

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet  
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi  
Institutt for matematiske realfag og teknologi

Masteroppgave 2016  
30 stp

# Nye satsingsområder for forskning og utvikling på teknologier tilpasset neste generasjon kraftsystem

New Priority Areas for Research and Development in  
Technologies for the Next Generation Power System

Vegard Holmefjord

## Forord

Denne masteroppgaven ble skrevet våren 2016 ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) på oppdrag fra Statnetts avdeling for forskning og utvikling (FoU).

Jeg ønsker å takke mine veiledere Sonja Berlijn og Oddgeir Kaspersen i Statnett for deres gode innspill og hjelp med denne masteroppgaven gjennom hele semesteret. Uten å nevne flere navn vil jeg takke samboer, venner, familie og kollegaer som har hjulpet til under prosessen.

Det har vært morsomt å få arbeide med en så tverrfaglig og variert oppgave. Den store bredden i oppgaven har også bidratt med å gjøre det ekstra lærerikt og spennende, men samtidig også spesielt utfordrende. Jeg håper at Statnett og andre kan få nytte av den.

Med denne oppgaven avsluttes en fantastisk studietid i Ås, hvor jeg har vært heldig som har fått studert miljøfysikk og fornybar energi i fem år.

Ås, 13. mai 2016

Vegard Holmefjord

## Sammendrag

Statnett er systemansvarlig for det norske kraftsystemet, noe som innebærer å drifte og eie 11000 km kraftledninger og omtrent 150 stasjoner. Europas andel uregulerbar fornybar kraftproduksjon stiger og kraftsystemet er i rask endring. På grunn av dette vil økt overføringskapasitet, økt effektkontroll og bedre overvåkning være viktige egenskaper blant de lovende teknologiene. Dette gir behov for teknologiutvikling i ledninger, kabler og stasjoner.

Statnetts avdeling for forskning og utvikling (FoU) har som mål å ha en balansert prosjektportefølje som utvikler løsninger tilpasset neste generasjon kraftsystem. Basert på en litteraturstudie blir teknologier tilpasset FoU-programmet Innovativ teknologi valgt ut og fokuset i Statnett blir sammenlignet med de eksterne forventningene. Dette blir gjort for å kartlegge mulige blindsoner i FoU-programmet og gjør det mulig å analysere hvilke fokusområder som er mest egnet for fremtidens FoU-prosjekter.

Det er funnet at fokusområdene innen teknologiutvikling utenfor og internt i Statnett er forskjellige. Litteraturstudien viste at Phase-Shifting Transformers (PST), HVDC effektbrytere, Gas-Insulated Lines (GIL), High-Temperature Superconductors (HTS) og Fault Current Limiters (FCL) bemerker seg som betydningsfulle teknologier for fremtiden. Til tross for dette er disse teknologiene lite aktuelle som satsingsområder for FoU i Statnett på grunn av dårlig tilpasning til norske forhold, upassende teknologisk modenhet eller leverandørdreven utvikling.

Litteraturen stiller også høye forventninger til Flexible AC Transmission Systems (FACTS), HVDC Voltage Source Converter (VSC), HVDC PEX-kabler, høytemperaturliner (HTLS) og nanoteknologi. Alle disse har det har vært satset på av FoU, og det kan derfor være mindre behov for videre prosjekter. Digitale stasjoner og sanntidsovervåkning med hjelp av sensorer, som for eksempel Dynamic Line Rating (DLR), er ifølge analysene mest egnet som fremtidige satsingsområder for Statnetts FoU-prosjekter. Sensorer for overvåkning av komponenter kan gi økt kapasitet, bedre tilstandskontroll og forlenget levetid.

## Abstract

Statnett is the Norwegian transmission system operator (TSO) which operates and owns 11,000 km of transmission lines and about 150 substations. The European share of variable renewable energy is rising and the power system is changing. For this reason increased power capacity, improved power control and better real-time monitoring are important characteristics for the emerging technologies. This will increase the need for new technologies in overhead transmission lines, cables and substations.

Research and development (R&D) in Statnett aims to have a balanced portfolio of projects that develop solutions for the next generation power system. Based on a literature review, emerging technologies tailored to the R&D program Innovative Technology are chosen and Statnett's focus is compared to the external expectations. This is done by searching for possible blind spots in the program and allows an analysis of focus areas suitable for future R&D projects.

It is found that the key priorities in technology outside and internally in Statnett is different. The literature review shows that phase shifting transformers (PST), HVDC circuit breakers, gas-insulated lines (GIL), high-temperature superconductors (HTS) and fault current limiters (FCL) are pointed out as significant technologies of the future. Despite this, these technologies are of little interest as priority areas for R&D projects because of their poor adaptation to Norwegian conditions, inappropriate technological maturity or vendor-driven development.

The literature also shows high expectations for Flexible AC transmission systems (FACTS), HVDC voltage source converter (VSC), HVDC XLPE cables, high-temperature low-sag conductors (HTLS) and nanotechnology. All these have previously been priority areas of the Statnett R&D projects, which might indicate less need for further projects. Digital substations and real-time monitoring with assistance from sensors, such as dynamic line rating (DLR), are according to the analysis most suitable as future priority areas in Statnett's R&D projects. Sensors for monitoring various components allow increased capacity, better control and extended lifetime.

## Liste over forkortelser

<b><u>Forkortelse</u></b>	<b><u>Engelsk navn</u></b>	<b><u>Norsk navn</u></b>
ACSR	Aluminium Conductor Steel-Reinforced	Ferealliner
AMS	Advanced Metering Infrastructure (AMI)	Automatiske måle- og styringssystemer
CSC	Current Source Converters	Strømkildeomformer
DLR	Dynamic Line Rating	
EMF	Electromagnetic Fields	Elektromagnetiske felt
FACTS	Flexible AC Transmission Systems	Fleksibelt AC overføringssystem
FCL	Fault Current Limiter	
FOCS	Fiber Optic Current Sensor	Fiberoptisk strømsensor
FoU	Research and Development	Forskning og utvikling
GIL	Gas-Insulated Lines	Gassisolerte kabler
GIS	Gas-Insulated Substations	Gassisolert apparatanlegg
HTC	High-Temperature Conductor	Høykapasitetsline
HTLS	High-Temperature Low-Sag conductors	Høytemperaturleder
HTS	High-Temperature Superconductors	Høytemperatur-superleder
HVAC	High Voltage Alternating Current	Høyspent vekselstrøm
HVDC	High Voltage Direct Current	Høyspent likestrøm
IKT	Information and communications technology (ICT)	Informasjons- og kommunikasjonsteknologi
LCC	Line Commutated Converter	Linjekommuterende omformer
MSC	Mechanically Switched Capacitor	Bryterkoblet kondensator
MTDC	Multiterminal HVDC	Multiterminal HVDC
NCIT	Non-Conventional Instrument Transformer	Ikke-konvensjonell måletransformator
NUP	Network Development Plan 2015	Statnetts Nettutviklingsplan 2015
PEX	Cross-Linked Poly-Ethylene (XLPE)	Tverrbundet polyetylen
PST	Phase-Shifting Transformer	Faseskiftende transformator
SCC	Self-Commutated Converter	Selvkommuterende omformer
SFCL	Superconducting Fault Current Limiter	Superledende FCL
SMUP	System Operation and Market Development Plan 2014-20	Systemdrifts- og markedsutviklingsplanen 2014-20
SSSC	Static Synchronous Series Compensator	Statisk synkron seriekompensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator	Statisk synkronkompensator
SVC	Static Var Compensator	Statisk VAR-kompensator
TCR	Thyristor Controlled Reactor	Tyristorstyrt reaktor
TCSC	Thyristor Controlled Series Compensation	Tyristorstyrt seriekompensator
TRL	Technology Readiness Level	Teknologiers modenhetsnivå
TSC	Thyristor Switched Capacitor	Tyristorkoblet kondensator
TSO	Transmission System Operator	Sentralnettoperatør
TSR	Thyristor Switched Reactor	Tyristorkoblet reaktor
VSC	Voltage Source Converter	Spenningskildeomformer

# Innholdsfortegnelse

Forord .....	ii
Sammendrag .....	iii
Abstract .....	iv
Liste over forkortelser .....	v
1 Innledning .....	1
2 Bakgrunn .....	2
2.1 Det norske kraftsystemet .....	2
2.2 Neste generasjon kraftsystem .....	2
2.3 Teknologitrender .....	3
2.4 IKT- og markedsløsninger .....	5
2.5 Forskning og utvikling (FoU) .....	5
2.6 Litteratur og metodebeskrivelse .....	8
3 Lovende teknologier .....	9
3.1 Digitale stasjoner .....	9
3.2 Phase Shifting Transformers (PST) .....	10
3.3 Flexible AC Transmission Systems (FACTS) .....	10
3.4 High Voltage Direct Current (HVDC) .....	13
3.5 Gas-Insulated Lines (GIL) .....	15
3.6 Høytemperaturliner (HTLS) .....	16
3.7 High-Temperature Superconductors (HTS) .....	17
3.8 Fault Current Limiter (FCL) .....	18
3.9 Sanntidsovervåkning og sensorteknologier .....	18
3.10 Dynamic Line Rating (DLR) .....	20
3.11 Nanoteknologi .....	21
4 Diskusjon rundt egnede teknologier .....	22
4.1 Vurdering av fokus .....	22
4.2 Mulige FoU-prosjekter .....	24
4.3 Alternativanalyse .....	26
4.4 Lite egnet til FoU-prosjekter .....	28
4.5 Middels egnet til FoU-prosjekter .....	29
4.6 Mest egnet til FoU-prosjekter .....	31
4.7 Teknologier med høyt fokus .....	32
5 Konklusjon .....	33
6 Litteraturliste .....	34

# 1 Innledning

Energisystemet er en kritisk del av et velfungerende samfunn. Norge er i stor grad et elektrifisert land og kraftoverføringen er en viktig forutsetning for verdiskaping. Statnett har ansvaret for drift og utbygging av sentralnettet i Norge og er systemansvarlig i det norske kraftsystemet, eller såkalt Transmission System Operator (TSO).

Satsingen på å bygge ut fremtidens kraftsystem er i gang. De neste fem årene anslår Statnett å investere totalt 40 – 55 milliarder kroner [1]. Utfordringene ligger i å bygge nytt nett på en sikker og samfunnsøkonomisk effektiv måte med bruk av de beste teknologiene tilgjengelige. Statnetts avdeling for forskning og utvikling (FoU) bringer frem ny kunnskap gjennom å satse på fremtidens løsninger. FoU har vist seg å gi gode resultater gjennom kostnadsreduksjoner innen blant annet spenningsoppgradering og nye mastefundamenter. Statnetts FoU-avdeling ønsker å undersøke mulige fremtidige teknologier og nye satsingsområder. Innovativ teknologi er et av FoU-programmene hvor det blir sett på nye tekniske løsninger innen luftledninger, kabler og transformatorstasjoner som er sikrere, raskere og billigere.

Denne masteroppgaven handler om å kartlegge lovende teknologier som foreløpig har vært lite dekket av dette FoU-programmet, og bidrar med anbefalinger for nye fokusområder til FoU-prosjekter. Det blir vurdert om enkelte teknologier har et høyt eller lavt fokus i forhold til forventningene utenfor Statnett. Oppgaven begrenser seg til teknologier som er innenfor Innovativ teknologi sitt fagområde og dekker dermed aktiviteter innen smarte nett, markedsløsninger, miljø og sikkerhet i mindre grad.

Problemstillingen blir løst gjennom å først undersøke forventningene utenfor Statnett for å gi et overblikk over hva som blir ansett å være kommende teknologier. Fokuset eksternt blir deretter sammenlignet med hvor stor satsingen har vært i FoU og Statnett for øvrig. Kort teori om de utvalgte teknologiene er nevnt i kapittel 3 og hvilke av dem som er egnet som FoU-prosjekt blir diskutert i kapittel 4.

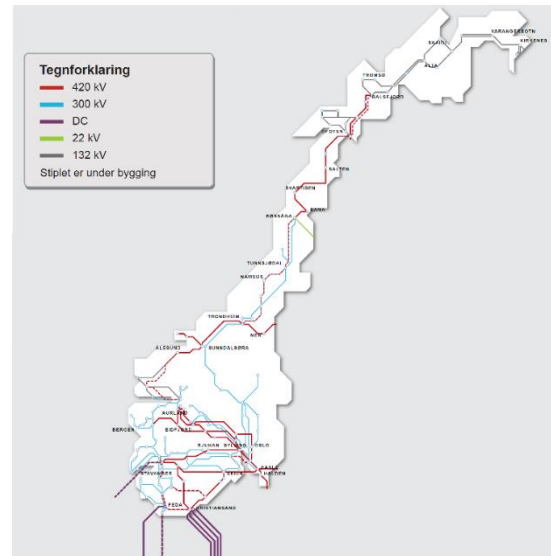
Selv om kraftnettene i stor grad blir bygget som før, endrer kraftsystemet seg i et raskt tempo. Dette må også TSO-ene legge til rette for og være forberedt på. Derfor er det viktig å skape seg et bilde av hvordan neste generasjon kraftsystem kommer til å se ut. På den måten kan Statnett velge riktig strategi for å tilpasse seg endringene som kan komme. Neste kapittel bidrar med bakgrunnskunnskap for å kunne velge riktige teknologier tilpasset fremtidens kraftsystem.

## 2 Bakgrunn

### 2.1 Det norske kraftsystemet

Det norske kraftsystemet er en del av et nordisk synkronområde og har en felles frekvens med ønske om å stadig opprettholde 50,0 Hz. Dette oppnås ved å hele tiden balansere forbruk og produksjon uten å overbelaste komponenter eller mørklegge områder. Stabilitet i frekvens og spenning er blant oppgavene som Statnetts driftssentral håndterer for å unngå feilsituasjoner. Statnett eier og drifter omtrent 11 000 km med luftledninger og kabler på de høyeste spenningsnivåene (som vist i Figur 2.1), i tillegg til om lag 150 transformatorstasjoner i sentralnettet og et reservekraftverk [2].

Det norske kraftsystemet kan ikke ses på som et isolert system. Tvert imot blir det stadig mer integrert med Europa, og nye mellomlandsforbindelser er under planlegging.



Figur 2.1 Sentralnettets utstrekning i Norge. Bildet er publisert med tillatelse fra Statnett.

### 2.2 Neste generasjon kraftsystem

Et aldrende sentralnett er i ferd med å erstattes og oppgraderes. Kraftnettet tar lang tid å planlegge og bygge, og har lang levetid, noe som står i sterk kontrast til en energisektor i rask endring. Det er viktig å kunne gi en prognose på hvordan produksjon og forbruk av kraft kommer til å utvikle seg på både kort og lang sikt. Forventningene til fremtidens kraftsystem kommer til å påvirke hvilke teknologier som vil bli tatt i bruk i sentralnettet for å tilpasse seg de endringene som vil komme.

I Norge har kraftforbruket økt og forventes å øke videre til tross for energieffektivisering [1]. På produksjonssiden har Norge allerede et godt utviklet, fornybart vannkraftsystem.



Elsertifikatordningen gir incentiver til å utvide fornybar kraftproduksjon, blant annet fra småskala vannkraft og vindkraft.

Statnetts rapport «Nettutviklingsplan 2015» (NUP) beskriver mulige utviklingstrekk i fremtidens kraftsystem med tanke på nettbehov og nye investeringer. NUP-en forteller at det forventes høyt investeringsnivå de nærmeste årene, men behovet for nytt sentralnett på lang sikt er usikkert [1]. Utviklingen som angår systemdriften i Statnett og markedsdesign er dekket av «Systemdrifts- og markedsutviklingsplanen 2014-20» (SMUP). Økte flytendringer, forverret frekvens- og spenningskvalitet er noen av de utfordringene som oppstår med økende andel uregulerbar produksjon og økt utvekslingskapasitet, ifølge SMUP-en [3].

Europeisk energipolitikk er i stor grad drevet av målet om å redusere klimagassutslipp, særlig CO<sub>2</sub>, der energisektoren står for mesteparten av utslippene [4]. For å nå målene er Europa nødt til å kutte på utslipp fra kullkraft og gasskraft og bytte ut denne med ny klimavennlig produksjon, særlig fra fornybare energikilder slik som sol, vind og vann. Hvor lang tid denne overgangen vil ta er usikkert, men innføringen av mer fornybar kraft vil være en viktig driver for nettutviklingen de neste tiårene.

Innføringen av fornybare energikilder fører til et endret kraftsystem for TSO-ene på grunn av sin uregulerbare og uforutsigbare natur [5]. Produksjonen vil bli mer desentralisert og har et annet produksjonsmønster enn tradisjonelle kilder. Nytt forbruk og ny produksjon vil føre til høyt investeringsnivå både i distribusjons- og transmisjonsnettene [3].

Til tross for at norsk kraftproduksjon allerede er fornybar, må Statnett likevel være forberedt på endringene som skjer på resten av kontinentet. Forventningene til fremtidens kraftsystem er viktige å forstå siden de påvirker hvilke teknologier som vil innføres.

## 2.3 Teknologitrender

Det stilles høye krav til utbygging av fremtidens sentralnett. Det er ønskelig at kraftnettet skal ha høyere kapasitet for å gi god forsyningssikkerhet, men ta opp lite plass og med minst mulig fotavtrykk. Uregulerbar kraftproduksjon blir innført i større grad i Europa, men dette må skje med hjelp av teknologier i sentralnettet som er tilpasset de endringene som kommer. Disse forventningene påvirker fremtidens teknologivalg.

Den europeiske TSO-organisasjonen ENTSO-E deler kommende teknologier inn i [5]:

- Økt overføringskapasitet
- Økt effektkontroll
- Overvåkningssystemer
- Kontrollsystemer
- Energilagring

De to sistnevnte er utenfor denne oppgavens begrensninger, men de resterende tre er godt dekket av oppgaven gjennom flere alternative teknologier.

Behovet for ny teknologi kan variere geografisk. I tettbygde strøk vil det for eksempel være viktig med kompakt mastedesign og samtidig høy kapasitet slik at arealbruken minimeres. Med økt urbanisering kan slike utfordringer bli vanligere. Reduksjon av elektromagnetiske felt (EMF) og støy er dessuten viktigere i nærheten av tettbebyggelse. Forventningene til befolkningen vil drive TSO-ene til teknologiutvikling for eksempel gjennom ønsket om mindre synlige master.

Økt overføringskapasitet kan oppnås på mange måter. Tradisjonelt bygges flere ledninger parallelt med eksisterende traseer inntil ønsket kapasitet er oppnådd. Som et alternativ har Statnett spenningsoppgradert mange strekninger fra 300 kV til 420 kV. Økt kontroll over aktiv og reaktiv effekt kan bidra til høyere overføringskapasitet i tillegg til andre fordeler. Termiske begrensninger kan forbedres med temperaturoppgraderinger slik at mer strøm kan passere gjennom ledningene. For luftledningene kan dette skje for eksempel gjennom å heve festepunkt i mastene, bruk av andre materialer i ledningene eller ved å fjerne hindringer på bakkenivå.

Siden det forventes raske flytendringer vil fremtidens kraftsystem etterspørre fleksible løsninger. Dette vil også innebære komponenter som tåler varierende og høy belastning. Dessuten vil det bli større behov for komponenter som effektivt kan regulere spenning, aktiv og reaktiv effekt.

For å bedre ivareta anlegg vil TSO-ene måtte håndtere store mengder datainformasjon. Stadig billigere systemer innen informasjons- og kommunikasjonsteknologi (IKT) tillater dette. Mange oppgaver som i dag er manuelle vil kunne automatiseres for å gi hyppigere og mer nøyaktige målinger av en rekke parametere. Overvåkningssystemer for tilstandskontroll vil kunne gi en bedre utnyttelse av komponentene.

## 2.4 IKT- og markedsløsninger

Det fysiske kraftsystemet kan ikke fungere effektivt uten et velfungerende kraftmarked med smarte IKT-systemer. For å forstå de tekniske løsningene som denne oppgaven dekker, må også helheten forstås. I et komplekst kraftsystem vil nye løsninger innen IKT og nye markedsmodeller være nødvendig for å sikre god forsyningssikkerhet.

Disse nye smarte løsningene blir ofte omtalt som «Smart Grid». Avanserte måle- og styringssystemer (AMS) blir innført over hele landet og bidrar med bedre forbruksdata og prisinformasjon slik at forbruket kan bli mer fleksibelt. Automatiserte IKT-systemer bidrar til mer effektiv styring av balanseresserver, flaskehalshåndtering og overvåkning [3]. Det vil for eksempel være nødvendig å få en bedre forståelse av hvordan mer ekstremvær vil påvirke planlegging og drift av nettet. SMUP 2014 foreslår å forbedre prognosemodeller for forbruk og produksjon. Det har blitt økt fokus på spenningskvalitet og derfor vil det bli bygget flere anlegg for spenningsregulering fremover [3].

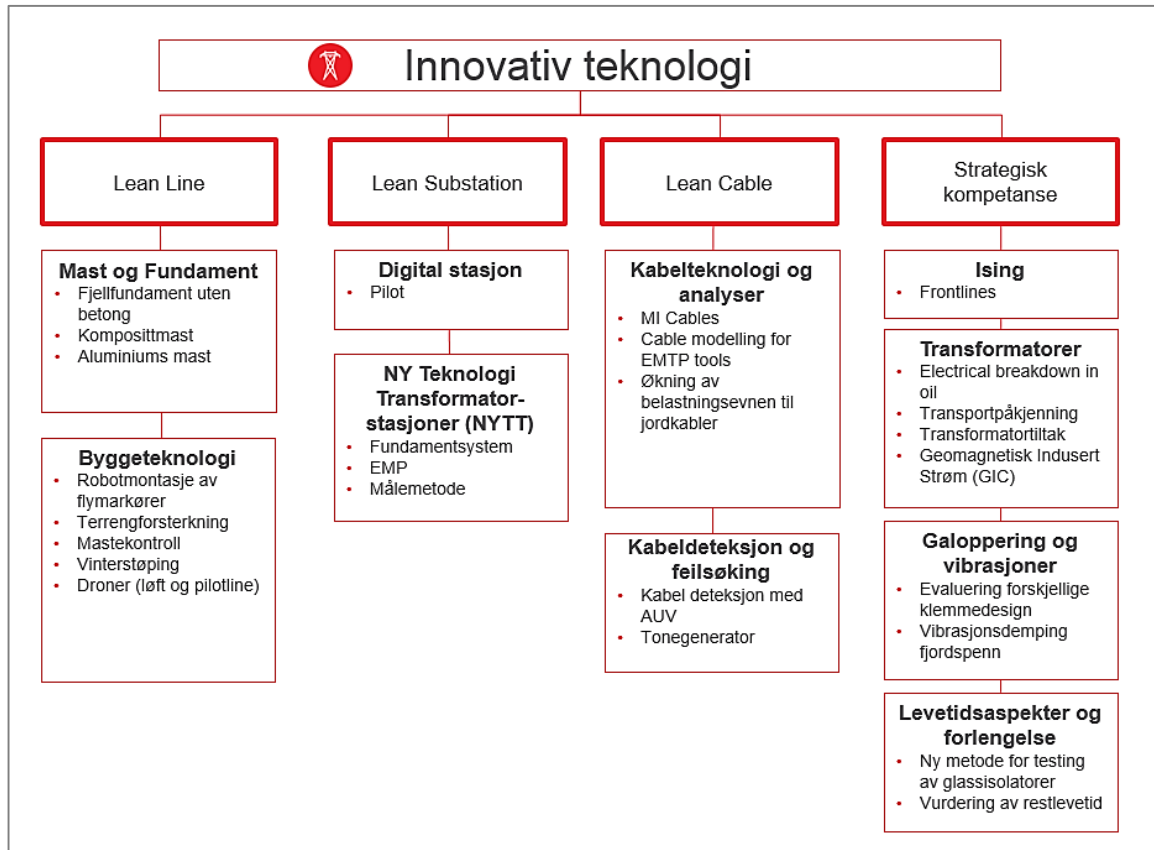
Etter hvert som Europa innfører mer energilagring og fleksibelt forbruk må det også finnes gode modeller som kan forutsi hvordan denne utviklingen vil foregå på en samfunnsøkonomisk optimal måte. Med et mer komplekst kraftsystem er det også nødvendig med bedre kontroll og overvåkning av nettet. Nye IKT-verktøy må tas i bruk for en bedre forvaltning av eksisterende anlegg og bedre planlegging av nye anlegg [5].

Lite utprøvde markedsmoeller som for eksempel flytbasert markedsklarering og finere tidsoppløsning i balansemarkedene pekes på som mulige løsninger på noen av utfordringene som forventes i fremtiden [3].

## 2.5 Forskning og utvikling (FoU)

Statnett har som strategi å være innovativt og forbedringsdrevet. Statnetts FoU-avdeling består av programmene Innovativ teknologi, Smarte nett og Bærekraftig systemutvikling. FoU-programmet Innovativ teknologi fokuserer på nye løsninger tilpasset neste generasjon kraftsystem. Programmet deles inn i løsninger for ledninger, kabler og stasjoner, og de pågående prosjektene er vist i Figur 2.2. Mange av prosjektene har vært rettet mot byggeteknikk og har brukt såkalt «lean»-metodikk for å sikre effektiv ressursbruk. For eksempel vil færre

helikopterturer og mindre ventetid gi kortere byggetid og samtidig sparte kostnader. Noen viktige prosjekter som allerede har vært undersøkt av Innovativ teknologi omfatter blant annet alternativ mastedesign, alternative mastematerialer (kompositt og aluminium) og prefabrikkerte mastefundamenter.



Figur 2.2 Oversikt over Innovativ teknologi og pågående prosjekter. Bildet er publisert med tillatelse fra Statnett.

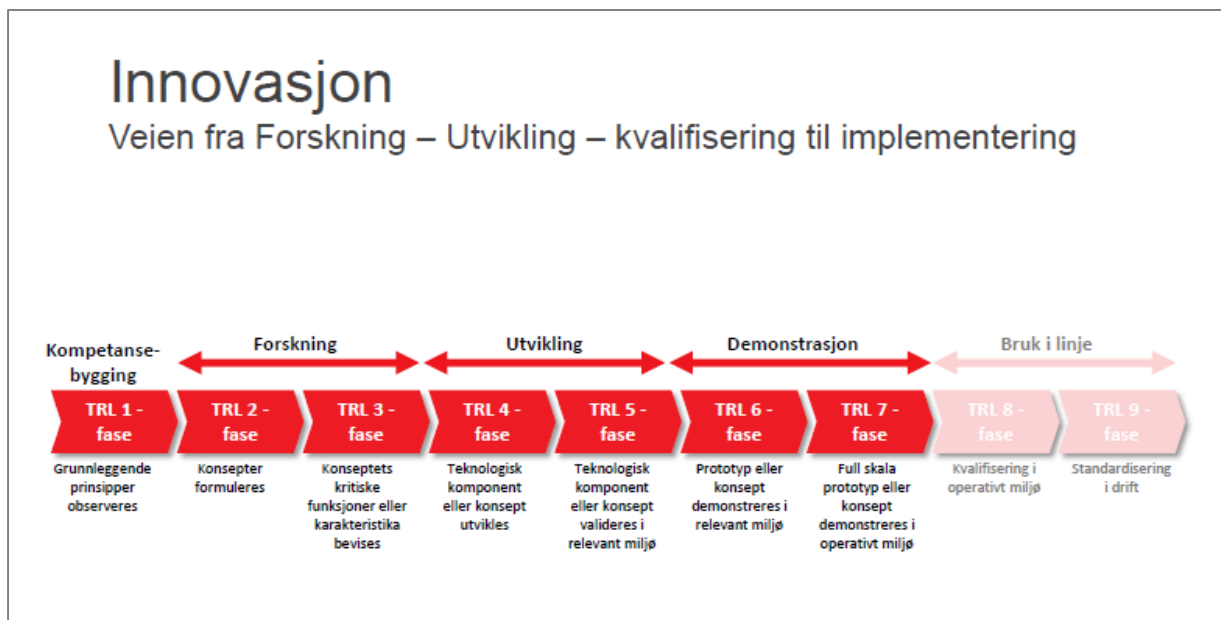
Etter hvert som flere av bygge- og vedlikeholdsprosessene er blitt effektiviserte kan flere av Innovativ teknologi sine FoU-prosjekter bli rettet mot teknologibruk og materialvalg. Det skiller her mellom bruk av nye metoder (som det allerede er stort fokus på i Innovativ teknologi) og nye teknologier. Statnett er opptatt av en balanse mellom kontinuerlig forbedring og banebrytende nyvinninger. Dessuten er det ønskelig med en balanse mellom forskningsprosjekter og utviklingsprosjekter.

I denne bransjen har innovasjon historisk sett vært krevende og investeringene kjennetegnes som kapital- og ressurskrevende. Utprøving av nye teknologier har derfor vært både risikofyllt og tidkrevende. Lite utprøvde komponenter kan ha ukjente konsekvenser for systemet når de innføres gjennom pilotprosjekter [6]. Utviklingen av nye teknologier må derfor skje trinnvis [5]. På den andre siden kan nytten være stor når alternativene likevel viser seg å være bedre

egnet. Forskning og utvikling handler om prøving, feiling og om å gå vekk fra konvensjonell tenking. Det er en langsiktig satsing og det er viktig å satse på FoU-prosjekter selv om det er en risiko for at de kan mislykkes.

Produsenter og leverandører av Statnetts anlegg utvikler nye løsninger. Derfor er relasjonsbygging og gode forskningspartnere viktig. Riktignok kan Statnett bidra til å fremskynde nye teknologier gjennom å sponse eller å delta i prosjekter. Ved å etterspørre nye løsninger vil det signalisere et behov for teknologiutvikling fra produsentene. Dessuten er TSO-ene viktige for storskala testing av nye løsninger, og deretter blir det lettere å avsløre mulige forbedringspunkter.

Teknologiutvikling kan deles inn i faser etter hvor modne teknologiene er. Statnett bruker Technology Readiness Levels (TRL) og Figur 2.3 viser fasene i denne inndelingen.



Figur 2.3 Alle TRL-fasene 1 - 9. FoU i Statnett ønsker å arbeide innen TRL 1 – 7, noe som innebærer kompetansebygging, forskning, utvikling og demonstrasjon. Bildet er publisert med tillatelse fra Statnett.

Nytten av FoU blir ofte ikke observert før lang tid senere siden prosessen fra forskning til kommersialisering kan være svært tidkrevende. For å være forberedt på store endringer i kraftsystemet de neste tiårene må forskningen være i forkant av utviklingen slik at de best egnede teknologiene enkelt kan bli tatt i bruk senere.

## 2.6 Litteratur og metodebeskrivelse

I denne litteraturstudien har det blitt funnet at noen kommende teknologier skiller seg ut som svært viktige. De mest lovende blir plukket ut i kapittel 3. Litteratur som har vist seg å gi gode svar på mulige kommende teknologier er fra ENTSO-E sine rapporter «R&D Roadmap 2013-2022» [5], «TYNDP 2014» (Ten-Year Network Development Plan) [6] og «R&D Implementation Plan 2016-2018» [7]. I tillegg er det flere andre publikasjoner som nevner forventninger om hva som kan bli fremtidens teknologier [8-15]. Denne litteraturen gir et grovt bilde over fokuset utenfor Statnett og kan kalles for de eksterne forventningene for fremtidens teknologier. En oversikt over andre TSO-ers FoU-aktiviteter kunne vært relevant i litteraturstudien, men dette er Statnett og FoU allerede oppmerksomme på.

Innholdet i FoU og Innovativ teknologi-programmet undersøkes for å kunne vurdere hvor stort fokuset har vært på teknologiene som er valgt ut. En fokusvurdering sammenligner Statnetts fokus med eksterne forventninger. Sammenligningen gir et grunnlag for å fortelle om hva som er satset mye og lite på av Statnett. Det er riktignok ikke så enkelt siden visse teknologier vil være mer eller mindre aktuelle i det norske sentralnettet enn i områder der litteraturen er hentet fra. Dette vil avgjøre om Statnett bør være i front som FoU-aktør på området eller om selskapet bør ha en avventende rolle for å observere teknologiutviklingen. Dessuten kan enkelte teknologier ha høye forventninger eksternt, men som likevel vil være lite egnet som et FoU-prosjekt i Statnett av ulike grunner. Dette blir det tatt hensyn til i en alternativanalyse før prosjekter til slutt anbefales som FoU-prosjekt eller ikke. Teknologiene som er valgt ut er i hovedsak brede fagområder, så der det er funnet mer spesialiserte oppgaver tilpasset FoU-prosjekter blir dette nevnt.

## 3 Lovende teknologier

Ut ifra fokuset i relevant litteratur har teknologier som er nevnt i dette kapittelet vist seg å være aktuelle kandidater som mulige FoU-prosjekter. Mange av teknologiene har vært kjent i lang tid, også fra Statnetts side, men det pågår stadig en utvikling på flere av feltene. I dette kapittelet introduseres disse kortfattet. For hver teknologi nevnes blant annet dens egenskaper, virkemåte, fordeler, ulemper, modenhet og hvor stor satsingen har vært fra Statnetts side.

### 3.1 Digitale stasjoner

IEC 61850 er en internasjonal standard for Ethernet-kommunikasjon i transformatorstasjonene. Sammen med Non-Conventional Instrument Transformers (NCIT) istedenfor konvensjonelle strøm- og spenningstransformatorer danner disse grunnlaget for digitale stasjoner [16]. Digitale stasjoner erstatter analoge signaler slik at stasjonene blir mer intelligente gjennom mer informasjon og bedre kommunikasjonsegenskaper.

Fordelene med digitale stasjoner er enklere og mer kompakte anlegg. De vil også kunne være sikrere, billigere og ha høyere pålitelighet enn tradisjonelle stasjoner [17, 18]. Digitale stasjoner kan derfor gi både tekniske og økonomiske fordeler. Måletransformatorene er relativt billige, men feil kan gi store konsekvenser. Pålitelighet er derfor en særdeles viktig faktor i stasjonene. En digital stasjon kan designes på forskjellige måter og det gjenstår mye arbeid for å finne den optimale løsningen. Standardisering og kompatibilitet fra ulike leverandører har tidligere vært en utfordring [19].

Høyere spenningsnivåer og dermed større stasjoner fører til økt mengde kostbar kobber for å koble sammen bryter- og målekomponenter. Med NCIT kan signaler sendes med fiberoptiske kabler og kan dermed erstatte store mengder kobber mellom brytere og kontrollrom [19]. Rogowski-spole, kapasitiv spenningsdeler og optiske sensorer (som vist i Figur 3.1) er noen vanlige varianter [20]. Digitale stasjoner åpner for mer informasjon som blir tilgjengelig med god nøyaktighet.



*Figur 3.1 Effektbryter med fiberoptisk strømsensor (FOCS). Bildet er publisert med tillatelse fra ABB.*

Slike stasjoner finnes ikke i Norge i dag, men FoU og Innovativ teknologi har allerede startet et prosjekt på digitale stasjoner og mener satsingen burde trappes opp videre. Fagpersoner i Statnett ytrer også et ønske om å erstatte bruk av kobber til fordel for fiber [21]. ENTSO-E derimot har ikke prioritert denne teknologien høyt.

### 3.2 Phase Shifting Transformers (PST)

Faseskiftende transformatorer (PST) er en moden teknologi som kan kontrollere aktiv effekt gjennom å regulere fasevinkelen [22]. Dette er nyttig der en ledning er overlastet, samtidig som en parallell ledning har ledig kapasitet, slik at lasten blir jevnere fordelt [6].

Til tross for høye kostnader er PST brukt blant annet i det vestlige USA og Belgia, og mange flere vil installeres fremover [6, 23]. Bedre kontroll over aktiv effekt blir stadig mer etterspurt og derfor blir PST regnet av mange som en lovende teknologi [5, 6].

Statnett har regnet på konsekvensene av å innføre PST i det norske sentralnettet, men funnet ut at det norske kraftsystemet ikke er tilpasset en slik løsning [24]. Blant annet vil PST øke tapene i systemet og gi suboptimal belastning i ledningene. Selv i de mest gunstige tilfellene har det vist seg at andre teknologier, for eksempel seriekondensatorbatterier, er bedre egnet for å øke kontroll over flyten.

### 3.3 Flexible AC Transmission Systems (FACTS)

FACTS er en gruppe styringskomponenter brukt i HVAC-systemer basert på en kombinasjon av tradisjonelle komponenter (kondensatorer og reaktorer) og nyere kraftelektronikk (tyristorer og transistorer). FACTS er en moden og velkjent teknologi som har vært lenge i bruk, men det er høye forventninger om flere anvendelser og at videre teknologiutvikling innen kraftelektronikk vil gi reduserte kostnader [6].

FACTS-komponentene har ulike egenskaper, men øker generelt kontroll- og overføringsevnen gjennom å raskt kunne regulere reaktiv effekt [25]. Dette vil tillate innføring av mer uregulerbar fornybar kraft. Balansering av reaktiv effekt er viktig for god spenningskvalitet og effektivitet ved å redusere elektriske tap. Reguleringen kan dessuten forbedre dynamisk (stasjonær) og

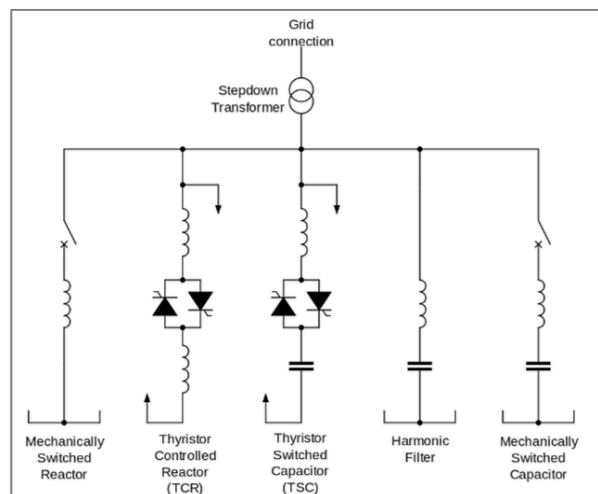


transient stabilitet. Med stabilitet menes kraftsystemets evne til å gjenopprette normale driftsforhold etter en driftsforstyrrelse.

Det finnes flere ulike varianter av kompenseringssystemer, og FACTS er kun en del av denne typen anlegg. Kondensatorbatterier tilfører reaktiv effekt og kan dermed øke spenningen. Reaktorer sluker reaktiv effekt slik at spenningen synker. Roterende fasekompensatorer kan både øke og redusere spenningen, og bedrer kortslutningsytelsen [26].

FACTS deles gjerne inn etter om de er koblet i serie, shunt eller en kombinert type. For spenningskontroll er det shuntkoblede (parallelt med ledningen) som er av interesse [27]. Statiske kompensatorer, slik som Static Var Compensator (SVC) og Static Synchronous Compensator (STATCOM), er effektive til spenningskontroll siden de kan både øke og redusere spenningen [28]. Disse har også vært de mest anvendte og modne av FACTS-teknologiene [6]. STATCOM bruker VSC-teknologi (se avsnitt 3.4.1) og kan fungere som både produsent og forbruker av reaktiv effekt.

SVC kan gi bedre dynamisk og transient stabilitet. I SVC-anlegg kombineres tyristor-koblede kondensatorer (TSC) med tyristorstyrte reaktorer (TCR) som gir hurtig og automatisk spenningsregulering som illustrert i Figur 3.2 [29]. Tyristorkoblede reaktorer (TSR) og bryterkoblede kondensatorer (MSC) er også vanlige [13]. Dersom problemet er for høy spenning er det tilstrekkelig med kun en reaktor, for eksempel TCR.



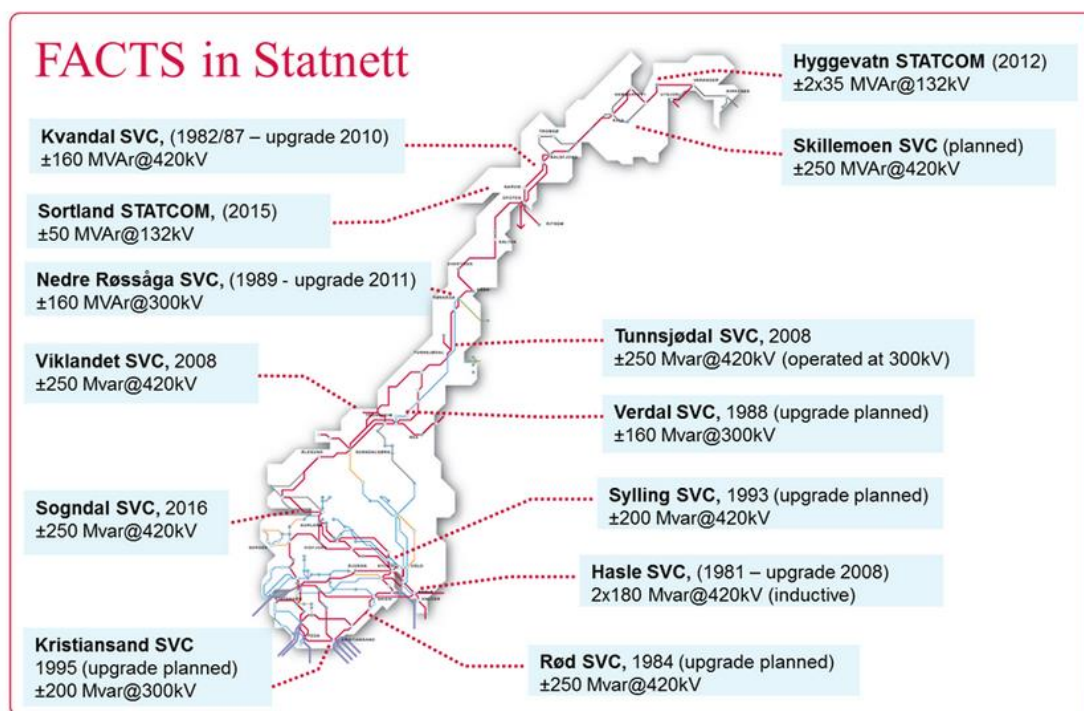
Figur 3.2 Noen mulige komponenter i SVC-anlegg.  
Lisens: CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons.

Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) og Static Synchronous Series Compensator (SSSC) er to vanlige seriekoblede FACTS-varianter. Både TCSC og SSSC kan, i likhet med SVC, forbedre dynamisk og transient stabilitet, begrense feilstrømmer og dempe pendlinger [30, 31]. Det finnes også hybride serie- og shuntløsninger slik som Unified Power Flow Controllers (UPFC), men disse har høyere kostnad. UPFC kan regulere spenning, reaktans og fasevinkel uavhengig og samtidig. I tillegg er det en rekke andre alternativer med ulike egenskaper [30].

FACTS-anlegg bidrar ofte med harmonisk støy og mange av disse har derfor harmoniske filtre som håndterer overharmoniske. Andre ulemper som høye investeringskostnader, kompleksitet

og usikker pålitelighet har vært hindre, men de systemmessige fordelene med økt kontroll og fleksibilitet gjør at teknologien blir satset stort på [6]. ENTSO-E og flere utpeker FACTS som en av de mest lovende teknologiene for fremtidens kraftsystem [5-10, 12-15]. De krever generelt lite vedlikehold og driftes automatisk. FoU innen FACTS-teknologi kan bidra til lavere kostnader for kraftelektronikken og økt forståelse for hvordan anleggene kan bli tatt i bruk. Foreløpig har shunt-koblede FACTS-anlegg (SVC og STATCOM) vært mest i bruk både i Norge og Europa, men flere varianter av FACTS kan etter hvert bli mer vanlig [6].

Det har tidligere vært FoU-prosjekter i Statnett på FACTS, men for tiden er det ikke fokus på dette i FoU. Siden flere slike anlegg har vært bygget i Norge er det god fagkompetanse innen FACTS for øvrig i Statnett. Statnett har vært opptatt av forbedret spenningskvalitet og installert flere kompenseringsanlegg de siste årene [3]. Noen av disse har vært FACTS-anlegg og en oversikt over alle disse er vist i Figur 3.3. Statnett driver og eier totalt ti SVC-anlegg og et STATCOM-anlegg [32]. Behovet for nye anlegg avhenger av kortslutningsytelse og spenningsforhold lokalt.

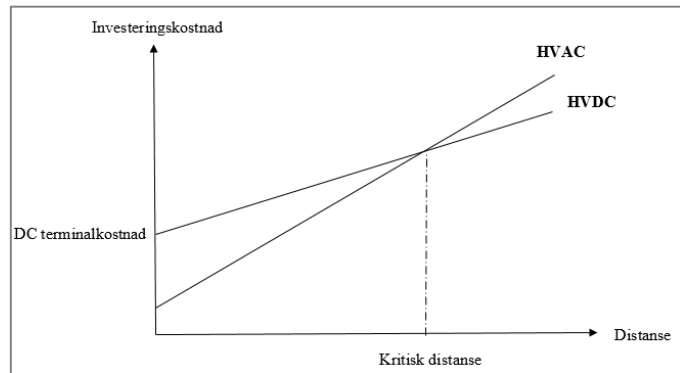


Figur 3.3 Oversikt over Statnetts FACTS-anlegg tilknyttet det norske sentralnettet i 2016. Bildet er publisert med tillatelse fra Statnett.

### 3.4 High Voltage Direct Current (HVDC)

For lange strekninger er HVDC brukt for å knytte sammen ulike synkronområder eller offshore vindkraft. HVAC egner seg lite for lange strekninger siden kablene gir et kapasitivt bidrag og større elektriske tap. Til tross for høye kostnader for omformerstasjonene vil det som vist i Figur 3.4 lønne seg med HVDC ved en tilstrekkelig lang distanse. For sjøkabler er denne distansen 100 – 130 km, og omtrent 700 km for luftledninger [6].

Med stadig større avstand mellom produsent og forbruker vil HVDC spille en viktig rolle. Det er mange konsepter som baserer seg på HVDC-teknologi. Combined Grid Solution (CGS) er en



Figur 3.4 Kostnadsbildet for HVAC og HVDC. For en gitt kritisk («break-even») distanse vil investeringskostnaden for HVDC og HVAC være like.

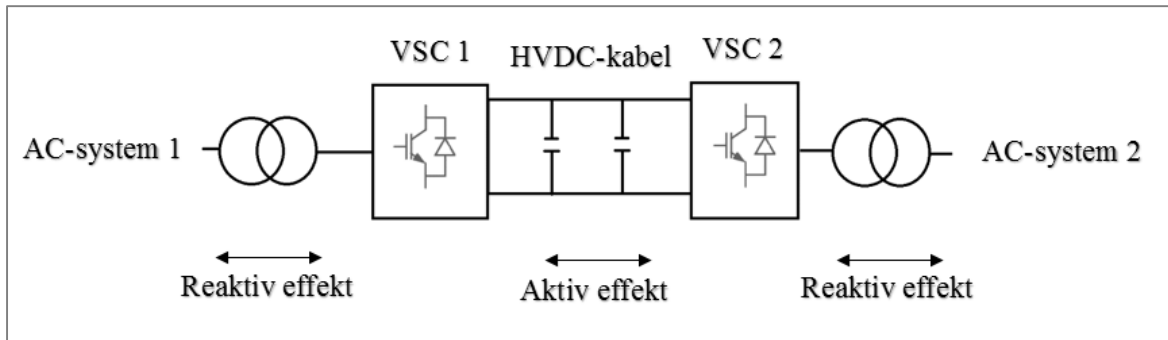
fleksibel løsning for å koble sammen ulike land og samtidig offshore vind. Tanken om et «hybrid nett» kombinerer HVAC og HVDC slik at hver teknologi blir brukt der de er best egnet [6]. Enkelte ser også for seg et HVDC «supergrid» som en ryggrad i det europeiske kraftnettet, for eksempel slik at solkraft i Sør-Europa og vannkraft i Nord-Europa blir tettere sammenkoblet [33]. Større utbredelse av HVDC kan føre til anvendelser annet enn kun å tilknytte to AC-systemer (punkt-til-punkt eller back-to-back).

HVDC er et stort tema internasjonalt så vel som i Norge. Statnett har investert i store prosjekter gjennom Skagerak 1 – 4 (1700 MW til Danmark) og NorNed (700 MW til Nederland) som har gitt Statnett gode erfaringer innen HVDC-teknologi. Planlagte prosjekter er North Sea Link (NSL, 1400 MW til England) og NordLink (1400 MW til Tyskland) [1].

#### 3.4.1 HVDC Voltage Source Converter (VSC)

Voltage Source Converters (VSC) er en populær nykommer innen omformerteknologi. VSC tar gradvis over for konvensjonelle Current Source Converters (CSC) på grunn av flere tekniske fordeler. Blant annet er VSC mer fleksibel gjennom kontroll over aktiv og reaktiv effekt (se Figur 3.5), har bedre oppstartsegenskaper og er mindre plasskrevende enn CSC [34]. VSC er også bedre egnet til å knytte seg til offshore vindparker eller HVDC-nettverk med flere

tilknytningspunkter, såkalt Multiterminal HVDC (MTDC) [35]. Likevel er CSC vanlig for HVDC-kabler for de høyeste effekt- og spenningsnivåene. Ulemper med VSC innebærer høyere stasjonskostnader og høyere tap [6, 36]. VSC holder konstant spenning med en kondensator, mens CSC holder strømmen konstant med en induktans (spole) [37].



Figur 3.5 Forenklet skisse over et VSC-basert HVDC-system som knytter sammen to AC-nett.

Utviklingen går fra linjekommuterende omformere (LCC) med tyristorer som slås av når strømmen bytter retning, til selvkommuterende omformere (SCC) med transistorer (ofte IGBT) som fritt kan slås av og på [34]. VSC-SCC er altså mer fleksibel enn tradisjonell CSC-LCC-teknologi. Dette er en av årsakene til at det nå er større fokus på VSC i tillegg til bedre kontroll over spenning, aktiv effekt og reaktiv effekt [13].



Figur 3.6 Omformerhall med IGBT-transistorer for HVDC-overføring mellom Frankrike og Spania. Bilde er publisert med tillatelse fra Siemens.

Statnett tok i bruk ABBs VSC-teknologi i Skagerak 4-kabelen med rekordhøy 500 kV spenning [38]. Dessuten er det planlagt VSC på forbindelsene NSL og NordLink. Statnett har altså fått erfaring gjennom disse utenlandsforbindelsene, men FoU har ikke hatt nylige prosjekter på HVDC VSC. EU-prosjektene «Best Paths Project» og «TWENTIES» har hatt fokus på teknologier som kan løse utfordringer knyttet til økende innfasing av fornybare energikilder. VSC har vært et av fokusområdene i disse prosjektene [39].

### 3.4.2 HVDC effektbrytere

Videre utvikling og erfaring med HVDC effektbrytere kan muliggjøre maskede HVDC-nettverk. Utfordringene ligger i å kunne bryte kortslutningsstrømmene raskt og pålitelig [40]. Den hybride HVDC-bryteren som ABB utviklet i 2012 kombinerer kraftelektronikk med mekanisk bryting. HVDC-brytere ble testet suksessfullt av TWENTIES-prosjektet [39]. Videre forskning må til for å realisere bruk av slike effektbrytere [7]. Mangelen på HVDC-brytere har vært en av begrensningene som har ført til HVAC-dominans [6].

### 3.4.3 HVDC PEX-kabler

Ekstruderte plastisolerte PEX-kabler tar over markedet for de høyeste spenningene som lenge har vært dominert av papirisolerte kabler. For HVDC sjøkabler har masseimpregnerte kabler (MI) vært det optimale valget grunnet høy kapasitet, men utviklingen her har stagnert [41].

For HVDC PEX-kabler derimot er det forventninger om videre fremskritt slik at de kan bli tatt i bruk for høyere spenninger enn dagens begrensning (ca. 320 kV og 1000 MW) [6]. Teknologiutviklingen er drevet frem av kabelleverandørene, men FoU i Statnett har tidligere vært involvert gjennom samarbeid med disse [24]. PEX er altså en gammel teknologi, men den forbedres og blir brukt i større grad enn tidligere. I ENTSO-Es nettutviklingsplan fokuseres det derfor sterkt på både HVAC og HVDC PEX som en kommende teknologi [6].

## 3.5 Gas-Insulated Lines (GIL)

Utviklingen går mot en økende andel underjordiske kabler [6]. Med behov for svært høy kapasitet kombinert med plassmangel kan Gas-Insulated Lines (GIL) være en mulig kandidat. GIL blir lagt i en tunnel fylt med SF<sub>6</sub>-gass blandet med nitrogen. Teknologien ble for første gang tatt i bruk i 1974, men har særlig de siste årene blitt en mer populær løsning [42]. GIL har hittil vært brukt kun for korte strekninger der tradisjonelle kabler ikke kan oppnå tilstrekkelig kapasitet. Teknologien er utviklet gjennom erfaringer fra effektbrytere med SF<sub>6</sub>-gass (GIS), se for øvrig Figur 3.7.

Fordelene med GIL inkluderer lave tap, lang levetid og høy pålitelighet, men ulempene opphever normalt fordelene [42]. For det første er investeringskostnadene mye høyere enn tradisjonelle teknologier, men mest for lavere spenningsnivåer. Ved 420 – 550 kV kan GIL koste omtrent 6 – 8 ganger mer enn vanlige luftledninger, mens for 1000 kV er kostnaden 2 – 3 ganger mer [42]. Dette gjelder investeringskostnadene og tar riktignok ikke hensyn til fordelene som GIL kan ha innen drift og vedlikehold. For det andre har SF<sub>6</sub>-gass en uheldig klimagasseffekt dersom en lekkasje skulle forekomme.



Figur 3.7 Grensesnitt mellom GIL-rør og GIS-bryter i Kina. Bildet er publisert med tillatelse fra Siemens.

En svært liten andel av Europas sentralnett forventes å benytte seg av GIL innen 2030 ifølge ENTSO-Es nettutviklingsplan [6]. Likevel er det altså et interessant alternativ i spesielle situasjoner der lav visuell påvirkning, lite plass tilgjengelig og høy kapasitet er viktige faktorer. GIL har vært lavt prioritert av Statnett siden anvendelsesområdet er lite.

### 3.6 Høytemperaturliner (HTLS)

High-Temperature Low-Sag conductors (HTLS) eller høytemperaturliner er et alternativ for å øke kapasiteten på en luftledning med termisk begrensning. HTLS er et samlebegrep for liner som sager mindre ned ved økt temperatur. Begrepet høykapasitetsliner (HTC) gjelder generelt for liner som gir høyere strømtetthet, men muliggjør ikke nødvendigvis høyere driftstemperaturer slik som i HTLS. I luftstrek er liner med aluminium og stål (ACSR) mest brukt som leder. HTLS kan øke kapasiteten på ledningene da de tåler temperaturer på 150 – 250 °C, mens konvensjonell ACSR kan kun driftes på opptil 90 – 100 °C over lengre tid [43]. Aluminiumet i ACSR vil miste mekanisk styrke ved høye temperaturer og sige ned slik at risikoen for overslag stiger.

HTLS er særlig nyttig der en oppgradering bør skje raskt. Der en lednings termiske kapasitet er begrensende faktor er det mulig å bytte ut ACSR med HTLS-materialer, og da er det ofte ikke nødvendig med større modifikasjoner i mastene [11]. Dersom HTLS er et alternativ til å bygge nye master for å gi ønsket kapasitet, vil det gi fordeler gjennom å unngå kostnader for nye



master, regulatoriske utfordringer og lang gjennomføringstid. Reduserte kostnader kan komme opp mot 1 MNOK/km [43].

Dessverre har HTLS-materialer ofte betydelig høyere investeringskostnader enn tradisjonell ACSR, noe som fører til sjelden bruk. Ved å ta med kostnader fra elektriske tap, installering, vedlikehold og drift kan de totale systemkostnadene jevne seg ut [6].

Noen kjente varianter er Aluminium Conductor Steel Supported (ACSS), Gap-type Aluminium Conductor Steel Reinforced (GTACSR), Thermal resistant Aluminium alloy Conductor Invar steel Reinforced (TACIR), Aluminium Conductor Composite Reinforced (ACCR) og Aluminium Conductor Composite Core (ACCC, vist i Figur 3.8) [43]. De to sistnevnte gir høyest



Figur 3.8 Sammenligning av ACSR (til venstre) og HTLS-typen ACCC (til høyre).

Lisens: CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

kapasitet (2 – 3 ganger ACSR), men til høyere kostnad (2,5 – 5 ganger ACSR) enn andre alternativer [44]. De ekstra kostnadene kan forsvares når oppheng er i god stand og linen bør erstattes på grunn av elektriske minsteavstander, slitasje eller feildimensjonering. Derimot er det en dårlig løsning dersom kapasiteten skal opp mindre enn 20 % eller hvis strekningen er mer enn 15 km lang [43].

HTLS har lenge vært tema for FoU-prosjekter i Statnett, og det er også fokus for øvrig i selskapet gjennom teknologikvalifisering. Norge har flere lange fjordspenn der høytemperaturliner er spesielt interessant for å redusere utbyggingskostnadene. HTLS har blitt brukt i flere europeiske strekninger og kan nå sies å være i en storskala testfase [6].

### 3.7 High-Temperature Superconductors (HTS)

High-Temperature Superconductors (HTS) eller høytemperatur-superledere er i dag i forskningsstadiet og foreløpig en lite utprøvd teknologi. Superkonduktivitet er et kjent fenomen, men kun ved svært lave temperaturer. Superledere kan potensielt gi neglisjerbare elektriske tap både ute i ledningsnettet og i transformatorer. Gjennom økt kunnskap innen material- og nanoteknologi har forskere funnet superledende materialer ved stadig høyere

temperaturer. Likevel er temperaturene fremdeles lave (ca.  $-135\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) og de påfølgende kostnadene til nedkjøling er for høye til at teknologien kan testes ut i stor skala foreløpig [11].

IEC [11], ENTSO-E [5, 6], IEA [12] og flere har nevnt HTS som en utviklende teknologi for fremtiden. Fagpersoner i Statnett har kjennskap til forskningsområdet, men siden teknologien trolig vil være lite i bruk innen 2030 gjør at den er mindre aktuell [6]. Det har heller ikke vært FoU-prosjekter innen HTS, men de samarbeider gjennom en del av Best Paths-prosjektet.

### 3.8 Fault Current Limiter (FCL)

Fault Current Limiters (FCLs) innebærer teknologier som kan begrense feilstrømmer i nettet uten frakopling. Dette fungerer slik at impedansen er lav ved normal drift, men får raskt en høy impedans ved høye feilstrømmer. Feilstrømmene, ofte fra kortslutning eller jordfeil, kan ellers føre til skader i komponentene [45]. Med ny kraftproduksjon er det ønskelig å unngå kostbare oppgraderinger for å takle høyere kortslutningsstrømmer. Ved å isteden introdusere FCL kan disse kostnadene spares.

FCL ble først anvendt på lavere spenningsnivåer. En av variantene, superledende FCL (SFCL), er mer rettet mot sentralnettet og er i likhet med HTS i en tidlig FoU-fase [6]. Det har vært sett på slik teknologi i Statnett, men for øyeblikket er sentralnettet dimensjonert for å takle feilstrømmene. I fremtiden derimot kan behovet komme, men det mangler kunnskap om hvordan og hvor slike skal installeres [24].

### 3.9 Sanntidsovervåkning og sensorteknologier

Sensorer til overvåkning av kraftsystemet gir bedre informasjon av ulike parametere, for eksempel ved å gi et mer nøyaktig bilde over belastninger i sanntid og restlevetid for komponentene gjennom diagnostisering. Med hjelp av tolkning av måleverdier kan nettet driftes smartere for eksempel gjennom å estimere feilsannsynlighet eller planlegge vedlikehold. Stadig flere komponenter kan ha tilhørende sensorer for å oppnå god tilstandskontroll.

Sensorene kan overvåke med bruk av video, IR-kamera, UV-kamera, vibrasjonsmålinger og lasere. Disse kan for eksempel brukes som utstyr til Dynamic Line Rating (DLR, se avsnitt



3.10) i ledningene, overvåkning av vegetasjon eller overvåkning av komponenter i transformatorer, effektbrytere og andre komponenter i stasjonene [7].

I transformatorer foregår mange målinger manuelt og en automatisering ville gi en bedre oversikt over restlevetid og raskere oppdagelse av feil. Roboter utstyrt med IR- og videokamera som kan fjernstyres er en av mulighetene, hvor det er mulig med demonstrasjonsprosjekter [5].

Det har blitt foreslått flere metoder for hvordan sensorers overvåkning av nettet skal kunne utføres i praksis. Sensorene kan være festet til ikke-flyvende roboter, droner i lufta, satellitter eller festet til et fast punkt [7]. Å feste flere sensorer på mastene eller linene medfører kostnaden med at flere sensorer må installeres, men dette gir også flere datapunkter og mer informasjon.

Anlegg som går ut av drift er en stor utfordring og det medfører et behov for å kunne varsle potensielle feil på forhånd [24]. Med sensorer og overvåkningssystemer muliggjøres hyppig og presis diagnostisering av komponentene. Målinger av blant annet vindstyrke, temperatur, sjøsprøyt og vibrasjoner gir bedre estimater av kapasitet og sannsynlighet for feil på utsatte ledninger. Med sensorer og tilknyttede visuelle alarmer eller lignende, er det mindre behov for å ha personer oppe i mastene for å gjennomføre inspeksjoner [46].



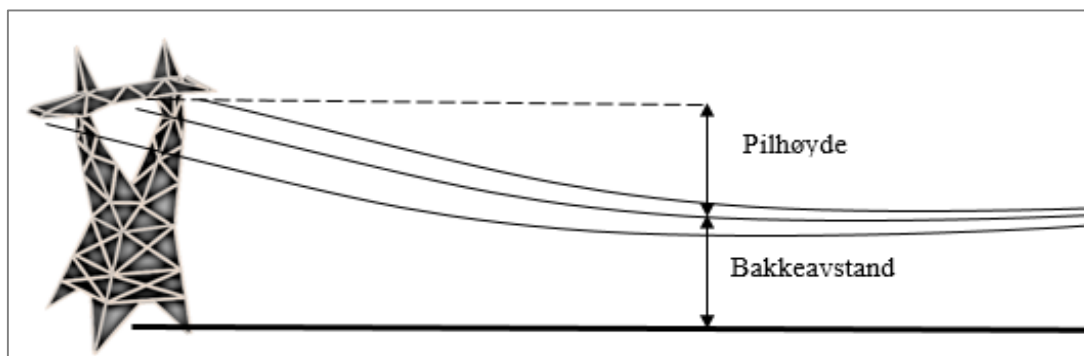
*Figur 3.9 Vibrasjonsmåler installert i enden av et av Statnetts fjordspenn. Bildet er publisert med tillatelse fra Statnett.*

Mange av Statnetts anlegg er plassert lite tilgjengelig for manuell avlesning og gjennomgår utfordrende klimaforhold. Dette taler for at Statnett fremfor andre TSO-er

burde satse på overvåkning ved hjelp av sensorer. Statnett og FoU har vært kjent med flere av sensorene gjennom lang tid og anleggsforvaltning er høyt prioritert av FoU. Statnett har tidligere testet blant annet vibrasjonsmålere (se Figur 3.9) og lastceller [46, 47]. Mange av sensorene er teknisk modne og tilgjengelige på markedet, men innen tolkning av måleresultatene er det ønskelig med mer kunnskap.

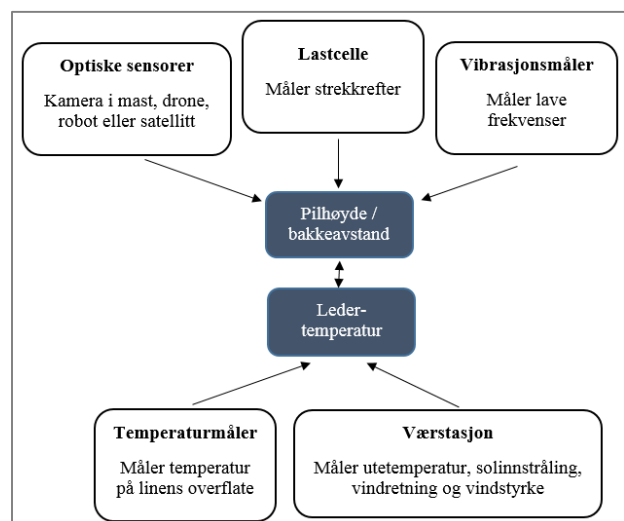
### 3.10 Dynamic Line Rating (DLR)

Dynamic Line Rating (DLR) eller Real-Time Thermal Rating (RTTR) bruker sensorer til å estimere ledningers kapasitet i sanntid, og er dermed en viktig gruppe innen overvåknings-systemene nevnt i avsnitt 3.9. Poenget med DLR er at ledningene kan driftes mer effektivt med bedre informasjon om de termiske begrensningene [12]. Hvor mye strøm som kan gå gjennom en ledning begrenses av maksimal temperatur på lederen og minimum klarering til bakken. Økt temperatur gir økt pilhøyde og mindre bakkeavstand som vist i Figur 3.10.



Figur 3.10 Pilhøyden er den vertikale avstanden mellom oppheng og ledningens laveste punkt.

Det eksisterer mange alternative metoder med hver sine fordeler og ulemper for å finne begrensningene. Noen viktige sensorer til bruk i DLR er vist i Figur 3.11 [48]. DLR er en moden og kjent teknologi, men det er fremdeles stort forbedringspotensial for å overkomme utfordringer [6]. Uten DLR bestemmes kapasiteten ut fra konservative anslag på grunn av mangel på informasjon. Det vil være spesielt nyttig med DLR-systemer der en ledning er utsatt for høye laster og overvåkning kan utnytte kapasiteten bedre. TWENTIES-prosjektet fant at målinger ved hjelp av DLR kunne gi 10 % mer effekt gjennom ledningene [39]. Dette kan for eksempel bidra med å kunne tilføre mer vindkraft uten at det medfører en risiko for forsyningsikkerheten. Kapasiteten vil være høyere ved økt vindstyrke noe som passer godt med økt produksjon fra vindparkene [14]. DLR vil i likhet med HTLS være et rimelig alternativ når termiske begrensninger hindrer et ønske om en beskjeden kapasitetsøkning.



Figur 3.11 Sensorer som gjennom beregninger og analyse kan gi et estimat på en lednings kapasitet.

Statnett har gjennomført testprosjekter med DLR som måler bakkeavstand og strekk. Modeller klarer til en viss grad å beregne ledningenes kapasitet, og nytten av mer nøyaktighet vil ikke nødvendigvis overveie kostnadene ved å installere sensorer. Dessuten er kraftmarkedet slik at kapasiteten mellom prisområder blir satt på forhånd, mens en fremtidig finere tidsoppløsning ville muliggjort en utvikling av DLR i Norge [24]. Flere fagpersoner i Statnett forventer at det vil bli brukt i mye større grad, muligens også i Norge [24, 46].

### 3.11 Nanoteknologi

Nanoteknologi er en gruppe teknologier som baserer seg på å endre stoffers oppbygning på et mikroskopisk nivå for å gi materialer ønskede egenskaper. For eksempel kan nanomaterialer designes til å gi bedre mekanisk styrke, korrosjonsmotstand og hydrofobe egenskaper. Nanoteknologi til bruk i kraftsystemet er enda et ungt forskningsfelt, og videre forskning kan på lang sikt gi mange kommersielle anvendelser.

Nanoteknologi har vært prøvd for å hindre islegging på linene. Dette er et problem som Statnett er interessert i å forebygge, men hittil har levetid og kostnader vært utfordrende. Dessuten er det forsøkt å bruke nanoteknologi for å redusere støy og til kamuflasje [5, 46]. I stasjonene er det mulig med nanoteknologi for å forbedre oljeegenskapene i transformatorene [21, 49].

Det er nevnt konsepter som baserer seg på å bruke nanomaterialer både som leder og i mastene. For eksempel kan en type Carbon Nanotube (CNT) gi svært ønskede egenskaper som ledermateriale, men hittil har masseproduksjon vært krevende og svært dyrt [50].

FoU-prosjekter i Statnett har vært forsøkt, men har tidligere blitt stoppet på grunn av lite teknologisk modenhet.

## 4 Diskusjon rundt egnede teknologier

Diskusjonsdelen sammenligner teknologiene og bidrar med anbefalinger ut fra funn i kapittel 2 og 3. Dette kapittelet analyserer hva som kan passe inn som nye FoU-prosjekter med bruk av kvalitativ metode.

### 4.1 Vurdering av fokus

Fokus defineres her som forventninger eller prioriteringer knyttet til kommende teknologier uttrykt gjennom intervjuer, rapporter eller annen litteratur. En fokusvurdering kan dermed gi verdifull kunnskap for FoU som en antydning på hvilke områder deres satsing ligger foran eller bak de eksterne forventningene. Målet med vurderingen er å avdekke mulige blindsoner eller hull i teknologistrategien til Statnett og FoU. Det kan også være at Statnett har et mer enn gjennomsnittlig høyt fokus på visse områder.

#### 4.1.1 Metode for eksterne kilder

Flere eksterne kilder som diskuterer kommende teknologier gir svar på hvilke teknologier det stilles høyest forventninger til. Disse er forbeholdt kilder fra upartiske organisasjoner og forskningsinstitusjoner, der det er mulig. Leverandører og produsenter kan være mindre uavhengige og vektlegger derfor annerledes. For å gjøre en samlet vurdering over det eksterne fokuset så objektiv som mulig er det valgt nøye gjennomgått litteratur [5-15] som nevner mulige kommende teknologier og satsingsområder for forskning og utvikling. Ut ifra hvor høye forventninger det gis til hver teknologi ut fra den relevante litteraturen kan fokuset vurderes. For eksempel er det store forventninger til FACTS, HVDC og overvåkningssystemer gjennom at de blir sterkt prioritert av mesteparten av litteraturen, noe som gir en indikasjon på høyt fokus.

ENTSO-E R&D Roadmap 2013-2022 [5] er en sentral kilde som gir en god oversikt over teknologier i europeiske FoU-aktiviteter. Her blir også fokuset vurdert ut fra hvor mye oppmerksomhet som blir gitt til hver teknologi. Fra denne rapporten kommer det tydelig frem at enkelte teknologier skiller seg ut som spesielt viktige, og fokusvurderingen viser også dette.



En sentral del av denne oppgaven er å finne teknologier i blindsonen, altså de som det har vært lite satsing på i FoU, men som vektlegges høyt blant andre. Fokusvurderingen viser blant annet at FACTS, PST og HVDC-teknologiene er høyt prioritert av ENTSO-E med flere, mens FoU ikke har hatt nylige prosjekter innen disse områdene. Med tanke på hvor stort fokus det er på disse teknologiene, kan disse sies å være i blindsonen til FoU. Ved å ta historiske FoU-prosjekter i betraktning derimot er fokuset nokså likt. FoU har gjennom tidene dekket alle de foreslåtte teknologiområdene gjennom sine aktiviteter.

Det nåværende fokuset i FoU har vært høyere enn det som kan forventes innen digitale stasjoner, noe som indikerer at Statnett ønsker å være i front av utviklingen på dette området. Ved å undersøke de historiske FoU-prosjektene er fokuset på digitale stasjoner og sanntids-overvåkning lavere enn de eksterne forventningene, og derfor er det passende at disse nå blir prioritert av pågående prosjekter.

En svakhet med metoden er at siden kildene fra litteraturstudien er hentet utenfor Statnetts område, kan det finnes teknologier godt tilpasset norske forhold, men som ikke dekkes av litteraturen. Heldigvis er en stor andel av teknologiene brukt av Statnett også gjeldende for andre TSO-er. En annen ulempe med metoden er at litteraturen har en tendens til å fokusere på store utviklingstrekk og kan derfor gå glipp av de små detaljene, for eksempel nye innstrekksstativ i stasjonene eller nye kabelendeavslutninger.

## 4.2 Mulige FoU-prosjekter

Teknologiene kan deles inn etter modenhet. De mest modne teknologiene er tilgjengelig på markedet med gode og tilgjengelige løsninger, men FoU kan likevel ha en rolle for å bedre forstå hvordan slike teknologier kan tas i bruk. For de mindre modne vektlegges samarbeidsprosjekter og kompetansebygging.

Utvalget av teknologier i kapittel 3 er i hovedsak brede forskningsfelt og teknologi grupper, der det kan finnes ulike problemstillinger. For å kunne anbefale de mer generelle fokusområdene, må det finnes spesialiserte arbeidsoppgaver tilpasset FoU innen hver teknologi gruppe. Det vil være en fordel for FoU å ikke bare kjenne til de større feltene hvor det er behov for FoU-prosjekter, men også de små arbeidsoppgavene. For at det skal være nyttig å starte nye prosjekter må det finnes ubesvarte spørsmål innenfor hver teknologi som FoU kan løse.

Denne masteroppgaven baserer seg på valg av satsingsområder, og ikke mulige problemstillinger, men for å anbefale de mer generelle satsingsområdene er det nødvendig å ta hensyn til hva FoU kan tilby gjennom eventuelle prosjekter. Dette blir i hovedsak gjort gjennom at teknologier som har vært tidligere FoU-prosjekter eller høy grad av leverandørdrevet utvikling regnes for å ha mindre nytte av FoU. Likevel er det i Tabell 4.1 gitt en kort oversikt over mulige tiltak og problemstillinger som FoU kan videreutvikle.

Tabell 4.1 Teknologiene er sortert fra forskningsfase til demonstrasjonsfase, og deres mulige problemstillinger tilpasset FoU. Flere av teknologiene inneholder mulige oppgaver som går på tvers av inndelingen i forskning, utvikling og demonstrasjon.

<b>Forskning</b>	<b>HTS</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Samarbeide med leverandører og andre TSO-er om videre forskning på nye konsepter</li> </ul>
	<b>Nanoteknologi</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hindre islegging eller dempe støy på linene</li> <li>• Forbedre oljeegenskapene i transformatorene</li> </ul>
<b>Utvikling</b>	<b>FCL</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se på muligheter for å innføre FCL og dens egenskaper</li> </ul>
	<b>Sanntidsovervåkning og DLR</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teste ut værstasjoner, vibrasjonsmålere og lastceller festet i mast</li> <li>• Observere utvikling av sensorer som er tilgjengelig på markedet</li> <li>• Vurdere mulige sensorer i stasjonskomponenter</li> <li>• Undersøke behov og ønsker fra driften om overvåkningssystemer</li> <li>• Bedre tolkning av måleverdier for å midlertidig gi høyere kapasitet på ledningene gjennom DLR</li> </ul>
	<b>FACTS</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Undersøke mulighetene for å innføre FACTS-komponenter utenom allerede kjente SVC og STATCOM</li> <li>• Få bedre kunnskap om hvordan eksisterende SVC-anlegg adresseres for bedre å planlegge oppgraderinger og vedlikehold [5, 15]</li> <li>• Utvide kunnskap om optimal plassering og ytelse på nye anlegg</li> </ul>
	<b>Digitale stasjoner</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bli bedre kjent med teknologiene gjennom demonstrasjonsprosjekter</li> <li>• Tilrettelegge for standardiserte løsninger og kompatibilitet mellom ulike leverandører</li> </ul>
<b>Demonstrasjon</b>	<b>GIL</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Avdekke strekninger der GIL er et mulig alternativ</li> </ul>
	<b>PST</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se på muligheter for å innføre PST og dens egenskaper</li> </ul>
	<b>HVDC</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Undersøke mulig FoU-bidrag innen PEX-kabler og VSC-teknologi, for eksempel mer kunnskap innen smart drift og vedlikehold</li> <li>• Forske på aldring av HVDC-komponenter [5]</li> </ul>
	<b>HTLS</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Utvikle nye HTLS-teknologier og andre høykapasitetslinjer</li> <li>• Forstå aldringsprosesser i de mer modne HTLS-variantene</li> </ul>

### 4.3 Alternativanalyse

Teknologiutvalget i kapittel 3 er basert på en litteraturstudie fra eksterne kilder. Det kan være flere grunner til at disse likevel er lite egnet som fremtidige prosjekter i Innovativ teknologi-programmet. En åpenbar forutsetning er at alle teknologier er innenfor FoU-programmets faglige rammer og alle de utvalgte teknologiene tilfredsstillende dermed dette kravet. For å være godt egnet som FoU-prosjekt må det både være etterspørsel etter ny teknologi og mulighet for FoU å tilby ny kunnskap.

For å avgjøre hvilke av de nevnte teknologiene som skal trekkes frem og anbefales er det gjort en alternativanalyse. Teknologiene som er godt egnet til prosjekter i Innovativ teknologi burde vurderes med god måloppnåelse på flest mulig av de seks målene listet under. For hvert mål er det nevnt kriterier for hva skal til for at en teknologi skal bli vurdert med god måloppnåelse.

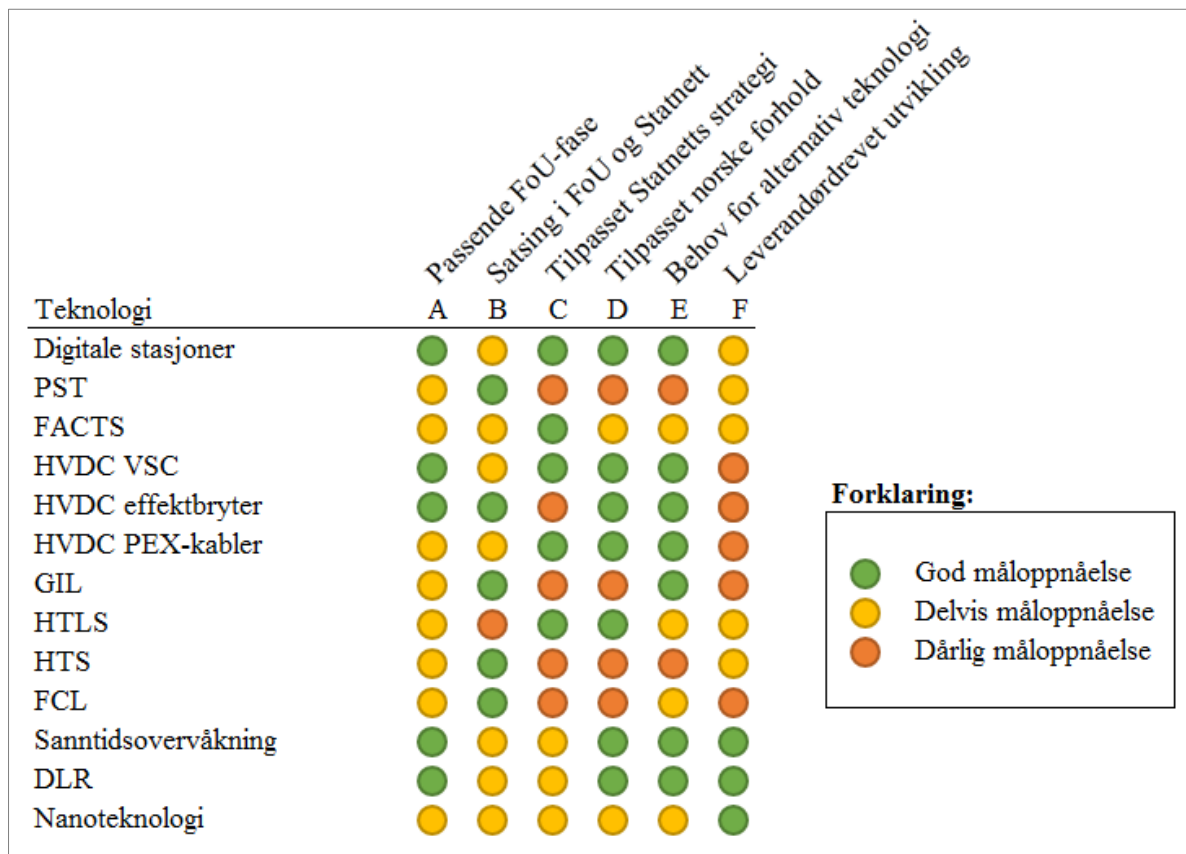
- A. Passende FoU-fase. TRL-fasene 1 – 7 (se side 7) er innenfor FoU-prosjektenebegrensninger. Teknologien burde helst ikke være på grunnforskningsnivå for å være egnet til FoU-prosjekter, men det burde fremdeles gjenstå arbeid utenom teknologi-kvalifisering.
- B. Satsing i FoU og Statnett. Dersom det har vært lite fokus i FoU-avdelingen eller resten av Statnett innen en teknologi gjennom tidligere eller pågående prosjekter, er det mindre nødvendig å anbefale denne som mulig FoU-prosjekt. Teknologier som har hatt lite fokus får dermed god måloppnåelse. Målet er altså en sammensatt og forenklet versjon av fokusvurderingen fremstilt i avsnitt 4.1.3.
- C. Tilpasset Statnetts strategi. Som en del av Statnetts strategi er det ønskelig at nye løsninger oppfyller mål om kostnadsbesparelse (inkludert sparte kostnader gjennom mindre tidsbruk), økt sikkerhet og bedre kvalitet (for eksempel bedre forsynings-sikkerhet). Teknologier som på sikt kan passe denne beskrivelsen godt blir vurdert som mer egnet til FoU-prosjekter. Måloppnåelsen antyder om teknologien kan bli tatt i bruk av Statnett av teknisk-økonomiske hensyn etter eventuelle FoU-prosjekter.
- D. Tilpasset norske forhold. Klimatiske, demografiske eller tekniske forhold i det norske sentralnettet fører til at enkelte teknologier enten burde vektlegges mer eller mindre av Statnett i forhold til andre TSO-er. Teknologier mer enn gjennomsnittlig godt tilpasset de norske forholdene vil bli vurdert med god måloppnåelse.
- E. Behov for alternativ teknologi. Bruksområdet til en teknologi kan per i dag være dekket av løsninger med uheldige ulemper. Ved mangel på gode løsninger vil det være spesielt



fornuftig å satse på alternativer som har potensiale til å overta for de konvensjonelle teknologiene. Disse vil da få god måloppnåelse siden det antyder ekstra nytteverdi og behov for FoU.

- F. Leverandørdrevet utvikling. Det er ikke i Statnetts mandat å utføre leverandørtjenester. Teknologier med god måloppnåelse for dette målet viser at Statnett kan ha en viktig rolle i teknologiutviklingen. Dårlig måloppnåelse betyr derimot at leverandører står for utviklingen og teknologien vil derfor egne seg mindre som FoU-prosjekter.

Fokuset eksternt, som var en sentral del av seleksjonen til kapittel 3, er nå mindre viktig og er ikke et av målene. I Figur 4.2 er grad av måloppnåelse for hver av teknologiene vurdert, som er delt inn i god, delvis eller dårlig måloppnåelse. Delvis måloppnåelse blir gitt dersom påstandene om god måloppnåelse innen et av målene A – F, ikke passer helt, men delvis. For eksempel oppnår digitale stasjoner delvis måloppnåelse på mål B fordi det et FoU-prosjekt har blitt igangsatt, men at det ellers har vært lite fokus i Statnett.



Figur 4.2 Illustrasjon over teknologiene og deres måloppnåelse for målene A – F.

Resultatene som er illustrert gjennom denne figuren er med på å avgjøre hvilke teknologier som FoU burde satse mer på. En stor andel grønne merker vil indikere at teknologien er godt egnet å starte FoU-prosjekt på, mens ett eller flere røde merker antyder at teknologien er mindre aktuell som FoU-prosjekt.

HVDC-teknologiene er for eksempel mer aktuelt i Norge enn mange andre land, og Statnett er allerede blant de ledende på dette feltet. Digitale stasjoner, HTLS, sanntidsovervåkning og DLR kan også være mer enn gjennomsnittlig nyttige i det norske sentralnettet. Disse har derfor gjort det godt på mål D – tilpasset norske forhold, og det er naturlig at Statnett ikke har en avventende rolle i utviklingen av disse teknologiene.

Figur 4.2 kan tolkes slik at sanntidsovervåkning, DLR og digitale stasjoner ser ut til å passe godt til fremtidige FoU-prosjekter, indikert med flest grønne merker og ingen røde. Hvilke som kommer best ut er avhengig av vektingen mellom de ulike målene. Dette diskuteres i avsnitt 4.5, men før dette kan noen av alternativene forkastes.

#### 4.4 Lite egnet til FoU-prosjekter

HVDC effektbryter, nevnt i 3.4.2, er en umoden og ny teknologi, men er leverandørdrevet. Statnett ønsker kun å teknologikvalifisere og ikke drive FoU. Dette gjør at denne teknologien regnes som uegnet til FoU-prosjekter.

PST, nevnt i 3.2, er en teknologi som trolig kommer til å anvendes i økende grad i mange land. Selv om PST foreløpig ikke har vært gunstig i norsk sammenheng skal ikke teknologien bli glemt av Statnett. Utviklingen av flere slike enheter utenlands gir erfaring og påfølgende samarbeid med andre TSO-er kan gi svar på om PST vil få en rolle i det norske kraftsystemet. Selv om PST skulle bli aktuell å bruke av Statnett er det likevel lite behov for FoU siden teknologien er moden.

GIL, nevnt i 3.5, kommer antakelig aldri til å bli brukt utenom et smalt nisjemarked med mindre store kostnadsreduksjoner forekommer. Dette gjelder særlig i Norge fordi andelen tettbygde områder er lavere enn i mange europeiske land. Det er derfor naturlig at Statnett ikke vil lede utviklingen i GIL, men burde likevel opprettholde en viss kompetanse på området siden teknologien i enkelte tilfeller vil være et mulig alternativ. Dessuten kommer GIL, i likhet med

PST, svakt ut av alternativanalysen på grunn av teknologisk modenhet, leverandørdrevet utvikling og liten anvendelse hos Statnett i forhold til andre TSO-er.

Det skjer store fremskritt i forskningen på superledende materialer. Det kan ikke utelukkes at HTS, nevnt i 3.7, en gang vil være mulig å bruke i det norske kraftsystemet, men utviklingen kan ta lang tid. FCL, nevnt i 3.8, er også en teknologi i forskningsfasen. Statnetts FoU-avdeling ønsker flere prosjekter innen forskningsfasene (TRL 2 – 3), noe som passer godt med HTS og FCL. Kombinasjonen av lite tilpasset norske forhold (mål D) og umoden teknologi fører til at disse to likevel blir vurdert som lite tilpasset FoU-prosjekter. FoU burde følge opp forskningen som skjer på områdene og samarbeid med andre TSO-er vil være verdifullt.

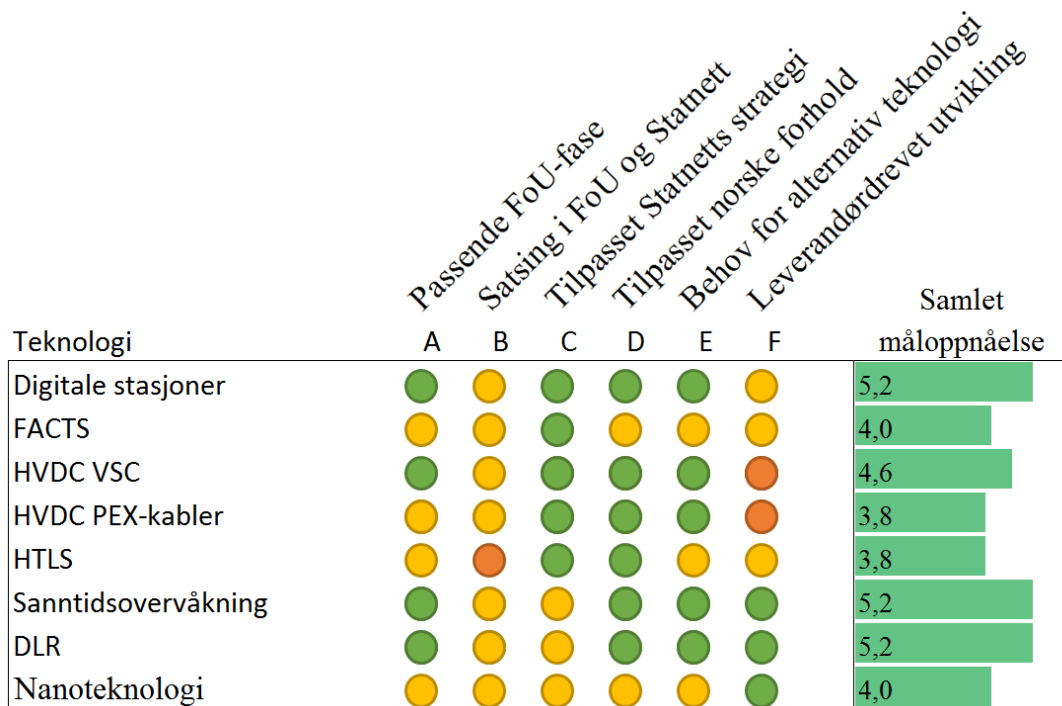
Enkelte kommende teknologier vil være mindre aktuelle i det norske sentralnettet enn hos andre TSO-er. Da er det naturlig at FoU i Statnett er mindre fokusert på disse teknologiene i forhold til andre TSO-er. Dårlig måloppnåelse på mål D tillater at FoU og Statnett kan ha en avventende rolle innen PST, GIL, FCL og HTS.

Alle disse fire er interessante og mulige teknologier for Statnett i fremtiden. FoU burde følge med på utviklingen som skjer, men så lenge tilpasning til norske forhold er en viktig faktor kan de ikke anbefales som FoU-prosjekter. Disse fire og HVDC effektbryter er altså vurdert som lite egnet for FoU å satse på.

## 4.5 Middels egnet til FoU-prosjekter

Ut ifra alternativanalysen i avsnitt 4.3 kan de mest uaktuelle tas bort fra vurderingen. PST, GIL, FCL, HTS og HVDC effektbryter har vist seg å være lite egnet som FoU-prosjekt. Hvilke av de resterende teknologiene som kommer best ut er avhengig av hvordan målene A – F vektlegges.

Teknologiene gis en samlet måloppnåelse, der høy samlet måloppnåelse kan tolkes som godt egnet til FoU-prosjekter. Dersom alle mål vektlegges likt og merkene vektes 0 (rødt), 0,6 (gult) og 1 (grønt) kan det blitt sett av Figur 4.3 at digitale stasjoner, sanntidsovervåkning og DLR vil være de mest aktuelle.



Figur 4.3 De sju resterende alternativene kan gis en samlet måloppnåelse med lik vektlegging av de ulike målene.

Nanoteknologiene består av nokså umodne teknologier og det har vært noe FoU-aktivitet innen islegging, isolatorbelegg og corona-støy. Det kan raskt oppstå nye muligheter innen nanoteknologi. HTLS har også gjennomgått flere FoU-prosjekter, men det kan fremdeles være muligheter for nye varianter som FoU burde se på.

Det stilles høye forventninger til bruk av FACTS- og HVDC-teknologiene i fremtiden. Disse har til felles at de bidrar til økt fleksibilitet og økt overføringsevne, men er kostbare. Det har heller ikke vært satsing på dem i FoU de senere årene. Det anbefales derfor å undersøke om det kan være nye problemstillinger innen FACTS, HVDC PEX-kabler og HVDC VSC som er interessante for FoU, eller avdekke om tidligere prosjekter har sørget for at det ikke lenger er behov for videre prosjekter i fremtiden. Ulempen med HVDC-teknologiene er at utviklingen er i stor grad drevet av leverandørene, og det er dermed usikkert i hvor stor grad FoU kan bidra. Statnett og FoU kan undersøke videre om de kan bidra til en raskere utvikling i samarbeid med leverandørene.

Som det var vist i Figur 4.3 er flere teknologier mindre egnet som FoU-prosjekt siden utviklingen er leverandørdrevet, altså at Statnett og andre TSO-er har en liten rolle i teknologiutviklingen. Dette er blant årsakene til at den samlede måloppnåelsen for FACTS, HVDC VSC, HVDC PEX-kabler, HTLS og nanoteknologi regnes å være middels egnet som FoU-prosjekt.

## 4.6 Mest egnet til FoU-prosjekter

Av alle de utvalgte teknologiene er det ingen som viser seg ideelle å anbefale. Faktumet at alle teknologiene som er funnet har sine ulemper med på tanke på nye FoU-prosjekter, tyder på at de mest aktuelle allerede har blitt satset på av FoU, noe som er en positiv konklusjon.

Sanntidsovervåkning, DLR og digitale stasjoner kommer best ut av alternativanalysen til tross for at de har vært tema i FoU-prosjekter. Det foreligger ingen garanti for at de kommer til å bli tatt i bruk i stor grad i Norge, men med FoU- og demonstrasjonsprosjekter vil Statnett være i stand til å si med sikkerhet om de burde innføres i det norske sentralnettet på permanent basis.

Digitale stasjoner er godt egnet til videre FoU-satsing. Dersom denne satsingen er vellykket kan det gi reduserte kostnader, økt pålitelighet og sikkerhet i stasjonene. Det pågående FoU-prosjektet er fremdeles i en startfase og det er fremdeles behov for videre utvikling. Digitale stasjoner vil være minst like aktuell for Statnett som for andre TSO-er. Digitale stasjoner er en av de fremtidsrettede teknologiene som inngår i bedre overvåkningssystemer. Derfor burde dette prioriteres høyt av FoU slik at de raskt kan testes ut i demonstrasjonsprosjekter, og Statnett vil da raskt kunne nyte fordelene av teknologien.

Sanntidsovervåkning og DLR viser seg også å være godt tilpasset fremtidens kraftsystem og nye FoU-prosjekter. Tidligere FoU-prosjekter har dekket noe, men analysene viser at fokuset innen sanntidsovervåkning har vært lavere enn de eksterne forventningene. Som nevnt i avsnitt 4.2 er det mange mulige prosjekter. Værstasjoner, lastceller, temperaturmålere og vibrasjonsmålere er blant de mer modne teknologiene. FoU mener det er størst mangel på kunnskap innen tolkning av måleverdier, noe som gir gode muligheter til å teste flere sensorer og gjøre flere studier. Selv om DLR tidligere har vist seg vanskelig å implementere, kan det fremdeles bli et kostnadseffektivt tiltak.

De mest egnede teknologiene gir bedre overvåkning og kontroll over kraftsystemet. Alle involverer bruk av sensorer som gir store mengder informasjon, og datamengdene må kunne tolkes og nyttiggjøres. Ut fra analysene er det altså denne typen egenskaper hvor det er sterkest behov for videre FoU i Innovativ teknologi.

## 4.7 Teknologier med høyt fokus

FoU og Innovativ teknologi har satset bredt og stort. Å velge en god strategi for valg av satsingsområder er ingen enkel oppgave. Enkle tiltak, som for eksempel klemmer på ledningene, kan ofte bli undervurdert selv om de har en kritisk funksjon [46].

Innovativ teknologi har valgt en strategi som baserer seg på en stor andel metoder for effektiv bygging, installasjon og vedlikehold. Satsingen som går på nye metoder kan bli tatt over til fordel for satsing på nye teknologier. Lovende teknologier som Innovativ teknologi har satset på inkluderer HTLS, alternative mastematerialer og digitale stasjoner.

Fokusvurderingen i Figur 4.1 viser at digitale stasjoner er høyere prioritert av FoU i Statnett enn det som forventes ut fra litteraturinnsamlingen. Med utgangspunkt i alternativanalysen illustrert i Figur 4.2 er det likevel ingen grunn til å påstå at eller digitale stasjoner har hatt et for høyt fokus. Det er også vist at det på flere områder har vært lite fokus i FoU, men alternativanalysen viser at disse er lite egnet for FoU-prosjekter, eller når det gjelder sanntids-overvåkning reduseres gapet opp til eksterne forventninger gjennom pågående prosjekter.

## 5 Konklusjon

Statnett er i gang med å bygge neste generasjon kraftsystem som byr på andre utfordringer enn i dag. Det er mange løsninger som kan svare på disse utfordringene. Fremtidens løsninger kan være både nye metoder gjennom effektivisert byggeteknikk og nye teknologier. Dessverre er mange av de lovende teknologiene fremdeles umodne. Videre forskning og utvikling kan føre til en gradvis innføring, og gjøre at dagens umodne teknologier blir mer aktuelle i fremtiden.

Det er funnet at kommende teknologier tilpasset fremtidens kraftsystem kommer til å basere seg på mer automasjon gjennom overvåkningssystemer, fleksibilitet gjennom bedre effektkontroll og økt overføringskapasitet. Dessuten kommer IKT- og markedsløsninger til å spille en stor rolle gjennom innføringen av smarte nett.

Litteraturstudien har funnet frem en rekke aktuelle teknologier, der flere kan ha potensiale som fremtidige FoU-prosjekter. Det er lite trolig at GIL, PST, HTS, FCL og HVDC effektbrytere vil være de mest aktuelle teknologiene for FoU å satse på. Statnetts FoU-avdeling burde likevel ikke utelukke dem, samtidig som de heller ikke burde være førsteprioritet når det finnes rikelig med andre gode prosjekter.

FACTS, HVDC VSC, HVDC PEX-kabler, HTLS og nanoteknologi er blant områdene som gis mest oppmerksomhet av litteratur som FoU burde forholde seg til. Likevel er de vurdert til å være middels egnet til nye FoU-prosjekter siden de allerede har vært involvert i tidligere FoU-prosjekter og er i stor grad en leverandørdrevet utvikling.

Teknologier for sanntidsovervåkning inklusive DLR har tidligere vært undersøkt av FoU, mens et FoU-prosjekt er i oppstart på digitale stasjoner. Det er ifølge analysene grunnlag for å videreføre eller øke satsingen på grunn av potensielt stor nytteverdi og behov for FoU. Forskning og utvikling er avgjørende for teknologiutvikling og FoU-programmet Innovativ teknologi har valgt en fornuftig strategi gjennom valg av sine satsingsområder. Studien har likevel gitt verdifull kunnskap om veien videre for Innovativ teknologi, og dessuten en oversikt over fokusområder som er prioritert i relevant litteratur.

## 6 Litteraturliste

1. Statnett SF, *Nettutviklingsplan (NUP) 2015*. 2015.
2. Statnett SF. *Om Statnett*. 2015. Tilgjengelig fra: <http://www.statnett.no/Om-Statnett/>. Besøksdato: 27.04.2016.
3. Statnett SF, *Systemdrifts- og markedsutviklingsplan (SMUP) 2014-2020*. 2014.
4. International Energy Agency (IEA), *Excerpt from CO2 emissions from fuel combustion (2015 edition)*. 2015.
5. ENTSO-E, *Research & Development Roadmap 2013-2022*. 2012.
6. ENTSO-E, *Ten-year Network Development Plan 2014*. 2014.
7. ENTSO-E, *Implementation Plan 2016-2018*. 2015.
8. Migliavacca, G., *Advanced Technologies for Future Transmission Grids*. 2012: Springer Science & Business Media. ISBN: 1447145496.
9. Hauer, J., et al., *Advanced transmission technologies*. National Transmission Grid Study, US Department of Energy, 2002.
10. L'Abbate, A., et al. *Advanced transmission technologies in Europe: a roadmap towards the Smart Grid evolution*. in *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*. 2011. IEEE.
11. International Electrotechnical Commission (IEC), *Efficient Electrical Energy Transmission and Distribution*. 2007, IEC.
12. International Energy Agency (IEA), *Technology Roadmap - Smart Grids*. 2011.
13. International Smart Grid Action Network (ISGAN), *Smarter & Stronger Power Technologies: Review of feasible technologies for enhanced capacity and flexibility*. 2013.
14. Jones, L.E., *Renewable energy integration: practical management of variability, uncertainty, and flexibility in power grids*. 2014: Academic Press. ISBN: 0124081223.
15. Hillegas-Elting, J.V., *Collaborative Transmission Technology Roadmap - March 2016*. 2016.
16. Liu, K., et al. *Study of Non-Conventional Instrument Transformer and IEC61850 impact on current differential protection*. in *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES*. 2008. IEEE.
17. ABB. *Protection and Control System Utilization of NCIT & Process Bus*. 2015. Tilgjengelig fra: <http://new.abb.com/substation-automation/systems/whitepapers/protection-and-control-system-utilization-of-ncit-process-bus>. Besøksdato: 27.04.2016.
18. Tholomier, D. og D. Chatrefou, *IEC 61850 Process Bus – It is Real*. PAC World Magazine, 2008: p. 48-53.
19. Ingram, D.M., *Assessment of precision timing and real-time data networks for digital substation automation*. 2013.
20. Fallmyr, S., *Bruk av ikke-konvensjonelle måletransformatorer*. 2015.
21. Kjetil Ryen, *Spesialrådgiver i Stasjonsapparater*. E-post 15. mars. 2016.
22. Verboomen, J., et al., *Phase shifting transformers: principles and applications*. 2005.
23. Molburg, J.C., J. Kavicky og K. Picel, *The design, construction, and operation of long-distance high-voltage electricity transmission technologies*. 2008, Argonne National Laboratory (ANL).
24. Lars Kristian Vormedal, *Programleder og tidligere FoU-direktør hos Statnett*. Intervju. Nydalen, 3. mars 2016.
25. Siemens, *Discover the World of FACTS Technology - Technical Compendium*. 2011.
26. Statnett SF, *Funksjonskrav i kraftsystemet (FIKS)*. 2012.



27. Hingorani, N.G. og L. Gyugyi, *Understanding facts - Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. 2000: IEEE press. ISBN: 0780334558.
28. Grigsby, L.L., *Power system stability and control*. Vol. 5. 2012: CRC press. ISBN: 1439883203.
29. Hannisdal, E.L., *Optimal Voltage Control of the Southern Norwegian Power Grid*. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Master thesis, 2011.
30. Singh, B., et al., *Introduction to FACTS Controllers: A Technological Literature Survey*. International Journal of Automation and Power Engineering, 2012. **1**(9): p. 193-234.
31. Song, Y.-H. og A. Johns, *Flexible ac transmission systems (FACTS)*. 1999: IET. ISBN: 0852967713.
32. Magne Meisingset, *Seksjonsleder i Stasjonssystemer. Intervju. Nydalen 31. mars 2016*. 2016.
33. MacLeod, N., et al., *A Technological Roadmap for the Development of the European Supergrid*. CIGRÉ, 2015.
34. Kjørholt, Å.M.H., *HVDC Transmission Using a Bipolar Configuration Composed of an LCC and MMC: Operating Characteristics of Skagerrak 3 and Skagerrak 4*. 2014.
35. Haileselassie, T.M., *Control of multi-terminal VSC-HVDC systems*. 2008.
36. De Decker, J., et al., *Offshore electricity grid infrastructure in Europe*. OffshoreGrid Final Report, 2011.
37. Ackermann, T., *Wind power in power systems*. Vol. 140. 2005: Wiley Online Library. ISBN: 0-470-85508-8.
38. Statnett SF. *New converter technology to be utilised at Skagerrak 4*. 2013. Tilgjengelig fra: <http://www.statnett.no/en/Projects/Skagerrak-4/News/New-converter-technology-to-be-utilised-at-Skagerrak-4/>. Besøksdato: 27.04.2016.
39. *TWENTIES project - Final Report*. 2013.
40. Franck, C.M., *HVDC circuit breakers: A review identifying future research needs*. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2011. **26**(2): p. 998-1007.
41. e-Highway 2050, *D3.1 Technology assessment from 2030 to 2050*. 2012.
42. Koch, H., *Gas insulated transmission lines (GIL)*. 2011: John Wiley & Sons. ISBN: 0470665335.
43. Geary, R., et al., *Introduction of High Temperature Low Sag Conductors to the Irish Transmission Grid*. CIGRE B2, 2012. **104**.
44. Chan, J., et al., *Demonstration of advanced conductors for overhead transmission lines*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Tech. Rep. CEC-500-2013-030, 2008.
45. Morandi, A., *State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system*. Physica C: Superconductivity, 2013. **484**: p. 242-247.
46. Kjell Åge Halsan, *Seksjonsleder i Elektromekanisk prosjektering. Intervju. Nydalen 24. februar 2016*.
47. Bjerkan, L., et al. *Measurements on aeolian vibrations on a 3 km fjord crossing with fibre-optic Bragg grating sensors*. in *Proc. Cigré Session*. 2004.
48. ENTSO-E og RGCE SPD WG, *Dynamic Line Rating for overhead lines – V6*. 2015.
49. Rycroft, M. og EE Publishers. *Latest developments in power transformer technology*. 2015. Tilgjengelig fra: <http://www.ee.co.za/article/latest-developments-power-transformer-technology.html>. Besøksdato: 27.04.2016.
50. Elcock, D., *Potential impacts of nanotechnology on energy transmission applications and needs*. 2007, Argonne National Laboratory (ANL).



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
67 23 00 00  
[www.nmbu.no](http://www.nmbu.no)