



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOONA LEINONEN
ALISYNKRONISET VÄRÄHTELYT VERKKOON KYTKETYISSÄ
TUULIVOIMALOISSA

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Assistant Professor Tuomas Messo

TIIVISTELMÄ

JOONA LEINONEN: Alisynkroniset värähtelyt verkkoon kytketyissä tuulivoimaloissa

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 25 sivua, 0 liitesivua

Syyskuu 2017

Sähkötekniikan tekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tehoelektroniikka

Tarkastaja: Assistant Professor Tuomas Messo

Avainsanat: tuulivoima, sarjakompensaatio, SSR, SSCI SSTI, TCSC

Lisääntynyt tuulivoiman kapasiteetin kasvu vaatii siirtoverkoilta enemmän. Siirtoverkon kapasiteettia nostetaan tyypillisesti sarjaan kytkettyjen kondensaattoreiden avulla. Sarjakondensaattoreiden on kuitenkin havaittu aiheuttavan alisynkronisia värähtelyjä tuulivoimalan generaattorin induktiivisten osien kanssa.

Alisynkroniset värähtelyt voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: alisynkroniseen resonanssiin, alisynkroniseen säädön vuorovaikutukseen ja alisynkroniseen vääntävään vuorovaikutukseen. Alisynkroninen resonanssi voidaan jakaa vielä kolmeen kategoriaan: epätahtigeneraattorivaikutukseen, vääntävään vuorovaikutukseen ja vääntävään vahvistukseen. Alisynkroninen resonanssi on sähköverkon ja turbiini-generaattoriakselin välistä vuorovaikutusta, alisynkroninen säädön vuorovaikutus on sähköverkon ja tehoelektroniikkalaitteiden välistä vuorovaikutusta, ja alisynkroninen vääntävä vuorovaikutus on tehoelektroniikkalaitteiden ja turbiini-generaattoriakselin välistä vuorovaikutusta.

Ensimmäinen alisynkroniseen resonanssiin liittyvä onnettomuus tuulivoimaloissa sattui 22. elokuuta 2009 Texasissa. Tätä ennen uskottiin, että tuulivoimalat ovat immuuneja alisynkronisille värähtelyille. Alisynkronista resonanssia voidaan havaita muun muassa taajuuskannauksella, jota tässä työssä myös käsitellään. Alisynkronisia värähtelyjä vastaan on kehitelty monia suodatusmenetelmiä. Suodatukseen voidaan käyttää muun muassa FACTS-laitteita, erilaisia tuulivoimalan konvertterien säätömenetelmiä ja esimerkiksi alisynkronisen taajuuden releitä.

Tässä työssä esitellään FACTS-laitteisiin kuuluvaa tyristoriohjattua sarjakondensaattoriparistoa alisynkronisen resonanssin suodatukseen. Tyristoriohjatun sarjakondensaattoripariston on todettu pystyvän suodattamaan epätahtigeneraattorivaikutusta ja vääntävää vuorovaikutusta.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TUULIVOIMA	2
2.1	Tuulen teho.....	2
2.2	Tuulivoimalatyypit	3
3.	ALISYNKRONINEN VÄRÄHTELY.....	6
3.1	Alisynkroninen resonanssi	6
3.1.1	Epätahtigeneraattorivaikutus.....	7
3.1.2	Vääntävä vuorovaikutus.....	9
3.1.3	Vääntävä vahvistus	12
3.2	Alisynkroninen säädön vuorovaikutus	12
3.3	Alisynkroninen vääntävä vuorovaikutus	13
3.4	Taajuusskannaus.....	13
4.	ALISYNKRONISEN RESONANSSIN SUODATUS.....	16
4.1	Tyristorihjattu sarjakondensaattoriparisto.....	17
5.	YHTEENVETO	23
	LÄHTEET.....	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

α	Tyristorin liipaisukulma
δ_i	Massan särmäinen kaltevuus
ρ	Tiheys
ω_b	Perustaajuus
$\bar{\omega}_e$	Dq-akselin pyörimisnopeus
$\Delta\omega_i$	Massan pyörimisnopeuden muutos
ω_t	Turbiinin pyörimisnopeus
A	Pinta-ala
A_{Tline}	Siirtoverkon systeemimatriisi
B_{Tline}	Siirtoverkon sisäänmenomatriisi
C_g	Generaattorin kapasitanssi
D_i	Massan vaimennuskerroin
E_{Bd}	Kiskon jännitteen d-komponentti
E_{Bq}	Kiskon jännitteen q-komponentti
f_n	Verkon nimellistaajuus
f_r	Resonanssitaajuus
f_m	Generaattorin pyörimisnopeus
H_i	Yksittäisen massan hitausmomentti
i_{CT}	TCSC:n kondensaattorin virta
i_{d}	Siirtoverkon d-komponentin virta
i_L	Vaihevirta
i_{LT}	TCSC:n kelan virta
i_{LTd}	TCSC:n kelan d-komponentin virta
i_{LTq}	TCSC:n kelan q-komponentin virta
i_{tq}	Siirtoverkon q-komponentin virta
$K_{i,j}$	Kahden massan välisen akselin jäykkyys
L_r	Roottorin induktanssi
L_s	Staattorin induktanssi
L_m	Magnetointi-induktanssi
L_t	Muuntajan induktanssi
L	Siirtolinjan induktanssi
R_{ef}	Efektiivinen resistanssi
R_r	Roottorin resistanssi
R_s	Staattorin resistanssi
R_{line}	Siirtolinjan resistanssi
$R_{r,eq}$	Roottorin ekvivalenttinen resistanssi
s	Jättämä
T_e	Sähköinen momentti
T_i	Akselin hitausmomentti
$T_{t,g}$	Kahden massan välinen momentti
U_{Tline}	Siirtoverkon sisäänmenomuuttujien vektori
v	Nopeus
v_{CT}	TCSC:n kondensaattorin jännite
v_{CTd}	TCSC:n jännitteen d-komponentti
v_{CTq}	TCSC:n jännitteen q-komponentti

V_s	Generaattorin napajännite
v_{ds}	Staattorin jännitteen d-komponentti
v_{qs}	Staattorin jännitteen q-komponentti
P_{ilma}	Ilmavirtauksen teho
X_{CT}	TCSC:n kondensaattorin reaktanssi
X_{ef}	Efektiivinen reaktanssi
X_L	Siirtolinjan reaktanssi
X_{LT}	TCSC:n kelan reaktanssi
X_{Tline}	Siirtoverkon tilamuuttujien vektori
$x_{TCSC}(\alpha)$	TCSC:n tuottama sarjakompensaatio
Z	Impedanssi
DFIG	Double fed induction generator
FACTS	Flexible AC transmission system
GCSC	
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
SCIG	Squirrel cage induction generator
SCV	Static var compensator, staattinen loistehokompensaattori
SSO	Sub-synchronous oscillation, alisyntkroninen värähtely
SSR	Sub-synchronous resonance, alisyntkroninen resonanssi
SSCI	Sub-synchronous control interaction, alisyntkroninen säädön vuorovaikutus
SSSC	Static synchronous series capacitor
SSTI	Sub-synchronous torsional interaction, alisyntkroninen vääntävä vuorovaikutus
STATCOM	Static synchronous compensator
TA	Torsional amplification, vääntävä vahvistus
TCSC	Thyristor controlled series capacitor, tyristoriohjattu sarjakondensaattoriparisto
TCR	Thyristor-controlled reactor
TI	Torsional interaction, vääntävä vuorovaikutus
UPFC	Unified power flow converter
WRIG	Wound rotor induction generator
WWEA	World Wind Energy Association

1. JOHDANTO

Energiantuotanto fossiilisia polttoaineita käyttämällä lisää hiilidioksidin määrää ilmakehässä, mikä puolestaan vauhdittaa kasvihuoneilmiötä. Ilmastonmuutoksen estäminen ja fossiilisten polttoaineiden väheneminen on kasvattanut huomattavasti uusiutuvien energialähteiden määrää. Etenkin tuuli- ja aurinkovoiman määrä on kasvanut viime vuosina. WWEA:n (World Wind Energy Association) mukaan maailmalaajuinen tuulivoiman tuotanto on kasvanut 456 GW:iin vuoden 2016 kesäkuun loppuun mennessä. Kasvu on 16,1 % edelliseen vuoteen verrattuna. Odotettu tuotanto vuoden 2016 lopussa on 500 GW. [1] Suomessa vastaavasti vuoden 2015 lopussa tuulivoiman kapasiteetti oli 1005 MW, jolla tuotettiin 2,8 % Suomen sähköenergiasta [2].

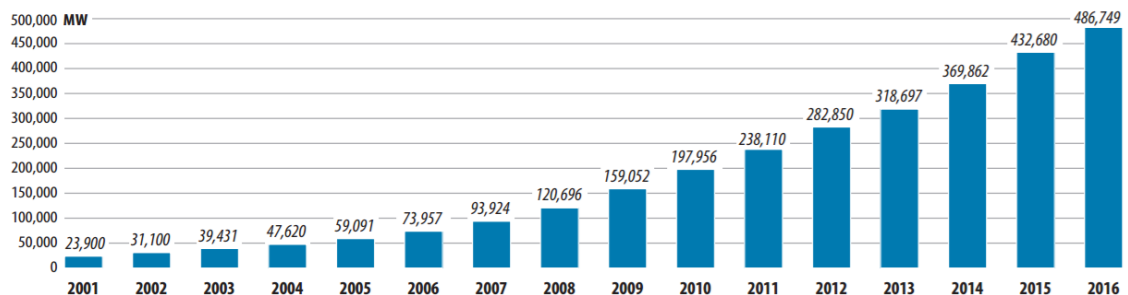
Tehoelektroniikalla on suuri rooli uusiutuvien energiamuotojen liittämässä valtakunnalliseen verkkoon. Se toimiikin niin sanotusti rajapintana uusiutuvan energian, esimerkiksi tuulivoiman tai aurinkovoiman ja sähköverkon välillä. Tuulivoiman energiantuotanto on vahvasti riippuvainen vallitsevasta säätilasta, jolloin sähköä ei aina ole saatavilla silloin, kun sitä tarvittaisiin. Tuulivoimaloiden koon ja verkkoon liitettyjen voimaloiden määrän kasvu on tuonut mukanaan lisää haasteita ja tarvetta syvemmälle ymmärtämiselle tuulivoiman vaikutuksista verkkoon [3].

Tuulivoimaloiden runsas maailmanlaajuinen kasvu on tuonut mukanaan myös sähkön laatuun liittyviä ongelmia. Tuulivoimaloita rakennetaan entistä enemmän kauas varsinaisista energiankulutusalueista, paikkoihin, joissa tuuliolosuhteet ovat erityisen hyvät. Energian siirto tuotantoalueelta kauas energiankulutusalueelle voi vaatia siirtoverkon kapasiteetin nostamista sarjaan kytketyillä kondensaattoreilla. Sarjaan kompensoitu verkko yhdistettynä laajaan tuulivoiman kasvuun on tuonut ongelmia, muun muassa alisynkronisia värähtelyongelmia. Verkon kapasitiiviset ja tuulivoimalan generaattorin induktiiviset osat saattavat alkaa resonoida keskenään, jolloin syntyy vaara alisynkroniselle resonanssille. Elokuun 22. vuonna 2009 Texasissa sattui ensimmäinen alisynkronisen resonanssin aiheuttama onnettomuus tuulivoimalassa. Onnettomuuden seurauksena sarjakondensaattoreita ja tuulivoimalan suojausjärjestelmiä tuhoutui.

Tässä työssä on tarkoitus käsitellä alisynkronista resonanssia verkkoon kytketyissä tuulivoimaloissa. Ensimmäisessä kappaleessa käsitellään tuulesta saatavaa tehoa ja tuulivoimalan hyötysuhdetta sekä erilaisia tuulivoimalakonsepteja ja niissä olevaa tehoelektroniikkaa. Seuraavassa kappaleessa käydään läpi alisynkronisten värähtelyjen eri tyypit ja resonanssin havaitsemiseen käytetty taajuuskannaus. Lopuksi käsitellään tyristoriohjatua sarjakondensaattoriparistoa ja sen mahdollisuuksia alisynkronisen resonanssin suodatuksessa.

2. TUULIVOIMA

Tuulivoimassa käytettävä teknologia on kehittynyt rajusti viime vuosikymmenien aikana. Kehitystä on tapahtunut erityisesti turbiinin halkaisijassa ja tehoelektroniikan hyödyntämisessä, joka on mahdollistanut muun muassa muuttuvanopeuksisen tuulivoimalatyypin käytön. Kuvasta 1 nähdään, kuinka asennetun tuulivoiman kapasiteetti on kasvanut viime vuosina. Vuoden 2016 loppuun mennessä maailmanlaajuinen kumulatiivinen kapasiteetti oli kasvanut noin 487 GW:iin.



Kuva 1. Maailmanlaajuinen kumulatiivinen asennettu tuulivoiman kapasiteetti. [4]

Tästä kumulatiivisesta kapasiteetista pelkästään Kiinan osuus on ollut vuoden 2016 loppuun mennessä jopa 34,7 %. Euroopan osuus oli 33,1 %, USA:n 16,9 % ja Saksan 10,3 % [4]. Tässä luvussa tarkastellaan, mistä tuulivoimala saa energiansa ja mikä on tehoelektroniikan merkitys, kun tuulivoimalla ruvetaan syöttämään sähköä verkkoon.

2.1 Tuulen teho

Tuulivoimalalla tuotetaan sähköä hyödyntäen ilmavirtauksen liike-energiaa. Ilmavirta muodostaa tuulivoimalan lapoihin nostevoiman, joka saa turbiinin pyörimään. Turbiini on yhdistettynä, tuulivoimalan tyypistä riippuen, vaihdelaatikkoon ja generaattoriin. Generaattorissa saadaan muutettua mekaanista energiaa sähkömagneettisen induktion avulla sähköksi. Generaattorin tuottama teho syötetään muuntajalle, joka muuttaa sähkön sopivalle tasolle verkkoon siirtämistä varten, kun kyseessä on verkkoon liitettävä tuulivoimala. [5]

Ilmavirtauksen teho voidaan laskea kaavalla

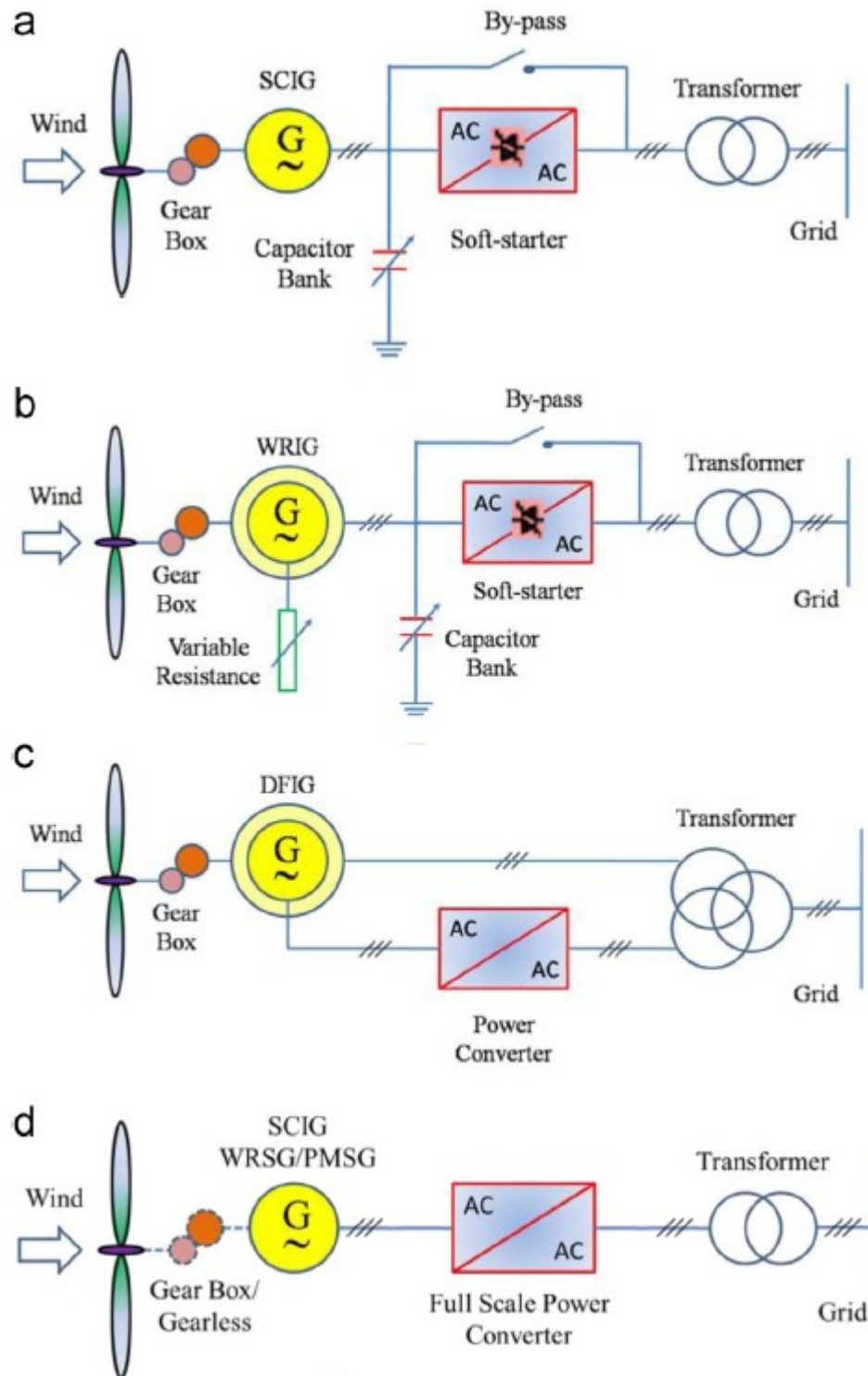
$$P_{itma} = \frac{1}{2} \rho A v^3, \quad (1)$$

jossa ρ on ilman tiheys, A on turbiinin pyörähdyspinta-ala ja v ilmavirtauksen nopeus [6].

Ilmamolekyylien liike-energiasta vain osa saadaan hyödynnettyä tuulivoimassa. Betzin lain mukaan tuulivoimalassa voidaan hyödyntää tuulen tehosta maksimissaan 59,3 % [7]. Betzin lain mukainen teoreettinen hyötysuhteen yläraja toimii ainoastaan ideaalitapauksille, ja todellisuudessa jo 40 % kokonaishyötysuhde tuulivoimalalle on hyvä.

2.2 Tuulivoimalatyypit

Tuulivoimalat voidaan jakaa käytännössä vakionopeuksisiin ja muuttuvanopeuksisiin voimalakonsepteihin. Tehoelektroniikkaa käytetään tuulivoimaloissa pääasiassa muuttuvanopeuksisissa tuulivoimalatyypeissä. Kuvassa 2 on esitetty neljä eri tyyppistä tuulivoimalakonseptia.



Kuva 2. Yleisimmät tuulivoimalakonseptit. a) vakionopeuksien, b) rajoitetusti muuttuvanopeuksinen, c) muuttuvanopeuksinen osittaisella suuntaajakäytöllä ja d) muuttuvanopeuksinen täysitehoisella suuntaajakäytöllä. [8]

Vakionopeuksisessa tuulivoimalassa (Type A) käytetään SCIG (engl. Squirrel cage induction generator) -tyylinen generaattoria eli häkkikäämityksellistä oikosulkugeneraatto-

ria [9]. SCIG on hyvin yleinen generaattori sen yksinkertaisen rakenteen, robustin toiminnan, kestävyuden ja vähäisen huollon tarpeen ansiosta [10]. Generaattori on suoraan kytkettynä verkkoon muuntajan välityksellä. Epätahtigeneraattorin ominaisuuksista johtuen se ottaa käynnistyksen yhteydessä loistehoa verkosta, jota voidaan kompensoida kuvaan 1 merkityllä kondensaattoripankilla. Jotta generaattorin käynnistyessä saataisiin pienemmät virtapiikit, tässä voimalatyypissä käytetään pehmeäkäynnistintä. Vakionopeuksisen tuulivoimalan suurin heikkous on pyörimisnopeuden muuttumattomuus, jonka seurauksena voimalan lapoihin kohdistuu suuria voimia tuulennonopeuden kasvaessa. [9],[11] Vakionopeuksiset tuulivoimalat onkin suunniteltu toimimaan optimaalisesti vain tietyllä tuulennonopeudella, jolloin voimalasta ei saada maksimaalista tehoa irti.

Rajoitetusti muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa (Type B) käytetään WRIG (engl. Wound rotor induction generator) -tyylistä epätahtigeneraattoria. Tällä voimalatyypillä on eroa vakionopeuksiseen tuulivoimalaan kuvan 1 perusteella ainoastaan epätahtigeneraattoriin kytketty säädettävä vastus. Säädettävä vastus on kytketty generaattoriin siten, että sillä voidaan vaikuttaa generaattorin roottorin käämien resistanssiin ja täten vaikuttaa epätahtigeneraattorin jättämän suuruuteen sekä generaattorin pyörimisnopeuteen. [9] Säädettävän vastuksen avulla pyörimisnopeus voi olla 0-10 % synkroninopeutta suurempi [11].

Muuttuvanopeuksisessa ja osittaisella suuntaajakäytöllä (Type C) varustetussa tuulivoimalakonseptissa käytetään DFIG (engl. Double fed induction generator) -tyylistä generaattoria eli kaksoissyötettyä epätahtigeneraattoria. Tämä konsepti on vastaavanlainen rajoitetusti muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan kanssa siinä mielessä, että molemmissa saadaan kasvatettua roottorin pyörimisnopeutta jättämää kasvattamalla. Tässä konseptissa osa jättämän kasvusta aiheutuneesta tehosta syötetään suuntaajan kautta verkkoon. Tällä saadaan jopa 30 % synkroninopeutta suurempi pyörimisnopeus. [11] Suuntaajan avulla saadaan kompensoitua loistehoa, ja voimalan verkkoon kytkeminen onnistuu helpommin [9].

Muuttuvanopeuksisessa täysitehoisella suuntaajakäytöllä (Type D) varustetussa voimalassa voidaan käyttää tahti- tai epätahtigeneraattoreita. Tässä voimalatyypissä ei tarvitse generaattorista riippuen käyttää lainkaan vaihteistoa, jolloin voimalaa voidaan kutsua suoravetoiseksi. Generaattori pyörii siis samalla nopeudella tuulivoimalan turbiinin kanssa eli suuntaajan voidaan ajatella toimivan niin sanotusti sähköisenä vaihdelaatikkona. Tällaiset generaattorit sisältävät yleensä useita kymmeniä napapareja ja ovat rakenteeltaan tahtigeneraattoreita tai kestromagnetoituja tahtigeneraattoreita. Tällaisella muuttuvanopeuksisella tuulivoimalalla saavutetaan monia etuja muihin nähden. Suoraan suuntaajan kautta verkkoon kytketyllä tuulivoimalalla voidaan säätää nopeasti pätö- ja loistehon määrää. Suuntaajan avulla tuulivoimalla saadaan otettua tuulesta suurempi teho monilla eri tuulennonopeuksilla. Verrattuna vakionopeuksiseen järjestelmään muuttuvanopeuksisessa voimalassa generaattorin vääntömomentti saadaan pidettyä vakiona, jolloin vaihtelut tuulennonopeudessa vaikuttavat suoraan roottorin pyörimisnopeuteen, eivätkä ne tällöin rasita voimalaa mekaanisesti. Muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa ei tarvitse käyttää vikaherkkää mekaanista vaihdelaatikkoa, jolloin säästetään huoltokuluissa. [9],[11] Tämä myös kasvattaa suoraan huipunkäyttöaikaa. Muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat ovat kuitenkin huomattavasti kalliimpia tehoelektroniikan ja erikoisvalmisteisten generaattoreiden takia. Kestomagneettigeneraattorit alkavat jo kuitenkin olla hintansa puolesta kilpailukykyisiä [12].

3. ALISYNKRONINEN VÄRÄHTELY

Sarjaan kytkettyjä kondensaattoreita käytetään yleisesti sähköverkossa kasvattamaan siirtolinjan kapasiteettiä. Verkkoon sarjaan kytketyillä kondensaattoreilla on merkittäviä etuja rinnan kytkettyihin nähden. Sarjaan kytketyn kondensaattorin loisteho kasvaa neliöllisesti vaihevirtaan nähden, kun taas rinnan kytketyn kondensaattorin loisteho kasvaa suoraan verrannollisesti kondensaattorin yli olevan jännitteen neliöön.

Sarjaan kytkettyjä kondensaattoreita käytettäessä on kuitenkin riskinsä: ne voivat aiheuttaa alissynkronista värähtelyä (engl. Sub-synchronous oscillation, SSO). Alissynkroninen värähtely voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: alissynkroninen resonanssi (engl. Sub-synchronous resonance, SSR), alissynkroninen säädön vuorovaikutus (engl. Sub-synchronous control interaction, SSCI) ja alissynkroninen vääntävä vuorovaikutus (engl. Sub-synchronous torsional interaction, SSTI). Pelkästään SSR voidaan vielä jakaa kolmeen osaan: epätahtigeneraattorivaikutukseen (engl. Induction generator effect), vääntävään vuorovaikutukseen (engl. Torsional interaction, lyh. TI) ja vääntävään vahvistukseen (engl. Torque amplification, lyh. TA). [8] Tässä kappaleessa käydään läpi eri alissynkronisen värähtelyn tyypit.

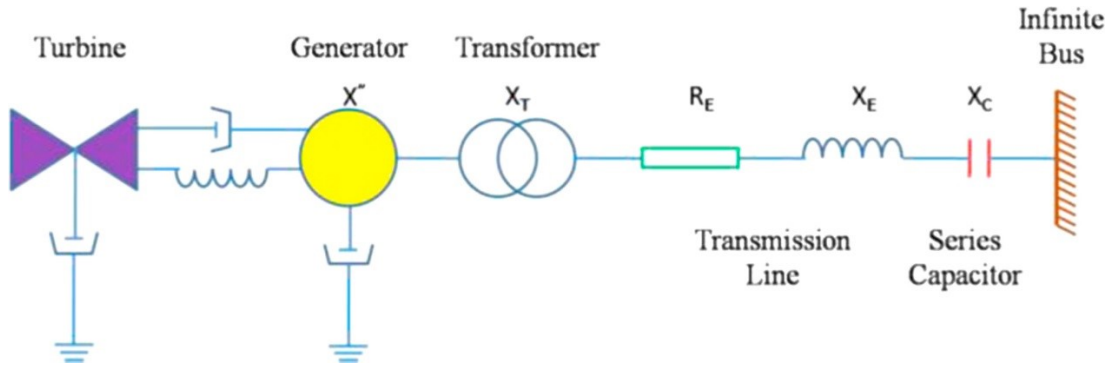
3.1 Alissynkroninen resonanssi

Alissynkroninen resonanssi viittaa yleisiin oskillaatio-ongelmiin alissynkronisella taajuusalueella. Alissynkroninen resonanssi on siis siirtoverkon komponenttien ja mekaanisen turbiini-generaattoriakselin välinen vuorovaikutusilmiö. [8] Virallisen määritelmän mukaan SSR on sähkövoimajärjestelmän tilanne, jossa sähköverkko vaihtaa energiaa turbiinigeneraattorin kanssa yhdellä tai useammalla yhdistetyn järjestelmän luonnollisella taajuudella, järjestelmän nimellisen taajuuden alapuolella [13].

Säteittäisessä sarjakompensoidussa verkossa sähköinen resonanssitaajuus voidaan ilmoittaa

$$f_r = \pm f_n \sqrt{\frac{x_c}{x_L}}, \quad (2)$$

jossa f_n on verkon nimellistaajuus, x_c on sarjaan kytketyn kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi ja x_L on siirtolinjan, muuntajan ja generaattorin yhteinen induktiivinen reaktanssi. [14] Yksinkertainen sarjakompensoitu järjestelmä on esitetty kuvassa 3. Kuvasta on myös nähtävissä kaavan 2 resonanssitaajuuden komponentit.



Kuva 3. Sarjakompensoitu järjestelmä. [8]

Sarjaan kytketyn kondensaattorin kapasitiivisen reaktanssin suhdetta siirtolinjan induktiiviseen reaktanssiin kutsutaan kompensoation asteeksi, joka vaihtelee 20:n ja 80:n prosentin välillä.

3.1.1 Epätahtigeneraattorivaikutus

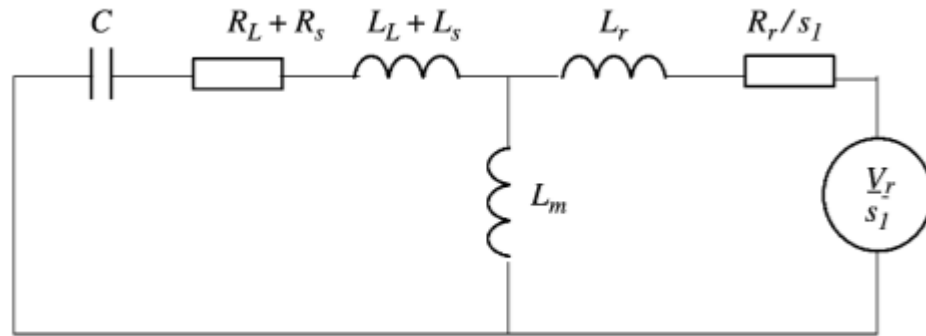
Sarjaan kytketty kondensaattori ja siirtolinjan induktanssi muodostavat sarjanresonanssi-piirin, jonka resonanssitaajuus voidaan laskea kaavan 2 avulla. Alisynkronisella resonanssitaajuudella generaattorin jättämä s on

$$s = \frac{f_n - f_m}{f_n}, \quad (3)$$

jossa f_m on taajuus, joka vastaa generaattorin pyörimisnopeutta. Resonanssitaajuuden f_n ollessa pienempi kuin f_m , jättämä s on negatiivinen. Näin ollen DFIG:in tasapainotilan ekvivalenttipiiristä, joka on esitettyä kuvassa 4, ekvivalenttinen roottorin resistanssi alisynkronisella taajuudella on negatiivinen eli

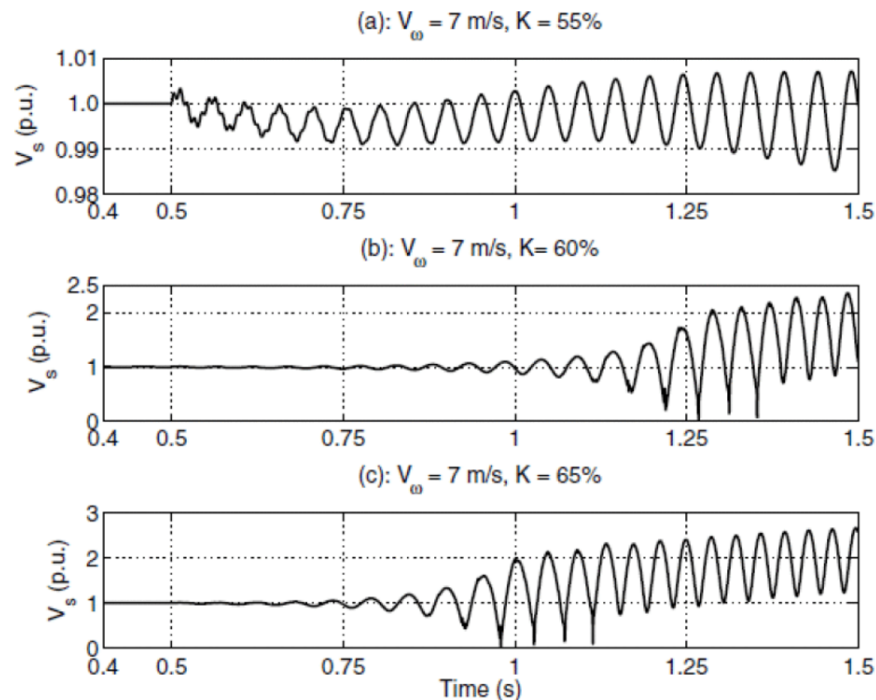
$$R_{r,eq} = \frac{R_r}{s_1} < 0. \quad (4)$$

Jos tämän resistanssin suuruus ylittää staattorin ja verkon yhteisen resistanssin, koko järjestelmällä on negatiivinen resistanssi alisynkronisella taajuudella. Tämä voi johtaa niin sanottuun itseherätykseen (engl. Self-excitation), joka voi johtaa pysyvästi tai heilahtelevasti kasvaviin staattorivirtoihin. Tätä ilmiötä kutsutaan epätahtigeneraattorivaikutukseksi. Epätahtigeneraattorivaikutus voi tapahtua kaikissa tuulivoimalatyypeissä ja se on suurin syy alisynkroniselle resonanssille tuulivoimaloissa. [15] Epätahtigeneraattorivaikutukseen liittyy ainoastaan generaattorin sähköiset ominaisuudet, eivätkä mekaaniset osat ole missään tekemisissä tämän kanssa [8].

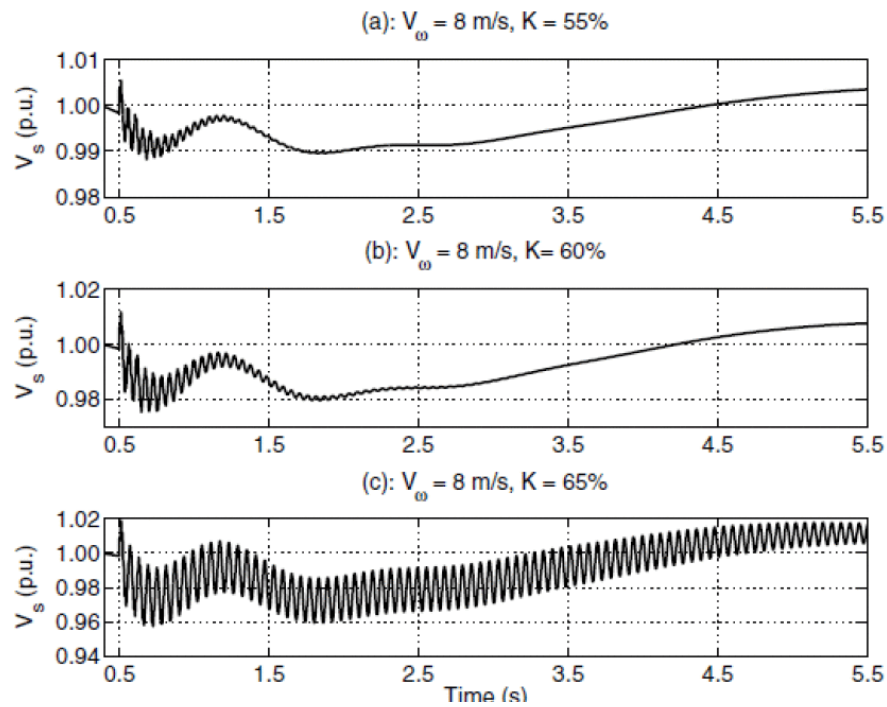


Kuva 4. DFIG:in tasapainotilan ekvivalenttipiiri alisynkronisella taajuudella. [15]

Artikkelissa [16] simuloitiin epätahtigeneraattorivaikutusta generaattorin jännitteeseen eri tuulennopeuksilla ja sarjakompensaatiotasolla. Simuloinneista kävi ilmi, että epätahtigeneraattorivaikutus on sitä todennäköisempää, mitä pienempi tuulennopeus ja suurempi kompensaatiotaso on. Toisaalta lähteessä [17] todettiin, että alisynkronisen resonanssin riski on mahdollista myös vain 6,67 % kompensaatiotasolla. Simulaatiotulokset ovat nähtävissä kuvista 5 ja 6, kun tuulennopeus on 7 m/s ja 8 m/s. Kuvissa 5 ja 6 ennen ajanhetkeä 0,5 s kompensaatiotaso on 50 %, jolloin järjestelmä on stabiili. Jännitteet on ilmoitettu suhteellisarvoina.



Kuva 5. Generaattorin jännite tuulennopeudella 7m/s. a) kompensaatiotaso 55 %, b) kompensaatiotaso 60 %, c) kompensaatiotaso 65%. [16]



Kuva 6. Generaattorin jännite tuulennopeudella 8 m/s. a) kompensoitotaso 55 %, b) kompensoitotaso 60 %, c) kompensoitotaso 65 %. [16]

3.1.2 Väöntävä vuorovaikutus

Väöntävä vuorovaikutus on mekaanisen turbiini-generaattorin ja sarjakompensoidun verkon välistä vuorovaikutusta. Vuorovaikutus syntyy, kun resonanssitaajuus on lähellä mekaanisen turbiini-generaattoriakselin luonnollisia resonanssitaajuuksia. Värähtelyt generaattorin roottorissa resonanssitaajuudella aiheuttavat muutoksia generaattorin jännitteeseen. Jos värähtelevät momentit ovat yhtä suuria tai ylittävät roottorin sisäisen mekaanisen vaimennuksen, systeemissä aiheutuu samanlainen itseherätys, kun epätahtigeneraattorin tapauksessa. [8]

Tällä taajuudella akseliin kohdistuvat väöntävät voimat voivat vahvistua ja mahdollisesti aiheuttaa vahinkoa tai jopa tuhota koko akselin. Tämä aiheuttaa saman ilmiön: itseherätyksen, kuten epätahtigeneraattorivaikutuksessa. [18]

Jotta väöntävää vuorovaikutusta voitaisiin tarkastella, täytyy aluksi määritellä, kuinka väöntävät taajuudet muodostuvat DFIG-tuulivoimalan akselistoon. Yleinen tapa on ilmaista roottori pieninä yksittäisinä massapisteinä, jotka ovat yhdistettynä toisiinsa jouilla, jotka määrittellään vaimennus- ja jäykkyyksertoimien avulla. Kuvassa 7 esittää tyypillisen tuulivoimalan akselin voimansiirron mallia kaksimassaisen järjestelmän osalta. Tätä järjestelmää voidaan kuvata kaavalla

$$2H_i \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = T_i + T_{i,i+1} - T_{i,i-1} - D_i \frac{d\delta_i}{dt}, \quad (5)$$

jossa

$$T_{i,j} = K_{i,j}(\delta_j - \delta_i) \text{ ja} \quad (6)$$

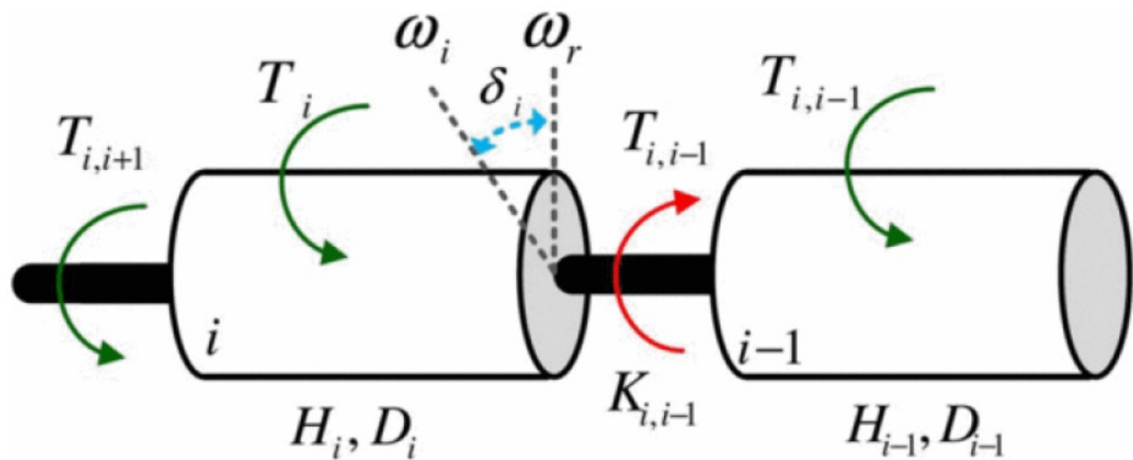
$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_r = \Delta\omega_i. \quad (7)$$

Kaavassa 7 H_i on yksittäisen massaosan hitausmomenttikerroin, $\Delta\omega_i$ on massan i nopeuden muutos, T_i on yksittäisen akseliosan momentti, D_i on massan vaimennuskerroin, $K_{i,j}$ on akselin jäykkyys ja δ_i on massan i särmäinen kaltevuus. [16]

Jos käsitellään N määrää erillisiä massoja käyttämällä kaavoja 5-7, saadaan $2N$ määrä differentiaaliyhtälöitä, jotka voidaan esittää tilayhtälöinä muodossa

$$\dot{X} = AX + BU, \quad (8)$$

jossa X on vektori tilamuuttujia ja U on momenttivektori.

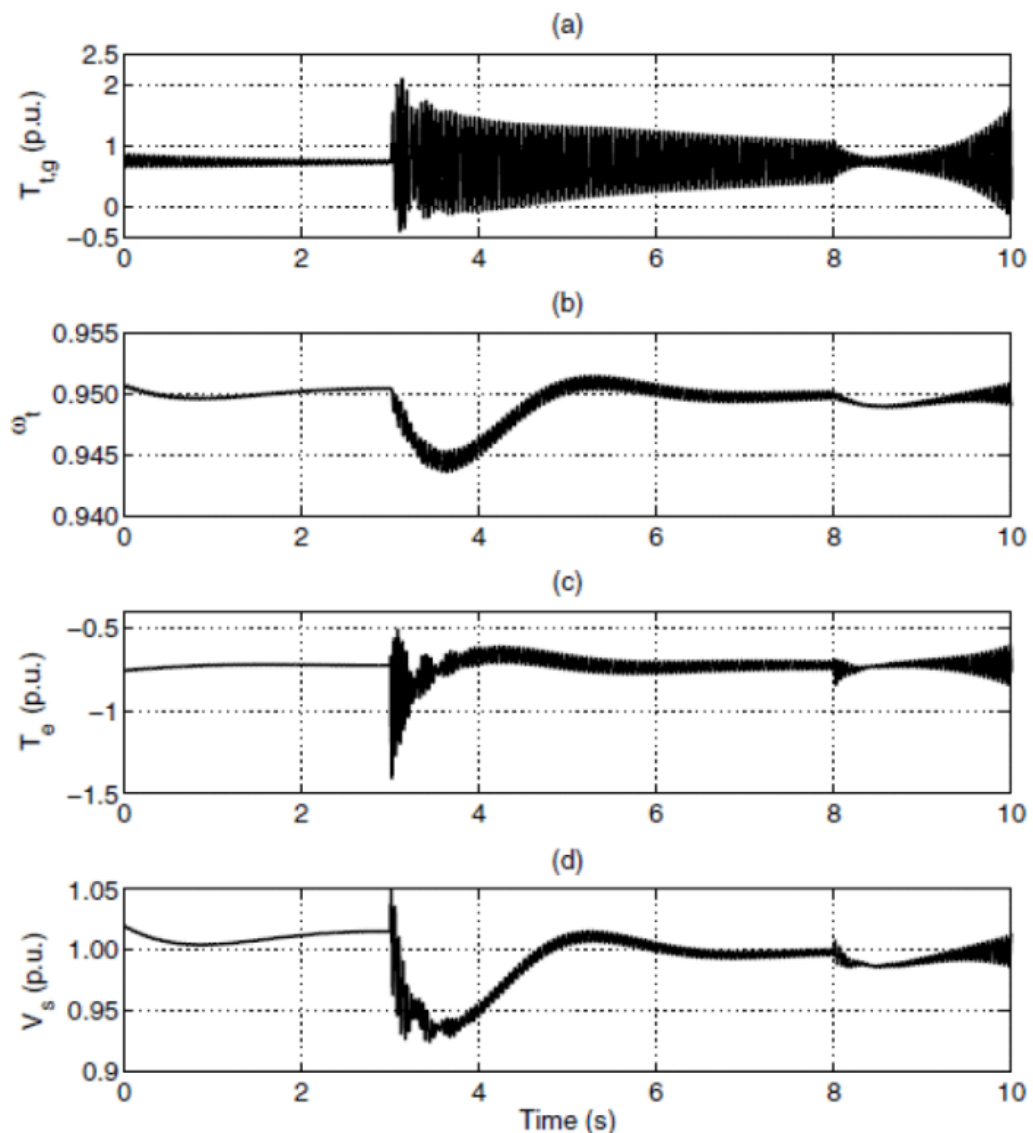


Kuva 7. Tuulivoimalan akselin malli.

Merkittävä tekijä TI:n syntymiseen on akselin luonnollisten värähtelevien vääntävien voimien taajuus. Tämä taajuus vaikuttaa suoraan akselin jäykkyyskertoimeen, joka vaikuttaa TI:n syntymiseen. Jäykkyyskerroimet tuulivoimaloissa ovat paljon pienemmät verrattuna höyry-, vesi-, ja dieselveimaloihin. Tuulivoimaloiden pieni akselin jäykkyyskerroin voimansiirrossa johtaa pieneen luonnolliseen vääntävään resonanssitaajuuteen, joka on 1-5 Hz:n välillä. Jotta TI tapahtuisi tuulivoimalassa, siirtoverkon sähköisen luonnollisen resonanssitaajuuden pitäisi olla 55-59 Hz:n välillä. Näin suuri sähköverkon resonanssitaajuus saavutetaan ainoastaan, jos sarjankompensointitaso on todella suuri. Normaalisti sar-

jakompeensaatiotaso on suurimmillaan 70-75 %, jolloin on yleensä kyse suurista vikavirroista, kuorman tasoitusta sarjankytköksiä pitkin tai mahdollisista vaikeuksista ohjata tehon kulkua. [16]

Kuvassa 8 on esitetty artikkelissa [16] simuloitua kahden massan välistä momenttia $T_{t,g}$, turbiinin pyörimisnopeutta ω_t , sähköistä momenttia T_e ja generaattorin napajännitettä V_s TI:n vaikutuksen alaisena eri kompeensaatiotasoilla tuulen nopeuden ollessa 9 m/s . Simuloinneissa on käytetty kuvassa 7 esitettyä tuulivoimalan kaksimassaista voimansiirtoakselin mallia. Kompeensaatiotaso vaihtelee siten, että simulaation alussa kompeensaatiotaso on 20 %, 2,5 sekunnin kohdalla 50 % ja 5 sekunnin kohdalla 55 %. Massojen välisen akselin jäykkyys $K_{t,g} = 50 \text{ pu}$.



Kuva 8. Simuloitu TI:n vaikutus massojen väliseen momenttiin $T_{t,g}$, turbiinin pyörimisnopeuteen ω_t , sähköiseen momenttiin T_e ja generaattorin napajännitteeseen V_s kompeensaatiotasojen vaihdellessa. [16]

Simulaatiotuloksista käy ilmi, että tuulivoimala on stabiili kompensaatiotason ollessa 20-50 %, mutta kompensaatiotason ollessa 55 % aiheutuu TI ja tuulivoimala menee epästabliiksi epästabliien akselia vääntävien muotojen takia. [16]

3.1.3 Vääntävä vahvistus

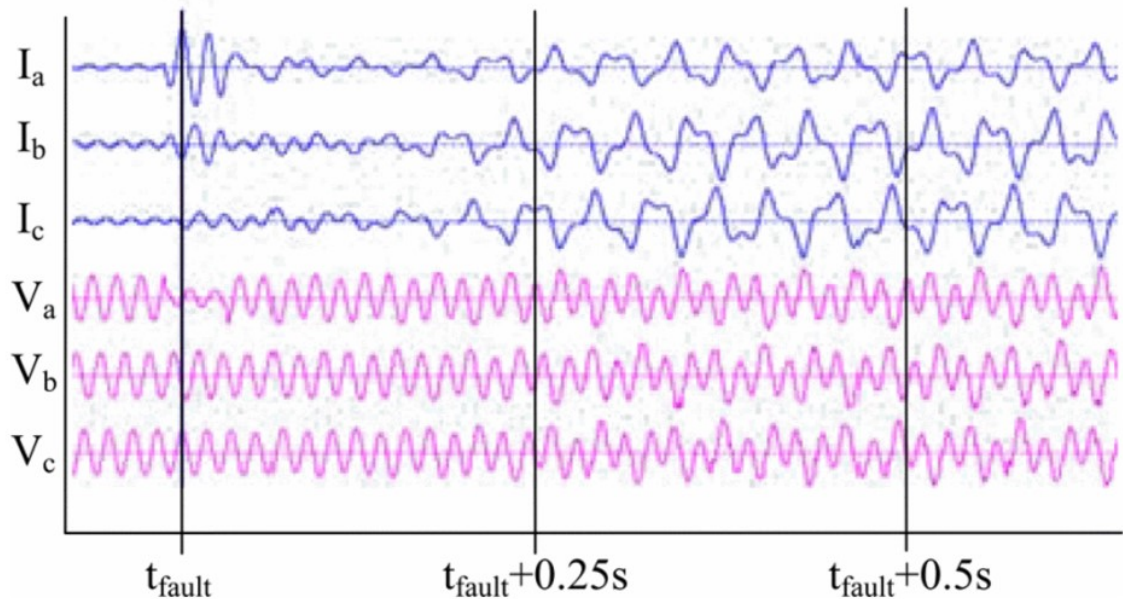
Vääntävää vahvistusta (lyh. TA) kutsutaan myös hetkelliseksi SSR:ksi, joka tapahtuu yleensä verkon vika- tai kytkentätilanteissa. Tästä aiheutuu häiriötä järjestelmään. Häiriö johtaa äkilliseen muutokseen virrassa, joka aiheuttaa värähtelyjä. Jos näiden värähtelyjen taajuus on sama kuin generaattoriakselin luonnolliset taajuudet, akselisto kokee suuren momentin. Tämä momentti on suoraan verrannollinen värähtelevän virran suuruuteen. TA:sta johtuva SSR voi aiheuttaa vahingollisia mekaanisia vääntäviä värähtelyjä akseli-järjestelmään, joka yhdistää generaattorin ja turbiinin. TA:n aiheuttamista vahingoista akselistöön ei kuitenkaan ole vielä mitään todisteita. [8]

3.2 Alisynkroninen säädön vuorovaikutus

Alisynkroninen säädön vuorovaikutus eli SSCI on yksi alisynkronisen resonanssin tyypeistä, joka on nopeasti kasvava sähköinen vuorovaikutus sarjakompensoidun verkon ja tehoelektronikkalaitteistojen, kuten suurjännitteisen tasavirtalinkin, Staattisen loistehokompensaattorin (engl. Static VAR compensator, SVC) tai tuulivoimalan tehoelektronikan säätöjärjestelmän välillä. SSCI on suhteellisen uusi laiteriippuvainen ilmiö, ja se sekoitetaan usein SSR:n kanssa. [14, 19, 20] SSCI perustuu puhtaasti sähköiseen ja säädön vuorovaikutukseen eikä siihen sisälly mitään mekaanisia tai vääntäviä komponentteja [8, 20].

SSR:n ja SSTI:n aiheuttamat värähtelyt perustuvat usein tiettyyn muuttumattomaan mekaanisen järjestelmän luonnolliseen värähtelytaajuuteen, mutta SSCI:llä ei ole mitään tiettyä vakiotajuutta, koska värähtelyt perustuvat puhtaasti säädön ja sähköisen siirtojärjestelmän konfiguraatioon. Lisäksi SSCI:n aiheuttamat värähtelyt voivat kasvaa erittäin nopeasti verrattuna mekaanisiin värähtelyihin, koska ne ovat vaimentamattomia ja mekaanisissa järjestelmissä on aina jokin vaimentava tekijä. [20]

Texasissa sattuneet alisynkroniset värähtelyt olivat SSCI:n aiheuttamia. Linjalla sattuneen vian ja sen jälkeisen sähkökatkoksen takia suuri tuulivoimalaitos yhdistyi säteittäisesti sarjankompensoituun suurjänniteverkkoon. Tämä aiheutti nopeasti kasvavia alisynkronisia värähtelyjä, jonka seurauksena sarjakondensaattoreihin ja tuulivoimaloihin aiheutui vahinkoja. SSCI:n aiheuttamat värähtelyt saatiin tallennettua ja ne on esitetty kuvassa 9. Kuvassa näkyvä vian alkamisajankohta on merkitty t_{fault} .



Kuva 9. SSCI:n aiheuttamat värähtelyt. Mitattuna on tuulivoimalan virrat ja jännitteet jokaisen vaiheen osalta. Vian alkamisajankohta t_{fault} . [20]

3.3 Alisynkroninen vääntävä vuorovaikutus

Alisynkroninen vääntävä vuorovaikutus eli SSTI on myös laiteriippuvainen ilmiö. SSTI on vuorovaikutusta generaattorin ja tehoelektronikkalaitteiden välillä. SSTI:stä on suhteellisen vähän tietoa kirjallisuudessa, ja se sekoitetaan yleensä TI:n kanssa. SSTI:n on havaittu olevan mahdollista tyyppin 1 tuulivoimaloissa, mutta muiden osalta tarvitaan vielä lisätutkimuksia [8]. SSTI huomattiin ensimmäisen kerran kenttätestin aikana Pohjois-Dakotassa.

3.4 Taajuusskannaus

Taajuusskannaus on menetelmä, jolla alisynkronisia värähtelyjä voidaan havaita ennen kuin tuulivoimalaa kytketään verkkoon. Taajuusskannauksessa määritetään ekvivalenttinen impedanssi generaattorin roottorikäämien takaa verkkoon päin katsoen taajuuden suhteen. Tässä menetelmässä etsitään taajuutta, jolla reaktanssi on nolla ja resistanssi negatiivinen, jolloin epätahtigeneraattorivaikutus on mahdollinen, kuten kappaleessa 3.2.1 esitettiin. Taajuusskannaus voi myös antaa tietoa vääntävistä vuorovaikutuksista.

Jos alisykroninen taajuus, jolla SSR:n reaktanssi on nolla tai lähellä nollaa ja kokonaisresistanssi on negatiivinen, löydetään, epätahtigeneraattorivaikutus havaitaan. Negatiivisen resistanssin suuruus on mitta sähköisten värähtelyjen kasvusta. Sähköiset värähtelyt eivät kuitenkaan vielä aiheuta vaimenemattomia mekaanisen järjestelmän värähtelyjä, mutta ne voivat olla sietämättömiä sähköiselle järjestelmälle.

Efektiiivinen resistanssi R_{ef} roottorista päin katsottuna on kriittisessä roolissa määriteltäessä tuulivoimalan altistumista SSR:lle. Tämä resistanssi on esitetty kaavassa 9.

$$R_{ef} = \frac{R_r}{s} + R_s + R_{line}, \quad (9)$$

jossa R_r on roottorin resistanssi, R_s on staattorin resistanssi, R_{line} on siirtolinjan resistanssi, joka sisältää myös muuntajan resistanssin ja s on generaattorin jättämä. Sähkölinjan ja staattorin resistanssit ovat vakioita kaikilla taajuuksilla, mutta roottorin resistanssi muuttuu taajuuden funktiona jättämän muuttuessa. Roottorin resistanssi pienenee taajuuden kasvaessa.

Epätahtigeneraattorin mahdollisten eri tilanteiden löytämiseksi efektiivisen reaktanssin ja kokonaisresistanssin nollan ylittävät alisykroniset taajuudet on löydettävä. Efektiiivinen reaktanssi X_{ef} voidaan laskea

$$X_{ef} = im\{Z_{ef}\} = im\{Z_1 + Z_2 + Z_3\}, \quad (10)$$

jossa

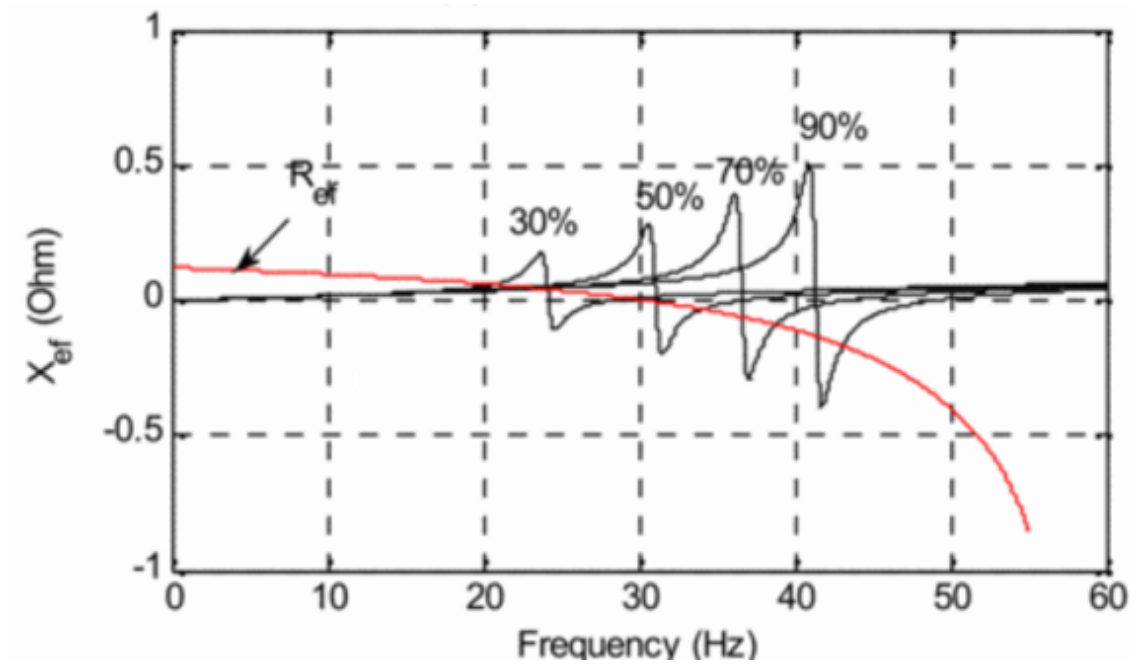
$$Z_1 = \left(\frac{R_r}{s} + j\omega L_r\right) \quad (11)$$

$$Z_2 = (R_s + j\omega L_s) || (j\omega L_m) \quad (12)$$

$$Z_3 = (R + j\omega(L + jL_t)) || \left(-j\frac{1}{\omega C_g}\right), \quad (13)$$

jossa L_r on roottorikämmien induktanssi, L_s on staattorikämmien induktanssi, L_m on magnetointi-induktanssi, L_t on muuntajan induktanssi, L on siirtolinjan induktanssi ja C_g generaattorin kapasitanssi.

Kuvassa 10 on esitetty efektiivinen reaktanssi roottorista päin katsottuna 300 MW:n generaattorille.

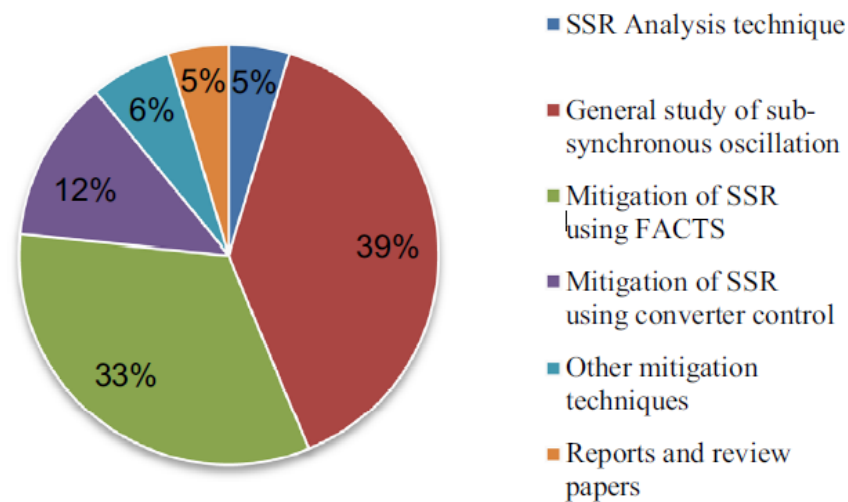


Kuva 10. Efektiivinen reaktanssi roottorista päin katsottuna.

300 MW:n järjestelmälle 50 % sarjakompensaatiotasolla efektiivinen resistanssi on negatiivinen samalla taajuudella, kun efektiivinen reaktanssi menee nolnaan. Tämä on merkki mahdollisesta epätahtigeneraattorivaikutuksesta. Kriittinen kompensaatiotasoo on jossain 30 % ja 50 % välillä. Kuvassa 10 efektiivinen resistanssi on piirretty punaisella ja reaktanssi eri kompensaatiotasolla mustalla.

4. ALISYNKRONISEN RESONANSSIN SUODATUS

Merkittävä osa (51 %) SSR:ään liittyvistä tutkimuksista tuulivoimaloissa on keskittynyt nimenomaan alisynkronisen resonanssin suodattamiseen. Suodattamiseen liittyvistä artikkeleista eniten (33 %) on tutkittu FACTS-laitteistojen (engl. Flexible AC Transmission System) suodatusmahdollisuuksia ja toiseksi eniten (12 %) konverterien säätöjärjestelmien suodatustekniikoita. Tilastot alisynkroniseen resonanssiin liittyvistä artikkeleista on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Alisynkronisen resonanssin artikkeleiden määrä eri tutkimuskategorioittain. [8]

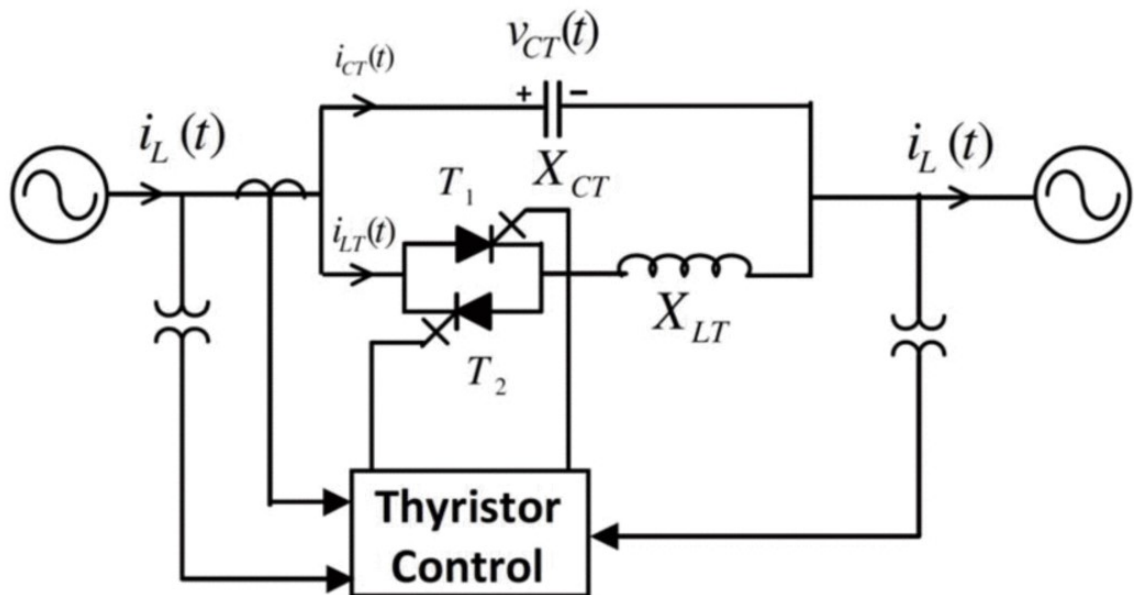
Artikkelissa [21] alisynkronista resonanssia suodatettiin optimoimalla DFIG:in verkon puoleisen konverterin (lyh. GSC) säätöjärjestelmää. Säätö suunniteltiin GSC:n normaalin säädön päälle ilman ylimääräisiä FACTS-laitteistoja. Ylimääräinen säädin ottaa inputikseen roottorin pyörimisnopeuden ja sen ulostulo lisätään GSC:n normaalin jännitesäädön sisäänmenoon. Artikkelissa [22] toteutettiin mikroprosessoripohjainen, alisynkronisen resonanssin tunnistava ja sähköjärjestelmää suojaava rele. Alisynkronisen taajuuden rele (engl. Sub-synchronous relay. SSF) tunnistaa alisynkroniset värähtelyt ja tallentaa tapahtumat jälkianalyysijä varten.

Useita eri FACTS-laitteistoja on toteutettu SSR:n suodattamiseen. [8] FACTS-laitteistot voidaan jaotella muuttuvaan impedanssiin perustuviin FACTS-laitteisiin, kuten SVC, TCSC (engl. Thyristor controlled series capacitor) tai GCSC (engl. Gate controlled series capacitor), ja jännitelähdekonverttereihin, kuten STATCOM (engl. Static synchronous

compensator, SSSC (engl. Static synchronous series capacitor) tai UPFC (engl. Unified power flow converter). Tässä luvussa keskitytään alisynkronisen resonanssin suodatuksen FACTS-laitteistoon kuuluvalla tyristoriohjatulla kondensaattoriparistolla.

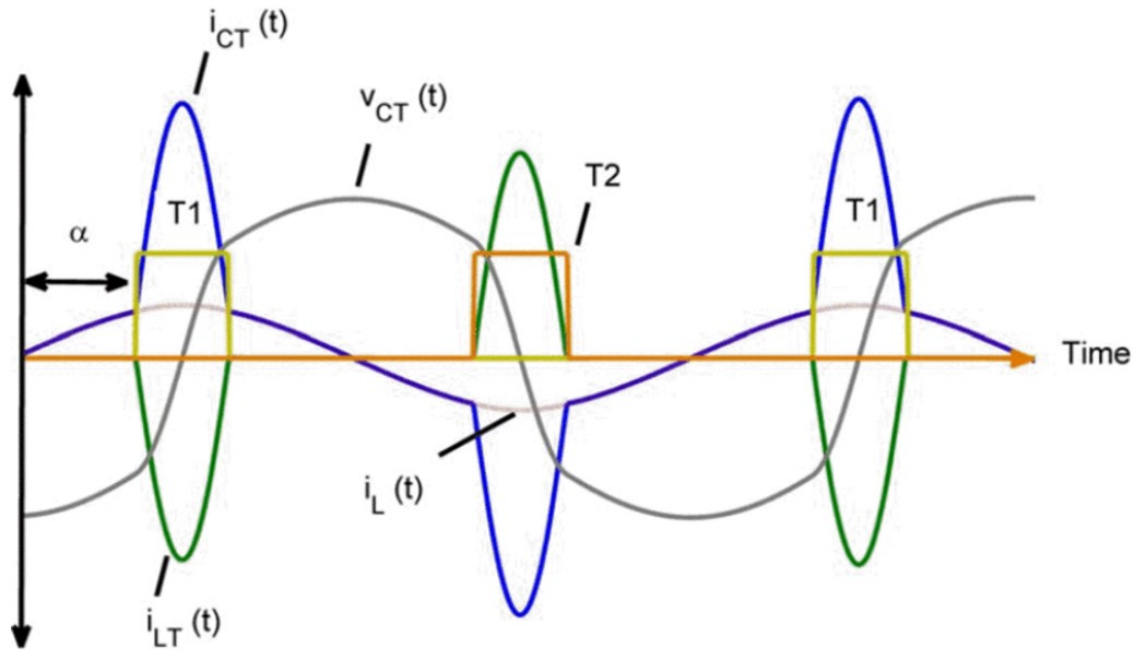
4.1 Tyristoriohjattu sarjakondensaattoriparisto

Tyristoriohjattu sarjakondensaattoriparisto (lyh. TCSC) kasvattaa siirtoverkon tehonsiirtomahdollisuuksia ja antaa nopean jatkuva-aikaisen sarjakompensaatiotason säätämisen ohjaamalla siirtolinjan tehoa dynaamisesti [18]. ABB valmisti ja asensi ensimmäisen TCSC-laitteiston Yhdysvaltoihin Arizonan osavaltioon Kayentan sähköjakelukeskukseen vuonna 1992. Asennettu laitteisto kasvatti siirtolinjan kapasiteettia noin 30 %. [23] TCSC:n yleinen kokoonpano yhden vaiheen osalta on esitetty kuvassa 12. TCSC-laitteisto koostuu kahdesta vastarinnankytketystä tyristorista ja kuristimesta sekä niiden kanssa rinnan kytketystä kondensaattorista. [18] TCSC:n toiminta perustuu tyristorien liipaisukulman säätämiseen. Tyristorien sytytyskulmaa säätämällä voidaan vaikuttaa laitteen muissa haaroissa kulkevien virtojen suuruuksiin. Tyristorihaaran kautta kulkee sitä suurempi virta, mitä suurempi kondensaattorin varaus on tyristorien liipaisuhetkellä. [24]



Kuva 12. TCSC:n rakenne yhden vaiheen osalta. [23]

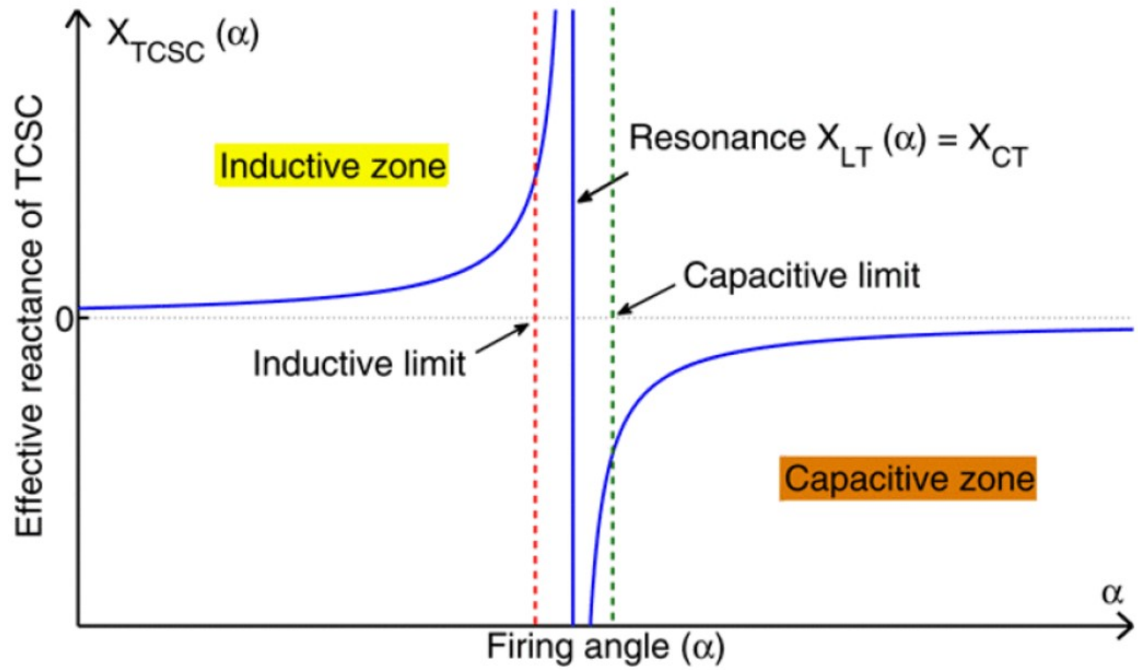
Kun sytytyskulmaa muutetaan, rinnalla olevaa LC-suodinta voidaan virittää, ja näin ollen TCSC-laitteiston impedanssi on säädettävissä. Kuvassa 13 on esitetty TCSC:n kondensaattorin jännite $v_{CT}(t)$, vaihevirta $i_L(t)$, kondensaattorin ja kelan virrat $i_{CT}(t)$ ja $i_{LT}(t)$ sekä tyristorien ohjauspulssit T_1 ja T_2 ajan suhteen.



Kuva 13. Kondensaattorin jännite $v_{CT}(t)$, vaihevirta $i_L(t)$, kondensaattorin ja kelan virrat $i_{CT}(t)$ ja $i_{LT}(t)$ sekä tyristorien ohjauspulssit T_1 ja T_2 . [23]

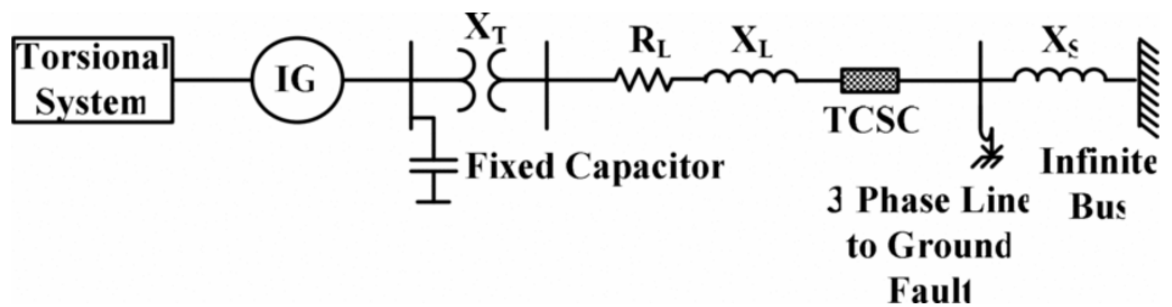
TCSC:n tyristorien ja kelan yhdistelmää kutsutaan tyristoriohjatuksi kelaksi (lyh. TCR, engl. Thyristor-controlled reactor). Jos TCSC:n kelan reaktanssi X_{LT} on merkittävästi pienempi kuin kondensaattorin reaktanssi X_{CT} , TCSC voi toimia kytkimen lailla niin, että sytytyskulmaa α säätämällä, TCR:n induktanssia voidaan vaihdella. Tämän ansiosta TCSC muodostaa jatkuva-aikaisesti muuttuvan kondensaattorin sulkemalla osan kondensaattorin impedanssista muuttuvan kelan impedanssin ansiosta. Yleensä kelan reaktanssin arvo valitaan siten, että se on 10-30 % kondensaattorin reaktanssista. [23]

Kuvasta 14 nähdään TCSC:n tyypillinen impedanssikäyrä sytytyskulman suhteen. Normaaliirakenteisessa TCSC-laitteistossa, jossa induktiivinen reaktanssi on pienempi kuin kapasitiivinen reaktanssi, TCSC edustaa säädeltävää rinnankytkettyä LC-piiriä. Tämä on nähtävissä kuvasta 7 siten, että TCSC:llä on kaksi toiminta-aluetta rinnakkaisresonanssin ympärillä: induktiivinen ja kapasitiivinen. [23]

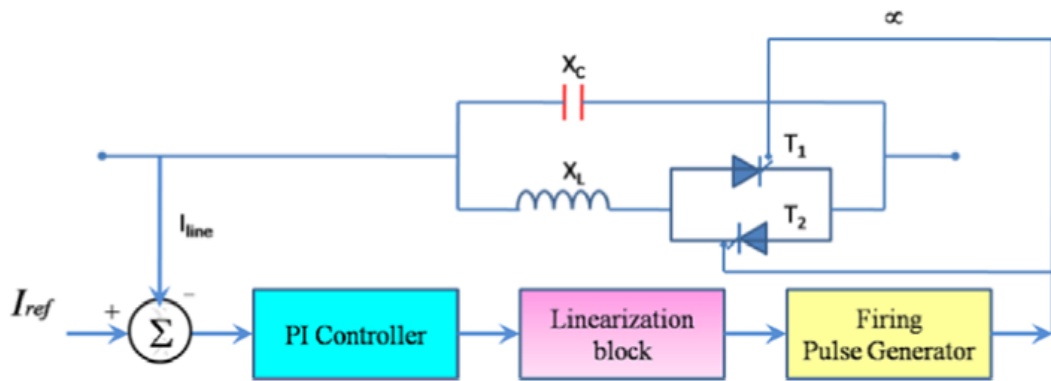


Kuva 14. TCSC:n impedanssi sytytyskulman α suhteen. [23]

Artikkelissa [18] todettiin simulaation TCSC:n pystyvän suodattamaan alisynkronista resonanssia, etenkin epätahtigeneraattorivaikutusta ja vääntävää vuorovaikutusta. Artikkelissa käytettiin tutkittavana systeeminä IEEE:n SSR:n tutkimiseen tarkoitettua testimalia, joka on esitetty kuvassa 15. Dokumentteissa [18, 23] TCSC:n implementoitiin vakiovirtasäätö, jonka lohkodiagrammi on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. IEEE:n testijärjestelmä. [18]



Kuva 16. TCSC:n vakiovirtasäädön lohkodeigrammi. [8]

TCSC:tä voidaan mallintaa muuttuvana induktiivisena reaktanssina ja rinnan kytkettyinä kondensaattorina. TCSC:n induktiivinen reaktanssi saadaan laskettua kaavalla

$$\frac{1}{x_{LT}(\alpha)} = \frac{1}{x_{CT}} - \frac{1}{x_{TCSC}(\alpha)}, \quad (14)$$

jossa $x_{TCSC}(\alpha)$ on haluttu TCSC:n tuottama sarjakompensaatio.

TCSC:n ja siirtoverkon malli dq-tasossa on esitetty kuvassa 17. Kuvasta voidaan muodostaa Kirchhoffin jännite- ja virtalaella TCSC:n kompensoiman siirtoverkon tilayhtälöt

$$\dot{\mathbf{x}}_{Tline} = \mathbf{A}_{Tline} \mathbf{x}_{Tline} + \mathbf{B}_{Tline} \mathbf{U}_{Tline} \quad (15)$$

$$\mathbf{x}_{Tline} = [i_{lq} \ i_{ld} \ v_{CTq} \ v_{CTd} \ i_{LTq} \ i_{LTd}]^T \quad (16)$$

$$\mathbf{U}_{Tline} = \left[\frac{(v_{qs} - E_{Bq})}{X_L} \ \frac{(v_{ds} - E_{Bd})}{X_L} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \right]^T, \quad (17)$$

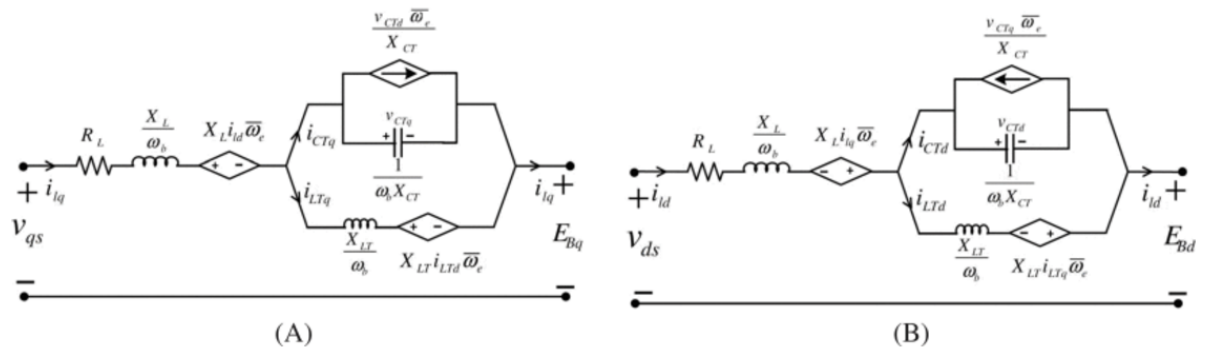
jossa i_{lq} ja i_{ld} ovat siirtoverkon dq-tason virtoja, v_{CTq} ja v_{CTd} ovat TCSC:n dq-tason jännitteitä, i_{LTq} ja i_{LTd} ovat TCSC:n kelan dq-tason virtoja, v_{qs} ja v_{ds} ovat generaattorin staattorin dq-tason jännitteet sekä E_{Bq} ja E_{Bd} ovat äärettömän kiskon dq-akselin jännitteet.

\mathbf{A}_{Tline} ja \mathbf{B}_{Tline} ovat matriiseja

$$A_{Tline} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{X_L} & \bar{\omega}_e & -\frac{1}{X_L} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\omega}_e & -\frac{R_L}{X_L} & 0 & -\frac{1}{X_L} & 0 & 0 \\ X_{CT} & 0 & 0 & -\bar{\omega}_e & -X_{CT} & 0 \\ 0 & X_{CT} & \bar{\omega}_e & 0 & 0 & -X_{CT} \\ 0 & 0 & \frac{1}{X_{LT}} & 0 & 0 & \bar{\omega}_e \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{X_{LT}} & \bar{\omega}_e & 0 \end{bmatrix} \text{ ja}$$

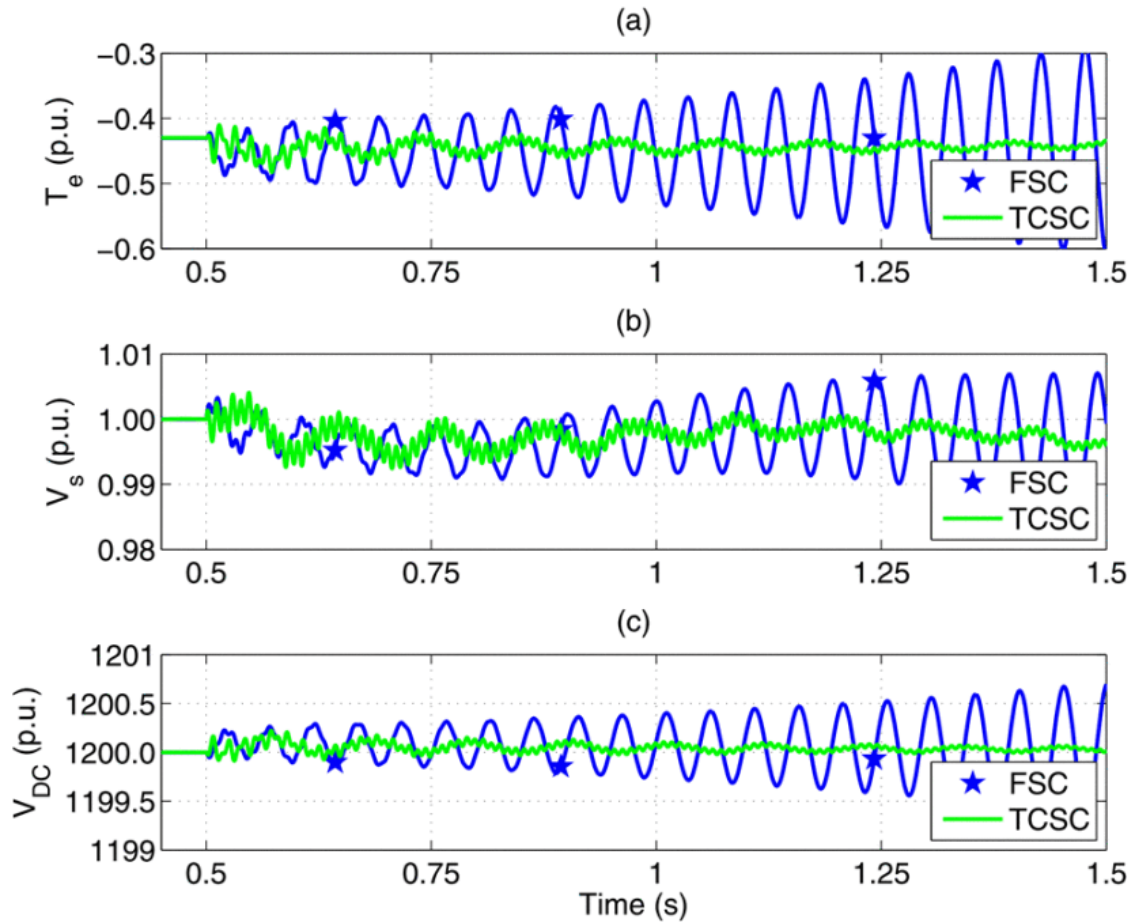
$$B_{Tline} = \begin{bmatrix} \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

joissa R_L on siirtolinjan resistanssi, X_L on siirtolinjan reaktanssi, $\bar{\omega}_e$ on pyörivän dq-akselin taajuus, X_{CT} on TCSC:n kondensaattorin reaktanssi, X_{LT} on TCSC:n kelan muuttuva reaktanssi ja ω_b on perustaajuus. [23]



Kuva 17. TCSC ja siirtoverkko dq-tasossa. [23]

Artikkelissa [23] simuloitiin TCSC:n toimintaa IGE:n suodattamiseen. Simuloinnissa systeemi on stabiili 50 %:n kompensatiotasolla, mutta ajanhetkellä 0.5s kompensatiotasoa nostettiin 55 %:in, jolloin sarjakompensoitu systeemi meni epästabiiliksi. Simuloituja suureita olivat sähköinen momentti, generaattorin jännite ja DC-tason jännite. Simulaation tulokset on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Sähköinen momentti T_e , generaattorin jännite V_s ja DC-tason jännite V_{DC} . [23]

Simuloinneista käy ilmi, että TCSC suodattaa hyvin IGE:n aiheuttamat värähtelyt. Kuvasta huomataan myös, että TCSC:n suodattaa hitaammin korkeamman taajuuden värähtelyt verrattuna sarjakondensaattoriin. Dokumentissa [18] todettiin TCSC:n myös pystyvän suodattamaan vääntävää vuorovaikutusta. Artikkelissa tosin mainittiin, että TCSC saattaisi tarvita rinnalle vielä erillisen säätöjärjestelmän. Vaikkakin TCSC ja muut FACTS-laitteet ovat tuulivoimalan sarjakompensoinnin kannalta joustavampia, ne ovat myös huomattavasti kalliimpia verrattuna pelkkään sarjakondensaattoriin. [23]

5. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoitus oli kertoa alisynkronisista värähtelyistä verkkoon kytketyissä tuulivoimaloissa. Aluksi käsiteltiin tuulivoimaloiden eri tyyppisiä, jonka jälkeen siirryttiin alisynkronisen resonanssin eri tyyppisiin ja niiden vaikutuksiin tuulivoimalalle. Lopuksi tutkittiin alisynkronisen värähtelyn suodattamista. Alisynkroniset värähtelyt voidaan jakaa kolmeen eri osioon, joista kaikkia käsiteltiin tässä työssä. Alisynkroniset värähtelyt tuulivoimaloissa saivat huomiota Texasissa sattuneen alisynkronisen resonanssiin liittyvän onnettomuuden jälkeen elokuussa vuonna 2009.

Alisynkroniseen resonanssiin liittyvä tutkimus on keskittynyt eri suodatusmetodien kehittämiseen. Alisynkronista resonanssia voidaan suodattaa useilla eri menetelmillä, joista yleisimmät ovat eri FACTS-laitteet ja konverttereiden säätömenetelmät. Myös muita menetelmiä on tutkittu, kuten tässäkin työssä mainittua alisynkronisen taajuuden relettä. Tässä työssä lähempi tarkastelu kohdistui tyristoriohjattuun sarjakondensaattoriparistoon alisynkronisen resonanssin suodattamisessa. TCSC koostuu kahdesta vastarinnan kytketystä tyristorista, kelasta ja niiden kanssa rinnalla olevasta kondensaattorista. Sen toiminta perustuu tyristorien liipaisukulman säätämiseen, jolloin TCSC:n reaktanssi on muunneltavissa. Tyristoriohjattu sarjakondensaattoriparisto osoittautui suodattamaan epätahti-generaattorivaikutusta ja vääntävää vuorovaikutusta hyvin. Se tosin suodatti korkeataajuisia värähtelyjä hitaammin pelkkään sarjakondensaattoriin verrattuna. TCSC saattaa siksi tarvita rinnalleen myös jonkin avustavan säätöjärjestelmän varsinkin, jos alisynkroniset värähtelyt ovat voimakkaita.

Uutta sähköverkkoa tai siirtolinjaa suunnitellessa kannattaa siis tutkia eri mahdollisuuksia verkon kapasiteetin nostattamiseksi sarjakondensaattoreiden sijaan. Jotta saataisiin hyödynnettyä sarjakondensaattorin etuja sekä suodattaa alisynkronista resonanssia, sarjakondensaattorit voitaisiin korvata FACTS-laitteistolla. Vaikka FACTS-laitteita ja niiden mahdollisuuksia suodattaa alisynkronisia värähtelyjä on tutkittu paljon, ne ovat kuitenkin huomattavan kalliita. Sarjakondensaattorin korvaaminen FACTS-laitteistolla saattaa olla kuitenkin huomattava lisäkustannus.

LÄHTEET

- [1] World Wind Energy Association 2016 Half-Year Report, World Wind Energy Association, <http://www.wwindea.org/wwea-half-year-report-worldwind-wind-capacity-reached-456-gw/>.
- [2] VTT No title, VTT, <http://www.vtt.fi/palvelut/v%C3%A4h%C3%A4hiilinen-energia/tuulivoima/suomen-tuulivoimatilastot/>.
- [3] V. Preciado, M. Madrigal, E. Muljadi, V. Gevorgian, Harmonics in a wind power plant, 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-5.
- [4] Global wind energy council Global wind statistics 2016, http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2016_EN_WEB.pdf.
- [5] O. Anaya-Lara, Wind energy generation : modelling and control, John Wiley & Sons, Chichester, U.K, 2009, 269 pages p.
- [6] J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers, Wind energy explained : theory, design and application, Wiley, Chichester, 2002, 577 sivua p.
- [7] A. Betz, Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren, 1920, .
- [8] V.B. Virulkar, G.V. Gotmare, Sub-synchronous resonance in series compensated wind farm: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 55, 2016, pp. 1010-1029.
- [9] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, 2005, .
- [10] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. W. Bindner, P. E. Sørensen, B. Bak-Jensen, Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines, Technical University of Denmark, 2002, .
- [11] F.B. F. Iov, Power Electronics Control of Wind Energy in Distributed Power Systems, in: T. J. Hammons (ed.), Renewable Energy, InTech, 2009, pp. 333.
- [12] F. Blaabjerg, Z. Chen, R. Teodorescu, F. Iov, Power Electronics in Wind Turbine Systems, Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International, pp. 1-11.
- [13] Proposed Terms and Definitions for Subsynchronous Oscillations, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, Iss. 2, 1980, pp. 506-511.
- [14] A. E. Leon, J. A. Solsona, Sub-Synchronous Interaction Damping Control for DFIG Wind Turbines, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, Iss. 1, 2015, pp. 419-428.

- [15] L. Fan, R. Kavasseri, Z. L. Miao, C. Zhu, Modeling of DFIG-Based Wind Farms for SSR Analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, Iss. 4, 2010, pp. 2073-2082.
- [16] H. A. Mohammadpour, E. Santi, Sub-synchronous resonance analysis in DFIG-based wind farms: Definitions and problem identification Part I, 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 812-819.
- [17] L. Wang, X. Xie, Q. Jiang, H. Liu, Y. Li, H. Liu, Investigation of SSR in Practical DFIG-Based Wind Farms Connected to a Series-Compensated Power System, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, Iss. 5, 2015, pp. 2772-2779.
- [18] R. K. Varma, Y. Semsedini, S. Auddy, Mitigation of subsynchronous oscillations in a series compensated wind farm with Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), 2007 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, pp. 331-337.
- [19] Reader's guide to subsynchronous resonance, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, Iss. 1, 1992, pp. 150-157.
- [20] G. D. Irwin, A. K. Jindal, A. L. Isaacs, Sub-synchronous control interactions between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems, 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-6.
- [21] C. Zhu, L. Fan, M. Hu, Control and analysis of DFIG-based wind turbines in a series compensated network for SSR damping, IEEE PES General Meeting, pp. 1-6.
- [22] K. Narendra, D. Fedirchuk, R. Midence, N. Zhang, A. Mulawarman, P. Mysore, V. Sood, New microprocessor based relay to monitor and protect power systems against sub-harmonics, 2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference, pp. 438-443.
- [23] H. A. Mohammadpour, E. Santi, Sub-synchronous resonance analysis in DFIG-based wind farms: Mitigation methods TCSC, GCSC, and DFIG controllers Part II, 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1550-1557.
- [24] S. Kuusinen, Tyristorihjatus sarjakondensaattoripariston reaaliaikaisen stjrjestelmn toiminnallisuuksien kehittminen : diplomity, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2009, 94 lehte p.