



Energimyndigheten

VINDKRAFT – 5/01

Minimering av nätförluster för grupper av vindkraftverk

Inom ramen för Elforsks vindkraftprogram har projekten ”Vindkraft i lokala och regionala nät” och ”Optimering av nätanslutning för grupper av vindkraftverk till havs och på land” utgjort del av Åke Larssons doktorsexamen vid Chalmers, Elektetik. Föreliggande rapport, som avser minimering av nätförluster för grupper av vindkraftverk till havs och på land, är den sista delrapporten från detta projekt.

Sammanfattning

Som ett led i att optimera nätanslutningen bör förlusterna minimeras. Ett sätt att reducera förlusterna är att styra den reaktiva effekten. Den reaktiva effekten för ett enskilt vindkraftverk går att göra styrbar på olika sätt. En utredning av de olika sättens fördelar och nackdelar är gjord. Resultaten visar att tyristorkopplade kondensatorbatterier är mest relevanta vid kompensering av enskilda verk, medan mer avancerade utrustningar som SVC och VSC kan vara intressanta alternativ vid stora grupper av verk. Dock använder dagens vindkraftverk kontaktorkopplade kondensatorer.

Vidare har möjligheten till en samordnad eller överordnad styrning av grupper av vindkraftverk undersökts. När flera vindkraftverk idag placeras i en grupp styrs varje vindkraftverk autonomt, dvs. det enstaka vindkraftverket tar inte hänsyn till de andra verken. En samordnad styrning kan minska nätpåverkan genom att det totala antalet start och stopp reduceras. En ytterligare fördel med samordnad styrning är att den reaktiva effekten vid en grupp av vindkraftverk kan samordnas med transformatorernas lindningsomkopplare i det överliggande nätet. På så sätt kan spänningsvariationerna minskas samtidigt som antalet omkopplingar hos transformatorernas lindningskopplare kan reduceras.

Andelen vindkraftverk som arbetar med variabelt varvtal ökar. Med det variabla varvtalet följer användandet av kraftelektronik vilket i sin tur ger strömövertoner. I kabelnät finns goda möjligheter att ansluta vindkraftverk med omriktare utan extra filter utöver det vanliga lågpasfiltret. Dock bör man med hänsyn till resonansstoppar välja en switchfrekvens i omriktaren över 2,5 kHz. Impedansförhållandet i luftledningarna gör att summan av övertonerna blir avsevärt större och det är generellt inte möjligt att ansluta flera vindkraftverk utan att använda filter. Att använda filter för att reducera förluster är dock inte ekonomiskt motiverat.

December 2001

Styrning av reaktiv effekt

Det finns i huvudsak tre sätt att producera reaktiv effekt: kondensatorer, synkronmaskiner och statiska omriktare. Kondensatorer kan anslutas både som shunt och i serie medan synkron-maskiner och statiska omriktare anslut som shunt.

Shuntkompensering med kondensatorer kan göras på flera olika sätt. Man kan ha dem fast kopplade till nätet, kopplade med hjälp av kontaktorer eller tyristorer. Kondensatorer som kopplas till nätet med hjälp av kontaktorer är avsedda att kopplas några enstaka gånger per dygn. Dessa är främst avsedda för statisk kompensering. Detta innebär att de ger en i det närmaste lika stor spänningsökning oberoende av om nätet är obelastat eller fullbelastat. En nackdel med shuntkompensering är att den producerade reaktiva effekten är proportionell mot spänningen i kvadrat, vilket innebär att det genereras minst reaktiv effekt när spänningen är som lägst. Detta är en klar nackdel eftersom det är när spänningen är som lägst som behovet av reaktiv effekt är som störst, beroende på att den då behövs för att kunna höja upp spänningen igen.

Kondensatorer som kopplas till nätet med tyristorer kan kopplas in och ur mycket snabbt, i millisekundsområdet. Dessa kan användas både för statisk och dynamisk kompensering. SVC är en generell benämning för olika metoder för dynamisk kompensering, vilka kan användas var för sig eller i mer eller mindre komplexa kombinationer. På detta sätt kan man åstadkomma allt från en till- och frånkopplingsbar kondensator till steglöst styrda system med mycket avancerad styrning för att både ta och ge reaktiv effekt. SVC innefattar:

- brytarkopplade kondensatorer (MSC)
- tyristorkopplade kondensatorer (TSC)
- tyristorreglerade reaktorer (TCR)
- tyristorkopplade reaktorer (TSR)

Antingen används dessa enheter var för sig eller i kombinationer. Nedan följer en kort sammanfattning av de olika metoderna.

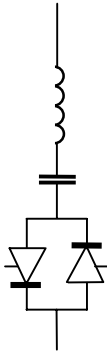
Brytarkopplade kondensatorer (MSC)

MSC är en avstämmd gren som består av ett kondensatorbatteri och en reaktor. Den är avsedd att kopplas max ett fåtal gånger under dygnet eftersom koppling utförs av effektbrytare. Syftet med MSC är att tillgodose det reaktiva effektbehovet under stationära förhållanden.

Tyristorkopplade kondensatorer (TSC)

En TSC (eng. TSC=Thyristor Switched Capacitor) är enhet bestående av kondensatorer och tyristorer för automatisk stegvis styrning. Vanligtvis består en TSC av ett antal parallellanslutna enheter av varierande storlek. Figur 1 visar en sådan enhet, där varje enhet består av en kondensator som kopplas till och från nätet oberoende av andra enheter med hjälp av ett par antiparallellkopplade tyristorer, på så vis kan man hela tiden åstadkomma bästa möjliga kompensering. Tyristorerna styrs av en mikroprocessorbaserad kontrollenhet som styr tyristorerna så att kopplings transienter undviks vid både in och urkoppling. Kondensatorbatterierna förses

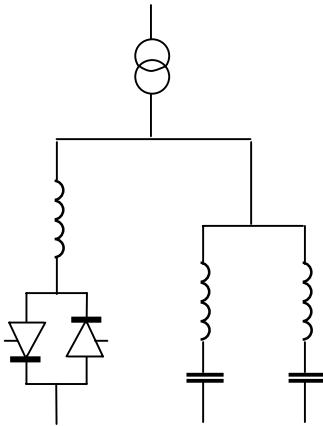
ofta med seriereaktorer för att förhindra resonans mellan nätet och kondensatorbatterierna.



Figur 1: Figuren visar en TSC-konfiguration bestående av en kondensator i serie med en reaktor för att erhålla filterverkan.

Tyristorreglerade reaktorer (TCR)

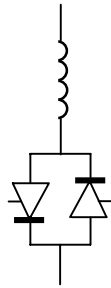
En TCR (eng. Thyristor Controlled Reactor) består av en reaktor i serie med ett par antiparallellkopplade tyristorer. Reaktorn kan styras så att en kontinuerlig styrning av den reaktiva effekten erhålls. Styrningen medför dock att övertonsströmmar genereras. För att ta bort dessa övertonsströmmar brukar ett filter anslutas med en TCR, se figur 2.



Figur 2: Figuren visar en TCR-konfiguration parallellt med ett filter.

Tyristorkopplade reaktorer (TSR)

Ett sätt att komma från övertonen är att koppla reaktorer i steg. En TSR (eng. TSR=Thyristor Switched Reactor) består av en reaktor i serie med ett par antiparallellkopplade tyristorer. Reaktorn kan kopplas stegvis till nätet med hjälp av tyristorerna. Om de kopplas in när nätspänningen har sitt toppvärde, så får man idealt sett en transientfri ström genom reaktorn. I och med att man alltid kopplar in när nätspänningen har sitt toppvärde och strömmen därmed sin nollgenomgång, så kommer inga övertonsströmmar att genereras. Figur 3 visar en TSR-konfiguration.



Figur 3: Figuren visar en TSR-konfiguration.

Seriekompensering

Seriekompensering är inte så vanlig som shuntkompensering, men används både i transmissionssystem och distributionssystem. I transmissionssystem kopplas seriekondensatorerna in på ledningen för att minska den effektiva reaktansen i ledningen, på så sett ökas överföringsförmågan och minskas förlusterna på ledningar. I distributionssystem används seriekondensatorerna främst till att förbättra spänningsstabiliteten i nätet. För vindkraftverk är det dock den av seriekondensatorn producerade reaktiva effekten som är intressant.

Om seriekompensering används vid vindkraftverk bör den reaktiva effektförbrukningen i tomgång kompenseras bort med shuntkondensatorer och resterande reaktiva effektförbrukningen med seriekondensatorer. Eftersom den reaktiva effekten i tomgång hela tiden är konstant är det inga problem att dimensionera en shuntkondensator som klarar detta. Serie-kondensatorns uppgift blir då att kompensera bort den ökning i reaktiv effektförbrukning från det att vindkraftverket går i tomgång till dess det arbetar vid märkdrift, ökningen i reaktiv effektkonsumtion motsvarar 25% av märkeffekten. På detta sätt erhålls även minimal spänningsökning i mottagarändan.

Statiska omriktare

Omriktare som används för reaktiv effektkompensering är spänningsstyva självkommuterande omriktare. Dessa kan både uppta och avge reaktiv effekt. Spänningsstyva självkommuterade omriktare, VSC (eng. Voltage Source Converter), som använder sig av PWM-teknik har idag ett brett användningsområde, det kanske vanligaste området är för styrning av växelströmsmotorer. VSC:er används både inom transmission och distribution, som lik- och växelriktare i HVDC system, som reaktiv effektkompensator och för att ansluta olika sorters laster eller spänningskällor till nätet.

Reaktiv effektkompensering med självkommuterade omriktare är en mycket snabb kompenseringmetod. Svarstiden begränsas i huvudsak av switchfrekvensen och storleken på reaktorn, men i de flesta fall blir svarstiden lägre än 5 ms. Den snabba reaktionstiden gör självkommuterade omriktare intressanta i vindkraftssammanhang.

Sammanställning av kompenseringsutrustning

Tabell 1: Tabellen visar olika tänkbara lösningar för reaktiv effektkompensering.

Lösningar	Fördelar	Nackdelar	Kommentar
Shuntkondensator	<ul style="list-style-type: none"> • Billig • Förbättrar effektfaktorn 	<ul style="list-style-type: none"> • Långsam om den kopplas med kontaktorer • Resonans 	<ul style="list-style-type: none"> • Spänningsberoende
Seriekondensator	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisk reglering • Snabb • Spännings stabiliserande 	<ul style="list-style-type: none"> • Resonans 	<ul style="list-style-type: none"> • Serie-kondensatorer behöver mycket skyddsutrustning • Kan inte alltid ges önskad prestanda • ”Strömberoende”
Synkronmaskin	<ul style="list-style-type: none"> • Inga problem med resonans • Klarar av leverera stora effekter 	<ul style="list-style-type: none"> • Långsam 	<ul style="list-style-type: none"> • Synkronmaskinen är för långsam för vindkraftsammanhang • Används för att kompensera bort stora mängder reaktiv effekt
SVC	<ul style="list-style-type: none"> • Kan både avge och uppta reaktiv effekt. • Mycket snabb • Olika konfigurationer • Förbättrar elkvalitén 	<ul style="list-style-type: none"> • Dyr 	<ul style="list-style-type: none"> • Kan komma i fråga på vindkraftsparker • Kopplas in på högspänningssidan
VSC	<ul style="list-style-type: none"> • Mycket snabb, svarstid lägre än 5 ms • Kan både avge och uppta reaktiv effekt • Transistorteknik 	<ul style="list-style-type: none"> • Dyr! 	<ul style="list-style-type: none"> • Endast aktuell vid parker p.g.a. priset • Placeras på högspänningssidan • Den snabbaste kompenseringsmetoden • Dagens utrustning kan leverera ca 100 MVAR

Tabell 2: Olika SVC-konfigurationer.

SVC	Fördelar	Nackdelar	Kommentar
Fast kondensator	<ul style="list-style-type: none"> • Enkel • Få komponenter • Billig • Lång livslängd 	<ul style="list-style-type: none"> • Konstant reaktiv effektproduktion • Ingen styrning • Kan ge onödiga förluster 	<ul style="list-style-type: none"> • Används ofta med en reaktor som konsumerar överbliven reaktiv effekt
Brytarkopplade kondensatorer	<ul style="list-style-type: none"> • Enkel • Få komponenter • Billig • Lång livslängd 	<ul style="list-style-type: none"> • Långsam • Kopplas med effektbrytare 	<ul style="list-style-type: none"> • Avsedd att kompensera under stationära förhållanden
Tyristorkopplade kondensatorer	<ul style="list-style-type: none"> • Som ovan samt: • Kopplas oberoende av andra enheter • Kopplingstransienter undviks • Lång livslängd 	<ul style="list-style-type: none"> • Kopplas stegvis 	<ul style="list-style-type: none"> • Används ofta tillsammans med TSR eller TCR
Tyristorreglerade reaktorer	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuerlig styrning 	<ul style="list-style-type: none"> • Genererar övertonsströmmar 	<ul style="list-style-type: none"> • Används tillsammans med övertonsfilter
Tyristor-kopplade reaktorer	<ul style="list-style-type: none"> • Transientfri koppling 	<ul style="list-style-type: none"> • Kopplar stegvis 	

Styrning av reaktiv effekt finns mera utförligt beskriven i examensarbetet ”Kompensering av reaktiv effekt vid vindkraftverk”, se referens 6.

Överordnad styrning av grupper av vindkraftverk

När flera vindkraftverk idag placeras i en grupp styrs varje vindkraftverk autonomt, dvs. det enstaka vindkraftverket tar inte hänsyn till de andra verken. En samordnad styrning skulle kunna minska nätpåverkan genom att det totala antalet start och stopp reduceras.

För att reducera kostnad och för att utnyttja marken i områden med god vindpotential placeras ofta vindkraftverk i grupper. Alla vindkraftverk i en grupp ansluts då oftast till samma punkt i nätet. Nätet i anslutningspunkten måste dimensioneras för den påverkan som alla vindkraftverken tillsammans ger. En sådan påverkan är flicker. Vindkraftverk producerar flicker både vid kontinuerlig drift och vid start. Den flickerpåverkan som vindkraftverken ger under drift är inte beroende av flickerpåverkan under start. Dimensioneringskriteriet för nätet blir följaktligen den högsta flickerpåverkan som vindkraftverken ger, oavsett om det är under drift eller under start.

För att klara flickerpåverkan från en grupp av likadana vindkraftverk under drift måste kortslutningskvoten dimensioneras enligt följande:

$$\frac{S_k}{S_{ref}} = \frac{1}{P_{lt}} \cdot c_f(\psi_k) \cdot \sqrt{k} \quad (1)$$

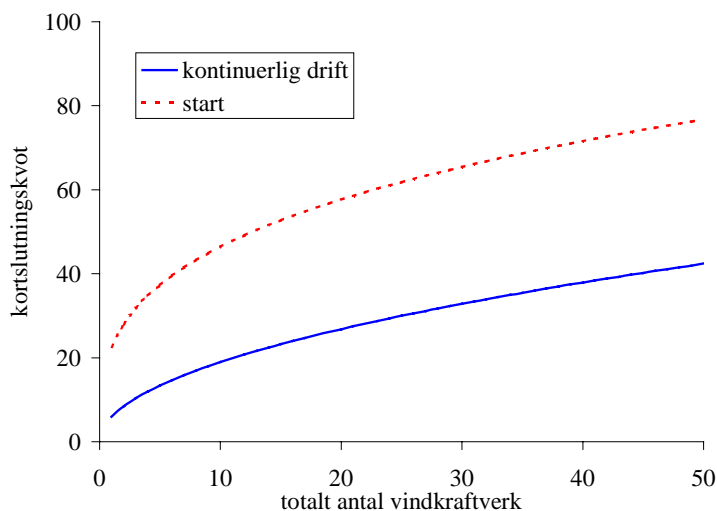
där kortslutningskvoten är nätets kortslutningseffekt, S_k , dividerat med märkeffekten från ett vindkraftverk, S_{ref} . $c_f(\psi_k)$ är uppmätt flickerkoefficient och k är det totala antalet vindkraftverk. Flicker mäts i enheten P_{lt} . Som framgår av ekvation 1 ökar kravet på kortslutningskvot vid kontinuerlig drift med kvadratroten av det totala antalet vindkraftverk.

På samma sätt kräver start av en grupp av likadana vindkraftverk en kortslutningskvot motsvarande:

$$\frac{S_k}{S_{ref}} = 8 \cdot \frac{1}{P_{lt}} \cdot k_f(\psi_k) \cdot N^{\frac{1}{3.2}} \cdot \sqrt[3.2]{k} \quad (2)$$

där $k_f(\psi_k)$ är uppmätt flickerstegsfaktor och N är antalet start/stop eller byte av generator i vindkraftverket, under en period av två timmar. Som framgår av ekvation 2 ökar kravet på kortslutningskvot med lite mer än kubikroten av antalet vindkraftverk till följd av start.

Figur 4 visar erforderlig kortslutningskvot som funktion av det totala antalet vindkraftverk för flicker producerat under kontinuerlig drift och under start, dvs. ekvationerna 1 och 2. I ekvationerna är flickervärdet $P_{lt}=1$. Som framgår av figur 4 blir starten dimensionerande. En överordnad styrning av antalet starter skulle i detta fall minska behovet av kortslutningseffekt med avseende på flicker. Parametrarna är hämtade från ett dantskiltverk 600 kW överstegringsreglerat vindkraftverk som arbetar med konstant varvtal. Det aktuella vindkraftverket har en flickerkoefficient $c_f=6$ och en flickerstegsfaktor $k_f=1,3$. Parametrarna i exemplet är representativa för överstegringsreglerade vindkraftverk som arbetar med konstant varvtal, en relativt låg flickerkoefficient under drift och en hög flickerstegsfaktor vid start.



Figur 4: Erforderlig kortslutningskvot som funktion av antalet överstegringsreglerade vindkraftverk som arbetar med konstant varvtal vid start (streckad linje) och drift (heldragen linje).

När det gäller bladvinkelreglerade vindkraftverk som arbetar med konstant varvtal är förhållandet det motsatta. Bladvinkelreglerade vindkraftverk har, i jämförelse med överstegringsreglerade verk, i allmänhet en hög flickerkoefficient och en låg flickerstegfaktor. Detta medför att flicker som produceras under drift blir dimensionerande. En överordnad styrning av antalet starter minskar i sådana fall inte behovet av kortslutningseffekt.

Flickerpåverkan under start och vid drift finns utförligt beskrivna i artiklarna "Flicker Emission of Wind Turbines During Continuous Operations", och "Flicker Emission of Wind Turbines Caused by Switching Operations" se förteckning i slutet av denna rapport.

Samordning av styrning av grupper av vindkraftverk och lindningskopplare

Införandet av vindkraft i befintliga distributionsnät leder, som följd av den varierande effektproduktion vindkraftverk har, i allmänhet till fler och i vissa fall ökade spänningsvariationer. Detta ger i sin tur fler omkopplingar i transformatorernas lindningskopplare. Tanken med denna frågeställning var att undersöka om styrningen av vindkraftverkens reaktiva effekt kan samordnas med lindningskopplarna. En litteraturstudie visar dock att problem med onödiga omkopplingar redan existerar, där bland annat reaktiv effektkompensering i det överliggande nätet påverkar lindningskopplarna i den underliggande nätet. Detta i nät som saknar vindkraft. Studien visar även att det går att minska spänningsvariationerna och antalet omkopplingar om rätt kontrollstrategi används. Val av kontrollstrategi bör dock utredas från fall till fall.

Syftet med spänningsreglering i distributionsnät är att kompensera för spänningsfall förorsakade av lastvariationer. I ett distributionsnät finns ett antal lindningskopplare på olika spänningsnivåer, dessa har till uppgift att reglera spänningen på nedspänningssidan av transformatorn. Spänningsregleringen sker med hjälp av en regulator som via en lindningskopplare kopplar in eller ut några extra lindningsvarv på transformatorn. Regulatorn till en lindningskopplare styrs enbart på lokal spänningsmätning, någon samordning mellan olika spänningsnivåer eller brancher i nätet sker ej. Detta leder till att lindningskopplare på olika spänningsnivåer kan motverka varandra. Regulatorn består normalt av en enkel integrator med tidsfördröjning där tidsfördröjningens uppgift i första hand är att reducera störningar. Det är vanligt att alla spänningsregulatorer i ett distributionsnät har samma tidsfördröjning.

I [1] beskrivs hur antalet omkopplingar hos lindningskopplingar inom Sydkrafts distributionsområde kunde reduceras med över 20%. Mätningar hade visat att det förekom många onödiga omkopplingar, bland annat innebar inkoppling av kondensatorbatterier på transmissionsnivå att lindningskopplarna på distributionsnivå måste justera spänningen. Simuleringar visade att de onödiga omkopplingarna kunde undvikas genom att regulatorerna justerades så att tidsfördröjningen gradvis valdes längre för lägre spänningsnivåer. Mätningar på en linje i Tommelilla visar att antalet omkopplingar kunde minskas med 28%.

Vid lokal energiproduktion ändrar nätet karaktär från att vara passivt till att bli aktivt. Distributionsnät har traditionellt sett varit passiva, vilket innebär att de inte har någon lokal energiproduktion utan endast distribuerar energi från transmissionsnätet till lasterna. Ett flertal artiklar visar att lokal energiproduktion påverkar både spänningsregleringen och förlusterna i distributionsnätet. I [2] konstateras att den existerande spänningsregleringen är konstruerad för passiva distributionsnät och att vindkraftverk genom sin varierande effektproduktion skapar fler och större spänningsvariationer. Spänningsregleringen kan bli svår eller till och med omöjlig om ledningsimpedansen mellan en station och ett vindkraftverk är stor. I [3] beskrivs en studie av statisk kompensering av reaktiv effekt till en grupp av vindkraftverk. I studien undersöktes flera olika kontrollstrategier för den statiska kompenseringen med avseende på spänningsreglering och förlustreducering. Resultaten visar att förlusterna kan minimeras om den reaktiva effektförbrukningen hela tiden är noll ($\cos\phi=1$). Nackdelen med denna kontrollstrategi är att den kan leda till stora spänningsvariationer under de tillfällen när näten är hårt eller lätt lastade. En annan kontrollstrategi som undersökts är spänningsreglering. Denna kontrollstrategi ger något ökade förluster i nätet men förbättrar spänningsregleringen i nätet och gör det möjligt att ansluta fler vindkraftverk till nätet utan att nätförstärkning behöver företas.

Övertonsförluster i filter, kablar och transformatorer

Andelen vindkraftverk som arbetar med variabelt varvtal ökar. Med det variabla varvtalet följer användandet av kraftelektronik vilket i sin tur ger strömövertoner. För grupper av vindkraftverk till havs diskuteras även användandet av HVDC-teknik. Den gamla HVDC- och omriktartekniken byggde på att tyristorventiler användes. Omriktare som använder tyristorer kallas ibland nätkommuterade omriktare. Nätkommuterade omriktare är relativt billiga i jämförelse med tvångskommuterade omriktare, detta beror framför allt på att tyristorerna är billigare än IGBT-transistorerna. Nätkommuterade omriktare har dock två egenskaper som bör beaktas. För det första genererar omriktaren stora mängder övertoner i strömmen och för det andra förbrukar den reaktiv effekt. En sexpuls nätkommuterad omriktare producerar udda strömövertoner som inte är en multipel av tre. Det relativa RMS-värdet av strömövertonerna är $I(n)=1/n$ där $n=6k \pm 1$, $k=1, 2, 3 \dots$. Den första strömövertonen blir alltså av ordningen 5 och är fem gånger mindre än grundtonen (20%). Den andra strömövertonen är på samma sätt av ordningen 7 och sju gånger mindre än grundtonen.

Idag används företrädesvis IGBT-ventiler, genom dessa kan en hög omkopplingsfrekvens användas. Den högre omkopplingsfrekvensen leder till strömövertoner som är mindre i amplitud men som har högre frekvens. Omriktare med IGBT-ventiler kallas tvångskommuterade omriktare. En tvångskommuterad omriktare har fördelen att den reaktiva effekten kan styras fritt samt att den genererar färre övertoner i strömmen. Tvångskommuterade omriktare kan antingen styras med pulsbreddsmodulation (PWM) eller pulsamplitudmodulation (PAM), det vanligaste är dock pulsbreddsmodulation. Användandet av pulsbreddsmodulation gör att alla låga strömövertoner elimineras och att den första strömövertonen har en frekvens i närheten av omkopplingsfrekvensen hos IGBT-transistorerna. Omkopplingsfrekvensen kan väljas högt men eftersom förlusterna ökar med ökad frekvens är en omkopplingsfrekvens mellan 1-3 kHz vanlig.

För att förhindra problem med elkvaliteten i nätet måste utbredningen av övertoner undersökas vid nätanslutning av vindkraftverk med omriktare. En sådan utredning kan göras med datorsimuleringsprogram där strömövertoner motsvarande de som ett vindkraftverk genererar injiceras i en representativt nätmodell. I referens [4] presenteras resultaten från en simulering där flera vindkraftverk med tvångskommuterade omriktare anslutits till ett nät. Nätet består av en 60/10 kV huvudstation med ett antal 10 kV radialer. 10 kV radialerna i nätet finns i två utföranden, ett med luftledning och ett med kabel. Resultaten visar att det i kabelnätet finns goda möjligheter att ansluta vindkraftverk med omriktare utan att använda filter. Det bör dock nämnas att ett mindre lågpassfilter alltid bör vara anslutet på en omriktares utgång. Kablarnas stora kapacitans och dess frekvensberoende induktans medverkar till att utbredningen av övertoner från flera vindkraftverk hålles inom acceptabla nivåer. Dock bör man med hänsyn till resonanstoppar välja en switchfrekvens i omriktaren över 2,5 kHz. I luftledningsnät är situationen dock annorlunda. Impedans-förhållandet i luftledningarna gör att summan av övertonerna blir ansevärt större både på 10 kV nivå och hos förbrukarna. Det är generellt inte möjligt att ansluta flera vindkraftverk utan att använda filter.

Att använda filter för att reducera förluster är dock inte ekonomiskt motiverat. Detta har flera studier bekräftat, ett sådant exempel är en fältmätning i ett industrinät som matar en 800 kVA 6-puls diodlikriktare [5]. Industrinätet består av en 6 MW 20/0,4 kV transformator med filter, 5:e och ett 7:e tonen, på sekundärsidan (0,4 kV) av transformatorn. Med filtren urkopplade var spänningsdistorsionen på sekundärsidan $THD_U=5,5\%$ och strömdistorsionen $THD_I=23\%$. Övertonsförlusterna i transformatorn var då 260 W. Med filtren inkopplade minskade spänningsdistorsionen på sekundärsidan till $THD_U=2,7\%$ och strömdistorsionen till $THD_I=6\%$. Övertonsförlusterna i transformatorn blev då 20 W, men till det kom då även förluster i filtren som enligt tillverkaren är 580 W för 5:e tons filtret och 210 W för 7:e tons filtret.

Referenser

- [1] Larsson, M., Karlsson, D., "Coordinated Control of Cascaded Tap Changer in a Radial Distribution Network", Stockholm Power tech, June 18-22, 1995, pp 686 - 691.
- [2] Salman, S.K., "The Impact of Embedded Generation on Voltage Regulation and Losses of Distribution Networks", IEE Colloquium, 15 October, 1996.
- [3] Saad-Saoud, Z., Lisboa, M.L., Ekanayake, J.B., Jenkins, N., Strbac, G., "Application of STATCOMs to Wind Farms" IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145, No. 5 September 1998, pp. 511 – 516.
- [4] "Elkvalitet ved nettilslutning af vindmøller, Del 3: Overtoner og driftforhold ved inverttertilsluttede vindmøller", Risø-R-853 (Pt. 3), Forskningscenter Risø, Roskilde, Januar 1996.
- [5] Lundquist, J., "On Harmonic Distortion in Power Systems", Technical Report no 371L, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2001.
- [6] Björklund, P. och Insulán, J., "Kompensering av reaktiv effekt", Examensarbete no 00-64, Institutionen för data och elektroteknik, Lindholmen, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2000.

Internationella artiklar

Följande internationella artiklar har producerats inom ramen för Elforsk-projektet "Vindkraft i lokala och regionala nät" under 1999 och 2000:

Å. Larsson, P Sørensen, F. Santjer, "Grid Impact of Variable-Speed Wind Turbines", European Wind Energy Conference (EWEC '99), Nice, France, 1-5 Mars 1999, Proceedings, p. 786 - 789. Artikeln behandlar elkvaliteten från vindkraftverk med variabelt varvtal. Papperet presenterar mätningar utförda i Sverige och Tyskland på samma typ av vindkraftverk. Mätningarna är analyserade och jämförda med existerande IEC standarder, tonvikten i artikeln ligger på sammanlagringseffekten av flicker och övertoner. Papperet har samförfattats med Poul Sørensen vid Risø National Laboratory i Danmark och Fritz Santjer vid Deutsches Windenergie-Institut i Tyskland.

P Sørensen, G. Gerdes, R. Klosse, F. Santjer, N. Robertson, W. Davy, M. Koulouvari, E. Morfiadakis, Å. Larsson, "Standards for Measurements and Testing of Wind Turbine Power Quality", European Wind Energy Conference (EWEC '99), Nice, France, 1-5 Mars 1999, Proceedings, p. 721 - 724. I artikeln beskrivs det arbete som utförts i EU-projektet "European Wind Turbine Testing Procedure Developments". Målsättningen med projektet var att finna nya rekommendationer för mätning och verifiering av elkvaliteten från vindkraftverk. Under sina tre månader

på Risø National Laboratory arbetade Åke Larsson i detta projekt med analys av vindkraftverk med variabelt varvtal och summering av flicker. Papperet har samförfattats med Poul Sørensen vid Risø National Laboratory i Danmark, Gert Gerdes, Rainer Klosse och Fritz Santjer vid Deutsches Windenergie-Institut i Tyskland, Niel Robertson och Willie Davy vid National Energy Laboratory i Skottland samt Maria Koulouvari och Evangelis Morfiadakis vid Centre for Renewable Energy Sources i Grekland.

Å. Larsson, "Guidelines for Grid Connection of Wind Turbines", 15th International Conference on Electricity Distribution (CIRED '99), Nice, France, 1-4 June, 1999. Artikeln behandlar regler för anslutning av vindkraftverk till nätet. De nya danska och nya svenska reglerna för nätanslutning av vindkraftverk jämförs med en kommande IEC standard, IEC 61 400-21 "Power Quality Requirements for Grid Connected Wind Turbines".

Å. Larsson, "Flicker Emission of Wind Turbines During Continuous Operations", accepterad för publicering i *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2000. Tidsskriftsartikeln presenterar beräkningsmodeller för flicker från vindkraftverk. Framställningen fokuseras kring de teoretiska aspekterna kring flickeralgoritmen, turbinens karaktäristik och flicker vid kontinuerlig drift.

Å. Larsson, "Flicker Emission of Wind Turbines Caused by Switching Operations", submitted to *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2000. Denna tidsskriftsartikel är en utvidgning av tidsskriftsartikeln ovan med avseende på flicker under start av vindkraftverk. Artikeln förklarar startproceduren hos vindkraftverk och härleder ekvationerna för beräkning av flicker under start.

Samtliga artiklar kan hämtas från hemsidan (IEEE-artiklar endast abstract)
<http://www.elkraft.chalmers.se/publications.html>