

DEN GRØNNE OMSTILLING OG EL-NETTET

Forudsætningen for en grøn omstilling baseret på vind- og solenergi er, at man kan få den producerede elektricitet pålideligt og sikkert ind på el-nettet. I praksis er det en udfordrende opgave, som kræver præcis styring af såkaldt effektelektronik.

Forfatterne



Mads Graungaard Taul er postdoc og forsker i pålidelig og stabil net-tilslutning af vedvarende energikilder og effektelektroniske omformere. mkg@et.aau.dk



Frede Blaabjerg er professor og forsker i at sikre et fremtidigt bæredygtigt samfund i en overvejende fuldt elektrificeret verden ved brug af effektelektronik både i produktion, transmission, distribution og forbrug af energien. fbl@et.aau.dk

Begge ved Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet

I Danmark har vi en markant ambition om at nedbringe CO₂-udledningen med 70 % allerede i 2030, og i 2050 forventes det, at vi er helt neutrale. En meget vigtig brik i realiseringen af denne ambition er, at vi elektrificerer vores samfund langt mere end, det er i dag.

Groft sagt kan energiforbruget i Danmark deles i tre kategorier: en til varme, en til transport og en til elektricitet. Energiforbruget til varme og transport baserer sig meget på fossile brændsler, og det skal vi derfor ændre til at basere sig på andre energikilder. Sol og vind er nogle af de mest oplagte, da de kan udnyttes til at producere el uden at udlede CO₂. I de seneste årtier er teknologiudviklingen for disse gået hastigt fremad, og indenfor de seneste 5 år er både vind- og solenergi blevet billigere end konventionelle ressourcer som kul og olie – hvorfor de to teknologier er blevet meget attraktive at bruge globalt.

Der er i dag installeret mere end 1100 GW vind- og solenergi i verden (svarende til 14% af verdens totale el-kapacitet), og tallet stiger

betydeligt hvert år med nye installationer. Også i Danmark forventes en stor tilvækst i installeret effekt for både sol og vind. Graden af succes i implementeringen vil afhænge af, om tilslutningen til el-nettet foregår forsvarligt, og om el-nettet er i stand til at håndtere så store mængder tilsluttet el-kapacitet. El-nettet er etableret ved en trefaset vekselspænding, der er defineret ved en amplitude, en faseforskydning og en frekvens (se boks). Det betyder, at vi kan bruge elektromagnetiske transformere til at transformere spændingen op og ned på el-nettet alt efter behov. Ørstedes opdagelse

af elektromagnetismen for 200 år siden er helt afgørende for, at dette kan lade sig gøre.

Når effekten skal ind på el-nettet

Størstedelen af vores elektricitet er i dag produceret af store synkron-generatorer på kraftværkerne. En synkrongenerator er en generator, der er drevet af en turbine (for eksempel kul, vand, biomasse, gas, olie mm.), hvorefter den mekaniske energi på rotorakslen bliver konverteret til elektrisk energi ved brug af elektromagnetisme. Generatoren roterer med en konstant hastighed,

Hvad er 3-faset spænding?

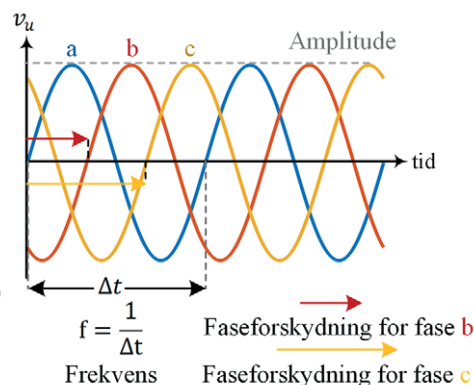
Amplituden

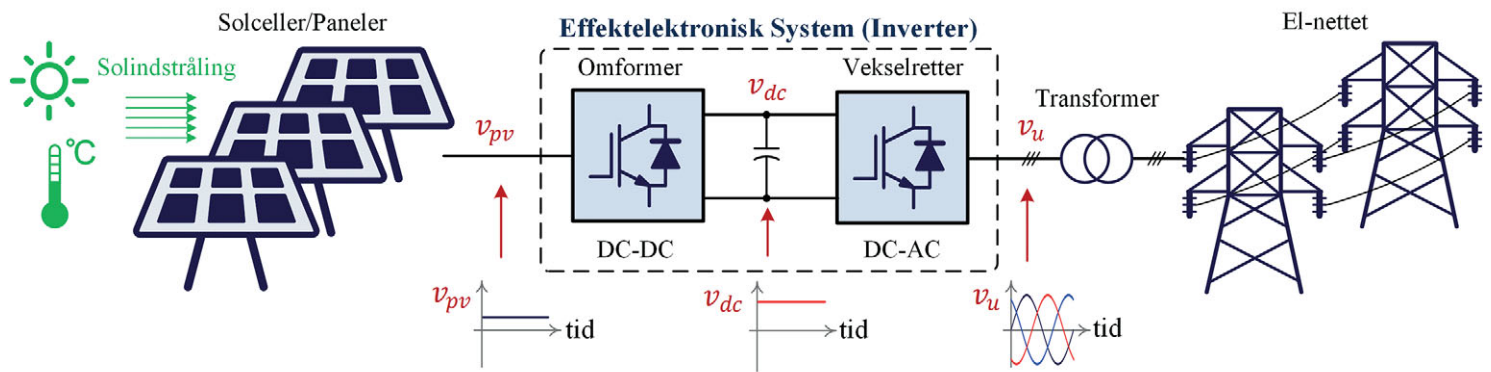
beskriver det maksimale udsving af sinuskurven.

Frekvensen

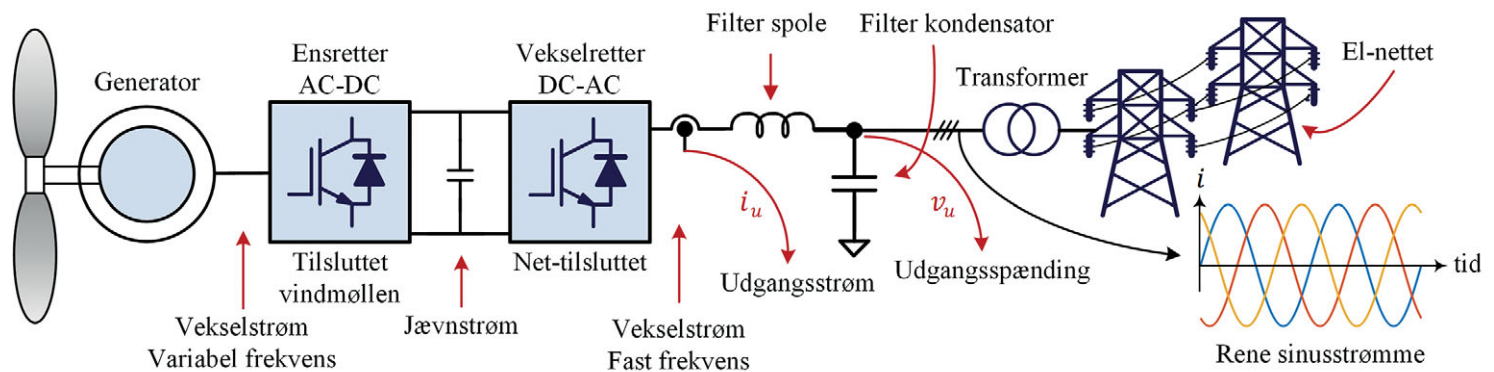
beskriver hvor mange gange i sekundet sinuskurven gentager sig selv, 50 Hz i Danmark.

Fasen (faseforskydningen) af en sinuskurve beskriver, hvor meget signalet er forskubbet til højre eller venstre





Solcelle-system tilsluttet el-nettet via effektelektroniske omformere. Solcellerne leverer jævnspænding når solens stråler rammer cellerne. Denne jævnspænding (DC) er forøget ved brug af en DC-DC omformer. Herefter, vekselrettes jævnspændingen til en tre-faset vekselspænding, hvormed der kan leveres energi ind på el-nettet.



Skitse af det elektriske system for en moderne vindmølle, der er tilsluttet el-nettet. Effektelektronikken er et væsentligt element.

nemlig netfrekvensen (heraf navnet synkron), og der leveres effekt ind på el-nettet ved at etablere en stærk tre-faset vekselspænding.

I lighed med synkrogeneratoren er samtlige generatorer i vindmøller også drevet elektromagnetisk for at kunne omdanne vindens energi til mekanisk rotation og herefter til elektricitet.

Solcelle-systemer er derimod ikke baseret på en elektromagnetisk generator, men i stedet på siliciumbaseret halvleder-teknologi, der kan omdanne solens stråler til jævnspænding (DC). For at kunne slutte denne spænding til el-nettet må den derfor omformes til vekselspænding (AC), hvilket gøres ved brug af en såkaldt vekselretter, der består af effektelektroniske komponenter, herunder transistorer.

Den jævnspænding, der genereres fra solcelle-panelerne, afhænger af intensiteten af solens stråler

og panelernes temperatur. Derfor er det typisk nødvendigt at forøge jævnspændingen via en jævnspænding-til-jævnspændings-omformer (DC-DC), da jævnspændingen skal være højere end el-nettets maksimale spænding for at transportere energien ind i el-nettet. Og når jævnspændingen omformes til vekselstrøm (DC-AC) er det endvidere vigtigt, at DC-AC-omformningen er synkroniseret med el-nettet (det vil sige, at frekvens og fase på udgangsspændinger og omformerspændinger er ens), da der ellers vil løbe en stor og ukontrolleret strøm imellem el-nettet og solcellesystemets vekselretter, hvilket kan beskadige systemet.

Moderne vindmøller og el-nettet

I moderne vindmøller benyttes også effektelektroniske omformere til at dirigere energien udvundet fra vinden ind i el-nettet. For en net-tilsluttet, effektelektronisk omformer er den primære opgave at sikre, at

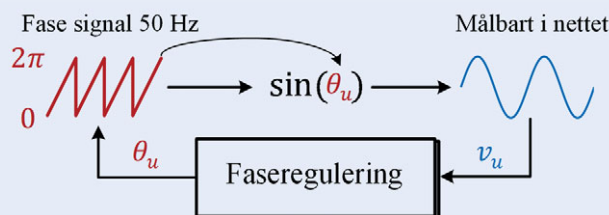
energien optaget i vindmøllens roterende elementer bliver leveret pålideligt og stabilt ind i el-nettet. For at det kan lykkes, skal den strøm, der sendes fra vindmøllen ind i el-nettet, have en præcis amplitude, fase og frekvens (typisk 50 Hz i Danmark og Europa).

For at optimere udbyttet fra vindmøllen drives vindmølle-generatoren med en variabel frekvens afhængig af vindhastigheden. Denne strøm med variabel frekvens ensrettes herefter til en jævnstrøm, hvorefter den nettilsluttede vekselretter omformer jævnstrømmen til vekselstrøm med en fast frekvens, nemlig netfrekvensen (typisk 50 Hz). For at sikre, at rene sinus-formede strømme leveres til nettet, bruges en elektromagnetisk filter-spole og -kondensator til at udglatte strøm og spænding.

I moderne vindmøller er styring og stabilitet af den net-tilsluttede vekselretter altafgørende for, at

Faseregulering og synkronisering af en vindmølle med el-nettet

For at indsende sinusformede strømme på el-nettet, er det nødvendigt at kende frekvens og fase af net-spændingen, og disse bestemmes ved hjælp af faseregulering. Den faseregulering, der foregår i styringen af en vindmølle, kan beskrives visuelt med sinusbølger og vektorer. Hvis et 50 Hz fasesignal, som vist i rødt, indsættes i en sinusfunktion, så vil man erfare, at resultatet er en 50 Hz sinusbølge, som anvist med blå til højre. Dette er en intuitiv matematisk proces. For en vindmøllestyring er det derimod af interesse at gå den modsatte vej, altså bestemme fasesignalet ud fra den blå sinusbølge, som bliver målt som en spænding i el-nettet. Det er denne proces, der kaldes faseregulering eller synkroniseringskontrol. Den fundne synkroniserings-



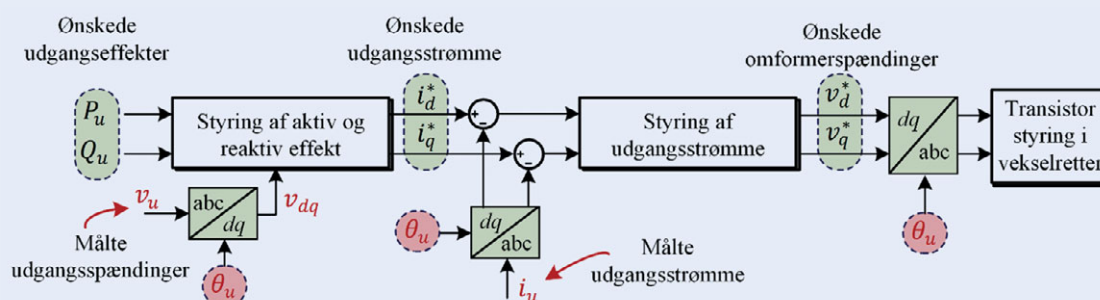
fase (θ_u) bruges herefter til at beskrive hele vindmøllestyringen relativt til den målte netspænding, så de indsendte strømme kan synkroniseres med spændingen i el-nettet.

Frede Blaabjerg er blandt pionerne indenfor udvikling af faseregulering som metode til at sikre en robust tilslutning af vedvarende energikilder på el-nettet.

Hvorfor er fasesynkronisering vigtigt for stabil vindmøllestyring?

En typisk kontrolstruktur for styring af net-tilsluttede omformere starter med en reference, hvor ønskede udgangseffekter er specificeret baseret på vindmøllens omdrejningshastighed mm. Ud fra disse referencer bruges den målte netspænding samt synkroniseringsfasen opnået fra fasereguleringen til at bestemme de ønskede udgangsstrømme, der skal skabes af den net-tilsluttede

vekselretter. Disse ønskede udgangsstrømme er realiseret ved brug af en strøm- og transistorstyring. Hvad der er afgørende at forstå for denne styringsmetode, er, at alle ønskede værdier og målte værdier er direkte skabt via den fundne synkroniseringsfase, θ_u . Det er derfor, det er så vigtigt at bestemme denne fase korrekt, for ellers kan hele vindmøllens styring blive ustabil.



Typisk struktur for styring af en net-tilsluttet vekselretter i moderne vindmøller. De ønskede udgangseffekter benyttes på baggrund af fasereguleringen til at styre den net-tilsluttede omformer som ønsket. Kasserne med abc/dq repræsenterer en transformation fra tre-faset målte strømme og spændinger til styringssignaler, som er beskrevet relativt til synkroniseringsfasen θ_u . Hvis styringssignalerne skal virke optimalt, skal synkroniseringsfasen være korrekt bestemt.

vindmøllerne kan indfri deres fulde potentiale.

Synkronisering og styring med el-nettet

At styre vekselretteren i en moderne vindmølle er en krævende opgave. Målet er at sørge for, at vekselretterens udgangsspænding er synkroniseret med de sinusformede spændinger, der er i el-nettet. For at dette kan lade sig gøre, er det nødvendigt at kende fasen og frekvensen på spændingen i el-net-

tet. Men det er ikke bare noget, man kan slå op i en tabel, som man måske kunne tro. Disse parametre er dynamiske og ændrer sig afhængig af den øjeblikkelige tilstand af el-nettet. Det er derfor nødvendigt, at man hele tiden holder øje med ændringer i frekvens og fase for at sikre, at vindmøllen leverer strøm ind i el-nettet på en stabil og pålidelig måde.

For at opnå viden omkring disse parametre bruger man typisk en stra-

tegi kaldet faseregulering. Denne strategi går ud på at beregne fasen og frekvensen ud fra en løbende måling af spændingen i elnettet (se boks), hvilket man derefter bruger som udgangspunkt for at beskrive hele vindmøllestyringen relativt til den målte netspænding. Det er en kritisk operation, idet kvaliteten af den strøm, vindmøllen leverer ind på el-nettet, stærkt afhænger af, om man har bestemt fasen i elnettet korrekt. Hvis ikke fasen bliver bestemt korrekt, kan hele vindmøl-

lens styring blive ustabil, og det kan forårsage ufrivillig nedlukning af vindmøllen, tab af produceret vedvarende energi og i værste fald strømafbrydelser i el-nettet. Disse problemstillinger er blandt dem vi på Institut for Energiteknik arbejder målrettet på at finde gode løsninger til i fremtidens el-net. Således har vi eksempelvis bidraget med matematiske modeller, som kan beskrive de ustabiliteter der kan opstå i fasereguleringen, og vi har udviklet metoder, som gør vindmøllestyringen mere robust overfor kortslutningsfejl.

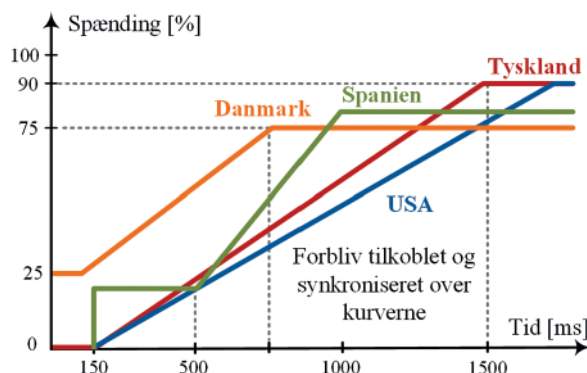
Udfordringer med styringer mod el-nettet

Den elektriske energi er på mange måder fordelagtig og derfor også en velvalgt energibærer i fremtidens energisystem. Elektricitet er effektivt at transportere, den er nem at skalere, og den kan nemt transformeres op og ned. Elektrisk energi har dog den klare ulempe, at hvis et el-system altid skal fungere som ønsket, er der nødt til at være balance imellem produceret og forbrugt effekt. Det bliver en udfordring i fremtidens el-system baseret på vedvarende energikilder, da sol og vind er vejrafhængige, og der skal derfor indgå elementer til energilagring i fremtidens energisystem. Denne nødvendige balance betyder også, at vindmøllernes synkronisering med nettet er særdeles vigtig, da driften af el-nettet forudsætter, at der altid er effektproduktion.

Ukorrekt eller forvrænget bestemmelse af synkroniseringsfasen kan ofte ske under to af følgende scenarier:

1) Når vindmøllen er tilkoblet el-nettet igennem en stor elektrisk impedans (modstand). Eksempler på dette er store havmølleparker, som er placeret geografisk langt fra det primære el-net.

2) Når netspændingen er lav. En lav netspænding forekommer især under netfejl som ved kortslutninger og lynnedslag.



Tilslutningskrav for vindmøller i forskellige lande i tilfælde, hvor el-nettet er udsat for fejl med lave spændinger. Så længe spændingen holder sig over de viste kurver, skal vindmøllerne forblive tilkoblet og synkroniseret til el-nettet.

Da kortslutninger og lynnedslag må forventes med jævne mellemrum og flere og flere effektelektronik-baserede vindmøller bliver tilkoblet el-nettet igennem lange elektriske kabler med en høj impedans, er det desværre umuligt at opnå en 100% stabil synkroniseringskontrol i vindmøllen. Men for at minimere ustabiliteter er det vigtigt at sikre, at synkroniserings-enhederne er så robuste som muligt. Dette forhold er reguleret via nettilslutningskrav fra elselskaberne, hvor et af kravene er, at vindmøllerne (og også solcelle-anlæg) skal forblive tilsluttet el-nettet selv om spændingen er 0 eller er meget reduceret i en kort periode (se figur). Hvis spændingen derimod falder til under 25 % i en længere periode (i Danmark over 150 ms), har man lov til at koble vindmøllerne fra el-nettet, indtil spændingen returnerer. Når spændingen returnerer efter en fejl, skal omformerne øjeblikkeligt være i stand til at synkronisere med det tilbagevendende el-net.

Fasereguleringen og styringen af vindmøllen er derfor nødt til at kunne håndtere sådanne situationer – ellers vil man ikke få lov til at slutte sol- og vind-energi til el-nettet.

Det bliver stadig mere kompliceret i fremtiden

Artiklen her har givet et lille indblik i nogle af de udfordringer, der er ved fremtidens el-net baseret på sol- og vindenergi – som også forskningsmæssigt er spændende at være med til at løse. Fremtidens el-net

vil bestå af titusinder af effektelektroniske enheder (vindmøller, solcelle-systemer, smarte laster mm.), der alle skal synkroniseres med et el-net, der tidligere har baseret sig på få store synkron-generatorer til at etablere en stærk sinusformet spænding i nettet. På grund af ønsket om en grøn omstilling, vil disse store generatorer sandsynligvis forsvinde i takt med, at kraftværker baseret på fossile brændsler bliver udfaset. Det store spørgsmål er nu, hvilke af de titusinder enheder, der skal bestemme spænding og frekvens, når de store generatorer ikke er der mere. Det kan betyde, at fremtidens effektomformere skal fungere på en anden måde, end de gør i dag – måske ligesom synkron-generatorer gør. Synkron-generatorer behøver nemlig ikke at synkroniseres til en stærk tre-faset spænding som eksempelvis vindmøller skal. Synkron-generatorer kan istedet selv etablere en stærk og robust net-spænding, hvor synkronisering med det øvrige el-net er meget pålidelig. En sådan løsning ved brug af effektomformere kaldes en virtuel synkron-generator, da teknologien bag dette udelukkende er baseret på effektelektronik og digital styring. Om en sådan teknologi vil være løsningen på udfordringerne for fremtidens el-net, er dog endnu usikkert. Hvad der derimod er sikkert, er, at vi forskere vil arbejde intenst på at finde gode løsninger på styringen af fremtidens el-net og på den måde være med til at løfte arven fra Ørstedes opdagelse for 200 år siden. ■

Forskningen bag problemstillingerne omtalt i denne artikel er finansieret af Villum Fonden og REPEPS (REliable Power Electronics-based Power System) projektet på Aalborg Universitets Institut for Energiteknik.

Videre læsning:

F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang and X. Wang, "Distributed Power-Generation Systems and Protection," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1311-1331, July 2017.

X. Wang, M. G. Taul, H. Wu, Y. Liao, L. Harnefors, F. Blaabjerg, "Grid-Synchronization Stability of Converter-Based Resources – An Overview," in *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 2020.

M. G. Taul, X. Wang, P. Davari and F. Blaabjerg, "An Overview of Assessment Methods for Synchronization Stability of Grid-Connected Converters Under Severe Symmetrical Grid Faults," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 10, pp. 9655-9670, Oct. 2019.

J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, Nov. 2012.

R. Teodorescu and F. Blaabjerg, "Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1323-1332, Sept. 2004.