similar o complementària, com són [9], [10], [11] i [12].

Altres articles es basen en l'ús d'aquests dispositius per al compliment de les normatives vigents en diversos països. Dos exemples, el primer per als països nòrdics, i el segon per a Alemanya són [13] i [14]. Per últim, citar un article que es fixa en el control i tècniques més avançades, i un llibre bàsic en aquest aspecte. *Coordinated Reactive Power Control of a Large Wind Farm and a STATCOM Using Heuristic Dynamic Programming*, [15] i [16].



Capítol 1

Integració de l'energia eòlica a la xarxa elèctrica

1.1 L'energia eòlica

Totes les energies renovables (exceptuant la mareomotriu i la geotèrmica), i fins i tot, l'energia dels combustibles fòssils, provenen en última instància del sol. El sol irradia $174,423 \cdot 10^{12}$ kWh d'energia a la Terra cada hora. En altres paraules, el planeta rep $1,74 \cdot 10^{17}$ W de potència¹. Entre un 1% i un 2% d'aquesta energia es converteix en energia eòlica. Això és, aproximadament, entre 50 i 100 vegades més que l'energia convertida en biomassa per totes les plantes del planeta Terra.

Una turbina eòlica obté la seva potència convertint la força del vent en un parell (força de gir) que actua a les pales del rotor. La quantitat d'energia que el vent transfereix al rotor depèn de la densitat de l'aire, l'àrea escombrada pel rotor i la velocitat del vent. L'expressió per a calcular la potència del vent que passa perpendicularment a una àrea circular és la següent:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v_w^3$$

on P_{wind} és la potència del flux d'aire, ρ és la densitat de l'aire², A és la superfície sobre la que actua el vent i v_w és la velocitat mitjana del vent.

A la pràctica, però, com més energia cinètica extreu la turbina del vent, més es redueix la velocitat del vent a la sortida de la turbina. Si s'aconseguís extreure tota l'energia, el vent s'allunyaria amb velocitat zero i, conseqüentment, no podria deixar la turbina. En aquest cas, l'energia extreta acabaria sent nul·la, perquè aquest tap faria que no entrés més vent a la turbina. En l'altre extrem, el vent podria passar sense frenar-se. En aquest cas, tampoc s'extrauria potència. Per tant, es pot assumir que hi ha un cas enmig, i que és el més eficient possible. Resulta que, utilitzant la llei de Betz (veure Annex C), una turbina ideal reduirà la velocitat del vent en 2/3 de la velocitat original. A partir d'aquesta dada, s'obté que no

¹L'emissió del sol és de $1,37 \text{ kW/m}^2$ a la superfície de l'esfera, que té el Sol al seu centre i el radi mitjà de la trajectòria terrestre. La potència arriba a un disc circular amb una àrea de $1,27 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$. La potència que rep la Terra és doncs $1,74 \cdot 10^{17} \text{ W}$

² 1.225 kg/m^3 (a pressió atmosfèrica al nivell del mar i 15°C)



es pot convertir més de $16/27$ (o el que és el mateix, un 59%) de l'energia cinètica del vent a energia mecànica utilitzant una turbina de vent.

Així doncs, la potència P_w extreta per un aerogenerador quedarà modificada per un coeficient de potència de la següent manera:

$$P_w = C_p P_{wind} = C_p \frac{1}{2} \rho A v_w^3$$

on C_p no serà mai més gran del coeficient de Betz, 0,59.

Cal notar que el valor de C_p és característic de cada turbina i depèn a més del quocient de la velocitat a la que es mou l'èlèp entre la velocitat del vent, λ l'anomenat *tip speed ratio*. En el cas de les turbines amb aspes orientables, a més, C_p depèn de l'angle θ_{pitch} d'orientació (*pitch*). Aquest valor es pot trobar tabulat per a un determinat model de turbina o pot ser aproximat a través d'una funció analítica.

1.2 Tecnologies d'aerogeneradors

Els sistemes eòlics basats en aerogeneradors capturen la potència del vent a través dels seus àleps i la converteixen en energia mecànica de rotació. El més usual és trobar instal·lades turbines amb tres àleps. Les turbines són generalment dissenyades de tal manera que donin màxima potència una determinada velocitat del vent, usualment al voltant de 10 metres per segon. No és eficient dissenyar turbines que maximitzin la seva aportació a velocitats més altes, perquè els vents més forts són poc usuals i puntuals.

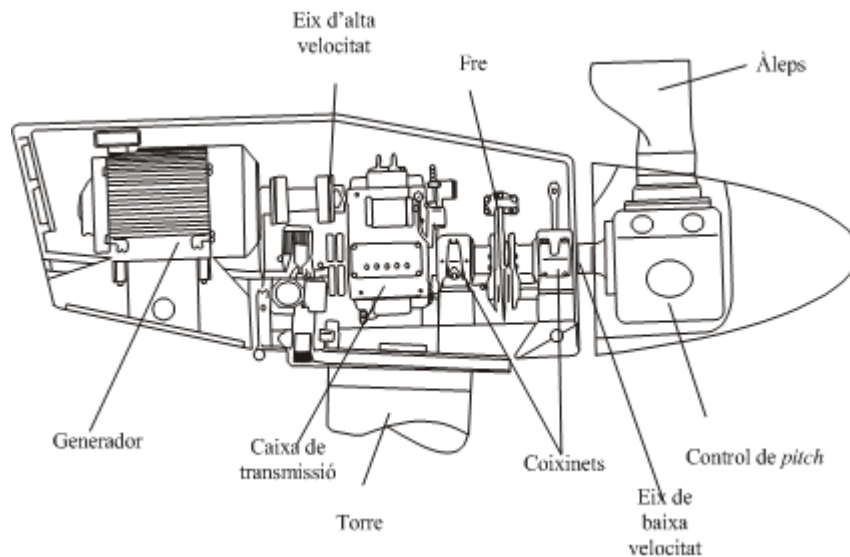


Figura 1.1: Secció d'un aerogenerador típic

Així doncs, en casos de vents més forts és necessari consumir part de l'excés d'energia que aporta per no malmetre la turbina. La potència mecànica obtinguda del vent es limita aerodinàmicament mitjançant principalment tres sistemes [17, 18, 19]:



- *Pitch control*: En una turbina controlada per control de *pitch*, el controlador electrònic mesura la potència generada per la turbina múltiples vegades per segon. Quan la potència generada és excessivament alta, envia una ordre al sistema actuador de les pales, el qual immediatament gira lleugerament els àleps del rotor fora de l'exposició del vent. De forma corresponent, les pales es tornen a exposar al vent quan aquest torna a disminuir.
- *Stall*: En el sistema de *stall* (passiu), els aerogeneradors controlats tenen les pales unides al rotor amb un angle concret i fixat. No obstant, la geometria del perfil dels àleps ha estat dissenyat aerodinàmicament per tal d'assegurar que en el moment que la velocitat del vent sigui massa elevada es creï una turbulència a la banda del rotor que no s'exposa al vent. Aquest *stall* evita que part de la força de la cara de davant (l'excés de vent) actuï sobre el rotor.
- *Active stall*: Tècnicament, aquest tipus de control de màquines s'assembla al control de *pitch*, ja que les pales es poden rotar. Per tal d'obtenir un parell raonable a velocitats reduïdes del vent, les màquines són usualment programades per a girar les pales com si fossin per control de *pitch* a velocitats baixes. Usualment però, només utilitzen uns quants punts de treball dependents d'aquesta velocitat. Quan la màquina assoleix la seva potència nominal, tanmateix, apareix una diferència important: si el generador està a punt de ser sobrecarregat, la màquina girarà les seves pales en la direcció oposada en la que ho faria el control de *pitch*. En altres paraules, incrementarà l'angle d'atac de les pales del rotor per tal d'aconseguir més pèrdues, alliberant l'excés d'energia al propi vent. Una de les avantatges d'aquest tipus de control respecte l'*stall* és que la potència de sortida és més fidelment controlable que en el cas passiu.

Els mecanismes de *pitch* són els més usuals i estesos, i solen ser implementats utilitzant hidràulica o motors pas a pas.

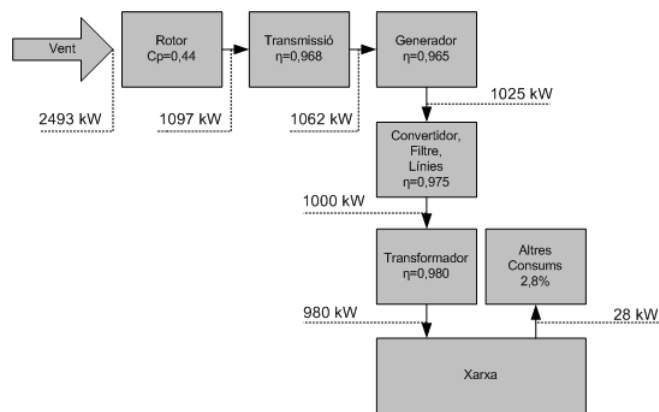


Figura 1.2: Eficiència de conversió en un aerogenerador d'1 MW de potència nominal

Per als aerogeneradors més usuals, la potència dels quals ronda el megawatt, la velocitat de rotació es troba en la forquilla de les 10-15 rpm [17]. Aquesta velocitat de rotació no és adient per a les velocitats de funcionament dels generadors i per tant, s'utilitzen dues solucions. La primera, convertir la baixa velocitat i alt parell en alta velocitat i baix parell a través d'una caixa de transmissió. La segona, utilitzar generadors multipolars, que permetin treballar directament amb velocitats baixes de gir. Per altra banda, la connexió a la xarxa es pot realitzar directament o bé mitjançant conversions que fan ús d'electrònica de potència. Les solucions tècniques són múltiples i diverses, i la figura 1.3 mostra el procés



habitual de conversió, que involucra solucions amb o sense caixa de transmissió i amb o sense convertidors.

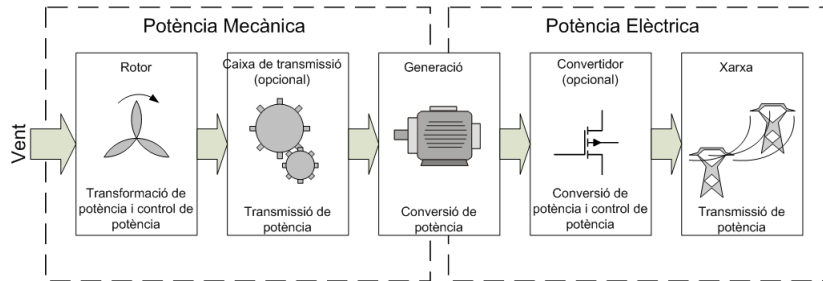


Figura 1.3: Procés de conversió de l'energia del vent en energia elèctrica utilitzant un aerogenerador

1.2.1 Aerogeneradors de velocitat fixa

Els aerogeneradors de velocitat fixa utilitzen generadors d'inducció de gàbia d'esquirol connectats directament a la xarxa elèctrica [20, 21, 22]. La velocitat d'operació a l'eix d'alta velocitat (el que connecta la caixa de transmissió amb el generador) es troba usualment a velocitats molt pròximes a la síncrona del generador a causa de les característiques del mateix. Així doncs, aquestes turbines són forçades a treballar a velocitat fixa. Això provoca que l'eficiència aerodinàmica sigui lleugerament inferior a velocitats del vent que no siguin la nominal. Els generadors d'inducció, a més, necessiten consumir potència reactiva per a magnetitzar la màquina, i per aquest motiu s'instal·len compensadors de reactiva a cada turbina per aconseguir operar a factors de potència pròxims a la unitat. Per altra banda, aquests sistemes utilitzen arrancadors estàtics per a limitar la corrent durant l'operació de posada en marxa. Aquesta solució és atractiva a causa del cost i la fiabilitat. El seu principal inconvenient és que només aporten potència òptima per a una velocitat del vent determinada. La configuració més habitual per aquests aerogeneradors és mostra en la figura 1.4.

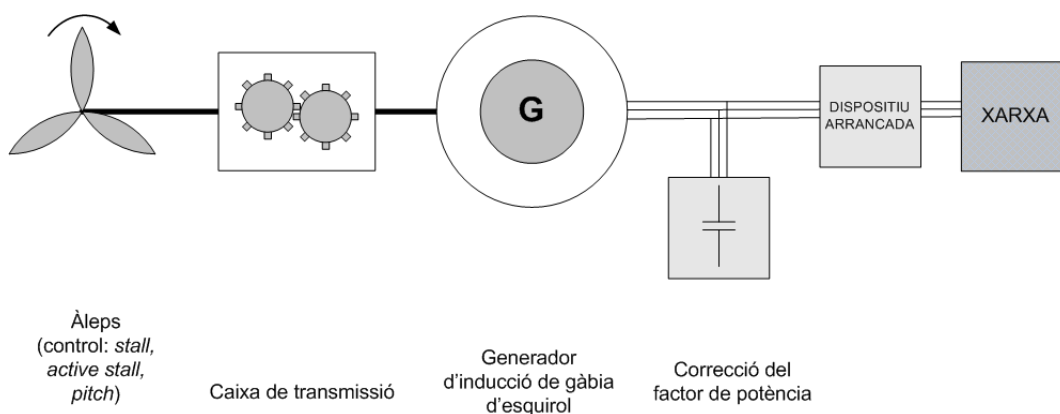


Figura 1.4: Aerogenerador de velocitat fixa



1.2.2 Aerogeneradors d'inducció doblement alimentats

Els aerogeneradors d'inducció doblement alimentats (DFIG) (Fig. 1.5) són turbines de velocitat variable i utilitzen generadors d'inducció bobinats. L'estàtor es troba connectat directament a la xarxa, mentre que el rotor es connecta a un convertidor *back-to-back*. Aquest convertidor es dimensiona a una fracció de la potència del generador i és capaç d'operar en ambdues direccions. El convertidor permet variar la velocitat de la turbina per tal d'optimitzar l'eficiència per a cada velocitat del vent. Això passa quan el ratio entre la velocitat de la turbina i la del vent està fixat. Així doncs, els aerogeneradors de velocitat variable disminueixen la seva velocitat de gir a velocitats menors del vent i l'augmenten per a les més elevades. La gran inèrcia de la turbina s'encarrega d'amortir les oscil·lacions. El comportament d'aquest tipus d'aerogeneradors davant de condicions normals o condicions de falta és determinat per el convertidor i l'algorisme de control.

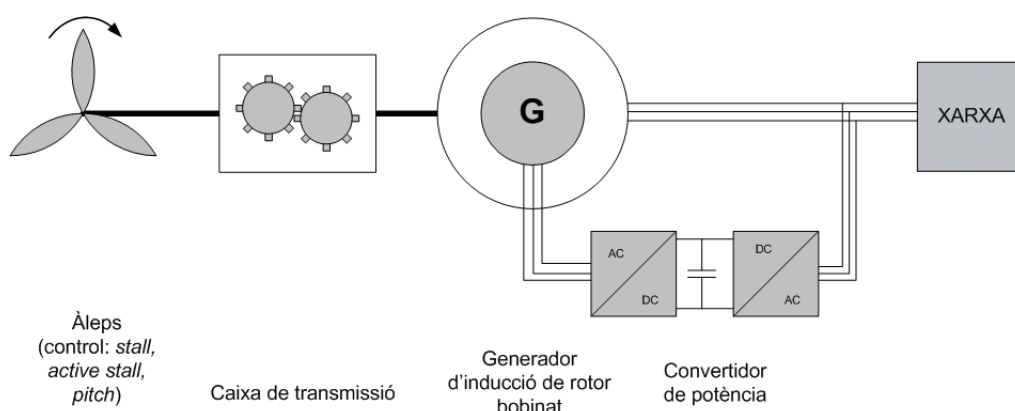


Figura 1.5: Aerogenerador de velocitat variable DFIG

1.2.3 Aerogeneradors de màquina síncrona amb convertidor

Els aerogeneradors de màquina síncrona (Fig. 1.6) fan ús d'un convertidor de plena potència entre el generador i la xarxa, amb l'objectiu de permetre l'operació a velocitat variable. Poden no requerir caixa de transmissió, perquè en alguns casos s'utilitzen màquines síncrones multipolars dissenyades especialment. Es poden realitzar tant de la forma convencional per a les màquines síncrones com amb imants permanents. Tota la potència produïda passa a través del convertidor, per tant, apareixen pèrdues en la conversió derivades d'aquest pas. Tanmateix, el fet de disposar d'un convertidor de plena potència obre noves vies d'augment de rendiment, mitjançant un ràpid control de la potència activa i reactiva. Addicionalment, el fet d'eliminar la caixa de transmissió aporta fiabilitat extra al sistema.

1.3 Integració a la xarxa

La integració de generació eòlica en nivells de penetració significants no tant sols és possible sinó que no sol requerir una gran modificació de l'esquema elèctric existent[18]. Des del punt de vista tècnic, cal considerar que l'objectiu final de qualsevol sistema de potència és proporcionar electricitat als consumidors en el moment que en tinguin demanda. Així doncs, encara que s'introdueixi generació eòlica, l'objectiu s'ha de mantenir i satisfer. El repte que

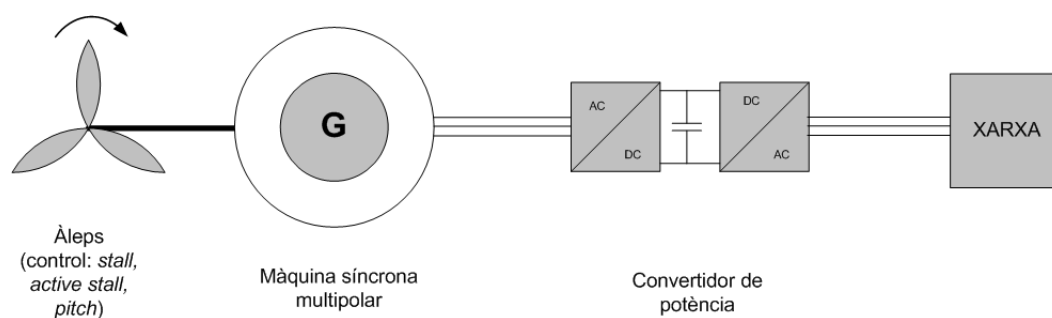


Figura 1.6: Aerogenerador de velocitat variable de màquina síncrona i convertidor de plena potència

introdueix aquest tipus de generació en el disseny i l'operació de la xarxa està relacionat fonamentalment amb la naturalesa fluctuant del vent.

Resumint, els dos aspectes bàsics que preocupen en la integració de grans quantitats de generació eòlica a la xarxa són[18]:

- Com mantenir un nivell acceptable de tensió per a tots els consumidors del sistema de potència: els consumidors haurien de poder seguir utilitzant els mateixos aparells que acostumen a utilitzar.
- Com mantenir el balanç de potència del sistema: això és, com es pot combinar la generació del vent amb la resta de generació per tal d'assolir constantment la demanda?

L'enginyeria sempre ha hagut de treballar amb aquests reptes, i cada país o sistema elèctric ha desenvolupat les seves solucions. En països amb una aportació nuclear important, la inflexibilitat d'aquest tipus d'aportació d'energia fa que aportin el consum base i que la resta, com la hidràulica o les centrals tèrmiques, més flexibles, aportin l'energia necessària en les puntes. Altres llocs han desenvolupat sistemes de bombeig, que integrats al sistema elèctric permeten més possibilitats d'acció. En tot cas, com es veurà en següents apartats, els problemes relacionats amb la integració de l'energia eòlica són principalment relacionats amb la xarxa a la que es connectin (és a dir, depenen del cas específic). Tanmateix, és clar que alguns mètodes generals de resolució de problemes d'aquest tipus són igualment aplicables en la integració eòlica, encara que sovint amb algunes modificacions.

1.3.1 Integració de generació eòlica a la xarxa

El repte que suposa la integració de l'energia eòlica s'il·lustra en la figura 1.7. En aquest sistema de potència, hi ha indústries i habitatges que consumeixen una determinada potència P_D i un parc eòlic que genera P_W . La potència addicional que es requereix, P_G , es produeix en una altra localització. Les impedàncies Z_1 , Z_2 i Z_3 representen les línies de transmissió i transformadors entre els diferents punts.

En una xarxa elèctrica, com la de la figura 1.7, la potència no pot desaparèixer. Això significa que sempre hi haurà equilibri en el sistema, és a dir,

$$P_G = P_D + P_L - P_w \quad (1.1)$$



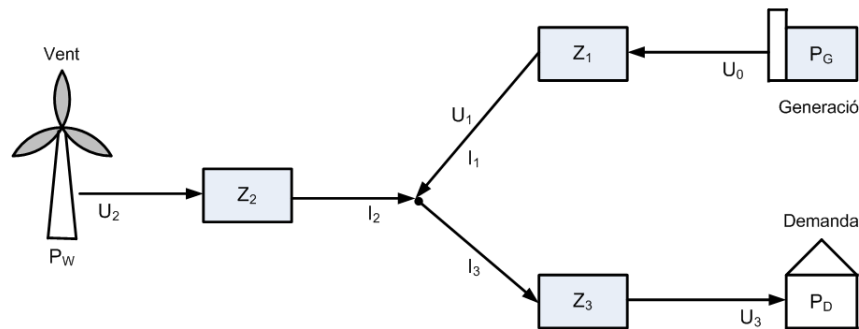


Figura 1.7: Sistema de potència d'exemple

on P_L representa les pèrdues en la transmissió.

L'equació 1.1 és vàlida en qualsevol situació, independentment del període de temps en el que es consideri. A més, implica que l'energia elèctrica no pot ser emmagatzemada. Així doncs, qualsevol canvi en la demanda (o en el vent) ha de ser equilibrat de forma simultània per la resta de fonts de generació del sistema.

Requisits de la demanda

Tal com s'ha mencionat anteriorment, l'objectiu principal del sistema de potència és aportar als consumidors l'electricitat requerida en qualsevol moment i a un cost raonable. Des del punt de vista del consumidor, es poden definir tres requisits principals[18]:

- Requisit del consumidor 1 (RC1): la tensió al punt de connexió ha de trobar-se en un rang acceptable, ja que la majoria d'aplicacions (il·luminació, motors, ordinadors, etc.) requereixen una tensió en un rang determinat (per exemple, $230 \pm 10\%$).
- Requisit del consumidor 2 (RC2): la potència hauria d'estar disponible exactament al moment que el consumidor la necessiti, com per exemple, quan engega un interruptor.
- Requisit del consumidor 3 (RC3): la potència hauria de ser accessible a un cost raonable. Com que RC1 i RC2 es refereixen a la fiabilitat del subministrament, i major fiabilitat porta a majors costos, apareix un conflicte i una necessitat de solució de compromís entre aquestes i RC3 en la demanda de costos raonables.

Requisits de l'operador

De manera similar als consumidors, els propietaris de parcs eòlics o operadors tenen certes demandes sobre la xarxa elèctrica existent per tal de poder vendre la producció eòlica[18].

- Requisit de l'operador 1 (RO1): així com les aplicacions dels consumidors, els parcs eòlics requereixen un nivell determinat de tensió al punt de connexió ja que les turbines eòliques són dissenyades per a operar en un rang específic de tensió (per exemple, el nominal $\pm 10\%$).
- Requisit de l'operador 2 (RO2): addicionalment, la intenció dels operadors és poder vendre la generació eòlica a la xarxa sempre que la producció sigui possible (quan la velocitat del vent és suficient). Altrament, la producció s'hauria de malgastar, la qual cosa implica pèrdues econòmiques.



- Requisit de l'operador 3 (RO3): els dos punts anteriors també es preocupen de la fiabilitat del sistema al punt de connexió del parc. Com sempre, existeix un compromís entre els costos i la fiabilitat. Més fiabilitat implica més costos.

1.3.2 Problemàtiques de la integració de generació èolica a la xarxa

El repte de la integració és assolir RC1, RC2, RO1 i RO2 de manera econòmicament eficient (RC3 i RO3), fins i tot en casos d'alta presència èolica. L'objectiu d'aquest projecte està relacionat amb RC1 i RO1, que són els dos requisits de tensió, i per tant, els que seran detallats i se'ls donarà solució en posteriors apartats. Aquests reptes seran tractats utilitzant el sistema de la figura 1.1.

RC1: nivell de tensió al punt de connexió del consumidor

Primer, s'assumeix que no hi ha presència èolica a la xarxa, i que la tensió U_0 es manté constant gràcies als generadors de P_G . En aquest supòsit, si la càrrega P_D varia, la corrent I_3 i conseqüentment I_1 es modificaran. Així doncs, apareixerà una caiguda de tensió en les corresponents impedàncies Z_1 i Z_3 . Si aquestes són grans (per exemple, en cas de línies llargues), la tensió U_3 variarà ostensiblement quan P_D variï. Les possibles accions correctores per a evitar-ho inclouen:

- Acció (a): reduir les impedàncies Z_1 i Z_3 . Això es pot aconseguir utilitzant tensions més altes, per exemple.
- Acció (b): controlar la tensió U_3 amb transformadors controlables propers a U_3 .
- Acció (c): controlar la tensió U_1 utilitzant compensació o transformadors controlables.

Si ara es connecta l'aportació èolica, P_W , quan aquesta canviï a causa de les fluctuacions del vent, I_2 varia. Aleshores, I_1 canvia en conseqüència, la qual cosa causarà una caiguda de tensió a Z_1 . Addicionalment, U_1 serà modificada i possiblement també U_3 , la tensió pròxima al consum. L'impacte de les fluctuacions del vent en les variacions de tensió per al consumidor depèn principalment de Z_1 . Si aquesta és gran, la relació entre les variacions de vent i variació de tensió serà molt forta. Si és molt petita, en canvi, la tensió U_3 serà pràcticament independent de la variació del vent. En realitat, només els consumidors pròxims al parc són propensos a ser afectats per aquestes variacions. Per a evitar-ho, s'haurien d'aplicar les accions (a)-(c), així com la següent, que constitueix un dels objectius d'aquest projecte:

- Acció (d): utilitzar un control local de la tensió U_2 al parc èolic.

RO1: nivell de tensió al punt de connexió del parc

La tensió U_2 també depèn del P_W , P_D i de la mida de Z_1 i Z_2 . La diferència respecte RC1 és que Z_2 és important i no Z_3 . Aquest fet és principalment d'interès quan la generació èolica està situada a una distància major dels consumidors. En aquest cas, les accions (a), (b) i (d) són d'interès, a les que s'afegeix:

- Acció (e): utilitzar un transformador controlable pròxim a U_2 . Tot i això, aquesta acció és més lenta que (d).



1.3.3 Impacte de la generació eòlica de velocitat fixa en l'estabilitat de la xarxa

En aquesta secció, l'estudi es centrarà en la tipologia de generador que estudia i aplica aquest projecte, el de velocitat fixa. Les turbines de velocitat fixa utilitzen un generador d'inducció de gàbia d'esquirol directament connectat a la xarxa per convertir la potència mecànica en elèctrica. El comportament d'aquest tipus de turbines està determinat per la relació intrínseca entre la potència activa, la reactiva, la tensió als terminals i la velocitat del rotor del generador d'inducció de gàbia d'esquirol. Aquesta relació es pot estudiar amb l'equivalent de la xarxa, com fa [16].

Resposta als sots de tensió

Els generadors d'inducció de gàbia d'esquirol són propensos a inestabilitzar-se després d'una baixada de tensió [23]. La explicació és la següent: La figura 1.8 il·lustra la relació entre la sortida de potència activa i el lliscament del rotor, així com el consum de reactiva amb el lliscament, tenint la tensió U_T del terminal com a paràmetre. Aquesta figura mostra que:

- Com més baixa és la tensió al terminal, més gran és el valor absolut de lliscament que correspon a certa quantitat de generació de potència activa.
- Com més gran és el lliscament, més gran és el consum de reactiva.

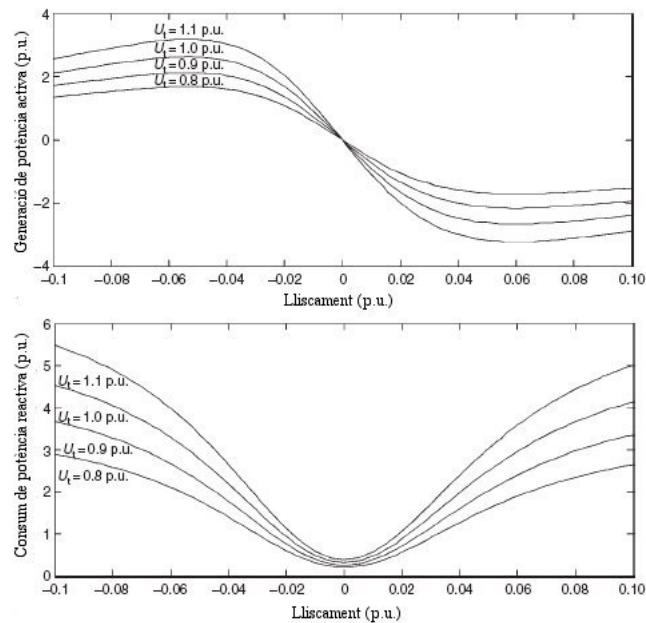


Figura 1.8: Relació entre la potència activa i reactiva i la velocitat del rotor en un generador de gàbia d'esquirol, amb la tensió als terminals, U_T , com a paràmetre.

Si la tensió al terminal del generador cau (a causa de, per exemple, una falta) només una petita porció de la potència elèctrica pot ser aportada a la xarxa perquè la potència elèctrica generada és proporcional a la tensió del terminal. No obstant això, el vent segueix subministrant potència mecànica. En motiu de la diferència existent entre la potència mecànica



subministrada i la elèctrica generada, el generador s'accelera. Això té com a resultat un lliscament decreixent. Una vegada desapareix la falta, el generador d'inducció de gàbia d'esquirol absorbeix una quantitat molt gran de potència reactiva de la xarxa a causa de la seva alta velocitat de rotació, com es veu a la figura 1.8. En motiu d'aquest consum de reactiva, pot passar que la tensió del terminal es recuperi lentament un cop desapareguda la falta.

Tanmateix, si la tensió en els terminals del generador és baixa, la potència elèctrica generada en un lliscament determinat és més baixa que la que es generaria en condicions nominals, tal com s'observa a la mateixa figura 1.8. Si el rotor s'accelera més ràpid que no pas es recupera la tensió als terminals, el consum de reactiva segueix augmentant. Això comporta una disminució de la tensió als terminals i per tant, a una deteriorització de l'equilibri entre potència mecànica i elèctrica i a l'increment de l'acceleració del rotor. Finalment, la tensió a l'aerogenerador es desplomarà. Arribat a aquest cas, serà necessari desconnectar la turbina de la xarxa per aconseguir restaurar la tensió de la xarxa. En escenaris d'alta penetració eòlica, la reacció en cadena que pot provocar aquest fet podria deixar la xarxa sencera sense suficient subministrament.

Depenent del disseny i els paràmetres del sistema de protecció, la turbina es desconnectarà per la seva protecció de sota-tensió o la de sobre-velocitat. Només podrà ser reconnectada després de la recuperació de la tensió en les parts afectades de la xarxa. Això pot comportar forces minuts, particularment si altres sistemes de protecció també es van activar durant la falta. El comportament exacte de la tensió i del temps de restauració depèn de la velocitat del vent, les característiques de la turbina, la topologia de la xarxa i els paràmetres de les proteccions.

Sempre que sigui possible, una falta s'hauria de fer desaparèixer del sistema abans que l'aerogenerador s'instabilitzís, precisament per tot el comentat fins aquest punt. Altrament, una gran quantitat de generació es pot perdre. La falta s'hauria d'eliminar ràpidament per tal de limitar la sobre-acceleració i, conseqüentment, per limitar la quantitat de potència reactiva que es consumirà en recuperar el nivell de tensió. El temps disponible per fer-ho abans que s'instabilitzi el sistema s'anomena el temps crític d'eliminació de falta.

V. Akhmatov, en la seva tesi [6], proposa una sèrie de contramesures per a prevenir la inestabilitat d'aquest tipus de turbines, la segona de les quals es posa en pràctica en el present projecte:

- Els aerogeneradors de velocitat fixa, que usualment són controlades per *stall*, poden ser equipades amb controladors de *pitch* que incrementin ràpidament l'angle de *pitch* quan es detecti l'acceleració del rotor. Això redueix la potència mecànica i conseqüentment limita la velocitat del rotor i el consum de reactiva post-falta, reduint així el risc d'inestabilitat.
- Les turbines eòliques poden ser equipades amb una font controlable de potència reactiva (com un compensador estàtic de reactiva (SVC) o un compensador estàtic síncron (STATCOM)) per a proporcionar la potència reactiva necessària per a incrementar la velocitat a la qual la tensió es recupera.
- Paràmetres mecànics i/o elèctrics de l'aerogenerador podrien ser variats, però habitualment això comporta un increment de costos, reducció d'eficiència i una major complexitat constructiva.

Aquestes mesures tenen com a objectiu reduir la sobre-acceleració durant la falta o suplir la potència reactiva necessària per a accelerar el procés de restauració de tensió. Tot i que aquestes mesures mitiguen el problema, no el solucionen completament: aquest s'origina en



el principi de funcionament del generador d'inducció, que no és canviat per cap d'aquestes mesures.

S'hauria de notar que les turbines de velocitat fixa es poden tornar inestables en moments en que no s'hagi produït cap falta. La seqüència descrita anteriorment també pot ser iniciada a causa d'una caiguda relativament petita de la tensió en els terminals. Això podria ser causat per l'activació d'un generador síncron proper o d'una càrrega fortament inductiva. Quan l'aerogenerador entrega la seva potència nominal i la tensió al terminal disminueix lleugerament, la velocitat del rotor augmenta, perquè un lliscament major és necessari per a entregar la potència nominal a tensió de terminal menor a la nominal. Això porta a un increment del consum de reactiva, que, al seu torn, torna a resultar en un decreixement de la tensió de terminal. Tot plegat pot portar a un col·lapse de tensió que no ve precedit per un curtcircuit. És un altre exemple d'inestabilitat de tensió.

Resposta als canvis de freqüència

La resposta del generador d'inducció de gàbia d'esquirol davant els canvis a la freqüència de la xarxa és similar a la dels generadors síncrons. La freqüència del camp de l'estàtor és idèntica a la freqüència de la xarxa dividida per el nombre de pols del generador. Si aquesta freqüència canvia, la freqüència mecànica del rotor canvia corresponentment. La variació de l'energia emmagatzemada en la massa rotativa, que és causada pel canvi en la velocitat del rotor és o bé entregada a la xarxa (en cas de caiguda de freqüència) o absorbida de la mateixa (en cas d'un increment de la freqüència del sistema).

No obstant, hi ha una diferència important entre la resposta dels generadors síncrons de generació i la dels generadors d'inducció de gàbia d'esquirol utilitzats en els aerogeneradors de velocitat fixa. En les centrals generadores convencionals, la potència mecànica introduïda és controlable. Així que si hi ha una pujada o una caiguda de freqüència, la potència mecànica es pot ajustar per contrarrestar la variació. En les turbines de vent, en canvi, això no és possible perquè la potència aportada pel vent no és controlable. Així doncs, encara que els aerogeneradors de velocitat fixa tendeixin a amortir les desviacions de freqüència alliberant o acumulant energia en la massa rotativa, l'efecte és molt més dèbil que en els generadors síncrons, que sí que poden controlar com contrarresten els canvis de freqüència.

Aquest tema es tracta en profunditat a [24] i a [25].

1.3.4 Normativa

Les normatives per cada país (els anomenats *grid codes*) varien àmpliament d'un lloc a un altre, a causa de les diferents mides de les xarxes, de la distribució dels tipus de generació (*generation mix*), dels processos operatius i de la penetració eòlica. Els fabricants han d'adaptar doncs els aerogeneradors a cada país, i fins i tot, dins del mateix, a causa de les diferents capacitats dels punts de connexió.

En aquest sentit, i independentment de les previsions de producció eòlica - que no deixen de ser importants - el tema crític són els ja mencionats sots de tensió. Els sots de tensió poden produir una pèrdua simultània important d'una quantitat important de generació eòlica i afectar a l'estabilitat del sistema. Com que la penetració eòlica espanyola és alta, la normativa estableix quina ha de ser la resposta dels aerogeneradors davant sots de tensió. Aquests han de mantenir-se connectats en casos de faltes normals permetent al sistema eliminar la falta. El *grid code* espanyol diferencia entre curtcircuits trifàsics, bifàsics o monofàsics, definits a *P.O. 12.3. Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas* [1].



La figura 1.9 representa els requisits de recuperació de tensió després d'una falta, mentre que la figura 1.10 mostra els requisits de reactiva mentre dura la falta. Aquests requisits han forçat als fabricants d'aerogeneradors a aplicar-los instruments d'electrònica de potència o dispositius de mitigació, com per exemple, els mencionats FACTS, objecte d'estudi del present projecte.

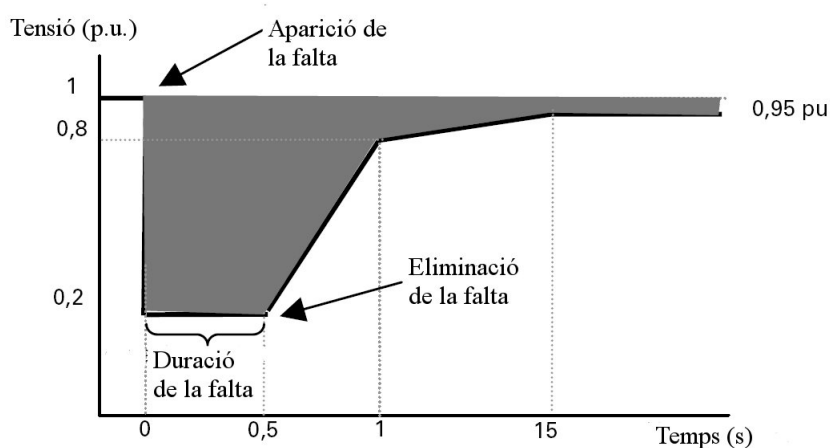


Figura 1.9: Normativa per a la recuperació de la tensió després d'una falta [1]

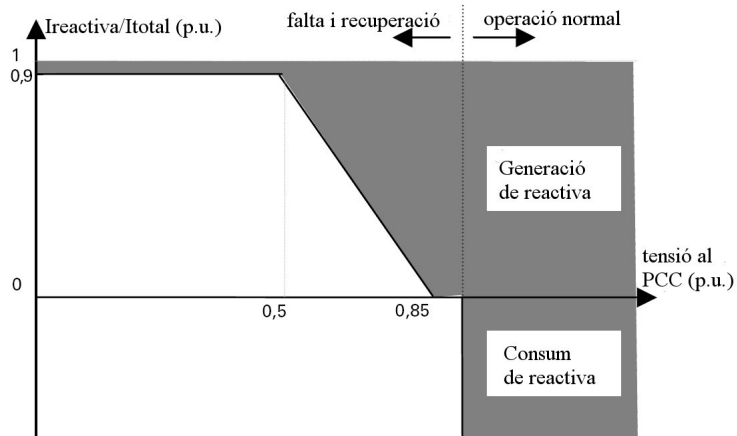


Figura 1.10: Normativa dels requisits de potència reactiva davant una falta [1]

Adicionalment, les turbines connectades a nivell de transmissió han de complir amb dues normatives més, *P.O. 12.1. Soluciones de acceso para la conexión de nuevas instalaciones a la red de transporte* i *P.O. 12.2. Instalaciones conectadas a la red de transporte: requisitos mínimos de diseño, equipamiento, funcionamiento y seguridad y puesta en servicio*.



Capítol 2

FACTS: dispositius de transmissió AC flexibles

2.1 Definició

Un FACTS es defineix, segons IEEE¹, com [5]:

Un sistema basat en l'electrònica de potència i altres equipaments estàtics que faciliten el control d'un o més paràmetres d'un sistema de transmissió AC amb l'objectiu de millorar la controlabilitat i incrementar la capacitat de transferència de potència.

Els sistemes de transmissió AC flexibles (a partir d'ara, FACTS) han guanyat recentment una popularitat creixent, bàsicament gràcies a les seves possibilitats de control, d'aplicació i preu. Un nombre important de dispositius han estat introduïts en diverses instal·lacions a tot el món, i altres components es troben en estat d'aplicació, mentre que cada dia es desenvolupen nous conceptes de FACTS.

Actualment, en gran part de les aplicacions, la controlabilitat i flexibilitat s'aprofita per reduir costos i optimitzar la distribució de l'energia elèctrica. Un dels punts forts dels FACTS és precisament la seva gran flexibilitat d'adaptació a diferents condicions de treball, així com la seva capacitat per a maximitzar l'aprofitament de les instal·lacions ja existents. Addicionalment, l'ús de l'electrònica de potència permet temps de resposta molt curts, per sota d'un segon, amb la qual cosa és possible actuar de manera ràpida i efectiva enfront els canvis en el sistema.

2.1.1 Aplicacions

Les aplicacions bàsiques dels dispositius FACTS són:

- Control de flux de potència
- Increment de la capacitat de transmissió

¹Institute of Electrical and Electronics Engineers, <http://www.ieee.org>



- Control de voltatge
- Compensació de potència reactiva
- Millora de l'estabilitat transitòria i de tensió
- Millora de la qualitat de subministre
- Millora de la qualitat de la potència
- Mitigació de l'efecte *flicker*
- Interconnexió tant de generació com d'emmagatzematge renovable i distribuït

Si guina sigui l'aplicació, els requisits pràctics, necessitats i beneficis s'han de considerar adequadament per a justificar la inversió en un element d'aquestes característiques tant complexes. L'ús de línies per al transport d'energia s'hauria de portar, idealment, fins als límits tèrmics del dispositiu. Els límits de tensió i estabilitat, menors que els tèrmics en línies llargues [16], haurien de ser elevats amb les eines proporcionades pels FACTS. Amb l'augment de les distàncies recorregudes per les línies elèctriques (per exemple, amb l'increment de nombre de parcs eòlics *off-shore*, a desenes de quilòmetres de la costa i encara més dels punts de consum), les possibilitats que presenten els dispositius FACTS per millorar el sistema de distribució augmenten dràsticament.

2.1.2 Classificació

A la figura 2.1 s'observa la divisió en dos grans grups entre dispositius convencionals y dispositius FACTS.

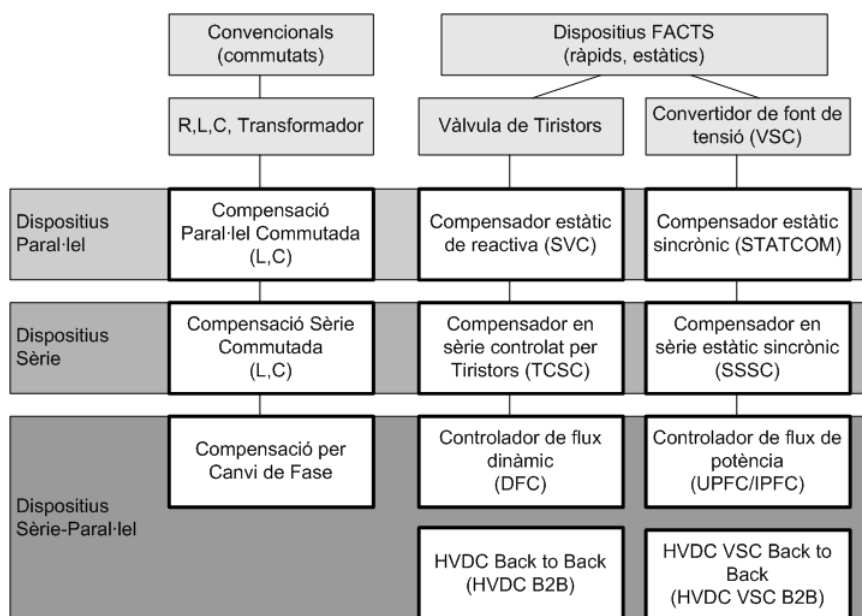


Figura 2.1: Classificació general dels dispositius de control de flux de potència

Els dispositius convencionals actuen de forma fixa o per connexió d'inductàncies o condensadors. Els dispositius FACTS més simples, els que disposen de vàlvula de tiristors, es



caracteritzen per commutar amb la xarxa i fer-ho per tant a l'ordre de la freqüència d'aquesta (Hz). En contraposició, els dispositius FACTS amb convertidor de font de tensió utilitzen tecnologies més avançades per a la commutació forçada, com són els IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) o els IGCT (*Insulated Gate Commutated Thyristor*). La seva elevada freqüència de commutació incrementa les pèrdues d'aquest tipus, però d'altra banda, entre les seves avantatges, permet generar menys harmònics. Els dispositius es caracteritzen en funció del tipus de connexió a la xarxa (paral·lel, sèrie o una combinació dels dos anteriors).

2.2 Fonaments teòrics

2.2.1 Cas base

Per a entendre l'aportació dels FACTS a un sistema elèctric, es descriu primer el comportament bàsic per així poder comparar-lo posteriorment amb l'aplicació de FACTS.

En el cas d'una línia sense caiguda de tensió, el mòdul del voltatge en ambdós extrems és el mateix: $|U_s| = |U_r| = U$. La transmissió té com a resultat una diferència d'angle δ que depèn de la reactància X de la línia.

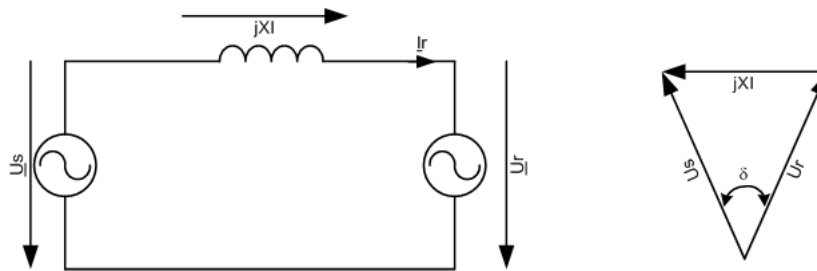


Figura 2.2: Transmissió en una línia sense pèrdues

Aplicant la trigonometria al diagrama de la figura 2.2, \underline{U}_s i \underline{U}_r poden expressar-se de la següent forma:

$$\underline{U}_s = U \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) + jU \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

$$\underline{U}_r = U \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) - jU \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

I per tant, la intensitat que circula per la línia I es troba utilitzant les expressions anteriors per a trobar ΔU a la línia i dividint per la reactància X .

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_s - \underline{U}_r}{jX} = \frac{2U \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}{X}$$

Partint de que el càlcul de la potència activa P i reactiva Q es realitza, respectivament, amb la part real i la imaginària del producte de la tensió per la intensitat conjugada

$$P = \Re\{\underline{U} \cdot \underline{I}_1^*\}$$

$$Q = \Im\{\underline{U} \cdot \underline{I}_1^*\}$$

S'obtenen els següents resultats per al cas general d'una línia sense caiguda de tensió:

La potència activa P és la mateixa en qualsevol punt de la línia,

$$P_s = P_r = P = U \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \frac{2U \sin(\frac{\delta}{2})}{X}$$

Que mitjançant manipulació trigonomètrica, $\cos \alpha \sin \beta = \frac{1}{2}[\sin(\alpha + \beta) - \sin(\alpha - \beta)]$, con $\alpha = \beta = \frac{\delta}{2}$ queda simplificada com:

$$P = \frac{U^2}{X} \sin(\delta) \quad (2.1)$$

Per altra banda, la potència reactiva Q a l'extrem receptor Q_r és la oposada a la de l'extrem d'enviament Q_s ,

$$Q_s = -Q_r = Q = U \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \frac{2U \sin(\frac{\delta}{2})}{X}$$

Que utilitzant la relació $-2 \sin(\frac{\alpha+\beta}{2}) \sin(\frac{\alpha-\beta}{2}) = \cos \alpha - \cos \beta$, con $\alpha = \delta$ y $\beta = 0$ deriva en:

$$Q = \frac{U^2}{X} \cdot (1 - \cos(\delta)) \quad (2.2)$$

Considerant que δ es molt petit, de (2.1) y (2.2) s'aprecia que la potència activa P depèn principalment de δ mentre que la potència reactiva Q ho fa de la magnitud de la tensió.

2.2.2 Fonaments de compensació paral·lel

Es parla de compensació en paral·lel quan el dispositiu FACTS es connecta en paral·lel amb el sistema. En aquesta situació, el dispositiu treballa equivalentment a una *font de corrent controlable*. La compensació en paral·lel s'utilitza per a modificar les característiques elèctriques intrínseques de la línia de transmissió, amb l'objectiu d'augmentar la potència transmissible i de controlar el perfil de tensió al llarg de la mateixa.

Si es col·loca el compensador al punt mig d'una línia, dividint-la d'aquesta forma en dos segments, es pot controlar la tensió en aquest punt de tal manera que tingui el mateix valor que a l'extrem receptor. L'avantatge d'aquest mètode és l'*increment de la potència màxima transferible*.

Per altra banda, si el dispositiu es col·loca en paral·lel amb la càrrega al final de la línia, permet regular la tensió en aquest extrem. D'aquesta forma es pot *prevenir la inestabilitat de la tensió*, motivada per variacions de càrrega o problemes en la generació o en la mateixa línia.

Es pot modelitzar el cas de disposar d'un dispositiu connectat en paral·lel amb el sistema mitjançant l'esquema de la figura 2.3, on es té com a hipòtesis, al no considerar pèrdues, $|U_s| = |U_r| = |U_m| = U$.

Es parteix de que totes les tensions tenen la mateixa magnitud U i es pren com a angle de referència el corresponent a U_r .



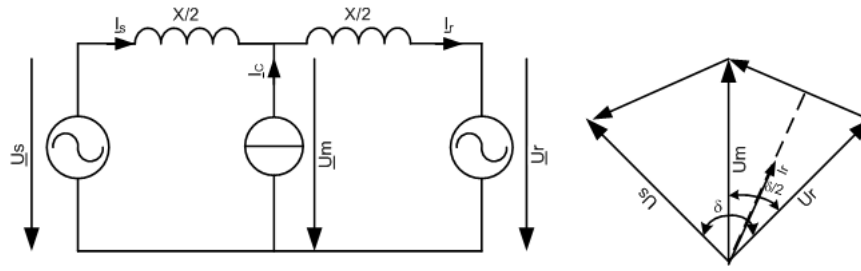


Figura 2.3: Model de dispositiu connectat en paral·lel

$$\underline{U}_r = U, \underline{U}_m = Ue^{j\delta/2}, \underline{U}_s = Ue^{j\delta}$$

Aplicant la trigonometria al diagrama de la figura 2.3, la intensitat que circula per la branca receptora \underline{I}_r pot ser calculada com

$$\underline{I}_r = \frac{4U}{X} \sin\left(\frac{\delta}{4}\right) \cdot e^{j\delta/4}$$

Amb les premisses anteriors, la potència activa resulta

$$\begin{aligned} P &= \Re\{\underline{U}_s \cdot \underline{I}_s^*\} = \Re\{\underline{U}_r \cdot \underline{I}_r^*\} \\ &= \Re\left\{\frac{4U^2}{X} \sin(\delta/4)(\cos(\delta/4) - j \sin(\delta/4))\right\} \\ &= \frac{2U^2}{X} \sin(\delta/2) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Utilitzant un raonament similar per a la component imaginària es pot trobar la expressió per a la potència reactiva Q

$$\begin{aligned} Q &= \Im\{\underline{U}_s \cdot \underline{I}_s^*\} = \Im\{\underline{U}_r \cdot \underline{I}_r^*\} \\ &= \Im\left\{\frac{4U^2}{X} \sin(\delta/4)(\cos(\delta/4) - j \sin(\delta/4))\right\} \\ &= \frac{2U^2}{X} (1 - \cos(\delta/2)) \end{aligned} \quad (2.4)$$

De les equacions (2.3) i (2.4) es dedueix que la potència activa transferible s'incrementa però que, a canvi, es requereix una major aportació de potència reactiva. Aquest fet es deu a que el dispositiu connectat en paral·lel aporta corrent reactiva a la línia amb la finalitat de mantenir el mòdul de la tensió.

2.2.3 Fonaments de compensació serie

La compensació serie (on el dispositiu està situat en serie amb el sistema) és altament efectiva tant controlant el flux de potència en una línia com millorant la estabilitat. Utilitzant compensació serie, es pot disminuir arbitràriament l'impedància de transmissió efectiva entre l'extrem transmissor i el receptor, influint directament en el flux de potència



($P = U^2/X \sin \delta$). Aquesta capacitat innata per a controlar el flux pot ser utilitzada tant per a incrementar la estabilitat en règim transitori com per a amortir les oscil·lacions de potència.

Per altra banda, en grans línies de transmissió, la inductància serie es considerable. Aquest fet provoca que, en cas de circular una gran intensitat, aparegui una gran caiguda de tensió. Amb la finalitat de compensar aquest efecte negatiu, també es pot optar per dispositius FACTS serie.

Partint de la teoria general exposada i descrita a l'apartat 2.2.1, s'observa que la principal diferència entre els esquemes de la figura 2.2 i els de la figura 2.4 radica en un canvi en la impedància de transmissió efectiva. On anteriorment es tenia una impedància X ara es té $X - X_c$ i per tant, comparant amb les expressions (2.1) i (2.2) obtenim:

$$P = \frac{U^2}{X - X_c} \sin(\delta) \quad (2.5)$$

$$Q = \frac{U^2}{X - X_c} (1 - \cos(\delta)) \quad (2.6)$$

De (2.5) i (2.6) es dedueix doncs que reduint la impedància total ($X - X_c$) s'incrementa la potència activa transmissible però que, en contraprestació, cal proporcionar més potència reactiva.

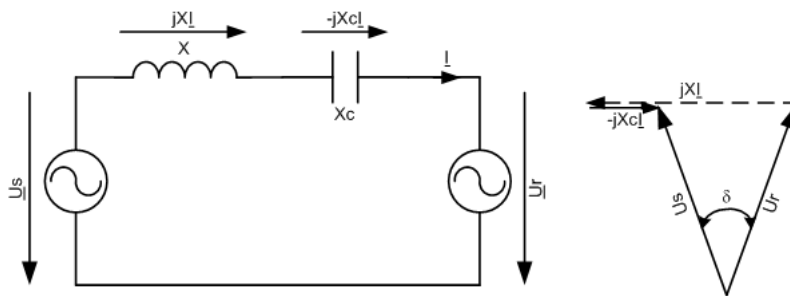


Figura 2.4: Model de dispositiu connectat en serie

2.3 STATCOM

En aquest punt s'estudia en profunditat l'STATCOM, un dels dispositius FACTS paral·lel més versàtils. Un STATCOM es defineix, segons la IEEE [5] com:

STATCOM *Generador síncron i estàtic operat com a compensador estàtic de potència, connectat en paral·lel, la corrent del qual (capacitiva o inductiva) de sortida pot ser controlada independentment de la tensió del sistema AC.*

Així doncs, un *STATic COMPensator* (STATCOM) és una font controlada de potència reactiva. Proporciona control de tensió mitjançant la generació o absorció de potència reactiva en el punt de connexió sense necessitat de grans bobines externes o bancs de condensadors. L'esquema bàsic (així com la seva característica d'operació) es mostra en la figura



2.5. Un STATCOM es construeix utilitzant tiristors amb capacitat de desconnexió com GTO's², IGCT³ o els cada vegada més comuns i extesos IGBT⁴. Per a més informació es pot consultar[4].

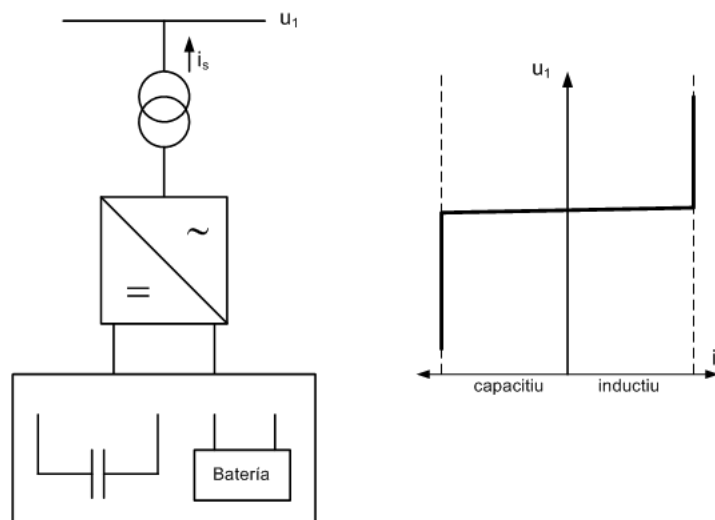


Figura 2.5: Estructura constructiva d'un STATCOM i característica tensió/corrent en regulació de tensió

El condensador carregat actua com a font de corrent contínua, amb la qual s'alimenta el convertidor. Aquest produeix un conjunt de sortides amb tensions trifàsiques controlables i amb la freqüència del sistema AC. Variant l'amplitud de la tensió de sortida \underline{U} , l'intercanvi de potència reactiva entre el convertidor i el sistema AC pot ser controlat. Es poden diferenciar dos modes d'operació:

- **Regulació de tensió.** La tensió es regula entre els límits de la característica tensió/corrent del dispositiu.
- **Control de reactiva.** El flux de reactiva de l'STATCOM es manté constant.

I en regulació de tensió, al seu torn, es poden diferenciar tres condicions de treball:

- Si l'amplitud de la **tensió de sortida \underline{U} s'incrementa por sobre de la tensió \underline{U}_T del sistema AC**, es produeix una corrent avançada, és a dir, el STATCOM és vist com un condensador des del sistema AC i **es genera potència reactiva**.
- Si **es disminueix l'amplitud per sota de la tensió del sistema AC**, resulta una corrent retardada, i el STATCOM és vist per el sistema com un inductor. En conseqüència, **s'absorbeix potència reactiva**.
- Si les amplituds són **iguals, no hi ha intercanvi de potència**.

Des del punt de vista de l'STATCOM, es té la figura 2.6:

on:

² Gate Turn-Off Thyristor

³ Integrated Gate Commutated Thyristor

⁴ Insulated-Gate Bipolar Transistor



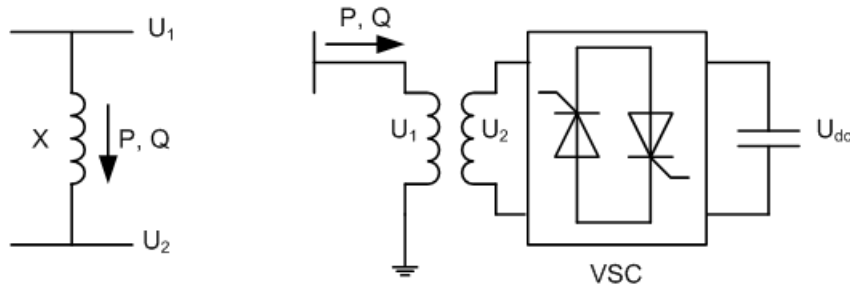


Figura 2.6: Esquema d'operació de l'STATCOM

- U_1 és la tensió de línia de la xarxa.
- U_2 és la tensió de línia a la sortida de l'STATCOM.
- X és la reactància del transformador de connexió i els filtres.
- δ és l'angle de U_1 respecte a U_2 .

Amb l'esquema de la figura 2.6, obtenim les següents expressions per a la transmissió entre l'STATCOM i la xarxa.

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin(\delta) \quad (2.7)$$

$$Q = \frac{U_1(U_1 - U_2 \cos(\delta))}{X} \quad (2.8)$$

En condicions normals d'operació, la tensió U_2 generada pel convertidor en font de tensió està en fase amb U_1 ($\delta = 0$), així que només flueix potència reactiva ($P = 0$). El flux de potència reactiva es pot trobar doncs amb l'expressió 2.9.

$$Q = \frac{U_1(U_1 - U_2)}{X} \quad (2.9)$$

A la pràctica, un convertidor té pèrdues. En el cas del condensador a la banda de contínua, l'energia emmagatzemada es consumiria a causa de les pèrdues internes. Això es soluciona parametrizant el sistema de tal manera que les tensions de sortida del convertidor estiguin retardades un petit angle respecte les tensions del sistema AC. Així s'aconsegueix que el convertidor absorbeixi una petita quantitat de potència activa per a equilibrar les pèrdues intrínseques.

Es poden aplicar algunes variacions sobre l'esquema bàsic que s'ha comentat. La primera consisteix en utilitzar l'ajust de l'angle de fase, mitjançant el qual es pot controlar el consum o la generació de reactiva incrementant o reduint la tensió U_{dc} del condensador i, per tant, també la tensió de sortida \underline{U} . Per altra banda, es pot utilitzar una bateria en substitució del condensador per a que actui de font DC. En aquest cas, el convertidor pot controlar simultàniament l'intercanvi tant de potència reactiva com d'activa. Aquesta és una característica significant que pot ser utilitzada de forma efectiva en aplicacions que requereixin una reducció de les oscil·lacions de potència, pot anivellar els pics de potència i també pot aportar la capacitat de proveir potència de forma ininterrompuda en condicions de càrrega crítica.



Trobar l'expressió per a la potència activa transmesa comporta nombrosos càlculs. Utilitzant les variables definides en la figura 2.7 i aplicant les lleis de Kirchoff a l'esquema, es poden escriure les següents equacions per al cas general:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_T - \underline{U}_2}{jX_2} = \frac{(\underline{U}_1 - j\underline{I}_1 X_1) - \underline{U}_2}{jX_2} \quad (2.10)$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 - \underline{I}_q \quad (2.11)$$

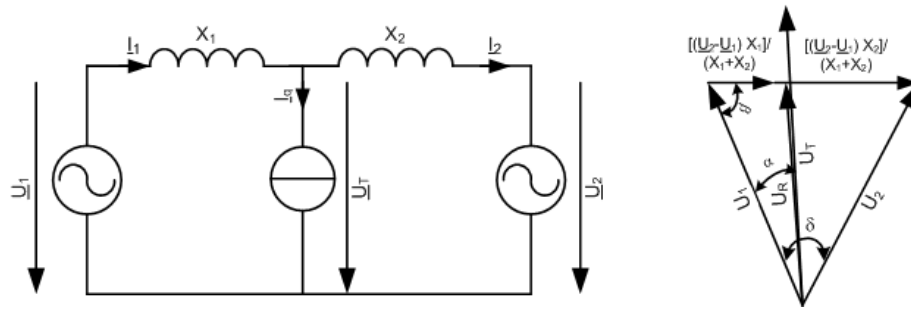


Figura 2.7: Model de funcionament a nivell de xarxa d'un STATCOM i diagrama fasorial

Igualant les equacions 2.10 i 2.11, es pot obtenir una expressió per a \underline{I}_1

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{j(X_1 + X_2)} + \underline{I}_q \frac{X_2}{(X_1 + X_2)}$$

A partir d'aquí, es desenvolupa l'expressió inicial per a \underline{U}_T de la següent forma

$$\begin{aligned} \underline{U}_T &= \underline{U}_1 - j\underline{I}_1 X_1 \\ &= \underline{U}_1 - \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2 X_1}{(X_1 + X_2)} - j\underline{I}_1 \cdot \frac{X_1 X_2}{(X_1 + X_2)} \\ &= \underline{U}_R - j\underline{I}_q \cdot \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} \end{aligned} \quad (2.12)$$

on \underline{U}_R correspon a la tensió terminal del STATCOM si aquest es troba fora de servei, i per tant, si $\underline{I}_q = 0$. Com \underline{I}_q és perpendicular (avançada 90°) respecte \underline{U}_R , és possible expressar \underline{I}_q així

$$\underline{I}_q = jI_q \frac{\underline{U}_R}{U_R}$$

Aleshores l'equació (2.12) es reescriu

$$\underline{U}_T = \underline{U}_R + I_q \frac{\underline{U}_R}{U_R} \cdot \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} = \underline{U}_R \left(1 + \frac{I_q}{U_R} \cdot \frac{X_1 X_2}{(X_1 + X_2)} \right) \quad (2.13)$$

Aplicant el teorema del sinus a la figura 2.7, apareixen dues noves relacions

$$\frac{\sin \beta}{U_2} = \frac{\sin \delta}{|U_1 - U_2|}$$

$$\frac{\sin \alpha}{|U_1 - U_2| \frac{X_1}{(X_1 + X_2)}} = \frac{\sin \beta}{U_R}$$

a partir de les quals s'extreu la fórmula per al $\sin \alpha$

$$\sin \alpha = \frac{U_2 \sin \delta X_1}{U_R (X_1 + X_2)}$$

La fórmula per a la potència activa transmesa s'obté combinant l'ús de la trigonometria amb les expressions trobades fins a aquest punt

$$P = P_1 = P_2 = \frac{U_T U_1}{X_1} \sin \alpha = \frac{U_1 U_2 \sin \delta}{(X_1 + X_2)} \cdot \frac{U_T}{U_R} \quad (2.14)$$

Per a disposar del terme U_R s'aplica el teorema del cosinus al diagrama de la figura 2.7. Per tant,

$$U_R = |U_R| = \left| \frac{U_1 X_2 + U_2 X_1}{(X_1 + X_2)} \right| = \frac{\sqrt{U_1^2 X_2^2 + U_2^2 X_1^2 + 2U_1 U_2 X_1 X_2 \cos \delta}}{(X_1 + X_2)} \quad (2.15)$$

Substituint (2.13) a (2.14) (i amb U_R calculat a 2.15) i realitzant algunes transformacions algebraïques, l'expressió final per al càlcul de la potència activa transmesa queda

$$P = \frac{U_1 U_2 \sin \delta}{(X_1 + X_2)} \cdot \frac{\left| U_R \left(1 + \frac{I_q}{U_R} \cdot \frac{X_1 X_2}{(X_1 + X_2)} \right) \right|}{U_R}$$

$$= \frac{U_1 U_2 \sin \delta}{(X_1 + X_2)} \left(1 + \frac{I_q}{U_R} \cdot \frac{X_1 X_2}{(X_1 + X_2)} \right) \quad (2.16)$$

Com a nota històrica, el primer STATCOM es va instal·lar al 1999, però actualment el seu ús en el sector de la energia distribuïda ja es considera una pràctica comuna. El següent pas en el desenvolupament d'aquest dispositiu és la seva combinació amb l'acomulació d'energia al costat de contínua. Això permet augmentar considerablement el rendiment per a millorar la qualitat de la potència i l'equilibri a la xarxa.

2.3.1 Esquema de control

A la figura 2.8 es mostra l'esquema de blocs del control per un STATCOM. Aquest consta de quatre grans parts:

- Un PLL (*Phase-Locked Loop*), que es sincronitza amb el component de seqüència positiva de la tensió trifàsica primària U_1 . La sortida del PLL (l'angle $\theta = \omega t$) s'utilitza per a calcular els components dq (eix directe i eix de quadratura)⁵ tant de les tensions com de les corrents del sistema AC (etiquetats com U_d , U_q , I_d i I_q al diagrama de la figura 2.8).

⁵Veure annex A



- Sistemes encarregats de mesurar els components d i q de les tensions i de les corrents del sistema AC a ser controlades així com de la tensió de la banda de contínua, U_{dc} .
- Unllaç de regulació extern que consisteix d'un regulador de tensió AC i un regulador de tensió DC. La sortida del regulador AC és la corrent de referència I_{qref} per al regulador de corrent (I_q és la corrent en quadratura amb la tensió, responsable del control de flux de reactiva). La sortida del regulador DC és la corrent de referència I_{pref} per al regulador de corrent (I_d és la corrent en fase amb la tensió, responsable del control de flux d'activa).
- Unllaç de regulació interna que consisteix en un regulador de corrent. Aquest controla la magnitud i la fase de la tensió generada per el convertidor PWM (U_{2d} i U_{2q}) a partir de les corrents de referència I_{qref} i I_{pref} produïdes respectivament per els reguladors de tensió DC i AC (en mode de control de tensió). El regulador de corrent és assistit per un regulador que fa calcula la sortida de tensió necessària U_2 a partir de la mesura de U_1 i la reactància del transformador.

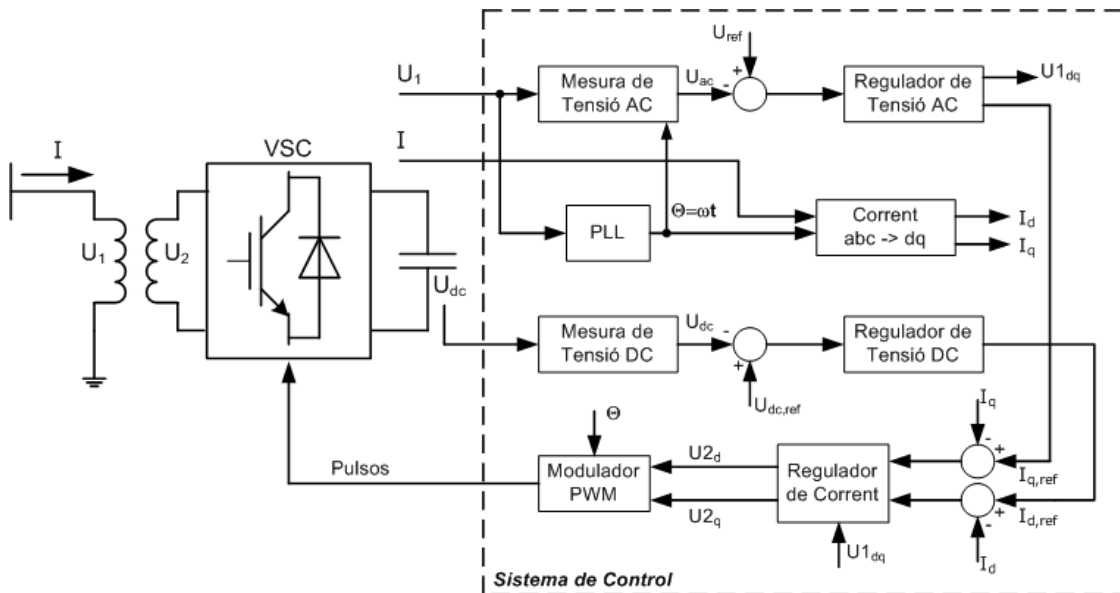


Figura 2.8: Esquema de control d'un STATCOM

2.4 SSSC

En aquest punt s'estudia en profunditat l'SSSC, un dels dispositius FACTS serie. Un SSSC es defineix, segons la IEEE [5] com:

SSSC *Generador estàtic síncron sense alimentació elèctrica externa, utilitzat com a compensador serie, la tensió de sortida del qual està en quadratura amb (i controlable de forma independent de) la corrent de línia, amb la intenció d'incrementar o disminuir la caiguda de tensió reactiva global a la línia i, conseqüentment, controlar la potència elèctrica transmesa. Un SSSC pot incloure emmagatzematge o absorció d'energia per a millorar el comportament dinàmic del sistema de potència en els transitoris a través de compensacions temporals a la*



potència activa, per a incrementar o disminuir de forma momentània la caiguda de tensió activa (resistiva) a la línia.

Un SSSC és un compensador serie basat en convertidors que actua com una font de tensió. L'esquema constructiu d'aquest dispositiu, similar a l'STATCOM (Fig. 2.5) però connectat en serie es representa a la figura 2.9, i el seu principi de funcionament es mostra a la figura 2.10.

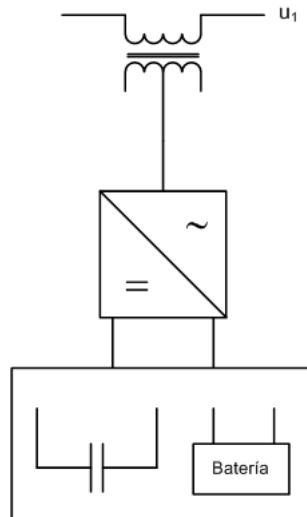


Figura 2.9: Estructura constructiva d'un Compensador Serie Estàtic Síncron (SSSC)

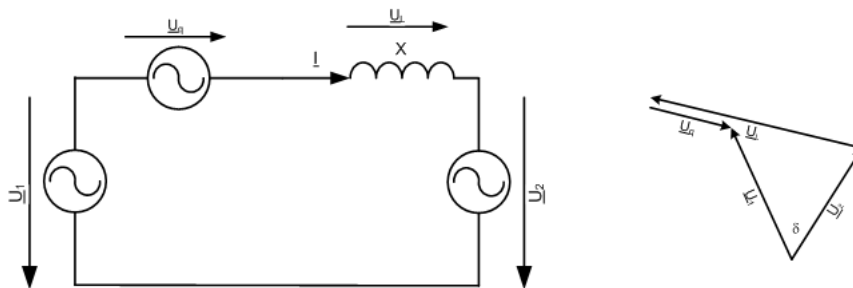


Figura 2.10: Esquema d'un Compensador Serie Estàtic Síncron (SSSC)

El diagrama fasorial mostra com la font de tensió incrementa la magnitud de la tensió que cau a la inductància (és a dir, a la línia) i per tant, incrementa la magnitud de la corrent I . Això té com a resultat un increment net en la transmissió de potència. De fet, amb el que s'ha exposat fins aquí, es tracta del mateix efecte que donaria un condensador col·locat en sèrie. Si la tensió de sortida de la font \underline{U}_q es varia en funció de la corrent I , s'aconsegueix precisament aquesta compensació:

$$\underline{U}_q = -jX_C I$$

on X_C és la reactància del condensador equivalent. No obstant, amb una font de tensió és possible mantenir una compensació de tensió constant encara que la corrent de línia



sigui variable, al ser aquesta tensió controlable de manera independent de la corrent. Per tant, el SSSC pot tant incrementar com reduir la transmissió de potència indiferentment, senzillament modificant la tensió AC injectada.

Si es parteix del fet que, al tractar-se d'una font de reactiva, el fasor \underline{U}_q és perpendicular a la corrent de línia, es pot trobar l'expressió analítica per a la intensitat que circula com

$$\begin{aligned} \underline{I} &= \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_q - \underline{U}_2}{jX} \\ &= \frac{1}{jX} \left((\underline{U}_1 - \underline{U}_2) - U_q \cdot \frac{(\underline{U}_1 - \underline{U}_2)}{|\underline{U}_1 - \underline{U}_2|} \right) \\ &= \frac{j(U_2 - U_1)}{X} \left(1 - \frac{U_q}{|\underline{U}_1 - \underline{U}_2|} \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

El terme $(\underline{U}_1 - \underline{U}_2)$ representa la diferència fasorial entre \underline{U}_1 i \underline{U}_2 . Sense font de tensió afegida, aquesta coincidiria amb la caiguda de tensió a la reactància X . El fasor de la tensió injectada \underline{U}_q té la mateixa direcció que la caiguda de tensió al ser una font de reactiva, i es determina mitjançant $(\underline{U}_1 - \underline{U}_2)/|\underline{U}_1 - \underline{U}_2|$. Si es multiplica per la magnitud de la injecció de tensió U_q es descriu matemàticament el fasor \underline{U}_q . Escollint adequadament \underline{U}_2 com a fasor de referència, es té $\underline{U}_2 = U_2$ i $\underline{U}_1 = U_1(\cos\delta + j\sin\delta)$.

Tenint en compte les premisses descrites, s'obté la característica de transmissió de la següent equació:

$$P_1 = P_2 = P = \Re\{\underline{U}_1 \underline{I}^*\} = \Re\{\underline{U}_2 \underline{I}^*\} = U_2 \cdot \Re\{\underline{I}\} \quad (2.18)$$

Tenint en compte que

$$|\underline{U}_1 - \underline{U}_2| = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2\cos\delta} \quad (2.19)$$

i combinat amb (2.17) i (2.18) s'obté la següent expressió per a la potència activa transmesa

$$P = \frac{U_1U_2 \sin\delta}{X} \left(1 - \frac{U_q}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2\cos\delta}} \right). \quad (2.20)$$

Conseqüentment, la potència transmesa P es funció de la tensió injectada U_q .

Si les magnituds de les tensions en els extrems de línia són iguals ($U_1 = U_2 = U$), (2.20) es simplifica en

$$P = \frac{U^2}{X} \sin(\delta) - \frac{U}{X} U_q \cos(\delta/2). \quad (2.21)$$

2.4.1 Esquema de control

Com que l'SSSC no utilitza cap font d'activa, la tensió injectada ha d'estar en quadratura amb la corrent de línia. Variant la magnitud U_q de la tensió injectada en quadratura amb la corrent, l'SSSC actua com un compensador de reactància variable, tant capacitiu com inductiu. Si $U_q > 0$, és capacitiu i si $U_q < 0$ és inductiu.



La variació de la tensió injectada s'aconsegueix a través del VSC connectat al secundari del transformador d'acoblament, que utilitza elements d'electrònica de potència. El condensador connectat a la banda DC actua com a font de tensió. Una petita quantitat de potència activa és extreta de la línia per a mantenir el condensador carregat i per a compensar les pèrdues, de tal manera que la tensió injectada U_s és pràcticament 90 graus desfasada respecte I . En el diagrama de blocs de control de la figura 2.11, $U_{d,conv}$ i $U_{q,conv}$ representen els components de la tensió del convertidor U_{conv} que estan respectivament en fase i en quadratura amb la corrent.

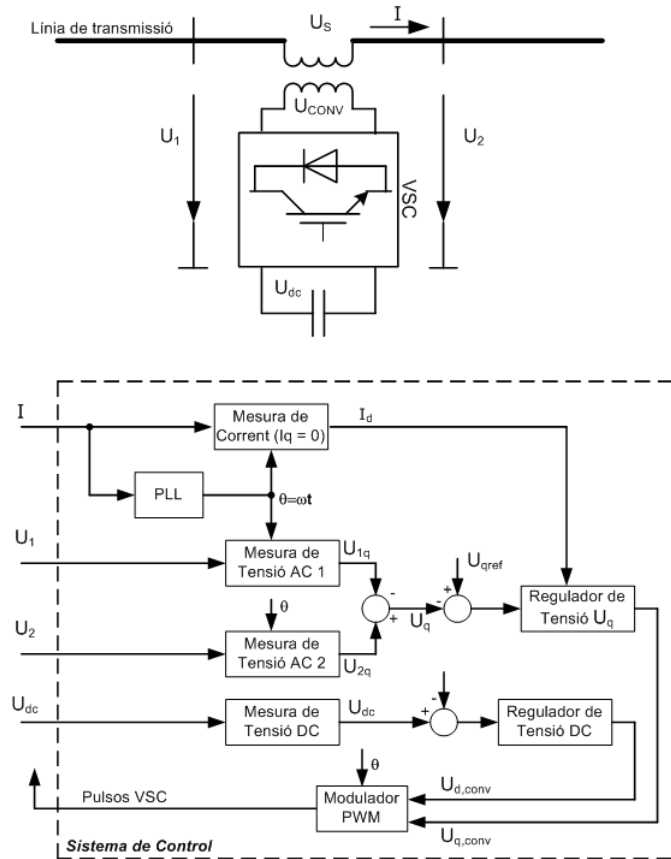


Figura 2.11: Esquema de control d'un SSSC

El sistema de control (Fig. 2.11) és format per:

- Un PLL (*phase-locked loop*) que es sincronitza amb la component en seqüència positiva de la corrent I . La sortida del PLL (l'angle $\theta = \omega t$) s'utilitza per a calcular els components dq (eix directe i eix de quadratura)⁶ tant de les tensions com de les corrents del sistema AC (etiquetats com U_d , U_q , I_d i I_q al diagrama de la figura 2.11).
- Sistemes de mesura dels components q de les tensions U_1 i U_2 (U_{1q} i U_{2q}) així com la tensió a la banda DC U_{dc} .
- Reguladors AC i DC que calculen quins han de ser els dos components de la tensió del convertidor ($U_{d,conv}$ i $U_{q,conv}$) per tal d'obtenir la tensió DC ($V_{dc,ref}$) i la tensió injectada ($V_{q,ref}$) desitjades.

⁶Veure annex A



Capítol 3

Cas d'estudi

Per a realitzar l'anàlisi de l'aportació dels dispositius de transmissió AC flexibles per al suport a la xarxa elèctrica s'ha dissenyat la següent xarxa de prova (Fig. 3.1), basada en aportacions de [26, 8, 12, 27].

Aquesta és una xarxa d'alta presència eòlica (100 MW dels 350 MW generats són d'aquesta font) i la tecnologia del parc eòlic és de generadors d'inducció de gàbia d'esquirol.

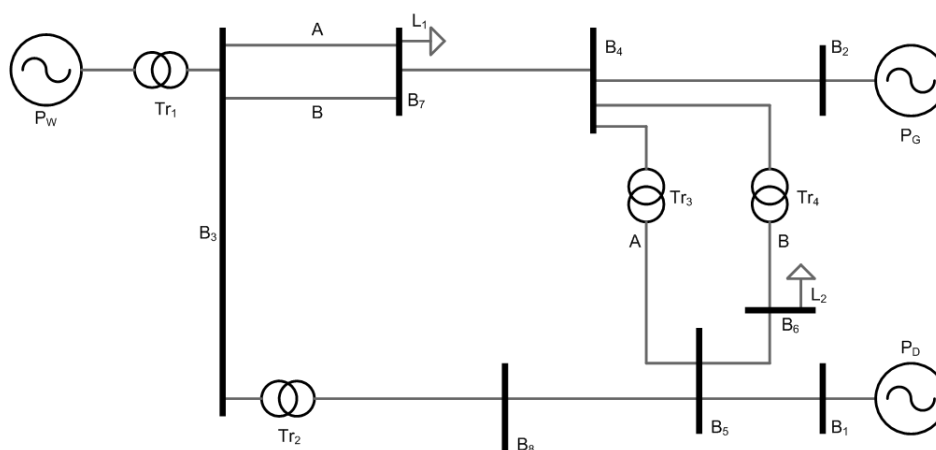


Figura 3.1: Xarxa d'estudi

Els paràmetres dels diferents components que formen la xarxa base són els que es detallen a continuació, i són basats en dades de [28] i [27]:

Paràmetres de les línies

- Resistència: $0,2758 \Omega/km$.
- Inductància: $3,2 mH/km$.
- Capacitància: $8,297 nF/km$.

Longituds, tensions i potències nominals de les línies

- Línia 1-5: 25 km, 400 kV i 200 MVA.
- Línia 2-4: 25 km, 220 kV i 300 MVA.
- Línia 3-7 (A): 25 km, 220 kV i 50 MVA.
- Línia 3-7 (B): 25 km, 220 kV i 50 MVA.
- Línia 3-8: 150 km, 400 kV i 100 MVA.
- Línia 4-5 (A): 50 km, 400 kV i 175 MVA.
- Línia 4-5 (B): 50 km, 400 kV i 175 MVA.
- Línia 4-7: 100 km, 220 kV i 100 MVA.
- Línia 5-8: 25 km, 400 kV i 100 MVA.

Per a il·lustrar la geografia de la xarxa, es disposa del següent esquema (Fig. 3.2):

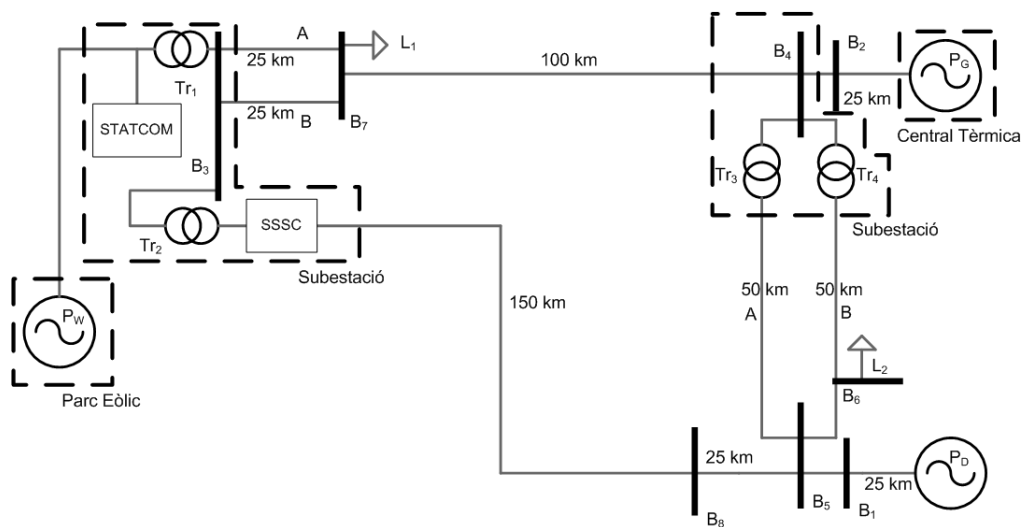


Figura 3.2: Geografia i distribució de la xarxa d'estudi

Generació

- G1: Es tracta de la xarxa elèctrica, el nus *infinít*.
- G2: Generador síncron que proporciona una potència de 250MW.
- G3: Parc eòlic amb generadors d'inducció de gàbia d'esquirol, dividits en dos sub-parcs de 50MW de potència, per a sumar un total de 100MW de potència màxima.



Aerogeneradors

- Generadors d'inducció de gàbia d'esquirol (velocitat fixa).
- Velocitat nominal del vent de funcionament: 9 m/s .
- Velocitat nominal del rotor: 1.000 rpm .
- *Pitch*: Coeficients del control de pitch k_p i k_i , 5 i 25, respectivament. El màxim angle de *pitch* és de 45° a una velocitat de gir màxima de 2° per segon.

Transformadors

- Tr1: De 25 kV a 220 kV , pèrdues negligibles.
- Tr2: De 220 kV a 400 kV , pèrdues negligibles.
- Tr3: De 220 kV a 400 kV , pèrdues negligibles.
- Tr4: De 220 kV a 400 kV , pèrdues negligibles.

3.1 Funcionament a velocitat nominal del vent

A la figura 3.3 es representen els fluxos de potència activa que tenen lloc en el sistema en funcionament normal o nominal.

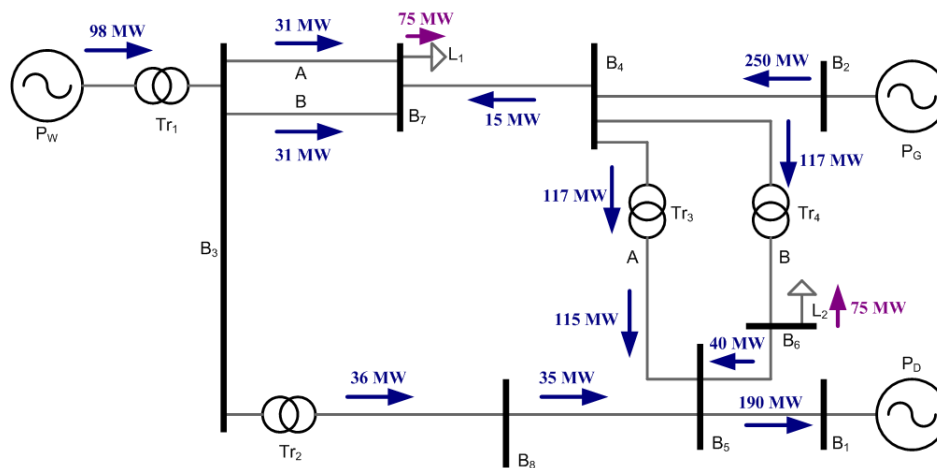


Figura 3.3: Flux de potència nominal al cas d'estudi

Es considerarà com a funcionament nominal de la xarxa el cas en que la velocitat del vent es troba al voltant de la velocitat nominal de funcionament. En aquest escenari, els dos generadors (P_G i P_W) entreguen la seva potència màxima i el flux cap a la xarxa general (P_D) és de 190 MW . Cap de les línies es troba sobrecarregada i el funcionament és estable i donant cobertura a les dues càrregues que té la xarxa d'estudi.



3.2 Resposta davant un petit increment de la velocitat del vent

Com s'ha comentat anteriorment, un dels problemes d'integració (apartat 1.3) dels generadors d'inducció de gàbia d'esquirol és que quan s'acceleren demanden energia reactiva i això pot portar a una reacció cíclica que acabi amb el col·lapse de la tensió al punt de connexió. Així doncs, s'analitza la reacció en el bus de connexió del parc (B_3) en cas que la velocitat del vent s'incrementi lleugerament, de 8 m/s a 11 m/s. Aquesta és una velocitat de funcionament vàlida per aquest sistema i serà utilitzada per a valorar la resposta davant de faltes.

La simulació transcorre de la següent manera:

1. Dels 0s als 5s, la xarxa s'inicialitza, i per aquest motiu, no es representa gràficament aquest interval de temps. La velocitat del vent és estable i de 8 m/s per a ambdós sub-parcs.
2. Dels 5s als 7s, la velocitat del vent segueix a 8 m/s.
3. Als 7s, la velocitat d'un dels sub-parcs comença a augmentar fins a 11 m/s, que assolirà als 9s.
4. Als 9s, la velocitat de l'altre sub-parc augmenta fins a 11 m/s i tarda dos segons a fer-ho, fins als 11s.
5. A partir dels 11s i fins al final de la simulació, la velocitat del vent és constant i igual a 11 m/s.

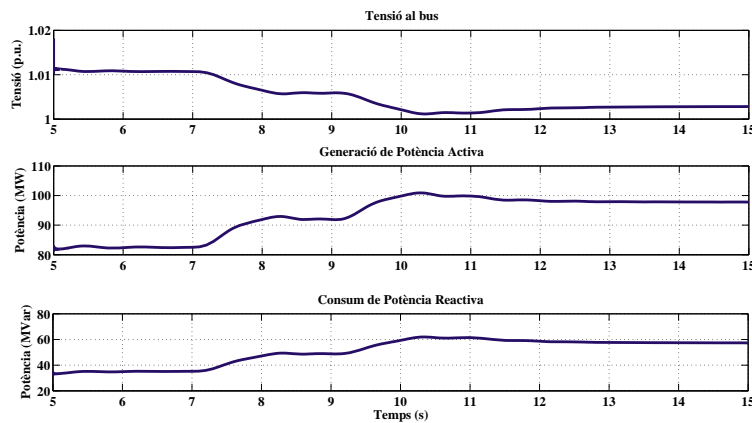


Figura 3.4: Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant un petit increment de la velocitat del vent

La figura 3.4 il·lustra els resultats de la simulació en el bus més crític (B_3), situat just a la sortida del parc eòlic. Els 5 primers segons de simulació no es representen perquè al tractar-se de la inicialització, presenta transitoris que no són objectiu d'estudi d'aquest projecte. Tot seguit es resumeixen els resultats de la simulació i les implicacions a la xarxa a partir del que s'observa en la resposta de la figura 3.4, seguint els passos de simulació definits anteriorment.



1. L'interval de 0s a 5s no es representa per tractar-se de la inicialització.
2. Dels 5s als 7s, la tensió al bus es manté en termes raonables (lleugerament per sobre d'1 p.u.). El parc eòlic genera 82 MW, una potència inferior a la nominal, i el consum de reactiva és de poc més de 30 MVar.
3. Un dels sub-parcs comença a accelerar-se als 7s. Això es tradueix en un increment de la potència activa transmesa a la xarxa (fins a 91 MW), un augment del consum de reactiva i una disminució de la tensió al bus a causa d'aquest augment. La xarxa és capaç d'adaptar-se i subministrar aquesta diferència.
4. Als 9s, l'altre sub-parc també s'accelera. Les conseqüències d'aquest fet són, com al punt anterior, increment de la potència activa transmesa, increment de la potència reactiva consumida i decrement de la tensió al bus.
5. Un cop el parc sencer rep velocitats del vent d'11 m/s, s'arriba a valors nominals de subministre de potència ($\simeq 100$ MW), el consum de reactiva s'estabilitza a nivells sensiblement majors que a l'inici i la tensió al bus B_3 ha disminuït en 0.01 p.u.

Així doncs, es comprova que la xarxa i el parc són capaços d'assumir un petit increment en la velocitat del vent. Un altra forma de comprovar-ho és veure quines han estat les observacions en el parc eòlic. A la figura 3.5, es pot veure que les velocitats dels rotors dels molins d'ambdós parcs han augmentat però en quantitats molt petites, i és precisament a aquest fet al que es deu el major consum de reactiva. La velocitat està en p.u. respecte la nominal, que és de 1.000 rpm. Per altra banda, es comprova l'augment descrit de la velocitat del vent i la resposta del controlador d'angle de pitch, que també hi aporta un lleuger control.

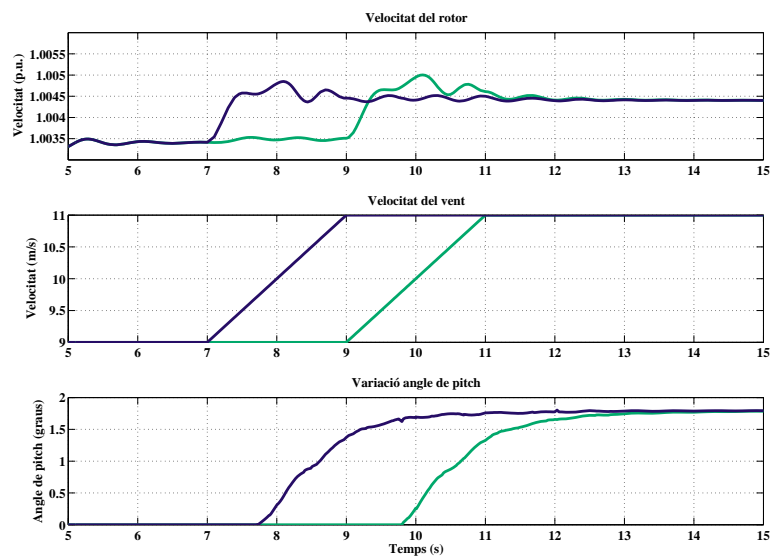


Figura 3.5: Evolució de velocitat del rotor (a), velocitat del vent (b) i angle de pitch (c) a ambdós sub-parcs davant un petit increment de la velocitat del vent

El sistema eòlic es manté estable sota aquestes condicions.



3.3 Resposta davant un gran increment de la velocitat del vent

Seguint amb el mateix problema d'integració (apartat 1.3) que a l'apartat anterior, s'analitza la reacció en el bus de connexió del parc (B_3) en cas que la velocitat del vent s'incrementi ostensiblement, de 8 m/s a 16 m/s. Aquesta és una velocitat del vent que depenent de la construcció i els paràmetres de seguretat podria obligar a desconnectar els aerogeneradors per protecció.

La simulació transcorre de la següent manera:

1. Dels 0s als 5s, la xarxa s'inicialitza, i per aquest motiu, no es representa gràficament aquest interval de temps. La velocitat del vent és estable i de 8 m/s per a ambdós sub-parcs.
2. Dels 5s als 7s, la velocitat del vent segueix a 8 m/s.
3. Als 7s, la velocitat d'un dels sub-parcs comença a augmentar fins a 16 m/s, que assolirà als 14s.
4. Als 9s, la velocitat de l'altre sub-parc augmenta fins a 16 m/s i tarda 7 segons a fer-ho, fins als 16s.
5. A partir dels 16s i fins al final de la simulació, la velocitat del vent és constant i igual a 16 m/s.

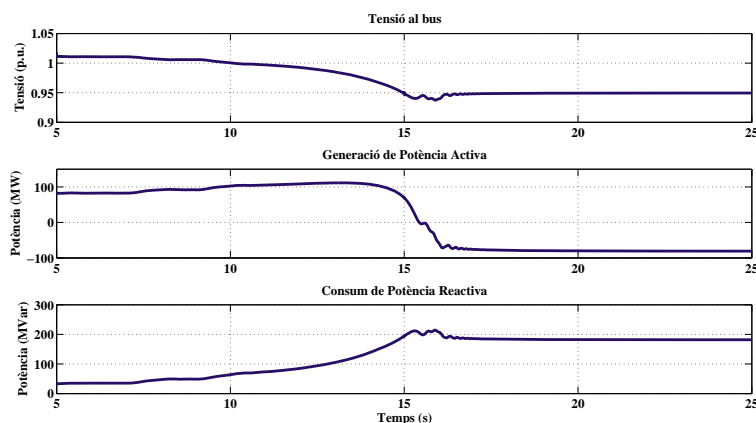


Figura 3.6: Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant un gran increment de la velocitat del vent

La figura 3.6 mostra els resultats de la simulació al bus més crític (B_3), que és el punt de connexió del parc eòlic. Els 5 primers segons de simulació no es representen perquè al tractar-se de la inicialització, presenta transitoris que no són objectiu d'estudi d'aquest projecte. Tot seguit es resumeixen els resultats de la simulació i les implicacions a la xarxa a partir del que s'observa en la resposta de la figura 3.6, seguint els passos de simulació definits anteriorment. La figura 3.7 representa l'evolució de les variables del parc eòlic, que ajuden a veure més gràficament quines són les conseqüències d'un gran augment de la velocitat del vent al parc.



1. Dels 0s als 5s, la xarxa s'inicialitza, i per aquest motiu, no es representa gràficament aquest interval de temps. La velocitat del vent és estable i de 8 m/s per a ambdós sub-parcs.
2. Dels 5s als 7s, la velocitat del vent segueix a 8 m/s.
3. Als 7s, la velocitat d'un dels sub-parcs comença a augmentar fins a 16 m/s, que assolirà als 14s. Aquest gran augment fa que comenci una pujada ostensible del consum de reactiva i corresponentment, una baixada preocupant de la tensió al bus B_3 .
4. Als 9s, la velocitat de l'altre sub-parc augmenta fins a 16 m/s i tarda 7 segons a fer-ho, fins als 16s. En aquest interval es suma als requeriments de l'increment en l'altre sub-parc i tot plegat deriva en un col·lapse del sistema eòlic, que provoca que passi a actuar com a motor (consumint potència activa). L'angle de pitch no pot variar prou ràpid com per evitar-ho (Fig. 3.7) i el rotor no deixa d'accelerar-se.
5. A partir dels 16s i fins al final de la simulació, aquesta no té massa sentit, donat el fet que el sistema eòlic ha deixat de comportar-se com a generador per fer-ho com a motor i, al no contemplar les proteccions de velocitat, el rotor està girant a velocitats que no tenen sentit a la pràctica i que acabarien implicant la destrucció de l'aerogenerador.

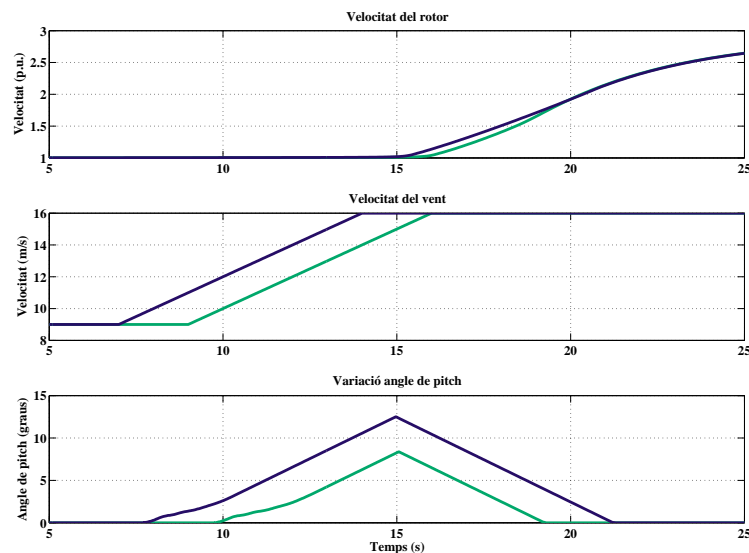


Figura 3.7: Evolució de velocitat del rotor (a), velocitat del vent (b) i angle de pitch (c) a ambdós sub-parcs davant un gran increment de la velocitat del vent

En conclusió, en aquest cas, que representaria una ràfega sostinguda de fort vent, el sistema no seria capaç d'aguantar l'esforç i el parc eòlic s'hauria d'acabar desconnectant per evitar un col·lapse global del sistema.

3.4 Resposta davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)

En aquest apartat s'analitza la resposta de la xarxa elèctrica i del parc eòlic davant una contingència (una falta) a la línia 4-5 (A) mentre es produeix, s'aïlla i es restableix. En



primer lloc, es realitza l'estudi de flux de potència mentre la línia on es produeix la falta es troba desconnectada (Fig. 3.8). En aquest es veu que:

- La línia que queda activa, 4-5 (B), es sobrecarrega a 218 MW, 43 MW més dels nominals.

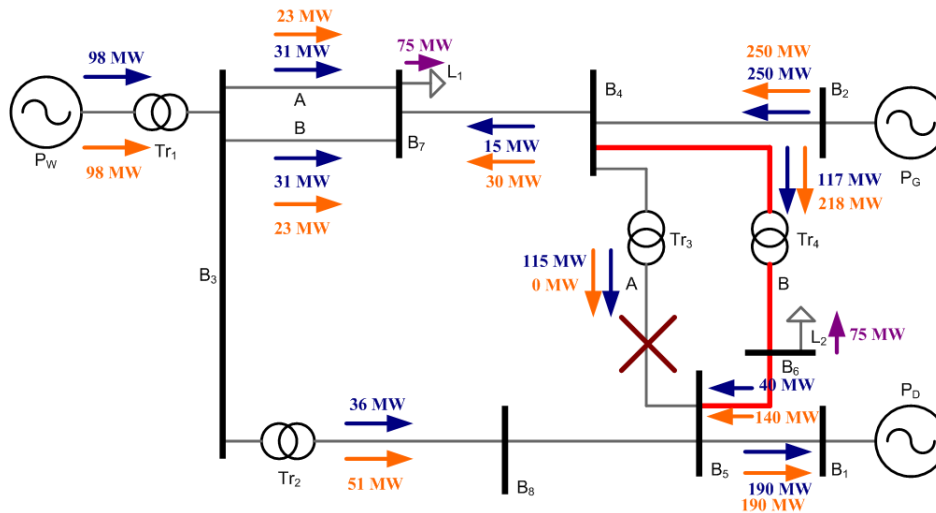


Figura 3.8: Flux de potència després de la pèrdua de la línia 4-5 (A)

Es procedeix a descriure la simulació realitzada. Els aerogeneradors reben una velocitat del vent de 11 m/s des dels 7s de simulació, accelerant des dels 8 m/s inicials. A partir d'aquí:

1. Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
2. Als 10 segons es produeix una falta a la línia 4-5 (A) durant 10 cicles, és a dir, durant 0,2s.
3. Als 10,2 s, les proteccions s'activen i s'aïlla la falta, amb la corresponent pèrdua de la línia implicada.
4. Als 14 s, es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 4-5 (A)) i es segueix la simulació fins als 20s.

La figura 3.9 mostra les conseqüències al bus de connexió del parc eòlic, que és lluny del lloc on es produeix la falta. Tot seguit s'analitzen els efectes de la contingència sobre la línia 4-5 (A) al punt de connexió del parc (Fig. 3.9) així com les implicacions que el canvi i l'aïllament comporten als fluxos de les línies que es veuen més afectades (Fig. 3.10).

1. Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
2. Quan als 10s es produeix la falta, les conseqüències arriben al bus B_3 en forma d'una baixada de tensió important, fins als 0,5 pu. Les potències pateixen les mateixes conseqüències. Els fluxos de les línies representades a la figura 3.10 es veuen afectats també per la falta.



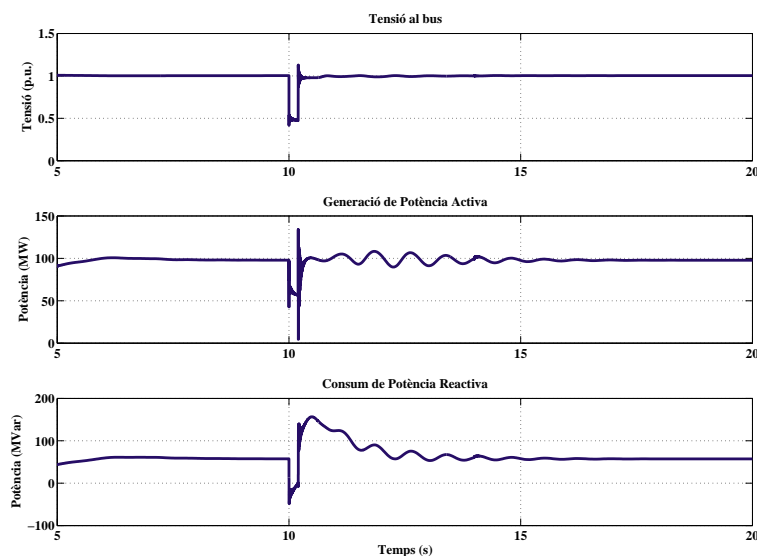


Figura 3.9: Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)

3. Als 10,2 s, quan la falta és aïllada, la tensió es recupera ràpidament als nivells de funcionament normal, la potència activa generada oscil·la lleugerament fins a recuperar la seva generació nominal i si bé el consum de reactiva augmenta sensiblement just després de la falta, en pocs segons es torna a trobar als nivells d'abans de la falta. El flux a la línia afectada (4-5 (A), figura 3.10 (a)) es redueix a zero i l'augment l'absorbeixen entre la línia (4-5 (B) i la 3-8, figures 3.10 (b) i (c) respectivament). Concretament, la línia 4-5 (B) es sobrecarrega per sobre dels seus valors límit.
4. Als 14 s, quan es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 4-5 (A)), els efectes sobre el bus B_3 són insignificants, i les línies recuperen els seus fluxos pre-falta.

D'altra banda, també resulta interessant investigar què passa amb la intensitat que circula a la línia de connexió del parc. La figura 3.11 mostra l'evolució d'aquesta. En primer lloc, s'observa que des de l'inici, la intensitat és lleugerament més elevada de la nominal, que es situaria a 1 pu. En segona instància, en produir-se la falta, la intensitat assoleix pics de 2 pu, que no són excessius al tenir una duració molt petita, però si que és perillós tot l'interval de temps en el que està entre 1,2 i 1,8 p.u., que podria fer saltar les proteccions del propi parc o de la línia.

En definitiva, una falta a la línia 4-5 (A), amb la posterior pèrdua i recuperació de la línia és assumible per al parc edic ja que recupera l'estat de funcionament normal sense problemes. On si apareixen noves problemàtiques és en la línia 4-5 (B), que es sobrecarrega considerablement després de la falta, la qual cosa la faria desconectar i acabaria portant problemes a la xarxa sencera, que cauria.



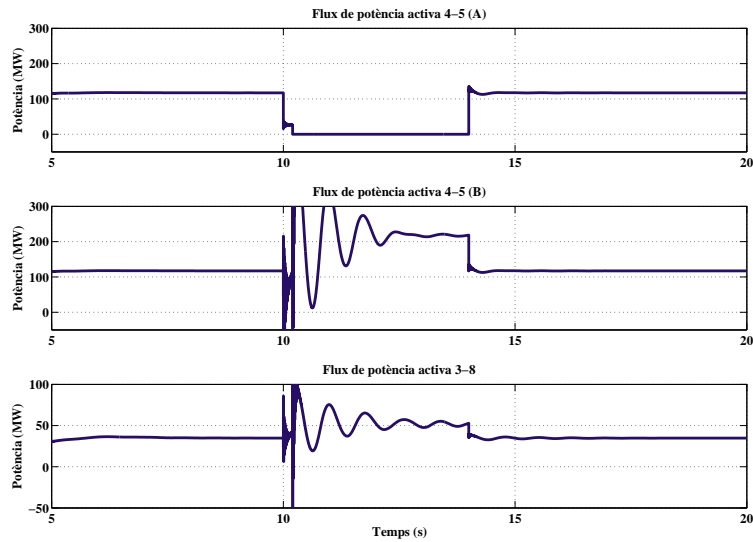


Figura 3.10: Evolució de la transmissió de potència a la línia 4-5 (A) (a), a la línia 4-5 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)

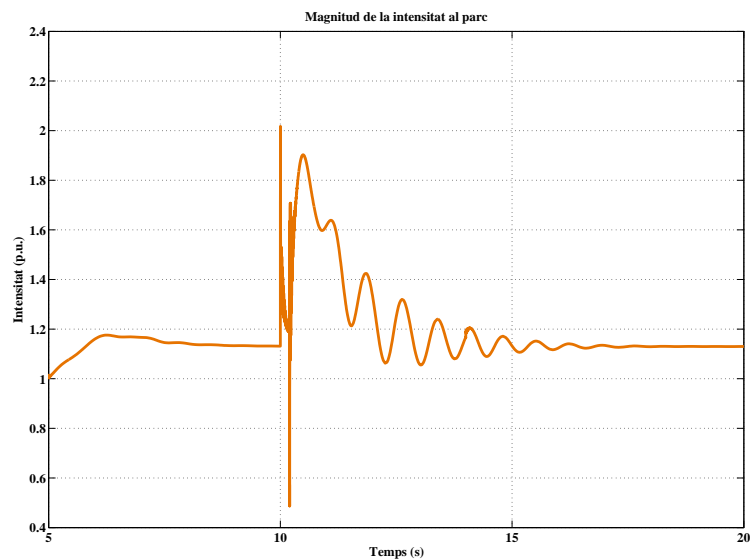


Figura 3.11: Evolució de la circulació d'intensitat a la línia de connexió del parc davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)



3.5 Resposta davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)

En aquest apartat s'analitza la resposta de la xarxa elèctrica i del parc eòlic davant una contingència (una falta) a la línia 3-7 (B) mentre es produeix, s'aïlla i es restableix. En primer lloc, es realitza l'estudi de flux de potència mentre la línia on s'ha produït la falta es troba desconnectada (Fig. 3.12). En aquest es veu que:

- Els fluxos de potència a les línies 3-7 (A), 4-7, 3-8 i 8-5 s'inverteixen, així com també al parc eòlic.
- Després de la falta i l'aïllament, les conseqüències han estat nefastes. El parc eòlic de generadors d'inducció de gàbia d'esquirol ha deixat de comportar-se com a generador per passar-ho a fer com a motor, la qual cosa ha derivat en la inversió dels fluxos i en una disminució del 90% de l'aportació de potència activa a la xarxa al punt P_D . En un cas real, les proteccions del parc l'haguessin desconnectat, que tampoc interessa.

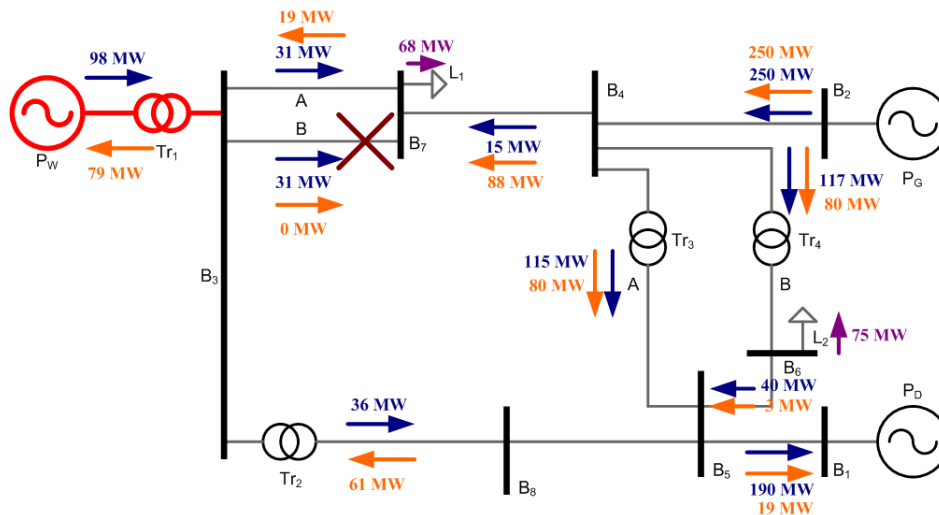


Figura 3.12: Flux de potència després de la pèrdua de la línia 3-7 (B)

Es procedeix a descriure la simulació realitzada. Els aerogeneradors reben una velocitat del vent de 11 m/s des dels 7s de simulació, accelerant des dels 8 m/s inicials. A partir d'aquí, i de la mateixa forma que a l'apartat anterior:

1. Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
2. Als 10 segons es produeix una falta a la línia 3-7 (B) durant 10 cicles, és a dir, durant 0,2s.
3. Als 10,2 s, les proteccions s'activen i s'aïlla la falta, amb la corresponent pèrdua de la línia implicada.
4. Als 14 s, es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 3-7 (B)) i es segueix la simulació fins als 20s.

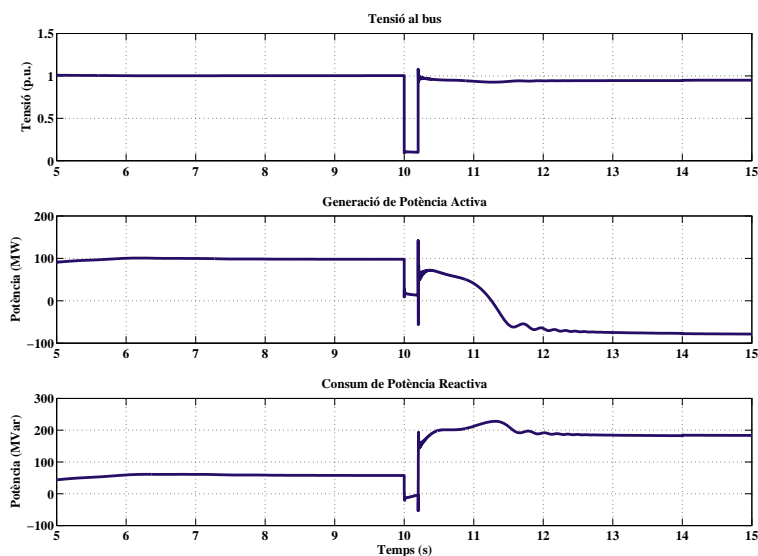


Figura 3.13: Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)

La figura 3.13 mostra les conseqüències al bus de connexió del parc eòlic, que és molt proper al lloc on es produeix la falta. Tot seguit s'analitzen els efectes de la contingència sobre la línia 3-7 (B) al punt de connexió del parc (Fig. 3.13) així com les implicacions que el canvi i l'aïllament comporten als fluxos de les línies que es veuen més afectades (Fig. 3.14).

1. Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
2. Quan als 10s es produeix la falta, les conseqüències arriben al bus B_3 en forma d'una baixada de tensió crítica i propera als 0 pu. Les potències pateixen les mateixes conseqüències i els transitoris derivats. Els fluxos de les línies representades a la figura 3.14 es veuen afectats també per la falta.
3. Als 10,2 s, quan la falta és aïllada, la tensió es recupera però no ho fa fins a nivells de funcionament normal, sinó que es queda per sota dels 0,95 p.u., i ho fa durant un interval de temps força llarg. L'augment de consum de potència reactiva accentua aquest fet i això porta a un col·lapse final que fa no tant sols impossible la recuperació dels nivells de generació de potència sinó que també al funcionament invers dels generadors, que passen a actuar com a motors. En aquest estat, consumeixen potència activa a més de reactiva. A les línies de la figura 3.14 s'observa com cau el flux de la línia afectada per la contingència ((b)) i com les línies 3-7 (A) i 3-8 veuen invertit el flux que transporten a causa de la cadena d'events descrita.
4. Als 14 s, quan es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 3-7 (B)), els efectes de la contingència sobre el sistema ja són irreversibles sense actuació externa a la xarxa.

D'altra banda, també resulta interessant investigar què passa amb la intensitat que circula a la línia de connexió del parc. La figura 3.15 mostra l'evolució d'aquesta. En primer lloc,



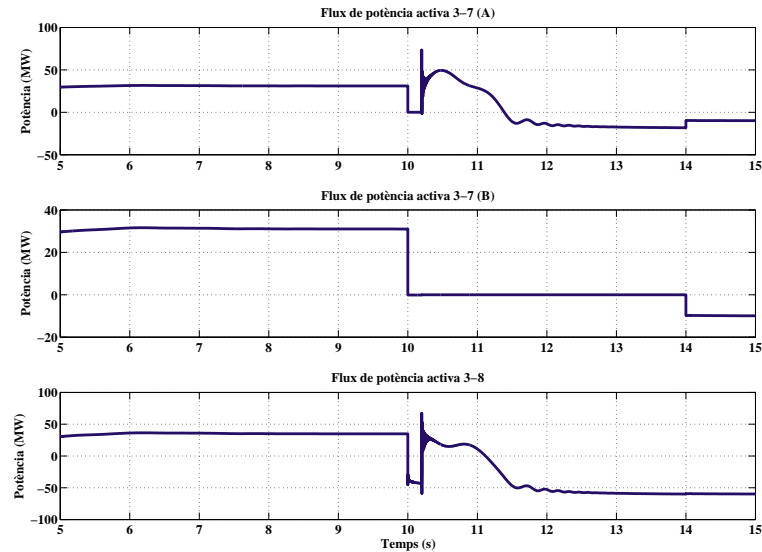


Figura 3.14: Evolució de la transmissió de potència a la línia 3-7 (A) (a), a la línia 3-7 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)

s'observa que des de l'inici, la intensitat és lleugerament més elevada de la nominal, que es situaria a 1 pu. En segona instància, en produir-se la falta, la intensitat assoleix pics de 3 pu, que no són excessius al tenir una duració molt petita, però un cop aïllada la falta s'ha vist que s'entra en un funcionament incorrecte i la intensitat passa a ser completament excessiva al mantenir-se i establir-se en més de 2 p.u., és a dir, a més del doble de la nominal, de forma permanent. Aquest fet faria saltar les proteccions i per tant, la simulació no té sentit a la realitat després de produir-se la falta.

Tal com es pot comprovar i veure al flux de potència descrit a la figura 3.12, els fluxos han canviat i el parc eòlic no funciona correctament. Vist des del punt de vista del parc, el consum de reactiva elevat post-falta (Fig. 3.16 (b)) i el no poder recuperar els nivells de tensió adequats al bus de connexió provoquen que el rotor s'acceleri (Fig. 3.16 (a)) i deriven en la successió d'events descrita a l'apartat 1.3.3 que provoca el col·lapse del sistema eòlic i conseqüentment, del funcionament desitjat de la xarxa.

En conclusió, la xarxa no és capaç d'assumir la contingència a la línia 3-7 (B). El parc eòlic desconnecta (no s'aconsegueix *ride through*) i l'aportació d'energia total a la demanda P_D es veu molt afectada.

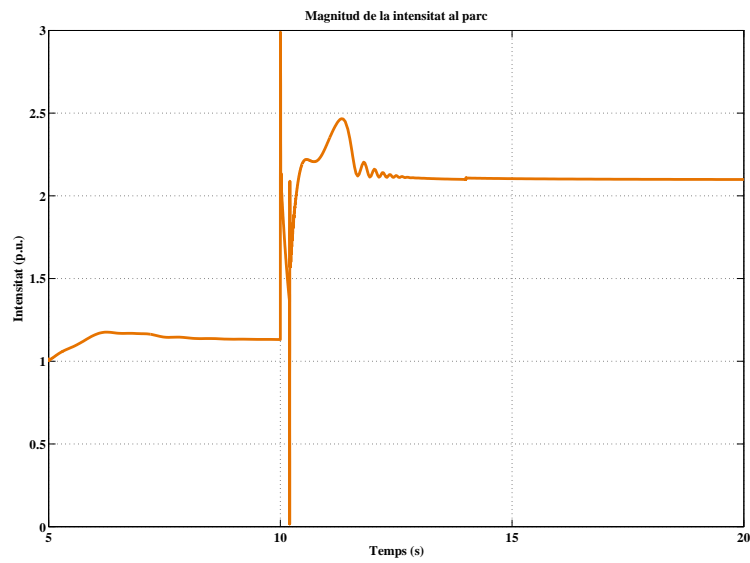


Figura 3.15: Evolució de la circulació d'intensitat a la línia de connexió del parc davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)

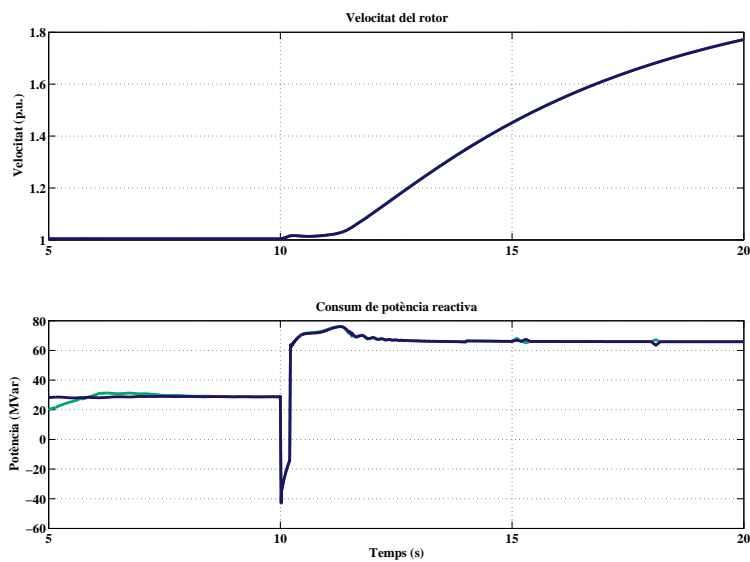


Figura 3.16: Evolució de la velocitat del rotor (a) i del consum de potència reactiva (b) als parcs eòlics P_W



Capítol 4

Aplicació d'un STATCOM a la xarxa

Al capítol 3 s'ha analitzat la xarxa dissenyada en condicions normals de funcionament. Entre d'altres temes, s'ha vist la problemàtica de la integració, i en casos com els descrits als apartats 3.3 - resposta davant un gran increment del vent - i 3.5 - resposta davant la pèrdua de la línia 3-7 (B) -, com aquesta problemàtica afecta directament al funcionament del sistema.

Aquest apartat presenta una possible solució per a algunes d'aquestes problemàtiques. La instal·lació d'un STATCOM (apartat 2.3) és capaç d'aportar suport a la xarxa elèctrica i en particular al parc eòlic per tal d'evitar el col·lapse del sistema. En cada cas s'analitza l'aportació d'aquest dispositiu FACTS paral·lel i, si bé no serà capaç per si sol d'actuar sobre els problemes de sobrecàrrega (en aquest cas, com a mínim un dispositiu serie serà necessari), si que hauria de ser capaç d'aportar el suport necessari de tensió i de potència reactiva, fet que es comprovarà en els següents casos d'anàlisi.

A la figura 4.1 s'observa la col·locació del dispositiu STATCOM al punt de connexió del parc.

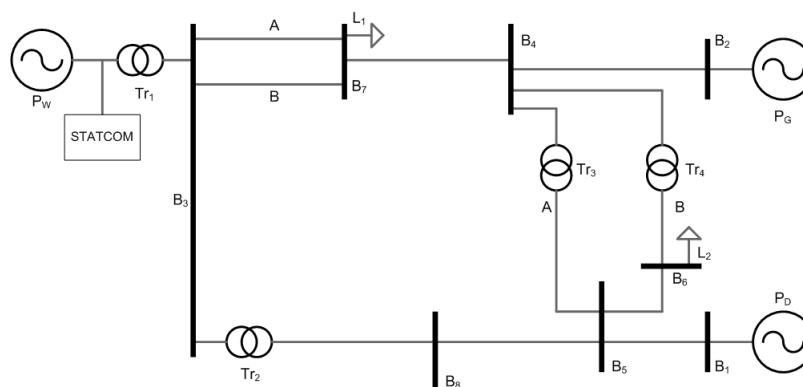


Figura 4.1: Xarxa d'estudi amb l'aplicació d'un STATCOM

Els paràmetres de configuració de l'STATCOM, basats en [27], són els següents:

- Tensió de referència a seguir: 1 p.u.



- Coeficients del regulador AC: $K_p = 5$ i $K_i = 1000$
- Coeficients del regulador DC: $K_p = 0,1 \cdot 10^{-3}$ i $K_i = 20 \cdot 10^{-3}$
- Coeficients del regulador de corrent: $K_p = 0,3$ i $K_i = 10$
- *Rating*: 50 MVA
- Tensió de l'enllaç DC: 4000 V
- Capacitat del condensador de la banda DC: $1125 \cdot 10^{-6} F$

Càlcul del *rating* de l'STATCOM En el cas de l'STATCOM, el *rating* o mida del dispositiu ve determinat bàsicament per un factor: la necessitat de compensació. Un major *rating* permetrà a l'STATCOM aportar major quantitat d'energia reactiva quan es requereixi i per tant, donar un major suport de tensió al bus on es troba connectat. En aquest cas, la mida s'ha escollit de tal forma que sigui capaç d'aportar suport en el cas més crític que es tractarà amb un marge d'aproximadament el 5%. Si la seva mida fos inferior, no seria capaç de donar suport a les faltes. Així doncs, el seu *rating* es fixa a 50 MVA.

4.1 Funcionament a velocitat del vent nominal

A la figura 4.2 es representen els fluxos de potència activa que tenen lloc en el sistema en funcionament normal o nominal amb un STATCOM instal·lat al punt de connexió del parc, que són pràcticament idèntics als de la figura 3.3.

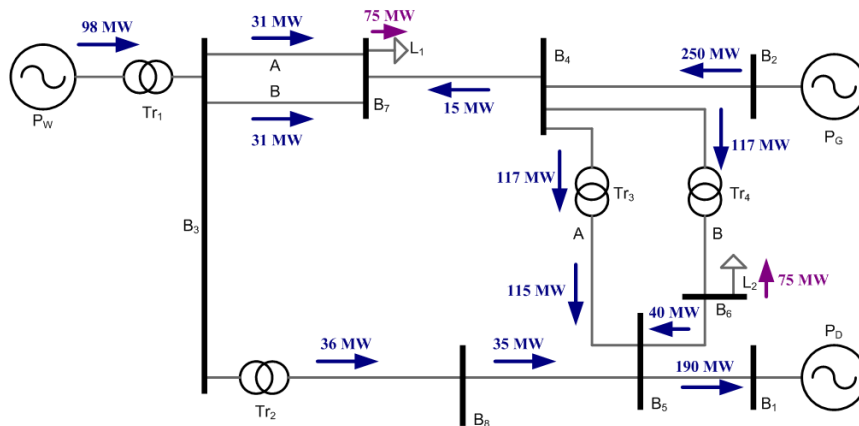


Figura 4.2: Flux de potència nominal al cas d'estudi amb un STATCOM a la xarxa

En aquest cas però, l'aportació de la potència reactiva per al correcte funcionament dels aerogeneradors no ha de ser aportada totalment per la xarxa perquè l'STATCOM és capaç de realitzar aquesta aportació i addicionalment, de mantenir la tensió al punt de connexió dins els límits marcats com a referència.

4.1.1 Aportació de l'STATCOM

La figura 4.3 mostra l'aportació de l'STATCOM en funcionament nominal de la xarxa. En aquest cas (i només en aquest cas) s'han representat els 5 primers segons de simulació per



veure el suport que fa l'STATCOM a l'arrancada del parc, i que anteriorment es realitzaven amb un sistema de suport a la inicialització que ara es pot evitar. Es pot observar de 4.3(a) com la tensió es manté a la tensió de referència, com l'aportació de reactiva és petita però no nul·la en funcionament estacionari (4.3(b)) i com la tensió a l'enllaç DC (4.3(c)), que és el millor indicador del correcte funcionament de l'STATCOM, es manté correcta al llarg de tota la simulació.

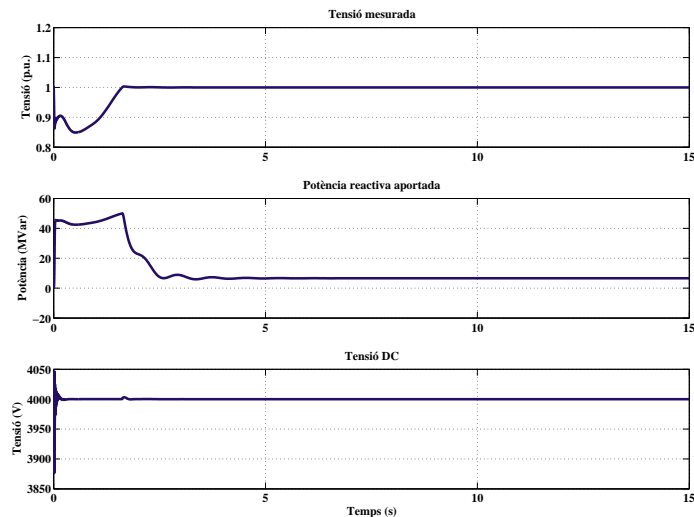


Figura 4.3: Evolució de la tensió mesurada (a), aportació de reactiva (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al STATCOM en circumstàncies de funcionament nominal

Es pot extreure doncs d'aquests resultats que l'STATCOM aporta suport a l'arrencada del parc i que, en condicions nominals, és capaç de mantenir el valor de tensió al punt de connexió al valor de consigna.

4.2 Resposta davant un petit increment de la velocitat del vent

Un dels problemes d'integració (apartat 1.3) dels generadors d'inducció de gàbia d'esquirol és que quan s'acceleren demanen energia reactiva i això pot portar a una reacció cíclica que acabi amb el col·lapse de la tensió al punt de connexió. Així doncs, s'analitza la reacció en el bus de connexió del parc (B_3) en cas que la velocitat del vent s'incrementi lleugerament, de 8 m/s a 11 m/s. Aquesta és una velocitat de funcionament vàlida per aquest sistema i serà utilitzada per a valorar la resposta davant de faltes. De la mateixa manera que en l'apartat anterior, es valorarà també l'aportació de l'STATCOM que s'ha instal·lat a la xarxa.

La simulació transcorre de la següent manera:

1. Dels 0s als 5s, la xarxa s'inicialitza, i per aquest motiu, no es representa gràficament aquest interval de temps. La velocitat del vent és estable i de 8 m/s per a ambdós sub-parcs.
2. Dels 5s als 7s, la velocitat del vent segueix a 8 m/s.



3. Als 7s, la velocitat d'un dels sub-parcs comença a augmentar fins a 11 m/s, que assolirà als 9s.
4. Als 9s, la velocitat de l'altre sub-parc augmenta fins a 11 m/s i tarda dos segons a fer-ho, fins als 11s.
5. A partir dels 11s i fins al final de la simulació, la velocitat del vent és constant i igual a 11 m/s.

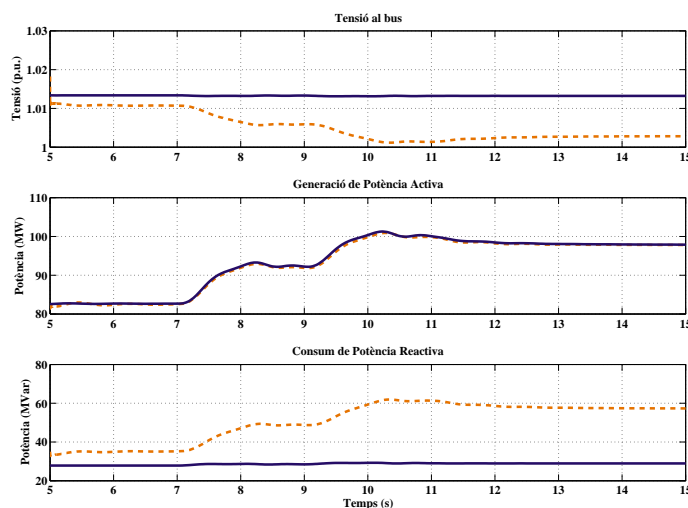


Figura 4.4: Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant un petit increment de la velocitat del vent amb un STATCOM a la xarxa. En taronja i discontinu es compara el cas sense STATCOM.

La figura 4.4 il·lustra els resultats de la simulació en el bus més crític (B_3), situat just a la sortida del parc eòlic. Els 5 primers segons de simulació no es representen perquè al tractar-se de la inicialització, presenta transitoris que no són objectiu d'estudi d'aquest projecte. Tot seguit es resumeixen els resultats de la simulació i les implicacions a la xarxa a partir del que s'observa en la resposta de la figura 4.4, seguint els passos de simulació definits anteriorment.

1. L'interval de 0s a 5s no es representa per tractar-se de la inicialització.
2. Dels 5s als 7s, la tensió al bus es manté en termes raonables (lleugerament per sobre d'1 p.u.). El parc eòlic genera 82 MW, una potència inferior a la nominal, i el consum de reactiva és de poc més de 25 MVar.
3. Un dels sub-parcs comença a accelerar-se als 7s. Això es tradueix en un increment de la potència activa transmesa a la xarxa (fins a 91 MW), però aquesta vegada, i en contraposició amb el cas sense STATCOM al sistema, ni la tensió disminueix ni s'incrementa significativament l'aportació de reactiva que fa la xarxa al parc.
4. Als 9s, l'altre sub-parc també s'accelera. Les conseqüències d'aquest fet són, com al punt anterior, increment de la potència activa transmesa, sense afectació notable ni de la tensió ni de l'aportació de reactiva.



5. Un cop el parc sencer rep velocitats del vent d'11 m/s, s'arriba a valors nominals de subministre de potència (≈ 100 MW), el consum de reactiva s'estabilitza a nivells similars a l'inici i la tensió al bus B_3 es manté estable de la mateixa forma que ha fet al llarg de tot el procés.

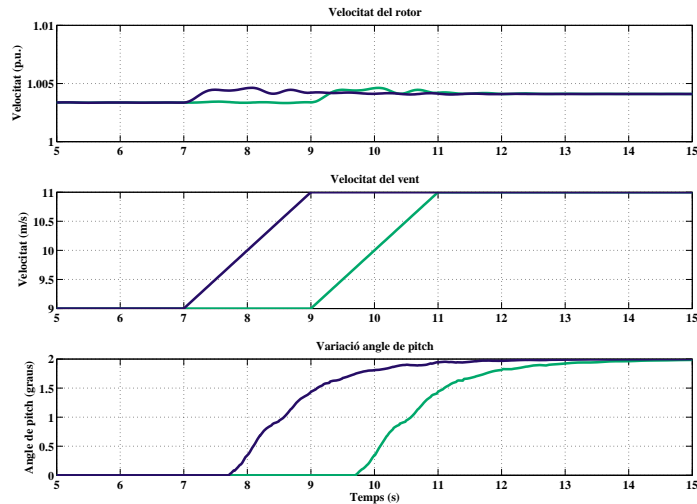


Figura 4.5: Evolució de velocitat del rotor (a), velocitat del vent (b) i angle de pitch (c) a ambdós sub-parcs davant un petit increment de la velocitat del vent amb un STATCOM a la xarxa

Així doncs, es comprova que la xarxa i el parc són capaços d'assumir un petit increment en la velocitat del vent com en el cas sense STATCOM, però que el fet d'incorporar aquest dispositiu propicia una assimilació del canvi de velocitat més tranquil·la. Un altra forma de comprovar-ho és veure quines han estat les observacions en el parc eòlic. A la figura 4.5, es pot veure que les velocitats dels rotors dels molins d'ambdós parcs han augmentat però en quantitats insignificants. La velocitat està en p.u. respecte la nominal, que és de 1.000 rpm. Per altra banda, es comprova l'augment descrit de la velocitat del vent i la resposta del controlador d'angle de pitch, que també hi aporta un lleuger control.

Es veu doncs que la xarxa assumeix l'increment de la velocitat del vent sense problemes.

4.2.1 Aportació de l'STATCOM

És en aquest punt on es nota quina és l'aportació que realitza l'STATCOM al sistema i en especial, al parc, davant un augment de la velocitat del vent. A la figura 4.6(b) s'aprecia com l'STATCOM realitza l'aportació de reactiva adequada per a suportar els increments de demanda derivats de l'augment de la velocitat del vent, i d'aquesta forma, no és la xarxa qui l'ha de fer un cop s'instal·la l'STATCOM.

D'aquesta manera s'explica doncs que s'hagi reduït l'aportació de reactiva des de la xarxa respecte l'anàlisi del capítol anterior. Si comparem el perfil d'aportació de l'STATCOM de la figura 4.6 amb l'aportació de la xarxa del capítol anterior 3.4, es veu que són molt similars. La diferència és que aquest increment addicional sobre la base d'aportació ara la supeix l'STATCOM i no la xarxa.



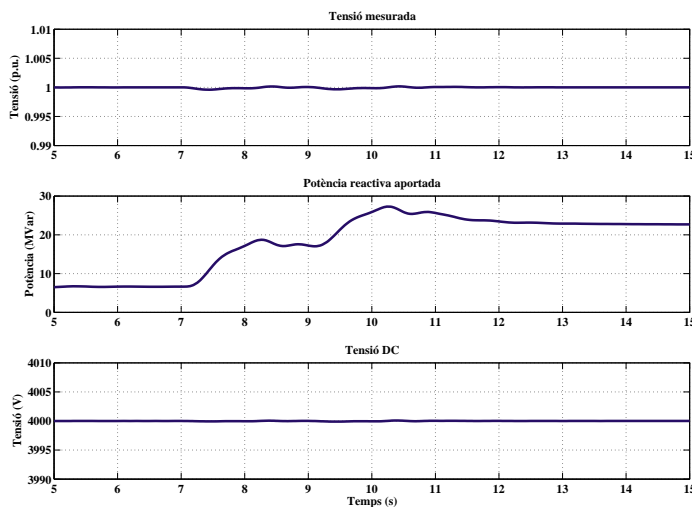


Figura 4.6: Evolució de la tensió mesurada (a), aportació de reactiva (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al STATCOM davant un petit increment de la velocitat del vent

4.3 Resposta davant un gran increment de la velocitat del vent

Seguint amb el mateix problema d'integració (apartat 1.3) que a l'apartat anterior, s'analitza la reacció en el bus de connexió del parc (B_3) en cas que la velocitat del vent s'incrementi ostensiblement, de 8 m/s a 16 m/s. Aquesta és una velocitat del vent que depenent de la construcció i els paràmetres de seguretat podria obligar a desconnectar els aerogeneradors per protecció. En aquest cas es compta amb un STATCOM connectat per al suport a la xarxa i al parc eòlic.

La simulació transcorre de la següent manera:

1. Dels 0s als 5s, la xarxa s'inicialitza, i per aquest motiu, no es representa gràficament aquest interval de temps. La velocitat del vent és estable i de 8 m/s per a ambdós sub-parcs.
2. Dels 5s als 7s, la velocitat del vent segueix a 8 m/s.
3. Als 7s, la velocitat d'un dels sub-parcs comença a augmentar fins a 16 m/s, que assolirà als 14s.
4. Als 9s, la velocitat de l'altre sub-parc augmenta fins a 16 m/s i tarda 7 segons a fer-ho, fins als 16s.
5. A partir dels 16s i fins al final de la simulació, la velocitat del vent és constant i igual a 16 m/s.

La figura 4.7 mostra els resultats de la simulació al bus més crític (B_3), que és el punt de connexió del parc eòlic. Els 5 primers segons de simulació no es representen perquè al tractar-se de la inicialització, presenta transitoris que no són objectiu d'estudi d'aquest



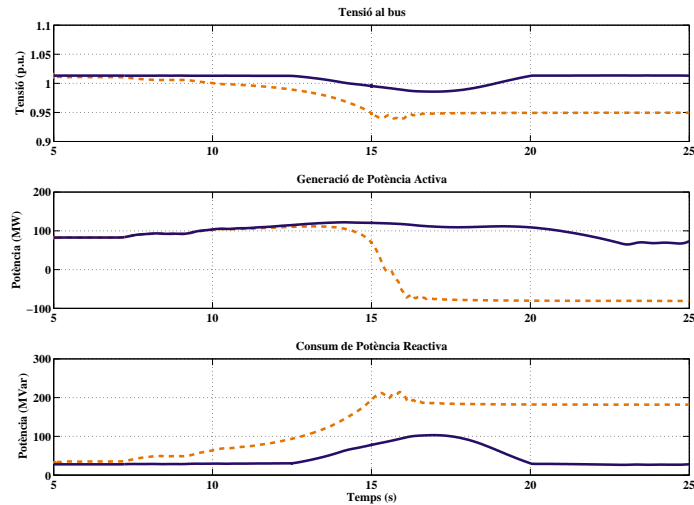


Figura 4.7: Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant un gran increment de la velocitat del vent amb un STATCOM a la xarxa. En taronja i discontinu es compara el cas sense STATCOM.

projecte. Tot seguit es resumeixen els resultats de la simulació i les implicacions a la xarxa a partir del que s'observa en la resposta de la figura 4.7, seguint els passos de simulació definits anteriorment. La figura 4.8 representa l'evolució de les variables del parc eòlic, que ajuden a veure més gràficament quines són les conseqüències d'un gran augment de la velocitat del vent al parc.

1. Dels 0s als 5s, la xarxa s'inicialitza, i per aquest motiu, no es representa gràficament aquest interval de temps. La velocitat del vent és estable i de 8 m/s per a ambdós sub-parcs.
2. Dels 5s als 7s, la velocitat del vent segueix a 8 m/s.
3. Als 7s, la velocitat d'un dels sub-parcs comença a augmentar fins a 16 m/s, que assolirà als 14s. Aquest gran augment fa que comenci una pujada ostensible del consum de reactiva del parc, que aportarà l'STATCOM (figura 4.9(b)) i que per tant no es veurà reflexada com a baixada de tensió del nus B_3 , ni la xarxa haurà de realitzar una aportació extra de reactiva.
4. Als 9s, la velocitat de l'altre sub-parc augmenta fins a 16 m/s i tarda 7 segons a fer-ho, fins als 16s. En aquest interval es suma als requeriments de l'increment en l'altre sub-parc i l'STATCOM arriba al seu màxim d'aportació (50 MVar). La resta de potència requerida l'ha d'aportar la xarxa, que en aquest cas, ho pot assumir. En detriment, però, la tensió al bus B_3 disminueix fins a menys de 0,94 p.u., fet que podria ser preocupant si s'allargués durant gaire més temps.
5. A partir dels 16s i fins al final de la simulació les mesures tendeixen a estabilitzar-se. El rotor es desaccelera a mesura que el control de *pitch* pot anar assumint el canvi de velocitat del vent i el consum de reactiva baixa. A partir d'aquest moment, l'aportació de reactiva de l'STATCOM pot ser menor i la de la xarxa també, però cal notar que



al treballar en un punt molt llunyà de l'òptim de vent un cop s'arriba al funcionament estable la potència activa generada és menor que en casos de velocitats més baixes.

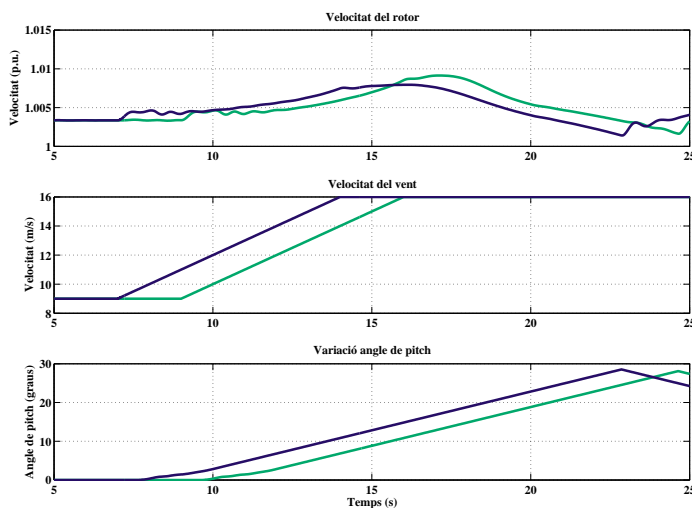


Figura 4.8: Evolució de velocitat del rotor (a), velocitat del vent (b) i angle de pitch (c) a ambdós sub-parcs davant un gran increment de la velocitat del vent amb un STATCOM a la xarxa

Amb la figura 4.8 es pot constatar bàsicament que el rotor en aquest cas no s'arriba a accelerar en excés i que l'aportació addicional de l'STATCOM permet donar temps al control de *pitch* de portar a un funcionament correcte al sistema.

4.3.1 Aportació de l'STATCOM

En aquest cas, l'aportació de l'STATCOM a mantenir l'estabilitat del sistema porta que en aquest cas no s'arribi al col·lapse com al capítol anterior. La figura 4.9 il·lustra aquesta aportació, amb els següents trets:

- No és possible mantenir la tensió a 1 p.u. durant tota la simulació. Hi ha uns instants on la demanda és excessiva per al *rating* de l'STATCOM i si la xarxa no pogués assumir-ho, el sistema cauria.
- L'aportació de reactiva durant l'increment és cada vegada més gran fins a un punt màxim. Durant aquesta mena d'altiplà, l'aportació que realitza l'STATCOM és del màxim aportable.
- La tensió a la banda DC no pateix i per tant, el funcionament és adequat.

En definitiva, és precisament l'aportació d'aquest STATCOM la que manté el sistema estable durant l'increment de la velocitat del vent.



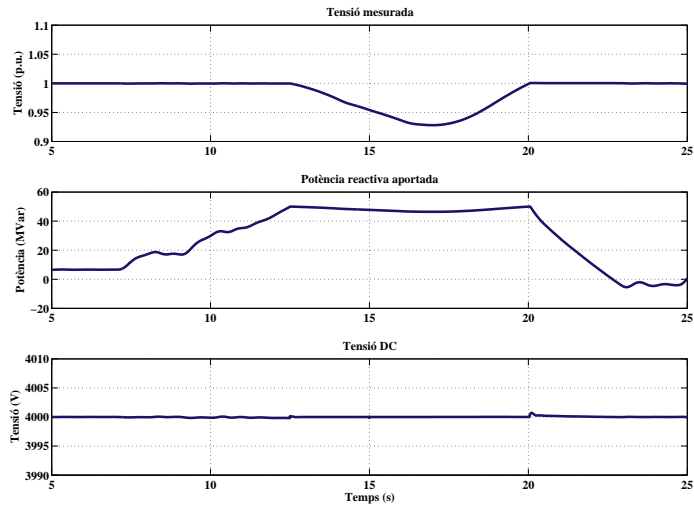


Figura 4.9: Evolució de la tensió mesurada (a), aportació de reactiva (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al STATCOM davant un gran increment de la velocitat del vent

4.4 Resposta davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)

En aquest apartat s'analitza la resposta de la xarxa elèctrica i del parc eòlic amb un STATCOM davant una contingència (una falta) a la línia 4-5 (A) mentre es produeix, s'aïlla i es restableix. En primer lloc, es realitza l'estudi de flux de potència mentre la línia on es produeix la falta es troba desconnectada (Fig. 4.10). En aquest veiem que:

- La línia que queda activa, 4-5 (B), es sobrecarrega a 217 MW, 42 MW més dels nominals.

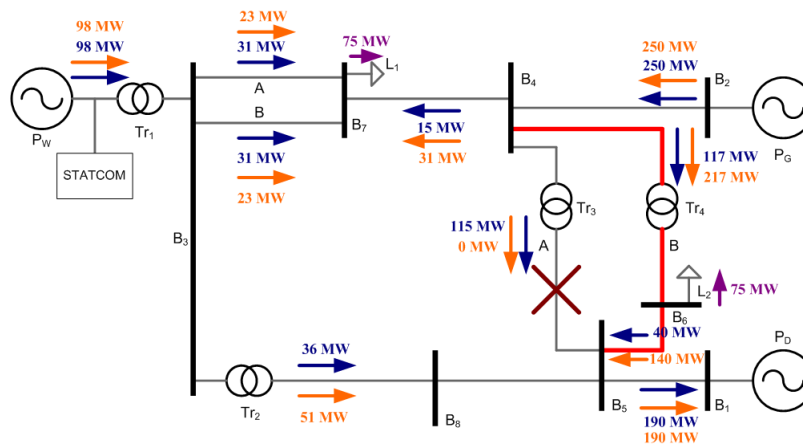


Figura 4.10: Flux de potència després de la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb un STATCOM a la xarxa



Així doncs, es passa a descriure la simulació realitzada. Els aerogeneradors reben una velocitat del vent de 11 m/s des dels 7s de simulació, accelerant des dels 8 m/s inicials. A partir d'aquí:

1. Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
2. Als 10 segons es produeix una falta a la línia 4-5 (A) durant 10 cicles, és a dir, durant 0,2s.
3. Als 10,2 s, les proteccions s'activen i s'aïlla la falta, amb la corresponent pèrdua de la línia implicada.
4. Als 14 s, es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 4-5 (A)) i es segueix la simulació fins als 20s.

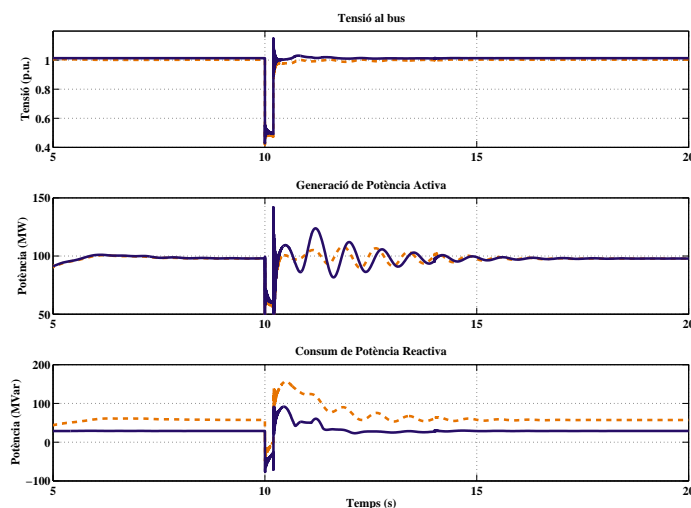


Figura 4.11: Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb un STATCOM a la xarxa. En taronja i discontinu es compara el cas sense STATCOM.

La figura 4.11 mostra les conseqüències al bus de connexió del parc eòlic, que és lluny del lloc on es produeix la falta. Tot seguit s'analitzen els efectes de la contingència sobre la línia 4-5 (A) al punt de connexió del parc (Fig. 4.11) així com les implicacions que el canvi i l'aïllament comporten als fluxos de les línies que es veuen més afectades (Fig. 4.12).

1. Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
2. Quan als 10s es produeix la falta, les conseqüències arriben al bus B_3 en forma d'una baixada de tensió important, fins als 0,5 pu. Les potències pateixen les mateixes conseqüències. Els fluxos de les línies representades a la figura 4.12 es veuen afectats també per la falta.
3. Als 10,2 s, quan la falta és aïllada, la tensió es recupera ràpidament als nivells de funcionament normal, la potència activa generada oscil·la lleugerament fins a recuperar la seva generació nominal i si bé el consum de reactiva augmenta sensiblement just



després de la falta, arriba molt més ràpid als nivells normals que en el capítol anterior gràcies a l'aportació de l'STATCOM. El flux a la línia afectada (4-5 (A), figura 4.12 (a)) es redueix a zero i l'augment l'absorbeixen entre la línia (4-5 (B) i la 3-8, figures 4.12 (b) i (c) respectivament). Concretament, la línia 4-5 (B) es sobrecarrega per sobre dels seus valors límit.

- Als 14 s, quan es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 4-5 (A)), els efectes sobre el bus B_3 són insignificants, i les línies recuperen els seus fluxos pre-falta.

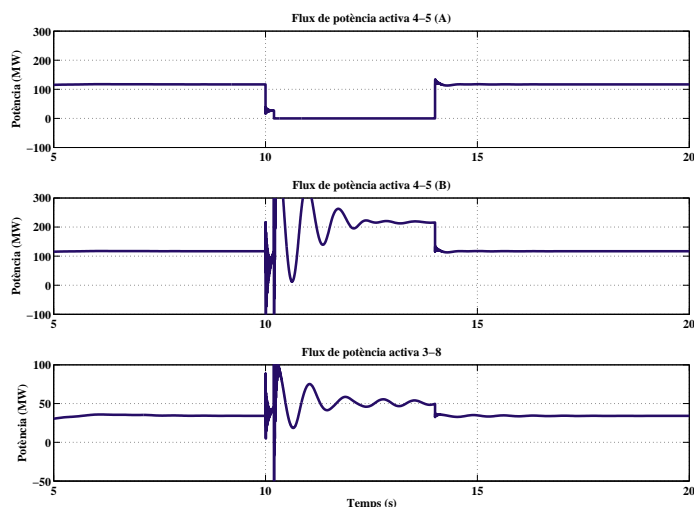


Figura 4.12: Evolució de la transmissió de potència a la línia 4-5 (A) (a), a la línia 4-5 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb un STATCOM a la xarxa

D'altra banda, també resulta interessant investigar què passa amb la intensitat que circula a la línia de connexió del parc, i comparar-ho amb el que passava en el capítol anterior. La figura 4.13 mostra l'evolució d'aquesta. Amb l'aplicació de l'STATCOM, s'observa que des de l'inici, la intensitat és menor i més pròxima a la nominal, que es situaria a 1 pu. En segona instància, en produir-se la falta, la intensitat assoleix igualment pics de 2 pu, que no són excessius al tenir una duració molt petita, però un cop aïllada la falta és on més es nota la diferència. El suport que aporta l'STATCOM assegura uns nivells de circulació de corrent molt menors, els pics de les oscil·lacions arriben a nivells més baixos i en poc temps es torna als nivells nominals. Si les proteccions desconnectaven el sistema en el cas sense STATCOM, un cop posat el dispositiu ja no ho farien, i per tant, donen validesa a la simulació post-falta.

En definitiva, una falta a la línia 4-5 (A), amb la posterior pèrdua i recuperació de la línia és assumible per al parc eòlic ja que recupera l'estat de funcionament normal sense problemes, com al capítol anterior, tot i que ara ho fa amb major celeritat. On si apareixen noves problemàtiques és en la línia 4-5 (B), que es sobrecarrega considerablement després de la falta. Això deriva en una gran contradicció: es dona suport al parc per tal que no desconnecti, però per altra banda, una línia es sobrecarrega de tal manera que desconnectaria, i la desconnexió provocaria una caiguda en cadena de tota la xarxa.



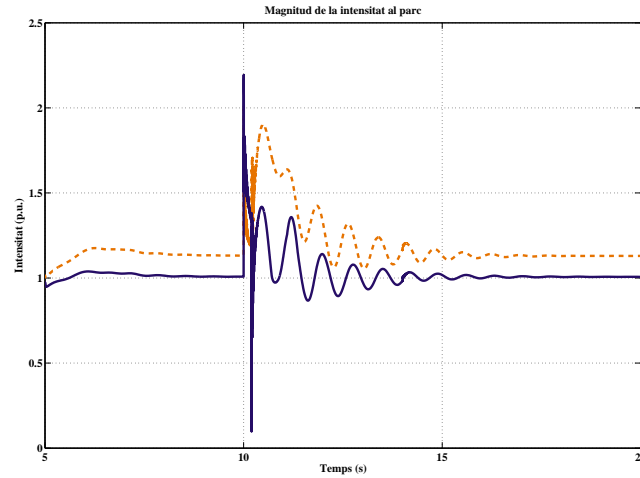


Figura 4.13: Evolució de la circulació d'intensitat a la línia de connexió del parc davant la pèrdua de la línia 4-5 (A), sense STATCOM (en taronja i discontinu) i amb STATCOM (blau)

4.4.1 Aportació de l'STATCOM

En aquest cas, l'STATCOM es dedica a aportar la reactiva addicional que és requerida després de la falta, durant el transitori (Fig. 4.14). L'enllaç DC nota els moviments bruscos de tensió provocats per la falta, però no arriba a tenir un efecte perillós.

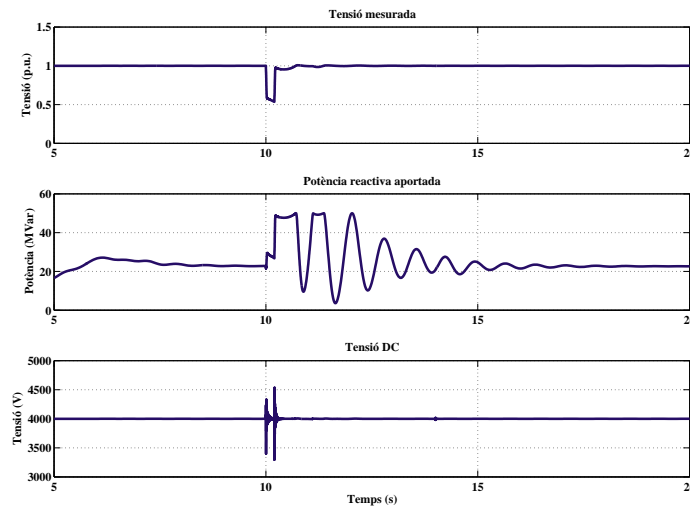


Figura 4.14: Evolució de la tensió mesurada (a), aportació de reactiva (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al STATCOM davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)



4.5 Resposta davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)

En aquest apartat s'analitza la resposta de la xarxa elèctrica i del parc eòlic davant una contingència (una falta) a la línia 3-7 (B) mentre es produeix, s'aïlla i es restableix. En primer lloc, es realitza l'estudi de flux de potència mentre la línia s'ha produït la falta es troba desconnectada (Fig. 4.15). En aquest veiem que:

- Al contrari que al capítol anterior, els fluxos segueixen en el sentit de circulació nominal.
- La línia que queda activa, la 3-7 (A), es sobrecarrega a 60 MW, 10 MW per sobre del límit especificat.
- La resta de variacions són minses.

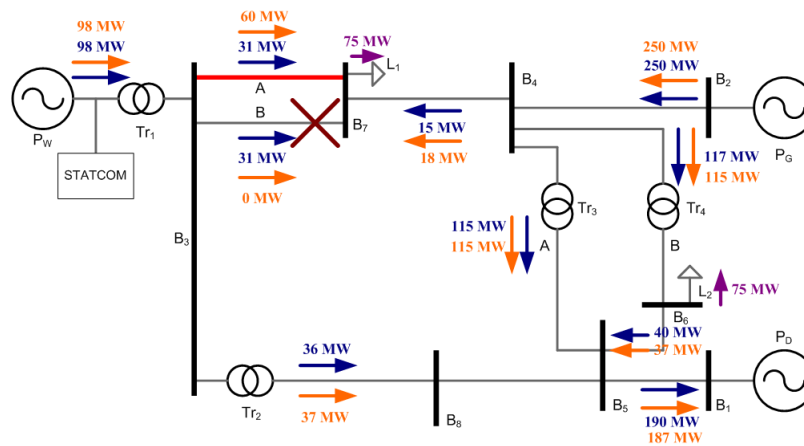


Figura 4.15: Flux de potència després de la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb un STATCOM a la xarxa

Es procedeix a descriure la simulació realitzada en la xarxa amb l'STATCOM en funcionament. Els aerogeneradors reben una velocitat del vent de 11 m/s des dels 7s de simulació, accelerant des dels 8 m/s inicials. A partir d'aquí, i de la mateixa forma que a l'apartat anterior:

1. Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
2. Als 10 segons es produeix una falta a la línia 3-7 (B) durant 10 cicles, és a dir, durant 0,2s.
3. Als 10,2 s, les proteccions s'activen i s'aïlla la falta, amb la corresponent pèrdua de la línia implicada.
4. Als 14 s, es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 3-7 (B)) i es segueix la simulació fins als 20s.

La figura 4.16 mostra les conseqüències al bus de connexió del parc eòlic, que és molt proper al lloc on es produeix la falta, en el cas que es disposa d'un STATCOM per al suport a la xarxa. Tot seguit s'analitzen els efectes de la contingència sobre la línia 3-7 (B) al punt de connexió del parc (Fig. 4.16) així com les implicacions que el canvi i l'aïllament comporten als fluxos de les línies que es veuen més afectades (Fig. 4.17).



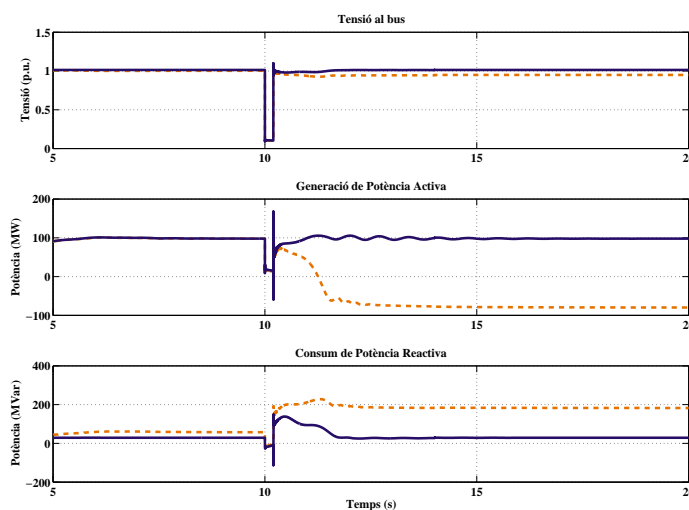


Figura 4.16: Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb un STATCOM a la xarxa. En taronja i discontinu es compara el cas sense STATCOM.

1. Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
2. Quan als 10s es produeix la falta, les conseqüències arriben al bus B_3 en forma d'una baixada de tensió crítica i propera als 0 pu. Les potències pateixen les mateixes conseqüències i els transitoris derivats. Els fluxos de les línies representades a la figura 4.17 es veuen afectats també per la falta.
3. Als 10,2 s, quan la falta és aïllada, la tensió es recupera completament en pocs segons i sempre sent pròxima a 1 pu. L'STATCOM aporta el màxim de reactiva que li és possible, i d'aquesta forma s'aconsegueix mantenir la tensió a nivells acceptables, sense perdre en cap cas la generació eòlica. A les línies de la figura 4.17 s'observa com cau el flux de la línia afectada per la contingència ((b)) i com les línies 3-7 (A) i 3-8 assumeixen l'increment, especialment en el cas de la 3-7 (A), que l'assumeix gairebé completament (Fig. 4.17(a)) .
4. Als 14 s, quan es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 3-7 (B)), els fluxos de potència recuperen ràpidament els valors anteriors a la falta.

D'altra banda, també resulta interessant investigar què passa amb la intensitat que circula a la línia de connexió del parc, i comparar-ho amb el que passava en el capítol anterior. La figura 4.18 mostra l'evolució d'aquesta. Amb l'aplicació de l'STATCOM, s'observa que des de l'inici, la intensitat és menor i més pròxima a la nominal, que es situaria a 1 pu. En segona instància, en produir-se la falta, la intensitat assoleix pics lleugerament superiors, de 3,5 pu, que no són excessius al tenir una duració molt petita, però el suport que aporta l'STATCOM provoca que un cop aïllada la falta el sistema segueixi en funcionament correcte i a més, assegura uns nivells de circulació de corrent molt menors i en poc temps es torna als nivells nominals. Si les proteccions desconnectarien el sistema en el cas sense STATCOM, molt probablement un cop posat el dispositiu ja no ho farien, i per tant, donen validesa a la simulació post-falta.



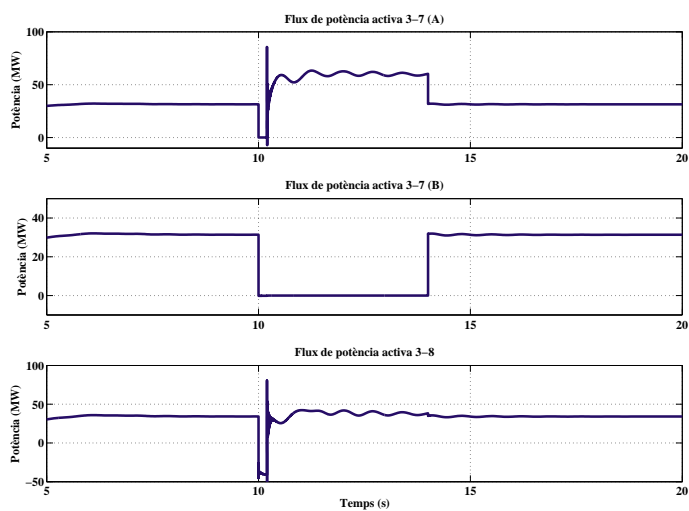


Figura 4.17: Evolució de la transmissió de potència a la línia 3-7 (A) (a), a la línia 3-7 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb un STATCOM a la xarxa

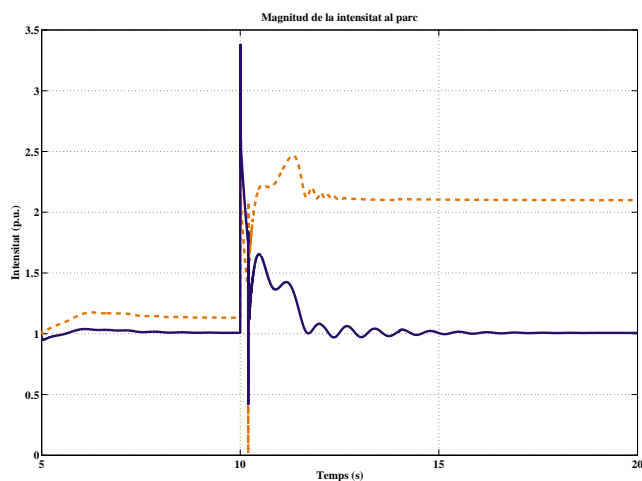


Figura 4.18: Evolució de la circulació d'intensitat a la línia de connexió del parc davant la pèrdua de la línia 3-7 (B), sense STATCOM (en taronja i discontinu) i amb STATCOM (blau)



En vista dels resultats, l'aportació de l'STATCOM permet solucionar els problemes apareguts en l'apartat 3.5.

4.5.1 Aportació de l'STATCOM

En aquest cas l'STATCOM veu una caiguda major de la tensió al punt de connexió (4.19(a)), fet que provoca que el dispositiu passi a aportar el màxim de reactiva que és capaç per tal de compensar (4.19(b)) i que aconsegueix mantenir la tensió als nivells desitjats fins al restabliment de la normalitat de la xarxa. La tensió a l'enllaç DC té dos pics causats per la connexió i desconnexió de la falta, però que són puntuals i en aquest cas no afecten al correcte funcionament de l'STATCOM.

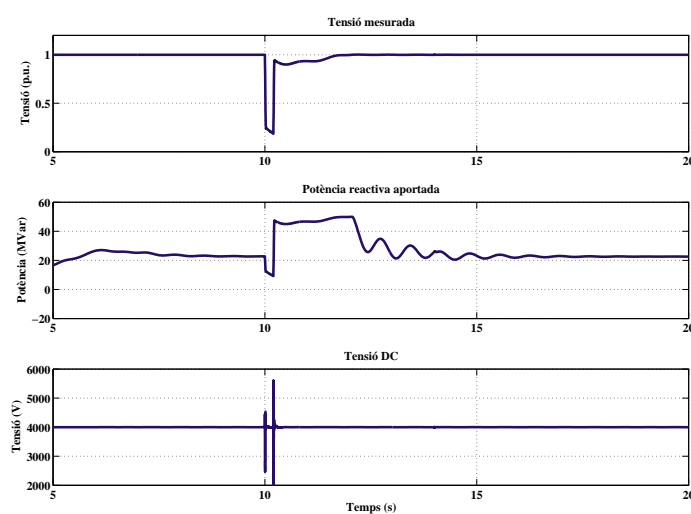


Figura 4.19: Evolució de la tensió mesurada (a), aportació de reactiva (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al STATCOM davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)



Capítol 5

Aplicació d'un STATCOM i un SSSC a la xarxa

Als capítols 3 i 4 s'ha analitzat la xarxa dissenyada en condicions normals de funcionament i després de l'aplicació d'un STATCOM per a solucionar algunes problemàtiques d'integració.

Un STATCOM, no obstant, no és capaç d'aportar una solució completa per si sol. En aquest apartat s'instal·la un SSSC (apartat 2.10) per a donar un suport ampliat a la xarxa elèctrica. En casos de contingència, la xarxa del cas d'estudi patia sobrecàrregues en diverses línies tant en el cas de la falta a la línia 4-5 (A) (apartat 4.4) com en el cas de la falta a la línia 3-7 (B) (apartat 4.5). La instal·lació d'un SSSC a la xarxa ha de permetre modificar puntualment fluxos de càrrega per tal d'evitar o mitigar les problemàtiques existents durant les faltes.

A la figura 5.1 s'observa la col·locació del dispositiu SSSC al punt mig de la línia 3-8.

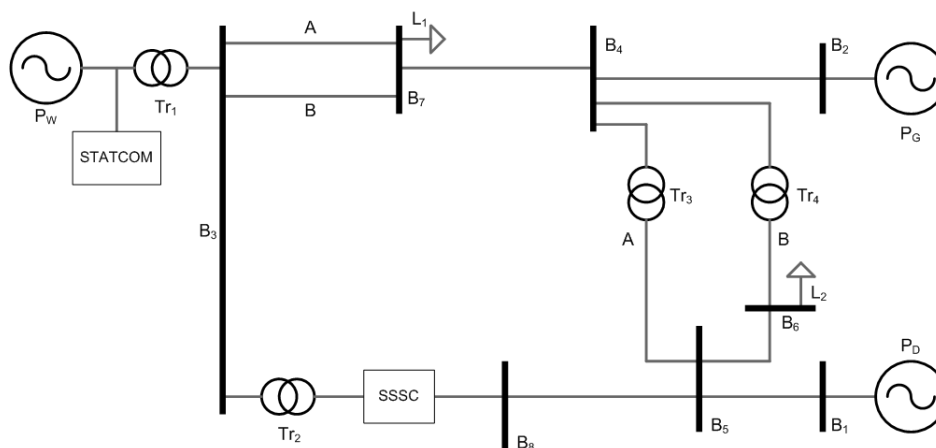


Figura 5.1: Xarxa d'estudi amb l'aplicació d'un STATCOM i un SSSC

L'SSSC és capaç de variar la inductància de la línia aplicant-li una tensió addicional. Amb una variació de les característiques de la línia s'aconsegueix una variació en el flux de potència. Els paràmetres de configuració de l'SSSC, basats en [29], són els següents:

- Màxima tensió injectable: 0,1 p.u.



- Coeficients del regulador AC de tensió injectada: $K_p = 0,004$ i $K_i = 0,2$
- Coeficients del regulador DC: $K_p = 0,1 \cdot 10^{-3}$ i $K_i = 20 \cdot 10^{-3}$
- *Rating*: 10 MVA
- Tensió de l'enllaç DC: 40000 V
- Capacitat del condensador de la banda DC: $375 \cdot 10^{-6} F$

Amb el sistema en funcionament normal, s'observa com l'SSSC és capaç de modificar el flux de potència per la branca on es troba situat. Es realitza una simulació on la injecció de tensió es va augmentant en forma de rampa des dels -0,05 p.u. fins als 0,1 p.u. (SSSC aportant el màxim possible). Es pot comprovar a la figura 5.2 com l'increment del flux de potència (respecte l'inicial) conseqüència de la injecció de tensió segueix una relació gairebé lineal, tal i com s'ha vist a les equacions (2.20) i (2.21).

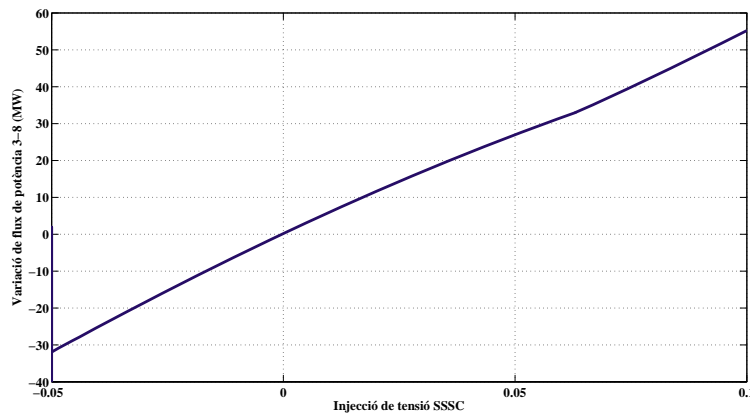


Figura 5.2: Increment en el flux de potència a la línia 3-8 provocat per l'injecció de tensió de l'SSSC

Aquest fet podrà ser utilitzat de cara a solucionar els problemes de sobrecàrrega, ja que es podrà quantificar el valor de la sobrecàrrega i per tant, el valor de potència a derivar per la branca de l'SSSC. Amb aquesta última xifra, només caldrà veure quin és el nivell d'injecció de tensió que li correspon.

Càlcul del *rating* de l'SSSC El *rating* per al SSSC és simplement el producte de la màxima corrent de línia (corrent màxima a la qual es segueix desitjant compensació) i la màxima compensació sèrie de tensió en quadratura amb la corrent [4].

$$VA = I_{max} V_{qmax} \quad (5.1)$$

Sabent que la potència nominal de la línia 3-8 és de 100 MVA, i que la seva tensió és de 400 kV, es té que la intensitat nominal (i màxima a la qual es desitja encara funcionament) serà de 176 A. Si es desitges ajustar al màxim la mida del dispositiu FACTS, la màxima injecció de tensió requerida és de 0,08 p.u., el que, en unitats del sistema, representen 32000 V. Si fem el producte, obtenim



$$I_{max}V_{qmax} = 176 \cdot 0,08 \cdot 400 \cdot 10^3 = 5,6MVA \quad (5.2)$$

que seria la mida límit. En tot cas, s'aplicarà un SSSC de 10 MVA de capacitat per dos motius: primer, per si cal fer front a contingències diferents que aportin alguna necessitat nova, obtenint així més marge per la injecció de tensió, i en segon lloc, per tal de poder flexibilitzar el control que s'aplicarà al pròxim capítol. Així doncs, el *rating* del dispositiu SSSC queda marcat en 10 MVA.

5.1 Resposta davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)

En aquest apartat s'analitza la resposta de la xarxa elèctrica i del parc eòlic amb un STAT-COM i un SSSC davant una contingència (una falta) a la línia 4-5 (A) mentre es produeix, s'aïlla i es restableix.

Sense SSSC, a l'apartat 4.4 es tenia que:

- La línia que queda activa, 4-5 (B), es sobrecarrega a 217 MW, 42 MW més dels nominals.

Si s'agafa ara la figura 5.2 es pot veure que l'injecció necessària per a derivar 42 MW cap a la línia afectada per l'SSSC és d'aproximadament 0,08 p.u. Així doncs, es procedeix a realitzar aquesta injecció a la xarxa després de perdre's la línia 4-5 (B) i a deixar-la d'injectar per tornar a condicions normals després de la recuperació.

En primer lloc, es realitza l'estudi de flux de potència mentre la línia on es produeix la falta es troba desconnectada però l'SSSC en compensa els efectes (Fig. 5.3). En aquest veiem que:

- La línia que queda activa, 4-5 (B), ja no es sobrecarrega a 217 MW, 42 MW més dels nominals, sinó que es queda a 174 MW, pràcticament el seu límit nominal.
- La línia on es troba l'SSSC, la 3-8, incrementa el seu flux de potència fins als 97 MW, just per sota del seu límit.
- Cap de les altres línies es veu sobrecarregada, tot i que, com a curiositat, les dues línies 3-7 pràcticament deixen de transmetre potència. Aquesta és una circumstància del disseny de la xarxa i no té a veure directament amb el funcionament dels FACTS implicats.

Es podria dir que l'acció de l'SSSC ha estat bàsicament la de redirigir la totalitat de la potència generada pel parc eòlic P_W a través de la línia 3-8.

Així doncs, es passa a descriure la simulació realitzada. Els aerogeneradors reben una velocitat del vent de 11 m/s des dels 7s de simulació, accelerant des dels 8 m/s inicials. A partir d'aquí:

1. Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
2. Als 10 segons es produeix una falta a la línia 4-5 (A) durant 10 cicles, és a dir, durant 0,2s.



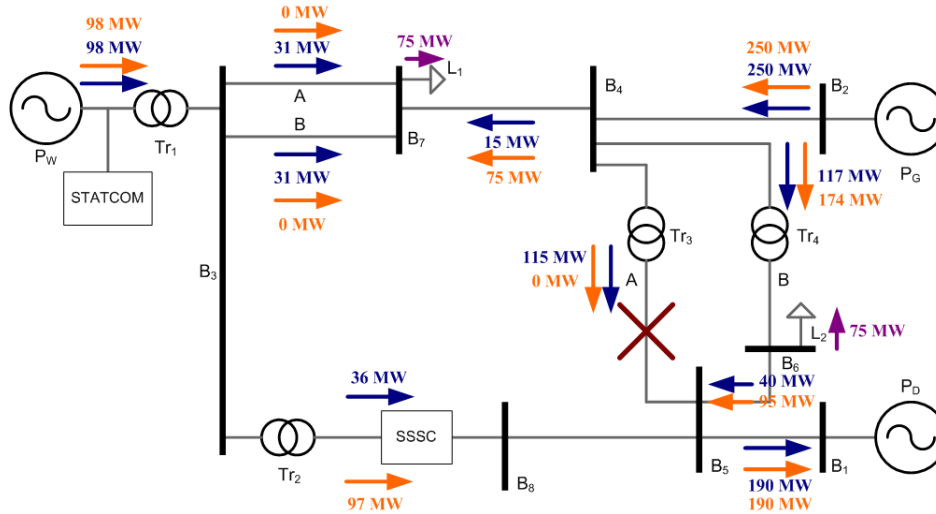


Figura 5.3: Flux de potència després de la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb un STATCOM i un SSSC a la xarxa

- Als 10,2 s, les proteccions s'activen i s'aïlla la falta, amb la corresponent pèrdua de la línia implicada.
- Als 14 s, es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 4-5 (A)) i es segueix la simulació fins als 20s.

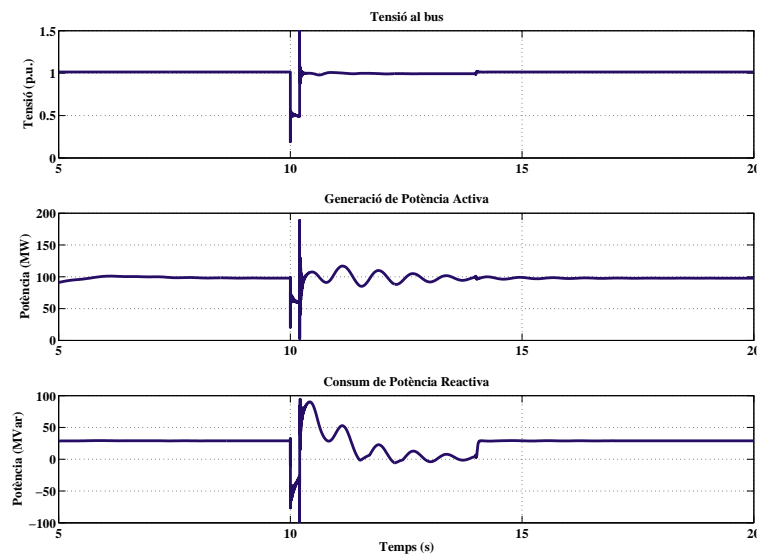


Figura 5.4: Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb un STATCOM i un SSSC a la xarxa



La figura 5.8 mostra les conseqüències al bus de connexió del parc eòlic, que és lluny del lloc on es produeix la falta. Els efectes de la contingència sobre la línia 4-5 (A) al punt de connexió del parc ja s'han analitzat en el capítol anterior i solucionat amb un STATCOM, així que es procedeix a analitzar com les implicacions que el canvi i l'aïllament comporten als fluxos de les línies que es veuen més afectades (Fig. 5.5) i com l'SSSC actua per a mitigar-les.

1. Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
2. Quan als 10s es produeix la falta, els fluxos de les línies representades a la figura 5.5 es veuen afectats també per la falta.
3. Als 10,2 s, quan la falta és aïllada, la tensió es recupera ràpidament als nivells de funcionament normal, la potència activa generada oscil·la lleugerament fins a recuperar la seva generació nominal i si bé el consum de reactiva augmenta sensiblement just després de la falta, arriba molt més ràpid als nivells normals que en el capítol anterior gràcies a l'aportació de l'STATCOM. El flux a la línia afectada (4-5 (A), figura 5.5 (a)) es redueix a zero i l'augment l'absorbeixen entre la línia (4-5 (B) i la 3-8, figures 5.5 (b) i (c) respectivament). Concretament, la línia 4-5 (B) es sobrecarrega per sobre dels seus valors límit en el cas taronja, que es correspon a l'STATCOM, i en canvi, es queda al límit quan l'SSSC fa efectiva la seva aportació. El suport aportat per l'SSSC provoca que la línia 3-8 absorbeixi la diferència i això l'aproxima al límit de la seva capacitat.
4. Als 14 s, quan es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 4-5 (A)), els efectes sobre el bus B_3 són insignificants, i les línies recuperen els seus fluxos pre-falta.

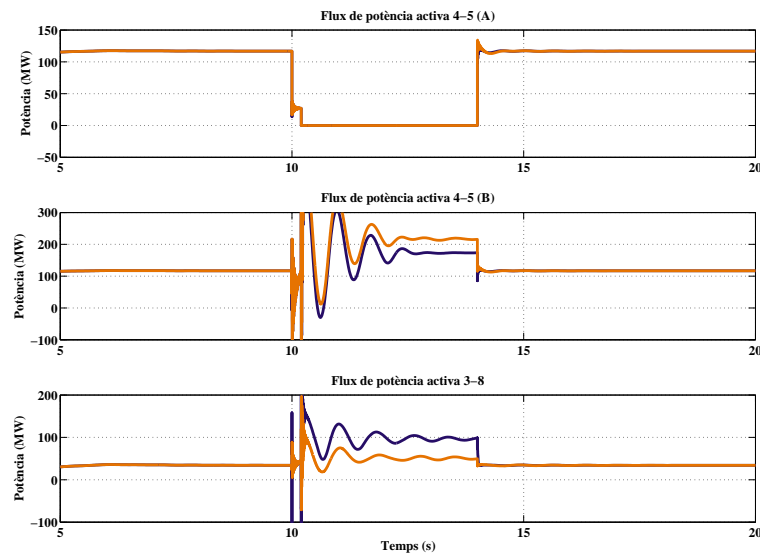


Figura 5.5: Evolució de la transmissió de potència a la línia 4-5 (A) (a), a la línia 4-5 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 4-5 (A) amb únicament un STATCOM (taronja) i amb ambdós dispositius (blau) a la xarxa



En definitiva, l'aplicació de l'SSSC a la xarxa permet solucionar la problemàtica que apareixia de sobrecàrrega a la línia 4-5 (B) durant l'aïllament, tot i que sigui a costa d'augmentar perillosament el flux a la línia 3-8.

5.1.1 Aportació de l'SSSC

Tal i com es pot veure a la figura 5.6, en el moment de l'aïllament, i donada la sobrecàrrega existent a la línia 4-5 (B), l'SSSC injecta 0,08 p.u. de tensió en quadratura amb la corrent circulant. Cal mencionar que aquesta injecció seria més progressiva en un escenari real per amortir els transitoris. En tot cas, aquesta injecció és capaç de modificar el flux de potència a la branca en la que es troba l'SSSC de tal manera que la xarxa pugui funcionar correctament.

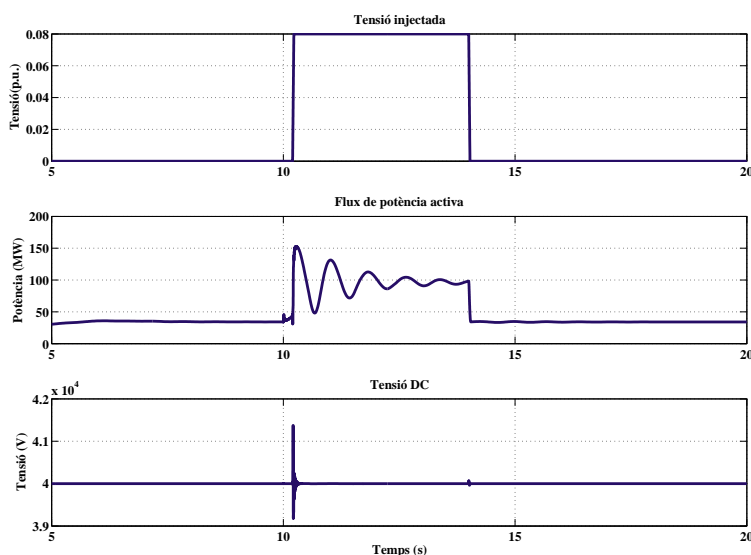


Figura 5.6: Evolució de la tensió injectada (a), flux de potència (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al SSSC davant la pèrdua de la línia 4-5 (A)

Així doncs, amb la integració d'un SSSC a més de l'STATCOM s'ha aconseguit solucionar els problemes provocats per la pèrdua de la línia 4-5 (A).

5.2 Resposta davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)

En aquest apartat s'analitza la resposta de la xarxa elèctrica i del parc eòlic amb un STATCOM i un SSSC davant una contingència (una falta) a la línia 3-7 (B) mentre es produeix, s'aïlla i es restableix.

Sense SSSC, a l'apartat 4.5 es tenia que:

- La línia que queda activa, la 3-7 (A), es sobrecarrega a 60 MW, 10 MW per sobre del límit especificat.



Si s'agafa ara la figura 5.2 es pot veure que l'injecció necessària per a derivar 10 MW cap a la línia afectada per l'SSSC és d'aproximadament 0,02 p.u. Ara bé, amb aquesta injecció s'aconseguiria deixar la línia 3-7 (A) al seu límit mentre que la línia 3-8 encara tindria un gran marge. Així doncs, es procedeix a realitzar un traspàs de 20 MW, que correspon a una injecció de 0,04 p.u., per tal d'aconseguir un funcionament més equilibrat, després de perdre's la línia 4-5 (B) i a tornar a condicions normals després de la recuperació.

En primer lloc, es realitza l'estudi de flux de potència mentre la línia on es produeix la falta es troba desconnectada però l'SSSC en compensa els efectes (Fig. 5.7). En aquest veiem que:

- La línia que queda activa, 3-7 (A), ja no es sobrecarrega a 60 MW, 10 MW més dels nominals, sinó que es queda a 38 MW, pràcticament 12 MW per sota del seu límit nominal.
- La línia on es troba l'SSSC, la 3-8, incrementa el seu flux de potència fins als 59 MW, treballant encara amb molt de marge fins als 100 MW que té com a límit.
- Cap de les altres línies es veu sobrecarregada.

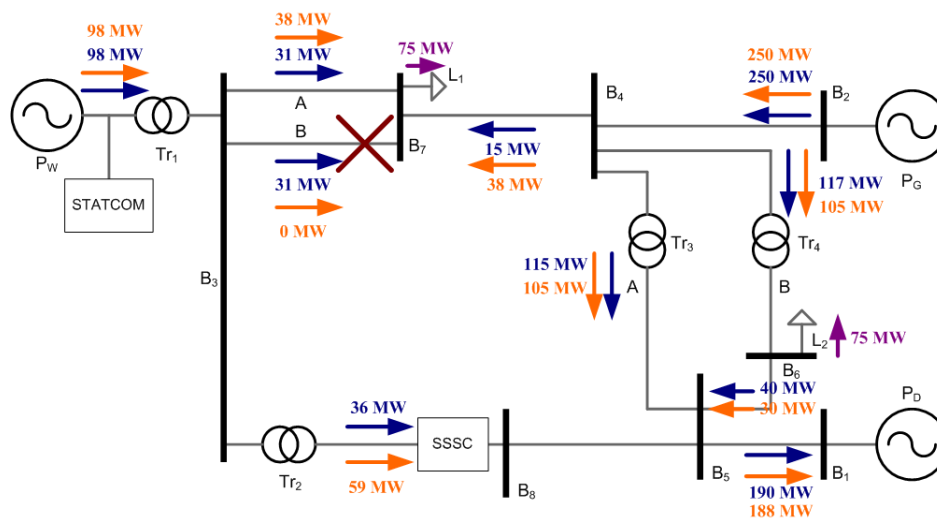


Figura 5.7: Flux de potència després de la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb un STATCOM i un SSSC a la xarxa

Es podria dir que l'acció de l'SSSC ha estat bàsicament la de redirigir una part de la potència generada pel parc eòlic P_W a través de la línia 3-8 per evitar que hagi de passar per la 3-7 (A).

Així doncs, es passa a descriure la simulació realitzada. Els aerogeneradors reben una velocitat del vent de 11 m/s des dels 7s de simulació, accelerant des dels 8 m/s inicials. A partir d'aquí:

1. Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
2. Als 10 segons es produeix una falta a la línia 3-7 (B) durant 10 cicles, és a dir, durant 0,2s.



- Als 10,2 s, les proteccions s'activen i s'aïlla la falta, amb la corresponent pèrdua de la línia implicada.
- Als 14 s, es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 3-7 (B)) i es segueix la simulació fins als 20s.

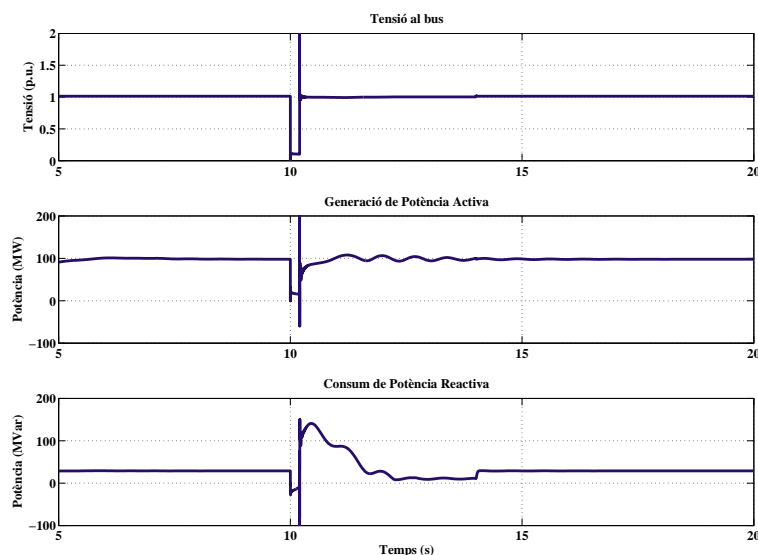


Figura 5.8: Evolució de la tensió (a), generació de potència activa (b) i consum de potència reactiva (c) al bus B_3 davant la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb un STATCOM i un SSSC a la xarxa

La figura 5.8 mostra les conseqüències al bus de connexió del parc eòlic, que és molt proper al lloc on es produeix la falta, en el cas que es disposa d'un STATCOM per al suport a la xarxa. Aquest tema ja s'ha analitzat en el capítol anterior així que es passa a estudiar les implicacions que el canvi i l'aïllament comporten als fluxos de les línies que es veuen més afectades (Fig. 5.9).

- Dels 7s als 10s el funcionament segueix el curs nominal.
- Quan als 10s es produeix la falta, les conseqüències arriben al bus B_3 en forma d'una baixada de tensió crítica i propera als 0 pu. Les potències pateixen les mateixes conseqüències i els transitoris derivats. Els fluxos de les línies representades a la figura 5.9 es veuen afectats també per la falta.
- Als 10,2 s, quan la falta és aïllada, la tensió es recupera completament en pocs segons i sempre sent pròxima a 1 pu. L'STATCOM aporta el màxim de reactiva que li és possible, i d'aquesta forma s'aconsegueix mantenir la tensió a nivells acceptables, sense perdre en cap cas la generació eòlica. A les línies de la figura 5.9 s'observa com cau el flux de la línia afectada per la contingència ((b)) i com les línies 3-7 (A) i 3-8 assumeixen l'increment, especialment en el cas de la 3-7 (A), que l'assumeix gairebé completament si només es disposa d'un STATCOM (Fig. 5.9(a), en taronja). A l'afegir l'SSSC, en blau, es pot observar com la càrrega de la línia 3-7 (A) es relaxa per sota els límits mentre que la 3-8 augmenta de forma acceptable.



- Als 14 s, quan es restableix la connexió de la línia que s'havia aïllat (la 3-7 (B)), els fluxos de potència recuperen ràpidament els valors anteriors a la falta.

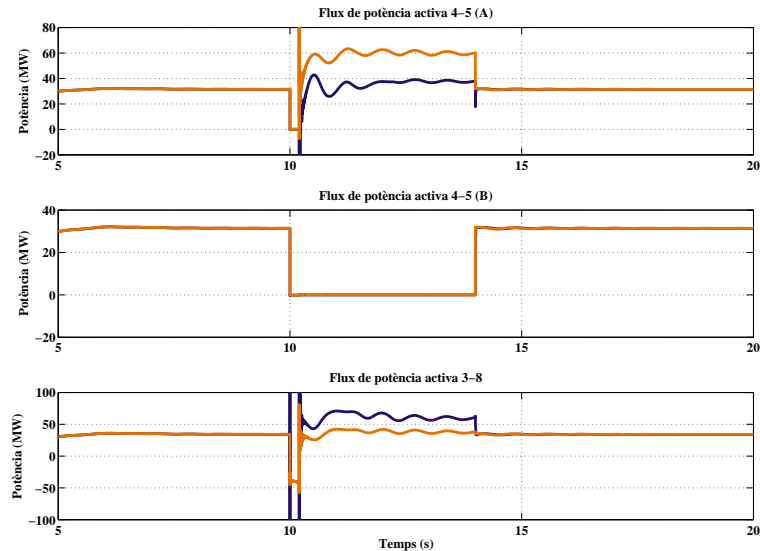


Figura 5.9: Evolució de la transmissió de potència a la línia 3-7 (A) (a), a la línia 3-7 (B) (b) i a la línia 3-8 (c) davant la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb únicament un STATCOM (taronja) i amb ambdós dispositius (blau) a la xarxa

Així doncs, amb la integració d'un SSSC a més de l'STATCOM s'ha aconseguit solucionar els problemes provocats per la pèrdua de la línia 3-7 (B), inclosos els de sobrecàrregues.

5.2.1 Aportació de l'SSSC

Tal i com es pot veure a la figura 5.10, en el moment de l'aïllament, i donada la sobrecàrrega existent a la línia 3-7 (A), l'SSSC injecta 0,04 p.u. de tensió en quadratura amb la corrent circulant. Cal mencionar que aquesta injecció seria més progressiva en un escenari real per amortir els transitoris. En tot cas, aquesta injecció és capaç de modificar el flux de potència a la branca en la que es troba l'SSSC de tal manera que la xarxa pugui funcionar correctament, alleugerint la càrrega que travessa la línia 3-7 (A).

En conclusió, amb la integració d'un SSSC a més de l'STATCOM s'ha aconseguit solucionar els problemes provocats per la pèrdua de la línia 3-7 (B).



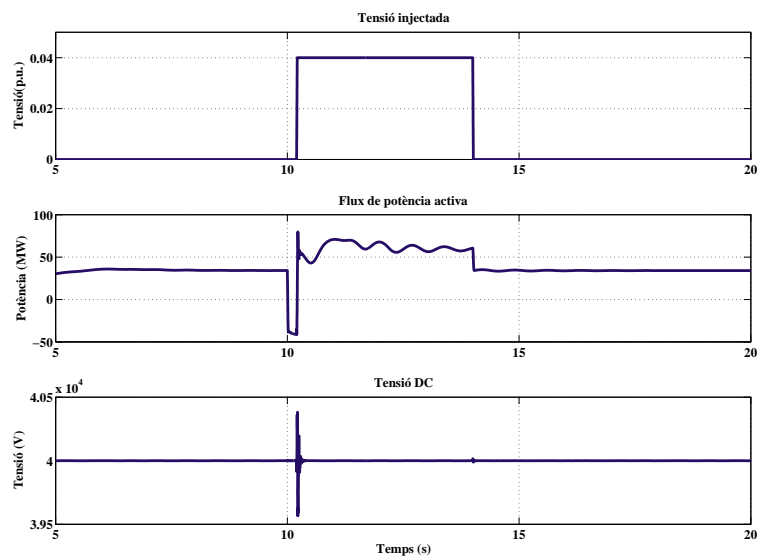


Figura 5.10: Evolució de la tensió injectada (a), flux de potència (b) i tensió de l'enllaç DC (c) al SSSC davant la pèrdua de la línia 3-7 (B)



Capítol 6

Estratègia de control

Els capítols precedents s'han basat en l'anàlisi de l'aportació d'un STATCOM per al suport a la xarxa elèctrica (capítol 4) i en quins punts és un SSSC capaç de millorar i completar aquest suport (capítol 5). Aquest capítol es centra en com dissenyar una estratègia de control per als dispositius FACTS instal·lats.

Al cas d'estudi, l'STATCOM té la finalitat de donar suport de tensió al punt de connexió del parc. En aquestes circumstàncies, el seu control es centra en mantenir la tensió a 1 pu, i per tant, el control és rígid.

En canvi, l'SSSC aporta certa flexibilitat sobre la seva acció. Es desenvolupa doncs una estratègia de control pensada per a aconseguir un règim que a més d'evitar les sobrecàrregues pugui aconseguir optimitzar els fluxos de potència per tal d'assolir mínimes pèrdues.

6.1 Consideracions generals

En primer lloc, cal considerar la situació geogràfica. Per qüestions de proximitat i de disponibilitat de les dades, el cas es tractarà des del punt de vista de la subestació que conté l'SSSC i, per tant, es disposarà únicament de les dades referents a les proximitats de B_3 . Aquestes són la línia de generació eòlica i les línies 3-7 (A), 3-7 (B) i 3-8-5, tal i com es pot veure a 3.2.

En benefici de la notació, a partir d'aquest punt els paràmetres referents a les línies seran anomenats amb:

- El subíndex G per a la línia eòlica, I_G .
- El subíndex 1 per a la línia 3-7 (A), com R_1 i I_1 .
- El subíndex 2 per a la línia 3-7 (B), com R_2 i I_2 .
- El subíndex 3 per a la línia 3-8-5, com R_3 i I_3 .

Les pèrdues a les línies que s'estudien, causades per efecte Joule, es poden expressar de la següent manera:

$$P_{diss} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 \quad (6.1)$$



on $R_n = R'_n L_n$, és a dir, la resistència total és la resistència lineal multiplicada per la longitud de la línia. No es consideren les pèrdues al convertidor.

6.2 Càlcul del flux per a mínimes pèrdues en el cas d'estudi

En general, la suma d'intensitats al nus B_3 ha de complir que

$$I_3 = (I_G - I_1 - I_2)$$

Per ser totes les tensions iguals en aquest punt, i considerant que s'han de complir els balanços de potència tant activa com reactiva, es dedueix que

$$I_3 \cos \varphi_3 = (I_G \cos \varphi_G - I_1 \cos \varphi_1 - I_2 \cos \varphi_2)$$

Així doncs, l'expressió (6.1) queda en

$$P_{diss} = R'_1 L_1 (I_1)^2 + R'_2 L_2 (I_2)^2 + R'_3 L_3 \left(\frac{I_G \cos \varphi_G - I_1 \cos \varphi_1 - I_2 \cos \varphi_2}{\cos \varphi_3} \right)^2 \quad (6.2)$$

que és una expressió amb múltiples variables que considera les pèrdues a les tres línies estudiades. En general, s'afegirien restriccions i es solucionaria el problema d'optimització a través d'un mètode d'OPF¹ com en [30, 31].

No obstant, l'aplicació de qualsevol d'aquests mètodes requeriria a més a més el coneixement i la modelització de la xarxa sencera, així com una complicació afegida: l'obtenció de totes les mesures. El que a nivell teòric o de simulació no presenta més dificultat, a la realitat es convertiria en un tema complex ja que s'hauria de fer arribar les mesures d'intensitat i tensió de punts molt llunyans, la qual cosa faria molt més complex el problema.

D'aquesta manera, s'ha optat per realitzar un control a través d'una funció programada que variant la injecció aportada per l'SSSC tendeix a trobar el punt mínim de la corba de pèrdues i que serà descrita en els següents apartats.

6.3 Disseny del control

Per al disseny de la funció de control, en primer lloc s'ha comprovat quin és l'aspecte de les pèrdues en funció de la injecció de l'SSSC a la xarxa. Per al cas d'estudi, la resposta ha estat la representada a la figura 6.1. D'aquesta se'n pot extreure l'existència d'un mínim que a més, no es correspon amb el cas d'injecció nul·la, sinó que ho fa amb una certa acció sobre el sistema.

A partir de tot això, es dissenya un esquema de control que segueixi el curs del diagrama de flux de la figura 6.2. La idea bàsica consistirà en comprovar que no hi hagi contingències (el cas contrari es tindrà en compte més endavant) i en funció de l'evolució de les pèrdues i de l'acció que s'hagi realitzat anteriorment es calcularà la nova comanda, acostant-se progressivament al mínim de pèrdues.

¹Optimal Power Flow



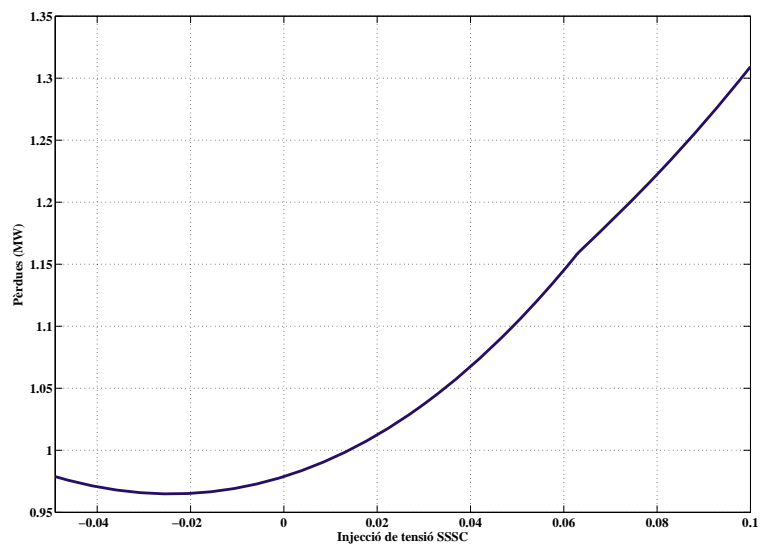


Figura 6.1: Relació entre la injecció de tensió de l'SSSC i les pèrdues en el cas d'estudi

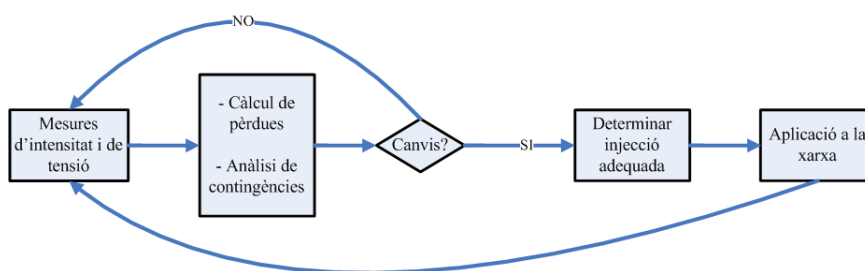


Figura 6.2: Esquema de control per a l'algoritme



6.4 Implementació del control

A continuació, es descriu en pseudo-codi la implementació realitzada del control.

Input: Pèrdues actuals, injecció actual i tensions a les línies

Output: Nova comanda d'injecció per a l'SSSC

```

foreach Temps de mostreig do
  if No hi ha cap contingència then
    if  $\Delta Perdues > \text{tolerància}$  then
      if  $\Delta Injeccio < 0$  then
        |  $Injeccio_{nova} = Injeccio_{actual} + k_1$ ;
      end
      else
        |  $Injeccio_{nova} = Injeccio_{actual} - k_2$ ;
      end
    end
    if  $\Delta Perdues < 0$  then
      if  $\Delta Injeccio < 0$  then
        |  $Injeccio_{nova} = Injeccio_{actual} - k_3$ ;
      end
      else
        |  $Injeccio_{nova} = Injeccio_{actual} + k_4$ ;
      end
    end
    else
      |  $Injeccio_{nova} = Injeccio_{actual}$ ;
    end
  end
end

```

Algorithm 1: Algoritme de control per a l'SSSC

Per a la implementació particular del present projecte, s'han utilitzat els següents valors per a les variables k_n :

- $k_1 = k_2 = 0,005$
- $k_3 = k_4 = 0,0025$
- $f(\text{Contingència}) = 0,04$
- $\text{tolerància} = 0,001 \text{ MW}$
- $\text{Temps de mostreig} = 0,5\text{s}$

D'aquesta forma, si l'evolució de les pèrdues segueix la direcció equivocada, la correcció sobre la injecció és major. Si en canvi, l'evolució és la correcta, els increments són menors per tal de tendir a la convergència i no oscil·lar. La funció que calcula quina ha de ser la injecció en casos de contingència es redueix a una constant però només en aquest cas, ja que si les mesures són únicament a B_3 no es poden identificar més casos. La tolerància, per la seva banda, indica quin és el marge de canvi en el valor de les pèrdues que faria que no es variés la injecció.



6.5 Verificació de la resposta en el cas nominal

Un cop implementada la funció en MATLAB®, es procedeix a la seva introducció a la xarxa d'estudi. Es col·loca el mòdul de control a l'entrada de l'SSSC per tal que sigui aquest l'encarregat de marcar la tensió de referència del dispositiu. Per tal de verificar el seu correcte funcionament es procedeix en primer lloc a aplicar el control al cas de funcionament nominal. La figura 6.3 mostra l'evolució de la comanda d'injecció de tensió que surt del control.

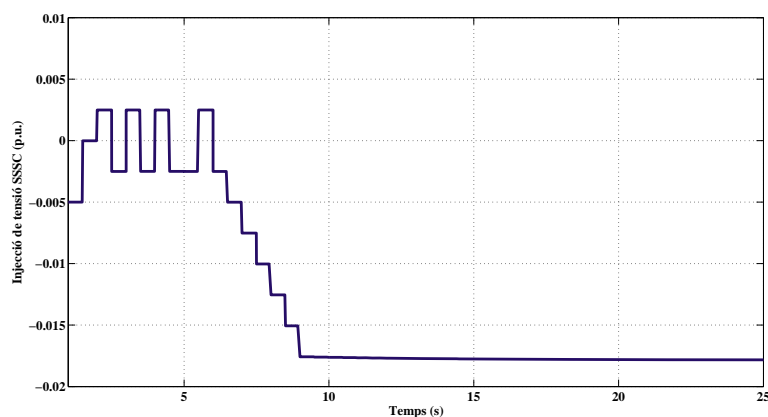


Figura 6.3: Comanda d'injecció de tensió per a l'SSSC en el cas nominal de funcionament

L'acció del control sobre les pèrdues es pot observar a la figura 6.4. Es compara el cas sense control (en taronja) amb el cas on s'activa el programa de control (en verd). La lectura que se'n pot extreure és la següent:

- En els 5 primers segons, el sistema està en arrencada. L'SSSC no s'activa fins als 5 segons i per tant, la senyal de control no és vàlida fins llavors.
- Una vegada activat, el control fa variar la injecció esglaonadament i segons el temps de mostreig fins a estabilitzar-se. Les pèrdues disminueixen de forma paral·lela a la injecció de tensió i s'estabilitzen en un valor menor que en el cas sense control.
- Es nota que el valor en el que s'estabilitza és al voltant de 0,02 p.u. negatiu, que coincideix amb el mínim vist al gràfic de la figura 6.1.

Així doncs, l'aplicació del control dissenyat permet estalvis en pèrdues des del moment de la seva activació.

6.6 Verificació de la resposta davant de variacions en el cas d'estudi

Fins aquí, sembla que el control estigui totalment orientat a la xarxa d'estudi dissenyada, però en realitat, el control és igualment hàbil per a canvis importants en la xarxa, com canvis en la generació o en la càrrega. Per a demostrar-ho, es presenten les respostes davant un canvi en la generació eòlica i davant de canvis en els valors i les situacions de les càrregues.



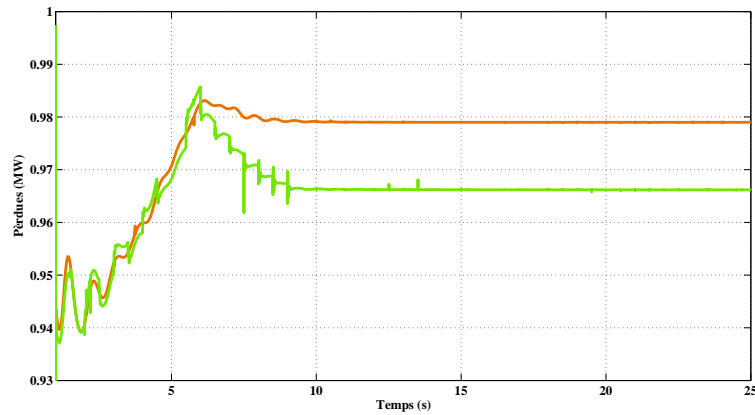


Figura 6.4: Pèrdues en el cas nominal amb control (verd) i sense (taronja)

6.6.1 Canvi en la generació

En aquest cas, es verifica la resposta davant de l'increment de la velocitat del vent, des d'una velocitat inferior a la de funcionament fins a la nominal del cas d'estudi. La figura 6.5 mostra l'evolució de la injecció de tensió a l'SSSC.

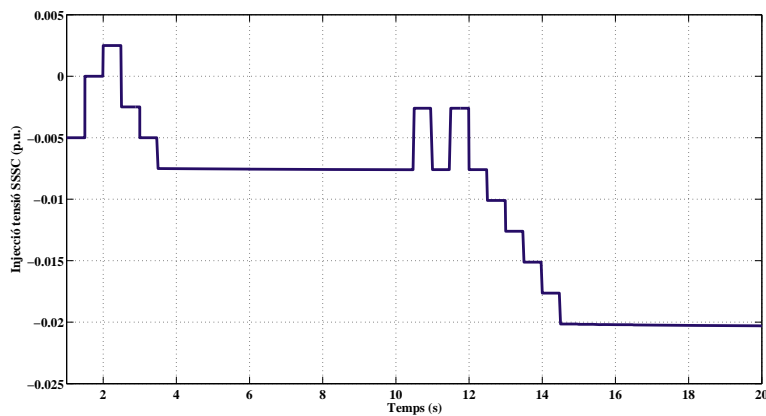


Figura 6.5: Comanda d'injecció de tensió per a l'SSSC en el cas de l'increment del vent

De la mateixa manera, la figura 6.6 mostra la comparativa de pèrdues abans i després de l'aplicació del control. Les conclusions que es poden extreure són:

- El control de la tensió a injectar s'estabilitza a dos valors diferents en els dos trams diferents, per tant, s'adapta a la situació acostant-se al nou mínim.
- En ambdós casos, es redueixen les pèrdues a la xarxa.



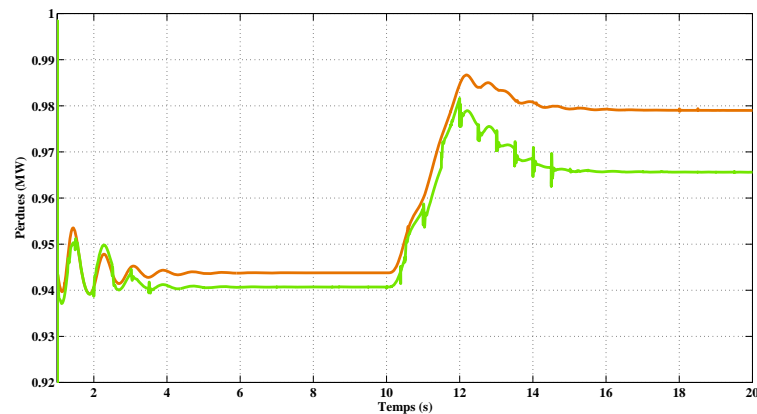


Figura 6.6: Pèrdues davant un increment del vent amb control (verd) i sense (taronja)

6.6.2 Canvi en les càrregues

Per a comprovar la resposta davant un canvi en les càrregues la simulació es realitza en quatre trams:

1. Dels 5 als 15 segons, el sistema funciona de forma nominal.
2. Dels 15 als 25 segons, la càrrega de 75 MW situada a B_7 s'incrementa fins a 150 MW.
3. Dels 25 als 30 segons, es torna a la càrrega nominal.
4. Dels 30 segons als 40, es col·loca una càrrega nova de 75 MW a B_3 , és a dir, just a la sortida del parc eòlic.

Els trams són fàcilment identificables a la figura 6.8, on es representen les pèrdues abans i després de l'aplicació del control. A més a més, la figura 6.7 mostra la resposta del control davant les variacions.

D'ambdues figures s'extreu que:

1. Dels 5 als 15 segons, el sistema funciona de forma nominal i la injecció s'estabilitza al voltant de -0,02 p.u.
2. Dels 15 als 25 segons, l'increment de la càrrega a B_7 provoca canvis al sistema. El control reacciona modificant el nou òptim que es troba al voltant de -0,01 p.u. Les pèrdues amb el control activat són menors.
3. Dels 25 als 30 segons, es torna a la càrrega nominal i la comanda d'injecció tendeix a tornar al valor del cas nominal, però no té temps per estabilitzar-se.
4. La càrrega nova a B_3 provoca un canvi més accentuat al sistema. Les pèrdues són menors (circula menys potència per les branques implicades però amb el control encara s'aconsegueix una disminució major).

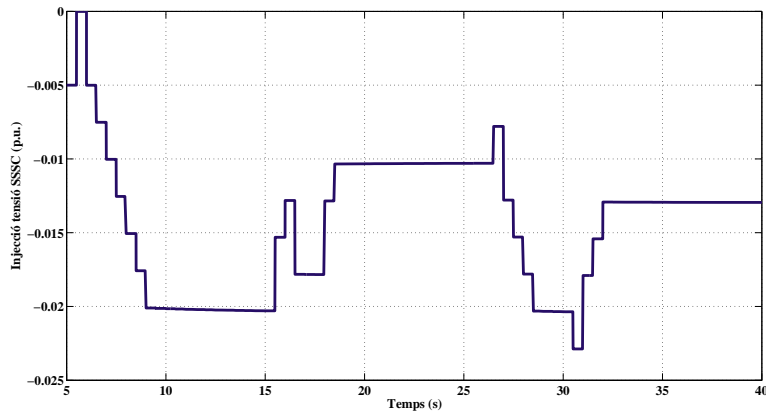


Figura 6.7: Comanda d'injecció de tensió per a l'SSSC en el cas de canvis de càrrega a la xarxa

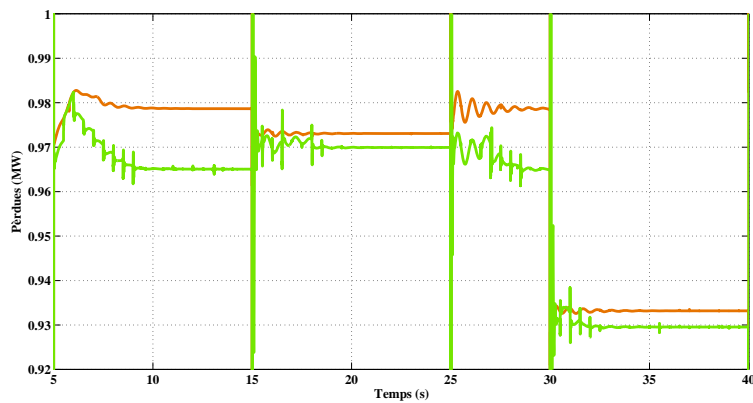


Figura 6.8: Pèrdues davant dels canvis de càrrega amb control (verd) i sense (taronja)



6.7 Cas de contingència

Fins ara s'ha verificat el control per a modificacions en la xarxa però sempre sense considerar casos de contingència. Les lectures de tensió i intensitat únicament a B_3 no permeten saber més que les pèrdues de línies que arriben a aquest punt, però en tot cas, això és suficient per tal d'assegurar un correcte funcionament (i evitar sobrecàrrega), tant en cas de falta a la línia 3-7 (B) - cas estudiat a continuació - com de falta a la 3-7 (A) o a la 3-8.

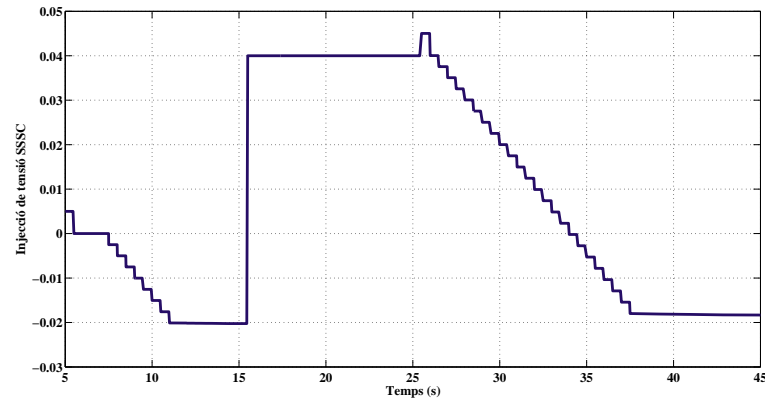


Figura 6.9: Comanda d'injecció de tensió per a l'SSSC en el cas de pèrdua de la línia 3-7 (B)

La figura 6.9 mostra la injecció de tensió de l'SSSC i la figura 6.10 mostra l'evolució de les pèrdues. Per trams, el que se n'extreu és el següent:

1. Fins a l'instant 15s, el funcionament és el del cas nominal.
2. Als 15 segons es produeix la falta i l'aïllament a la línia 3-7 (B). La resposta és la injecció pràcticament immediata (amb un temps de mostreig de retard) de 0,04 p.u., que es correspon a l'acció necessària davant aquesta contingència. Les pèrdues són ara majors que en el cas sense control, però això es deu a que, en el cas sense control, la línia 3-7 (A), que és més curta i presenta menys pèrdues, es sobrecarrega (Fig. 6.11). L'SSSC es veu obligat a realitzar una injecció que va en contra del desitjat de cara a les pèrdues però va a favor de protegir la xarxa, i en aquest cas, això és el més important.
3. Amb el retorn a la normalitat, als 25 segons, el sistema retorna lentament al seu funcionament nominal.

Per últim, s'ha adjuntat la figura 6.11 per fer més visible la sobrecàrrega a la línia 3-7 (A). El límit es representa amb una línia vermella, el cas amb control en verd i el cas sense control, en taronja. Es veu com, sense control, el sistema passa 10 segons en sobrecàrrega, que serien fatals per la xarxa.



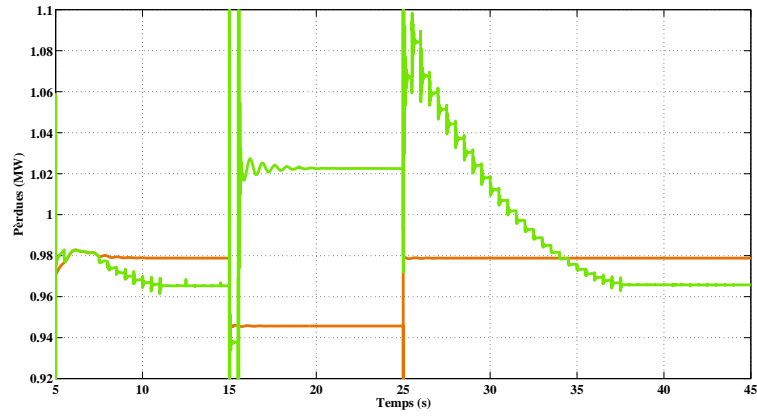


Figura 6.10: Pèrdues davant la pèrdua de la línia 3-7 (B) amb control (verd) i sense (taronja)

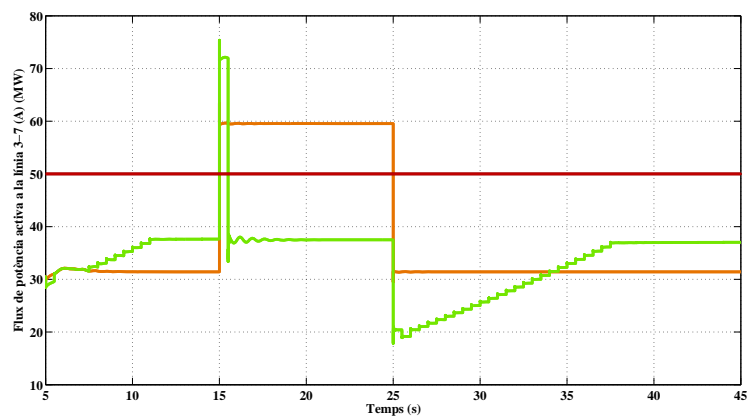


Figura 6.11: Flux de potència activa per la línia 3-7 (A) en cas de pèrdua de la línia 3-7 (B) amb control (verd) i sense (taronja)



Capítol 7

Pressupost

7.1 Introducció

El present projecte és un projecte de simulació. Conseqüentment, no s'ha realitzat cap muntatge ni s'ha requerit més infraestructura de la necessària per simular i realitzar tasques d'oficina. Així doncs, els únics elements presents en aquest pressupost seran els de hardware, software i mà d'obra.

7.2 Pressupost per a l'anàlisi de l'aplicació de dispositius de transmissió AC flexibles per al suport a la xarxa elèctrica

A continuació es presenta el pressupost desglossat per partides segons les activitats. L'IVA no es mostra fins a la suma final. El pressupost té validesa d'un mes a partir de la data de la signatura.

7.2.1 Hardware

La taula 7.1 mostra el pressupost destinat als elements que conformen el hardware.

Taula 7.1: Pressupost del hardware

Concepte	Preu/unitat	Unitats	Total
Torre Compaq Presario SR5700	430 €	1	430 €
Monitor Compaq	137 €	1	137 €
Perifèrics	30 €	1	30 €
TOTAL			597 €



7.2.2 Software

La taula 7.2 mostra el pressupost destinat als elements que conformen el hardware.

Taula 7.2: Pressupost del software

Concepte	Preu	Unitats	Total
MATLAB ©	1950 €	1	1950 €
Simulink	3000 €	1	3000 €
SimPowerSystems	3000 €	1	3000 €
TOTAL			8950 €

7.2.3 Mà d'obra

La taula 7.3 mostra el pressupost destinat a la mà d'obra.

Taula 7.3: Pressupost de la mà d'obra

Concepte	Preu/hora	Hores	Total
Formació	35 €/h	90	3150 €
Disseny	35 €/h	100	3500 €
Programació	35 €/h	200	7000 €
Redacció	35 €/h	150	5250 €
TOTAL		540	18900 €

7.2.4 Agregat

La taula 7.4 mostra el pressupost total del projecte.

Taula 7.4: Pressupost global agregat per capítols

Capítol	Preu
Pressupost de hardware	597 €
Pressupost de software	8950 €
Pressupost de la mà d'obra	18900 €
Altres materials i previsió de desviacions	2844,7 €
TOTAL (sense IVA)	31291,7 €
IVA (16%)	5006,7 €
TOTAL	36298,4 €



Capítol 8

Impacte Mediambiental

L'impacte directe d'aquest projecte consisteix bàsicament en el material fungible consumit durant la seva realització i en l'energia elèctrica que han consumit els aparells electrònics implicats en les simulacions, és a dir, els ordinadors. Fent una mirada una mica més enllà, l'aplicació d'aquest projecte no implicaria haver de construir parcs nous, sinó que està precisament pensat amb l'objectiu de poder aprofitar els ja existents, permetent que compleixin amb la fiabilitat que s'espera en el subministrament d'energia. No obstant, sí que implicaria la construcció i implementació de dispositius FACTS, que no deixen de ser elements d'electrònica de potència que han de ser fabricats i per tant, sí que porten associat cert impacte directe sobre el medi.





Conclusions

L'objectiu del projecte ha estat l'aplicació de dispositius FACTS (sistemes de transmissió AC flexibles) per al suport a la xarxa elèctrica en el punt de connexió d'un parc eòlic amb generadors d'inducció (velocitat fixa), donant suport tant al parc com a la xarxa sencera en cas de contingència. Les tasques realitzades es resumeixen en:

- S'ha realitzat un estudi de l'energia eòlica, tecnologies d'aerogenerador i problemàtiques d'integració a la xarxa elèctrica.
- S'ha realitzat un estudi de l'art complet sobre dispositius FACTS per tal de comprendre el seu funcionament, amb una visió general, una classificació, els seus principis de funcionament i un anàlisi més concret d'alguns d'aquests dispositius.
- S'ha dissenyat i modelat una xarxa elèctrica pròpia i s'han estudiat els problemes derivats de la integració d'una alta proporció d'energia eòlica, generada a partir de generadors de velocitat fixa.
- S'ha instal·lat un STATCOM a la xarxa de prova, estudiada prèviament sense l'aportació d'aquest dispositiu, i s'ha analitzat quina és la seva capacitat de suport sobre la xarxa. L'STATCOM ha servit eficaçment per solucionar les problemàtiques que havien aparegut al punt de connexió de la xarxa.
- S'ha instal·lat un SSSC a la xarxa de prova, a la qual ja s'havia afegit l'STATCOM, amb la finalitat de solucionar problemes de flux de potència. S'ha comprovat com aquest dispositiu pot proporcionar un suport addicional a la xarxa.
- S'ha dissenyat un control pels FACTS a la xarxa de prova, amb la finalitat d'aprofitar les capacitats dels dispositius instal·lats per anar un pas més enllà del suport a la xarxa elèctrica.

Utilitzant el programa de simulació SimPowerSystems[®] i el MATLAB[®], s'ha implementat la xarxa elèctrica i s'ha analitzat la resposta del sistema en casos de contingència variats. Concretament, s'ha comprovat la resposta a increments lleugers o notables de l'increment del vent i davant de dues faltes que, addicionalment a la pròpia falta, ocasionen la pèrdua momentània d'alguna de les línies.

Les simulacions realitzades han demostrat que el sistema format per la xarxa elèctrica amb alta presència eòlica i sense cap tipus de suport no és capaç de reaccionar adequadament davant les contingències ni davant un fort increment del vent. Així doncs, s'ha vist també que un STATCOM soluciona aquests problemes amb el parc eòlic, permetent superar les contingències que la xarxa sola era incapaç d'afrontar. Però l'aparició de sobrecàrregues en aquests casos ha fet plantejar l'instal·lació d'un SSSC, i un cop situat, s'ha comprovat que contribueix eficaçment a alleujar les sobrecàrregues i a permetre el funcionament desitjat del sistema. El control aplicat, a més, redueix les pèrdues, tant durant el funcionament nominal



com davant de canvis en la xarxa, i fins i tot és capaç de donar resposta a les contingències que puguin aparèixer.

Treballs futurs

Si s'analitzen les possibilitats de treballs futurs apareixen moltes noves vies d'estudi. A continuació, es fa una pinzellada de les més interessants:

- El control aplicat és efectiu però simplificat. Incrementar la seva complexitat no implica millorar-ne l'efectivitat però es podrien dur a terme algunes millores. En particular, el càlcul de les k_n es podria fer en funció de la distància a l'òptim, per tal de convergir més ràpidament. D'altra banda, si s'agafessin dades de més punts es podria fer més complexa la funció d'acció en cas de contingència. Fins i tot, es podria aplicar càlculs heurístics o genètics, la qual cosa constituiria un projecte per si sol.
- L'SSSC s'ha instal·lat a la branca 3-8 perquè era la que, geogràficament, estava millor situada. L'STATCOM, s'ha col·locat a B_3 per connectar-se a la sortida del parc. Un estudi futur seria la determinació de la localització òptima a la xarxa per a aquests dispositius, especialment per a l'SSSC.
- L'UPFC és un dispositiu que agrupa un STATCOM i un SSSC en connexió *back-to-back*. Al present projecte s'han instal·lat per separat, amb la qual cosa es podrien comprovar els efectes o la viabilitat d'intercanviar-los per un UPFC.
- L'estudi s'ha realitzat en màquines de velocitat fixa. El següent pas seria comprovar els requisits o l'aplicabilitat dels mateixos dispositius en màquines que utilitzin les altres tecnologies d'aerogenerador.
- Un cop vist que els dispositius FACTS són capaços de solucionar els problemes, un treball futur consistiria en pensar estratègies de control més complexes que fossin capaces de gestionar simultàniament dos o més d'aquests elements per tal de poder gestionar la xarxa amb l'objectiu que es desitgi, com per exemple, el d'aconseguir les mínimes pèrdues.
- Una feina futura no menys important seria la relacionada amb fer un estudi de viabilitat de l'aplicació, comparar costos i veure en quins casos és rendible aplicar aquests dispositius o rehabilitar parcs ja existents que altrament no podrien complir les normatives.



Agraïments

En primer lloc, vull agrair al meu director de projecte, l'Oriol Gomis, del Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA), el seu consell i guia a través de la realització del present projecte, així com per la oportunitat que m'ha donat de formar part del grup del CITCEA, dedicat, entre d'altres, a temes de recerca relacionats amb les noves energies. En la mateixa línia, agraeixo a la resta de companys del departament d'Urgell la seva col·laboració, especialment a l'Andreas, al Roberto, a l'Eduard, al Mikel, al Gerard, a la Marcela i al Pau.

En relació, donar les gràcies a les diverses entitats involucrades en la càtedra Endesa que, a banda de finançar la meua beca per a la realització del projecte final de carrera, han col·laborat en la realització de tasques paral·leles que m'han aportat nous coneixements.

Un agraïment addicional per al CFIS (Centre de Formació Interdisciplinària Superior), per haver-me donat la oportunitat única de cursar dues enginyeries superiors de manera simultània, així com per l'ajuda proporcionada al llarg de tot el camí.

També seria un error no considerar que l'agraïment més important és per a la meua família, i que el seu suport durant el projecte no és més que una fita de les seves empentes al llarg de tota una vida.

I finalment, però no per menys, la meua més sincera gratitud als meus amics més propers i a la Cristina, que m'ha fet costat mentre em proporcionava un suport inestimable amb les seves correccions i comentaris.

A tots ells, moltes gràcies.





Bibliografia

- [1] REE. P.O. 12.3. requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas. *BOE 254 de 24/10/2006*, Sec 1:37017 a 37019, 2006. [7](#), [25](#), [26](#)
- [2] Red Eléctrica de España. El sistema eléctrico español (avance). 2008. [11](#)
- [3] European Wind Energy Association. Europe wind map. 2008. [11](#)
- [4] N.G. Hingorani and L. Gyugyi. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press, 2002. [14](#), [33](#), [72](#)
- [5] Gabriela Glanzmann. Facts: flexible alternating current transmission systems, January 2005. [14](#), [27](#), [32](#), [37](#)
- [6] Vladislav Akhmatov. *Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power*. PhD thesis, Technical University of Denmark, 2003. [14](#), [24](#)
- [7] M. Noroozian, A. N. Petersson, B. Thorvaldson, B. A. Nilsson, and C. W. Taylor. Benefits of svc and statcom for electric utility application. In *Proc. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, volume 3, pages 1192–1199, 7–12 Sept. 2003. [14](#)
- [8] Wei Qiao, R. G. Harley, and G. K. Venayagamoorthy. Effects of facts devices on a power system which includes a large wind farm. In *Proc. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition PSCE '06*, pages 2070–2076, Oct. 29 2006–Nov. 1 2006. [14](#), [41](#)
- [9] Z. Saad-Saoud, M.L. Lisboa, J.B. Ekanayake, N. Jenkins, and G. Strbac. Application of statcoms to wind farms. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 5(145):511–516, Sep 1998. [14](#)
- [10] V. Salehi, S. Afsharnia, and S. Kahrobaee. Improvement of voltage stability in wind farm connection to distribution network using facts devices. In *Proc. IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pages 4242–4247, 6–10 Nov. 2006. [14](#)
- [11] A. P. Jayam, N. K. Ardesna, and B. H. Chowdhury. Application of statcom for improved reliability of power grid containing a wind turbine. In *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pages 1–7, 20–24 July 2008. [14](#)
- [12] L. Qi, J. Langston, and M. Steurer. Applying a statcom for stability improvement to an existing wind farm with fixed-speed induction generators. In *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pages 1–6, 20–24 July 2008. [14](#), [41](#)



- [13] M. Molinas, Jon Are Suul, and T. Undeland. Low voltage ride through of wind farms with cage generators: Statcom versus svc. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 23(3):1104–1117, May 2008. [14](#)
- [14] N. R. Ullah, T. Thiringer, and D. Karlsson. Voltage and transient stability support by wind farms complying with the e.on netz grid code. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 22(4):1647–1656, Nov. 2007. [14](#)
- [15] W. W. Qiao, R. R. G. Harley, and G. G. K. Venayagamoorthy. Coordinated reactive power control of a large wind farm and a statcom using heuristic dynamic programming. *IEEE Transaction on*, pages 1–11, 2003. [14](#)
- [16] Prabha Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Professional, 1994. [14](#), [23](#), [28](#)
- [17] F. Blaabjerg and Z. Chen. Wind power - a power source enabled by power electronics. *Proceedings of 2004 CPES Power Electronics Seminar*, pages pp. 3–14, 2004. [16](#), [17](#)
- [18] T. Ackermann. *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons, Ltd., 2005. [16](#), [19](#), [20](#), [21](#)
- [19] Z. Lubosny. *Wind Turbine Operation in Electric Power Systems*. 2003. [16](#)
- [20] S. Heier. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. John Wiley & Sons, 1998. [18](#)
- [21] S. Arnalte-Gomez J. Rodríguez-Almendro, J. Burgos-Dias. *Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica*. Rueda, 2003. [18](#)
- [22] J. G. Slootweg. *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons, 2005. [18](#)
- [23] Thierry Van Cutsem and Costas Vournas. *Voltage stability of electric power systems*. Springer, 1998. [23](#)
- [24] Andreas Sumper, Oriol Gomis-Bellmunt, Antoni Sudria-Andreu, Roberto Villafila-Robles, and Joan Rull-Duran. Response of fixed speed wind turbines to system frequency disturbances. *Power Systems, IEEE Transactions On*, 24:181–192, February 2009. [25](#)
- [25] Andreas Sumper. *Dynamic Performance of Fixed Speed Wind Turbine Generating Systems During System Fault Events*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2008. [25](#)
- [26] Shan Jiang, U. D. Annakkage, and A. M. Gole. A platform for validation of facts models. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 21(1):484–491, Jan 2006. [41](#)
- [27] Pierre Giroux and Gibert Sybille. Static synchronous compensator (STATCOM) used for midpoint voltage regulation on a 500-kv transmission line. *SimPower Systems reference manual*, 2007. [41](#), [55](#)
- [28] Richard Gagnon. Operation of induction generators (IG) driven by variable-pitch turbines. *Hydro-Québec*, 2007. [41](#)
- [29] Pierre Giroux and Gibert Sybille. Static synchronous series compensator (SSSC) used for power oscillation damping. *SimPower Systems reference manual*, 2007. [71](#)
- [30] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, and G. Andersson. Use of upfc for optimal power flow control. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 12(4):1629–1634, Oct 1997. [82](#)



- [31] X.-P. Zhang and E.J. Handschin. Optimal power flow control by converter based facts controllers. *AC-DC Power Transmission, 2001. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 485)*, pages 250–255, Nov 2001. [82](#)
- [32] R.H. Park. *Two Reaction Theory of Synchronous Machines*. AIEE Transactions 48:716-730, 1929. [103](#), [104](#)
- [33] Albert Betz. *Wind-Energie*. 1926. [107](#)





Apèndix A

Transformació dq0

La transformació dq0 és una transformació matemàtica utilitzada per simplificar l'anàlisi de circuits trifàsics. En el cas de sistemes equilibrats, la transformació dq0 redueix tres quantitats AC a dues quantitats DC. Càlculs simplificats poden ser duts a terme en aquestes quantitats DC imaginàries abans de desfer la transformació per a recuperar els resultats reals AC. S'utilitza habitualment per a simplificar l'anàlisi de màquines trifàsiques o per simplificar càlculs per al control d'inversors trifàsics. Aquesta transformació és molt similar a la proposada al 1929 per R.H. Park [32]. De fet, la transformada dq0 és habitualment anomenada transformada de Park.

A.1 Transformada dq0

Es defineix la transformada dq0 amb angle θ d'un vector $x^{abc} \in \mathbb{R}^3$ com:

$$x^{dq0} = T_{dq0}(\theta)x^{abc} \quad (\text{A.1})$$

amb

$$T_{dq0}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Es diu aleshores que el vector x^{qd0} és el vector x^{abc} en forma qd0 en la referència d'angle θ . D'altra banda, com que $T(\theta)$ és invertible, aleshores:

$$x^{abc} = T_{dq0}^{-1}(\theta)x^{dq0} \quad (\text{A.3})$$

amb

$$T_{dq0}^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Gràficament, la transformació és la de la figura A.1.



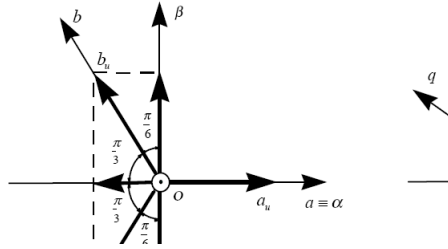


Figura A.1: Transformació de referència abc (estàtica) a dq0 (rotativa)

A.2 Transformada de Park

Es pot veure que les diferències respecte la transformada proposada per R.H. Park [32] són poques:

$$T_{park}(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

i

$$T_{park}^{-1}(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$



Apèndix B

Sistema p.u.

El sistema p.u. o sistema per unitat és, en el camp de la transmissió de potència, l'expressió de les magnituds del sistema com a fraccions d'una unitat base definida. Els càlculs es simplifiquen perquè les quantitats expressades en p.u. són les mateixes independentment del nivell de tensió. De la mateixa forma, aparells similars tindran impedàncies, caigudes de tensió i pèrdues que seran les mateixes una vegada expressades en per unitat, encara que la mida de l'aparell varii àmpliament. La conversió de les quantitats p.u. a volts, ohms o amperers requereix coneixement de la base a la qual aquestes magnituds són referides.

Un sistema per unitat aporta unitats per a la potència, la tensió, la corrent, l'impedància i l'admitància. Només dues poden ser independents, usualment la potència i la tensió. Totes les quantitats s'expressen com a múltiples dels valors base seleccionats. El sistema p.u. s'utilitza principalment en estudis de flux de potència. Això no obstant, com que els paràmetres de transformadors i màquines (motors elèctrics i generadors) s'especifiquen habitualment en termes de per unitat, és un concepte important en tota la branca elèctrica.

En aquest context es té:

B.1 Magnituds elèctriques

Valors donats:

$$\begin{aligned} V_{base} \\ P_{base} \end{aligned} \tag{B.1}$$

B.1.1 Sistema monofàsic

$$\begin{aligned} I_{base} &= \frac{P_{base}}{V_{base}} \\ Z_{base} &= \frac{V_{base}^2}{P_{base}} \\ Y_{base} &= Z_{base}^{-1} \end{aligned} \tag{B.2}$$



B.1.2 Sistema trifàsic

$$\begin{aligned} I_{base} &= \frac{P_{base}}{\sqrt{3}V_{base}} \\ Z_{base} &= \frac{V_{base}^2}{P_{base}} \\ Y_{base} &= Z_{base}^{-1} \end{aligned} \tag{B.3}$$



Apèndix C

Llei de Betz

Per a provar la Llei de Betz, que estableix que no és possible convertir més del 59% de l'energia del vent a mecànica utilitzant un aerogenerador, es parteix de la hipòtesis que, si v_1 és la velocitat del vent lluny per davant de la turbina i v_2 la velocitat del vent lluny després d'haver-hi passat, la velocitat mitjana del vent a través del rotor és [33]

$$v_m = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (\text{C.1})$$

Així doncs, la massa d'aire que travessa el rotor en un segon és de

$$m = \rho A \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (\text{C.2})$$

on m és la massa per segon, ρ és la densitat de l'aire, A és l'àrea escombrada pel rotor i $\frac{(v_1 + v_2)}{2}$ és la velocitat mitjana de pas de l'aire a través de l'àrea escombrada pel rotor. La potència extreta del vent pel rotor és igual a la massa (per segon) vegades la caiguda quadràtica de velocitat del vent (d'acord amb la segona Llei de Newton):

$$P = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{C.3})$$

Substituint m en aquesta expressió des de la primera equació s'obté la següent expressió per la potència extreta del vent:

$$P = \frac{\rho}{4} (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) A \quad (\text{C.4})$$

Ara es pot comparar aquest resultat amb la potència total disponible en el flux de vent si no hi hagués la turbina,

$$P_0 = \frac{\rho}{2} (v_1^3) A \quad (\text{C.5})$$

El ratio entre la potència que s'extreu i la que porta el vent és, aleshores:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right) \quad (\text{C.6})$$



Si es grafica (Fig. C.1) $\frac{P}{P_0}$ en funció de $\frac{v_2}{v_1}$ es té:

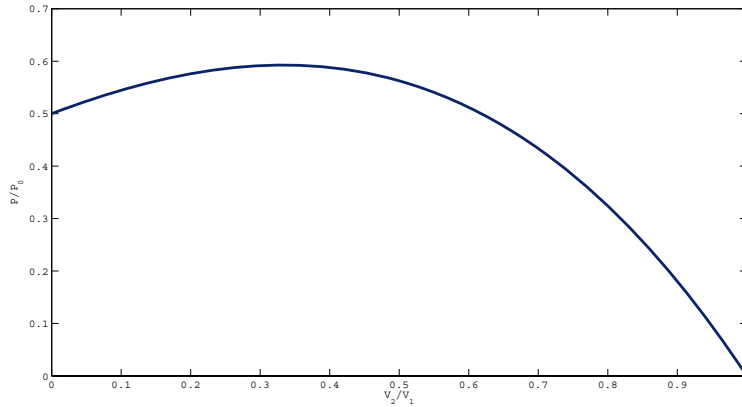


Figura C.1: Gràfica de $\frac{P}{P_0}$ en funció de $\frac{v_2}{v_1}$

S'observa que la funció té el seu màxim per $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$, i que el valor per aquest màxim de potència extreta respecte el total és de $0,59$ o $16/27$ de la potència total del vent, el coeficient de Betz.

