

Resum

En la última dècada les energies renovables, especialment la eòlica, han experimentat un fort creixement fins a arribar a un percentatge significatiu de la generació en les xarxes elèctriques. Sense poder seguir considerant-les minoritàries, els operadors dels sistemes elèctrics es veuen obligats a canviar la normativa per a que aquestes fonts d'energia donin suport a la regulació i estabilitat de la xarxa oferint serveis auxiliars com fan les centrals de generació elèctrica convencionals.

Les solucions tècniques passen per millorar el disseny dels propis generadors per a que les futures instal·lacions compleixin les noves especificacions i incorporar als productors elèctrics ja existents sistemes auxiliars per adaptar-se als requeriments establerts recentment. En aquests últims casos, els FACTS es presenten com a dispositius capaços de front a aquesta demanda. Una de les implicacions directes d'aquesta innovació és la necessitat d'incorporar els FACTS i el seu impacte en el sistema com a nous elements en els estudis de planificació de xarxes elèctriques. Per tant cal desenvolupar les eines per implementar el seu comportament dins l'entorn de software en que es realitzen aquestes tasques.

En aquest projecte dona resposta a aquesta necessitat. Han estat modelats els FACTS del tipus STATCOM i SVC, a partir de les seves equacions s'han dissenyat algorismes de control lineal que permeten la regulació de voltatge i el seguiment del *grid code* P.O. 12.3. Finalment s'ha transcrit el model i el seu control a llenguatge de programació Fortran per implementar-lo com a model dinàmic del programa de simulació de xarxes elèctriques PSS/E. Per a comprovar el seu correcte funcionament, s'han realitzat diverses simulacions d'una xarxa de proves amb els models de FACTS incorporats i els resultats han estat positius.

Índex general

Resum	1
Prefaci	13
Introducció	15
Objectius	15
Abast	16
1. Estat de l'art dels FACTS	17
1.1. FACTS paral·lel	17
1.1.1. SVC	18
1.1.2. STATCOM	18
1.2. FACTS sèrie	19
1.2.1. TSSC	19
1.2.2. TCSC	20
1.2.3. SSSC	20
1.3. FACTS sèrie/paral·lel	21
2. Modelització d'un STATCOM	23
2.1. Circuit RL	24
2.1.1. Càlculs en referència $dq0$	24
2.2. Convertidor i bus de continua	25
2.3. Connexió a la xarxa	26
3. Modelització d'un SVC	29
3.1. Variació d'impedància d'un TCR per angle de retard	30
3.2. Càlcul de paràmetres	31
3.2.1. Susceptància equivalent	31
3.2.2. Potència absorbida	32

4. Disseny de Control del STATCOM	35
4.1. Llaços de corrent	35
4.2. Control del bus DC	37
4.3. Control de Voltatge	39
4.3.1. Síntesi directa	39
4.3.2. <i>Voltage Droop</i>	40
4.3.3. <i>Voltage Droop</i> adaptatiu	41
4.4. Seguiment del P.O. 12.3	41
4.5. Saturació de Potència i Transició entre modes d'operació	42
4.5.1. Llaç anti-windup	43
5. Disseny de control del SVC	45
5.1. Llaç de susceptància equivalent	45
6. Validació dels models amb simulacions en Matlab	47
6.1. Simulació del STATCOM	47
6.1.1. Simulació de llaços de corrent	49
6.1.2. Simulació de llaços de tensió	51
6.1.3. Saturació de potència	54
6.2. Simulació del SVC	54
6.2.1. Simulació de llaç de susceptància	56
6.2.2. Simulació de llaç de susceptància	57
7. Implementació en PSS/E	59
7.1. Elements d'interacció de models amb PSS/E	59
7.2. Arxiu de dades dinàmiques (*.dyr)	61
7.3. Procés de simulació dinàmica	61
7.3.1. Assimilació de dades	61
7.3.2. Inicialització	62
7.3.3. Resolució i Càlcul de derivades	63
7.3.4. Càlcul de sortides	63
7.3.5. Integració numèrica, avançament temporal i pertorbacions.	63
7.4. Simulacions en PSS/E	63
7.4.1. Simulació del STATCOM	65
7.4.2. Simulació del SVC	66
Conclusions	71
Futurs treballs	71

A. Pressupost	73
A.1. Pressupost dels models y simulació de FACTS per a PSS/E	73
A.1.1. Pressupost del hardware	73
A.1.2. Pressupost del software	73
A.1.3. Pressupost de la mà d'obra	74
A.1.4. Suma per capítols	74
B. Impacte ambiental	75
B.1. Impacte del disseny i desenvolupament	75
B.2. Impacte de la fabricació i instal·lació	76
B.3. Impacte de l'operació	76
C. Transformades de Clarke y Park	77
C.1. Transformada de Clarke	77
C.2. Transformada de Park	79
D. Fulls de dades dels models PSS/E	81
D.1. STATCOM	81
D.1.1. Eix q	82
D.1.2. Eix d	86
D.2. SVC	90
Glossari	93
Bibliografia	95

Llista de Figures

1.1.	Configuracions constructives de SVC i la seva característica tensió-corrent . . .	18
1.2.	Esquema d'un STATCOM i la seva característica tensió-corrent	19
1.3.	Esquema constructiu d'un TSSC	20
1.4.	Esquema constructiu d'un TCSC	20
1.5.	Esquema i diagrama fasorial d'un SSSC	20
1.6.	Classificació dels dispositius reguladors de flux potència	22
2.1.	Esquema d'un STATCOM i la seva característica tensió-corrent	23
2.2.	Circuit elèctric equivalent de la línia trifàsica entre el convertidor i el punt de connexió	24
2.3.	Circuit elèctric equivalent en els eixos d i q	25
2.4.	Esquema del convertidor CC/CA i bus de continua i els seus models equivalents	26
2.5.	Equivalent Thevenin de la xarxa al punt de connexió del STATCOM	27
3.1.	esquema constructiu del model de SVC	30
3.2.	Característica tensió(u)- corrent(i) del SVC	30
3.3.	Ones de Tensió (V) i corrent (A) del TCR	31
3.4.	Impedància equivalent de TCR (a) i de SVC (b) segons l'angle de retard . . .	32
3.5.	Relació entre susceptància i angle de retard d'un TCR	33
3.6.	Diagrama de composició de la susceptància equivalent del SVC	33
4.1.	Esquema de control general	36
4.2.	Sistema en llaç tancat de control de corrents	37
4.3.	Llaç de control de corrents en eixos dq	38
4.4.	Sistema en llaç tancat de control de tensió DC	38
4.5.	Diagrama de blocs per al control de voltatge	39
4.6.	Característica del <i>Voltage Droop</i> i rectes de càrrega per diferents tensions de buit	40

4.7.	característica de tensió i corrent reactiva del P.O. 12.3	42
4.8.	esquema de control per al mode d'operació en sot de tensió	42
4.9.	Esquema del controlador de tensió amb saturació i llaç anti-windup	43
5.1.	Diagrama de control de susceptància del SVC	46
6.1.	Model elèctric en Matlab de la xarxa utilitzada en les simulacions del STATCOM	48
6.2.	Esquema de control del STATCOM en Matlab-Simulink	48
6.3.	Resposta de P davant una consigna de graó	49
6.4.	Resposta de Q davant una consigna de graó	50
6.5.	Influència mútua de P i Q davant consignes de graó	50
6.6.	Consigna graó de E_{dc} i la seva resposta	51
6.7.	Consigna graó de V_{ld} i la seva resposta	52
6.8.	Tensió de bus i potència per a un graó en la tensió de xarxa amb controlador I	52
6.9.	Tensió de bus i potència per a un graó fins a 0,9 p.u. en la tensió de xarxa amb control Droop	53
6.10.	Tensió de bus i potència per a un graó fins a 0,9 p.u. en la tensió de xarxa amb control Droop adaptatiu	53
6.11.	Resposta i interacció de V_{ld} i E_{dc} per a entrades graó	54
6.12.	Tensió de bus i potència per a un graó fins a 0,7 p.u. en la tensió de xarxa amb saturació en la potència reactiva	55
6.13.	Tensió de bus i potència per a un graó fins a 0,7 p.u. en la tensió de xarxa amb saturació en la potència reactiva i realimentació anti-windup	55
6.14.	Model elèctric i de control per a les simulacions en Matlab del SVC	56
6.15.	Resposta de susceptància equivalent (B_{eq}) per a un graó en la seva consigna	57
6.16.	Resposta de potència reactiva (Q) per a un graó en la seva consigna	57
6.17.	Resposta de tensió al PCC(V_{ld}) per a un graó en la seva consigna	58
7.1.	Diagrama de l'algoritme de simulació dinàmica de PSS/E	62
7.2.	Esquema de càlcul de n i α per el model SVC de PSS/E	64
7.3.	Xarxa de proves per a simular les models FACTS en PSS	64
7.4.	Resposta del STATCOM en PSS/E davant de graons de tensió	65
7.5.	Resposta del STATCOM en PSS/E davant d'un sot de tensió	66
7.6.	Resposta de la xarxa en PSS/E sense FACTS davant d'un sot de tensió	67
7.7.	Resposta del SVC en PSS/E davant de graons de tensió	68
7.8.	Resposta del SVC en PSS/E davant d'un sot de tensió	69
7.9.	Detall de susceptància, angle i nombre de TSC del SVC en PSS/E	70
C.1.	Representació del pla $\alpha\beta$	78

C.2. Representació del pla dq	80
D.1. Esquema de control general del STATCOM	81
D.2. Esquema de control de tensió del STATCOM amb dades de PSS/E	82
D.3. Esquema de seguiment del P.O. 12.3 del STATCOM amb dades de PSS/E	83
D.4. Esquema de control de corrent en eix q del STATCOM amb dades de PSS/E	84
D.5. Esquema del model intern de circuit RL en eix q del STATCOM amb dades de PSS/E	85
D.6. Esquema de control de tensió del STATCOM amb dades de PSS/E	86
D.7. Esquema de control de corrent en eix d del STATCOM amb dades de PSS/E	87
D.8. Esquema del model intern de circuit RL en eix d del STATCOM amb dades de PSS/E	88
D.9. Esquema del model intern de bus DC del STATCOM amb dades de PSS/E	89
D.10. Esquema de control de tensió del SVC amb dades de PSS/E	90
D.11. Esquema de control del llaç de susceptància del SVC amb dades de PSS/E	91

Llista de Taules

A.1. Pressupost del hardware.	73
A.2. Pressupost del software.	73
A.3. Pressupost de la mà d' obra.	74
A.4. Suma per capítols.	74
B.1. Càlcul d'emissions de CO_2 per als consums elèctrics	75
D.1. Dades per a PSS/E del control de tensió al PCC del STATCOM.	82
D.2. Dades per a PSS/E del seguiment del P.O 12.3 del STATCOM.	83
D.3. Dades per a PSS/E del control de corrent en eix q del STATCOM.	84
D.4. Dades per a PSS/E del circuit RL en eix q del STATCOM.	85
D.5. Dades per a PSS/E del control de tensió al PCC del STATCOM.	86
D.6. Dades per a PSS/E del control de corrent en eix d del STATCOM.	87
D.7. Dades per a PSS/E del circuit RL en eix d del STATCOM.	88
D.8. Dades per a PSS/E del bus DC eix d del STATCOM.	89
D.9. Dades per a PSS/E del control de tensió al PCC del SVC.	90
D.10. Dades per a PSS/E del llaç de susceptància del SVC.	91

Prefaci

En els últims anys la implantació de l'energia eòlica i altres renovables a crescut molt a tot el món i especialment a Europa. L'estat espanyol registrava en el seu sistema elèctric al final de l'any 2010 un 20 % de la seva potencia instal·lada d'origen eòlic, havent donat una cobertura de la demanda del 16 % en el darrer any [1]. Les previsions son d'augment en els propers anys. Davant aquest fet ja no es pot considerar que la aportació energètica en règim especial sigui minoritària, sinó que hi té un pes molt important. Per tant és necessari per a la seguretat del sistema elèctric i per garantir el subministrament als usuaris que s'exigeixi uns nivells superiors de qualitat en l'aportació de potència a la xarxa elèctrica. Per a fer-ho possible cal introduir millores tecnològiques com son els FACTS i poder regular en tot moment els paràmetres amb que es transfereix l'energia. En el present treball es desenvolupen dos models de FACTS, del tipus STATCOM i SVC, i s'implementen dins el programa de simulació de sistemes elèctrics de potència PSS/ E per a ser utilitzat principalment en futurs estudis sobre integració d'energia eòlica a la xarxa. [2]

El projecte reflectit en el present document ha estat realitzat en el Centre de Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) per a contribuir a la millora de la situació energètica esmentada . El CITCEA-UPC fa deu anys que investiga, desenvolupa i innova aportant coneixement a empreses i institucions en el camp de l'electrònica de potència aplicada. En els últims anys s'hi han realitzat nombrosos projectes d'integració d'energies renovables, especialment eòlica, a la xarxa elèctrica en col·laboració amb l'empresa de distribució elèctrica ENDESA a través de la Càtedra Endesa Red de Innovació Energètica (CERIEN) de la UPC . Entre aquests projectes destaquen les actualitzacions i estudis dinàmics dels escenaris de la xarxa elèctrica de transport a Catalunya, l'estudi del escenari eòlic del pla de de l'energia 2010-2015 de la Generalitat de Catalunya i el projecte de modelització dinàmica i control d'un aerogenerador de velocitat variable amb una màquina d'inducció doblement alimentada. Aquests han estat els antecedents més pròxims al projecte aquí explicat, que també s'emmarca dins la trajectòria del CERIEN. Per tant, abans de procedir amb la seva explicació, només resta agrair el suport rebut per part del director del projecte Andreas Sumper, el CITCEA en el seu conjunt, ENDESA i l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona de la UPC.

Introducció

Aquesta és la memòria del projecte final de carrera *Modelització dinàmica i control de FACTS en PSS/E*. S'ha estructurat seguint les fases en que s'ha dut a terme el projecte. En el primer capítol es descriuen els FACTS i s'exposa l'estat de l'art en que es troben. De tots els tipus de FACTS existents, aquest projecte s'ha centrat en modelitzar i controlar un STATCOM un SVC. En els següents capítols es desenvolupa cada fase del projecte, primer per al STATCOM i després es procedeix igual per al SVC. Es modelen els dos sistemes elèctrics obtenint les equacions de la seva dinàmica. Després es dissenyen els controls per a complir les funcions especificades. En els següents capítols s'exposa la validació dels models a través de simulacions amb Matlab. Finalment s'explica com s'implementen en el programa PSS/E i es mostren les simulacions dinàmiques realitzades en una xarxa de proves incorporant-hi els models.

Objectius

L'objectiu general del projecte és crear eines informàtiques com a complement del programa de simulació de xarxes elèctriques PSS/E versió 30.0, que modelin el comportament dinàmic dels FACTS tipus STATCOM i SVC. Per assolir-ho s'estableixen els següents objectius específics:

- Analitzar l'estat de l'art dels sistemes flexibles de transmissió AC (FACTS), especialment els de connexió en paral·lel.
- Desenvolupar un model matemàtic d'un STATCOM i d'un SVC que representi el seu comportament físic.
- Dissenyar un esquema de control flexible i adaptable i els controladors necessaris per a poder regular amb els models desenvolupats paràmetres elèctrics tals com el flux de potència i la tensió en el punt de connexió.
- Ampliar el control bàsic dels models per a que compleixin les indicacions del P.O. 12.3 davant de sots de tensió en la xarxa
- Implementar per al programa PSS/E a través de la traducció al llenguatge de programació Fortran dels models de STATCOM i SVC desenvolupats així com del algoritmes de control dissenyats.
- Realitzar simulacions dinàmiques amb els models en un cas de proves de PSS/E per corroborar el seu correcte funcionament.

Abast

En tant que l'objectiu principal és dotar d'eines informàtiques per a la simulació de xarxes elèctriques, no s'han modelitzat els transitoris ràpids ni la commutació dels elements d'electrònica de potència i s'han utilitzat models promitjats. En grans xarxes de potència, hi intervenen grans quantitats d'elements amb dinàmiques molt variades, afegir-hi models de gran complexitat pot allargar innecessàriament els temps de càlcul de les simulacions. Amb la filosofia d'oferir un model obert i adaptable, queda fora de l'abast del projecte el procediment de dimensionat o establir valors recomanats per els diversos paràmetres dels models.

El marc en que es realitza aquest projecte s'ubica contemplant les següents premisses:

- S'han desenvolupat models aproximats al comportament dinàmic dels sistemes reals que representen
- Queda fora dels models l' estudi dels interruptors electrònics de potència, així com la seva modulació, essent els convertidors considerats com fonts de tensió
- els paràmetres i variables dels models s'utilitzen en valors rms(*root mean square*, tal com treballa el programa PSS/E
- Els controls dels models s'han dissenyat per a la regulació de tensió i el seguiment de consignes de potència.
- La implementació final dels models en l'entorn de programa de PSS/E s'ha fet en una xarxa de proves senzilla amb un nombre petit de nodes

Capítol 1

Estat de l'art dels FACTS

Les sigles de FACTS corresponen al terme anglès "Flexible AC Transmission systems", és a dir, sistemes de transmissió flexible de corrent alterna. Es tracta de dispositius basats en l'electrònica de potència capaços d'augmentar la potència transferida i mantenir el nivell de tensió del punt on es connecten tot regulant la seva aportació de potència reactiva. La idea de partida és la clàssica bateria de condensadors per a la millora del factor de potència. Si es connecta i desconnecta un condensador per mitjà d'un interruptor electrònic, la freqüència de commutació és prou elevada per a actuar a nivell del període d'oscil·lació de la xarxa. D'aquesta manera es pot regular la injecció de reactiva en la mesura i desfasament desitjats, fent molt més flexible la transmissió de potència. [3]

1.1. FACTS paral·lel

Un FACTS connectat en paral·lel amb el sistema actua com una font de corrent controlable. S'utilitza per a canviar les característiques intrínseques de la línia de transmissió amb la finalitat d'augmentar la potència transferible i controlar el seu voltatge enmig o a l'extrem de la línia. Injectant corrent un FACTS pot realitzar compensació capacitiva o inductiva o alternar entre les dues .

La **compensació capacitiva** és la més habitual i s'utilitza per millorar el factor de potència. La majoria de càrregues que es connecten a una línia de transmissió son inductives (com els motors, per exemple) i provoquen un retràs en la corrent que circula per la línia, disminuint el factor de potència. Connectant un capacitor en paral·lel es compensa la corrent i es millora el factor de potència. En aquest sentit, un FACTS fa la mateixa funció que els dispositius de compensació convencionals però amb més precisió i flexibilitat i generant menys harmònics.

La tècnica de **compensació inductiva** en paral·lel es adient quan en el extrem receptor de la línia hi ha poca càrrega o càrrega inductiva. Una càrrega petita suposa poca corrent fluïnt per la línia de transmissió. La capacitància en paral·lel de la línia causa l'amplificació del voltatge per *efecte Ferranti*. Col·locant inductors en paral·lel amb la línia pot compensar-se aquest efecte.

Els dispositius FACTS paral·lel més utilitzats son dos: els Compensadors estàtics de potència (SVC) i els Compensadors Estàtics Síncrons (STATCOM), sobre els quals tracta el present document.

1.1.1. SVC

Segons la IEEE, un Static VAR Compensator (SVC) és un generador o consum estàtic connectat en paral·lel, la potència del qual s'ajusta per intercanviar corrent capacitiva o inductiva amb la fi de mantenir o controlar paràmetres específics del sistema elèctric de potència (típicament, la tensió de la línia).

El flux de càrrega que transmet una línia elèctrica canvia considerablement al llarg de les hores. Com les càrregues generen (o consumeixen) potència reactiva, també canvia el balanç de potència reactiva. Això pot resultar en una variació de la tensió inacceptable fins al punt d'una disminució que podria derivar en un buit de tensió. Un SVC pot aportar de forma continua la potència reactiva necessària per mitigar les oscil·lacions dinàmiques de tensió i millorar la transmissió del sistema i la seva estabilitat.

Els SVC estant constituïts per tiristors que controlen la connexió d'elements de potència reactiva: capacitors, inductors o tots dos. Segons el tipus de compensació que es vulgui, es construeixen combinant *Thyristor Switched Capacitors* (TSC) i *Thyristor Switched or Controlled Reactors* (TSR/TCR). La connexió amb la xarxa es fa per mitjà d'un transformador. La figura 1.1 mostra diverses configuracions.

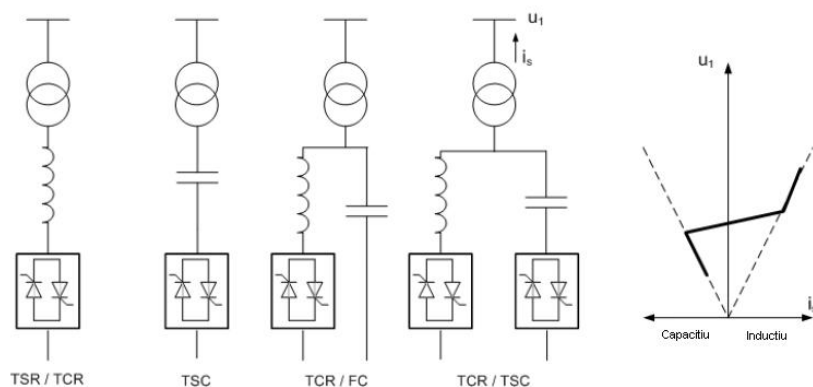


Figura 1.1: Configuracions constructives de SVC i la seva característica tensió-corrent

El control coordinat d'aquests blocs injecta la corrent necessària per compensar la potència reactiva fins a un límit, com mostra la figura 1.1. Cal destacar que la corrent màxima que pot aportar el SVC tant en mode inductiu com capacitiu depèn linealment amb la tensió del sistema.

1.1.2. STATCOM

La definició del IEEE d'un *STATIC COMPensator* (STATCOM) és: *Generador síncron i estàtic operat com a compensador estàtic de potència connectat en paral·lel amb corrent de sortida (capacitiva o inductiva) que pot ser controlada independentment del sistema AC*

Un STATCOM és una font controlada de potència reactiva. Quan el voltatge augmenta per sobre del nominal es genera reactiva i quan el voltatge es inferior s'absorbeix potència reactiva. El dispositiu està format per un convertidor AC/DC amb una font de tensió en

la banda de continua. Generant la tensió amb amplitud i fase adequades en la sortida del convertidor s'aconsegueix injectar la potència reactiva necessària. La connexió al sistema es fa amb un transformador. La figura 1.2 mostra la seva estructura.

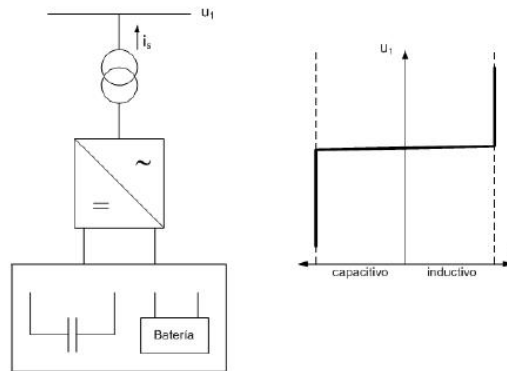


Figura 1.2: Esquema d'un STATCOM i la seva característica tensió-corrent

El convertidor es construeix amb tiristors amb capacitat de desconexió, els més comuns són els IGBT. Com a font de tensió continua s'utilitza normalment un condensador, tot i que també pot substituir-se per una bateria. En aquest cas el STATCOM pot controlar també l'intercanvi de potència activa per reduir oscil·lacions de potència i nivellar pics de tensió.

Les pèrdues del convertidor són consumides en la font de tensió continua, el que suposa que un condensador es descarregui. Llavors s'ajusta l'angle de la tensió en la banda AC per a que el convertidor absorbeixi la potència activa per a equilibrar les pèrdues.

La característica tensió-corrent del STATCOM es mostra en la figura 1.2. Pot injectar corrent capacitiva o inductiva fins al límit permès per els tiristors, però a diferència del SVC aquest límit no depèn del nivell de voltatge.

1.2. FACTS sèrie

La compensació de potència que ofereixen els FACTS connectats en sèrie es basa en variar la impedància de la línia de transmissió per a regular el flux de potència i així incrementar l'estabilitat i mitigar les oscil·lacions del sistema. En grans línies de transmissió la inductància sèrie és considerable i es pot produir una important caiguda de tensió. Connectant-hi capacitors sèrie es pot compensar aquest efecte.

El FACTS sèrie més senzill és el *Thyristor Switched Series Capacitor* (TSSC) que aporta una compensació en un rang discret. Amb un control més complex s'obté el *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) i de manera similar a un STATCOM, el *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC) que implementa una font de tensió sèrie controlable.

1.2.1. TSSC

Un TSSC és un conjunt de mòduls bàsic connectats en sèrie. Cada mòdul consta de un condensador connectat en paral·lel amb un tiristor. El seu esquema és el de la figura 1.3.

Quan el tiristor condueix es produeix un curtcircuit i la corrent deixa de passar per el condensador. El nivell de compensació depen del nombre de mòduls activats. Per tant donarà lloc a una regulació discreta per trams.

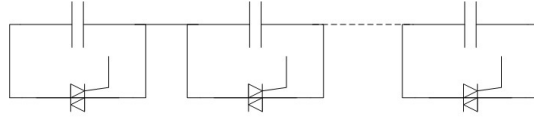


Figura 1.3: Esquema constructiu d'un TSSC

1.2.2. TCSC

Al afegir en un TSSC una inductància en sèrie amb el tiristor s'obté un TCSC. Així es mostra en la figura 1.4. Aquesta diferència constructiva aporta al dispositiu certes avantatges. En primer lloc, la regulació de la impedància deixa de ser discreta, fent que el TCSC actuï com una reactància capacitiva variable controlada en un rang continu de valors. Segons si els tiristors estan en bloqueig, conducció o commutació la reactància aparent varia essent la tensió en borns del TCSC inductiva o capacitiva i d'amplitud variable

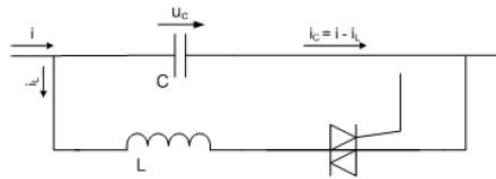


Figura 1.4: Esquema constructiu d'un TCSC

1.2.3. SSSC

Un Compensador estàtic síncron en sèrie està basat en un convertidor AC/DC i actua com a font de tensió per augmentar o disminuir la tensió reactiva global de la línia. La figura 1.5 La tensió aportada es regula independentment de la corrent que circula per la línia i per tant es pot augmentar i disminuir la transmissió de potència simplement modificant la tensió injectada.

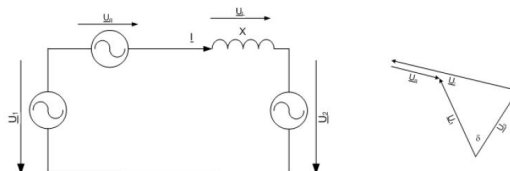


Figura 1.5: Esquema i diagrama fasorial d'un SSSC

1.3. FACTS sèrie/paral·lel

Com s'ha vist, els FACTS paral·lel actuen com a fonts de corrent absorbint o generant potència reactiva per a controlar la tensió. Els FACTS sèrie en canvi, actuen com a fonts de tensió per incidir sobre la corrent i millorar la transmissió de potència. Utilitzant una combinació d'aquests sistemes és pot aconseguir un control efectiu de corrent, potència i tensió, donant lloc a la gamma de FACTS sèrie/paral·lel.

Els *Unified Power Flow Controllers* (UPFC) son una combinació de STATCOM i SSSC amb els convertidors en configuració *back-to-back*, es a dir, amb el bus de continua comú. Així pot intercanviar-se potencia activa a través del enllaç DC, afegint més flexibilitat a les seves prestacions.

Els *Interline Power Flow Controllers* (IPFC) és la unió dels SSSC de diferents línies de transmissió a través de un bus DC comú. També es pot unir al STATCOM d'algun bus AC. Així es pot controlar la compensació de potència reactiva de cada línia de forma independent i ajustar el flux de potència activa en cada línia. Així es pot mantenir la distribució desitjada de potència activa

Les *línies de transmissió de corrent continua d'alta tensió*(HVDC) son tambe sistemes FACTS capaços de controlar el flux de potència. Un convertidor transforma la corrent AC a DC per a que sigui transportada en continua i novament transformada en corrent AC en arribar al receptor. Les seves principals aplicacions son:

- Transmissió per llargues distàncies. Per a línies llargues el estalvi de perdues que suposa el transport en DC compensa el cost dels convertidors
- Cables submarins. La transmissió DC elimina el problema de la elevada capacítancia dels conductors en el mar. Afegit al punt anterior les línies HVDC tenen gran interès per a la generació eòlica marina (*offshore*).
- Connexió entre sistemes AC. Amb un enllaç DC es pot intercanviar potència entre sistemes AC de diferent freqüència o no sincronitzats.

En la figura 1.6 es resumeixen els diferents tipus de FACTS i dispositius convencionals

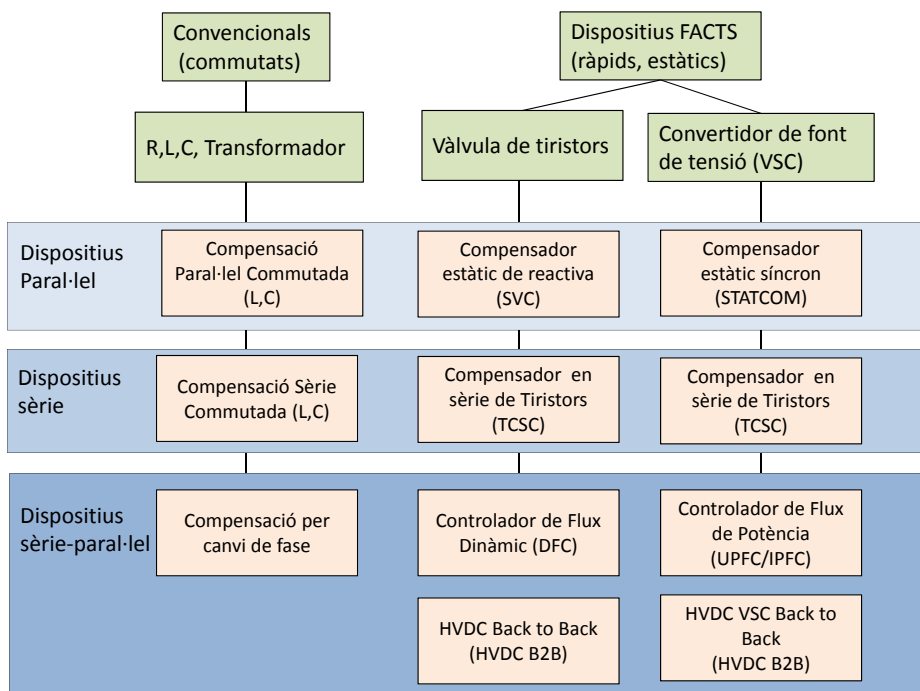


Figura 1.6: Classificació dels dispositius reguladors de flux potència

Capítol 2

Modelització d'un STATCOM

El STATCOM es modela en 4 parts: transformador, convertidor, bus de continua i sistema de control. El seu esquema es mostra en la **figura 2.1**

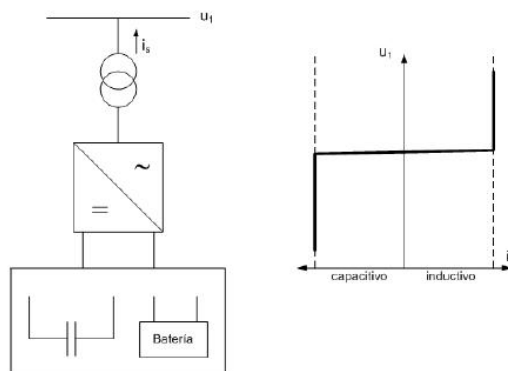


Figura 2.1: Esquema d'un STATCOM i la seva característica tensió-corrent

- El **transformador** trifàsic de 2 debanats uneix el punt de connexió del dispositiu amb el convertidor. Redueix la tensió al nivell d'operació del convertidor i actua com a **línea RL**
- El **convertidor** CC/CA actua com a font de tensió del circuit RL per a injectar el corrent necessari al punt de connexió. Està format per 6 IGBT controlats per tensió amb modulació per ample de pols o PWM (Pulse Width Modulation).
- El **bus de continua** és un condensador que actua de font de tensió per a la banda de corrent continua del convertidor.
- Finalment, el **bloc de control** s'encarrega de generar la seqüència adequada de polsos de tensió per a disparar els IGBT del convertidor a partir de les mesures de tensió del punt de connexió i del bus de continua i la corrent que s'injecta a la xarxa tot comparant aquests paràmetres amb les consignes especificades.

Seguidament es desenvolupen les equacions que modelen cada un dels components descrits del STATCOM. El sistema de control es descriu en el següent capítol.

2.1. Circuit RL

Com ja s'ha esmentat anteriorment, el transformador pot ser modelat com un línia trifàsica amb una inductància i una resistència. Tal com s'indica en la figura 2.2 tant el punt de connexió a xarxa com la banda d'alterna del convertidor es poden assimilar com una font de tensió. El convertidor injecta una corrent a la xarxa segons els paràmetres de la línia RL que ve determinada per l'equació en forma de vectors espacials:

$$\vec{V}_l - \vec{V}_s = R \cdot \vec{i} + L \cdot \frac{d\vec{i}}{dt} \quad (2.1)$$

on

\vec{V}_l vector d'espai de tensió al punt de connexió de la xarxa

\vec{V}_s vector d'espai de tensió de la banda d'alterna del convertidor

\vec{i} vector d'intensitat que circula per la línia RL

R Resistència del filtre de xarxa (transformador)

L Inductància del filtre de xarxa (transformador)

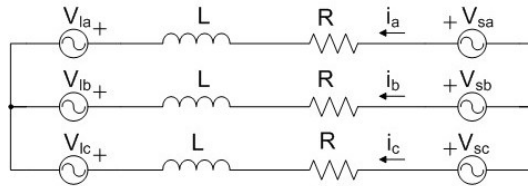


Figura 2.2: Circuit elèctric equivalent de la línia trifàsica entre el convertidor i el punt de connexió

2.1.1. Càlculs en referència dq0

Haver de realitzar els càlculs de xarxes elèctriques tot manejant variables trifàsiques que varien en el temps com són les tensions i corrents sinusoidals pot ser molt laboriós. És una pràctica habitual, també emprada aquí, aplicar un canvi de variables conegut com a Transformada de Park. Es tracta de projectar les tres fases de cada paràmetre sobre una referència de 2 eixos ortogonals d (directe), q (quadratura) que giren sincronament amb la polsació de la xarxa. D'aquesta manera els 3 fasors d'una corrent o un voltatge pot ser expressat en dues components.

També té l'avantatge de poder escollir un dels eixos de referència alineat amb alguna de les variables, de forma que s'anul·la l'altre component. En aquest cas s'escull com a referència la tensió del punt de connexió a xarxa alineada amb l'eix d. Aplicant la transformada de Park a l'equació 2.1 ens queden les expressions 2.2. Llavors el circuit elèctric equivalent sobre el que es farà el disseny de control és el de la figura 2.3.

$$\begin{aligned} V_{ld} - V_{sd} &= R \cdot i_d + L \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega L \cdot i_q \\ -V_{sq} &= R \cdot i_q + L \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega L \cdot i_d \end{aligned} \quad (2.2)$$

on ω és la pulsació de la xarxa.

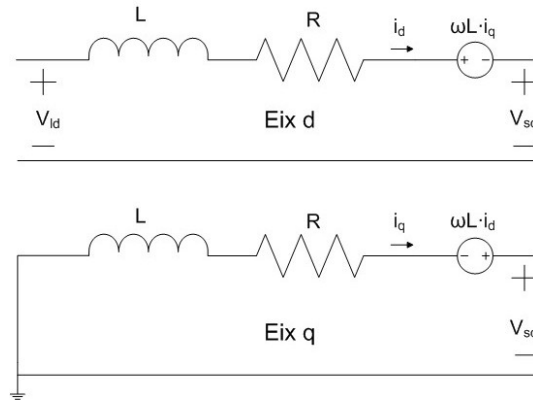


Figura 2.3: Circuit elèctric equivalent en els eixos d i q

Les potències activa i reactiva en aquesta nova referència es calculen com:

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2}(V_{ld} \cdot i_d + V_{lq} \cdot i_q) \\ Q &= \frac{3}{2}(V_{lq} \cdot i_d - V_{ld} \cdot i_q) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Al haver escollit l'eix d alineat amb la tensió al punt de connexió l'expressió anterior queda simplificada:

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2}V_{ld} \cdot i_d \\ Q &= -\frac{3}{2}V_{ld} \cdot i_q \end{aligned} \quad (2.4)$$

Així, gràcies al canvi a eixos dq i tal com indica l'equació 4.1, la potència activa depèn només de la corrent i_d i la potència reactiva depèn només de la corrent i_q . Per tant queda simplificat el sistema, deixant el control de P i Q com a dos problemes diferenciats.

2.2. Convertidor i bus de continua

El convertidor transforma la corrent continua proporcionada per un condensador carregat en corrent alterna trifàsica per a entregar a la xarxa per mitjà de tres branques de dos interruptors cada una que permet connectar i desconnectar cada una de les fases d'alterna amb qualsevol dels 2 borns del condensador, tal com s'il·lustra a la figura 2.4. Els interruptors utilitzats són IGBT amb diode en antiparal·lel com a protecció. Aquests components d'electrònica de potència han evolucionat en els últims anys, assolint unes bones prestacions per a aplicacions com els STATCOM.

Les diferents combinacions de commutació dels IGBT donen lloc a un convertidor amb un conjunt d'estats discrets. Assumint que la freqüència de commutació dels interruptors és

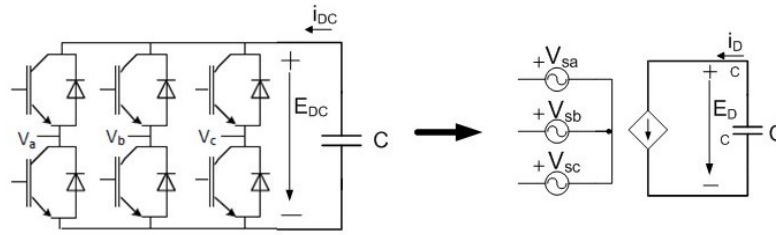


Figura 2.4: Esquema del convertidor CC/CA i bus de continua i els seus models equivalents

molt superior a la de la xarxa i més ràpida que les dinàmiques de control, es pot modelar el convertidor de forma simplificada separant el costat d'alterna del de continua. D'aquesta manera en el cantó d'alterna es representa com una font de tensió trifàsica i la banda de continua consta d'una font de corrent connectada al condensador. Aquesta font de corrent és el lligam entre els dos models separats, ja que és que imposa una potència consumida en el bus de continua igual a la potència activa entregada en la banda d'alterna.

$$P_{AC} = P_{DC} \quad (2.5)$$

Utilitzant la definició de potència en el banda de continua s'obté una expressió que al integrar-la relaciona la potència activa amb l'estat de tensió del condensador. Així es constata que el condensador es descarrega només quan hi ha consum de potència activa.

$$\begin{aligned} P_{DC} &= E_{DC} \cdot i_{DC} \\ P_{DC} &= E_{DC} \cdot C \frac{d}{dt} E_{DC} \\ P_{AC} &= \frac{1}{2} C \cdot \frac{d}{dt} E_{DC}^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

P_{AC} Potència activa entregada en la banda d'alterna del convertidor

P_{DC} Potència consumida en la banda de continua del convertidor

i_{DC} Corrent a través del condensador

C Capacitat del condensador

E_{DC} Tensió del condensador

2.3. Connexió a la xarxa

L'aplicació principal d'un STATCOM és la regulació de tensió en un punt de la xarxa amb la injecció de potència reactiva. Per trobar la relació entre els dos paràmetres s'utilitza l'equivalent Thevenin de la xarxa al Punt de connexió [4], com il·lustra la figura 2.5

Prenent com a referència d'angle 0 per V_{id} i assumint que el STATCOM només injecta potència reactiva, podem definir la corrent com indica la equació 2.7

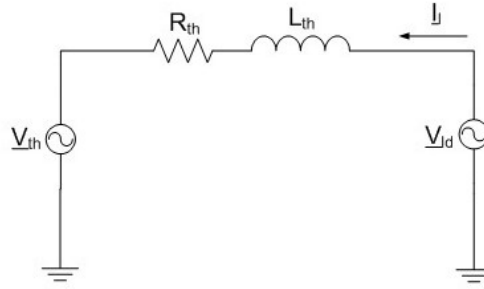


Figura 2.5: Equivalent Thevenin de la xarxa al punt de connexió del STATCOM

\underline{V}_{th} Tensió de l'equivalent Thevenin de la xarxa
 R_{th} Resistència de l'equivalent Thevenin de la xarxa
 X_{th} Reactància de l'equivalent Thevenin de la xarxa
 \underline{V}_{ld} Tensió en el punt de connexió del STATCOM
 \underline{I}_l Corrent injectada per el STATCOM

$$\underline{S} = \underline{V}_{ld} \cdot \underline{I}^* = jQ$$

$$\underline{I} = \frac{-jQ}{\underline{V}_{ld}} \quad (2.7)$$

Llavors es pot relacionar la tensió del STATCOM amb la potència reactiva injectada tal com es dedueix en la equació 2.8.

$$\underline{V}_{th} - \underline{V}_{ld} = (R_{th} + jX_{th}) \cdot \underline{I} = (R_{th} + jX_{th}) \cdot \left(-j \frac{Q}{\underline{V}_{th}}\right)$$

$$(V_{th} \cos(\delta) - V_{ld}) + (jV_{th} \sin(\delta)) = \frac{X_{th}}{V_{ld}} Q - j \frac{R_{th}}{V_{ld}} Q \quad (2.8)$$

Si l'angle elèctric δ és petit llavors $\cos(\delta) = 1$ i podem simplificar l'equació 2.8 i obtenir una relació senzilla entre potència reactiva i voltatge, indicada en l'equació 2.9. [3]

$$(V_{th} - V_{ld}) = \frac{X_{th}}{V_{ld}} Q \quad (2.9)$$

Capítol 3

Modelització d'un SVC

Un Static VAR Compensator(SVC) és un dispositiu FACTS de compensació de potència reactiva basat en una impedància variable però que a diferència de les bateries de condensadors convencionals no només actua en un conjunt discret d'etapes de compensació sinó que pot prendre un rang continu de valors de la impedància. Aquest efecte s'aconsegueix afegint a la bateria de condensadors i reactàncies una impedància(normalment una bobina) activada amb interruptors d'electrònica de potència. La commutació d'aquests interruptors és prou ràpida per permetre un control d'angle de retard que retalli l'ona de corrent, aconseguint variar la impedància. Generalment s'utilitzen tiristors, que pot controlar-se l'engegada però condueixen fins que la corrent arriba a zero. No son tan versàtils com els IGBT d'un STAT-COM però suporten nivells de corrent i tensió més grans.

Els SVC es componen de diferents elements en paral·lel diferenciats per si son d'impedància capacitiva o inductiva i el tipus d' interruptor que els controla. Els dispositius bàsics més comuns son:

- Fixed Capacitor (**FC**). Condensador fix, sense interruptor
- Thyristor Switched Capacitor (**TSC**). Condensador commutat per un tiristor durant cicles sencers d'ona.
- Thyristor Switched Reactor (**TSR**). Bobina commutada per un tiristor durant cicles sencers d'ona.
- Thyristor Controlled Reactor(**TCR**). Bobina controlada per un tiristor capaç de retallar l'ona de corrent amb control d'angle de retard.

Com la majoria de càrregues i generadors son inductius, la correcció del factor de potència ha de ser capacitiva i la topologia més habitual d'un SVC, i la escollida en aquest projecte, és la connexió en paral·lel de varis commutats mecànicament o per tiristors(TSC) que defineixen diferents etapes i un TCR que contrarresta l'efecte capacitiu fins al valor d'impedància equivalent desitjat (figura 3.1). La coordinació adequada de commutació de condensadors i el controlde la inductància dóna lloc al valor d'impedància desitjat. D'aquesta manera també es pot considerar el SVC com una font controlada de potència reactiva, i al igual que

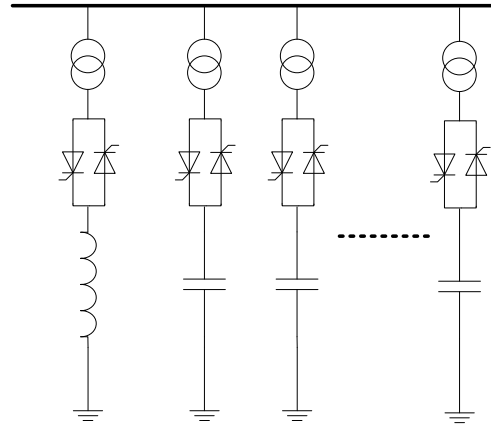


Figura 3.1: esquema constructiu del model de SVC

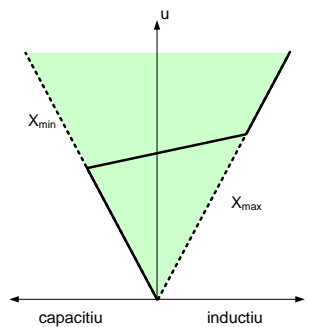


Figura 3.2: Característica tensió(u)- corrent(i) del SVC

un STATCOM pot utilitzar-se per a regular la tensió al punt de connexió. La diferència més rellevant és que està limitat a una impedància màxima i llavors a nivells de tensió baixos la corrent permesa baixa proporcionalment, tal com mostra la seva característica en la figura 3.2. Això fa els SVC menys adients per a contribuir a suportar sots de tensió.

3.1. Variació d'impedància d'un TCR per angle de retard

Per aconseguir una impedància variable en el TCR s'utilitza l'angle de retard d'activació dels tiristors α . Aquest angle es defineix proporcionalment a la diferència entre l'instant en que el pols de corrent activa el tiristor i l'instant de pas per zero del voltatge. Per tant, l'angle $\alpha = 0^\circ$ correspon a l'inici d'un semiperíode i $\alpha = 180^\circ$ al seu final. Al activar-se el tiristor corresponent al signe de la tensió la inductància es va carregant i la corrent creix proporcionalment a la tensió segons la coneguda expressió d'una inductància 3.1.

$$V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (3.1)$$

Tal com mostra la figura 3.3 la corrent és nul·la fins el moment d'activació del tiristor, augmenta fins que la tensió arriba a zero i decreix de forma simétrica fins a zero. L'angle de

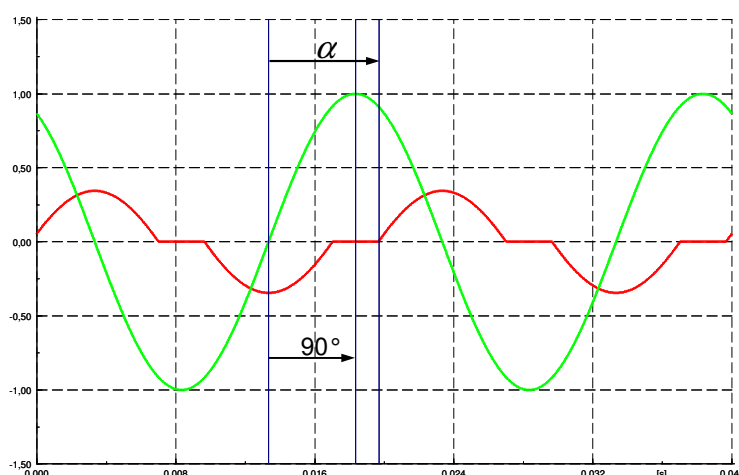


Figura 3.3: Ones de Tensió (V) i corrent (A) del TCR

retard està limitat entre 90° i 180° , ja que la corrent a través d'una reactància ha d'estar desfasada 90° respecte el voltatge. Per a $\alpha = 90^\circ$ el tiristor queda sempre tancat i la corrent és una sinusoidal d'amplitud màxima, tal com si es connectes directament la reactància a la xarxa. Per a $\alpha = 180^\circ$ el tiristor queda sempre obert i la corrent és nul·la, com si la reactància no hi fos. Per a tots els angles intermitjos la corrent pren una forma d'ona retallada que no és sinusoidal amb un alt contingut en harmònics i de component de freqüència fonamental d'amplitud progressivament inferior conforme l'angle de retard augmenta. Aquesta generació d'harmònics és el un dels principals inconvenients dels SVC ja que requereixen instal·lar filtres en paral·lel per mitigar les components d'altres freqüències. Per a valors de α superiors a 180° el tiristor està en bloqueig al trobar-se una tensió oposada a com està connectat. Si es sincronitzen malement els dos tiristors en antiparal·lel del TCR i condueixen alhora es crea un curtcircuit que podria malmetre'ls. Per a valors de α inferiors a 90° es provoca que la inductància no s'hagi descarregat totalment en finalitzar un semiperíode des de el màxim de tensió i llavors la corrent deixa d'alternar el signe (el tiristor actua com a rectificador) i arriba a valors superiors als de plena conducció (90°).

3.2. Càlcul de paràmetres

3.2.1. Susceptància equivalent

El principi de funcionament d'un SVC és actuar com a impedància variable. El valor d'aquesta dependrà de dos factors: l'angle de retard en l'activació del TCR i el nombre de TSC connectats. La impedància equivalent del TCR segons l'angle de retard segueix la funció: [5]

$$X_{Leq}(\alpha) = \frac{\pi \cdot X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)} \quad (3.2)$$

X_L :reactància de la bobina del TCR

α : angle de retard del TCR en radians

Si es considera que la capacítància de cada TSC és la mateixa, la impedància equivalent del SVC conjunt és:

$$X_{eq} = \left(\frac{1}{X_{Leq}} + \frac{n}{X_C} \right) \quad (3.3)$$

X_{Leq} : reactància equivalent del TCR

X_C : capacítància d'un TSC

n : nombre de TSC connectats.

Les figures 3.4(a) i 3.4(b) mostren l'evolució segons l'angle de retard de la impedància relativa del TCR (X_{Leq}/X_L) i de un SVC amb una capacítància de $0,2X_L$. Es pot observar com, lògicament, per a un angle de 180° la impedància del TCR tendeix a infinit (tiristor sempre desconnectat). D'igual forma, quan en el SVC hi ha algun TSC connectat per un cert angle l'efecte inductiu i capacitiu es contrarresten entrant en ressonància amb una impedància equivalent que tendeix a infinit. Així té lloc l'asímtota vertical del gràfic 3.4(b)

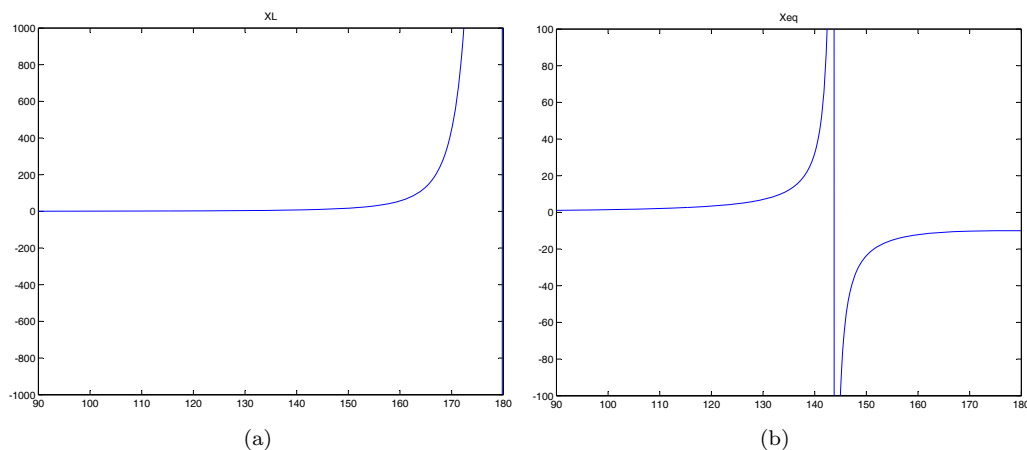


Figura 3.4: Impedància equivalent de TCR (a) i de SVC (b) segons l'angle de retard

Per evitar manipular una funció amb punts singulars i fer més senzills els càlculs, es treballa amb la susceptància equivalent ($B_{eq} = \frac{-1}{X_{eq}}$). La relació de susceptància equivalent amb l'angle de retard queda una funció monòtona creixent sense asímptotes. Així ho mostra la figura 3.5 per a un TCR de reactància unitària.

Com la connexió del TCR i els TSC és en paral·lel la susceptància equivalent del SVC és la suma de susceptàncies dels TSC connectats amb la susceptància equivalent del TCR. Així s'indica en l'equació 3.4 i la figura 3.6.

$$B_{eq} = B_{Ceq} + B_{Leq} = \frac{n}{X_C} - \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi \cdot X_L} \quad (3.4)$$

3.2.2. Potència absorbida

Coneguda la susceptància equivalent del SVC en cada instant i considerant que no hi ha pèrdues, la corrent absorbida del punt de connexió cap al SVC estarà desfasada 90° respecte

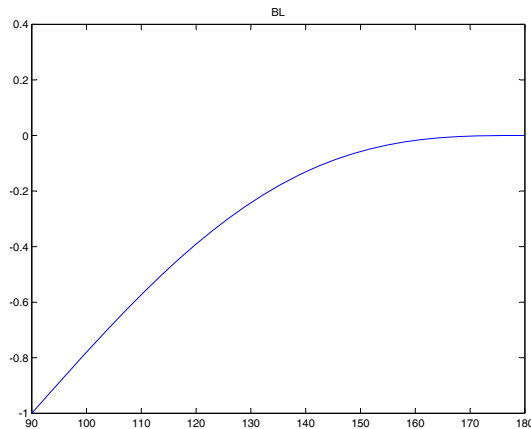


Figura 3.5: Relació entre susceptància i angle de retard d'un TCR

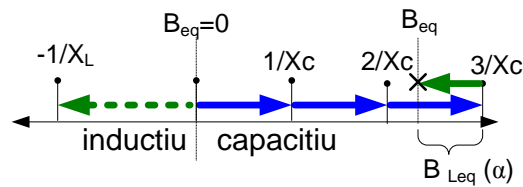


Figura 3.6: Diagrama de composició de la susceptància equivalent del SVC

el voltatge i tindrà un valor $I = -B_{eq} \cdot V$. Com el model consta se susceptàncies pures la potència(Q) absorbida serà totalment reactiva i valdrà:

$$Q = -B_{eq} \cdot V^2 \quad (3.5)$$

D'aquesta manera, controlant adequadament l'angle de retard i el nombre de TSC connectats, el SVC pot actuar com a font de potència reactiva al igual que un STATCOM però limitat per la susceptància màxima ($n = \text{maxim}; \alpha = 180^\circ$) segons la capacitat i nombre màxim de TSC i la susceptància mínima ($n = 0; \alpha = 90^\circ$) segons la inductància del TCR. Cal destacar que a diferència del model de STATCOM, per a les simulacions realitzades els interruptors d'electrònica de potència no es simplifiquen com a fonts de tensió o corrent ideals i per tant cal filtrar els harmònics generats per la commutació dels tiristors en la corrent.

Capítol 4

Disseny de Control del STATCOM

Tal com s'ha vist, segons les equacions 4.1, utilitzar adequadament la referència dq0 permet controlar per separat la potència activa i reactiva a través de les corrents i_d i i_q respectivament. Donada una línia RL cal implementar un control de la tensió del convertidor en la banda d'alterna per a que segueixi les consignes de corrent. En un nivell de control més elevat es genera la consigna de potència activa a partir de la regulació de tensió del bus de continua i la consigna de reactiva per a la regulació de la tensió al punt de connexió del STATCOM. Així doncs, l'esquema de control utilitzat serà un disseny en cascada de dos nivells: regulació de tensions en bus de continua i punt de connexió a la xarxa amb injeccions de potència activa i reactiva i en un nivell més baix el seguiment de consignes de corrent actuant sobre les fonts de tensió que modelen el convertidor. Cal afegir un altre llaç de control que segueixi l'angle de la tensió de la xarxa al punt de connexió V_{ld} per a mantenir coherent la referència dq0. Aquest és un llaç de control molt comú, anomenat *Phase Locked Loop* (PLL). Per aquest disseny de control es considerarà que el llaç de corrent té una dinàmica prou ràpida per seguir les consignes que el controlen i poder-se assimilar a una font de corrent. També s'assumeix el convertidor com a ideal, de 100% de rendiment i sense harmònics

4.1. Llaços de corrent

En el nivell més alt de control es donen les consignes de potència activa (P^*) i reactiva (Q^*). Amb elles es calculen les corresponents consignes de corrent en els eixos dq a partir de la lectura de tensió en el punt de connexió a xarxa (V_{ld}) i les expressions 4.1:

$$\begin{aligned} P^* &= \frac{3}{2} V_{ld} \cdot i_d^* \\ Q^* &= -\frac{3}{2} V_{ld} \cdot i_q^* \end{aligned} \quad (4.1)$$

L'objectiu del control de les corrents és assolir en les línies del STATCOM (circuit RL) les intensitats consignades en eixos dq a través del voltatge donat per l'inversor. Així cal obtenir

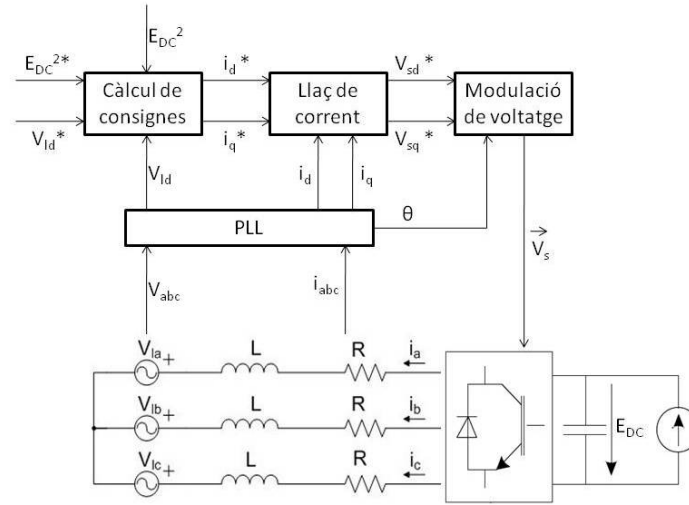


Figura 4.1: Esquema de control general

la funció de transferència dels circuits RL equivalents en eixos dq, modelats per les equacions 2.2, aquí reproduïdes:

$$\begin{aligned} V_{ld} - V_{sd} &= R \cdot i_d + L \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega L \cdot i_q \\ -V_{sq} &= R \cdot i_q + L \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega L \cdot i_d \end{aligned} \quad (4.2)$$

Per a evitar l'acoblament entre components en d i q del corrent i compensar la part dependent de la freqüència de xarxa i la tensió V_{ld} . Es pot aplicar un llaç *feed-forward* fent un canvi de variables en les tensions i obtenir expressions desacoblades, únicament dependents dels paràmetres en un sol eix d o q. [6]

$$\begin{aligned} V_{sd} &= -\hat{V}_{sd} + V_{ld} + \omega L \cdot i_q \\ V_{sq} &= -\hat{V}_{sq} - \omega L \cdot i_d \end{aligned} \quad (4.3)$$

Així, aplicant la transformada de Laplace a les equacions 4.2, s'obté la mateixa funció de transferència per als circuits equivalents dels eixos dq, on la sortida és el corrent injectat i la entrada

$$G(s) = \frac{I_{dq}}{\hat{V}_{sdq}} = \frac{1}{R + L \cdot s}$$

Aquesta és la planta a controlar amb la tensió aplicada per l'inversor en font de tensió com a acció de control i el corrent dels circuits RL equivalents com a sortida. Cal doncs, un controlador que determini aquesta tensió a partir de l'error de corrent. Per a dissenyar aquest control s'empra el mètode de Síntesi directa, pràctic i adequat per a sistemes senzills. Coneguda la funció de transferència de la planta a controlar s'utilitza un controlador genèric

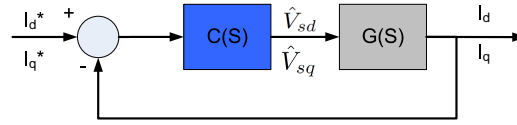


Figura 4.2: Sistema en llaç tancat de control de corrents

i una realimentació unitària. S'equipara la funció de transferència del sistema en llaç tancat amb la funció de transferència desitjada i es calculen els paràmetres del controlador.[7]

En la Figura 4.2 es mostra el diagrama de blocs del sistema en llaç tancat a controlar. La planta $G(s)$ és la ja calculada per als circuits RL equivalents. El controlador $C(s)$ és desconegut inicialment i el conjunt del sistema té una funció de transferència en llaç tancat $M(s)$ que s'assigna a un sistema de primer ordre, com s'indica en 4.4:

$$M(s) = \frac{1}{\tau_I \cdot s + 1} = \frac{C(s)\dot{G}(s)}{1 + C(s)\dot{G}(s)} \quad (4.4)$$

Coneixent la funció de transferència de la planta i igualant la del sistema en llaç tancat a l'expressió desitjada, el controlador $C(s)$ queda determinat per aquesta equació i només cal aïllar-lo, i en l'equació 4.5 s'obté la seva expressió.

$$C(s) = \frac{M(s)}{G(s)(1 - M(s))} = \frac{\frac{1}{\tau_I s + 1}}{\frac{1}{R + L \cdot s} \left(1 - \frac{1}{\tau_I s + 1}\right)}$$

$$C(s) = \frac{R + L \cdot s}{\tau_I s} = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (4.5)$$

$$(4.6)$$

I així s'ha trobat el controlador necessari per obtenir una resposta de primer ordre a través del mètode de síntesi directa. Aquest és un PI de mateixos paràmetres tant per el control de i_d com de i_q amb la constant de temps τ_I com a paràmetre de disseny

$$K_P = \frac{L}{\tau_I}$$

$$K_I = \frac{R}{\tau_I} \quad (4.7)$$

La figura 4.3 mostra la composició final dels llaços de control de corrents afegint al controlador dissenyat la compensació *feed-forward* de l'acoblament de corrents i la tensió del PCC.

4.2. Control del bus DC

Per a poder regular la tensió del condensador del bus de continua cal cedir o consumir potència activa de la xarxa tal com descriu l'equació 2.6. Per simplicitat pràctica la variable que es controla es el quadrat de la tensió del condensador.

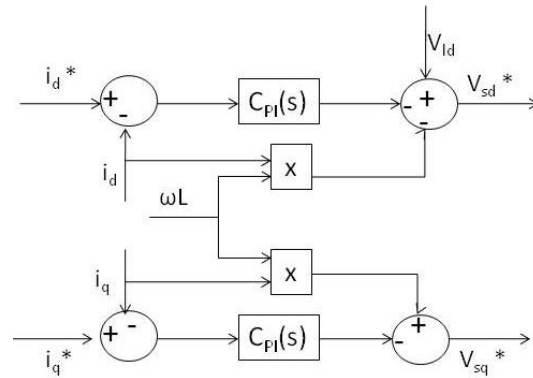


Figura 4.3: Llaç de control de corrents en eixos dq

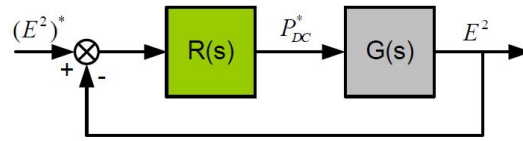


Figura 4.4: Sistema en llaç tancat de control de tensió DC

El sistema a estudiar és el de la figura 4.4, on l'entrada és la consigna del quadrat de la tensió DC (E^2*), l'acció de control és la consigna de potència activa (P^*) i la sortida és el quadrat de la tensió del condensador (E^2).

Aplicant la Transformada de Laplace a l'equació 2.6 s'obté la funció de transferència de la planta ($G(s)$).

$$G(s) = \frac{E^2}{P^*} = \frac{2}{C \cdot s} = \frac{K}{s} \quad (4.8)$$

També en aquest cas s'utilitza el mètode de síntesi directe. Es determina que el sistema en llaç tancat $M(s)$ tingui una dinàmica de primer ordre amb la constant de temps τ_{dc} com a paràmetre de disseny. Aïllant la funció de transferència del controlador ($R(s)$) obtenim l'expressió que permet calcular els seus paràmetres.

$$R(s) = \frac{M(s)}{G(s)(1 - M(s))} = \frac{\frac{1}{\tau_{dc}s+1}}{\frac{K}{s}(1 - \frac{1}{\tau_{dc}s+1})} = \frac{1}{K \cdot \tau_{dc}} \quad (4.9)$$

Per tant podria utilitzar-se un controlador P de la forma:

$$K_p = \frac{1}{K \cdot \tau_{dc}} = \frac{C}{2\tau_{dc}} \quad (4.10)$$

Convé però, utilitzar un Controlador PI amb constant integral (K_i) prou petita per a tenir una influència en la dinàmica negligible davant l'efecte proporcional. D'aquesta manera s'introdueix un integrador que augmenta el tipus del sistema per millorar la precisió i la robustesa. Llavors es garanteix un error estàtic nul davant d'entrada graó o rampa i s'ajuda

a mitigar l'efecte de possibles perturbacions. Aquest paràmetre addicional també deixa oberta la possibilitat d'ampliar el model incorporant, per exemple, pèrdues a través d'una resistència.

[8]

4.3. Control de Voltatge

La regulació del voltatge al punt de connexió comuna és la finalitat principal del STATCOM. L'objectiu és mantenir aquesta tensió al seu valor nominal. Per fer-ho, cal que el STATCOM injecti una certa potència reactiva, donada per l'equació 2.9. Aquesta funció principal s'implementa en el llaç extern de control sobre l'eix q, donant la consigna de potència reactiva (Q^*) per al control de més baix nivell. En aquest cas s'ha abordat el disseny de control per tres mètodes diferents per a poder comparar a través de simulacions les seves prestacions en front de la complexitat de control.

4.3.1. Síntesi directa

Per aplicar el mètode de síntesi directa ja utilitzat anteriorment s'assumeix que mentre la xarxa opera en condicions normals, la tensió en qualsevol punt hauria d'estar entre 0,9 i 1,1 p.u. Així que es pot considerar que en l'equació 2.9 la relació entre la diferència de tensions i la potència reactiva és una constant dependent de la tensió nominal V_N . D'aquesta manera el disseny de control pot fer-se sobre aquesta relació i trobar el controlador necessari per a que el comportament global del sistema sigui de 1r ordre de guany unitari i constant de temps τ . Aquest controlador és el definit en 4.11

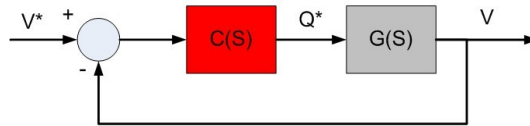


Figura 4.5: Diagrama de blocs per al control de voltatge

$$\begin{aligned}
 M(s) &= \frac{1}{\tau s + 1} = \frac{C(s) \cdot G(s)}{1 + C(s) \cdot G(s)} \\
 G(s) &= \frac{\widehat{V}}{Q} = \frac{X}{V_N} \\
 C(s) &= \frac{M(s)}{G(s)(1 - M(s))} = \frac{\frac{1}{\tau s + 1}}{\frac{X}{V_N} \left(1 - \frac{1}{\tau s + 1}\right)} = \frac{1}{K \cdot \tau s} \\
 C(s) &= \frac{U_N}{X \cdot \tau s} \tag{4.11}
 \end{aligned}$$

Cal matitzar que aquest disseny controla la variable $\widehat{V} = V_{th} - V_{ld}$. Si es vol controlar V_{ld} i V_{th} es manté constant, l'error entre la variable controlada i la seva consigna serà el mateix però amb signe oposat. Llavors només cal afegir un signe negatiu a $C(s)$

4.3.2. Voltage Droop

El terme anglès *Voltage Droop* es podria traduir com caiguda del voltatge i fa referència a un mètode de control emprat des de fa molts anys en els generadors elèctrics convencionals de les grans plantes elèctriques. Es tracta d'un control proporcional al voltant d'un punt d'operació de tensió i potència reactiva (Q-V) basat en incrementar o disminuir la potència reactiva injectada en proporció a la caiguda de tensió respecte el punt d'operació. En la figura 4.6 es pot veure el gràfic característic del Droop control i com es creua amb rectes de càrrega per a diferents tensions de buit equivalents de la xarxa, donant lloc als diferents punts de treball en règim estacionari. [9]

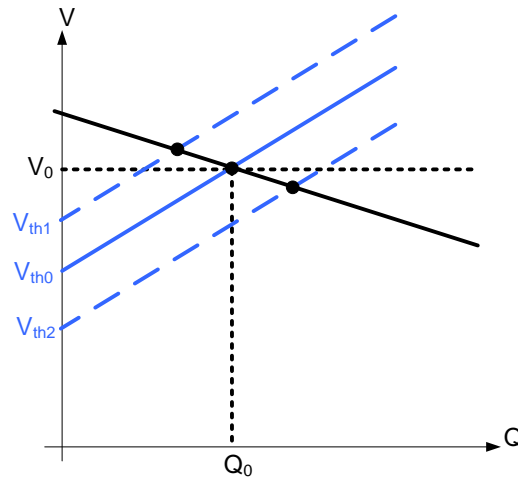


Figura 4.6: Característica del *Voltage Droop* i rectes de càrrega per diferents tensions de buit

El Voltage Droop és un mètode senzill i fàcil d'implementar que no requereix caracteritzar la xarxa s'implementa i només necessita la mesura de la tensió del PCC. Per altra banda no és un control exacte ja que es basa precisament en la caiguda (o error) de la tensió i s'ha d'assumir un grau de tolerància. Aquest control ve regit per l'equació 4.12:

$$V - V_0 = -\frac{1}{K_{Droop}} \Delta(Q - Q_0) \quad (4.12)$$

Al implementar el mètode de Droop per regular el voltatge s'han de determinar tres paràmetres: les coordenades de tensió i potència reactiva del punt d'operació (V_0, Q_0), i la constant de proporcionalitat K_{Droop} , que marca el pendent de la recta. Per a una variació en la tensió de la xarxa, un valor alt de la constant suposarà que la tensió del PCC s'allunyi poc, però requerirà una aportació de potència reactiva major que per una K_{Droop} més petita. I aquí està el compromís a l'hora d'assignar la constant de Droop, acotada per la màxima caiguda de tensió admissible i el límit de potència reactiva del FACTS. Per tant, és raonable definir aquesta constant amb aquests dos límits, de manera que la màxima caiguda de voltatge es doni al injectar la màxima potència reactiva:

$$K_{Droop} = \frac{Q_{max}}{\Delta V_{ldmax}} \quad (4.13)$$

Pel que fa al punt d'operació (V_0, Q_0), la coordenada de tensió és la consigna de control, que serà per defecte la tensió nominal del PCC. En ser els STATCOM dispositius auxiliars

per regular el voltatge, quan el nivell de tensió es troba al valor consagrat, el sistema no ha d'actuar i per tant la potència a injectar (Q_0) ha de ser nul·la. Amb aquestes consideracions, el Voltage Droop és un controlador proporcional amb un guany sobre l'error de tensió:

$$Q^* = K_{Droop} \Delta (V_{ld}^* - V_{ld}) \quad (4.14)$$

4.3.3. Voltage Droop adaptatiu

El control de Voltage Droop té, a més de ser senzill, l'avantatge d'utilitzar menys potència reactiva que una regulació exacta a canvi de permetre una caiguda(o pujada) de la tensió. Per a variacions considerables de tensió és profitosa aquesta reducció de la potència requerida, però en altres situacions pot ser més millor mantenir-se en el voltatge nominal amb més precisió. El que cal fer és modificar el paràmetre K_{Droop} per a que el pendent de la recta de Voltage Droop (figura 4.6) sigui més restrictiu amb la caiguda de voltatge en l'estat estacionari. Per a introduir aquesta evolució sobre el Voltage Droop s'ha dissenyat un control adaptatiu simple basat en multiplicar el valor de K_{Droop} de forma proporcional a l'error de tensió del PCC. El paràmetre K_{Droop} es realimenta formant un llaç de control adaptatiu a través d'un retard amb període de mostratge T_{ad} . En cada instant de mostratge la constant de Droop es veu multiplicada per l'error de tensió (en valor absolut) i un guany. L'equació 4.15 mostra com s'actualitza el paràmetre K_{Droop} .

$$K_{Droop}(t) = K_{Droop}(t - T_{ad}) \Delta \frac{V_{ld}^* - V_{ld}}{\varepsilon_V \Delta V_N} \quad (4.15)$$

Es tracta d'establir una recta de Droop per a cada nivell de voltatge, i per tant s'haurà de considerar una tolerància ε_V com a l'error de tensió admissible en règim estacionari. Mentre l'error mesurat de la tensió V_{ld} en p.u. sigui superior a la tolerància, la constant K_{Droop} es multiplica per un factor major que 1 i anirà creixent en cada període de mostratge del control adaptatiu. Llavors la potència reactiva injectada(o absorbida) s'incrementarà, contribuint a reduir l'error de voltatge i consegüentment el factor de multiplicació de K_{Droop} disminuirà. Aquest factor arriba a 1 quan l'error de tensió és de ε_V p.u, moment en que la pendent del Voltage Droop ja no canviarà i s'haurà arribat al règim estacionari.

4.4. Seguiment del P.O. 12.3

Mentre hi hagi variacions petites en la tensió de xarxa, el STATCOM pot regular la tensió però per a faltes en la xarxa com els sots de tensió la potència reactiva requerida per a retornar al voltatge nominal seria inadmissible. Durant sots de tensió el STATCOM pot injectar potència reactiva per contribuir a recuperar la xarxa i evitar que les proteccions dels dispositius del seu voltatge hagin d'actuar aïllant-se del sistema, fet que pot agreujar el problema. En el cas de les tecnologies de generació eòlica, la majoria dels parcs instal·lats no son capaços de donar suport a la xarxa davant aquestes faltes i es desconnecten quan es dona el cas. La pèrdua de generació influeix negativament a dissipar la falta i per això la creixent contribució de l'energia eòlica a la producció elèctrica suposa un problema de seguretat. Per a fer-hi front la llei del estat espanyol estableix en el 2006 el procediment d'operació P.O. 12.3 [10] per a la generació en règim especial, com la eòlica. Aquest (*grid code*) defineix la proporció de corrent reactiva respecte corrent total que una instal·lació, com un parc eòlic amb un STATCOM, ha d'injectar a la xarxa segons el nivell de tensió al PCC, tal com s'il·lustra en la figura 4.7

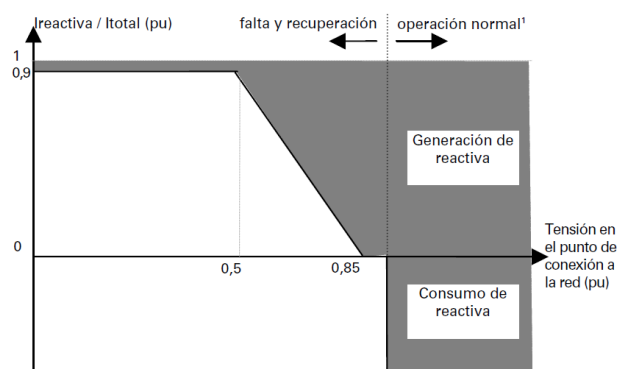


Figura 4.7: característica de tensió i corrent reactiva del P.O. 12.3

Per incorporar aquesta normativa al STATCOM es dissenya un segon mode d'operació per al control d'alt nivell. Si la tensió mesurada al PCC és inferior a 0,85 p.u. es deixarà de regular la tensió amb els algorismes anteriorment descrits i es passarà a través d'un commutador a operar en mode de sot de tensió. En aquest cas es generen les consignes de potència reactiva per al llaç intern de control comparant la tensió del PCC mesurada amb el que estableix el P.O. 12.3. La relació de la figura 4.7 es discretitza en una taula i amb una interpolació lineal s'obté la relació de corrent reactiva per a cada nivell de tensió, que serà igual a la relació entre potència reactiva i aparent. Cal tenir en compte que aquesta relació fa referència a tota la instal·lació del conjunt parc eòlic i STATCOM, llavors la relació obtinguda es multiplicada per la potència aparent total i es resta la potencia reactiva que pugui estar aportant o consumint el parc eòlic. Així, com es veu en la figura 4.8 es calcula la consigna de potència reactiva en mode d'operació en sot de tensió.

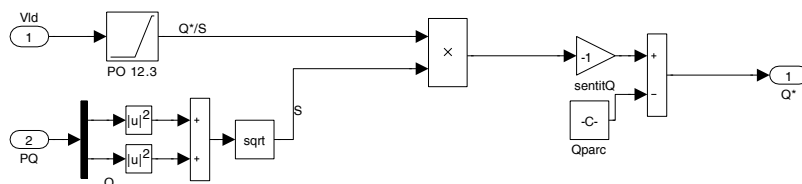


Figura 4.8: esquema de control per al mode d'operació en sot de tensió

4.5. Saturació de Potència i Transició entre modes d'operació

Els dispositius electrònics que formen el STATCOM tenen limitacions físiques i no poden suportar qualsevol nivell de potència. Per tant existeix una potència reactiva màxima que es podrà injectar (o absorbir) a la xarxa per a regular la tensió. Per això en el sistema de control es posa un bloc de saturació en la consigna de reactiva Q^* . Així es limita la senyal de control amb el paràmetre Q_{max} entre un límit superior (Q_{max}) i un inferior ($-Q_{min}$).

4.5.1. Llaç anti-windup

El fet d'introduir una saturació després d'un controlador amb un integrador comporta un problema afegit. Quan el controlador estableix una consigna de potència reactiva per sobre del límit Q_{max} la saturació actua i no s'assoleix el nivell de tensió consignat. Per tant la senyal d'error de tensió que entra al controlador no és nul·la i l'integrador segueix incrementant el valor de la sortida. Llavors l'estat de l'integrador no es correspon amb l'acció de control saturada. Quan canvia la consigna de tensió o la tensió mesurada, l'error canvia i el controlador integral corregeix la seva sortida però des de un estat encara per sobre de la saturació i es segueix consignant Q_{max} innecessàriament fins que el controlador I té una sortida inferior a Q_{max} i ja no hi ha saturació. Per tant la saturació provoca l'anomenat efecte windup un retard per a assolir l'estat que marquen les noves consignes o mesures de tensió.

Per a corregir l'efecte windup de la saturació s'afegeix en el controlador una realimentació anti-windup que compara la senyal de control Q^* abans i després de la saturació i es realimenta amb un guany a l'entrada de l'integrador. mentre no hi hagi saturació aquesta realimentació serà nul·la i quan la saturació actuï la sortida de l'integrador seguirà l'acció de control saturada amb més o menys rapidesa segons el valor del guany anti-windup de la realimentació. La topologia d'aquest llaç de control es mostra l'esquema 4.9.

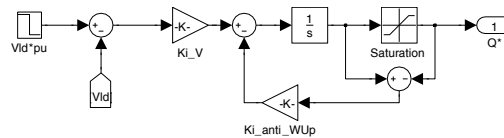


Figura 4.9: Esquema del controlador de tensió amb saturació i llaç anti-windup

Capítol 5

Disseny de control del SVC

Havent comprovat amb la equació 3.5 que el SVC pot actuar com a font controlada de potència reactiva a través de la susceptància variable, es pot aplicar l'esquema de control del STATCOM també per al SVC. S'apliquen les mateixes transformades de Park però en aquest cas només es té en compte l'eix q, ja que el SVC només pot aportar o consumir potència reactiva.

En el llaç de control extern (alt nivell) es pot utilitzar el mateix disseny del STATCOM per a regular el voltatge al punt de connexió a xarxa. Aquest genera la consigna de potència reactiva Q^* que el SVC a d'absorbir i amb la mesura de tensió es calcula la susceptància equivalent consignada B^*_{eq} . La principal diferència amb el STATCOM és que no hi ha una saturació de la consigna de potència reactiva Q sinó que es satura la consigna de susceptància, que està fortament afectada del valor de la tensió.

El llaç de control intern regula la susceptància del SVC disparant el pols de corrent dels tiristors amb l'angle de retard adequat. Finalment cal tenir en compte que les senyals de tensió i corrent mesurades hauran de ser convenientment filtrades per mitigar l'efecte d'harmònics

5.1. Llaç de susceptància equivalent

Del control de tensió es genera la senyal de potència reactiva Q^* amb la que es calcula la susceptància equivalent desitjada (B^*_{eq}) segons l'equació 5.1. Amb la consigna de susceptància i la seva lectura calculada a partir de mesures de tensió i corrent en el SVC, el llaç de susceptància ha de generar les senyals de sortida de nombre de TSC connectats (n) i l'angle de dispar del TCR(α).

$$B_{eq} = -\frac{Q}{V^2} \quad (5.1)$$

La primera operació a realitzar és obtenir el nombre de TSC a connectar. Aquest paràmetre (n) ha de ser l'enter superior de la divisió de B_{eq} entre la susceptància d'un dels condensadors. Llavors la susceptància inductiva a aportar per el TCR serà la diferència entre la susceptància de tots els TSC connectats i la susceptància equivalent desitjada. Així es descriu en les següents equacions 5.2

$$\begin{aligned} n &= \lceil B_{eq}/B_C \rceil = \lceil B_{eq} \cdot X_C \rceil \\ B_{Leq} &= \frac{n}{X_C} - B_{eq} \end{aligned} \quad (5.2)$$

El principal inconvenient per aquest llaç de control és que la característica de susceptància (B_{Leq}) en funció de l'angle de dispar (α), tot i no tenir dinàmica, no és lineal i és difícil calcular la seva inversa, tal com es veu en l'equació 3.4. Per a fer front a aquesta no linealitat s'implementa un control adaptatiu que linealitza la corba al voltant del valor de l'angle de dispar i s'actualitza cada cert període de temps.

Tenint una característica lineal, la derivada de la funció $B_{Leq}(\alpha)$ es pot prendre com una constant que s'actualitza amb el valor anterior de l'angle de dispar. La inversa d'aquesta constant s'utilitza com a guany per a relacionar la variació temporal d'angle a partir de l'error de susceptància en un temps petit τ_B , com es dedueix en les equacions 5.3. Aquesta senyal de variació d'angle s'entra en un integrador del que s'obté la senyal d'angle de dispar.

$$\frac{dB_{Leq}}{d\alpha} = 2 \frac{1 - \cos(2\alpha)}{\pi \cdot X_L}$$

$$\frac{B_{eq}^* - B_{eq}}{\tau_B} \cdot \frac{d\alpha}{dB_{eq}} = \frac{d\alpha}{dt}; \tau_B \rightarrow 0 \quad (5.3)$$

$$(5.4)$$

Com s'ha vist i es mostra en la figura 5.1, el llaç de control de susceptància descompon la consigna de susceptància (B_{eq}) entre la aportada per n condensadors i la que ha de contrarrestar el TCR. Per a obtenir l'angle de dispar (α) adequat s'aplica un control integral adaptatiu basat en la derivada $d\frac{d\alpha}{dB_{eq}}$.

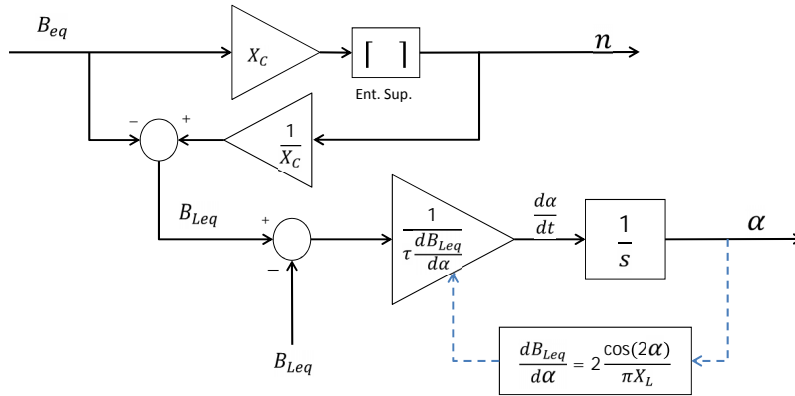


Figura 5.1: Diagrama de control de susceptància del SVC

Com es mostra en la figura 5.1, el llaç de control de susceptància descompon la consigna de susceptància (B_{eq}) entre la aportada per n condensadors i la que ha de contrarrestar el TCR. Per a obtenir l'angle de dispar (α) adequat s'aplica un control integral adaptatiu basat en la derivada $d\frac{d\alpha}{dB_{eq}}$.

Capítol 6

Validació dels models amb simulacions en Matlab

Un cop establert el disseny de control tant per al STATCOM com per el SVC cal comprobar que funciona. Per això s'implementa el model elèctric i l'esquema de control en el programa Matlab-Simulink i el seu mòdul de sistemes elèctrics de potència per a poder realitzar diverses simulacions i validar del sistema de control dissenyat. Els esquemes de control simulats son idèntics als que han estat dissenyats. Els models elèctrics utilitzats segueixen la modelització realitzada i son trifàsics connectats a una xarxa en equivalent Thevenin constituïda per una impedància de components resistiva (R_r) i inductiva (L_r) i una font de tensió trifàsica controlada, per a poder simular buits de tensió en la xarxa. Per a obtenir senyals en els eixos dq a partir de mesures trifàsiques s'utilitzen blocs predefinits del programa que implementen la transformada de Park i la seva anti-transformada i un *Phase Locked Loop* (PLL) per sincronitzar les variables a l'angle de la tensió del PCC. Per altra banda, per algunes simulacions s'ha afegit una branca de generació en paral·lel en el PCC a la xarxa per simular un parc eòlic al que el FACTS donarà suport. El parc eòlic intervé produint la potència activa i reactiva que se li indica.

6.1. Simulació del STATCOM

El model elèctric del STATCOM consta de una línia RL trifàsica amb una resistència i una inductància en sèrie amb una font de tensió controlada en cada fase. El bus de continua es modela com un condensador en paral·lel amb una font de corrent. A l'altre extrem de la línia RL, el STATCOM es connecta a una xarxa d'equivalent Thevenin i en paral·lel amb el parc eòlic. El circuit elèctric conjunt i els blocs funcionals de mesura es mostren en la figura 6.1 i a continuació es defineixen els seus paràmetres.

Paràmetres del model

Xarxa

- Tensió: $V_{th} = 25kV$
- Resistència: $R_{th} = 2\Omega$
- Inductància: $L_{th} = 5mH$

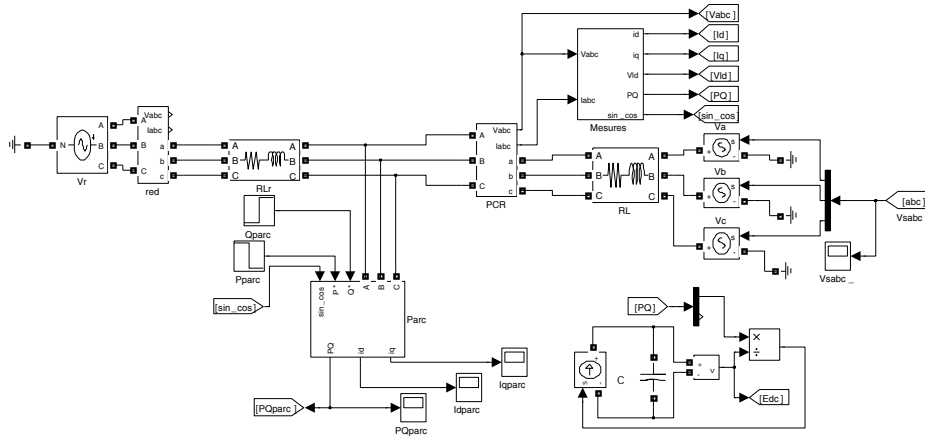


Figura 6.1: Model elèctric en Matlab de la xarxa utilitzada en les simulacions del STATCOM

- Freqüència: $f = 50Hz$

STATCOM

- Tensió nominal al punt de connexió: $V_N = 20,412kV$
- Resistència: $R = 1\Omega$
- Inductància: $L = 50mH$
- Capacitat del condensador: $C = 3e - 5F$
- Tensió inicial del condensador: $E_{dc0} = 250kV$

Sobre aquest model elèctric es construeix en diagrama de blocs l'esquema de control dissenyat, il·lustrat en la figura D.1. S'hi poden veure el dos eixos de control d i q i els llaços de tensió i corrent units a través de les consignes de potència. També s'hi observa la compensació feed-forward de l'acoblament de corrents.

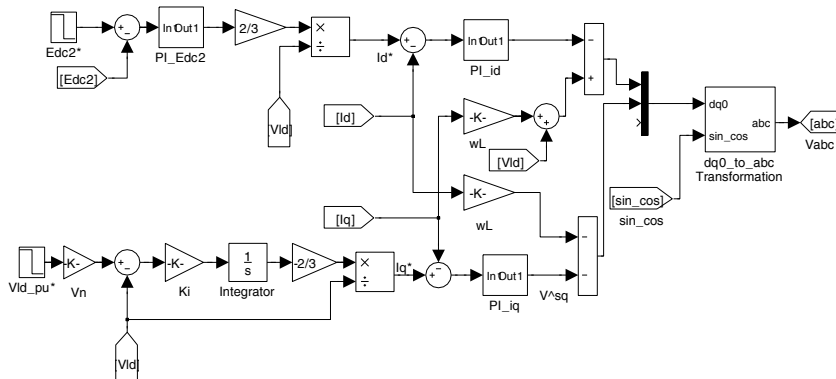


Figura 6.2: Esquema de control del STATCOM en Matlab-Simulink

Paràmetres de control

- Constant de temps dels llaços de corrent: $\tau(I) = 0,001$
- Constant de temps del llaç de tensió : $\tau(V) = 0,01$
- Constant de temps del llaç de tensió continua: $\tau_{DC} = 0,02$
- Guany integral del controlador de tensió continua: $K_{idc} = 0,001$

6.1.1. Simulació de llaços de corrent

Un cop definit el model amb tots els seus paràmetres es procedeix a simular el seu comportament davant de diferents consignes. Per comprovar el funcionament del sistema de control en cascada es fan simulacions dels seus llaços de control, de més intern a més extern. Per tant, primer s'eliminen del model complet el control de tensions en el punt de connexió i en el bus de continua i es simulen els dos llaços de corrent controlats per consignes de potència activa i reactiva.

Control de potència activa

- temps de simulació: 0,5s
- entrada: graó de potència activa (P) en $t=0,2s$ des de 0 fins a 2MW. La consigna de potència reactiva(Q) es manté en 0 durant tota la simulació.

La figura 6.3 mostra el resultat de la simulació.

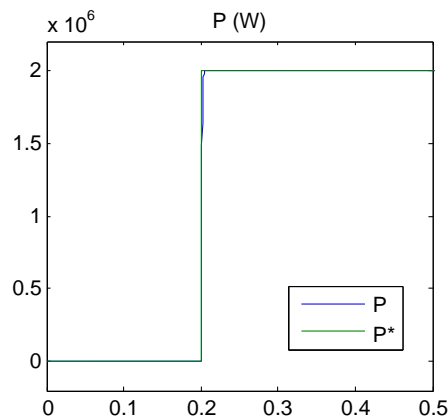


Figura 6.3: Resposta de P davant una consigna de graó

Control de potència reactiva

- temps de simulació: 0,5s
- entrada: graó de potència reactiva (Q) en $t=0,2s$ des de 0 fins a 2MVAr. La consigna de potència activa(P) es manté en 0 durant tota la simulació.

La figura 6.4 mostra el resultat de la simulació.

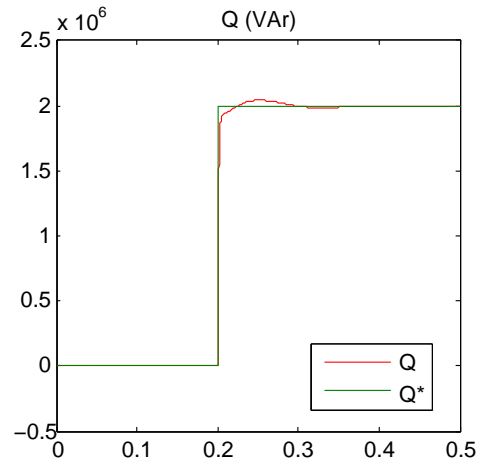


Figura 6.4: Resposta de Q davant una consigna de graó

Acoblament de potència activa i reactiva

Les tensions en la banda d'alterna del convertidor en els eixos dq (V_{sd} , V_{sq}) depenen també del corrent en l'eix oposat, tal com indica la equació 2.2. Per tant les potències activa i reactiva presenten un acoblament, i un canvi en una influeix en l'altra. La següent simulació il·lustra aquesta dependència en la figura 6.5.

- temps de simulació: 1s
- 1a entrada: graó de potència reactiva (Q) en $t=0,2s$ des de 0 fins a 20MVAR.
- 2a entrada: graó de potència activa (P) en $t=0,5s$ des de 0 fins a 10MW.

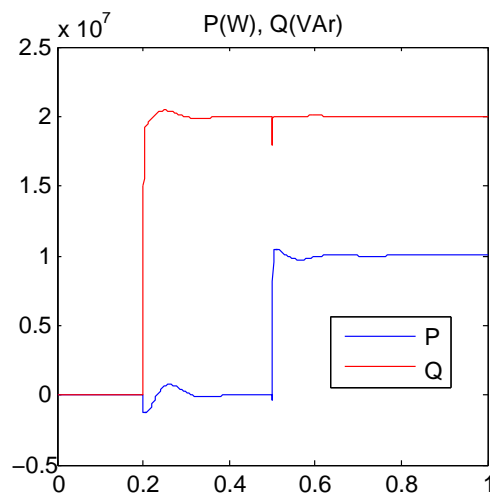


Figura 6.5: Influència mútua de P i Q davant consignes de graó

6.1.2. Simulació de llaços de tensió

Havent comprovat que les potències segueixen la consigna establerta amb una resposta acceptable es procedeix a simular a un nivell de control més elevat. Utilitzant el sistema complet es regulen la tensió en el punt de connexió a xarxa i la tensió en el bus de continua. Per a la tensió del PCC i del bus DC s'utilitza primer el controlador obtingut per síntesi directa per a simular un canvi en la consigna de tensió. Després es simula una caiguda de tensió en la xarxa per als tres tipus de control de tensió V_{ld}

Control de tensió en el bus DC

- temps de simulació: 0,6s
- entrada: graó de tensió (E_{dc}) en $t=0,1s$ des de el seu valor inicial fins a 0,9 p.u. La consigna de tensió de V_{ld} es manté en el valor nominal durant tota la simulació.

La figura 6.6 mostra el resultat de la simulació.

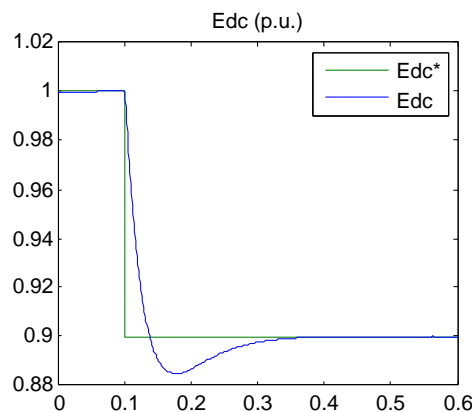


Figura 6.6: Consigna graó de E_{dc} i la seva resposta

Control de tensió en el PCC

- temps de simulació: 0.6s
- entrada: graó de tensió (V_{ld}) en $t=0,1s$ des de el seu valor nominal fins a 0,9 p.u. La consigna de tensió de bus de continua (E_{dc}) es manté en el valor inicial durant tota la simulació.

La figura 6.7 mostra el resultat de la simulació.

Així doncs, és pot controlar el nivell de tensió en el punt de connexió injectant la potència reactiva adequada. Però habitualment no s'utilitza el STATCOM per variar la tensió fins a un nivell concret sinó per a mantenir la tensió al seu propera al seu valor nominal davant de perturbacions en la xarxa. Per veure si el sistema suporta les perturbacions es simula una baixada de tensió en la font equivalent de la xarxa.

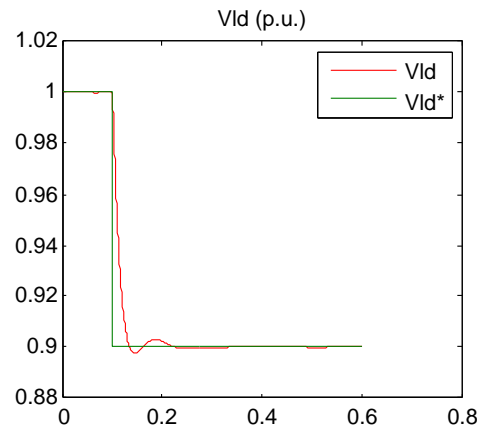


Figura 6.7: Consigna graó de V_{ld} i la seva resposta

Simulació: pertorbació de tensió de xarxa amb controlador I

- temps de simulació: 0,5s
- entrades: consigna de tensió ($V_{ld} = 1$), caiguda de tensió en la xarxa fins a 0,9 p.u. en $t = 0,1$ s
- sortides: tensió V_{ld} , potència activa i reactiva (PQ). Resultats en la figura 6.8

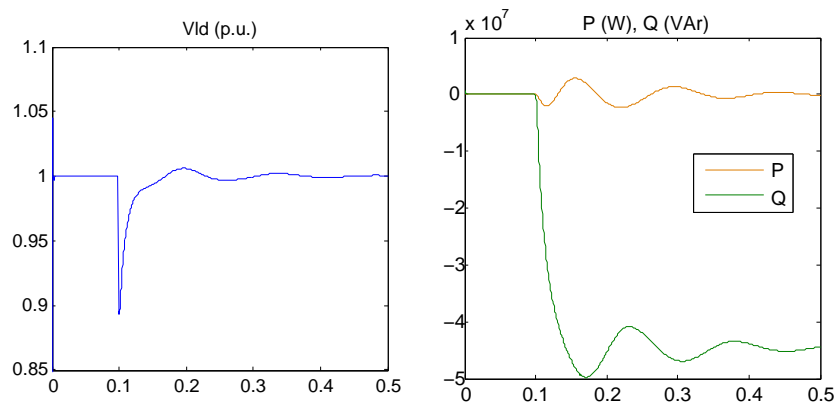


Figura 6.8: Tensió de bus i potència per a un graó en la tensió de xarxa amb controlador I

Simulació: pertorbació de tensió de xarxa amb control Droop

- temps de simulació: 0,5s
- entrades: consigna de tensió ($V_{ld} = 1$), caiguda de tensió en la xarxa fins a 0,9 p.u. en $t = 0,25$ s
- sortides: tensió V_{ld} . Resultats en la figura 6.9

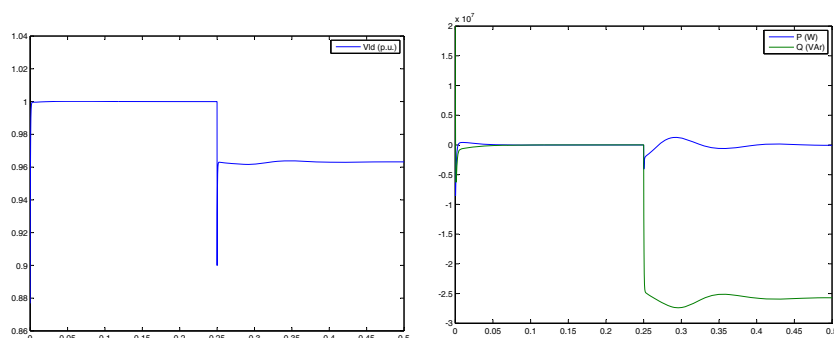


Figura 6.9: Tensió de bus i potència per a un graó fins a 0,9 p.u. en la tensió de xarxa amb control Droop

Simulació: pertorbació de tensió de xarxa amb control Droop adaptatiu

- temps de simulació: 0,5s
- entrades: consigna de tensió ($V_{ld} = 1$), caiguda de tensió en la xarxa fins a 0,9 p.u. en $t = 0,25s$
- sortides: tensió V_{ld} . Resultats en la figura 6.10

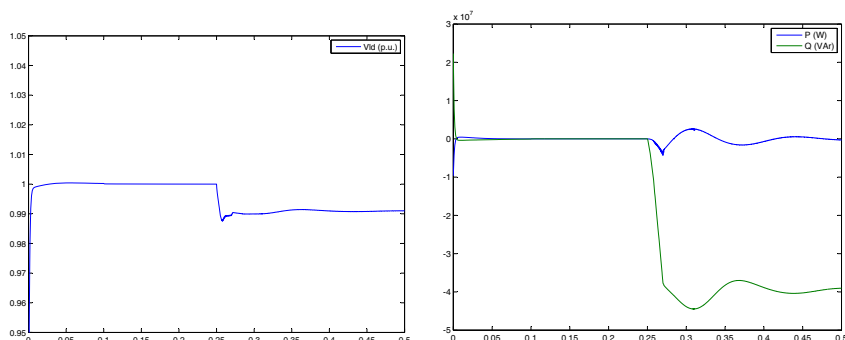


Figura 6.10: Tensió de bus i potència per a un graó fins a 0,9 p.u. en la tensió de xarxa amb control Droop adaptatiu

Interacció de tensions

Al igual que per al control de potència, hi ha acoblament entre la tensió al punt de connexió i la tensió en el bus de continua. Un transitori en una variable incideix en l'altre. Així es mostra en la figura 6.11

- temps de simulació: 1s
- 1a entrada: graó de tensió (V_{ld}) en $t=0,1s$ des de el seu valor nominal fins a 0,9 p.u.
- 2a entrada: graó de tensió de bus de continua (E_{dc}) en $t=0,5s$ desde el valor inicial fins 0,9 p.u.

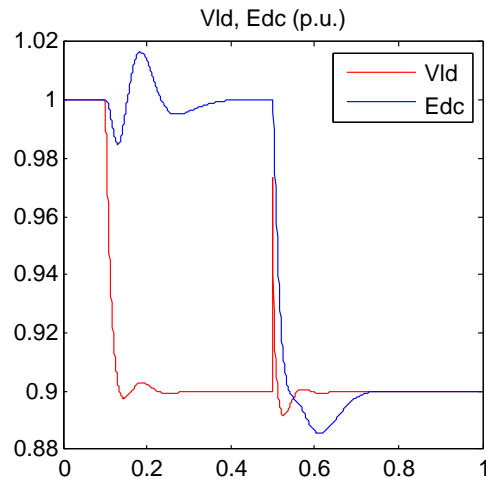


Figura 6.11: Resposta i interacció de V_{ld} i E_{dc} per a entrades graó

6.1.3. Saturació de potència

Comprobat que el controlador dissenyat es capaç de mantenir la tensió en front de perturbacions a la xarxa s'inclou al sistema de control un bloc de saturació en la consigna de reactiva Q^* . Així es limita la senyal de control amb el paràmetre Q_{max} entre un límit superior (Q_{max}) i un inferior ($-Q_{max}$). En les simulacions s'utilitza el valor de **$Q_{max} = 50$ MVar**. Per veure l'efecte de la saturació es simula una caiguda de tensió en la xarxa fins a 0,7 p.u.

Simulació: regulació de tensió amb saturació de potència

- temps de simulació: 1,5s
- entrades: consigna de tensió ($V_{ld} = 1$), graó de tensió en la xarxa fins a 0,7 p.u. des de $t = 0,1s$ fins $t = 0,5s$
- sortides: tensió V_{ld} , potència activa i reactiva (PQ). Resultats en la figura 6.12

Per a corregir l'efecte windup de la saturació s'afageix en el controlador una realimentació anti-windup de guany $1/\tau_{wu}$, on τ_{wu} és el temps d'integració de l'efecte windup. En aquest cas s'ha escollit $\tau_{wu} = 0,05$. Realitzada aquesta correcció es repeteix la anterior simulació. En la figura 6.13 es pot comprovar que un cop passada la baixada de tensió en la xarxa la potència reactiva i la tensió en la connexió del STATCOM ja es corregeixen sense retard cap a l'estat inicial.

6.2. Simulació del SVC

El model de simulació per al SVC consta de tots els components del sistema elèctric. A diferència del STATCOM, en que s'utilitza un model promitjat en font de tensió, la susceptància variable del SVC s'implementa commutant models de tiristors predefinits dins les

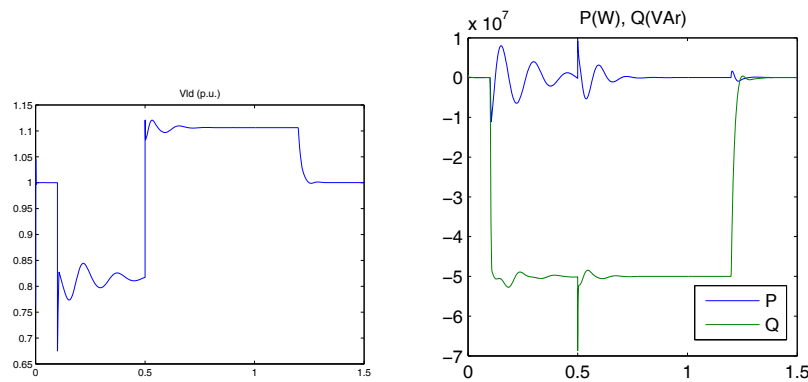


Figura 6.12: Tensió de bus i potència per a un graó fins a 0,7 p.u. en la tensió de xarxa amb saturació en la potència reactiva

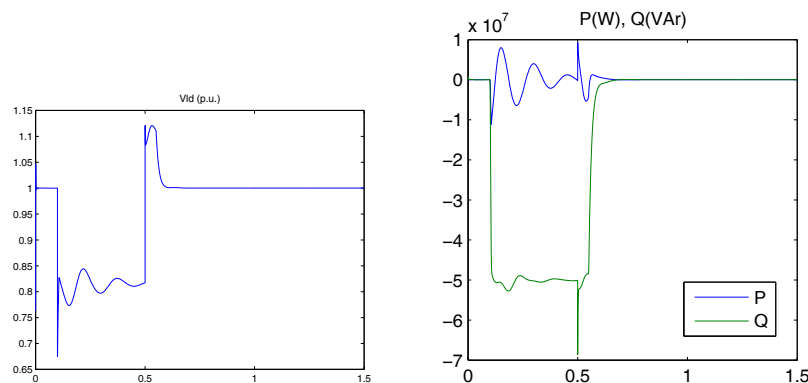


Figura 6.13: Tensió de bus i potència per a un graó fins a 0,7 p.u. en la tensió de xarxa amb saturació en la potència reactiva i realimentació anti-windup

llibries Simulink de Matlab. Per tant és una millor aproximació al sistema real ja que s'incorporen els elements d'electrònica de potència amb la seva commutació.

Aquesta incorporació suposa l'aparició de distorsió harmònica en les corrents generades, i per això s'incorpora un filtre que les atenua. Tot i així les senyals de mesura es filtren per rebutjar aquest soroll, fent que les simulacions requereixin un temps d'inicialització per arribar al règim estacionari inicial abans d'aplicar perturbacions o canvis en les consignes.

El SVC simulat consta de un TCR, un TSC i un filtre. La xarxa d'equivalent Thevenin on es connecten els dispositius és la mateixa que per a la simulació del STATCOM. El llaç de tensió és fa amb el controlador I, també de mateixos paràmetres que el STATCOM. El model elèctric i el llaç de control de susceptància per a les simulacions del SVC es mostren en la figura 6.14.

Paràmetres del model

Xarxa

- Tensió: $V_{th} = 25kV$
- Resistència: $R_{th} = 2\Omega$

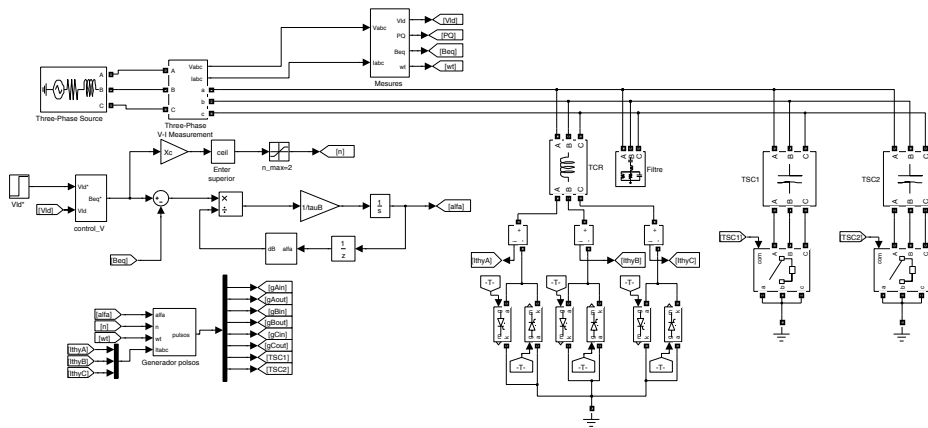


Figura 6.14: Model elèctric i de control per a les simulacions en Matlab del SVC

- Inductància: $L_{th} = 5mH$
- Freqüència: $f = 50Hz$

SVC

- Inductància dl TCR: $L = 2mH$
- Capacitat del condensador: $C = 1\mu F$
- Resistència dels Snubbers dels tiristors: $R = 10k\Omega$

Paràmetres de control

- Constant de temps del llaç de tensió : $\tau_V = 0,6$
- Constant de temps del llaç de susceptància: $\tau_B = 0,03$
- Temps de mostreig per a l'actualització de $\frac{d\alpha}{dB}$: $T_\alpha = 0,001$

6.2.1. Simulació de llaç de susceptància

Amb el model SVC exposat es realitzen diverses simulacions per a comprovar el comportament del sistema i validar el disseny de control implementat. Seguint l'esquema de control en cascada, cal començar per el llaç intern, i per tant comprovar que s'assoleixen les consignes de potència reactiva i que la susceptància equivalent B_{eq} es pot controlar.

Simulació: graó de susceptància

- temps de simulació: 1,5s
- entrades: graó de susceptància equivalent (B_{eq}) en $t=0,8s$ des de $0 \Omega^{-1}$ fins a $-0,2 \Omega^{-1}$.
- sortides: susceptància equivalent (B_{eq}). Resultats en la figura 6.15

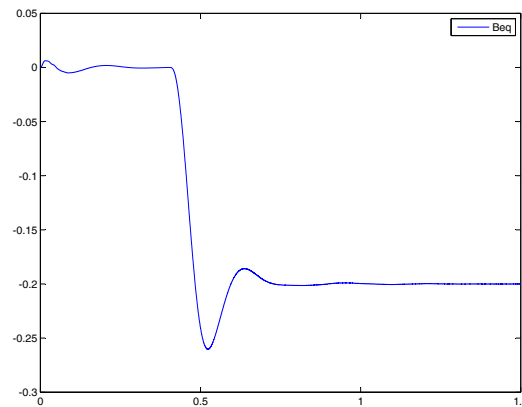


Figura 6.15: Resposta de susceptància equivalent (B_{eq}) per a un graó en la seva consigna

Simulació: graó de potència reactiva

- temps de simulació: 1,5s
- entrades: graó de potència reactiva (Q) en $t=0,8s$ des de -25 MVar fins a -100 MVar.
- sortides: susceptància equivalent (Q). Resultats en la figura 6.16

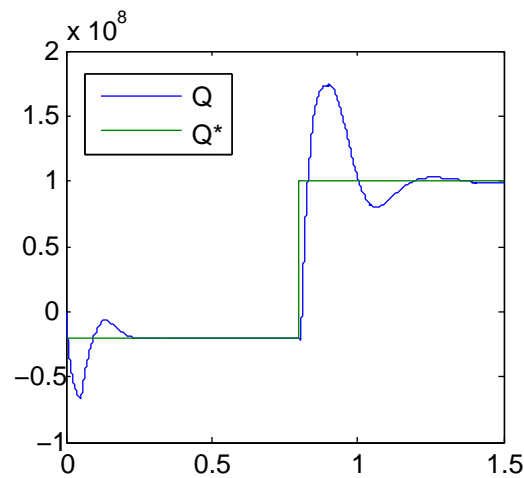


Figura 6.16: Resposta de potència reactiva (Q) per a un graó en la seva consigna

Aquestes dues primeres simulacions del SVC mostren com, tot i tenir un sobrepuig considerable, efectivament el llaç intern de control aconsegueix assolir la potència reactiva consignada regulant la susceptància equivalent. El filtrat de les senyals mesurades suposa un transitori inicial i un temps de resposta una mica més lent que per al STATCOM.

6.2.2. Simulació de llaç de susceptància

Havent comprovat que en el nivell de control inferior es segueixen adequadament les consignes donades, es procedeix a simular el sistema complet introduint el llaç de control extern que

regula la tensió al PCC. No es contempla la simulació de sots de tensió en la xarxa, ja que el SVC actua per reactància(o susceptància) i a tensions baixes té capacitat d'aportació de potència reactiva molt limitada.

Simulació: graó de tensió al punt de connexió comuna

- temps de simulació: 1,5s
- entrades: graó de tensió al PCC(V_{ld}) en $t=0,8s$ des de 1,05 p.u. fins a 0,8 p.u.
- sortides: tensió al PCC(V_{ld}). Resultats en la figura 6.17

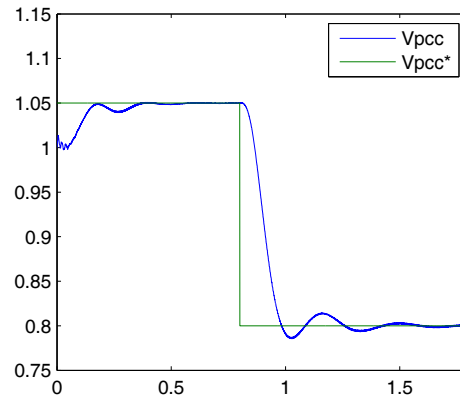


Figura 6.17: Resposta de tensió al PCC(V_{ld}) per a un graó en la seva consigna

Com es veu en la darrera simulació, la tensió al PCC segueix la senyal consignada correctament i amb un temps de resposta acceptable. Pot observar-se un petit arrissat inicial amb un comportament de fase no mínima degut al transitori d'inicialització del sistema i el filtrat de les mesures. Al llarg de la simulació es comprova que el model de SVC desenvolupat compleix la seva principal funció de regular la tensió.

Capítol 7

Implementació en PSS/E

Una vegada establert el disseny de control, ha de transcriure's l'algorisme a un llenguatge en el qual PSS/E pugui interpretar com a model dinàmic d'usuari. PSS/E és un programa de simulació de sistemes elèctrics de potència basat en la creació d'una xarxa elèctrica a partir de nodes o busos. A cada bus s'assigna una tensió nominal i s'hi connecten càrregues, generadors o altres dispositius com FACTS. Els busos es connecten entre si a través de línies o transformadors. Es defineixen els paràmetres de cada dispositiu, com impedàncies, consums o potències generades i el cas de la xarxa creada es pot resoldre en mode estàtic o règim permanent. PSS/E, a través de mètodes numèrics, resol la xarxa variant els fluxos de potència fins a convergir a una solució per a la tensió i angle de cada bus. Un cop resolt el cas en mode estàtic es poden realitzar simulacions dinàmiques per a observar la resposta de la xarxa davant certes pertorbacions. Per aquestes simulacions cal atribuir als dispositius de la xarxa models dinàmics procedents de les llibreries internes del programa o bé creats per l'usuari.

Els models dinàmics d'usuari per a PSS/E es desenvolupen en codi Fortran, on es poden crear i manipular variables de forma molt lliure. Bàsicament han de crear-se 2 subrutines. En la primera es defineix la dinàmica del model a través d'equacions diferencials. La segona subrutina s'associa amb la primera per tenir el mateix nom canviant la lletra inicial per 'T' i en ella es calcula el corrent que el model injecta a la xarxa del cas PSS/E. Per crear aquestes subrutines fa falta conèixer el funcionament bàsic de les simulacions dinàmiques en PSS/E i els elements d'interacció entre PSS/E i el codi Fortran dels models d'usuari.

7.1. Elements d'interacció de models amb PSS/E

Els models han de llegir i transmetre dades amb la xarxa elèctrica de PSS/E per complir la seva funció. A més PSS/E executa els models dinàmics en diferents maneres segons el punt de la simulació en què es trobi. Per fer possible aquest intercanvi de dades de forma coherent PSS/E disposa d'una sèrie de funcions i taules de dades que poden usar-se en codi Fortran. Principalment s'usen 4 vectors indexats de dades en els quals es llisten les dades de tots els models dinàmics d'un cas classificats segons el tipus de paràmetres al que fan referència: [11]

- **Constants** [$CON(J + \dots)$]: són paràmetres reals fixos per a cada equipament en què s'usa el model. No varien en l'execució del codi ni durant la simulació. Normalment representen les especificacions que dimensionen físicament un sistema concret.

- **Indicadors** [$ICON(M + \dots)$]: operen de la mateixa manera que les constants però contenen valors sencers. Són utilitzats com a etiquetes o índexs per indicar un nombre de bus, de línia, de generador o altres equips o per activar o desactivar certes funcions del model.
- **Estats** [$STATE(K + \dots)$, $DSTATE(K + \dots)$]: són variables que evolucionen de forma dinàmica durant la simulació segons una equació diferencial. El model s'encarrega de calcular el valor de la derivada (DSTATE) en cada instant i PSS realitza la integració numèrica amb la qual actualitza l'estat corresponent (STATE).
- **Variables** [$VAR(L + \dots)$]: són variables d'entrada o sortida del model que no evolucionen segons una dinàmica com els estats. Poden ser lectures de paràmetres de xarxa (ex: tensions de bus) o sortides del model (ex: corrent injectat)

Cada vector de dades té associat un índex (J,M,K,L) amb el qual s'accedeix a cadascun dels elements. PSS/E compta amb un vector de cada tipus per a tots els models dinàmics del cas i reserva en ells el número d'espais que cada model requereix i li assigna el valor dels índex (J,M,K,L) com la primera posició en cada vector de dades que usa el model. Així, per exemple, per accedir a la 3a constant d'un model dins del codi Fortran s'ha d'escriure $CON(J+2)$, ja que 'J' correspon a la primera posició en el vector de constants usada pel model. PSS/E disposa d'un ampli llistat de variables i funcions per ser utilitzades en models dinàmics. Poden ser paràmetres propis del cas de xarxa o indicadors del tipus o fase de la simulació. Unes altres són sortides predefinides que poden estar encarades un tipus concret de models dinàmics tals com a generadors. Moltes d'aquestes funcions requereixen especificar el bus o generador al que vol referir-se. cal destacar que en aquestes funcions ha d'usar-se el índex intern de bus o dispositiu i no el que apareix al programa. Aquests nombres interns poden obtenir-se mitjançant funcions que accedeixen a taules de relació entre índex intern i extern. Per als models de FACTS les més importants són:

- **MODE**: variable sencera usada en tots els models i indica la manera en què s'ha executat la subrutina principal del model. PSS/E la modifica segons la fase de la simulació dinàmica en què es trobi. Les diferents maneres es defineixen en el codi Fortran simplement mitjançant una sentència condicional comprovant el valor de MODE. Així cadascun de les maneres són:
 - MODE=1: Inicialització d'estats i variables
 - MODE=2: Càlcul de derivades dels estats
 - MODE=3: Càlcul de les sortides del model
 - MODE=4: Comprovacions prèvies a la simulació. Coherència de número d'estats, assimilació de dades de la xarxa.
 - MODE=5 a 8: informació per a la generació d'informes del model en PSS/E (DOCU i DYDA)
- **SBASE**: Potència base del cas PSS/E en MW.
- **VOLT(IB)**: variable complexa del fasor de voltatge en el bus de índex intern IB. Expressada en p.o.
- **CURNT(IB)**: variable complexa del fasor de corrent injectat en el bus de índex intern IB. Expressada en p.u.
- **FCSBUS(I)**: número intern de bus on es troba el FACTS I.
- **FQSHUNT(I)**: Potència reactiva injectada a la xarxa pel FACTS I en la solució estàtica de la xarxa.

7.2. Arxiu de dades dinàmiques (*.dyr)

Per incloure models dinàmics PSS/E requereix que es llisti una capçalera de cadascun d'ells en un arxiu de dades dinàmiques. Est és un fitxer de text d'extensió *.dyr en el qual s'especifica i dimensiona el model dinàmic usat en cada equipament (generador, línia, càrrega, FACTS) indicant el bus i equip en què se situa, tipus de model, nombre d'elements en cada vector de dades i la llista d'indicadors [ICON(M+...)] i constants [CON(J+...)] del model. Un model d'usuari genèric en PSS/E v30 ha de descriure's:

```
ID, 'USRMDL', 0, 'NAME', IC, IT, NI, NC, NS, NV, [,,,ICONS,,,] [,,,CONS,,,]/
```

Per al cas concret del model de FACTS implementat, la capçalera es concreta com:

- **ID:** Número de FACTS del model
- **NAME= EBSTCM:** Nom del model
- **IC=15:** Indica que el model és del tipus FACTS
- **IT=1:** Indica que és un model de injecció de corrent
- **NI=3:** nombre de indicadors (ICONS) del model
- **NC=27:** nombre de constants (CONS) del model
- **NS=7:** nombre de estats (STATES) del model
- **NV=13:** nombre de variables (VARs) del model
- **[,,,ICONS,,,]:** llistat dels valors de indicadors de ICON(M) a ICON(M+NI-1)
- **[,,,CONS,,,]:** llistat dels valors de constants de CON(J) a CON(J+NC-1)

Així la capçalera de dades dinàmiques del model resulta:

```
1, 'USRMDL', 0, 'EBSTCM', 15, 1, 3, 27, 7, 13, [,,,ICONS,,,], [,,,CONS,,,]/
```

7.3. Procés de simulació dinàmica

7.3.1. Assimilació de dades

Quan es duu a terme una simulació dinàmica en PSS/E s'executa un procés amb una sèrie de passos iteratius, tal com es mostra la figura 7.1. El primer pas és l'assimilació de dades per poder incorporar els models dinàmics en el cas. Partint d'un cas de xarxa de PSS/E resolt s'han de convertir les càrregues i generadors, després s'incorpora el fitxer de dades dinàmiques (*.dyr) on s'especifiquen tots els models dinàmics usats i els seus paràmetres. Això genera 3 arxius de sortida: dos per a les rutines conec.flx i conet.flx més un arxiu de compilació. Aquestes rutines contenen les trucades als models d'usuari del cas per a les fase de càlculs dinàmics(conec.flx) i els càlculs de corrent injectat(conet.flx). Després

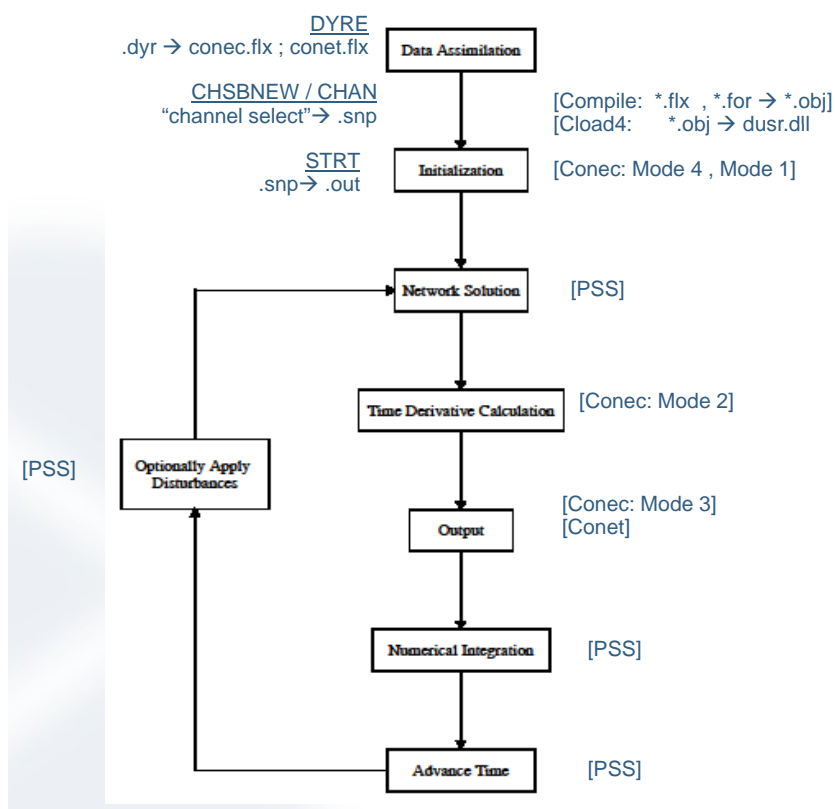


Figura 7.1: Diagrama de l'algoritme de simulació dinàmica de PSS/E

han d'escollir-se els canals (tensions, fluxos de càrrega, variables de models dinàmics, ...) a visualitzar en la simulació per crear l'arxiu del cas dinàmic (*.snp)

Fora del programa han de compilar-se les rutines conec.flx i conet.flx juntament amb tots els arxius de codi Fortran dels models d'usuari del cas. Això genera els fitxers objecte (*.obj) d'aquestes rutines i models que es muntaran amb l'executable cload4.bat per generar la llibreria de models del cas (dsusr.dll). Llavors ja estan tots els arxius llests per realitzar la simulació dinàmica.

7.3.2. Inicialització

Per començar la simulació dinàmica s'ha de carregar el cas de xarxa estàtic (*.sav) amb generadors i càrregues convertits des del directori de la llibreria creada (dsusr.dll). Seguidament s'obre l'arxiu del cas dinàmic (*.snp) i es procedeix a inicialitzar la simulació mitjançant el comando STRT. Aquesta acció executa els models dinàmics del cas per obtenir el valor inicial dels seus estats i variables (MODE=1) i comprova que les derivades dels estats en l'instant inicial sigui nul·la. A més es crea l'arxiu de sortida (*.out) on es guardaran els valors de tots els canals seleccionats durant la simulació.

7.3.3. Resolució i Càlcul de derivades

Amb els models inicialitzats es procedeix a resoldre la xarxa elèctrica com si es tractés del cas estàtic. Determinats els nivells de tensió en els busos i el flux de càrrega, en la propera fase PSS/I canvia a MODE=2 i es procedeix a executar tots els models dinàmics per calcular les derivades temporals dels seus estats. Així, en aquesta manera es realitzen els calculos i resolen les equacions per actualitzar el valor de tots els DSTATE(K+...).

7.3.4. Càlcul de sortides

El següent pas és obtenir les sortides del model. Per a això s'executen els models 2 vegades. En la primera, la subrutina principal en MODE=3 actualitza les variables del model usades com a sortides i es calculen els valors de funcions específiques indicades per a cert tipus de models (com a potència dels generadors). Després en una altra execució la segona subrutina del model calcula el corrent a injectar a la xarxa.

7.3.5. Integració numèrica, avançament temporal i pertorbacions.

Arribats a aquest punt PSS/E disposa de totes les variables de sortida dels models dinàmics i els corrents a injectar a la xarxa en cada bus. Però els estats de cada model no estan actualitzats. En cada iteració del procés el codi de cada model dinàmic calcula la derivada de cadascun dels seus estats i amb ella PSS/E realitza la integració numèrica per a l'actualització dels estats. PSS/E discretitza el temps de simulació en intervals fixos determinats per un paràmetre de simulació, el pas d'integració. Amb el valor dels estats, les seves derivades i el pas d'integració es calculen els valors actualitzats dels estats per a la següent iteració mitjançant una extrapolació lineal. Aquí sorgeix el compromís entre les constants de temps de cada estat, que regeixen la magnitud de les seves derivades, i el pas d'integració necessari per a una simulació convergent sense allargar excessivament el temps de simulació. Una vegada actualitzats els estats, el sistema ja ha evolucionat i el temps de simulació s'avança un pas d'integració més. Llavors ja està tot llest per començar una la següent iteració i solucionar de nou la xarxa. Però abans poden introduir-se pertorbacions com a curtcircuits, caigudes de generació o desconnexions de línies que modifiquin la xarxa abans de ser solucionada i seguir amb la simulació.

7.4. Simulacions en PSS/E

Ja han estat presentats els elements que PSS/E utilitza per incorporar models dinàmics i el procés de simulació del programa. Amb el que s'ha exposat poden traduir-se els models de STATCOM i SVC dissenyats a llenguatge Fortran per a ser usats en PSS/E. Aquest procés s'ha fet adaptant al màxim els esquemes de control al que permet PSS/E, tot i així, ha estat necessari fer alguna modificació en el model de SVC. Els interruptors d'electrònica de potència del SVC no es modelen, ja que commuten a freqüències massa ràpides per els passos d'integració de les simulacions de xarxes elèctriques de potència i PSS/E treballa amb càlculs de flux de càrrega.

Sota aquestes consideracions, la millor aproximació admissible és que el SVC actuï com una susceptància variable. Per tant, s'assumeix que la consigna de susceptància s'assoleix de forma instantània i l'angle de dispar α i el nombre de TSC connectats n son variables de sortida sense cap efecte en la dinàmica del model. La figura 7.2 mostra com n es calcula igual

com s'ha dissenyat a l'inici mentre que la variable α es calcula amb un mètode iteratiu basat en la derivada de la funció que relaciona les variables d'entrada i sortida. S' actualitza la variable de la sortida (α) a partir de l'error entre l'entrada (B_{Leq}) i la funció entrada-sortida ($B_{Leq}(\alpha)$). La derivada d'aquesta funció divideix l'error trobat per obtenir la variació de la sortida.

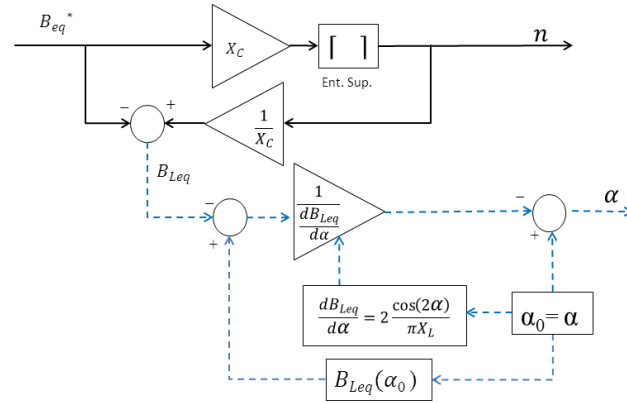


Figura 7.2: Esquema de càlcul de n i α per el model SVC de PSS/E

Un cop adaptats els models es pot procedir a compilar-los dins un escenari de PSS/E per a fer simulacions dinàmiques. Per a provar els models desenvolupats es crea una cas PSS/E d'una petita xarxa de proves, mostrada en la figura 7.3. Aquesta xarxa consta de dos busos de generació convencional (1 i 401) un bus de càrrega (301) i un bus (501) al que s'hi connecten en paral·lel un parc eòlic (503) i el FACTS a simular (502).

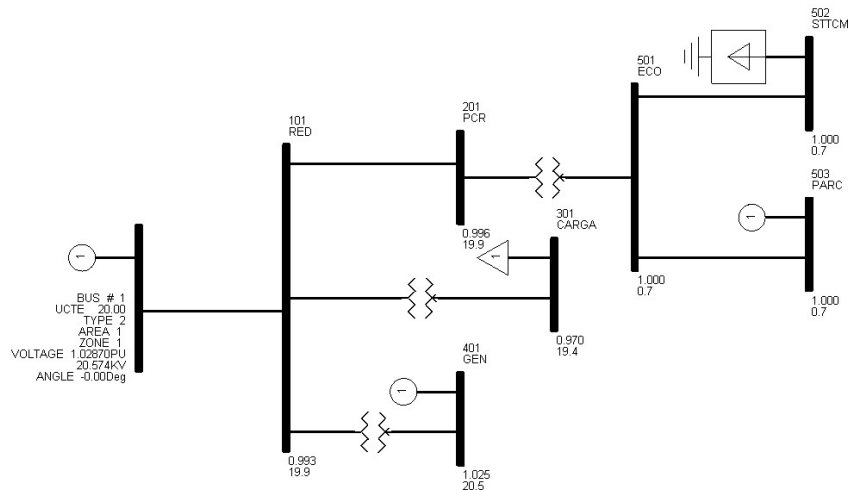


Figura 7.3: Xarxa de proves per a simular les models FACTS en PSS

En aquesta xarxa s'han realitzat simulacions amb els models dinàmics de FACTS de STAT-COM i SVC aplicant pertorbacions en la xarxa tal com permet PSS/E i realitzant canvis de consignes tot modificant les variables pertinents en funció del temps de simulació dins el codi Fortran.

7.4.1. Simulació del STATCOM

Simulació: Consignes de tensió amb STATCOM

- temps de simulació: 10s
- entrades: graó de tensió en el PCC fins a 1,02 p.u. en $t=1s$; graó de tensió del bus DC fins 0,9 p.u. des de $t=3s$ fins $t=5s$
- sortides: tensió al V_{ld} PCC, quadrat de tensió del bus DC E_{DC}^2 , Potència activa (P) i reactiva (Q) injectada. Resultats en la figura 7.4.

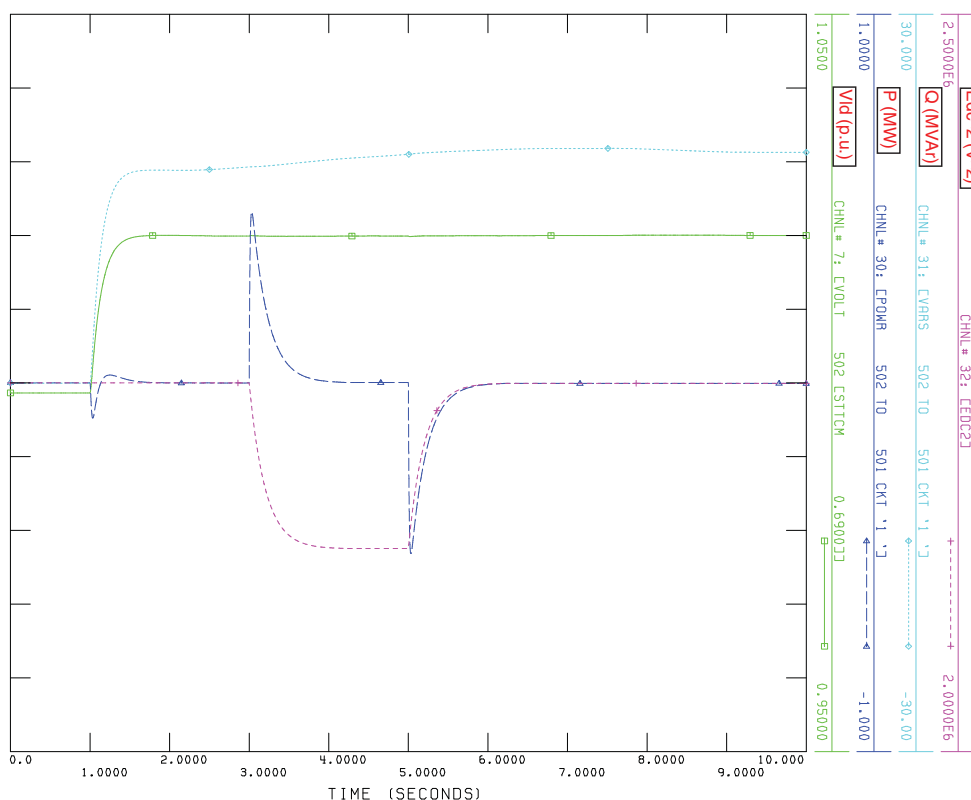


Figura 7.4: Resposta del STATCOM en PSS/E davant de graons de tensió

En la figura 7.4 s'observa com s'assoleixen les consignes de tensió en un temps aproximat de 1s, els canvis en els flux de potència corresponents, i és manté l'estabilitat al llarg de tota la simulació. La potència reactiva augmenta per incrementar el valor de la tensió al punt de connexió. Però la potència activa és nul·la si no hi ha cap transitori de tensió a la banda de corrent continua, com pertoca a la càrrega i descàrrega d'un condensador. També pot observar-se un petit acoblament entre potència activa i reactiva. El comportament del STATCOM és doncs, el desitjat.

Simulació: Sot de tensió amb STATCOM

- temps de simulació: 5s

- entrades: sot de tensió per curtcircuit en el bus 301 de la xarxa de proves des de $t=2s$ fins a $t=2,2s$
- sortides: tensió al V_{ld} PCC, quadrat de tensió del bus DC E_{DC}^2 , Potència activa (P) i reactiva (Q) injectada, consigna de potència reactiva (Q^*) i relació Q/S segons el P.O. 12.3. Resultats en la figura 7.5.

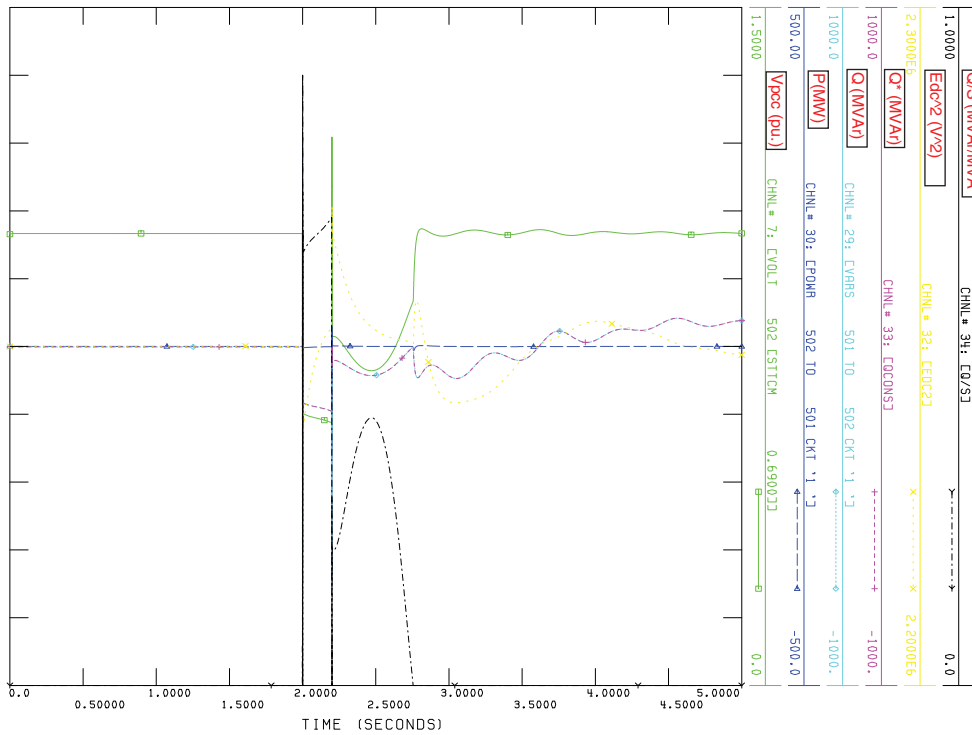


Figura 7.5: Resposta del STATCOM en PSS/E davant d'un sot de tensió

La tensió al PCC es recupera després del sot de tensió en la xarxa en un temps inferior a 1s tot i que apareix una oscil·lació d'esmoreïment lent però de poca amplitud. Durant el sot de tensió, l'aportació de potència reactiva del STATCOM aconsegueix mantenir la tensió per sobre de 0.5 p.u i compleix amb el P.O. 12.3. Comparant amb la figura 7.6, on la simulació no compta amb el model de STATCOM, s'observa una clara diferència en l'evolució del voltatge.

7.4.2. Simulació del SVC

Simulació: Consignes de tensió amb SVC

- temps de simulació: 7s
- entrades: graó de tensió en el PCC fins a 1,05 p.u. des de $t=2s$ fins a $t=4s$; graó de tensió en el PCC fins a 0,95 p.u. des de $t=4s$ fins a $t=6s$
- sortides: tensió al V_{ld} PCC, consigna de tensió al PCC V_{ld}^* , Potència reactiva (Q) injectada i consigna Q^* . Resultats en la figura 7.7.

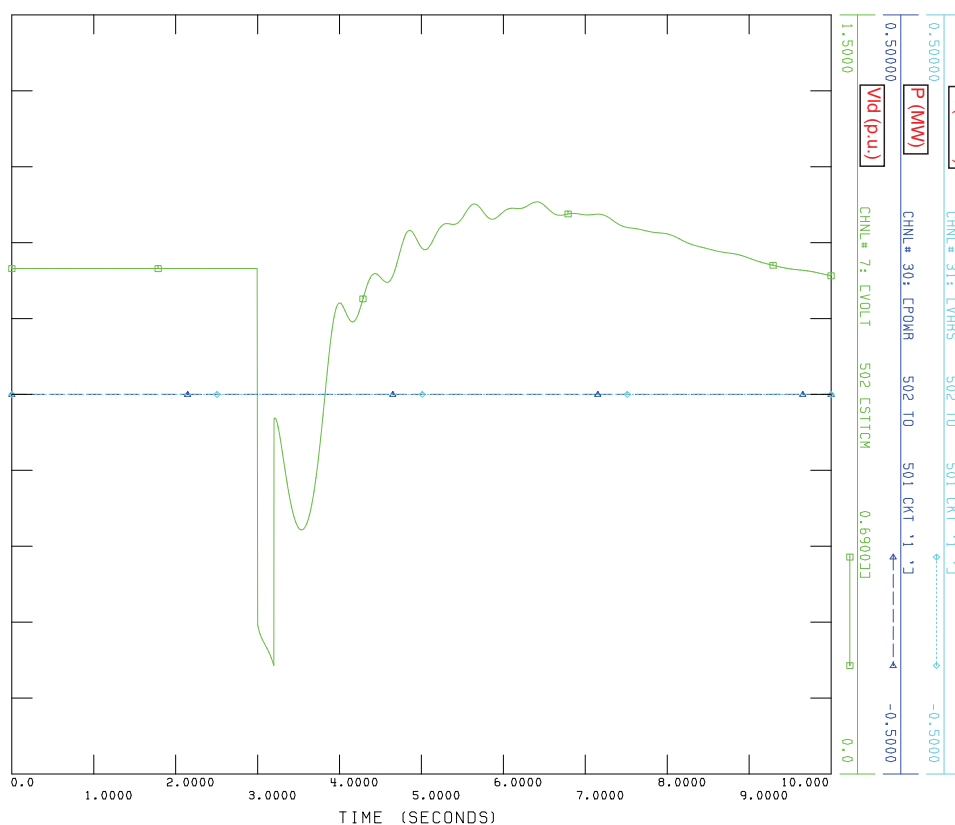


Figura 7.6: Resposta de la xarxa en PSS/E sense FACTS davant d'un sot de tensió

En els resultats de la simulació en la figura 7.7 s'observa com el SVC aconsegueix que la tensió al PCC sigui la consignada en un temps de resposta aproximat de 1s. La potència reactiva absorbida varia conseqüentment al nivell de tensió i segueix la seva consigna sense cap retard apreciable en el temps de resposta. Per tant es pot concloure que el SVC compleix satisfactòriament l'objectiu de regular la tensió. En canvi, pel que fa a un sot de tensió, la figura mostra com el SVC respon pitjor que el STATCOM, la tensió triga més a recuperar-se i pateix oscil·lacions considerables, ja que a tensions baixes el SVC és poc efectiu.

Simulació: Sot de tensió amb SVC

- temps de simulació: 10s
- entrades: sot de tensió per curtcircuit en el bus 301 de la xarxa de proves des de $t=2s$ fins a $t=2,2s$
- sortides: tensió al V_{ld} PCC, Potència activa reactiva (Q) injectada i consigna (Q^*) Resultats en la figura 7.8.

Susceptància equivalent, angle i connexió de TSC

- temps de simulació: de 1,95s a 2,3s

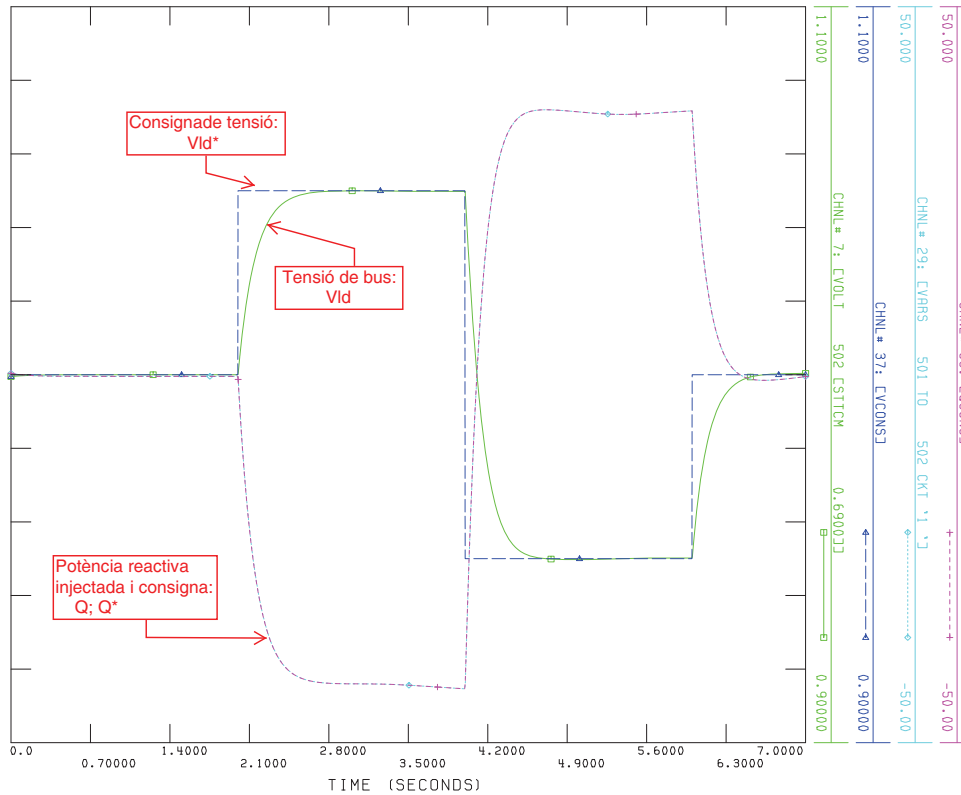


Figura 7.7: Resposta del SVC en PSS/E davant de graons de tensió

- entrades: graó de tensió en el PCC fins a 1,05 p.u. des de $t=2s$ fins a $t=4s$
- sortides: susceptància equivalent B_{eq} , angle de dispar del TCR α i nombre de TSC connectats n . Resultats en la figura 7.9.

Es reprèn la primera simulació del SVC, mostrada en la figura 7.7, en que s'han aplicat graons de tensió. S'observa en detall el temps de simulació del primer transitori per a comprovar que la susceptància equivalent evoluciona d'acord amb la potència reactiva i la tensió i que els càlculs d'angle de dispar i nombre de TSC connectats en cada instant és coherent. La figura 7.9 mostra com la susceptància segueix una resposta anàloga a la potència reactiva, i com per a intervals fixats de variació en la susceptància el nombre de TSC actius augmenta d'un en un, descrivint una senyal discreta. Al observar l'angle de dispar trobem que augmenta a mesura que augmenta la susceptància, seguint la funció 3.4. Quan es connecta un nou TSC l'angle té una caiguda instantània i es re-inicia, ja que el TCR ha de mantenir la mateixa susceptància però amb la capacitat del nou TSC afegida. També en els càlculs d'aquestes sortides el SVC respon de forma adequada.

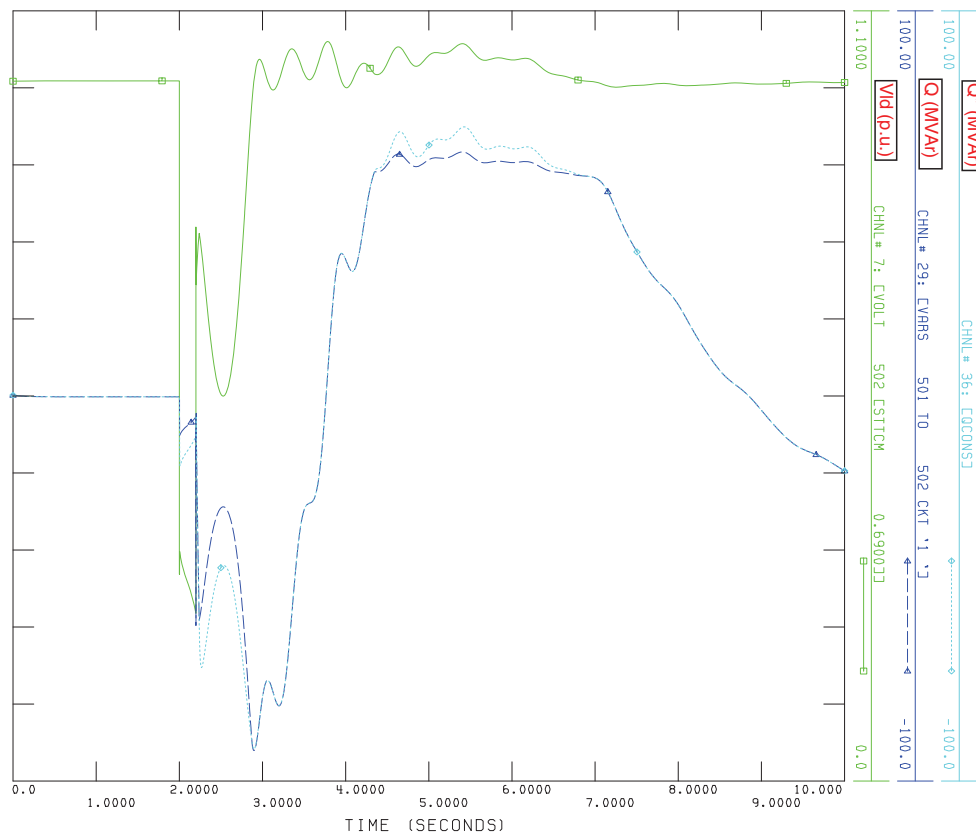


Figura 7.8: Resposta del SVC en PSS/E davant d'un sot de tensió

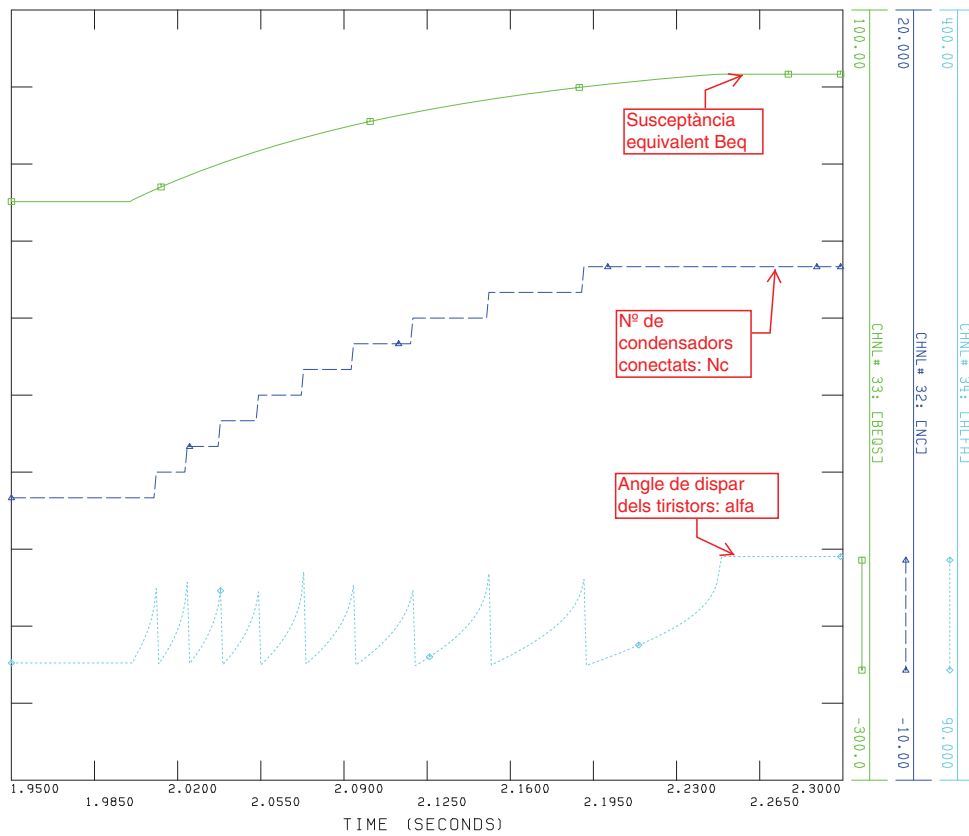


Figura 7.9: Detall de susceptància, angle i nombre de TSC del SVC en PSS/E

Conclusions

Aquest projecte té per objectiu principal crear models dinàmics de dispositius FACTS del tipus STATCOM i SVC per al programa de simulació de xarxes elèctriques PSS/E. Aquest objectiu s'ha complert satisfactòriament tot detallant-ne els procediments i resultats en aquesta memòria. Per a dur-lo a terme s'han realitzat les següents tasques:

- Estudi de l'estat de l'art de les tecnologies FACTS.
- Modelització dinàmica dels dispositius STATCOM i SVC.
- Disseny d'algoritmes de control per la regulació de voltatge i seguiment del P.O. 12.3 per ambdós sistemes
- Comprovació dels models i control mitjançant simulacions dinàmiques en *Matlab-Simulink*.
- Traducció dels models de STATCOM i SVC a llenguatge Fortran.
- Implementació i simulació dinàmica dels models en PSS/E

Els resultats de les simulacions en Matlab mostren que els controls dissenyats son adequats, fent que els sistemes modelats responguin de la manera desitjada. Els llaços de corrent del STATCOM i el llaç de susceptància del SVC permeten injectar la potència consignada. Els llaços de tensió també responen de forma adequada per a la regulació del voltatge del PCC, es generen les consignes de potència convenientes amb saturació que no implica cap retard en la resposta gràcies a la realimentació anti-windup. També s'ha acomplert satisfactòriament l'objectiu de seguir el *grid code* establert en el P.O. 12.3 sense que la transició entre modes d'operació sigui brusca amb transitoris de sobrepuig excessiu. La traducció dels models i els seus algoritmes de control s'ha dut a terme sense renunciar als sistemes dissenyats ni les seves prestacions. Les simulacions de PSS en una xarxa de proves mostren com la resposta dels FACTS implementats es manté de forma correcta.

Futurs treballs

Dins de l'àmbit dels FACTS, Aquest projecte pot servir de referència o primers passos per a les següents línies de treball:

- Ampliar els models presentats tenint en compte aspectes que han estat simplificats com la modelització dels components d'electrònica de potència (tiristors i IGBT) i la seva commutació així com una major aproximació a la realitat dels transformadors que tinguin en compte efectes com el de la saturació magnètica.

- estudiar la resposta del sistema per a diferents pertorbacions com sots de tensió asimètrics o variacions de freqüència.
- proposar i analitzar alternatives al control dels sistemes per millorar-ne les prestacions
- afegir el modelat de bateries o altres sistemes d'emmagatzemament d'energia en el bus DC del STATCOM per poder aportar potència activa i donar suport a la xarxa per a la regulació de freqüència i gestió de la disponibilitat energètica .
- desenvolupar models de FACTS més avançats com els UPFC, IPFC o la transmissió de corrent continua d'alt voltatge (HVDC)
- contrastar els resultats de les simulacions amb mesures del comportament dels sistemes reals.

Apèndix A

Pressupost

Aquest és un projecte de simulació i desenvolupament de software i per a la seva realització la infraestructura utilitzada ha estat una oficina

A.1. Pressupost dels models y simulació de FACTS per a PSS/E

El pressupost es desglossa en tres partides: hardware, software i mà s'obra. Els preus indicats en aquests capítols no contemplen el IVA, que s'aplica al agregar-los tots tres al final. S'atorga a aquest pressupost la validesa d'un mes a partir de la data de la seva firma.

A.1.1. Pressupost del hardware

La taula A.1 mostra el pressupost destinat als dispositius hardware utilitzats en el projecte.

Concepte	Preu/unitat	Unitats	Total
Ordenador HP Compaq dc7900	578,00 €	1	578,00 €
Monitor TFT Benq T902HDA	35,00 €	1	35,00 €
TOTAL			613,00 €

Taula A.1: Pressupost del hardware.

A.1.2. Pressupost del software

En la taula A.2 es desglossa el pressupost del software necessari per a la realització del projecte.

Concepte	Preu/unitat	Unitats	Total
MATLAB ®	6.000,00 €	1	6.000,00 €
PSS/E ®	10.000,00 €	1	10.000,00 €
TOTAL			16.000,00 €

Taula A.2: Pressupost del software.

A.1.3. Pressupost de la mà d'obra

En la taula A.3 s'indica el pressupost destinat a la mà de obra.

Concepte	Preu/hora	Nº de hores	Total
Diseny	35,00 €/h	170	5.950,00 €
Programació	35,00 €/h	250	8.750,00 €
Redacció	35,00 €/h	120	4.200,00 €
TOTAL		540	18.900,00 €

Taula A.3: Pressupost de la mà d' obra.

A.1.4. Suma per capítols

La taula A.4 recull els resultats dels anteriors apartats i mostra la suma final del pressupost.

Capítol	Preu
Pressupost del hardware	613,00 €
Pressupost del software	16.000,00 €
Pressupost de la mà d'obra	18.900,00 €
TOTAL (sin IVA)	35.513,00 €
IVA (18%)	6.392,34 €
TOTAL	41.905,34 €

Taula A.4: Suma per capítols.

Data: 26 d'octubre de 2011 **Firma:** Eric Boixeda Tamburini

Apèndix B

Impacte ambiental

Aquest annex exposa l'impacte sobre el medi ambient associat al disseny, fabricació, instal·lació i operació dels FACTS desenvolupats en aquest document. Si bé el projecte es centra en models de software de STATCOM i SVC i queda fora del seu abast l'anàlisi d'aspectes tècnics com dimensionat, materials o components, si que és convenient esmentar consideracions ambientals dels sistemes reals. Realitzar un anàlisi del cicle de vida d'aquests sistemes de forma acurada podria suposar elaborar tot un altre projecte per aquesta tasca, per això aquí es fa una primera aproximació a nivell qualitatiu. L'aplicació concreta en la que és fa l'anàlisi és la incorporació de FACTS en parcs eòlics com a sistema auxiliar per donar suport a la seva integració a la xarxa elèctrica.

B.1. Impacte del disseny i desenvolupament

Degut a que el present projecte és de modelització i desenvolupament de programari, l'únic aspecte en que finalment té una incidència sobre el medi ambient és en el disseny del sistema. Per a dur-lo a terme s'ha utilitzat com a única infraestructura una oficina amb el mobiliari corresponent, implicant en la utilització d'un espai urbà edificat, els seus serveis associats i el consum elèctric per a la seva il·luminació. Com a eines s'ha utilitzat principalment un ordinador amb el programari necessari. De forma secundària s'ha consumit una petita quantitat de paper per a fer esbossos, esquemes i anàlisis matemàtics que suposen un afegit poc significatiu a la tala d'arbres. El consum més destacable és l'elèctric, per alimentar la il·luminació de l'espai de treball i l'ordinador amb que s'ha desenvolupat el projecte. Considerant un factor d'emissió de 223 g de CO_2 per kWh elèctric consumit [1] i un temps d'ús de 540 hores, es poden quantificar les emissions de CO_2 associades a la realització d'aquest projecte com com es mostra en la taula B.1

Aparell	Potència (kW)	Consum elèctric (kWh)	Emissió de CO_2 (kg)
Ordinador	0,320 kW	172,8 kWh	38,53 kg
Làmpada fluorescent	0,015 kW	8,1 kWh	1,81 kg
TOTAL	0,335 kW	180,9 kWh	40,34 kg

Taula B.1: Càlcul d'emissions de CO_2 per als consums elèctrics

B.2. Impacte de la fabricació i instal·lació

Quantificar l'impacte ambiental de la fabricació de tots els components que conformen tant un STATCOM com un SVC és extens i complex. L'extracció i tractament o reciclatge dels metalls com el coure del cablejat o el ferro del nucli del transformador o les aletes de refrigeració suposen un elevat consum energètic en relació al seu pes i requereixen de processos industrials que emeten contaminants a l'atmosfera. A més la compacitat i diversitat de materials dels dispositius d'electrònica de potència com IGBT i tiristors fa que el seu reciclatge sigui complex.

Pel que fa a la instal·lació cal tenir en compte l'espai que ocupen els diversos components dels FACTS i la construcció de l'edificació que els ha d'albergar, tot i que un parc eòlic ja comptarà amb l'edificació per al transformador per a connectar-se a la xarxa. Aquest espai edificat es veurà ampliat per el FACTS però el seu impacte visual serà molt petit en comparació al que tenen els aerogeneradors, de grans dimensions i situats en cims de muntanyes i turons

B.3. Impacte de l'operació

L'ús de FACTS en general, i per a parcs eòlics en particular, aporta beneficis al medi ambient, tret de la calor emesa per les pèrdues per efecte Joule en els components. Al regular la tensió i millorar el factor de potència, les línies de transmissió elèctrica queden menys saturades i amb menors caigudes de tensió, el que significa que patiran menys pèrdues i podrà transportar-se la mateixa potència amb una secció de cable menor, estalviant el material que això comporta. De manera més indirecta, disposar de tecnologies FACTS en parcs eòlics fa que puguin donar suport a la xarxa complint amb el P.O. 12.3, de manera que el sistema elèctric admeti més energia eòlica i cobreixi la demanda amb menors emissions de CO_2 .

Apèndix C

Transformades de Clarke y Park

C.1. Transformada de Clarke

La teoria de potència instantània en la referència $\alpha\beta 0$, que es descriu més endavant, es basa a transformar els valors instantanis de les quantitats trifàsiques en referència abc a la referència ortogonal $\alpha\beta 0$.

Aquesta transformada, coneguda com Transformada de Clarke, es defineix com

$$\begin{aligned}
 [x_{\alpha\beta 0}] &= [T_{\alpha\beta 0}][x_{abc}] \\
 \begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \\ x_0 \end{bmatrix} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{C.1}$$

y la seva antitransformada per a poder desfer el canvi és:

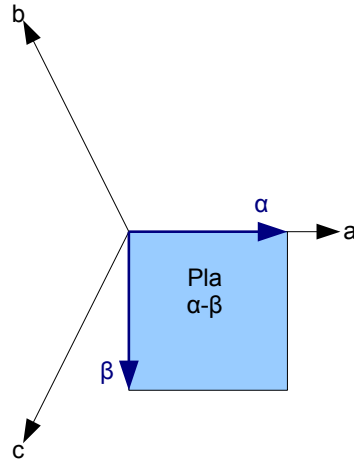
$$\begin{aligned}
 [x_{abc}] &= [T_{\alpha\beta 0}^{-1}][x_{\alpha\beta 0}] \\
 \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \\ x_0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{C.2}$$

on x_a , x_b y x_c son els valors de tensió o intensitat en la referència abc i x_{α} , x_{β} i x_0 son els obtinguts, després de la transformació, en la referència $\alpha\beta 0$.

La transformada de Clarke també pot ser representada com una transformació geomètrica, com es veu en la figura C.1.

Potència instantània en la referència $\alpha\beta 0$

Les tensions y corrents d'un sistema equilibrat de tres fases es poden expressar com,

Figura C.1: Representació del pla $\alpha\beta$

$$\begin{aligned}
 X_a(t) &= \sqrt{2}X \cos(\omega t + \phi) \\
 X_b(t) &= \sqrt{2}X \cos(\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}) \\
 X_c(t) &= \sqrt{2}X \cos(\omega t + \phi + \frac{2\pi}{3})
 \end{aligned} \tag{C.3}$$

i aplicant la transformada de clarke C.1 s' obté:

$$\begin{aligned}
 X_\alpha(t) &= \sqrt{2}X \cos(\omega t + \phi) \\
 X_\beta(t) &= -\sqrt{2}X \sin(\omega t + \phi) \\
 X_0(t) &= 0
 \end{aligned} \tag{C.4}$$

on s'aprecia que $X_0(t) = 0$, al ser un sistema compensat. Definint els fasors de tensió y corrent com,

$$\underline{V}^{\alpha\beta} = \frac{v_\alpha - jv_\beta}{\text{sqrt}2} \tag{C.5}$$

$$\underline{I}^{\alpha\beta} = \frac{i_\alpha - ji_\beta}{\text{sqrt}2} \tag{C.6}$$

es pot obtenir l'expressió de la potència per a $\alpha\beta 0$ a partir de la expressió de potència per a tres fases en abc,

$$\underline{S} = \underline{P} + j\underline{Q} = 3\underline{V}^{\alpha\beta} \underline{I}^{\alpha\beta*} = 3 \left(\frac{v_\alpha - jv_\beta}{\text{sqrt}2} \right) \left(\frac{i_\alpha + ji_\beta}{\text{sqrt}2} \right) \tag{C.7}$$

Desenvolupant C.7, s'obtenen les potències activa (C.8) i reactiva (C.9) instantànies en funció de les tensions y corrents en la referència $\alpha\beta 0$.

$$P = \frac{3}{2}(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \quad (\text{C.8})$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha) \quad (\text{C.9})$$

C.2. Transformada de Park

La base $\alpha\beta 0$, obtinguda per la transformada de Clarke, s'utilitza en multitud d'aplicacions però segueix tenint naturalesa oscil·latòria com la abc. D'altra banda, per a aplicacions tals com el disseny de controladors el realment útil és poder treballar amb valors constants independents del temps. Això s'aconsegueix mitjançant la transformada de Park a un sistema de referència síncron.

Aquesta transformada ve donada per,

$$\begin{aligned} [x_{qd0}] &= [T_{qd0}][x_{abc}] \\ \begin{bmatrix} x_q \\ x_d \\ x_0 \end{bmatrix} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{C.10})$$

i la seva antitransformada, per a poder desfer el canvi, és

$$\begin{aligned} [x_{qd0}] &= [T_{qd0}^{-1}][x_{abc}] \\ \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} &= \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_q \\ x_d \\ x_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{C.11})$$

on x_{abc} és un vector amb els valors de les tres fases a la base abc, x_{qd0} és un vector amb els valors en la base dq0 i la matriu de transformació és funció d'un angle θ que correctament escollit permet obtenir quantitats constants per als valors en referència dq0.

La transformada de Park es pot representar com a transformació geomètrica, C.2, sent aquesta la combinació de la transformada de Clarke i una rotació.

Potència instantània en la referència dq0

L'angle θ , el qual correspon a l'angle de tensió elèctrica C.12, és l'encarregat que la transformada de Park produeixi uns valors constants en l'estat estacionari. Per tant, transformant tensions i corrents a la base dq0 s'obtenen els següents fasors:

$$\Theta = \omega t + \phi_0 \quad (\text{C.12})$$

$$\underline{V}^{qd} = \frac{v_q - jv_d}{\text{sqrt}2} \quad (\text{C.13})$$

$$\underline{I}^{qd} = \frac{i_q - ji_d}{\text{sqrt}2} \quad (\text{C.14})$$

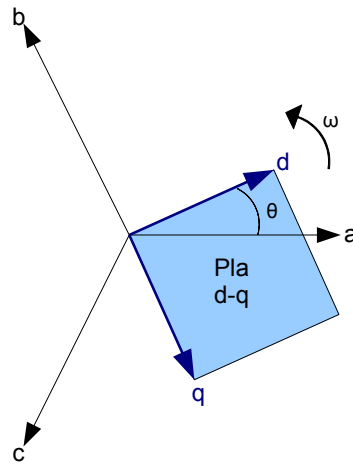


Figura C.2: Representació del pla dq

de la mateixa manera que en el cas de $\alpha\beta 0$, es pot obtenir l'expressió de la potència en dq0 a partir de l'expressió de potència per a tres fases en abc,

$$\underline{S} = \underline{P} + j\underline{Q} = 3\underline{V}^{qd} \underline{I}^{qd*} = 3 \left(\frac{v_q - jv_d}{\text{sqrt}2} \right) \left(\frac{i_q + ji_d}{\text{sqrt}2} \right) \quad (\text{C.15})$$

Desenvolupant C.15, s'obtenen les potències activa (P) i reactiva (Q) instantànies en funció de les tensions i corrents en la referència dq0.

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2} (v_q i_q + v_d i_d) \\ Q &= \frac{3}{2} (v_q i_d - v_d i_q) \end{aligned} \quad (\text{C.16})$$

Apèndix D

Fulls de dades dels models PSS/E

En aquest apartat es presenta el full de dades dels models dinàmics de FACTS per a PSS/E. S'inclouen els estats, constants i variables per als diferents laços de control i la modelització interna de bus DC i circuits elèctrics RL. D'aquesta manera s'expliquen els elements d'interacció amb PSS/E per a entendre la transcripció dels models a codi Fortran. Per a cada bloc dels models.

D.1. STATCOM

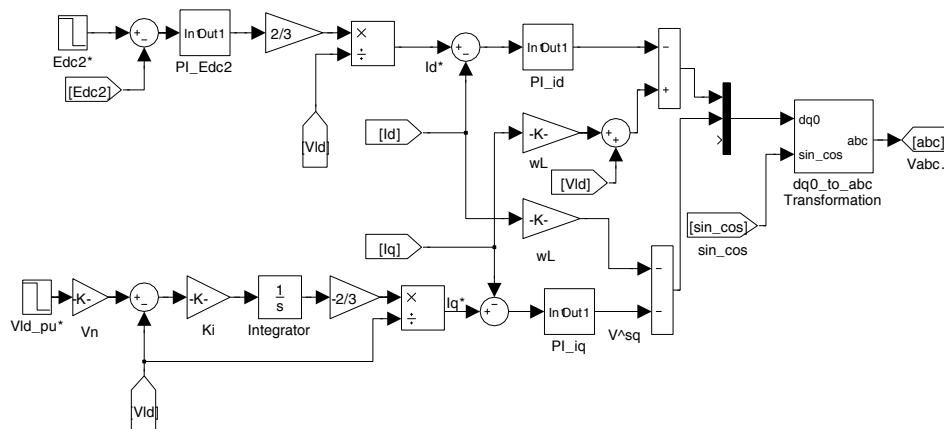


Figura D.1: Esquema de control general del STATCOM

D.1.1. Eix q

Regulació de tensió

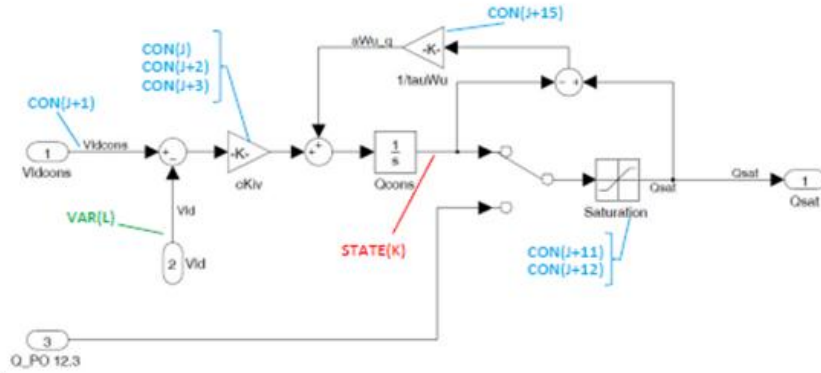


Figura D.2: Esquema de control de tensió del STATCOM amb dades de PSS/E

STATE's	Nom	Descripció
K	Qcons	Consigna de potència reactiva
VAR's		
L	Vld	Tensió al punt de connexió del STATCOM
L+10	aWu_q	Correcció anti-windup en l'integrador de Q.
CON's		
J	Vn	Tensió nominal al punt de connexió del STATCOM
J+1	Vldcons	Consigna de tensió al punt de connexió del STATCOM
J+2	X	Inductància equivalent de la xarxa al punt de connexió
J+3	tauV	Constant de temps del control de tensió
J+11	cQmax	Potència reactiva màxima
J+12	cQmin	Potència reactiva mínima
J+15	tauWu	Constant de temps de seguiment anti-windup

Taula D.1: Dades per a PSS/E del control de tensió al PCC del STATCOM.

Seguiment del P.O. 12.3

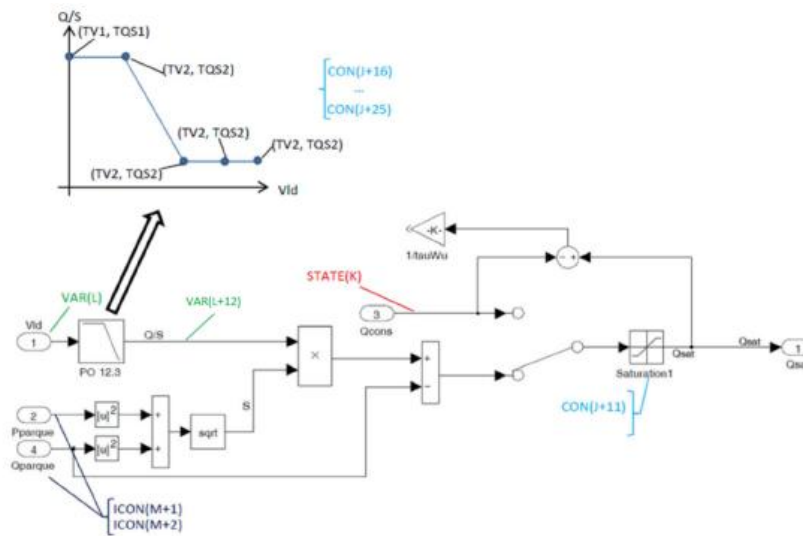


Figura D.3: Esquema de seguiment del P.O. 12.3 del STATCOM amb dades de PSS/E

STATE's	Nom	Descripció
K	Qcons	Consigna de potència reactiva
VAR's		
L	Vld	Tensió al punt de connexió del STATCOM
L+12	QS	coeficient de reactiva Q/S
CON's		
J	Vn	Tensió nominal al bus de connexió del STATCOM
J+11	cQmax	Potència reactiva màxima
J+12	cQmin	Potència reactiva mínima
J+16...J+20	TV1...TV5	voltatge dels punts 1 a 5 del P.O. 12.3
J+21...J+25	TQS1...TQS5	relació Q/S del punt 1 a 5 del P.O. 12.3
CON's		
M+1	IBparc	Nº bus del parc que regula el STATCOM
M+2	Iparc	Nº d'identificador del generador del parc

Taula D.2: Dades per a PSS/E del seguiment del P.O 12.3 del STATCOM.

Llaç de corrent

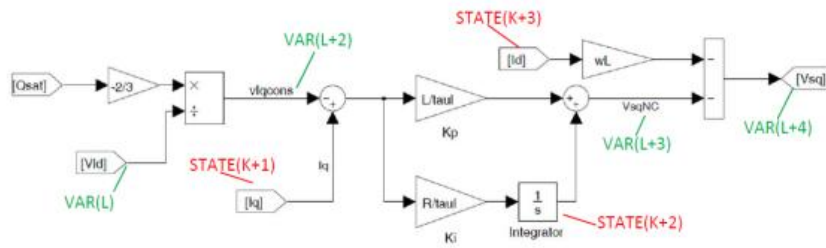


Figura D.4: Esquema de control de corrent en eix q del STATCOM amb dades de PSS/E

STATE's	Nom	Descripció
K+1	sIq	Corrent en l'eix q
K+2	sIntIq	Integrador PI de control de corrent en l'eix q
K+3	sId	Corrent en l'eix d
VAR's		
L	Vld	Tensió al punt de connexió del STATCOM
L+2	vIqcons	Consigna de corrent en l'eix q
L+3	VsqNC	Tensió de font eix q no compensada
L+4	Vsq	Tensió de font eix q
CON's		
J+4	cR	Resistència de la línia RL
J+5	cL	Inductància de la línia RL
J+6	tauI	Constant de temps del control de corrent

Taula D.3: Dades per a PSS/E del control de corrent en eix q del STATCOM.

Circuit RL equivalent en eix q

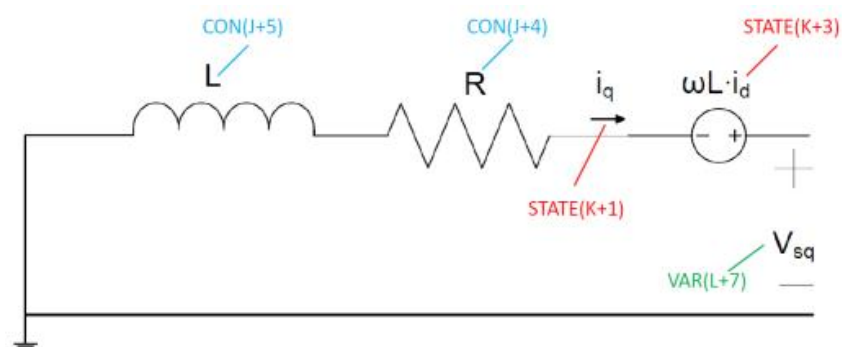


Figura D.5: Esquema del model intern de circuit RL en eix q del STATCOM amb dades de PSS/E

STATE's	Nom	Descripció
K+1	sIq	Corrent en eix q
K+3	sId	Corrent en eix d
VAR's		
L+4	Vsq	Tensió de font eix q
CON's		
J+4	cR	Resistència de la línia RL
J+5	cL	Inductància de la línia RL

Taula D.4: Dades per a PSS/E del circuit RL en eix q del STATCOM.

D.1.2. Eix d

Regulació de tensió DC

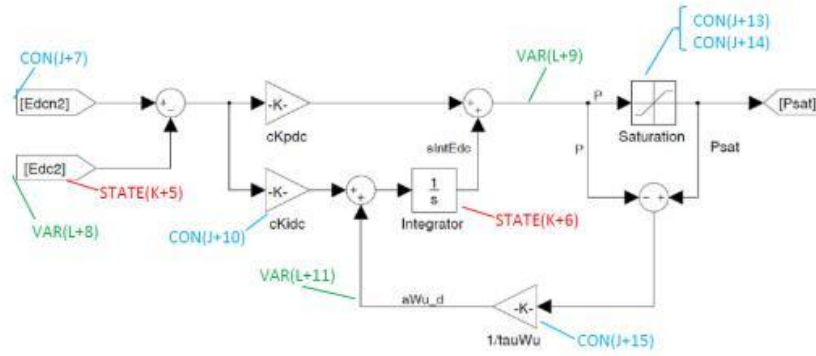


Figura D.6: Esquema de control de tensió del STATCOM amb dades de PSS/E

STATE's	Nom	Descripció
K+5	sEdc2	Corrent en eix q
K+6	sIntEde	Corrent en eix d

VAR's	Nom	Descripció
L+8	Ede	Tensió de bus DC
L+9	P	Consigna de potència activa
L+11	aWu _d	Correcció anti-windup en l' integrador del PI de P. Eix d

CON's	Nom	Descripció
J+7	Ede _n	Tensió de bus DC nominal
J+8	C	Capacitat del condensador DC
J+9	taudc	Constant de temps del control de tensió DC
J+10	Kidc	Constant integradora de control de tensió DC
J+13	cPmax	Potència activa en eix d màxima
J+14	cPmin	Potència activa en eix d mínima
J+15	tauWu	Constant de temps de seguiment anti-windup

Taula D.5: Dades per a PSS/E del control de tensió al PCC del STATCOM.

Llaç de corrent

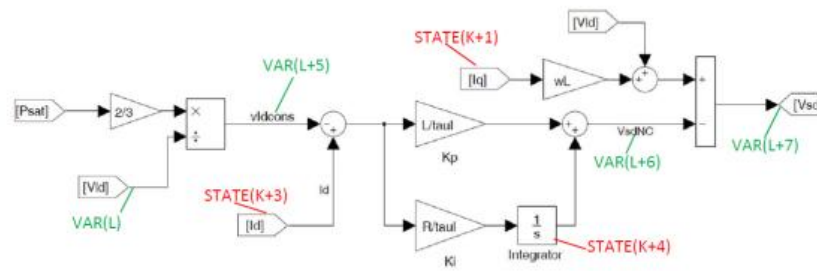


Figura D.7: Esquema de control de corrent en eix d del STATCOM amb dades de PSS/E

STATE's	Nom	Descripció
K+1	sIq	Corrent en eix q
K+3	sId	Corrent en eix d
K+4	sIntId	Integrador PI de control de corrent id
VAR's		
L	Vld	Tensió al punt de connexió del STATCOM
L+5	vIdcons	Consigna de corrent eix d
L+6	VsdNC	Tensió de font eix d no compensada
L+7	Vsd	Tensió de font eix d
CON's		
J+4	cR	Resistència de la línia RL
J+5	cL	Inductància de la línia RL
J+6	tauI	Constant de temps del control de corrent

Taula D.6: Dades per a PSS/E del control de corrent en eix d del STATCOM.

Circuit RL equivalent en eix d

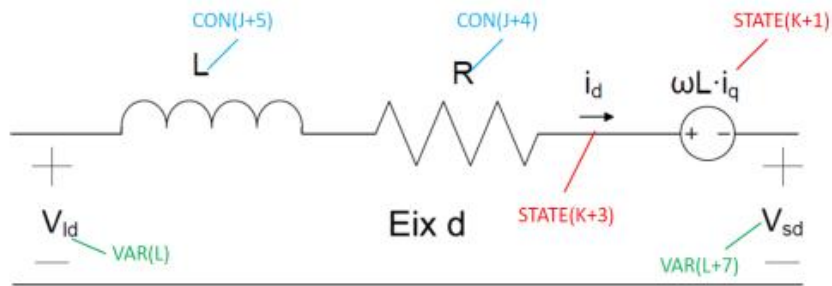


Figura D.8: Esquema del model intern de circuit RL en eix d del STATCOM amb dades de PSS/E

STATE's	Nom	Descripció
K+1	sIq	Corrent en eix q
K+3	sId	Corrent en eix d
VAR's		
L	Vld	Tensió al punt de connexió del STATCOM
L+7	Vsd	Tensió de font eix d
CON's		
J+4	cR	Resistència de la línia RL
J+5	cL	Inductància de la línia RL

Taula D.7: Dades per a PSS/E del circuit RL en eix d del STATCOM.

Bus de corrent continua

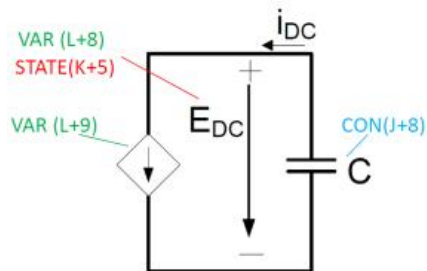


Figura D.9: Esquema del model intern de bus DC del STATCOM amb dades de PSS/E

STATE's	Nom	Descripció
K+5	sEdc2	Tensió de bus DC al quadrat
VAR's		
L+8	Edc	Tensió de bus DC
L+9	P	Consigna de potència activa
CON's		
J+7	Edcn	Tensió de bus DC nominal
J+8	C	Capacitat del condensador del bus DC

Taula D.8: Dades per a PSS/E del bus DC eix d del STATCOM.

D.2. SVC

Regulació de tensió

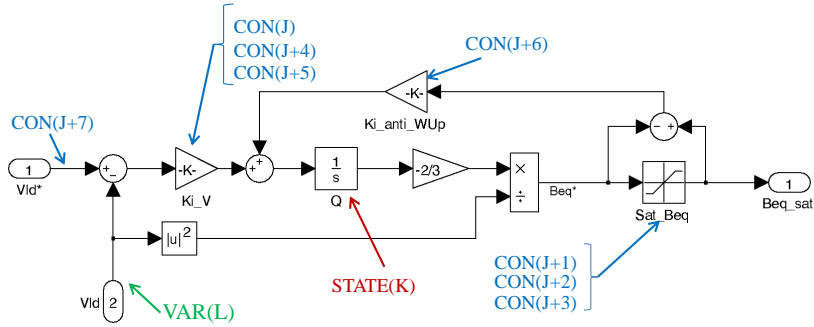


Figura D.10: Esquema de control de tensió del SVC amb dades de PSS/E

STATE's	Nom	Descripció
K	Qcons	Consigna de potència reactiva
VAR's		
L	Vld	Tensió al punt de connexió del SVC
L+10	aWu _q	Correcció anti-windup en l'integrador de Q.
CON's		
J	Vn	Tensió nominal al punt de connexió del SVC
J+1	Xl	Inductància de la bobina del TCR
J+2	Xc	capacitatde un condensador d'un TSC
J+3	cNmax	Nombre màxim de TSC del SVC
J+4	Xth	Inductància equivalent de la xarxa al punt de connexió
J+5	tauV	Constant de temps del control de tensió
J+6	tauWu	Constant de temps de seguiment anti-windup
J+7	Vldcons	Consigna de tensió al punt de connexió del SVC

Taula D.9: Dades per a PSS/E del control de tensió al PCC del SVC.

Llaç de susceptància

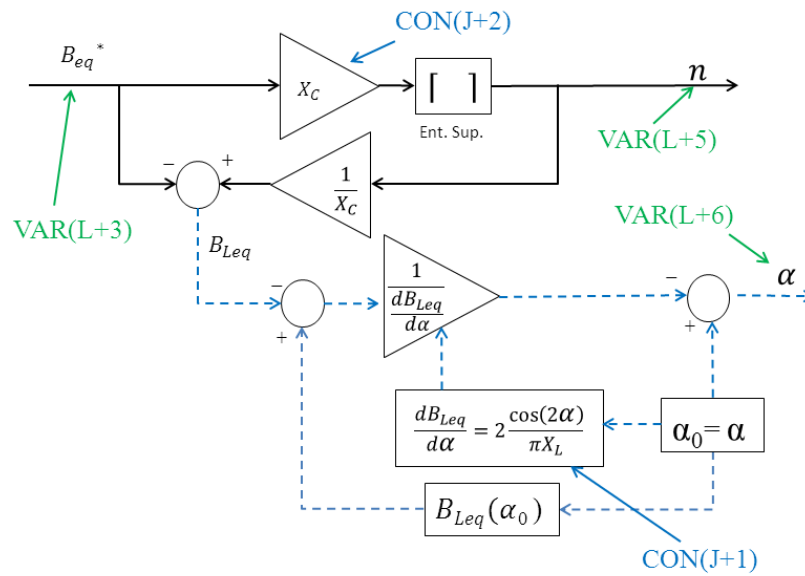


Figura D.11: Esquema de control del llaç de susceptància del SVC amb dades de PSS/E

VAR's		
L+4	Beq	Susceptància equivalent del SVC
L+5	vNc	nombre de TSC connectats
L+6	alfa	angle de dispar dels tiristors del TCR

CON's		
J+1	Xl	Inductància de la bobina del TCR
J+2	Xc	capacitatde un condensador d'un TSC

Taula D.10: Dades per a PSS/E del llaç de susceptància del SVC.

Glossari

Símbols

V_d	Voltatge al punt de connexió comuna entre el dispositiu FACTS i la línia elèctrica de xarxa
V_{sd}	Component en eix d del Voltatge de font del convertidor del STATCOM
V_{sq}	Component en eix q del Voltatge de font del convertidor del STATCOM
E_{DC}	Tensió del bus de corrent contínua del STATCOM
i_d	Component en eix d de la corrent a través del STATCOM
i_q	Component en eix q de la corrent a través del STATCOM
i_{DC}	Corrent del bus de corrent contínua del STATCOM
X_{eq}	Reactància equivalent del SVC
B_{eq}	Susceptància equivalent del SVC
B_{Leq}	Susceptància equivalent del TCR del SVC
B_C	Susceptància d'un dels TSC del SVC
n	Nombre de TSC del SVC connectats
P	Potència activa
Q	Potència reactiva
\underline{S}	Potència aparent
R	Resistència elèctrica
L	Inductància d'una bobina
C	Capacitat d'un condensador
V_{th}	Voltatge de l'equivalent Thevenin de la xarxa elèctrica
X_{th}	Reactància de l'equivalent Thevenin de la xarxa elèctrica

Acrònims

FACTS	<i>Flexible AC Transmission System</i> , Sistema de transmissió flexible de corrent alterna
VSC	<i>Voltage Source Converter</i> , Convertidor de font de tensió
STATCOM	<i>STATIC COMPensator</i> , Compensador estàtic
SVC	<i>Static VAR Compensator</i> , Compensador de VAR estàtic
PCC	Punt de Connexió Comuna
AC	<i>Alternating Current</i> , corrent alterna
DC	<i>Direct Current</i> , corrent continua
TCR	<i>Thyristor Controlled Reactor</i> , inductància controlada per tiristors
TSC	<i>Thyristor Switched Capacitor</i> , capacitància commutada per tiristors
TSSC	<i>Thyristor Switched Series Capacitor</i> , capacitància sèrie commutada per tiristors
TCSC	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i> , capacitància sèrie controlada per tiristors
SSSC	<i>Static Synchronous Series Compensator</i> , compensador estàtic síncron en sèrie
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller</i> , controlador unificat de flux de potència
IPFC	<i>Interline Power Flow Controller</i> , controlador de flux de potència entre línies
HVDC	<i>High Voltage DC</i> , transmissió de corrent contínua a alt voltatge

Bibliografia

- [1] Red Eléctrica Española. Informe del sistema eléctrico en 2010. 2011. [13](#), [75](#)
- [2] José Luis Olabarrieta Rubio. Aplicación de los dispositivos facts en generadores eólicos. *Técnica industrial* 276, 2008. [13](#)
- [3] Andreas Sumper Marçal Mora, Oriol Gomis. Facts: Felxible ac transmission systems. Technical report, CITCEA-UPC, 2009. [17](#), [27](#)
- [4] M. Ermisb H.F. Bilgin. Current source converter based statcom: Operating principles, design and field performance. *Elsevier Electric Power Systems Research.*, 2010. [26](#)
- [5] G. Andersson G. Glanzmann. Using facts devices to resolve congestions in transmission grids. *IEEE.*, 2007. [31](#)
- [6] Oriol Gomis-Bellmunt Agustí Egea-Alvarez, Adrià Junyent-Ferré. Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems. 2009. [36](#)
- [7] *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, 2003. [37](#)
- [8] Mikel de Prada. Modelización dinámica y control de un aerogenerador de velocidad variable con una máquina de inducción doblemente alimentada en pss/e. Master's thesis, ETSEIB UPC, 2010. [39](#)
- [9] J. Van den Keybus A. Woyte J. Driesen K. De Brabandere, B. Bolsens and R. Belmans. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. *IEEE*, 2004. [40](#)
- [10] Ministerio de Indústria Comercio y Turismo. P.o. 12.3. requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas. *BOE 254 24/10/2006*. [41](#)
- [11] *PSS/E 30.1 Program Application Guide*. [59](#)