

Indpasning af vindkraft i elsystemet

Efterhånden som vindkraft dækker en større og større andel af det samlede, danske elforbrug, bliver indpasningen i energisystemet mere og mere afgørende. Indpasning handler både om tilslutning af mølleparker til elnettet og om afsætning af produktionen i systemet.

Vindmøllernes produktion følger vejret og sker ikke altid i takt med forbruget af el. Det skaber en række udfordringer, da elektricitet er noget, der forbruges her og nu. Spørgsmålet bliver, hvordan vi skaber et fleksibelt energisystem, hvor vindmøllestrømmen anvendes på en rationel måde – både teknisk, økonomisk og miljømæssigt.

Fra andre vedvarende energikilder, især solceller, øges elproduktionen ligeledes og både i Danmark og i vores nabolande udbygges med vind og sol. Omstillingen af energisystemet kræver en fleksibel og effektiv anvendelse af den voksende og fluktuerende elproduktion fra vedvarende energikilder.

Vindkraft nu – og i fremtiden

Den langsigtede tendens i retning af større vindkraftproduktion understøttes af EU's målsætninger på klima- og energiområdet. EU's regeringschefer vedtog i oktober 2014 nye mål for EU i 2030, hvor målet er 40 % reduktion af drivhusgasser sammenlignet med 1990 og en samlet europæisk VE-andel på 27 procent.

Målet i Danmark i 2020 er jævnfør den energipolitiske aftale fra 2012 at nå en vinddækning på 50 %. På længere sigt er det målet helt at udfase brugen af fossile brændsler og efter 2020 vil både land- og havmøller komme til at udgøre et centralt element i elforsyningen.

Danmark havde ultimo 2014 en installeret kapacitet på 4.896 MW vindkraft fordelt på 3.625 MW på land og 1.271 MW på havet og vindkraftkapaciteten udgør ca. 40 % af den samlede danske elproduktionskapacitet. Produktionen af strøm fra vindmøller bidrog i 2014 med 39 % af elforbruget og i de seneste år er elproduktionen fra solceller steget til ca. 2 % af elforbruget.

Allerede i dag findes der forskellige virkemidler til indpasning af vindkraft og den danske systemoperatør, Energinet.dk, vurderer, at der med et fleksibelt elmarked og forskellige reguleringsmekanismer indtil nu ikke har været væsentlige problemer med balanceringen af den øgede vindkraftproduktion.

Dog stiller den fortsatte grønne omstilling og de stigende mængder fluktuerende VE-strøm nye udfordringer til indpasningen. Danmark har i mange år været en del af et sammenhængende nordeuropæiske elmarked og i vores nabolande udbygges også kraftigt med vindkraft.

I hovedparten af årets timer er den danske elpris bestemt af naboområderne. Uanset udbygningstakten for de danske vindmøller vil nabolandenes vindplaner betyde at det danske energisystem under alle omstændigheder vil være en del af et større energisystem med væsentlig mere vindkraft end i dag.

Elforbrug og vindkraft

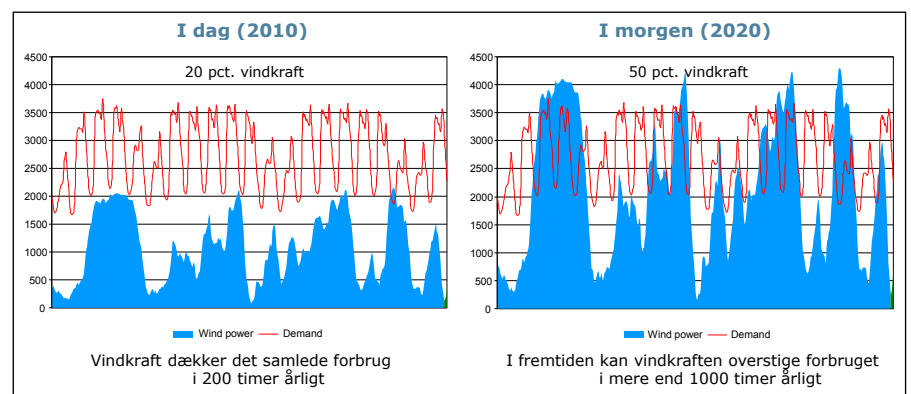
Elforbruget følger en velkendt døgnrytme. Der er spidser om morgenen, når vi står op og arbejdet begynder, og nedgang om natten hvor fabrikker og kontorer er lukket, og hvor folk sover. Desuden er forbruget lavere om sommeren end om vinteren, hvor folk opholder sig mere inden døre, og forbruget af el til lys og varme er større.

Vindkraftens produktion er mere uforudsigelig end elforbruget, men følger dog også nogle overordnede rytmer. F.eks. blæser vinden i Danmark mere om vinteren end om sommeren. Det skyldes klimatiske forskelle i placeringen af højtryk og lavtryk om vinteren henholdsvis om sommeren. Dertil kommer, at der er mere energi i vinden om vinteren, fordi luften er koldere, og derfor vejer mere.

Normalt blæser det desuden mere om dagen end om natten. Det skyldes et lokalt vejrphænomen, nemlig at solen varmer jorden op i løbet af dagen. Jorden afgiver sin varme til luften, og da varm luft er lettere end kold luft, stiger luften over land til vejrs. Herved skabes et undertryk, som får luften, der ligger over det relativt koldere hav, til at bevæge sig ind mod land. Vinden, der kommer ind fra havet, kaldes en søbrise. Generelt producerer vindmøllerne altså mest om vinteren og midt på dagen, når vi også bruger mest el.

I den enkelte time kan vindkraftens produktion naturligvis variere meget i forhold til elforbruget. Som gennemsnit er vindkraftproduktionen dog højere i de timer, hvor også forbruget er højest, og lavest når elforbruget også er lavest. Dette øger vindkraftens værdi for systemet.

Nedenstående figur viser det samlede elforbrug overfor vindkraftproduktionen og illustrerer udfordringen med indpasningen af mere vindkraft. Fra 2010



Elforbrug og vindkraftproduktion (Jylland) ved hhv. 20 og 50 % vindkraftdækning af elforbruget. Kilde: Energinet.dk, november 2012.

og frem til 2020 forventes vi at gå fra en vinddækning på ca. 20 til 50 pct. I en situation med en relativt lav gennemsnitlig vinddækning vil vindkraften kun i relativt få timer om året overstige elforbruget. Med en større andel vindkraft vil antallet af timer, hvor den samlede vindkraftproduktion overstiger elforbruget, øges. Omvendt vil der fortsat være behov for tilførsel af el i de situationer, hvor elforbruget er højt og vindkraftproduktionen er lav.

Figuren peger på to centrale spørgsmål i forbindelse med indpasning af vindkraft:

- 1) Hvordan sikrer vi forsyningen i de timer, hvor elforbruget er højt, og vindmøllerne ikke producerer?
- 2) Hvordan udnyttes situationer med kraftig vind, hvor vindkraftproduktionen overstiger det hjemlige forbrug?

Effektiv anvendelse af vind

For at håndtere eloverløb og sikre forsyningssikkerheden, når det ikke blæser, er der behov for at udvikle et mere fleksibelt elsystem, end det vi kender i dag. Med forskellige indpasningsværktøjer kan man øge anvendelsen af vindkraft og samtidig udnytte vindkraften endnu mere effektivt med både miljømæssige og økonomiske fordele.

Energiscenarier

Som en del af den energipolitiske aftale fra 2012 har Energistyrelsen maj 2014 udarbejdet en energiscenarierapport med analyser af fremtidens energisystem. Scenarierne beskriver forskellige muligheder for udviklingen af et energisystem frem mod 2050. Scenarierne bekræfter, at det både er teknisk muligt og økonomisk overkommeligt at realisere ambitionen om et samfund fri for fossile brændsler i 2050. Omstillingen kræver en øget elektrificering og god sammenhæng mellem de forskellige systemer.

Et af de billigste fossilfri scenarier i Energistyrelsens beregninger er et scenarie med vindkraft som den primære vedvarende energikilde. Denne udviklingsretning kan sikre en høj brændselsforsyningssikkerhed, men kræver også store investeringer i energisystemet for at opnå en god elforsyningssikkerhed. Der er selvsagt usikkerheder i sådanne langsigtede fremskrivninger, især på transportområdet og omkostningerne i scenarierne afhænger bl.a. af udlandets hastighed i omstillingen til vedvarende energi og prisen på biomasse.

Energinet.dks Systemplan 2014 peger også på, at en vindbaseret vej er en samfundsøkonomisk fornuftig vej frem. Generelt er der god økonomi i landvind og på længere sigt kan havvind også tegne til at blive en omkostningseffektiv VE-kilde.

I rapporten "Vindintegration i Danmark - Vindens værdi og tiltag for at sikre den" fra november 2014, har EA Energianalyse vurderet hvilke integrationstiltag, som umiddelbart og med positiv samfundsøkonomi vil kunne udnytte strømmen fra vindmøllerne bedre. Analysen bygger på en samlet vurdering af el- og varmesystemerne i Danmarks og dets nabo-lande frem til 2035.

Analysen peger på følgende integrations-tiltag:

- Udbygning af transmissionslinjer til udlandet
- Fleksible kraftværker, via installation af 500 MW elpatroner i centrale områder
- Varmepumper, via installation af 500 MW store varmpumper i fjernvarmeområder
- Fleksibelt forbrug i industrien

Især store varmpumper i fjernvarmeområder er et effektivt integrationstiltag.

Fem udfordringer ved vindkraft

- a. Et tilstrækkeligt stærkt net til at transportere vindkraften dertil, hvor efterspørgslen er.
- b. Tilgængelige reguleringsressourcer, der håndterer vindens uforudsigelighed (balancering).
- c. Tilstrækkelig fleksibilitet i elsystemet for at håndtere vindkraftens fluktuationer.
- d. Elforsyningen skal også fungere i perioder, hvor det ikke blæser (effekttilstrækkelighed).
- e. Vindkraften skal have størst mulig værdi, også i perioder hvor det blæser (nyttiggøre vinden).

Kilde: "Vindintegration i Danmark - Vindens værdi – og tiltag for at sikre den", EA Energianalyse, november 2014.

I det følgende redegøres der nærmere for forskellige teknologier og indpasningssystemer, der kan bidrage til at skabe bedre balance i elsystemet ved storskala vindkraftindpasning.

Elhandel over landgrænser

Elmarkedet sikrer, at det er teknologier og kraftværker med de højeste produktionsomkostninger, der nedjusterer produktionen for at indpasse de billigste producenter, herunder vindkraft. Da elmarkedet gør det muligt at udveksle el på tværs af landegrænser, vil dansk vindkraft ikke nødvendigvis fortrænge dansk elproduktionen.

Normalt vil kraftværker baseret på olie og gas have de højeste omkostninger. Herefter følger værker fyret med kul, da kul er et billigere brændsel. Kraftvarme-

	Kort sigt	Mellemlangt sigt	Langt sigt
Primært fokus: Balancering af elsystemet	<ul style="list-style-type: none"> • Udbygning af udvekslingsforbindelser • Forstærkning og udbygning af eksisterende net • Nedregulering af produktion vha negative spotpriser 	<ul style="list-style-type: none"> • Geografisk spredning af havmølleparker • Fleksibelt elforbrug • Fleksibel elproduktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Ellagring i brint • Compressed Air Energy Storage • Ellagring i batterier
Primært fokus: Integration af el i andre sektorer	<ul style="list-style-type: none"> • Varmepumper på kraftvarmeværker • Elpatroner på kraftvarmeværker 	<ul style="list-style-type: none"> • Varmepumper i husstande • Plug-in hybridbiler • Elbiler 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrolysebaseret brint i transportsektoren • Elektrolysebaseret brint i gasnettet

anlæg vil normalt være relativt billige i drift, fordi samproduktionen af varme giver en ekstra indtægt.

International handel med strøm giver fordele for alle parter. Det bidrager til at udjævne svingninger i elforbrug og produktion på tværs af landegrænser, og sikrer at det altid, er de billigste anlæg, der er i drift. Nordmænd og svenskere kan bruge vores vindkraft, når den er til stede, og gemme deres egen vandkraft til vinden løjer af. Via elmarkedet fungerer de nordiske vandmagasiner som et billigt og effektivt energilager for dansk vindkraft. Udvekslingen er også god for retning for de danske vindmølleejere, fordi strømmen generelt kan afsættes på et større marked.

Det er en udbredt misforståelse, at Danmark eksporterer strøm til nul kroner, når det blæser. Når elprisen i Danmark er 0 øre, bliver den danske eksportstrøm solgt til den elpris, der gælder i nabolandet. Prisforskellen mellem Danmark og nabolandet deles mellem de to systemsvar, og den danske del indkasseres derfor af Energinet.dk til gavn for de danske forbrugere.

På den nordiske elbørs er der ligesom på den tyske børs indført en mulighed for negative priser i de situationer, hvor efterspørgslen er meget lille, men hvor der alligevel synes at være et vist udbud. Der er dog sat en nedre grænse på -4 kr./kWh. Det gælder for alle elproducenter, også de centrale kraftværker, som dermed forventes at få et incitament til i højere grad at tilrettelægge produktionen ud fra den forventede efterspørgsel. Dog optræder negative priser kun i ganske få af årets i alt 8.760 timer.

For at belyse potentialerne i at udveksle vind med vand er det interessant at se på størrelsesforholdet mellem det danske elsystem baseret på kraftvarme og vindkraft og de norske og svenske energisystemer, som har en høj vandkraftdækning.

Elforbruget i Norge og Sverige er betydeligt højere end i Danmark og vandkraftdækningen er meget stor - i Norge over 90 % i et normalt år og i Sverige omkring 45 %. I nordisk sammenhæng udgør vindkraft stadig et relativt begrænset bidrag til den samlede forsyning – selv med de seneste års markante udbygning. Derfor er mulighederne for indpasning via vandkraftlagring store. I et vist omfang er det udvekslingskapaciteten i og mellem de nordiske lande, der vil blive begrænsende for at udnytte potentialerne for at handle vind- og vandbaseret el på tværs af grænserne.

Det danske elmarked er et relativt lille område i det nordeuropæiske marked og Danmark vil næsten altid være pristager

fra vores nabolande, dvs. at elpriserne i mange af året timer bestemmes af de tyske priser og af vandkraftsituationen i Norden.

Vestdanmark er i dag forbundet med Norge og Sverige over hhv. Skagerrak og Kattegat og Østdanmark til Sverige via Øresund. Både Vest- og Østdanmark er forbundet med Tyskland og i 2019 forventes et kabel at kunne forbinde Vestdanmark med Holland. Desuden vil den planlagte havmøllepark ved Kriegers Flak, øst for Møn, inkludere en yderligere forbindelse mellem Østdanmark og det østlige Tyskland.

Varmebunden elproduktion

En meget stor del af den danske elproduktion er koblet sammen med varmeproduktion. Næsten alle kraftværker i Danmark har således mulighed for at producere kombineret el og varme. Dette kan give bindinger i forhold til indpasning af vindkraft, fordi elproduktionen i et vist omfang er bundet op på varmebehovet. De fleste centrale anlæg er såkaldte udtagsanlæg, der kan veksle imellem kun at producere el (såkaldt kondensdrift) og at producere el og fjernvarme. De mindre, decentrale kraftværker er hovedsagligt såkaldte modtryksanlæg, der producerer el og varme i et bestemt forhold, og de kan normalt kun producere el, når de samtidigt har mulighed for at afsætte varme. I forbindelse med praktisk taget alle større danske kraftvarmeværker er der etableret varmelagre (store termokander), som er dimensioneret til at gemme varme til flere timers produktion. De øger fleksibiliteten i elsystemet, så kraftvarmeanlæggene kan reducere eller stoppe produktionen af el og varme, når det blæser meget, og alligevel forsyne varmekunderne fra varmelagrene.

Større varmelagre kan være en måde at øge fleksibiliteten yderligere på i et system med stor vindkraftandel. I andre situationer kan det være nødvendigt helt at stoppe samproduktionen af el og varme. Produktion af kraftvarme er både miljømæssigt og økonomisk fornuftigt, så længe alternativet er spild af varme, men for at udnytte strømmen fra vindmøllerne fuldt ud kan bindingen med fordel løsnes. I kolde perioder, hvor vindmøllerne dækker elforbruget, kan kraftvarmeværkerne f.eks. lade dampen gå uden om turbinen direkte til varmeproduktion, hvis de har installeret et såkaldt 'damp by-pass'.

Noget af elproduktionen kan også bruges til at lave varme f.eks. med højeffektive varmepumper tilkoblet fjernvarmesystemet. Via en kompressor i varmepumpen flyttes energi fra et uendørs reservoir (udeluft/jord/vand)

indenfor til opvarmningsbrug. Varmepumpesystemer kan levere op til 4 gange mere varme målt i energienheder, i forhold til den elektricitet, de bruger. Alternativt kan man anvende elpatroner, der virker på samme måde som de elkedler, vi kender fra køkkenet. Elpatroner er mindre effektive, da én enhed el bliver til én enhed varme, men til gengæld væsentligt billigere i indkøb. Varmepumper er derfor velegnede til drift i mange timer, mens elpatroner kan være den rigtige løsning til få driftstimer (spidslast).

Afgiftsændring

Høje afgifter på el har generelt hindret brug af el til varmeproduktion, på tidspunkter hvor elmarkedsprisen har været lav. Afgiftssystemerne er løbende blevet justeret, og bl.a. gav en nedsættelse af afgifterne ved kraftvarmeværkernes produktion af varme uden samtidig elproduktion i 2009 en vis tilskyndelse til brug af elpatroner.

Men indtil videre udgør relativt høje elafgifter og eltariffer en barriere for øget brug af el til varme. Hos varmeproducenterne vil eksempelvis biomasse baseret kraftvarmeproduktion - hvortil der opnås faste el-tilskud – ofte stå mere økonomisk fordelagtigt end en investering i store varmepumper. Derved kan afgiftssystemernes indretning være afgørende for den nødvendige fleksibilitet i samspillet mellem produktion og forbrug af energi.

Integrere transportsektoren

På længere sigt vil et gennembrud for elbiler kunne gøre det endnu lettere at indpasse vindkraft. Bilerne kan oplades om natten, eller når det blæser mest, og forbruge strømmen i dagtimerne. Bilparken vil derved udgøre et stort rullende ellager, som også kan bruges til korttidsbalancering af vindkraften.

Såkaldt plug-in hybrid-elbiler kan blive skridtet på vej mod egentlige elbiler. Plug-in hybrider er biler, der både kan køre på el og benzin/diesel, og som kan oplades fra nettet. Bilen oplades på bopælen, ved stationen eller arbejdspladsen og bruger el til hovedparten af den daglige kørsel. Da bilen har indbygget forbrændingsmotor, vil der ikke være risiko for at løbe tør for strøm.

Både energi- og miljømæssigt har batteridrevne elbiler et stort potentiale. I forhold til traditionelt benzin- eller dieseldrevne biler har elbiler en bedre energieffektivitet sammen med lokale miljøfordele ved mindre støj og ingen skadelige udledninger i nærmiljøet. Der er dog behov for en forbedring af selve batterierne, før elbiler er kommercielt konkurrencedygtige.

Også på transportområdet er de rette økonomiske og afgiftsmæssige incitamenter afgørende for den nødvendige udbygning.

Lagring af el

Teknologier, der har været diskuteret og er under udvikling til ellagring, er bl.a. trykluftslagere, batterier, vandkraftslagere og brintproduktion i kombination med brændselsceller. Alle teknologierne er imidlertid investeringstunge, og desuden er det forbundet med energitab at lagre større mængder energi.

Regulering af vindkraftens produktion

Der er udarbejdet særlige tilslutningsbetingelser for vindmøller tilsluttet transmissionsnettet (i praksis store havmølleparker), som skal sikre, at vindmølleparker kan nedreguleres, hvis andre reguleringsmetoder i en periode er utilstrækkelige. Teknisk er det muligt at stoppe vindmøller helt i kritiske driftssituationer.

I perioder med meget lave eller måske ligefrem negative priser vælger nogle vindmølleejere helt at stoppe møllerne. Efter de nyeste udbudsbetingelser for de store havmølleparker vil havmøller ikke få udbetalt pristillæg ved negative priser, hvilket giver et incitament til at nedregulere produktionen. Dermed virker de negative priser som en regulerende faktor i de situationer, hvor udbuddet er større end efterspørgslen.

Fleksibelt elforbrug

De enkelte elforbrugere spiller også en rolle i samspillet mellem produktion og forbrug. Det er vigtigt, at forbrugere får installeret timemålere og automatik til at styre udvalgte dele af forbruget. En vis fordel ligger der i at få forbrugere til at flytte deres elforbrug - til f.eks. vask og tørring og opladning af batterier - til mere hensigtsmæssige tidspunkter, bl.a. om natten, hvor strømmen fra nettet er rigelig og billig. Det kan gøres ved hjælp af intelligente elmålere og 'intelligente elapparater'.

Teknisk set kan man koble husholdningen eller virksomheden op på informationer fra den nordiske elbørs og programmere sit forbrug som man ønsker. Det er planen at der hos alle elforbrugere i Danmark i 2020 skal være installeret intelligente elmålere.

Forsyningssikkerhed

Der er flere problemstillinger forbundet med at sikre tilstrækkelig effekt i spidslastsituationer. Typisk opstår effektmangel i de kolde timer på året, hvor elforbruget traditionelt er højest, og ofte falder "den koldeste time" sammen med, at der er vindstille, så vindmølle-

produktionen er på sit laveste. Derfor vil indpasningen af en større mængde vindkraft i elsystemet stille større krav til nye løsninger til håndtering af systemtilstrækkelighed og forebyggelse af effektmangel.

I det liberaliserede elmarked skal markedet sikre den tilstrækkelige produktionskapacitet til at dække forbruget – også i spidslastsituationer, som eksempel den koldeste time. Overordnet er ansvaret for opretholdelse af elforsyningssikkerheden i Danmark placeret hos den systemansvarlige virksomhed, Energinet.dk.

Når det ikke blæser i et fremtidigt elsystem og der måtte opstå knaphed på kapacitet kan kraftvarmeværker opregulere deres elproduktion til fuld drift. Endvidere kan elforbrugere vælge at skrue ned for forbruget og visse virksomheder kan vælge at starte deres nødstrømsanlæg eller måske helt afbryde produktionen efter nærmere aftaler om afbrydeligt forbrug. Samtidig vil alle importmuligheder blive taget i brug, og visse af systemansvarets driftsreserver vil muligvis også blive startet.

I fremtidens system bliver det i højere grad end i dag vinden, der bestemmer, hvor meget produktionskapacitet, der er i overskud en given time. Jo større det sammenhængende elmarked er geografisk set, desto mindre er sandsynligheden for, at der er vindstille på én gang alle steder.

Udfordringer

Danmark har ligesom andre områder, f.eks. Nordtyskland og dele af Spanien med fordel kunne integrere relativt store mængder vindkraft i energiforsyningen. Sammenlignet med andre europæiske lande har Danmark en meget stor grad af forsyningssikkerhed. Antallet af afbrudsminutter er meget lavt og skyldes typisk mindre fejl i distributionsnettet. Historisk har der aldrig været strømafbud på grund af effektmangel – altså er der ikke har været nok strøm til rådighed,

Alligevel sætter omstillingen fra en fossilbaseret energiforsyning til vedvarende energi et vist fokus på den fremtidige forsyningssikkerhed. Den grønne omstilling betyder, at centrale værker og decentrale kraftvarmeværker skal tilpasse sig ændrede system- og markedsforhold. Den stigende andel af vind og sol i elsystemet har ændret det økonomiske grundlag for at opretholde en så stor termisk kraftværkskapacitet i Danmark, som det hidtil har været tilfældet.

Kraftværker har betydning for forsyningssikkerheden, men selv med store reduktioner i kraftværkskapaciteten forudsiger Energinet.dk, at niveauet for elforsyningssikkerhed stadig vil være i top.

På sigt vil det særligt for det østdanske område formentlig blive nødvendigt at finde yderligere regulerings- og reservekapaciteter. Men overordnet vil forsyningssikkerheden være god, bl.a. i kraft af Danmarks udlandsforbindelser.

En fornuftig udnyttelse af vindkraften kræver dog, at tilpasningsværktøjerne udvikles og at der i fremtiden findes en balance mellem vindmøllernes produktion, udbygning med elkabler til udlandet, tilpasningen af den danske termiske produktionskapacitet og udviklingen af et fleksibelt samspil mellem produktion og forbrug.

Mulighederne i et fremtidigt energisystem baseret på vedvarende energi og med et vindkraftdomineret elmarked er i foråret 2015 beskrevet af Energinet.dk i en omfattende analyse, Energikoncept 2030.

Yderligere oplysninger

Effektiv anvendelse af vindkraftbaseret el i Danmark, Energinet.dk, 2009

Systemplan 2014, Energinet.dk, december 2014

Energikoncept 2030, Energinet.dk, maj 2015

Energistyrelsen

"Vindintegration i Danmark – Vindens værdi - og tiltag for at sikre den", EA Energianalyse, november 2014

Energinet.dk

Faktablad T7:

Import og eksport af vindmøllestrøm



Fakta om Vindenergi

Fakta om Vindenergi udgives af Danmarks Vindmølleforening.

Faktabladene, der giver faktaoplysninger om en række udvalgte emner, kan rekvireres fra sekretariatet eller hentes på www.dkvind.dk.

Danmarks Vindmølleforening
Ellemarksvej 47, Bygning 6
8000 Århus C

Tlf. 8611 2600
(kl. 9-15, fredag 9-13)
Fax 8611 2700
E-mail: info@dkvind.dk
www.dkvind.dk

Faktablad T3, maj 2015