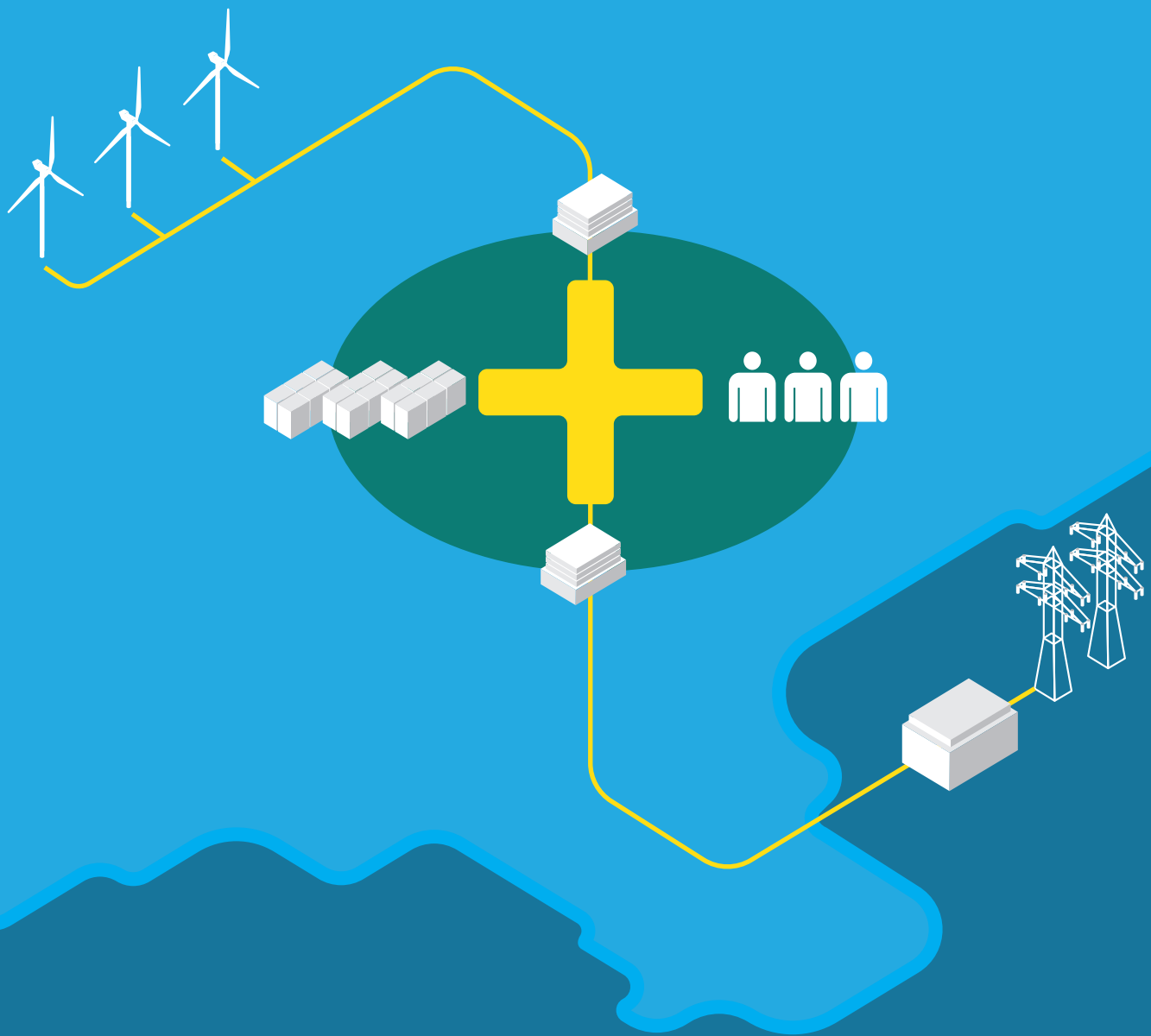


Energiøerne



En "Mars-mission" for det danske energisystem

En "Mars-mission" for det danske energisystem

Danmark har opstillet ambitiøse mål om at reducere udledningen af drivhusgasser med 70 % inden 2030 og blive uafhængig af fossile brændstoffer i 2050. For at nå målene planlægger Danmark at fremskynde dekarboniseringen af energisystemet ved at erstatte kul- og gaskraftværker med vedvarende energikilder. Sammen med landvind og sol skal havvind udgøre fundamentet i elproduktionen i et dekarboniseret system. Danmark er allerede en verdensførende aktør inden for vindkraft og planlægger at installere yderligere 6,8 GW havvind frem mod 2030. Det vil firedoble den eksisterende kapacitet på 1,7 GW.

For at facilitere en omkostningseffektiv tilslutning af så store mængder havvind til elnettet, besluttede Folketinget i 2020 at udvikle og bygge to energiøer: En på Bornholm i Østersøen og en anden som en kunstig ø i Nordsøen. Begge projekter er ambitiøse, men energiøen i Nordsøen er det i særlig grad. Når den er færdig, vil den blive et af de største energi-hubs* i Europa med et mål om at installere 10 GW havvind på langt sigt. Til sammenligning er der i dag kraftværker på op til 5 GW.

Opførelsen af de to energiøer inden 2033 er en "Mars-mission" for det danske energisystem. Det er der tre grunde til. For det første er der en betydelig kløft mellem de tilgængelige omkostningseffektive teknologier og dem, der er nødvendige for at realisere visionen om energiøerne. For det andet er der behov for nye operationelle modeller for innovation i den offentlige/private sektor for at udforme, planlægge, bygge og drive øerne omkostningseffektivt og driftssikkert. For det tredje vil øerne være laboratorier for den forandring, hele energisystemet i Danmark (og resten af verden) skal gennemgå i de kommende årtier, når vi nærmer os 100 % uafhængighed af fossile brændstoffer i 2050.

En særlig udfordring i udviklingen af energiøerne er at designe og opbygge en elektrisk infrastruktur, der kan fungere med en varierende elforsyning, der er baseret på 100 % vedvarende energi. Hver energiø vil være en "elektronmetropol", hvor elektroner, der påvirkes af havvindens kinetiske energi, bevæger sig gennem elkabler, handles på markeder af flere leverandører og til sidst når fastlandet. Herefter sendes de enten direkte ud til forbrugerne eller anvendes til at adskille molekyler i power-to-X-systemer. Disse elektronmetropoler skal drive og betjene systemer til produktion, salg og transport af flere gigawatt elektricitet med millisekunders præcision. Det er et system med helt nye karakteristika. Vi er derfor nødt til at udvikle og modne en række nye løsninger for at gøre dette muligt. Det er en markant udfordring, som ikke er bredt anerkendt.

Denne hvidbog giver derfor et overblik over de vigtigste teknologiske udfordringer ved at føre energiøerne ud i livet. Derudover indeholder den anbefalinger til, hvordan man håndterer udfordringerne på sådan en måde, at man udnytter de unikke læringsmuligheder ved denne "Mars-mission" for det danske energisystem.

En hjørnesteen i et fuldt dekarboniseret energisystem

Udfordringerne med at bygge energiøen i Nordsøen er ikke kun forbundet med øens størrelse og de fysiske aspekter ved at bygge en ø ude midt i havet. Fra et elektrisk perspektiv er øen en hjørnesteen i fremtidens fuldt dekarboniserede energisystem. Dens elektriske infrastruktur vil udelukkende bestå af inverterbaserede* ressourcer, som er kendetegnet ved at have meget få direkte tilsluttede roterende masser. Dermed har systemet ingen konventionel indbygget inertie*, som kan hjælpe med at balancere elnettet, hvis der er et pludseligt fald i forsyningen af strøm fra vind eller sol eller en fejl på en højspændingsledning.

Energy hub: Energi-hub: Et geografisk placeret system, hvor produktion, omdannelse, lagring og/eller forbrug af flere energibærere (i dette tilfælde primært elektrisk energi) finder sted, og et system, som er kendetegnet ved en vis grad af lokal kontrol.

* **Inerti- og inverterbaseret produktion:** Inerti (i energisystemer) er den energi, der lagres i store (roterende) generatorer, så de kan rotere i en periode, efter at der er slukket for strømmen. Ved inverterbaseret produktion med brug af effektelektroniske strømformere som grænseflade mellem den roterende maskine (f.eks. vindmøllerotor) og elnettet så kan inertien fra den roterende masse ikke bruges i elnettet. Dette eliminerer inertien og dermed også den energibuffer, der er til rådighed i traditionelle energisystemer. Når strømmen slukkes, afbrydes strømmen derfor øjeblikkeligt.



Teknologien til at bygge systemet er generelt tilgængelig i dag som individuelle komponenter. Udfordringen består i at kombinere dem i en skala som på energiøen: Hvordan designer man et sådan system? Hvordan betjener man det? Hvordan integrerer man det i det samlede energisystem? Og hvordan udvider man det på en sikker, robust og effektiv måde? Der står meget på spil, når man skal drive en energiø på 10 GW: En fejl, der får 10 GW vindkraft i Nordsøen til at forsvinde fra elnettet, kan potentielt mørklægge hele det europæiske elnet.

Mange af de løsninger, der er nødvendige for at muliggøre en omkostningseffektiv, pålidelig og robust drift af energiøerne, er endnu ikke demonstreret i kommerciel skala. De standarder og tekniske specifikationer for eldrift der skal bruges, er endnu ikke blevet udviklet. Samtidig er der en række potentielle "hønen eller ægget"-problemstillinger, hvor projektudvikleren af energiøen skal kende de potentielle løsninger fra leverandørerne, mens leverandørerne afventer yderligere specifikationer fra projektudvikleren.

Det er dog ikke kun udfordrende at gå i gang med denne Mars-mission. Den giver os også en unik mulighed for at fremskynde udviklingen af rene energisystemer og en unik indsigt i, hvordan et fuldt dekarboniseret energisystem kan se ud i fremtiden.

Innovationsmuligheder

Vi skal omsætte udfordringerne til innovation og her er succesen med dansk vindkraft eller fjernvarme eksempler til efterfølgelse. Energiøerne kan være en platform, hvor interessenter kan lære og være innovative. Her kan man teste nye teknologier, opbygge kompetencer, modne teknologier og tjenester og tilpasse regulering og lovgivning. I dette kapitel opdeler vi de mange potentielle innovationer i fire hovedkategorier: design, drift, udvidelse og integration af energiøerne.

1. Sådan designer man de elektriske systemer på offshore-energiøer

Energiøerne kommer til at udgøre en betydelig del af den danske elproduktion og får en central rolle i energisystemet. Det er derfor vigtigt at sikre, at øerne kan levere stabil og pålidelig strøm til nettet. Pålidelighed og stabilitet* er imidlertid ikke nok. Systemet skal også være robust og sikkert. Det skal kunne modstå ekstreme eller sjældne hændelser, herunder cyberangreb, der kan få hele systemer eller dele af dem til at svigte. Da energiøerne bliver en kritisk del af energisystemet, vil sådanne hændelser kunne få alvorlige konsekvenser for hele det danske net. I designfasen skal der træffes vigtige valg i forhold til den elektriske topologi og teknologier. Det vil få stor indflydelse på de ekspansionsmuligheder, der vil være efterfølgende, og de beslutninger, der skal træffes. Og der vil her ikke være mulighed for at trække på erfaringer, gennemtestede procedurer eller avancerede softwaresimuleringsværktøjer fra tidligere.

På en skala som denne er det essentielt, at man råder over avancerede softwaremodeller til design, konstruktion og drift af elektriske infrastrukturer. På grund af energiøernes store kompleksitet er der i de softwaremodeller, der p.t. står til rådighed, en række mangler i forhold til detaljeringsgrad og valideret nøjagtighed. Det kan resultere i betydelige designfejl. Denne unøjagtighed kan enten resultere i for store sikkerhedsmargener i designet og konstruktionen, hvilket vil øge omkostningerne, eller den kan reducere nettets evne til at modstå ekstreme eller sjældne hændelser. For at gøre tingene endnu mere komplicerede skal de udviklede modeller opdateres og valideres kontinuerligt over årtier, hvis man skal kunne blive ved med at bruge dem.

En anden vigtig udfordring er systemets robusthed*. Robusthed vurderes ud fra tre hovedparametre: Forebyggelse af skader, systemgenoprettelse og overlevelsessevne. Der er i øjeblikket ingen standardiserede måder at måle sådanne kriterier på. Da energiøernes er de første af deres slags og der samtidig er behov for et design, der kan tilpasses nye teknologier eller nye leverandører, så er det vanskeligt at foretage disse risikovurderinger af systemets robusthed.

Et tredje element, der kræver nøje overvejelse, er balancen mellem datafortrolighed og samarbejde. På grund af det ekstreme elektriske miljø på energiøerne skal detaljerede modeller af anlæg deles mellem alle de parter, der er til stede på øen. At gøre en sådan modelpakke tilgængelig for fremtidige anlægsejere, som på nuværende tidspunkt er ukendte, vil imidlertid være forbundet med en række udfordringer.



Et fjerde usikkerhedsmoment er driften af power-to-gas-anlæg, uanset om de opererer på land eller på øen. Der er i øjeblikket kun ringe erfaring med driften af store power-to-gas-anlæg.

Sidst, men ikke mindst, kan der opstå en række komplekse fænomener på energioverførerne, som man ikke tager højde for aktuelt, eller som man simpelthen ikke kender. De ukendte ubekendte.

2. Sådan driver man offshore-energiøer

De danske energioverførere vil være de første af deres slags, og det kræver, at man designer et "ekstremt energisystem" helt fra bunden med banebrydende egenskaber. Den 100 % inverterbaserede produktion vil resultere i en ekstremt lav kortslutningseffekt, og systemet vil have meget lav eller slet ingen inert. Derudover forventes det at omfatte HVDC* med flere terminaler (multi-terminal*) og flere leverandører (multi-leverandør*) samt en konstruktion med flere ejere, der skal udvides gradvist over tid. Et sådant system vil have mange teknisk udfordrende egenskaber, som kræver nye løsninger for at sikre en stabil og normal drift af energioverførerne. Der er behov for nye styringsstrategier for at sikre den aktive effektbalance i systemet og den nødvendige robusthed over for forstyrrelser, når inertien er meget lav eller måske endda lig nul.

Kombinationen af svingende elproduktion fra vindmøller og et system med lav inert gør, at de traditionelle procedurer for systemdrift ikke er tilstrækkelige. Operatøren vil skulle have overblik over situationen i realtid og systemet skal kunne udløse automatiske reaktioner for at sikre stabiliteten. Det kræver en ny form for kontrolsystem med metoder til at bestemme effektive afbødninger og modforanstaltninger for at kunne håndtere kritiske driftsforhold. Og det vil kræve integreret (kunstig) intelligens, som kan udløse de automatiske reaktioner, hvis begivenheder som disse indtræffer.

Hvilken type kritiske driftsforhold kan der forekomme under drift? De primære kritiske driftsforhold vil være forårsaget af tre typer af hændelser. Den første type er problemer med energisystemets stabilitet. De er resultatet af vindsystemernes lave inert og harmoniske interaktioner i nettet, som kan udfordre systemsikkerheden. Den anden type kritiske driftsforhold er naturkatastrofer, som vil teste energisystemets robusthed. Og sidst, men ikke mindst er cyberangreb mod vindkraftværkets kontrolsystem eller energioverførernes drift en risiko. En fejl i enhver komponent kan resultere i et lokalt problem, der kan begrænses til et enkelt kraftværk på øen, eller det kan skabe en kaskade af udfald, som kan forringe energioverførernes samlede pålidelighed.

Som en konsekvens heraf bør driftsmetoderne tage højde for disse nye effektelektronik-teknologier og deres fejlkarakteristika, stabilitetsspørgsmål og hændelsernes virkning på den samlede systemrisiko. Der bør indføres nye metoder til forbedring af systemsikkerheden i forhold til pludselige forstyrrelser og kaskadeudfald under forskellige driftsforhold. Desuden er der behov for nye software- og hardwareløsninger for at forbedre systemets robusthed ved at forbedre systemets modstandskraft samt mulighederne for at genoprette driften efter udfald.

Stability: Et elektrisk energisystems evne til at genvinde en driftstilstand, der er i balance, efter at have været udsat for en fysisk forstyrrelse. Det elektriske transmissionssystem skal opretholde balancen mellem produktion og forbrug (holde frekvensen på 50 Hz). Hvis denne balance forstyrres midlertidigt, f.eks. ved tilslutning/frakobling af en stor belastning, vil et stabilt elektrisk energisystem kunne genoprette balancen (bringe frekvensen tilbage til 50 Hz) ved at øge/reducere produktionen i overensstemmelse hermed.

Robusthed: Et elektrisk energisystems evne til at modstå, tilpasse sig og komme sig efter meget lidt sandsynlige større naturkatastrofer eller kunstige katastrofer. Dette kunne f.eks. være en meget kraftig storm, som ville medføre, at der blev lukket ned for al vindproduktion og derfor potentielt ville kunne føre til et systemnedbrud.



3. Sådan udvider man offshore-energiøer

Forberedelserne til energiøerne er i fuld sving, med sigte på at etablere driften senest i 2033. Når de er opført, vil de dog eksistere i meget længere tid og kunne håndtere en markant større elproduktion baseret på havvind og muligvis også elforbruget i power-to-gas-anlæg. Energiøen i Nordsøen vil blive bygget til 3 GW, men skal være designet til at kunne udvides til 10 GW og potentielt blive forbundet med andre øer og danne et europæisk offshore-DC-net

Energiøerne repræsenterer derfor en markant ændring i paradigmet for, hvordan man hidtil har bygget offshore-forbindelser op. I dag bygges offshore-forbindelser mellem enkelte produktionsenheder (en vindmøllepark eller en olie-/gasplatform) og et indgangspunkt til energisystemet. Der er ingen erfaringer med at forstærke eller ændre offshore-forbindelser med henblik på ekspansion, når de er i drift. Omfanget af denne udfordring bliver for alvor tydelig, når man ser på, hvor hurtigt teknologien udvikler sig inden for områder som effektelektronik. Det oprindelige design skal kunne skaleres, dvs. være i stand til at kunne udvides med flere enheder med egen styring, uden at der skal være behov for omfattende eftermontering eller store ændringer af designet. På alle stadier skal den valgte teknologi give mulighed for en høj grad af frihed og ikke begrænse fremtidige udvidelser med mere intelligente løsninger, samtidig med at de skal sikre en høj grad af robusthed.

En anden kritisk udfordring er at sikre, at systemkomponenterne kan "tale" med hinanden og arbejde sammen. Det kaldes interoperabilitet*. Der vil være et betydeligt antal effektelektroniske enheder på offshore-energiøer – enten som omformere i vindmøllerne eller som store HVDC-konvertere.

Effektelektroniske konvertere er alsidige og fleksible enheder med komplekse og avancerede kontrolalgoritmer. Operationelt er konverterne (næsten) udelukkende defineret af deres kontrol (software) snarere end af deres fysiske karakteristika (hardware), som primært definerer konverternes begrænsninger. I deres endelige form vil offshore-energiøernes elektriske system omfatte flere vindkraftværker og HVDC-konvertere fra flere producenter, og deres kontrolsystemer vil være specifikke og fortrolige for hver leverandørs vedkommende. Derfor skal et system (vindkraftværk) eller en komponent (HVDC-konverter) kunne fungere effektivt sammen med andre systemer og/eller komponenter fra en anden leverandør. Udfordringen her ligger i at udvikle en proces, der sikrer interoperabilitet uden at kræve fuld offentliggørelse af den detaljerede konverterstyring fra producenterne. Og det skal ske vel vidende, at konverterstyringssoftwaren (og hardwareteknologien) i 2030 sandsynligvis vil adskille sig markant fra den, vi har til rådighed i dag.

4. Sådan integrerer man offshore-energiøer i det danske energisystem

Den energi, der produceres på øerne, enten i form af elektricitet eller andre former for energi, vil blive handlet på markederne. Erfaringerne fra tidligere projekter i Danmark i forbindelse med integrerede energisystemer viser, at det er afgørende, at man udvikler velfungerende koordineringsmekanismer mellem energimarkederne, herunder et marked for elektricitet og brint. Uden disse mekanismer vil energisystemet ikke være i stand til fuldt ud at udnytte den eksisterende fleksibilitet i andre energisektorer, især ikke fleksibiliteten i power-to-gas-aktiver.

(HVDC) Konvertere: En effektomformer behandler og styrer flowet af elektrisk energi. En HVDC-konverter er en aktiv enhed, der konverterer elektrisk strøm fra højspændingsvekselstrøm (AC) til højspændings jævnstrøm (HVDC) eller omvendt.

Multi-terminal: Et system, der består af tre eller flere indbyrdes forbundne terminaler, dvs. konvertere.

Multi-leverandør: HVDC-konvertere fra forskellige producenter (leverandører), hver med deres eget kontrolsystem.



Det er vigtigt at udvikle passende "markedsbaserede" koordineringsmekanismer mellem energisektorerne (elektricitet, opvarmning, gas/brint). Det kan opnås ved at definere nye markedsprodukter og/eller indføre nye markedsaktører i energisystemernes grænseflade og/eller ved at definere nye budformater.

Desuden skal fysikken i det integrerede energisystem, herunder el-til-gas-aktiverne, være korrekt repræsenteret i markeds-clearingproblemet, som samtidig skal holdes så matematisk enkelt, at der kan udledes effektive priser.

De to energiøer bliver til den største koncentration af produktionsenheder i det danske energisystem. Kombineret med den iboende variation i deres vindkraftproduktion vil de udfordre balancen mellem udbud og efterspørgsel i det danske energisystem.

Energisystemets nuværende mekanismer for redundans og forsyningsikkerhed i tilfælde af funktionssvigt i de største enheder kan ikke håndtere enheder af den størrelsesorden, som energiøerne repræsenterer. Selv om en del af udfordringen kan løses ved at indarbejde redundans i udformningen af den elektriske infrastruktur, er det sandsynligt, at disse mekanismer skal tages op til fornyet overvejelse og tilpasses.

Overfloden af billig, grøn elproduktion fra bl.a. havvind, gør elektrificering til det naturlige næste skridt imod dekarboniserede energisystemer. Men elektrificering alene vil ikke være nok. Derfor betragtes brint i øjeblikket som en fremtidig hjørnesteen i et fuldt integreret energisystem, der forbinder vedvarende elektricitet med grønne brændstoffer til sektorer som tung biltransport, luftfart, skibsfart og stålindustrien. Produktionen af grønne brændstoffer kan blive en integreret del af energiøerne.

Interoperabilitet: *Et transmissionssystem, dets delsystemers og komponenters evne til at arbejde problemfrit sammen, så det bliver muligt at overføre elektrisk energi med den krævede kvalitet og den krævede forsyningsikkerhed. Elsystemet udvikler sig konstant på grund af innovationer og netkrav, og det er derfor vigtigt, at man skaber et system, der kan tilpasse sig fremtidige innovationer.*



En enestående mulighed for at lære, vokse og vise vejen mod et 100 % dekarboniseret energisystem

I 2033, vil en dansk minister klippe det røde bånd over og erklære Nordsøens energiø for åben. Vi har 12 år til at lukke kløften mellem de løsninger, vi har, og de løsninger, vi har brug for for at sikre en sikker landing for denne Mars-mission for det danske energisystem. Offshore-energiøer kan lære os, hvordan vi skal designe og drive det dekarboniserede globale energisystem. Det giver Danmark en enestående mulighed, men der er behov for tre tiltag for at maksimere værdien af denne mission:

Kendskab og forståelse



Vi har brug for en diskussion, der når ud i en bred kreds af interessenter, for at øge kendskabet til og forståelsen af, hvilke udfordringer vi kommer til at stå over for. Hvordan håndterer vi udfordringerne med både energiøerne og mere generelt på dansk energisystemniveau, efterhånden som vi bevæger os i retning af dekarbonisering?

Diskussionen bør være centreret om, hvilken betydning det har for samfundet som helhed. Energiøerne er konkrete eksempler på energiomstillingen. De er nemme at visualisere, og kan bruges til at formidle den grønne omstilling til den brede offentlighed. Øerne repræsenterer også en ekstrem version af

energisystemet – det, vi kalder en elektronmetropol – som hjælper med at afklare, hvorfor robusthed, driftssikkerhed, interoperabilitet og modularitet er vigtige faktorer i enhver løsning.

Mulighed for læring



De kommende 12 år repræsenterer en unik mulighed for at lære og for at opbygge kapacitet. Vi kan tiltrække og uddanne ingeniører, teknikere, tilsynsmyndigheder og forretningsfolk i, hvordan man skaber et dekarboniseret energisystem. Det bør vi gøre gennem forskning og demonstration i både laboratorieskala og i demonstrationsprojekter, der understøtter teknologi- og serviceudviklingen.

Også uddannelse vil spille en væsentlig rolle. De erfaringer, vi får, skal komme studerende på alle områder fra ingeniørvidenskab og digitalisering til jura- og miljø til gavn. Det gælder også studerende på erhvervsuddannelserne.

Det er nemlig dem der i sidste ende kommer til at arbejde med den daglige konstruktion og drift af øerne. Uddannelse og undervisning bør også omfatte uddannelsesaktiviteter for ansatte i virksomhederne og for dem, der ønsker at skifte karriere ind i den grønne sektor.

Førende i grøn omstilling



Offshore-energiøer er en mulighed for at bekræfte Danmarks førerposition inden for omstillingen til grøn energi. Endnu en gang kan Danmark vises vejen ind i en ny æra med udvikling af havvind og bruge erfaringerne herfra til at hjælpe andre lande med at springe udviklingstrin over.

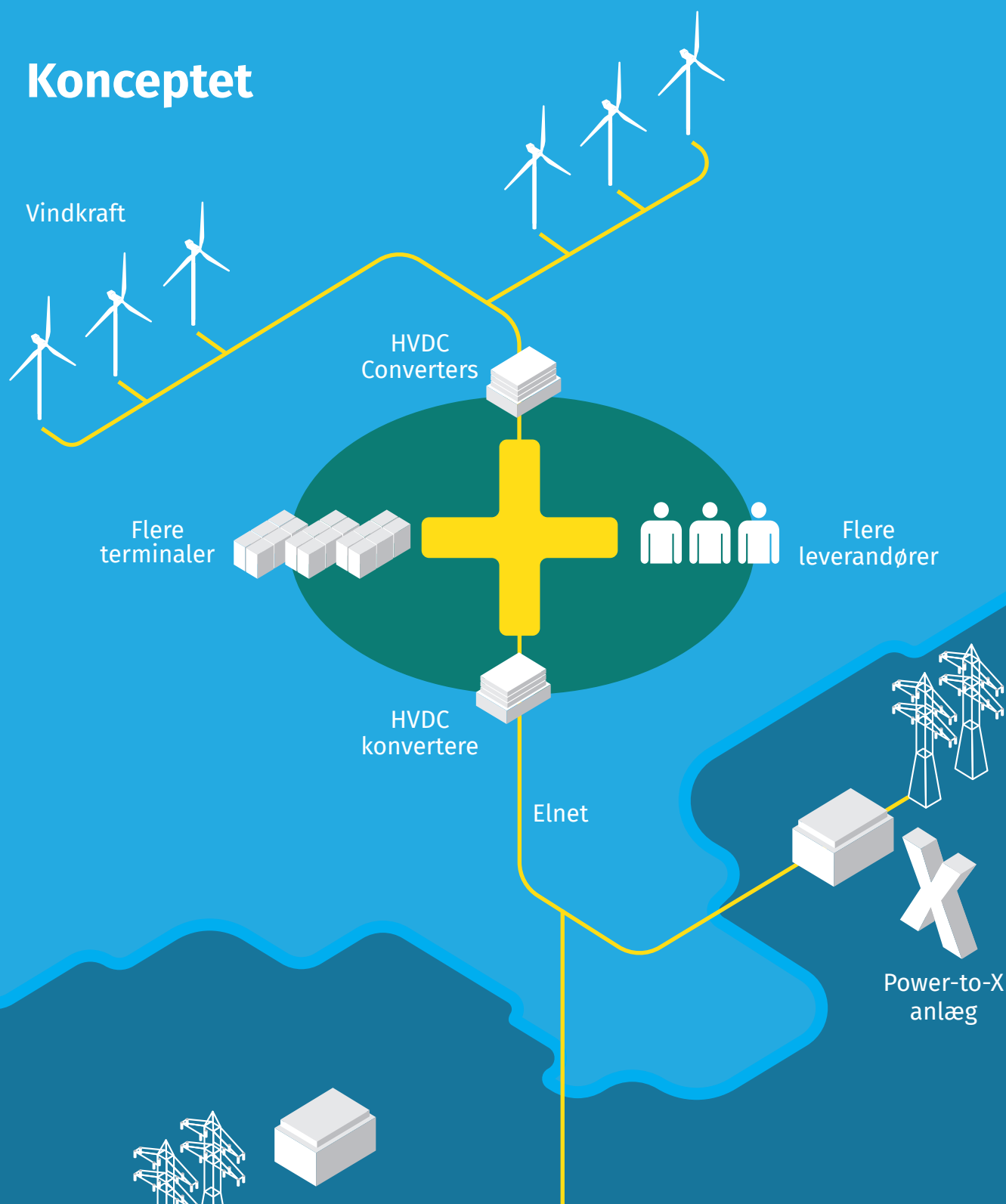
I dag er der mange internationale delegationer, der rejser til Danmark for at lære af vores erfaringer inden for f.eks. vindenergi, fjernvarme og systemintegration. Efterhånden som vi udvikler energiøerne, vil vi også få gæster, som ønsker at lære af vores erfaringer med at bygge energiøerne og om, hvordan man driver disse elektronmetropoler.

En vellykket udrulning af offshore-energiøerne vil styrke Danmarks konkurrenceevne og den danske eksport. Selv om energisystemet ikke er et eksportprodukt i sig selv, vil mange af komponenterne og serviceydelserne være det.

Tilsammen giver energiøerne unikke muligheder for hele sektoren: Virksomheder får mulighed for at udvikle nye teknologier og tjenester; politikere, lovgivere og de systemansvarlige netselskaber (TSO'er) for at udvikle de rammer, der er nødvendige for at drive energiøerne; universiteterne for bl.a. at skabe de nye løsninger, der skal bruges til energiøerne, og uddanne ingeniører og teknikere, der kan føre dem ud i livet. Denne viden vil blive delt, så vi kan fremme den grønne omstilling i hele verden.



Konceptet



Energiøer er hubs, der forbinder flere havvindkraftværker med elnettet ved hjælp af flere HVDC-konvertere fra forskellige leverandører. De kan også heste lagringsenheder og power-to-gas-konverteringsenheder.

Bidragydere

Nicolaos A. Cutululis (DTU)

Frede Blaabjerg (AAU)

Jacob Østergaard (DTU)

Claus Leth Bak (AAU)

Mattias Anderson (DTU)

Filipe Miguel Faria da Silva (AAU)

Hjörtur Jóhansson (DTU)

Xiongfei Wang (AAU)

Birte Holst Jørgensen (DTU)