



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2017 30 stp
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for matematiske realfag og teknologi

En litteraturstudie mot sanntidsovervåkning av kraftsystemer

A Literature Study Towards Real-time Monitoring of
Power Systems

Sangcami Krishnakumar
Industriell økonomi

Sammendrag

Kraftsystemet blir utsatt for enorme omstillinger de kommende årene. Økt kraftbehov, flere utenlandsforbindelser, forbrukerfleksibilitet, klimautfordringer og økt uforutsigbar kraftproduksjon er utfordringer som morgendagens kraftsystem står overfor. Hvordan vi skal monitorere, vedlikeholde og drifte et slikt komplekst kraftsystem blir derfor det store spørsmålet. Dagens IKT-muligheter kan muligens bidra til å finne eller utvikle effektive løsninger som kan ta hånd om dette storspørsmålet.

Det er ønskelig å integrere prinsipper og forskning i vedlikehold og risikoberegning angående elementer i kraftsystemets informasjonsflyt for å utvikle risikoovervåking og beslutningsstøtte for vedlikehold og drift i sanntid. Elementene i informasjonsflyten utgjøres av systemkomponenter, sensorer, innsamling og overføring av data, lagring av data og metoder for dataanalyse. Antakelsen er at det hittil har vært et stort fokus på forskningen og prinsippene av elementene for seg selv, men ikke som et helhetlig bilde som danner grunnlaget for beslutningsstøttene og risikoovervåkingen i sanntid.

I denne masteroppgaven har jeg gjort rede for de ulike elementene i informasjonsflyten for å bekrefte eller avkrefte denne antakelsen, og til slutt har jeg kommet med forslag til videre forskning. Oppgaven er et litteraturstudium og metoden som er brukt er litteratursøk med forskningsartikler og bøker som kilder. Resultatet av oppgaven er at et slikt helhetsbilde over alle elementene ikke eksisterer og dermed bekrefte antakelsen. Min redegjørelse viser at det foreligger mye forskning på hver av elementene individuelt, men at vi enda ikke har klart å se helheten i flyten for å kunne utarbeide sanntidsverktøy for risikoovervåking og beslutningsstøtte i vedlikehold og drift. Forslag til videre arbeid er å motivere til forskning på en sanntids beslutningsstøtte og risikoovervåkningssystem.

Abstract

Our electric power systems are subject to major restructuring in the near future. Increased need of power, increasing foreign connections, flexibility among users, climate change and a growing power production which is unpredictable, are challenges that tomorrow's power system faces. The big question remains how we can monitor, maintain and operate such a complex power system. With the help of ICT we can find or develop possible solutions to handle this major question.

It is desirable to integrate principles and research on maintenance and risk monitoring regarding elements in the power system's flow of information, in order to create real time tools in risk monitoring and decision support in operation and maintenance. The elements of the flow of information consist of the components of the system, sensors, data collection and transmission, and methods in data analysis. There is an allegation or assumption that there has been a major focus on the research and principles of these elements individually, and that the general picture of the flow of information as a whole is missing. In fact, the whole picture is fundamental for the creation of the important real time tools in decision support and risk monitoring.

In this master thesis, I am exploring the different elements in the flow of information to confirm or disprove this assumption. The thesis is a literature study and the method used is literature search with research articles and books as the main sources. The finding or result of the thesis is the confirmation of a non-existing whole picture of the elements, which confirms the assumption. My investigation shows that there are abundant amounts or masses of information and research related to each element, but that we still have not managed to explore the general picture in the flow of information, which is necessary in creating real time tools in risk monitoring and decision support in operation and maintenance. My suggestion for further work is encouraging research on the mentioned tools and the matter of the whole picture.

Forord

Denne masteroppgaven ble skrevet ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) våren 2017.

Etter deltakelse i kurset FYS377 i 2015 fikk jeg en dypere forståelse og innsikt av våre elektriske kraftsystemer. Det faktum at fremtidsperspektivet ble satt i lys styrket ytterligere min interesse for våre kraftsystem. Med hjelp fra min veileder, Sonja Monica Berlijn, fikk jeg en oppgave som utforsket dette. Oppgaven var meget innsiktsfull, lærerikt dog utfordrende. Jeg håper oppgaven min kan være til nytte for Statnett og andre. Jeg vil takke Sonja for hennes verdifulle veiledning, hjelp og innspill.

Deretter vil jeg takke professor Arne Auen Grimenes, professor Achim Kohler og studieveileder Rune Grønnevik for deres gode støtte i gjennomføringen av denne oppgaven. Andre støttespillere under denne prosessen jeg er takknemlig for er min mor, far, søster og katt.

Kolsås, 15. august 2017

Sangcami Krishnakumar

Liste over forkortelser

Forkortelse	Engelske navn	Norske navn
AMM	Automatic Meter Management	Avansert målingsforvaltning
AMS	Advanced Metering Infrastructure	Avanserte måle- og styringssystemer
CRM	Customer Relationship Managment	Kundeforvaltning
CT	Current Transformer	Strømtransformator
DGA	Dissolved Gas Analysis	Oppløsningsanalyse av gass
ENTSO-e	European Network of Transmission System Operators for Electricity	
EPRI	Electric Power Research Institute	Forskningsinstitutt for elektrisk energi
FoU	Research & Development	Forskning og utvikling
FRA	Frequency Response Analysis	
ILE	Non-distributed energy	Ikke levert energi
LTC	Load Tap Change	Lastkobling
MIS	Metal Insulator Semiconductor	
PD	Partial Discharge	Partielle utladninger
PMU	Phasor Management Unit	Fasemåleenheter
PT	Potential Transformer (Voltage Transformer)	Spenningstransformator
RF	Radio frequency	Radiofrekvens
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	
TLSA	Transmission Line Surge Arrester	
TSO	Transmission System Operator	Systemoperatør

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	i
Abstract	ii
Forord	iii
Liste over forkortelser	iv
Innholdsfortegnelse	v
1. Innledning	1
2. Kraftsystemets infrastruktur.....	3
2.1 Drift av et kraftsystem	4
2.2 Fra N-1 til risikobasert.....	8
2.3 Økt kompleksitet av nettet	9
2.4 Behov for sanntidsovervåkning	13
3. Fra sensor til beslutningsstøtte.....	17
4.1 Sensorer	23
4.2 Overføringsteknologier.....	35
4.3 Innsamling av data.....	38
4.4 Metoder for dataanalyse	40
4.5 Asset Management for vedlikehold	43
4.6 Pågående utviklinger	48
4. Oppsummering og forslag til videre arbeid	48
5. Referanser	51

1. Innledning

Elektrisitet er en av de viktigste velsignelser vitenskapen har gitt menneskeheten da den har blitt så godt integrert i det moderne liv at man kan ikke forestille seg en verden uten den. I tillegg til å være en viktig del av funksjonen i hverdagen er elektrisitet også essensiell for verdiskapning i et samfunn. Den gode tilgjengeligheten til strøm i Norge skyldes et velfungerende kraftsystem som nettselskapet Statnett er systemansvarlig for (transmission system operator – TSO). Statnett sitt sentrale arbeid innebærer utbygging og drift av sentralnettet, og forsikring av god forsyningssikkerhet, hvilket er avhengig av et godt fungerende vedlikeholdsarbeid.



Figur 1.1: Ved å feste UV-kameraet på en drone åpner muligheten for tilstandskontroll. Bildet er hentet fra [4].

TSOer har muligheten til å benytte seg av avanserte sensortechnologier i vedlikeholdsarbeidet. Sensordata kan integreres i analyseverktøy for å kartlegge og holde transmisjons- og distribusjonssystemet oppdatert, fastslå statusen til komponentene, og gi tilstandsestimering og sanntidskontroll, hvilket øker påliteligheten og levetid. Måter

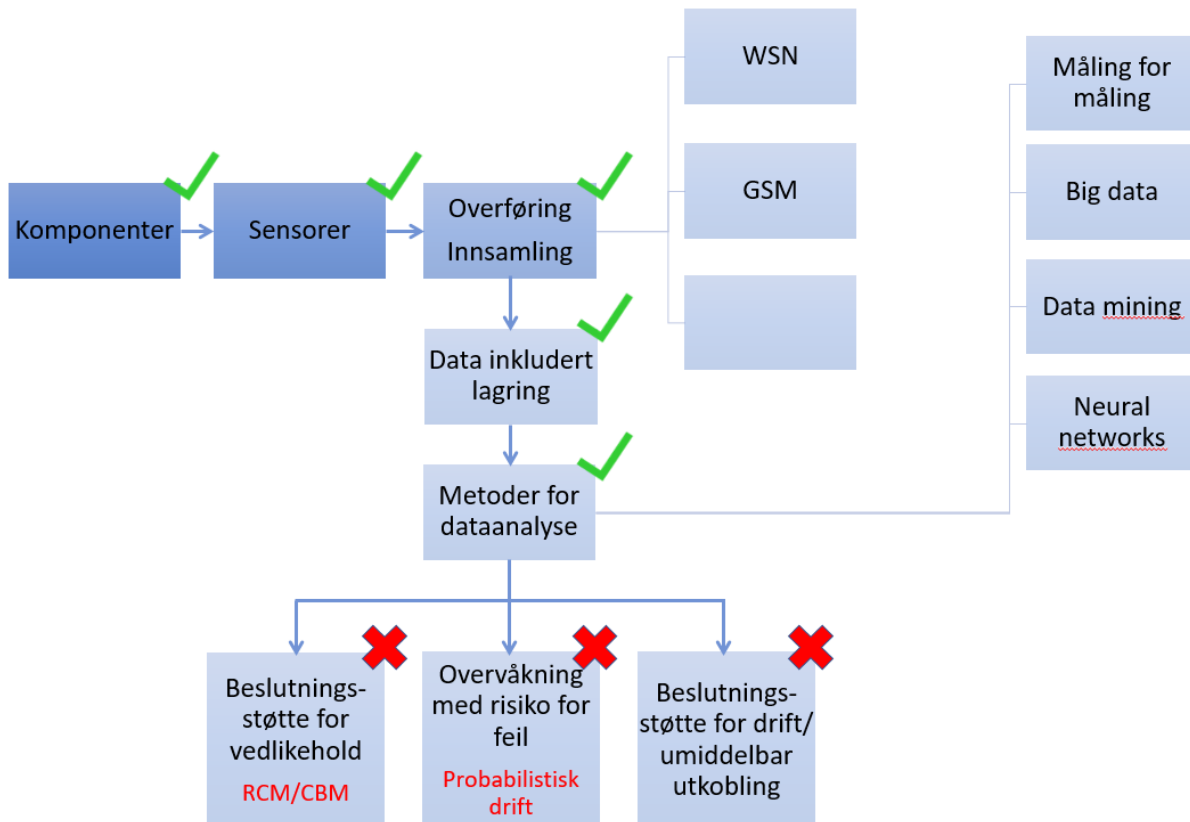
sensorer kan overvåke ulike systemkomponenter og omkringliggende vegetasjon er via vibrasjonsmålinger, IR-kamera, videoopptak og UV-kamera. Ved bruk av UV-kamera kan man detektere koronautslipp som uttrykker feil på luftlinjer. I tillegg kan sensorene monteres på roboter, droner i luften (se Figur 1.1) eller på et fast punkt. For å eksemplifisere vil UV-kamera festet til drone muliggjøre overvåkning av luftlinjer på langt hold på en kostnadseffektiv måte. GPS-bruk i tillegg vil gi presis lokalisasjon av feilen. [4]

I Norge har vi 11 000 km lange luftlinjer og 150 transformatorstasjoner [2]. Benyttelse av sensorer vil medføre overflødig informasjon i overvåkningsentralen pga. overvåkingen av flere forskjellige komponenter som kraftledninger, master osv. av utallige mengder sensorer. Vi trenger derfor et analyseverktøy som automatisk filtrerer og konverterer data til informasjon og velger ut den informasjonen som er viktigst med henblikk på feil. Foreløpig

benyttes N-1 som medfører stor ubenyttet kapasitet fordi en kraftledning tar over for en annen dersom en feil inntreffer [2].

Om vi får vite om en potensiell feil, som sensorer muliggjør for, kan infrastrukturen utnyttes på en bedre måte. Men sensorer kan ikke være grunnlaget for denne overvåkingen med risiko for feil på egenhånd. Beslutningsstøtte for vedlikehold, beslutningsstøtte for drift og som sagt overvåking med risiko for feil i sanntid kan bare muliggjøres ved at forskning om alle elementer i informasjonsflyten sees i sammenheng. Informasjonsflyten består som sagt av komponenter, sensorer, overføring og innsamling, datalagring og metoder for dataanalyse (se Figur 1.2).

I min oppgave skal jeg undersøke om denne sammenhengen eller helhetsperspektivet eksisterer, eller om hovedfokus ligger i elementene hver for seg. Med andre ord skal jeg avkrefte eller bekrefte antakelsen om at forskningen om elementene ikke ser hele informasjonsflyten som en helhet og at det derfor ikke eksisterer risikoovervåking og beslutningsstøtte for vedlikehold og drift i sanntid.

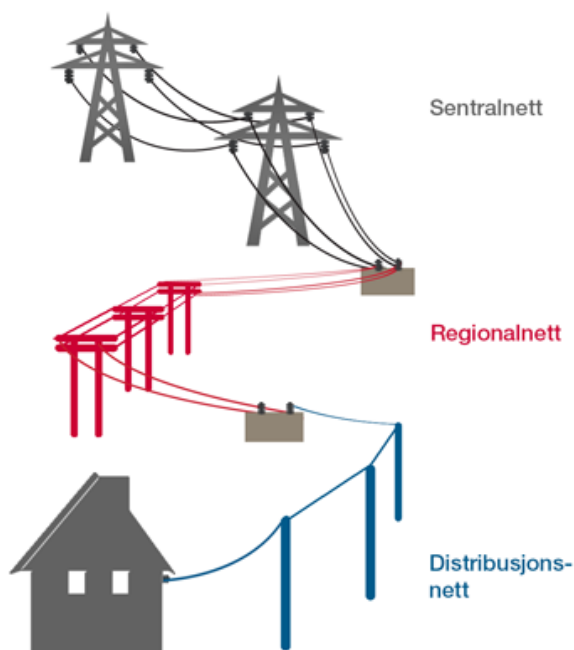


Figur 1.2: Her fremstilles en idé på hvordan man kan tilkoble alle elementene i kraftsystemets informasjonsflyt til én felles enhet for å gi god nok bakgrunn til å foreta god beslutningsstøtte. [1]

2. Kraftsystemets infrastruktur

Kraftsystem er et samleord for alle elementene som til sammen fører til produksjon og overføring av kraft fra de ulike kraftstasjonene og mellomforbindelser, og frem til sluttbrukere. I tillegg dekker kraftsystem-begrepet forskjellige virkemidler som forsikrer akseptabel pris, leveringskvalitet og forsyningssikkerhet. Et særpreg ved kraftsystemet er at forbruk og produksjon må være i balanse. Dette illustrerer prinsippet om momentan balanse. Dersom denne balansen ikke ivaretas vil enten nettanlegg falle ut eller systemkomponenter vil kunne komme til skade. [5]

Komponentene i kraftsystemet utgjøres av tekniske anlegg som transmisjons- og distribusjonsnett, generatorer, transformerings- og bryteranlegg, og systemer for kontroll av funksjonalitet til brytere og beskyttelse av de ulike anleggskomponentene. Rammene for aktørene og kraftsystemet blir satt av lover, retningslinjer, veiledere og forskrifter, og har som mål å fremme igangsetting av nødvendige tiltak til rett tid. Kraftsystemet i Norge er



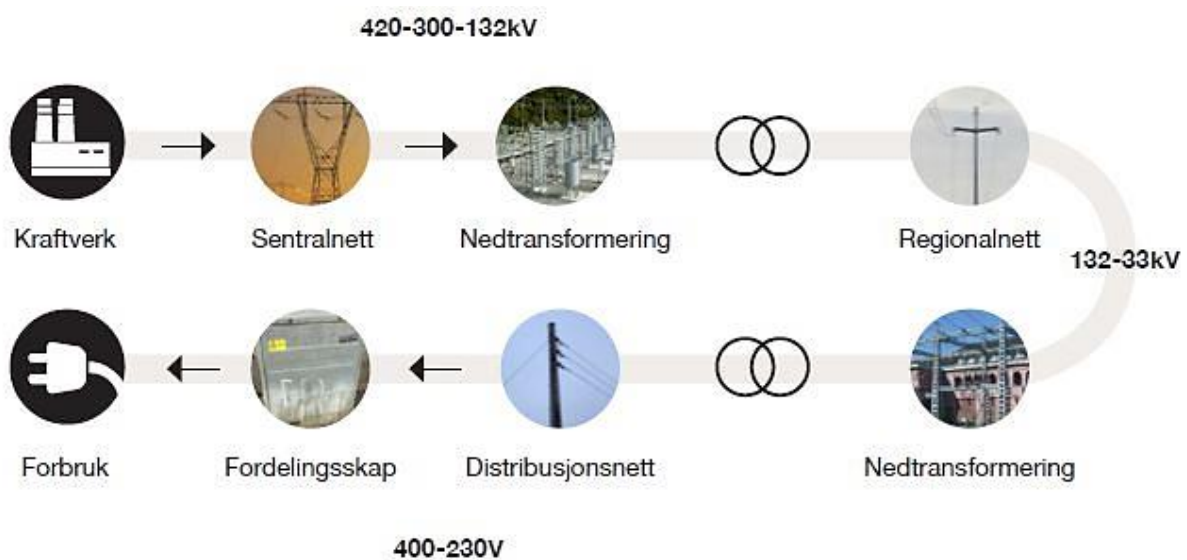
Figur 2.1: Her ser vi de ulike nivåene i kraftsystemet. Bildet er hentet fra [5].

strukturert i en trenivåinndeling som består av sentralnettet, regionalnettet og distribusjonsnettet (se Figur 2.1). Sentralnettet består av 11000 km lange kabler hvor ca. 0,5 % utgjøres av jordkabler og tilsvarende prosentandel utgjøres av sjøkabler [6]. Dette ledningsnett er ansvarlig for overføringen av strøm fra landsdel til landsdel og over til naboland. Statnett har eid 96 % av sentralnettet i Norge siden 2013 [7]. De høyeste spenningsnivåene (420 kV, 300 kV og noe 132 kV) som blir representert av sentralnettet muliggjør mindre energitap i ledningsnett over store avstander, dvs. at vi kun får 2-3 % tap på en 420 kV linje. [2, 5]

Regionalnettet, som utgjør bindeleddet mellom sentralnettet og distribusjonsnettet, representerer mellomspenningene 33, 47, 66, 110 og 132 kV, og består av 19 000 km lange

kabler (1,6 % sjøkabler og 6 % jordkabler) [6]. Hafslund i Oslo og BKK i Bergen er eksempler på regionale nettselskaper. Til slutt har vi Distribusjonsnettene som strekker seg over 305 000 km, hvorav sjøkabler utgjør ca. 0,7 % og jordkabler 45 % [6], som tar hånd om lavspenningene 0.23 kV, 0.4 kV, 11 kV, 22 kV, i tillegg til en andel av byenes 132 kV kabelanlegg. Dette ledningsnettene overfører kraft helt frem til boligfelt og lokalmiljø. [7]

Figur 2.2 beskriver flyten av kraft fra produsent til forbruker. Den elektriske kraften blir transformert opp til adekvat nivå av spenning. Deretter går den ut på sentralnettet hvor den blir fraktet videre gjennom jord- og sjøkabler og ledninger i form av luftlinjer til sluttbrukere. Deretter vil kraften fra sentralnettet nedtransformeres i en transformatorstasjon og vil videre nå regionalnettet. Nedtransformering skjer på ny når kraften nærmer seg boligområde, for så å gå videre ut på distribusjonsnettene og bli fordelt til forbrukere. [7]



Figur 2.2: Illustrasjonen viser kraftflyten fra produsent til sluttbruker. Bildet er hentet fra [7].

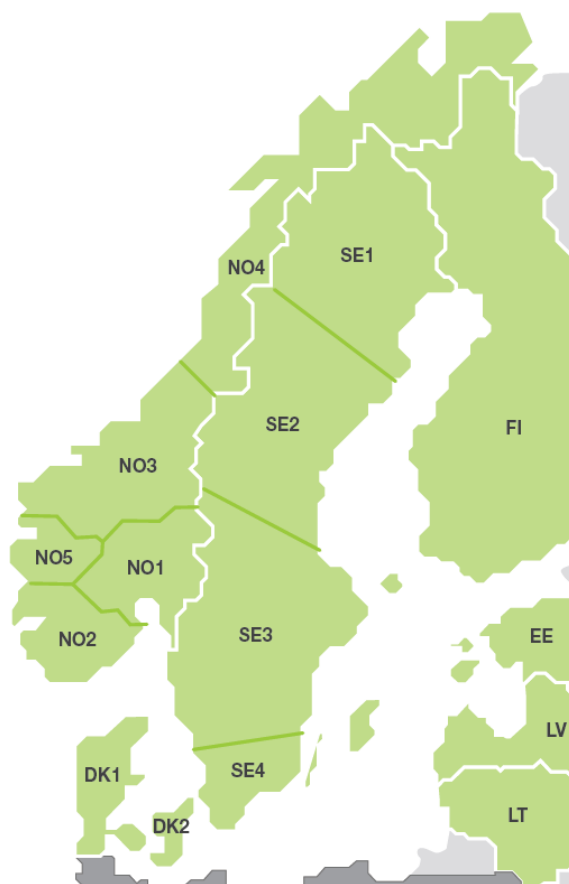
2.1 Drift av et kraftsystem

Det er svært vanlig at hvert land har sin egen systemoperatør som er systemansvarlig for hele landets kraftnett. Statnett har nemlig denne rollen i Norge. Statnett har hovedsakelig to roller; eie og drifte sentralnettet og være systemoperatøren i landet. Systemoperatørens viktigste arbeidsoppgaver innebærer utvikling av markedsløsninger for å fremme god utnyttelse av kraftsystemet, og i tillegg styre og drifte landets anlegg. Systemansvarets oppgaver blir regulert av forskriften for systemansvar (fos).

Statnetts rolle som systemoperatør er å sørge for momentan balanse dvs. balanse mellom forbruk og produksjon. Frekvens er et mål for den momentane balansen og måles i Hz. Norden unntatt Jylland skal ha en felles frekvens på 50 Hz som betyr at Norden utgjør et synkronområde (se Figur 2.3). Signaler om forbruk, produksjon og frekvens blir registrert av sensorer og måleutstyr ute i kraftnettet og sender signaler til systemoperatøren.

Frekvensavvik fra 50 Hz signaliserer ubalanse, og ubalanse i et område påvirker resten av synkronområdet. Dersom dette opptrer må Statnett foreta seg en vurdering om de skal kontakte produsenter og forbrukere om å redusere eller øke produksjon/forbruk for å gjenoppnå 50 Hz. Synkronområdet er inndelt i ulike prisområder som vist i Figur 2.3 for å

håndtere større flaskehalsen i nettet. Flaskehalsene koordinert med etterspørselen og tilbudet på kraft danner grunnlaget for kraftprisen i Norden. [7]



Figur 2.3: Figuren viser Norden (Norge, Sverige, Danmark og Finland) som et felles synkronområde. Synkronområdet er inndelt i ulike prisområder. Bildet er hentet fra [8].

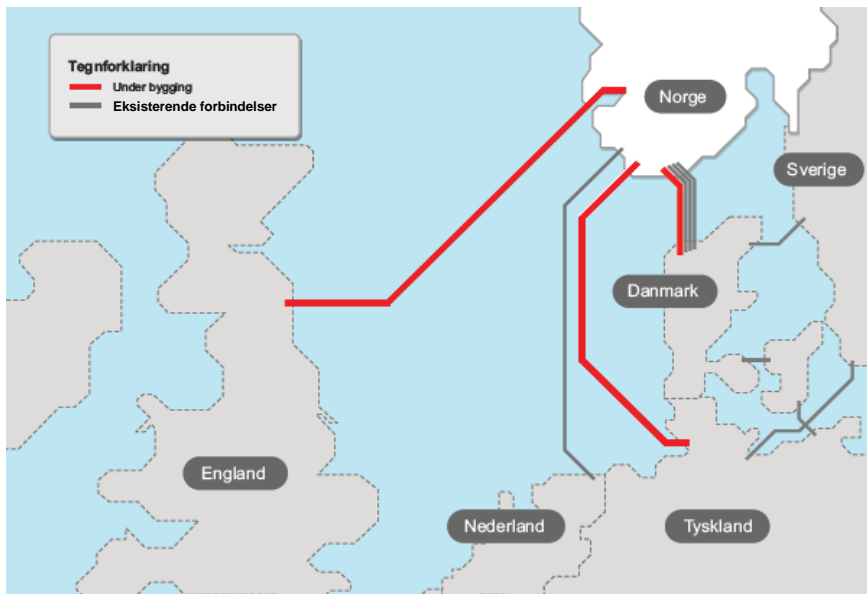
Den omfattende utbyggingen av fornybar produksjon og fordobling av inn- og utførsel av kapasitet har medført store utfordringer for Norden. Elementer som blir påvirket av utfordringene er nettspenning, stabilitet og frekvens, flytmønsteret, og balansen av kraft og systemet som en helhet. For å oppnå en effektiv og sikker drift, og en balansert utvikling av kraftsystemet er det essensielt med et nordisk samarbeid. Balansert utvikling er viktig for systemdrift og forsyningssikkerhet, men også for den samfunnsøkonomiske nytten grunnet effektiviserte markeder. Et felles nordisk kraftmarked frembygger økt verdiskapning på nasjonalt og internasjonalt nivå. Den store fortjenesten er forbundet til interaksjon mellom diverse produksjonsteknologier. De samfunnsøkonomiske vinninger kommer til rette ved at det foreligger kraftflyt fra overskuddsområder til underskuddsområder. De kraftressursene som er rimeligst benyttes først for å redusere totalkostnadene. [7]

Dersom en feil oppstår i kraftverk må Statnett sørge for at det til alle tider er tilgjengelige produsenter og/eller forbrukere som kan regulerere produksjonen/forbruket for å unngå langvarige strømbrudd. TSOen må altså sørge for at det er tilstrekkelig fleksibilitet i kraftnettet. For å forhindre tap av kraft i nettet og risikere at elektriske apparater i husholdningen blir ødelagte, er det særdeles viktig at det er riktig spenning i nettet. [7]

Leveringssikkerhet er også et aspekt som må ivaretas. Drift av all ledning og anlegg etter N-1 prinsippet bidrar til opprettholdelse av dette aspektet. N betegner antallet komponenter i ett nett. Dersom det opptrer feil med én komponent skal nettet tåle belastningen likevel. I verstefall er det den sterkeste komponenten som faller ut, som medfører at den svakeste komponenten må overta. Det er dermed ytterst viktig at den svakeste komponenten ikke er gjenstand for mer belastning enn det den tåler. Dette er for å forhindre kjedefeil som kan medføre alvorlige ødeleggelser på nettet og til slutt strømbrudd for sluttbrukere. Den svakeste komponenten forteller derfor alltid om kapasiteten til en del av kraftverket. Selv om andre sterke komponenter faller ut skal de svakeste komponentene være i stand til å tåle påkjenninger på kraftsystemet. Betydningen dette har er at det ikke påvirker forbrukerne eller nettet negativt dersom en feil inntreffer. For å eksemplifisere kan strømmen nå endepunktet via andre ruter dersom en strømkabel faller ut av drift. Vi kan av den grunn opprettholde en forsyningssikkerhet på 99,999 %. N-1 er på overordnet nivå et kriterium for planlegging og drift som på sterkeste grad er ønskelig å ivareta. [7, 8]

Kraftsystemet i Norge kan ikke anses som et isolert system ettersom det stadig blir integrert med utlandet. Tilknytningen til andre land gjennomføres via likestrømskabler og vekselstrømslinjer som Statnett er medeier av. Det muliggjør for utveksling av kraft utenfor landegrensene og styrker nordisk samarbeid med Europa. Det åpner muligheten for koordinering av systemdriftsoppgaver og være en del av den europeiske utviklingen for å forsikre at våre nordiske behov blir møtt. For å øke kapasiteten mot utlandet er to mellomlandsforbindelser under konstruksjon. Den ene forbindelsen strekker seg fra Norge til Storbritannia (NSN Link) og den andre fra Norge til Tyskland (NordLink) som Figur 2.4 viser. Mellomlandsforbindelser fremmer økt verdiskapning i og med at den norske produksjonen av fornybar kraft får mer verdi i situasjoner hvor det er kraftoverskudd. Dessuten blir det lettere tilgang på rimeligere kraft fra andre markeder ved kraftunderskudd. Dette vil sammen gi økt forsyningssikkerhet. Et eksempel på kraftunderskudd er ved

situasjoner hvor det er lav produksjonskapasitet og høyt forbruk som ved tørre og kalde vintre. [7, 8]



Figur 2.4: Figuren viser planlagte og nåværende mellomlandsforbindelser. Forbindelser under konstruksjon er merket i rødt og eksisterende er merket i grått. Som vi ser på figuren har Norge allerede forbindelser til Nederland og Jylland (Danmark). Dette muliggjør utveksling og handel av kraft. Bildet er hentet fra [7].

Om ti år forventes det at utvekslingskapasiteten mellom Europa og Norden skal fordobles fra omtrent 5000 til 10 000 MW. Denne fordoblingen kombinert med økt produksjon av uregulerbar kraft og utfasing av svensk kjernekraft vil medføre omfattende endringer i kraftsystemet i Norden. For at økt utvekslingskapasitet ikke skal gå på bekostning av sikker drift av systemet er det nødvendig med tilstrekkelig erfaring som kan hentes fra driften av NSN Link og NordLink. Statnett skal derfor testkjøre disse forbindelsene etter ferdigstillelse. Erfaring vil nemlig gi grobunn for fremtidig ekspansjon av kapasiteten. [7, 8]

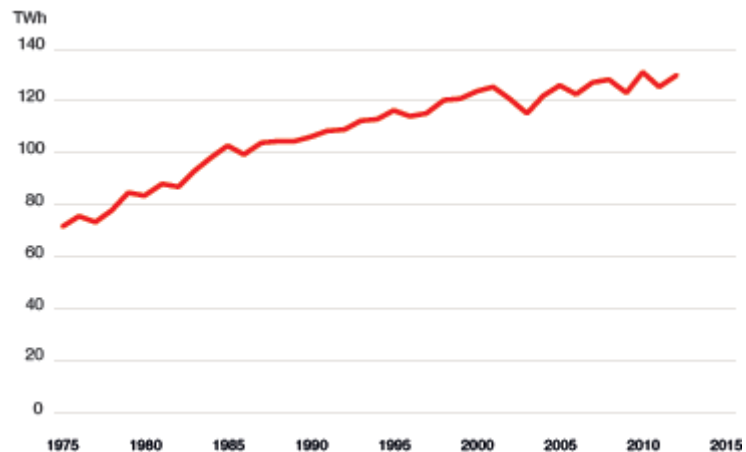
En annen viktig oppgave Statnett har er å koordinere vedlikeholdsarbeid i nettet. I de fleste tilfeller kobles komponenter i nettet ut for at det ikke skal gå strøm og spenning gjennom dem samtidig som det pågår arbeid. Dette resulterer i begrensning i overføringskapasitet da det er færre antall komponenter i nettet som bidrar til kraftoverføringen. For å forhindre dette sørger Statnett for at vedlikeholdsarbeidet ikke samles i et område samtidig som at det forsøkes å finne nye vedlikeholdsmetoder som kan utføres under drift. [7, 8]

Som TSO skal Statnett sørge for at aktørene knyttet til kraftnettet er innforstått med dets fysiske begrensninger. For at funksjonen av nettet skal overholdes er det særdeles viktig at alle innfrir kravene stilt av Statnett (FIKS). Ved å fastsette gode krav kan Statnett oppfylle tilfredsstillende kraftkvalitet. [8]

2.2 Fra N-1 til risikobasert

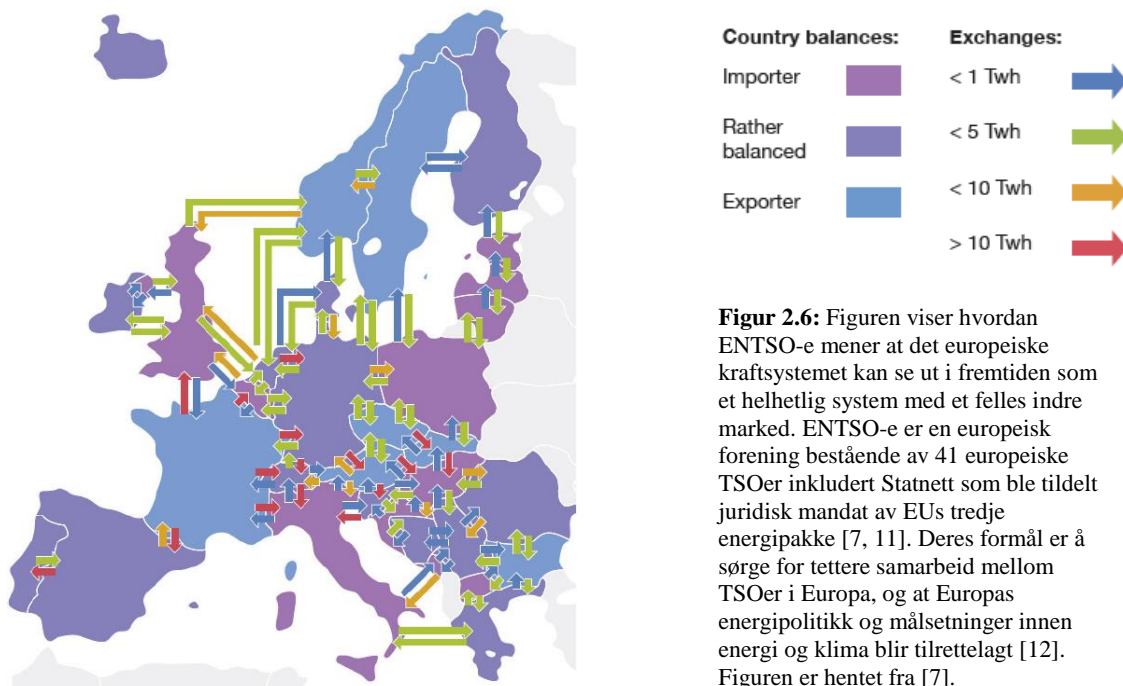
Solid og nært samarbeid med kompetansemiljøer utenfor våre geografiske grenser spiller en viktig rolle for Statnetts FoU-arbeid. Statnett deltar derfor i en rekke EU-prosjekter. I dette delkapittelet skal vi se på et EU-prosjekt kalt GARPUR med tanke på prosjektets betydning for fremtidens kraftsystem. [9, 10]

Driften av kraftsystemet blir stadig mer usikkert og komplekst ettersom kraftbehovet i verden øker (Figur 2.5 viser utviklingen av forbruket i Norge) og produksjonen av uregulerbar kraft stiger i takt med dette behovet. På lang sikt er derfor N-1 ikke tilfredsstillende for drift av transmisjonsnettet. For å sikre tilfredsstillende forsyningssikkerhet og opprettholde reduserte samfunnsøkonomiske kostnader er løsningen å anvende risikobaserte metoder som GARPUR-prosjektet tar til sikte. [9, 10]



Figur 2.5: Figuren viser elektrisitetsforbruket i Norge i perioden mellom 1975 og 2012. Figuren er hentet fra [7].

GARPUR er et europeisk FoU-prosjekt som er delfinansiert av den europeiske kommisjonen. Prosjektets målsetning innebærer å utvikle, utforme og vurdere nye probabilistiske pålitelighetskriterier innen utbyggings- og vedlikeholdsplanlegging og drift, i mål om å redusere samfunnsøkonomiske kostnader. Utvikling, vurdering og evaluering av pålitelighetskriterier skal på sikt supplere eller erstatte N-1 kriteriet. Av den grunn får man økt samfunnsøkonomisk overskudd ved å bedre balansen mellom forsyningssikkerhet og kostnad.



Figur 2.6: Figuren viser hvordan ENTSO-e mener at det europeiske kraftsystemet kan se ut i fremtiden som et helhetlig system med et felles indre marked. ENTSO-e er en europeisk forening bestående av 41 europeiske TSOer inkludert Statnett som ble tildelt juridisk mandat av EUs tredje energipakke [7, 11]. Deres formål er å sørge for tettere samarbeid mellom TSOer i Europa, og at Europas energipolitikk og målsetninger innen energi og klima blir tilrettelagt [12]. Figuren er hentet fra [7].

Dessuten har prosjektet et annet mål; å basere beslutninger innen vedlikehold, drift og langtidsplanlegging på et felles tankesett, nemlig «hvordan vurderes pålitelighet?». [9, 10]

GARPUR ble igangsatt den 1. september. 2013 og løper i fire år frem til 31. august. 2017. Prosjektet blir koordinert av Sintef Energi AS i samarbeid med sju andre TSOer (Norge, Island, Frankrike, Danmark, Tsjekkia, Bulgaria og Belgia), tolv leverandører innen FoU og en vitenskapelig rådgiver fra det offentlige universitetet i Liège i Belgia. [9, 10]

2.3 Økt kompleksitet av nettet

Som følge av at kraftsystemet er preget av internasjonalisering forsterkes nettets kompleksitet. Kraftsystemet er stadig et offer for massive endringer grunnet teknologiutvikling, klimautfordringer, og ønske om økt verdiskapning og høy forsyningssikkerhet. For å gagne medlemmer av EØS-avtalen ønsker man å fremme konkurranse som er nasjonsnøytral. Målet til EU er å oppnå et sammenfallende indre energimarked for å redusere klimagassutslipp, opprettholde konkurransedyktige kraftpriser og samtidig bevare forsyningssikkerheten. Utforming av et felles regulatorisk rammeverk innad i Europa og effektiv samhandling mellom TSOer, kombinert med stor nok kapasitet på mellomlandsforbindelser, er faktorer som former et vellykket indre marked. Stiftelsen av ENTSO-e er blant de virkemidlene som skal til for å fremme nettopp dette (se Figur 2.6). [7, 8]

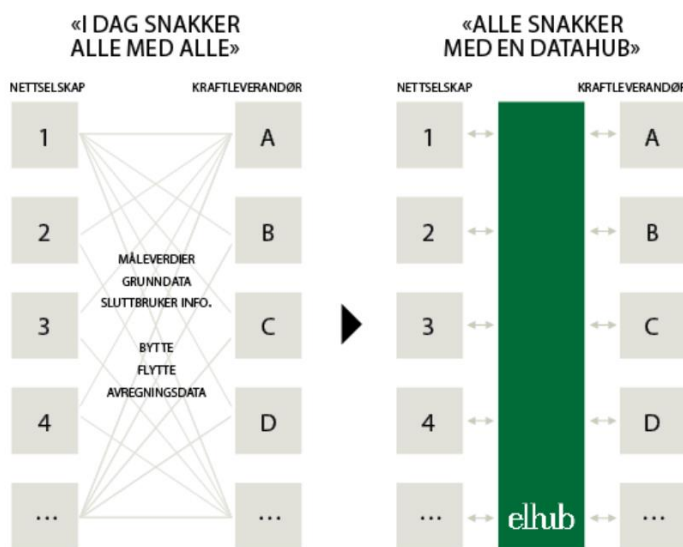
DSOers rolle er stadig i utvikling som en konsekvens av kraftsystemets endringer noe som også vil gi innvirkning på TSOenes oppgaver og ansvar. Det er derfor sterkt behov for avklaring angående ansvarsfordelingen. Kraftsystemets endringer vil si dets fysiske endringer i tillegg til en kombinasjon av distribuert produksjon, IKT-utvikling (smarte nett) og forbrukerfleksibilitet. Dette vil frembringe nye muligheter for bedre nettutnyttelse og styring. Hvordan dette kan oppnås avklares nærmere i avsnittene under. [8]

DSOer i EU og Norge kommer til å få nye rammer og regelverk de kommende årene som følge av den enorme omveltningen av kraftsystemet. Når og hvordan dette implementeres i Norge er fortsatt usikkert. Av den grunn vil DSOer før eller senere få mer innflytelse på driften av nettet. I Norge har allerede enkelte DSOer blitt utpekt for å utføre arbeidsoppgaver til gagn for flere nettselskaper takket være etableringen av en hjemmel grunnet endringer i Energiloven. [8]

Fleksibilitet hos sluttbruker kommer til å spille en viktig rolle i fremtidens kraftsystem blant annet for å oppnå fremtidige mål om et energieffektivt og miljøvennlig kraftsystem. Det europeiske regelverket vil før eller senere sørge for at ulike lagringsteknologier og forbrukerfleksibilitet kan medvirke sin fleksibilitet inn i energimarkedet slik som konvensjonell kraftproduksjon. Faktorer som større prisendringer, bedre styringsfunksjonalitet og innføring av høyteknologiske strømmålere vil øke insentiver hos alminnelige sluttbrukere til å gi respons på energimarkedets prissignaler. I dag er ikke det norske kraftsystemet like fleksibelt enda da den er begrenset til regulerbar kraftproduksjon og fleksible prisbud i energimarkedet. [8]

I motsetning til dagens situasjon trer Norge forsiktig inn i en ny fase hvor det åpnes for mer fleksibilitet fra mindre sluttbrukere. Innen 2019 skal installasjonen av smarte målere som inngår i AMS (avanserte måle- og styringssystemer) være ferdiginstallert hos alle sluttbrukere [13]. Det som er unikt med disse målerne er at de registrer forbruket til strømkundene hver time og blir deretter sendt videre til nettselskapet. Henting av måleverdier skjer derfor mer regelmessig i forhold til den tradisjonelle metoden hvor forbruket registreres kun én gang per måned. Nettselskaper kan dermed drifte nettet mer effektivt pga. økt informasjon, noe som også kan resultere i lavere nettleie. Kundene har også tilgang på all data slik at de stadig får informasjon om eget strømforbruk. Forbrukere kan av den grunn effektivisere og justere eget strømforbruk. [13]

Etableringen av elhub som har oppstart nå til høst er også et viktig virkemiddel innen forbrukerfleksibilitet. Elhub (datahub) vil omfatte all strømmåledata i Norge. Dette forenkler leverandørbyttning, effektiviserer distribusjon av målinger, tilrettelegger for leverandørsentrerte markedsmodeller samt hjelper aktører til å utnytte det teknologiske potensialet som byr seg i AMS på best mulig måte. Det blir derfor åpent for smarte løsninger og tjenester for leverandører, nettselskaper og til og med sluttbrukere. Hovedsakelig skal elhub fungere som et bindeledd mellom kraftleverandører og nettleverandører (se Figur 2.7) samtidig som å etablere samfunnsøkonomisk kraftmarked for sluttbrukere i Norge. [8]

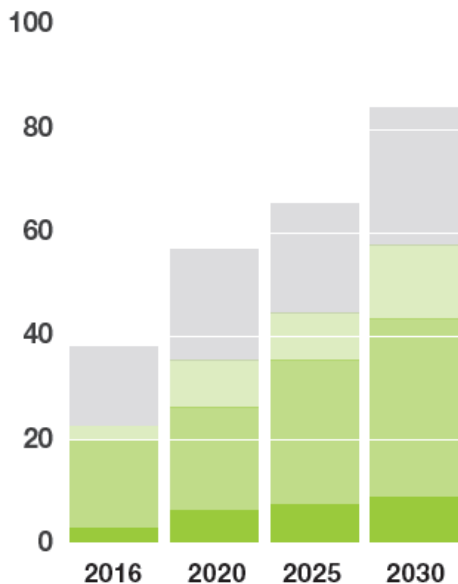


Figur 2.7: Elhub vil representere midtpunktet i det norske kraftsystemet. For en kraftleverandør er det særdeles viktig å ha kontinuerlig kontakt med forbrukernes nettselskaper vedrørende informasjon. Opprettelsen av Elhub vil derfor simplifisere mye av dagens kraftsystem ved å skape en felles plattform som alle aktører kan ta stilling til [14]. Bildet er hentet fra [14].

Klimautfordringer er som sagt også en medvirkende faktor til økt nettkompleksitet. Utfordringene innebærer omgjøringen til lavutslippssystem som medfører store endringer. Dessuten krever EUs klimamål omlegging av dagens energisektor. EU og deres sentrale medlemsland baserer sin klimapolitikk på en målsetning om å redusere 80 % av utslippene innen år 2050. For at dette skal oppnås må energisektoren allerede ha en utslippsreduksjon på 50-60 % ved inngangen av 2030. Dette resulterer i omfattende omstilling av kraftsystemet i EU da mesteparten av energiproduksjonen i EU til nå er basert på fossile energikilder. For å igangsette omveltningen av kraftsektoren må man først og fremst erstatte fossil kraftproduksjon med teknologier som er utslippsfrie, elektrifisere samferdsel og andre energikrevende sektorer og tilslutt men ikke minst øke nettutbyggingen for å tåle

uforutsigbarheten fornybar kraftproduksjon medbringer. Variable faktorer som nedbør, sol og vind gir uregelmessigheter i kraftproduksjonen. Det er derfor sterkt behov for et robust og kraftig kraftnett som kan overføre kraften fra produksjon til forbruk når ressurstilgangen

TWh Vind- og solkraft



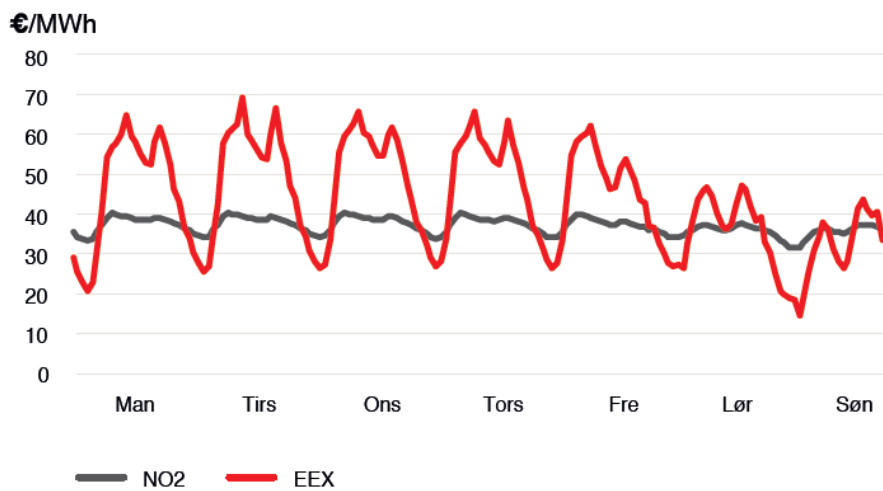
Figur 2.8: Sol- og vindkraftsproduksjon i Norden målt i TWh for årene 2016, 2020, 2025 og 2030. Figuren er hentet fra [8].

veksler. Siden mye av den uregulerbare energien omfatter sol- og vindenergi (se Figur 2.8 for mer informasjon om forventet utbygging av sol- og vindkraft) øker også behovet for regulerbare energiresurser som også er miljøvennlige for å balansere variert produksjon forårsaket av sol- og vindkraft. [8]

Fornybardirektivet ble derfor stiftet for å hjelpe til med konverteringen av kraftsektoren slik at EUs klimamål blir oppnådd. Direktivet forplikter at ethvert medlemsland i 2020 skal benytte en målsatt andel fornybar energi til sin elektrisitetsproduksjon. Veksten av fornybar kraftproduksjon har økt kraftig som følge av disse fornybarmålene hvor mesteparten av utbyggingen er finansiert av subsidieordninger. [8]

Norge har hittil hatt evnen til å styre sin egen elektrisitetsproduksjon avhengig av prisene utenfor våre landegrensener ved hjelp av regulerbar kraftproduksjon og utenlandsforbindelser. Strømprisene i Norge er nokså stabile i løpet av et døgn (se Figur 2.9) fordi ingen driftskostnader løpes ved endringer i produksjonsmønsteret i vannkraftverk. I Europa derimot har store kjerne- og kullkraftverk enorme oppstart- og stoppkostnader. Det er derfor ikke gunstig å stoppe produksjonen når etterspørselen er lav f.eks. om natten. I tillegg har mange europeiske land som for eksempel Tyskland og Danmark ingen styring i vindkraftproduksjonen. Kombinasjonen av slike faktorer resulterer lave strømpriser grunnet høy produksjon i perioder med lav etterspørsel. Norge kan derfor utnytte denne muligheten til sin fordel ved å begrense egen produksjon og isteden importere kraft akkurat i det tidspunktet prisen er lav. Når prisen er høy er eksport av kraft og nedgang i egen vannkraftproduksjon veien å gå. Figur 2.9 illustrerer nettopp prissvingningen i Norge sammenliknet med Tyskland i løpet av et døgn og viser klart nok en stabil prisutvikling i forhold til Tyskland. Men hvordan

disse kurvene kommer til å se ut i fremtiden avhenger av regel- og rammeverksutforming i Europa, etterspørsel og tilbud av kraft, og nettkapasitet. [7, 8]



Figur 2.9: Figuren viser en gjennomsnittlig prissammenligning mellom Sør-Norge (NO2, se Figur 2.3) og Tyskland (EEX) i en uke fra 2004 til 2013. X-aksen viser ukedager mens Y-aksen viser prisen i Euro per MWh. Prisen i Tyskland (den grå kurven) svinger kraftig i forhold til prisen i Norge (den røde kurven). Figuren er hentet fra [7].

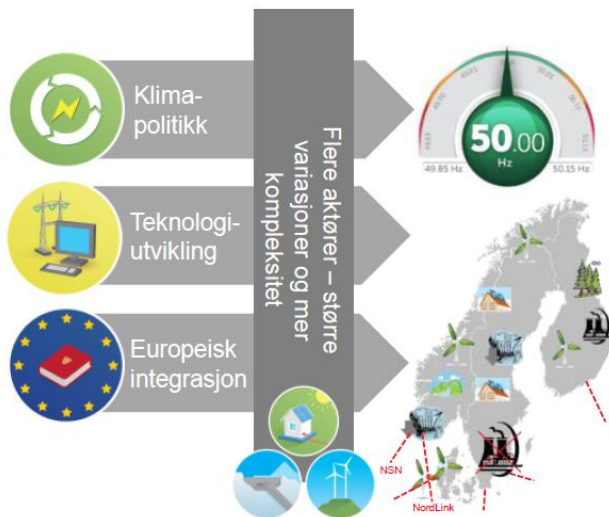
Mellomlandsforbindelser har i de siste årene gitt en positiv effekt på kraftforsyningen i Norge. I 2010 da det var lite nedbør hadde Norge økt behov for import fra utlandet mens i 2011 var utlandet avhengig av vår overskuddsenergi. Vekslingen av kraft går derfor begge veier for å sikre kraftforsyningen. [7]

Dagens kraftsystem vil som sagt bli utsatt for enorme endringer de kommende årene helt frem til 2050. Vi vil gradvis gli inn mot et kraftsystem som tar hånd om økt elektrifisering av flere sektorer, stiller større krav til forsyningssikkerhet, har vekslende kraftflyt både innenlands og utenlands, har økt fornybar kraftproduksjon og tillater flere aktører inkludert aktive sluttbrukere i deltakelsen av å skape et godt fungerende kraftmarked. Dette er det Statnett kaller for neste generasjonskraftsystem hvor faktorer nevnt ovenfor bidrar til at systemet blir mer komplekst. [7, 8]

2.4 Behov for sanntidsovervåkning

Som tidligere nevnt blir neste generasjon kraftsystem mer og mer komplekst pga. tidligere nevnte faktorer som variert kraftproduksjon, økt kraftveksling og en mer driftig

sluttbrukerside. Det at systemdriften blir påvirket av det som skjer utenfor våre landegrenser samtidig som flere aktører deltar aktivt på lavere nivå av kraftnettet sier mye om hvor komplekst kraftsystemet vårt har blitt. Det er derfor økt behov for planlegging og samspill mellom de forskjellige aktørene fordi kraftsystemet gradvis blir utsatt for økt kompleksitet og massive endringer. For å ivareta effektiv og sikker drift av det fremtidige kraftsystemet vil informasjonsprosessering- og utveksling i økende grad spille en viktig rolle fremover. [15]



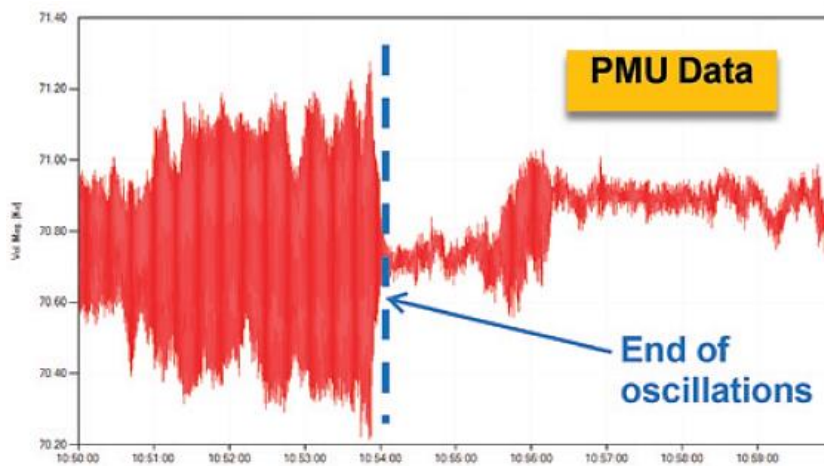
Figur 2.10: Figuren illustrerer hvor komplekst kraftsystemet vårt har blitt og utfordringen det skaper i balanseringen av systemet. Figuren er hentet fra [15].

Mer variabel og økt kraftutveksling betyr ikke i den grad at det er kun behov for større transmisjonskapasitet. En annen utfordring kraftsystemet står overfor er å opprettholde en stabil frekvens (se Figur 2.10). Jo mer produksjonsmønsteret svinger desto vanskeligere blir det å vedlikeholde spenningen innenfor et ønsket nivå dvs. balansen mellom forbruk og produksjon i systemet. Eksempler på dette er når et antall kraftverk foretar raske produksjonsendringer for å svare til høyt

forbruk og endringen av kraftflyten til eksport fra import på morgentimen. [13, 15, 16]

For å være forberedt på fremtidens kraftsystem må man gå løs på utfordringen kompleksiteten skaper. For det første er det svært nødvendig å stå for utviklingen av nye IKT-løsninger både for å inkludere nye aktører i deltakelsen av balanseringen av systemet og i tillegg forsterke automatisert drift og overvåking for trygg og stabil drift av kraftsystemet. DSOer har lite innsyn i tilstanden til og forholdet rundt distribusjonsnett. Jo flere ressurser investert i systemet desto mer innsyn får man for å sikre påliteligheten og frekvensen. USA blant annet har investert bort imot 50 millioner dollar på smartmålere som dekker 43 prosent av amerikanske hjem i motsetning til Norge hvor 100 prosent av befolkningen får dem ferdigmontert innen 2019. Det har bidratt USA med økt innsyn i distribusjonssystemet blant annet hyppigere registrering av forbruket dvs. hvert 15. min istedenfor månedlig. [13, 15, 16]

For økt innblikk i systemdynamikk og beskyttelse kreves raskere og høyere oppløsningssensorer dvs. utsending av driftsinformasjon i løpet av millisekunder. Et eksempel på en slik høyoppløsningsteknologi benyttet i transmisjonssystemet er PMU som kan ta opptil 30 til 120 tidsstemplede datapunkter i løpet av et sekund (se Figur 2.11). Dette



Figur 2.11: Her ser vi at PMU er vesentlig raskere og har høyere oppløsning enn eksisterende teknologier pga. atskillige antall datapunkter produsert i løpet av ett sekund. Grafen er hentet fra [16].

muliggjør bestemmelsen av eventuelle forandringer i fasevinkelen mellom flere steder som igjen er meget viktig for forståelsen av tilstanden til kraftsystemet. Fasevinkelen er basert på momentan strøm- og spenningsmålinger som forteller om forholdet mellom reell og reaktiv

effekt. Beregningen av fasevinkel forsyner operatører med nødvendig informasjon for å håndtere kraftstrømmen gjennom nettet, optimalisere effektfaktor, vedlikeholde ønsket spenningsnivå og beskytte systemkomponenter. En tilsvarende høyoppløsningssensor tilpasset distribusjonssystemet blir kalt Micro PMU. Den vil sørge for økt innsyn på distribusjonsnivå og bidrar til forsyningen av data til avanserte applikasjoner som f.eks. nettautomatikk og spenningsestimering. Micro PMU gir opphav til mange fordeler og avanserte muligheter innen diagnostikk, tilstandsestimering og kontroll relatert til kunden. [16]

I tillegg til utviklingen av kostnadseffektive PMU, micro PMU og andre sensorer til måling av elektriske parametere, har systemoperatørene nå muligheten til å benytte seg av avanserte sensorteknologier til å overvåke tilstanden og driften av systemkomponenter. Disse sensorteknologiene innhenter informasjon om komponentens konfigurasjon og/eller tilstanden i sanntid. Dataene fra disse sensorene kan integreres i avanserte applikasjoner bl.a. for å kartlegge og holde transmisjons- og distribusjonssystemet oppdatert, fastslå statusen til komponentene for optimal drift, gi støtte til bedre tilstandsestimering og mer kompleks sanntidskontroll. Komponentenes fysiske begrensninger er en funksjon av ulike driftsforhold hvor omgivelser/miljø og værforhold spiller en viktig rolle. [16]

Sanntidsovervåkning av utstyr og komponenter er nyttig for å øke levetiden til systemkomponentene i nettet og utsetter ytterligere behovet for utbygging av ny kapasitet. Det blir også enklere å opprettholde påliteligheten fordi det blir mindre sannsynlig for uforutsatte feil i nettet. Ut i fra årsstatistikken fremstilt av Statnett i 2016 viser det seg at driftsforstyrrelser oftest er forårsaket av omgivelser (~58 %) dvs. faktorer som fugler, torden, vegetasjon og vind, og teknisk utstyr (~11 %) som vi kan se tydelig fra Tabell 2.1. Vi har derfor økt behov for sensorteknologier som kan detektere eventuelle feil på systemkomponentene utplassert i feltet. Dessuten er det også viktig å poengtere at kostnadene påløpt av investeringen i sensorteknologi og avanserte applikasjoner er forholdsvis lave sammenliknet med gjeninnkjøp av nytt utstyr. [16, 17]

Tabell 2.1: Her ser vi en oversikt over antall driftsforstyrrelser kategorisert etter type årsak. Oversikten viser også tapt kraft pga. driftsforstyrrelsene både i MWh og prosentandel. Tabellen er hentet fra [17].

Utløsende årsak (hovedgruppe)	Antall driftsforstyrrelser				ILE pga. driftsforstyrrelser			
	Antall		Andel		MWh		Andel	
	2016	Årsgj.snitt 2009-2016	2016	Årsgj.snitt 2009-2016	2016	Årsgj.snitt 2009-2016	2016	Årsgj.snitt 2009-2016
Driftspåkjenninger	339	328	3,6 %	3,1 %	280	342	3,4 %	3,6 %
Konstr./montasje mm	289	199	3,1 %	1,9 %	302	181	3,7 %	1,9 %
Mennesker (andre)	235	304	2,5 %	2,9 %	291	388	3,5 %	4,1 %
Mennesker(personale/innleid)	242	274	2,6 %	2,6 %	126	177	1,5 %	1,9 %
Omgivelser	5 446	5 603	57,7 %	53,8 %	5 186	5 772	62,9 %	61,3 %
Teknisk utstyr	1 063	1 168	11,3 %	11,2 %	1 257	1 498	15,3 %	15,9 %
Tidligere feil	9	17	0,1 %	0,2 %	1	23	0,0 %	0,2 %
Årsak ikke klarlagt	1 820	2 524	19,3 %	24,2 %	797	1 031	9,7 %	11,0 %
Sum	9 443	10 417	100 %	100 %	8 239	9 413	100 %	100 %

Et annet konsept som stadig vokser innen drift av kraftsystemer er Condition-based-maintenance (CBM). Denne metoden bruker data fra sensorene utplassert i feltet for å avgjøre nødvendigheten for ytterligere eller fremtidig vedlikehold. Det å ha spesifikk informasjon om enhver komponent betyr at vedlikeholdsaktiviteter kan planlegges etter behov fremfor bruk av faste rutinekontroll. Nåværende status og bruksområder av ulike sensorer blir presentert senere i delkapittel 4.1. [18]

3. Fra sensor til beslutningsstøtte

Ettersom kraftsystemet blir mer og mer komplekst resulterer i at nettet blir mer sensitivt for trusler vi ikke er kjent med selv under normale forhold. Konvensjonelle metoder innen systemdrift og kontroll vil derfor ikke fungere lenger i og med at kraftsystemet har blitt mer omfattende og komplekst. I tillegg bygges det stadig ut mer nettkapasitet for å møte fremtidens kraftbehov. Dette betyr at det stadig installeres systemkomponenter for at man i det hele tatt kan drifte fremtidens nett. utfordringen blir nettopp å sørge for at alle systemkomponenter yter sitt beste under normal systemdrift. Det store spørsmålet blir derfor hvordan man kan holde øye med tusenvis av systemkomponenter døgnet rundt for optimal drift av systemet. Det er vanskelig å vite når systemkomponenter har behov for vedlikehold og i verste tilfelle erstatning. Situasjonen blir enda mer utfordrende dersom finansielle faktorer hindrer for bruk av operasjons- og vedlikeholdsressurser og når verdifull kunnskap går tapt av at langtidspersonalet forlater eller går av med pensjon. Alle overnevnte faktorer kombinert fører til at operatører og driftspersonell er under stort press for å fremme effektivitet og eliminere ukjente problemområder. [19, 20]

Så lenge det har vært elektrisk drevne komponenter har det vært vedlikeholdsproblemer, usikkerhet i pålitelighet og svikt. Svikt i dyre og komplekse komponenter øker risikoen for å skade mennesker og miljø, og påvirker selskapets fortjeneste hovedsakelig pga. kostbare reservedeler og at komponentene ikke er tilgjengelige for å gi inntekter. Ny teknologi har derfor skapt muligheten til å overvåke og vurdere systemkomponentens tilstand, istedenfor å vente til deres levetid er omme og gå i underskudd av den grunn. [21]

Likevel er det svært vanlig å loggføre tilstanden til de ulike systemkomponentene i nettet manuelt for å utvikle en forvaltningsstrategi hvis man ikke har en overvåkningsstrategi og et databehandlingssystem. En feil i nettet kan oppstå av ulike årsaker. Feilene inntreffer som regel uforventet pga. eksterne forhold som ekstreme værforhold og sabotasje. For det andre kan feilene bli utløst av indre årsaker som slitasje, aldring, deformering og dårlig konstruksjon eller materialer. For det tredje kan eventuelle feil utløses i forbindelse med drift slik som overbelastning, koblingsfeil og svikt i beskyttelsesmekanismen. Korrekt analyse av defekter og feil kan bidra til utviklingen av strategier for å opprettholde en «frisk» tilstand av kraftnettet. For å utføre en defektsanalyse bør man ha en klar og forståelig database som

inneholder data før hendelsen finner sted, etter at hendelsen har inntruffet og påløpte kostnader. Loggføring og konstruksjon av et databasesystem sørger for informasjon om systemkomponentenes tilstand. Det gir i tillegg grunnlag for å foreta gode beslutningsvalg i fremtiden hvis det evt. skjer noe drastisk. [22]

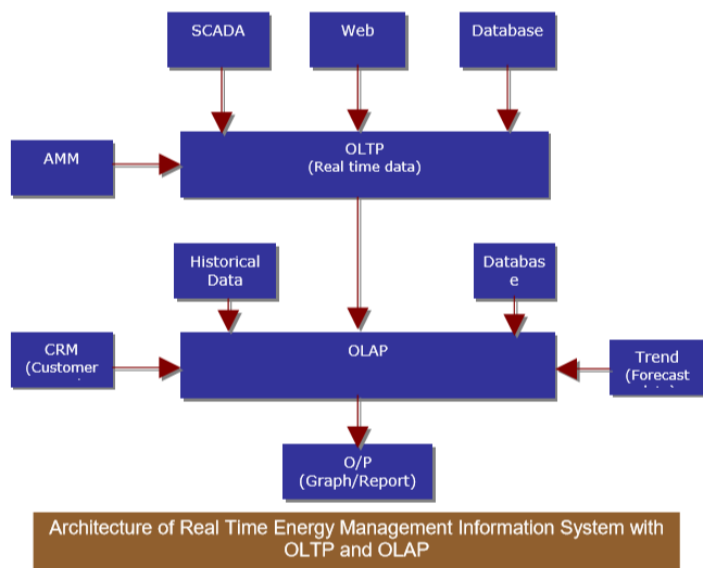
Rutinemessige kontroll og manuell loggføring gir seg ut for å være tidkrevende, og mange operatører og vedlikeholdspersonell pleier som regel å oppleve forsinkelser og feilkommunikasjon, og oppdage hull i dataene. Hvis informasjonen om komponentens tilstand er tilgjengelig i sanntid, kan operatøren først og fremst vurdere situasjonen og eventuelle risiko de står overfor. En del har derfor begynt å gå over til sensorer og automatisert datainnsamling for å få et bedre bilde av tilstanden til systemkomponentene. Likevel er det ikke mange som har begynt med sensorimplementering. I 2014 har mindre enn 20 % implementert sensorer i USA og Europa, men prosentandelen vil garantert øke fremover. Uansett om man går ut i feltet og loggfører tilstanden, eller om man monterer sensorer til overvåkning og tilstandskontroll av systemkomponenter, bør man vite hva man skal gjøre med den enorme informasjonen. Problemet ligger nemlig ikke i selve installeringen, men hvordan man skal håndtere den massive datainnstrømmingen for så å finne en vedlikeholdsstrategi. Det er derfor behov for et robust analyseverktøy som kan håndtere og omforme den overveldende informasjonen til noe som gir mening for så å utvikle vedlikeholdsaktiviteter. Selve dataanalysen er ikke en lett oppgave i seg selv med tanke på den enorme datamengden, og at man må forholde seg til tusenvis av sensorer og ulike formater. [18]

EPRI mener at det er fullt mulig å innhente brukbar informasjon fra sensordata og utvikle visualiseringsverktøy fra denne informasjonen (se Figur 3.1). Dette kan oppnås ved å utvikle algoritmer som tar tilstanden til komponenten, rangering og hendelse i betraktning. Algoritmer integrerer forskjellige sensorteknologier med ulik data inn i et felles system. Dette vil være en betydelig utfordring ifølge EPRI.



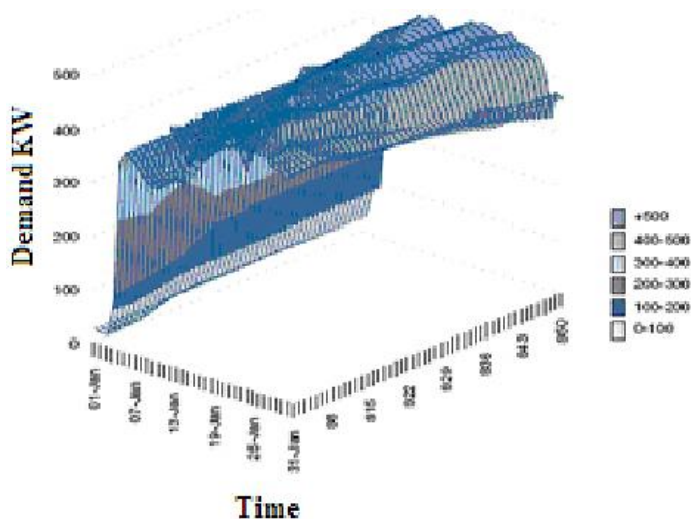
Figur 3.1: Her ser vi EPRIs forslag på hvordan man kan integrere sensordata ved hjelp av algoritmer for å foreta beslutningsstøtte på en best mulig måte i forvaltningen av komponentene i kraftsystemet. [23]

EPRI er i utviklingsfasen når det gjelder konseptet av virtuelt kontrollrom for tilstandskontroll. Prosjektet går ut på å presentere kravene for datasamling, lagring, analyse og visualisering, og kan benyttes av forskjellige brukere. EPRI har også et annet prosjekt pågående innen beslutningsstøtteteknologi. For å håndtere store, komplekse og varierende datamengder med støtte fra automatisk generering, vil EPRI med fokus på nødvendigheten for beslutningsstøtte svare med en interaktiv plattform for menneskelig system (HSI). HSI består av analyse-, visualiserings- og simuleringsverktøy og vil fremme beslutningsstøtte, og unngå tap av situasjonsbevissthet og andre nye typer av feil assosiert med økt automatikk i datagenerering. EPRI mener også at man ved hjelp av ulike sensorteknologier kan innhente systemkomponentens helseinformasjon, og at man i kombinasjon med data fra andre informasjonskilder kan fasilitere en beslutningsstøtte. Dersom en komponent er i en dårlig eller alvorlig tilstand og det viser seg at en storm er på vei (tilleggsinformasjon), kan operatøren vurdere å utkoble komponenten helt eller begrense lasten for å opprettholde god pålitelighet. Alt i alt ønsker operatører og vedlikeholdspersonell at all relevant data vises på en felles plattform, dvs. informasjon om nåværende tilstand av systemkomponenter, drastiske endringer i tilstanden og tilstandsendringer forventet i løpet av noen dager. Dette kan gjerne bestå av fullautomatiserte rapporter om forhåndsanalysert tilstandsinformasjon og detaljert diagnostikkdata for videre analyse. [2, 23, 24]



Figur 3.2: Her vises hvordan den omtalte prosessen utføres der dataen samles i to omganger først til analyse og så til sammenlikning. AMM benyttes for registrering av forbruk eksternt og fremmer bedre kundeforvaltning. SCADA overvåker kraftflyten i systemet og fokuserer hovedsakelig på elektriske parametre som strøm og spenning. CRM er forbrukerdata og fokuserer også på kundeforvaltning. Figuren er hentet fra [19].

En annen rapport beskriver metoder for hvordan beslutningsstøtte kan foretas i energiforvaltningen. Figur 3.2 viser prosessen av en metode beskrevet i denne rapporten. Det første steget går ut på å kombinere sanntidsdata enten fra forskjellige kilder som selve driften (PMU osv.), kunderelatert data (AMS etc.) og andre ulike databaser inn i OLTP (transaksjonsprosess under drift). Deretter blir sanntidsinformasjonen overført videre til analytisk prosessering (OLAP) for å sammenlikne med eldre data, prognose data for eksempel informasjon om ulike værforhold som komponenten kan bli utsatt for og andre typer data som ikke er i sanntid. Ved hjelp av denne metoden kan rapporter og ulike visualiseringstyper genereres hvert minutt fra ulike datakilder. Figur 3.3 viser et eksempel på hva som kan genereres ved hjelp av et bredt informasjonsspekter. For mer informasjon se [19].



Figur 3.3: Her ser vi et tredimensjonalt plott hvor aksene representerer dato, halv- og heltime, og kW. Dette er en mulighet som kan utvinnes fra dette konseptet. Grafen er hentet fra [19].

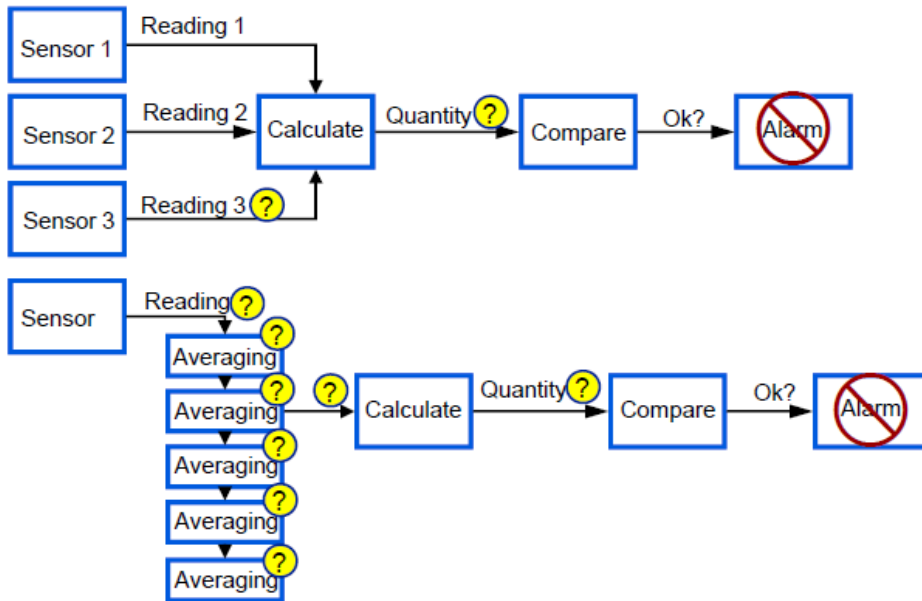
Under normal drift vil sensorene gi ut repeterende data der verdiene vil være noenlunde like. Vi kan ha verdier bortover som er forholdsvis like til man får en økning. Om man skal sette inn en varsellampe et eller annet sted på stigningen er ett spørsmål (se Figur 3.4). Eller dersom det foreligger en temperaturmåling 1 på 27 °C som etter hvert vil gradvis øke til 40 °C pga. komponentsvikt, hvordan skal vi da oppdage temperaturøkningen? Skal vi sammenlikne måling for måling produsert av én type sensor (se nedre del av Figur 3.5)? Eller skal vi behandle for eksempel 10 sensorer i en bås og sammenlikne dem med hverandre (se øvre del av Figur 3.5)? Vi har utallige muligheter, men hvordan databehandling og analyse skal foretas effektivt og sikkert er nettopp det store spørsmålet. Det er også viktig å finne ut av hvilken



Figur 3.4: Denne figuren illustrere én av mange analysemetoder man kan foreta ved bruk av sensorteknologier. En idéblomstring fra [1].

informasjon beslutningsstøtten skal basere seg på. Den enorme utfordringen kraftsektoren står overfor blir nettopp det å transformere data til analyse for så å foreta en beslutningsstøtte.

[1]



Figur 3.5: Her ser vi hvordan man kan gå løs på dataanalysen foretatt av flere sensorer. Skal man gå for flere sensorer som en enhet og sammenlikne målinger foretatt av enhver sensor eller skal man sammenlikne måling for måling? Utfordringen blir i å nettopp finne hvilke av dem som er effektivt. Figuren er hentet fra [25].

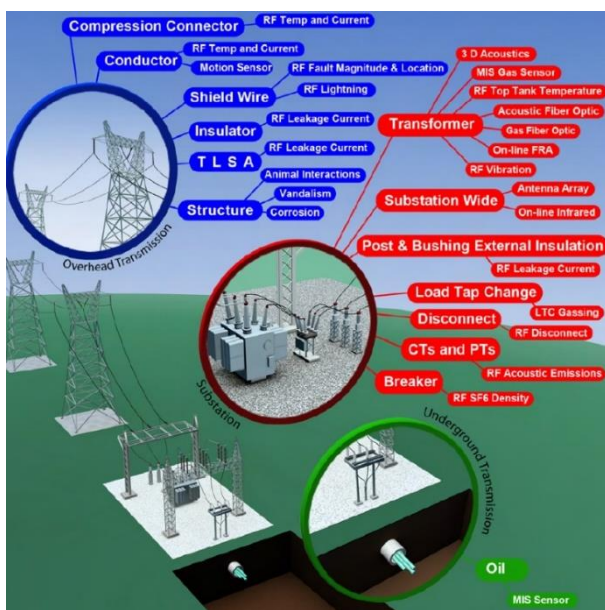
Sanntidsanalyse av systemdrift har behov for analyseverktøy som kan prosessere massive datamengder og automatisk avgjøre hva som skal til for å avverge ulykker og viderespredning av påfølgende effekt. For at dette skal oppnås bør analysen skje innen en brøkdel av et sekund og analyseresultatet må presenteres visuelt i et kontrollrom for rask respons av en forverret situasjon. Dessverre er ikke disse algoritmene ferdigutviklet for å utføre disse funksjonene, men de kan forhåpentligvis distribueres innen 2020 og bli forbedret i tidsrammen 2020-2035 og utover. [26]

TSO har økt behov for å foreta beslutningsstøtte raskt og effektivt spesielt i ekstreme situasjoner. Systemoperatører har mange systemkomponenter og mye nett å forholde seg til og det resulterer jo i enorme datamengder. Da er også nødvendigheten for gode data- og analysemetoder meget stor. Ellers blir håndteringen av den enorme informasjonen overveldende og ineffektiv. Effektiv behandling av informasjon fra mange kilder i systemet sammenklemt i én felles plattform skaper en betydelig utfordring. Problemet ligger nemlig i at mange forsker på ulike typer sensorer, datainnsamlingsverktøy og analyser hver for seg, men ingen kobler alle disse elementene sammen for å danne verktøy som kan foreta beslutninger og risikoovervåking i sanntid. I figuren er denne mangelen på verktøy illustrert ved at de har rødt kryss. Figuren viser generelt den ønskelige integreringen av alle ressursene sammen til et

helt system for at man skal ha god nok informasjonsbakgrunn for å foreta god beslutningsstøtte (se Figur 1.1). [1]

Beslutningsstøtteteknologi kan identifisere eksisterende, nye og forutsagte problemer og gi analyse for å støtte eventuelle løsninger. Ved å analysere konsekvensene av enhver hendelse og sannsynligheten for at den inntreffer igjen, kan beslutningsstøttesystemer angi relativ risiko og alvorlighetsgrad. Disse relative risikoene kan integreres i en sammensatt risikofaktor og presenteres for operatøren for å bistå i beslutningsprosessen. Det blir nødvendig for videre arbeid av beslutningsstøttealgoritmer som blir tilgjengelig for distribusjon før inngangen av 2020 med forbedringer i tidsrammen 2020-2035 og utover. [26]State of the Art

4.1 Sensorer



Figur 3.6: Illustrerer EPRIs sensorer i ulike områder i kraftsystemet. Bildet er hentet fra [2].

Implementering av sensorer på ulike områder i kraftsystemet åpner muligheten for kontinuerlig overvåking og tilstandskontroll. Det å vite om systemkomponent er i risikosonen for feil gjør det mulig for mannskap å håndtere situasjonen før feilen inntreffer. En feil på for eksempel en strømtransformator kan resultere i eksplosjon og brann. Beredningsmannskapet blir utsatt for unødvendig fare og gjeninnkjøp av en ny transformator er meget kostbart. Derfor kan

konsekvensene av en komponentfeil være meget alvorlig. For å avverge en slik katastrofe kan man ved bruk av sensorer overvåke transformatorens utladningsnivåer og iverksette vedlikehold dersom avviket mellom målingene blir for stort. [2]

Figur 3.6 viser en illustrasjon over de ulike områdene (transmisjonslinjer, transformatorstasjon og undergrunns kabler) i kraftsystemet med tilhørende sensorer for

enhver komponent. EPRI har utviklet en rekke sensorer for ulike områder, men mange av dem er fremdeles i utviklingsfasen (se Figur 3.6). [2]

Tabell 3.1: Oversikt over EPRIs sensorer. Tabellen er hentet fra [2].

Område	Systemkomponent	Sensor	Beskrivelse	FoU	Demo
Transformator-stasjon	Transformator-stasjon (for hele stasjonen)	Antenna Array	Identifisering og lokalisering av komponenter med utladninger	✓	✓
		On-line Infrared	Automatisk videoprosessering av termiske bilder avbildet av komponenter	✓	✓
	Transformator	3D Acoustics	Lokalisering og analysing av utladningsaktiviteter		✓
		Acoustic Fiber Optic	Identifisering av lave utladningsnivåer i høyrisikoområder	✓	
		Gas Fiber Optic	Identifisering av gass-dannelser i høyrisikoområder	✓	
		MIS Gas Sensor	Måler H ₂ og C ₂ H ₂ i olje.	✓	
		On-line FRA	Kontinuerlig overvåkning av frekvensrespons		✓
	LTC	LTC Gassing	Identifiserer: Overoppheting Koksdannelser Utslitte kontakter	✓	✓
	Post and Bushing External Insulation	RF Leakage Current	Måler lekkstrømmen	✓	✓
	Skillebryter	RF Disconnect	Identifiserer kontakter i faresonen	✓	✓
	CTs and PTs	RF Acoustic Emissions	Identifiserer interne utslipp	✓	✓
Effektbryter	RF SF ₆ Density	Måler SF ₆ -tettheten	✓		
Transmisjons-linjers	Kompresjons-konnektorer	RF Temp and Current	Måler både strømmen og temperaturen til konnektoren.	✓	✓
	Leder	RF Temp and Current	Måler temperaturen til lederen	✓	✓
	Isolator	RF Leakage Current	Måler lekkstrømmen		
	TLSA	RF Leakage Current	Vurderer tilstanden og antall inntrufne tilfeller	✓	
	Shield Wire	RF Fault Magnitude and Location	Bestemmer plassering og størrelsen på feilstrømmen	✓	
		RF Lightning	Forklarer fordelingen av størrelsen på lynstrømmene	✓	
Structure	Sensor System	Kombinerer bilde-gjenkjenning og RF for å undersøke luftlinjeproblemer	✓	✓	
Undergrunns-kabler	Oil	MIS Sensor	Måler H ₂ og C ₂ H ₂ gasser i olje.	✓	
	Underground Cable System	Various	Utvikling av visjons-dokument ¹ hvor man identifiserer potensielle anvendelser og danner grunnlaget for forskning	✓	

¹ En rapport som beskriver hvordan man realiserer en ide fra bedriftens perspektiv.

Vedlikehold av høyspenningskomponenter, nemlig elektriske maskiner og kabler er avgjørende for påliteligheten i strømforsyningen. Derfor bør strømtransformatorer og andre høyspenningskomponenter være i god stand for å opprettholde leveringspålitelighet og leveringskvalitet. Som vi ser fra Tabell 3.1 har EPRI utviklet to sensorer for overvåkning og kontroll av hele transformatorstasjonen. Disse kalles for Antenna Array og On-line Infrared. [2]

Antenna Array: Takket være et internasjonalt og vellykket samarbeidsprosjekt har enda en ny sensorteknologi blitt utviklet og demonstrert [27]. Prosjektet gikk ut på å konstruere et varslingsystem for å oppdage og lokalisere PD (partielle utladningssignaler) gjennom hele transformatorstasjonen ved bruk av radiofrekvens og en rekke med antenner [27]. PD gir ikke bare en indikasjon på isolasjonssvikt, men er i grunnen hovedårsaken til videre isolasjonssvikt [28]. Derfor er deteksjon av PD den mest effektive metoden for å undersøke tilstanden til høyspenningskomponenter.



Figur 3.7: Et eksempel på en transformatorstasjon. Bildet er hentet fra [2].

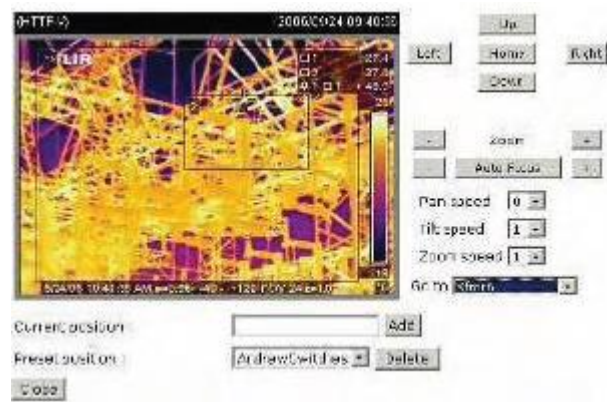
Over tid blir isolasjonen i høyspenningskomponenter påvirket av en kombinasjon av elektriske, termiske og miljømessige påkjenninger. Disse aldringsfaktorene fører til PD. PD er en lav-energi ioniseringsprosess og skjer på innsiden eller på overflaten av en isolator. Den samlede utladningen blir frigjort under visse miljø- og spenningsforhold og angriper dermed isolasjonen både kjemisk og fysisk. Som følge av dette igangsettes nedbrytningen av isolatoren og medvirker til isolasjonsproblemer i elektriske komponenter. [2, 27, 28]

Under normal drift er PD aktiviteten sjeldent konstant. Av den grunn blir denne formen for utladningsaktivitet meget vanskelig å oppdage ved rutinemessige kontroll. Derfor blir kontinuerlig tilstandsovervåkning og kontroll den mest praktiske løsningen. For at denne løsningen skal være mest optimal som mulig bør den i tillegg være økonomisk gunstig. Derfor bør kostnadene for PD overvåkning og kontroll være betydelig lavere enn driftsstands- og gjeninvesteringskostnader av mislykkede systemkomponenter. Vanligvis blir jo flertallet av kontinuerlig overvåkningsordninger designet for individuelle systemkomponenter. For mer

kostnadseffektiv løsning på problemet bør man utvikle et system som er i stand til å overvåke en hel transformatorstasjon istedenfor enkeltkomponenter som i dette tilfellet. [27, 28]

Online Infrared:

Dette prosjektet ble initiert i 2011 for å utvikle algoritmer innen overvåkning av et bredt utvalg av systemkomponenter. Dette gjøres ved bruk av et automatisert infrarødt termografisk kamera installert på transformatorstasjonen [2]. Målet var å utforske og utvikle algoritmer som kan korrigere den absolutte termiske målingsnøyaktigheten og tilhørende datamålinger i den grad det er mulig [29].



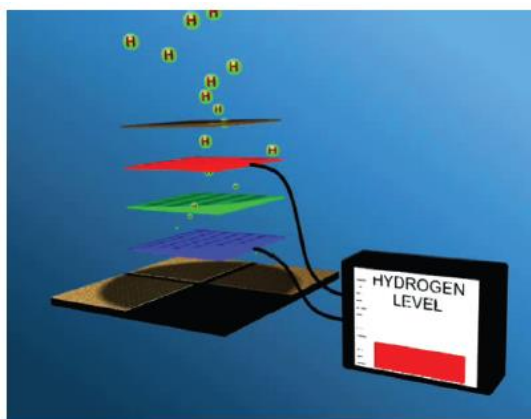
Figur 3.8: Figuren viser et glimt av hvordan det infrarøde termografiske kameraet benyttes innen visualiseringen av systemkomponentenes temperaturutvikling [2].

Transformator - MIS Gass i olje

For å overvåke tilstanden til transformatoren har det nå blitt vanlig å undersøke om gasser som hydrogen (H_2) og acetylen (C_2H_2) er oppløst i isolasjonsoljen. Faktorer som dette vil utløse problemer for transformatoren over tid og bidrar til nedgradering av isolasjonen. [2]

Transformatoren er bunn i grunn en jernkjerne bestående av laminerte elektroplater. Denne jernkjernen har kobberviklinger tvunnet rundt seg som en sylindrisk spole for å redusere energitap. For at kobberviklingene ikke skal være i kontakt med hverandre og resultere i kortslutning, blir dem isolert med cellulose (et isolasjonsmateriale som er meget vanlig å benytte). Jernkjernen med viklingene blir nedsenket i en stålbeholder kalt for transformatorboks oppfylt med transformatorolje (se Figur 3.9). Oljens hovedoppgave er nedkjøling i tillegg til å isolere viklingene fra kjernen. [30]

Off-line teknikker innen oppløst-gassanalyse (DGA) går ut på å ta prøver av isolasjonsoljen for evaluering av tilstanden. Rutinemessige kontroll og planlegging av faste tidspunkter for avkobling av transformatorstasjonen i henhold til gjennomføringen av denne prosedyren må dermed tas i betraktning. Denne prosedyren blir derfor mer innviklet og dermed ineffektiv. De innovative metallisolator-halvledersensorene (MIS) derimot tar i bruk en katalytiskdrevet metalloverflate. Denne spalter målrettede gassmolekyler til ladede ioner for å endre



Figur 3.9: Små sensorer kombinert med metallisolator-halvlederlag er i stand til selektiv og presis gjenkjenning av hydrogen gass oppløst i den dielektriske oljen. Bildet er hentet fra [31]

elektronstrømmingen over halvlederovergangen i en mengde som er korrelert med gasskonsentrasjonen. De tillater derfor selektiv og sensitiv deteksjon i tillegg sanntidsovervåkning av H_2 og C_2H_2 oppløst i transformatoroljen.

Oppløsning av H_2 og C_2H_2 i isolasjonsoljen gir en indikasjon på PD og fremskynder utviklingen av lysbue. Konsekvensen av en lysbue kan være

meget alvorlig og føre til det verste utfallet, nemlig en eksplosjon. For at en slik hendelse skal inntreffe kommer det fullt an på tilstanden til

cellulosen. Som sagt isolerer cellulosen viklingene rundt jernkjernen. Over tid vil cellulosen nedgradere pga. hyppige oksidasjonsprosesser forårsaket av faktorer som vann, oksygen og høye temperaturer. Transformatoroljen har derfor en annen viktig funksjon, nemlig å holde vannet oppløst for så å trekke det ut av cellen. [30, 31]

Dersom isolasjonen svikter vil det føre til kortslutning. En kortslutning vil føre til at strømmen i kretsen øker og i verste fall bidra til en temperaturøkning. En temperaturstigning gir to utfall. For det første skjer nedgraderingsprosessen av isolasjonen enda raskere. Da blir også størrelsen på kortslutningen enda større og sjansen for å fa overslag i transformatoren i tillegg til lysbuer blir dermed mye større. For det andre spaltes isolasjonsoljen til små molekyler sammensatt av umettede og mettede hydrokarboner, hydrogen og karbon. Hvilke gasser som produseres avhenger av hvilken type transformatorolje som brukes, størrelsen på kortslutningen, trykket i transformatorcellen og temperaturen. De mest vanligste gassene er metan, hydrogen, etan, acetylen, propylen og etylen. Hydrogen og acetylen er nettopp de gassene MIS sensorene registrerer. Jo mer gass som utvikles desto mer overtrykk blir det i transformatorcellen. Da øker sjansen for at cellen sprekker. Dersom cellen sprekker vil den gassrike oljen strømme inn i cellen med høyt trykk. [30, 31]

Inne i cellen er det rikelig med oksygen og kombinert med olje- og gasstrømmingen vil dette skape en eksplosiv atmosfære. Inne i cellen derimot, vil ikke olje- og gassblandingen ha tilgang på oksygen og av den grunn ikke utløse en eksplosjon. Men i det blandingen får kontakt med oksygenet vil det mest sannsynlig oppstå en oljesky og resultere i gass-, støv- og tåkeeksplosjoner. Dette kalles for en primæreksplasjon. En sekundæreksplasjon er den mest

alvorlige fasen. Denne forekommer av at blandingen sammen med luft blir antent av en tennkilde. En lysbue er et godt eksempel på en tennkilde. Eksplosjon av hydrokarboner kan maksimalt gi et overtrykk på 20 bar. Det skal lite til for at situasjonen blir dødelig for mennesker. Et menneske kan dø eller skade seg alvorlig ved 0,25 og 1,2 bar. Av den grunn er tilstandskontroll og overvåkning meget viktig for å opprettholde en trygg arbeidsatmosfære for personell i tillegg til å unngå store tap av ressurser og utstyr. [30]

Transformator - Akustisk emisjonsteknikk i 3D

Denne sensoren (se Figur 3.10) muliggjør deteksjon og lokalisering av gasskilder i krafttransformatorer og lastkoblinger. Deteksjon av akustiske utladninger (AE) fra PD forbundet med transformatorer er en kjent prosedyre og man har tilgjengelige verktøy i akkurat dette. Allikevel har man oppdaget AE selv når PD ikke er tilgjengelig. Det viser seg at AE blir produsert når det utvikles gassbobler og muligens av den turbulente bevegelsen når oljen blir oppvarmet.



Figur 3.10: Her ser vi en sensor som kan detektere AE. Bildet er hentet fra [2].

Analyse av slike forekomster fra et antall transformatorer med gassutslipp kan resultere i ny diagnosteknikk for deteksjon, lokalisering og karakterisering av gassteder som vi kan se i dette tilfellet. Potensialet for å benytte AE i tilstandskontroll av transformatorer er derfor enormt. Det som er spesielt med denne sensoren er at den lokaliserer AE i en 3D-modell. [32]

Transformator - Acoustic Fiber Optic

Denne sensoren som vi ser på Figur 3.11 måler indre PD ved bruk av fiberoptikk installert på høyrisikoområder. PD generer bølger i samme bølgelengde som ultralyd og overføres gjennom transformatoren via isolasjonsoljen.



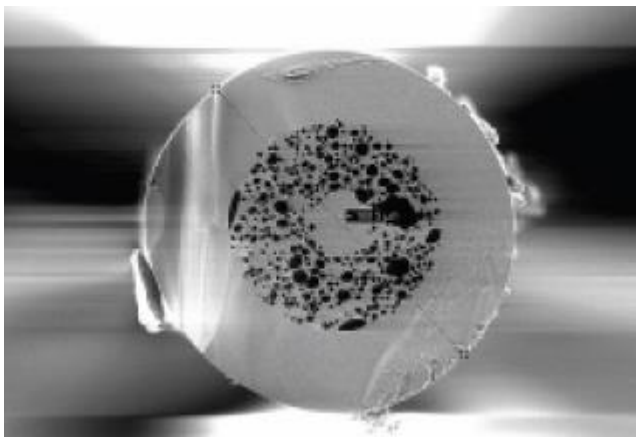
Figur 3.11: Slik ser en AFO-sensor ut. Bildet er hentet fra [2]

Vanligvis blir PD oppdaget av piezoelektriske akustiske sensorer. Disse sensorene blir vanligvis montert på transformatorens yttervegg. Problemet ligger i at intensiteten av de akustiske bølgene svekkes betydelig pga. bølgerrefleksjonen gjennom transformatorveggen. For det andre bør en ekstern sensor ha høyere sensitivitet for å oppdage

en svak PD. Pga. disse problemområdene ønsker man å finne en bedre metode. Det er nettopp her AFO-sensoren kommer inn. En stor fordel AFO-sensoren har er at den ikke blir påvirket av elektromagnetisk interferens (EMI) som er svært vanlig i temperatur- og PD deteksjon. Fiberoptiske sensorer er vanligvis laget av dielektriske materialer som kvartsglass og safir som gjør sensorene immune mot EMI. En annen fordel er at sensoren er kompakt i størrelsen, har lite vekt og høy sensitivitet. Av den grunn kan de plasseres inne i transformatoren uten å påvirke både sensorens og transformatorens ytelse. [33]

Transformator - Gas Fiber Optic

Sensoren vist på Figur 3.12 måler ulike gasser som er tilstede på enden av en fiberoptisk kabel. Ved å plassere kabelenden i nærheten av store stressområder kan problemer identifiseres tidlig i nedbrytningsprosessen. [2]



Figur 3.12: Her ser vi enden av en fiberoptisk kabel. Bildet er hentet fra [2].

Transformator - Analyse i frekvensrespons

Transformatorviklinger er vanligvis mekanisk festet for å hindre bevegelse. Men klemmene som holder viklingene på plass kan svikte over tid. De kan bli utsatt for økt stress av ulike årsaker som økt antall feil, skade påført av transport og nedgradering av isolasjon pga. aldring. Dersom klemmene svikter kan viklingene bevege seg når de blir utsatt for krefter. Dette oppstår vanligvis pga. eksterne kortslutningsfeil. Hvis dette inntreffer vil transformatoren tilslutt svikte og det ønsker vi ikke. FRA-testing utført i perioder hvor transformatoren ikke er i drift viser seg å være en svært anerkjent metode for effektiv identifisering av delvis skadede eller løse transformatorviklinger. Metoden går ut på å undersøke en frekvensavhengig parameter som for eksempel størrelse og fase av impedans, og

sammenlikne den med tidligere verdier. Testen utføres ved å påføre flere lavspenningspulser til én av viklingene og måle signalresponsen. Dessverre krever jo testen at transformatoren utkobles for drift og det påvirker jo påliteligheten i negativ retning. Derfor ble utviklingen av On-line FRA Analysis igangsatt blant annet for å gi varsel på løse eller skadede transformatorviklinger og begrense antall transformatorfeil betydelig. [34]

LTC - Overvåkning av gassforholdet i lasttilkoblinger

LTC er en viktig delkomponent av en transformator fordi den regulerer spenningen uten å påvirke laststrømmen. Det viser seg at 30 prosent av transformatorbrudd skyldes svikt i LTC [35]. Derfor er det svært viktig at den yter på sitt ytterste og dette kan gjøres ved hjelp av sensoren avbildet på Figur 3.13 ved å måle gasskonsentrasjonen. Hovedoppgaven til denne sensoren går ut på å måle gassforholdet. Da har man ikke behov for å måle enhver gass individuelt som forenkler mye av prosessen. [2]



Figur 3.13: Her ser vi sensorer som måler gassforholdet i lastkoblinger. Bildet er hentet fra [2].



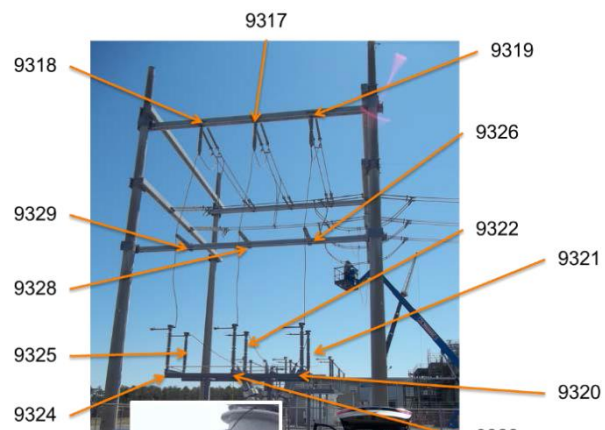
Figur 3.14: Her ser vi den monterte sensoren. Bildet er hentet fra [2]

Måling av radiofrekvent lekkstrøm

Denne sensoren som vi ser fra Figur 3.14 måler lekkstrømmen og gir en indikasjon på når det er behov for rengjøring (skylning) av isolasjonen. Den gir også en pekepinn på når det er mest sannsynlig for overslag. [2]

Skillebryter - Radiofrekvent temperatur sensor:

Denne sensoren måler temperaturen på skillebryteren for at den ikke skal havne på risikozonen for feil. Figur 3.15 viser at enhver skillebryter har behov for en sensor. [2]



Figur 3.15: Pilene viser hvor sensorene har blitt monteret. Den hvite boksen viser hvordan sensoren ser ut etter monteringen og det er slik alle sensorene monteres. Bilder er hentet fra [3].

Radiofrekvente AE

Denne sensoren måler akustiske utladninger pga. tilstedeværende PD aktivitet og overfører resultatet via trådløs tilkobling. [2]

Radiofrekvent tetthet av SF₆

Denne sensoren måler tettheten av SF₆ og transmitterer resultatet trådløst. [2]

Undergrunnskabler - MIS sensor til oljefylt undergrunnskabler

Denne sensoren måler hydrogen og acetylen oppløst i kabeloljen som igjen indikerer at det er behov for vedlikehold. [2]

Transmisjonslinjer -

Kompresjonskonnektorer

Sensoren fra Figur 3.16 registrerer kompresjonen utsatt på transmisjonslinjene, konnektortemperaturen og strømstørrelsen. Det som er så spesielt med denne sensoren er at den utvikler et histogram for å gi en indikasjon på når komponenten havner i sluttfasen eller om den er i risikozonen. [2]



Figur 3.16: Den rosa og den blå biten illustrerer selve sensoren montert på kompresjonskonnektoren. Figuren er hentet fra [2].

Transmisjonslinjer - Radiofrekvent temperatur- og strømsensor

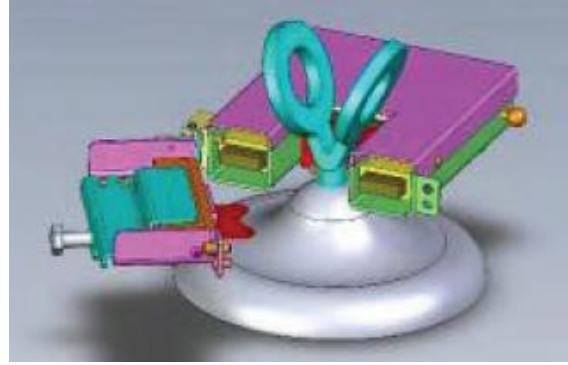


Figur 3.17: Her ser vi hvordan sensoren er omsluttet lederen for å foreta målinger. Figuren er hentet fra [2].

Denne sensoren som vi ser på Figur 3.17 måler temperaturen og strømmen i transmisjonslinjene og transmitterer informasjonen trådløst til applikasjoner for vurdering. Dette er spesielt nødvendig for at kabelen skal yte sitt ytterste uten å overskride kapasiteten. [2]

Transmisjonslinjer - Radiofrekvent lekkstrømssensor

Denne sensoren (se Figur 3.18) registrerer lekkstrømsverdier for å gi en indikasjon på når det er behov for vask av isolatoren eller når det foreligger høy risiko for overslag. Måling av lekkasjestrøm gir indikasjon på isolasjonens effektivitet på lederne. I kretser hvor det er lav isolasjonsmotstand eller hvor filterteknologi benyttes i elektronisk utstyr kan det foreligge høye nivåer av lekkasjestrøm. Lekkasjestrøm kan forstyrre den normale driften og det er derfor essensielt med sensorer som måler dette. [2]



Figur 3.18: Her ser vi hvordan sensoren monteres på isolatoren. Figuren er hentet fra [2].

Transmisjonslinjer - Radiofrekvent strøm og lokalisasjonssensor

Disse sensorene informerer om isolasjonssvikt ved å gi data for tidspunkt og størrelse på feilstrøm i isolasjonskabel. Fordelen er at de gir en mer nøyaktig lokalisering av feil på transmisjonslinjer. [2]

Transmisjonslinjer - Radiofrekvent sensor for TLSA

Denne sensoren gir data på lynavlederens funksjon. Lynet kan spesielt volde skade på elektriske anlegg pga. deres store utstrekning i form av luftledningsnett. Lynet framkaller spenningsbølger på kabelnettet og det er lynavlederen som må avlede bølgene. Når spenningsbølgen utlades blir strømstyrken dirigert mot jorden og det er essensielt at denne brytes før driften blir forstyrret. Overspenningsavledere oppfyller kravene, og disse har funksjon som isolator så fremt spenningen ikke går over et visst nivå, og som leder ved overspenning. Da ledes overspenningsstrømmen til jord. Deretter slukner avlederen og gjenopptar isolatorfunksjonen. [2, 36]

Transmisjonslinjer – Radiofrekvent lyncsensor

Disse sensorene registrerer topp- og tidspunktet til lynbølger som flyter gjennom isolasjonskabler. Disse dataene analyseres for å forstå fordelingen av lynstrøm på transmisjonslinjer. [2]

Transmisjonslinjer - Deteksjon av Coronautslipp

Som nevnt i innledningen kan man detektere Coronautslipp som mål på feil ved transmisjonslinjer ved hjelp av UV kamera. Dette er brukbart i flere sammenhenger spesielt ved deteksjon av feil på transmisjonslinjer. Bruken av IR vanskeliggjør Coronautslipp-deteksjon grunnet økt forstyrrelse fra andre kilder. UV-deteksjonen kan på den andre siden gi bilder med en mer presis lokalisering av Coronautslippet. [4]

Transmisjonslinjer - Automatisk bildeanalyse av isolatorkjeder på transmisjonslinjer



Figur 3.19: Her har man foretatt synlighetstesten på tre ulike glassisolatorer med forskjellige fargetrekk; grønn-oliven, grå og standard. Bildet er hentet fra [37].

Denne sensoren henter ut informasjon fra isolatorkjedene (som vist på Figur 3.19) utplassert på transmisjonslinjer ved bruk av videoovervåkning og automatiserte bilde/video analyseteknikker. Det som er særskilt med denne sensoren er at den utfører tre oppgaver. Den første oppgaven går ut på å lokalisere snø og is på isolatorene. Den andre skal beregne vinkelen på svingningene utført av isolatorene grunnet vind og ekstremvær. Til slutt skal den angi synligheten av isolatoren med typiske bakgrunner

(vegetasjon, himmel osv.) siden det blotte øyet foretrekker mindre synlige isolatorer. Dette er svært nyttig for å oppdage isolasjonssvikt og kan forebygge fremtidige feil på linjen. [37]

Monitorering ved hjelp av robotikk

Ved monitorering av kraftsystemer med bruk av robot kan man detektere faktorer som forårsaker feil i undergrunnskabler før feilen inntreffer og monitorere dem med roboten. Dette effektiviserer overvåkningsarbeidet og blir hovedsakelig brukt for undergrunnskabler. Det er blitt utviklet en robotplattform som monitorerer nettverkets struktur av undergrunnskabler. Denne typen robot vist på Figur 3.20 blir kalt “CRUISER” (CR - crawling, U - underground, I - Inspection, S - search, E - exploration, R - robot), og består av en rekke sensorer som videokamerasensor, infrarød sensor, akustisk sensor og sensor for elektrisk felt. [38]



Figur 3.20: Her ser vi hvordan roboten ser ut til anvendelsen av monitorering [39].

Videokamerasensor muliggjør fjerninspeksjon av miljøet og kabler. Infrarøde sensorer detekterer overfløydige varmeoppsamlinger forårsaket av PD og hjelper med å detektere varmesoner i kabelen. Prinsippet er her at sensoren måler temperaturen til objekter ut ifra mengden infrarød energi de avgir grunnet dens proporsjonalitet til temperaturen. Akustisk sensor derimot detekterer lydbølger fra PD og hjelper med å lokalisere PD. Prinsippet er her at PD fungerer som en liten eksplosjon som gir opphav til et trykk som brer seg utover. Den siste sensoren, sensoren for elektrisk felt, måler den dielektriske egenskapen til kabelen som indikerer mengden opptak av vann. [39]

Fordelen med bruk av robot i monitorering er effektiv vedlikehold og overvåkning av kraftsystemer for å forsikre pålitelighet og høy kvalitet ved forsyning av kraft til forbrukere. I tillegg er dette en måte å erstatte et krevende manuelt arbeid med høyt spesialiserte oppgaver som vedlikehold av høy-spennings transmisjonslinjer i sanntid. Det beskytter også arbeidere mot operasjoner i farlige miljøer, som radioaktive områder i kjernekraftverk og tilgang til smale områder som kjølerør. I tillegg får man en presis lokalisering av målingsutstyr. For å oppsummere kan mobil monitorering med robot forhindre kabelfeil effektivt. Dette multi-sensor-systemets hovedhensikt er å monitorere aldringsstatusen, vannopptaket og begynnende feil i isolasjon. [39]

4.2 Overføringsteknologier

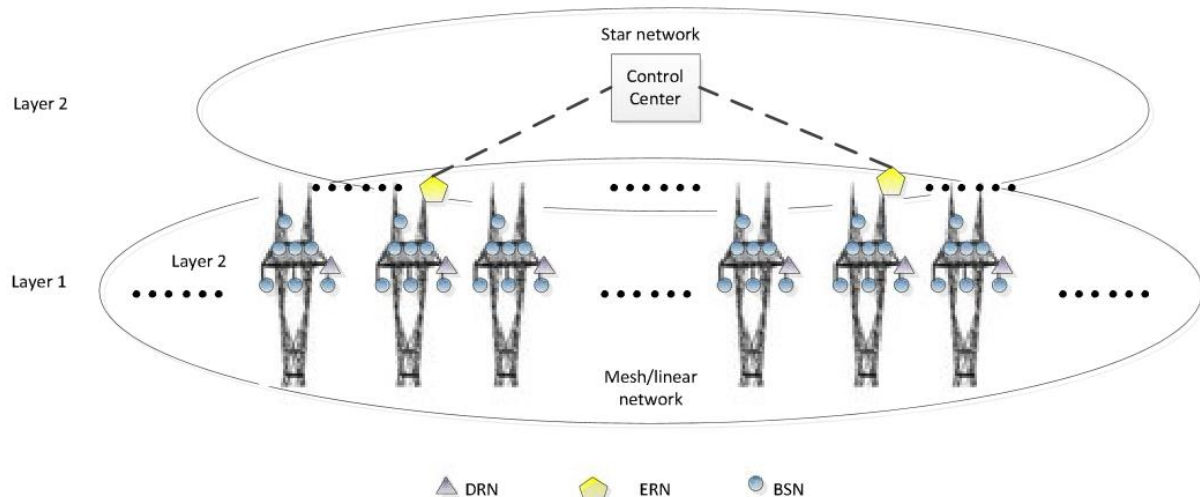
Monitorering av transmisjonsnett under drift er et meget kraftig beskyttelses- og diagnoseverktøy. Det er en rekke faktorer som kan true sikkerheten til denne infrastrukturen som ekstreme værhold, omgivelsene, overoppheting og ødeleggelse. Vi kan detektere og respondere til trusler før de påvirker driften basert på monitoreringen. I tillegg kan vi finne lokalisasjonen til feilen og reparere denne som et ledd i vedlikehold. Slik monitorering under drift er også et nyttig verktøy for å få et maksimalt utbytte av transmisjonslinjen. [40, 41]

Siden kraftsystemet er mer utstrakt og spredt over store områder går nettstrukturen som regel over kompliserte terrengområder. Dette vanskeliggjør vedlikeholdsarbeidet på det sterkeste fordi mesteparten av vedlikeholdsarbeidet blir utført av vedlikeholdspersonell, helikoptre og roboter som nevnt i forrige avsnitt. Alle disse metodene er meget kostbart og arbeidskrevende. I tillegg kan man heller ikke monitorere kraftsystemet kontinuerlig og dekke monitorering på hele transmisjonsnettet på samme tid. Kabelløsninger i tilstandskontroll krever kostbare kabler og det er dermed ikke praktisk å monitorere alle systemkomponenter i store utbredelser. Dersom en maste- /bæremastes støttestruktur svikter eller hvis transmisjonslinjen brytes, vil det også medføre feil på kablet som resulterer i vansker med å finne feil på linjen. [41]

Trådløse sensornettverk er dermed en lovende teknologi for monitorering av transmisjonslinjer under drift grunnet dens lave kostnader, storskala dekning, egenskaper for toleranse av feil og enkel montering. Ved bruk av såkalt «digital cellular technology» som for eksempel GSM («Global System for Mobile Communication»), WIMAX («Worldwide Interoperability of Microwave Access») og CDMA («Code Division Multiple Access») kan vi utvikle et monitoreringssystem som driver med kontinuerlig overvåking. Slik cellulærteknologi anvendes til å assistere det trådløse sensornettverket i overføringen av data for å oppnå økt effektivitet i monitorering av transmisjonslinjer. Det trådløse sensornettverket har nemlig lav kapasitet for dataoverføring. Av den grunn er det vanskelig for nettverket å overføre data effektivt fra sensornoder som har høy volumkapasitet for data på egenhånd. Ved bruk av cellulærteknologien kan noder kommunisere med kontrollsentre direkte og trafikken i det trådløse sensornettverket reduseres, spesielt når sensorer med høy volumkapasitet for data blir plassert nær de cellulære modulene i teknologien. Av den grunn kan man ved bruk av

cellulær teknologi forbedre nettdriften ved å få en tillitsfull sanntidsdata. Lineære nett har som regel utstrekning i områder med komplekse terrengetilstander. Nodene er av den grunn utsatt for potensielle farer som kan medføre at deler av nettet frakobles kontrollsenteret.

Cellulærteknologien assisterer ikke bare med å effektivisere overføringen av data og sikring av nettdriften i sanntid, men isolerer også feil. Dette gjelder spesielt nodene plassert i midten av nettverket fordi de trenger få steg/punkter for å nå kontrollsenteret. [41]



Figur 3.21: Her ser vi hvordan trådløs sensornettverk er integrert med cellulær teknologi.

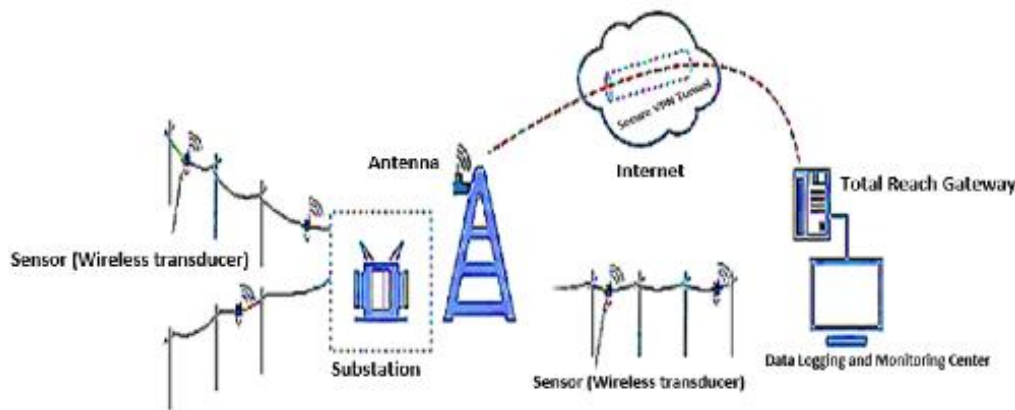
Trådløs sensornettverk integrert med cellulær teknologi består av to nivåer som vist på Figur 3.21 hvor man benytter tre typer sensornoder:

- Fundamental sensornode, BSN (Basic Sensor Node): De er den mest vanligste formen av noder i nettverket. Deres funksjon i nettverket går ut på å kommunisere med hverandre og registrere tilstanden til transmisjonslinjene. De er også utstyrt med et modem som har middels rekkevidde.
- Relénode for data, DRN (Data Relay Node): De er også blant de vanligste sensornodene bare at de ikke har registreringsfunksjon på tilstanden. De har kun en reléfunksjon (transmitterer data).
- Forbedret relénode, ERN (Enhanced Relay Node): Disse samler inn den registrerte dataen foretatt av BSNene og leverer dem til kontrollsenteret. Det som er spesielt med ERNer er at de ikke bare er utstyrt med et modem (middels rekkevidde), men også en cellulær modul. For at det skal være mulig for ERNer å kommunisere med BSN- og DRNer for å samle inn sensordata benytter ERNer en trådløs kommunikasjonsradio.

Deretter sender de sensordataen til kontrollsenderet via den trådløse kommunikasjonsradioen.

Det første nivået av nettverket består av BSN-, DSN- og ERNer og de kommuniserer med hverandre ved hjelp av et modem som har et rekkevidde på 400-800 meter. ERNer fungerer som synkronasjonsnoder (destinasjon) i nivå 1 og BSNer leverer sine egne data til ERNer fra punkt til punkt. Nivå 2 er sammensatt av ERNer og kontrollsenderet hvor sistnevnte er synkronasjonsnode for hele nettverket. Den bearbejder og analyserer all sensordata fra monitoreringssystemet. [41]

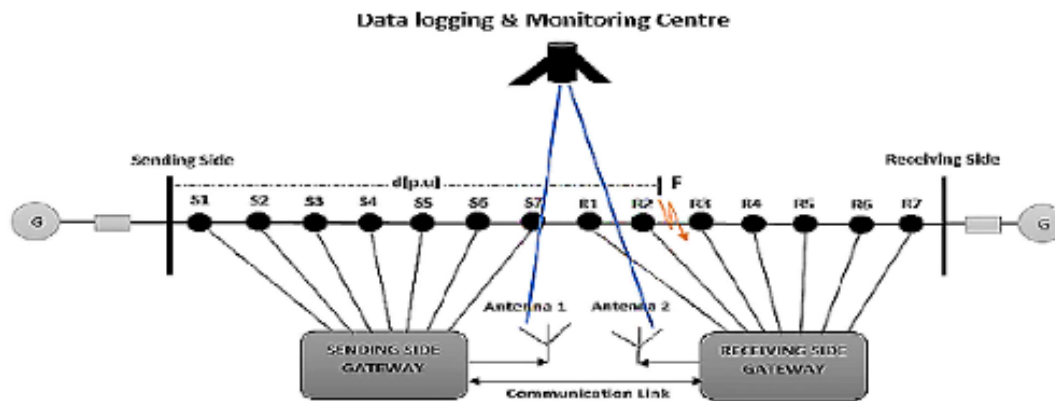
Man kan også integrere WiFi i et trådløst sensornettverk som vist på Figur 3.22. Konseptet går ut på å benytte flere trådløse sensorer over en utstrekning på 56 km lange transmisjonslinjer. Avstanden mellom enhver sensor skal ligge på 400 meter. Sensorene sender informasjon via hverandre og til gatewayene. En gateway er en node i nettverket som kobler sammen ulike greiner i nettverket. På feilstedet blir to gatewayer installert; én for å sende og én for å motta. Hver av dem innhenter informasjon fra halvparten av sensorene. Slik kan man få umiddelbar notifikasjon om en feil har inntruffet og beskjed om feilens posisjon. [42]



Figur 3.22: Her ser vi datainnsamling og overføring utføres av sensorer med trådløsfunksjon. Figuren er hentet fra [42].

Figur 3.23 viser at en feil inntreffer mellom sensor S3 og S4 for å gi et eksempel. Dette registreres av de omkringliggende sensorer og data blir sendt via en trådløstilkobling til sendings-gatewayen. Fra gatewayen kan den samlede informasjonen bli hentet for å få informasjon om eksakt lokalisasjon av feilen på transmisjonslinjer. Dersom en feil inntreffer ved sendingssiden, blir feilen registrert av sending-gatewayen. Det samme gjelder for mottak-gatewayen hvis feilen inntreffer der. Gatewayen oppfører seg nemlig som en

synkronasjonsnode som samler informasjon fra forskjellige sensorer ute i feltet. Dataen logges og blir oppført på en monitoreringsstasjon med et imponerende tidsavvik på 0,5 mikrosekunder. Siden frekvensen på nettet er 50 Hz ligger vi godt innenfor. [42]



Figur 3.23: Her ser vi oppsettet av et trådløst sensornettverk integrert med WiFi for identifisering av feillokalisasjon. Figuren er hentet fra [42]

4.3 Innsamling av data

Siden sensorene genererer rådata bør vi garantert benytte et effektivt transmisjonsverktøy beskrevet i delkapittel 4.2 for å sende dataen til et robust datahåndteringssystem i støtte for videre analyser. Den innsamlede dataen har som regel overflødig informasjon med mye gjentakelser eller ubrukelig informasjon og dette øker dessverre lagringsplassen og gjør det mer vanskelig for dataanalyse. Sensorene utplassert i kraftnettet vil jo under normale forhold generere repeterende data. For å ta tak i utfordringene knyttet til unødvendig og repeterende informasjonsgenerering kan man benytte datakomprimeringsverktøy. Da kan man sikre effektiv lagring av informasjon siden dataen går gjennom en rensesprosess før lagring. To av de mest vanlige datakomprimeringsverktøy presenteres under: [43]

Loggfiler:

Loggfiler benyttes stadig som et datainnsamlingsverktøy. Loggfiler blir automatisk generert av datakilder som for eksempel sensorer i forskjellige formater avhengig av hva slags type målinger som blir tatt. Loggfiler blir typisk brukt i alle digitale enheter. For å gi et eksempel registrerer nettsider loggfiler in form av antall klikk, klikkrater, antall besøk og andre egenskaper knyttet til bruker. Man kan også benytte loggfiler i finans med tanke på aksjer og i

bestemmelse av driftstilstand i nettverksmonitorering som er meget relevant for kraftsystemet. [43]

Sensorer:

Sensorer blir stadig inkorporert i vårt daglige liv for å måle fysiske størrelser og omforme dem til lesbare digitale signaler for lagring og behandling. Sensordata kan omfatte mål på lydbølger, vibrasjoner, strøm, vær, trykk, temperatur osv. Den genererte dataen sendes til et datapunkt via kabel- eller trådløst nettverk som tidligere beskrevet i delkapittel 4.2. Dersom sensoren foretar videoovervåking som er meget enkelt å distribuere og ta hånd om, er kabelnettverk en god og stabil løsning for å innhente informasjon. I blant kan monitoreringsområdet ikke være utstyrt med energi- og kommunikasjonsverktøy og dersom noe uventet inntreffer vet man heller ikke den eksakte posisjonen. Av den grunn blir WSN stadig implementert i forskjellige applikasjoner som forskning i miljø, kvalitetskontroll av vann, monitorering av dyrehabitat osv. Som nevnt i delkapittel 4.2 blir sensorene montert på monitoreringsnettverket hvor data genereres. Deretter blir dataen samlet inn på sensornoder og ført til en kontrollstasjon for videre prosessering. [43]

Siden vi har et bredt spekter av forskjellige datakilder vil den genererte dataen variere med hensyn på støy, gjentakelse og konsistens, og det er meningsløst å lagre unødvendig informasjon. I tillegg har noen analyseverktøy strenge krav om datakvalitet. Derfor bør data gå gjennom en prosess før den analyseres ved å integrere dataen generert av ulike datakilder for å analysere dataen effektivt. Det som er positivt med forhåndsbehandling av data er at den ikke bare frigjør mye lagringsplass, men at den også forbedrer analysens nøyaktighet. Følgende forhåndsbehandling av data blir presentert under: [43]

Dataintegrasjon

Denne metodikken kombinerer data fra ulike datakilder og sørger for at brukere får en uniform datapresentasjon slik at en virtuell database kan bli oppbygd. Men denne databasen inneholder ikke data, men informasjon eller metadata relatert til den ordinære dataen. Ulempen er at den ikke tilfredsstillende høye ytelseskrav på datastrømninger fordi dataen er mer på den dynamiske siden og krever derfor at den blir behandlet under overføring. Det er derfor svært vanlig å benytte seg av enheter som behandler datastrømmen dersom man ønsker å benytte dataintegrasjon. [43]

Datarengjøring

Denne prosessen går ut på å identifisere ufullstendige, unøyaktige eller overflødige data og deretter modifierer eller sletter slik data for å bedre datakvaliteten. Datarengjøringen inkluderer fire generelle strategier; definere og fastslå feiltyper, lokalisere og identifisere feil, rette feil, dokumentere feiltyper, og sist men ikke minst redusere fremtidige feil.

Datarengjøring er derfor avgjørende for å ivareta lik datakonsistens og har mange bruksområder som for eksempel innen bank, forsikring, telekommunikasjon, trafikkontroll og klesindustri. [43]

Eliminering av dataredundans

Det som menes med dataoverflødigheit er datarepetisjoner- og overskudd som er svært vanlig for datasett. Ulempen med dette er at man får høye overføringskostnader. I tillegg kan overflødigheit forårsake defekt på lagringssystemer. Eksempler på dette kan være bortkastet lagringsplass, begrensning i datapålitelighet, dataskade og ikke-uniform datakonsistens.

Derfor har ulike metoder innen redundansreduksjon blitt foreslått for eksempel datakomprimering og datafiltrering. Redundansreduksjoner har også noen negative sider som ekstra kostnader og beregningsbyrde. Derfor bør fordelene og ulempene være balansert for effektiv databehandling. Eksempler på hvor redundansreduksjon benyttes er på video- og bildeformater fordi de genererer overflødig informasjon. [43]

4.4 Metoder for dataanalyse

I dette delkapittelet skal vi se på kunnskapsbaserte systemer, stordata inkludert tingenes internett som er metoder innenfor dataanalyse som benyttes i dag og er fremtidens verktøy for høyprosessering av data.

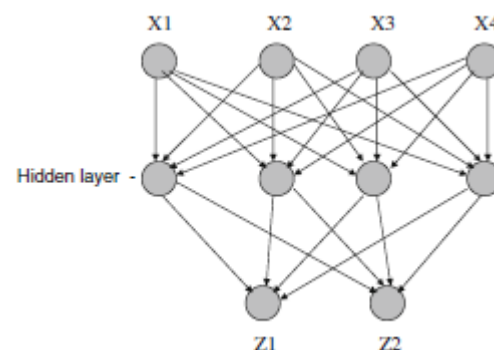
Kunnskapsbaserte systemer (KBS)

KBS er maskiner som driver med informasjonsbehandling for å forsøke å etterligne menneskers adferd. De kan operere på grunnlag av regler, fange opp beslutningsprosessen utført av en ekspert eller være trent for å gjenkjenne og reagere/svare på mønstre av data.

Anskaffelse av diagnostiske anbefalinger gjennom en regelbasert tilnærming for å analysere informasjon avhenger av handling (prodding = som oppfordrer deg til å prøve noe), tolking (forklaring på noe som ikke er umiddelbart opplagt) og representasjon av kunnskap fra menneskelige eksperter. For å unngå feiltolking, mangler eller feil i programmeringslogikken for å komme frem til et resultat oppfordrer man til å vise varsomhet. Fordelen med å bruke denne formen for kunstig intelligens er at resultatene blir raskt levert til et diagnoseverktøy ut ifra et fast mønster av retningslinjer. Ulempen er at prosessen ikke kan lett tilpasse seg endringer på grunn av sin faste struktur. Derfor må ekspertsystemet bli omprogrammert i perioder siden man får erfaring som igjen kan bli tidkrevende og kostbare. [21]

I et forsøk på å anvende mer menneskelig tankegang i programmering kan fuzzy logikk bli brukt til å beskrive hvordan man gjennomfører beslutninger eller handlinger uten å måtte spesifisere adferdsprosessen gjennom kompliserte likninger. Sett på som en formell matematisk teori for å representere usikkerhet, noe som er avgjørende for forvaltningen av utstyr, tillater fuzzy logikk uttalelser som «ganske varmt» eller «ganske kaldt» for å bli formulert videre til databruk. [21]

Forskning har foretatt bruk av neurale nettverk i tilstandsovervåking og diagnostikk, og modellert på nerveceller fra hjernen. Dette kunnskapsbaserte systemet lærer å gjenkjenne komplekse mønstre gjennom et sett av prosesserende elementer eller noder som er koblet sammen i et nettverk som i Figur 3.24.



[21]

Figur 3.24: Slik ser strukturen til neurale nettverk ut. Illustrasjonen er hentet fra [21].

Toppnodene representerer datainput (i dette tilfelle har vi fire innganger merket med X1, X2, X3 og X4). I midten har vi det skjulte nivået bestående av et antall med noder som utfører mye av arbeidet til nettverket. Outputen har i dette tilfellet to noder, Z1 og Z2, som representerer konklusjoner som skal bestemmes fra inputen. Hver node i det skjulte nivået er fullstendig tilkoblet til alle inputene. I det skjulte nivået lærer nettverket gjensidig avhengighet. Observasjoner fra tilgjengelige data relatert til problemløsningen blir gjentatte ganger vist til nettverket for å løse problemet. Dette inkluderer både input og ønsket output. Deretter prøver systemet å predikere en output for

ethvert sett av input ved å redusere feilen gradvis gjennom algoritmer. Algoritmene involverer et interaktivt søk etter et sett med «tyngde/last» som vil nøyaktig forutsi outputene. Rådataene blir derfor brukt og manipulert for å oppdatere systemet og trekke frem den beste konklusjonen basert på all erfaringen systemet har hatt frem til dags dato. Siden «kunnskap» ikke er tydelig kommet frem er metoden derfor begrenset for å rettferdiggjøre dets grunn for resonnement (beslutningskjeden er usynlig). [21]

Stordata

Generelt refereres stordata («big data») til de datasett som ikke kan bli oppfattet, ervervet/tilegnet, håndtert og prosessert av tradisjonelle IT eller maskin- og programvareverktøy innen en tolererbar tidsperiode. Ulike felt viktiggjør ulike aspekter i definisjonen av stordata, for eksempel fokuserer NIST («US National Institute of Standards and Technology») på analyse- og prosesseringsaspektet: [43]

Big data shall mean the data of which the data volume, acquisition speed, or data representation limits the capacity of using traditional relational methods to conduct effective analysis or the data which may be effectively processed with important horizontal zoom technologies. [43]

Begrepet stordata oppstod først under den massive økningen av global data og ble hovedsakelig brukt om disse store datasettene. Generelt har stordata mengder av ustrukturert data som krever mer sanntidsanalyse dersom man sammenlikner med tradisjonelle datasett. Stordata bringer nye muligheter for å oppdage nye verdier og hjelper oss med å oppnå en dypere forståelse for skjulte verdier. I tillegg skapes nye utfordringer om hvordan man skal organisere og håndtere slik data. Den dag i dag har stordata skapt interesse hos blant annet industri, akademia og regjeringen, og store tidsskrifter som Nature og Science har artikler som diskuterer viktigheten og utfordringene til stordata. Dermed sier man at æraen for stordata har kommet. For det første har fremskrittene i IT gjort det enklere å generere data. For å illustrere blir 72 timer av video opplastet til YouTube hvert minutt. Dette skaper for det første utfordringer med å motta og integrere store mengder data fra spredt utbredte datakilder, som i vårt tilfelle utgjøres av sensorer. For det andre øker den samlede datamengden som utfordrer lagringen og håndteringen av slike store datasett med de kravene på maskinvare og programvare vi har. For det tredje så må vi effektivt gjøre nytte av datasettene på forskjellige

nivåer med tanke på deres heterogenitet, kompleksitet, sanntid og skalerbarhet. Dette gjøres med analyse, modellering, visualisering og optimaliseringsteknikker for å forbedre beslutningstaking. [43]

Videre fremmer den hurtige veksten av skytjenester («cloud computing») og Tingenes internett («Internet of Things») veksten av data. Skytjenester gir sikkerhet, tilgangsområder og kanaler for viktige data («data assets»). Ideen med Tingenes internett er å koble samme ulike objekter, som for eksempel sensorer, for å realisere informasjonsutveksling og for å få dem til å samarbeide med hverandre for å fullføre en felles oppgave. Med bakgrunn i Tingenes internett mottar sensorer over hele verden data som blir overført, lagret og prosessert i skyen. Slik data vil ikke bare overgå kapasiteten til IT infrastrukturen til eksisterende bedrifter, men dets sanntidskrav vil også utøve et stress på den databehandlingskapasiteten vi har tilgjengelig. [20]

Analyse av stordata omhandler hovedsakelig analytiske metoder for tradisjonell data og stordata, den analytiske arkitektur til stordata, og programvare brukt til «mining» og analyse av stordata. Dataanalyse er den siste og viktigste fasen i verdikjeden til stordata. Hensikten er å hente ut nyttige verdier til beslutninger eller forslag. Gjennom analyse av datasett kan forskjellige nivåer av potensielle verdier bli generert.

Stordataanalyse kan forstås som en analyse av en spesiell type av data, men flere tradisjonelle dataanalyseverktøy kan fortsatt brukes. Flere av metodene kommer fra statistikken og datavitenskapen, som for eksempel faktoranalyse, korrelasjonsanalyse, regresjonsanalyse og statistisk analyse. En annen metode er datautvinning («data mining»), som er en prosess for å hente ut skjulte og ukjente data som er potensiell brukbar informasjon, fra store mengder av ukomplette og tilfeldige data med støy. Den opprinnelige dataen er kilden til kunnskap og datautvinning er prosessen hvor denne kunnskapen oppdages. Til slutt vil denne kunnskapen bli brukt til informasjonshåndtering, prosesskontroll, vedlikehold av data og beslutningsstøtte.

4.5 Asset Management for vedlikehold

Hvis komponenten ikke blir passet godt nok på vil effekten av dette ikke bli merket øyeblikkelig. Man har da holdningen «den er ikke ødelagt og trenger derfor ikke reparasjon».

Man kan få mye i profitt siden man ikke trenger å bruke penger på vedlikeholdskostnader. Men svikt kan ikke unngås for alltid. Når den inntreffer vil den påvirke profitten sterkt pga. ulike faktorer som produksjonsstopp, investering i reservedeler, kostnader grunnet arbeidskraft og sekundære skader og risiko for skade på mennesker og miljø. Den tekniske utfordringen er derfor blitt å identifisere optimale midler for å forsikre seg mot katastrofal svikt samtidig som å unngå unødvendige utgifter. [21, 22, 44]

4.5.1 Corrective Maintenance (CM):

Reparasjon eller erstatning av deler blir utført umiddelbart etter en svikt pga. brudd i komponenten som igjen fører til forstyrrelser i strømforsyningen. Hvis investeringskostnaden er lav i tillegg til at risikoen for svikt også er lav eller at kostnaden for tilstandsevaluering er høy, vil denne strategien være den rimeligste fordi kostandene dukker kun opp etter at bruddet har skjedd. Reservedeler bør være tilgjengelig i løpet av kort tid og hvis man neglisjerer konsekvensene av utstysfeil og dermed forstyrrelser i nettet, benyttes derfor denne strategien ofte på lavspenningsnettet. Hvis det i tillegg er snakk om mange komponenter er denne strategien mer egnet fremfor andre med tanke på økonomisk lønnsomhet. [21, 22, 44]

Med tanke på vedlikehold blir ikke tilstanden til strømkomponentene loggført ved inspeksjon fordi det ikke er økonomisk effektivt når informasjonen om utstyret er begrenset som nevnt tidligere. Utstyret blir benyttet så lenge levetiden tillater det uten å ta hensyn til å være 100 % tilgjengelig for systemet. I bunn og grunn er denne strategien rimelig akseptert for grunnene presentert ovenfor spesielt når sviktraten er konstant på veldig lavt nivå og ingen aldring inntreffer. Derfor har man ingen risiko for høye og uforventede vedlikeholdsutgifter. [21, 22, 44]

4.5.2 Time-based Maintenance

I dette tilfellet blir inspeksjoner og service utført etter et fast tidsintervall og da blir komponentene skiftet ut basert på forventet levetid. Syklusen beregnes etter systemoperatørens erfaring og produsentens anbefaling som tilslutt blir avgjort etter kjent aldringsmønster i tillegg til statistikk. Tidspunkt for vedlikeholdsaktiviteter blir bestemt på forhånd og hovedfokuset er å unngå svikt. Denne strategien blir mest brukt på verdifulle

utstyr som er på feltet i over lang tid dersom slitasjemønsteret på de ulike komponentene blir basert på driftserfaring. [21, 22, 44]

Hovedsakelig gir dette de høyeste vedlikeholdskostnadene selv om utstyret ikke blir benyttet helt mot slutten av dens levetid. Disse kostnadene som kan unngås bør derfor sammenliknes med kostnadene som må til for å loggføre og vurdere helsetilstanden dersom man vurderer å gjennomføre CBM (se neste avsnitt). [21, 22, 44]

I alle fall krever anvendelsen av TBM en korrelasjon mellom alder eller akkumulert stress på utstyr (for eksempel frekvenssvingninger) og sviktraten slik at de individuelle komponentene skiftes ut før en svikt skjer basert på statistisk vurdering. Denne vedlikeholdsstrategien bør benyttes på utstyr ifølge CBM hvis den tekniske tilstanden ikke kan bli vurdert økonomisk ved tilstandsovervåkning- eller bestemmelse. I praksis har TBM en betydelig fordel nemlig at hele nettstasjonen eller «feeders» kan avkobles helt slik at vedlikehold kan utføres på alle komponentene på samme tid. I motsetning til TBM vurderer CBM helsetilstanden for enhver komponent i kraftsystemet. [21, 22, 44]

4.5.3 Condition-based Maintenance

I mange tilfeller er korrelasjonen mellom sviktraten og alder til utstyret ikke tilgjengelig. Av den grunn er ikke TBM så effektiv likevel. Dette leder oss til en ny strategi nemlig condition-based maintenance (CBM). I dette tilfellet er vedlikehold og utskifting av utstyr en funksjon av tilstanden. Det som skal til for å detektere tilstanden til komponenten er overvåkning eller diagnostikk som videre kan sammenliknes med tilstandshistorikken til utstyret. Da har man behov for ytterligere investering i diagnoseverktøy og opplæring av personalet. Når man skal estimere levetidskostnadene på utstyr i CBM er det viktig å merke seg at kostnadene for overvåkingssystemer påløper i det tidspunktet investeringen av utstyret blir foretatt mens de unngåtte sviktkostnadene vil skje på et senere tidspunkt. Resultatet blir at fortjenesten er en funksjon av renten og at svikten på alt utstyr ikke kan identifiseres som en trend i forveien. Ulempen med denne strategien er at alt utstyr behandles på samme måte uavhengig av deres plassering eller betydning for systemytelsen. Denne strategien er godt egnet til systemer som allerede er automatisk velutstyrt med gjenstander egnet til tilstandsovervåkning eller der tilstandsevaluering er mulig under inspeksjon. I utgangspunktet er denne strategien velegnet der aldringsprosessen og slitasjeutviklingen lett kan detekteres slik at risikoen for svikt minimeres betydelig. [21, 22, 44]

4.5.4 Priority-Oriented or Reliability-Centered Maintenance (RCM)

I dette tilfellet blir ikke vedlikeholdsaktivitetene prioritert direkte etter utstyrets tilstand slik som i CBM. Her fokuserer man på påliteligheten til systemet og ser på om tilstanden til utstyret er egnet for vedlikehold ved hjelp av risikoraten som for eksempel beregningen av sannsynligheten for svikt eller knapphet på energi. I motsetning til CBM tas både utstyrets betydning og tilstand med i betraktning. Kombinasjonen av utstyrets betydning og tilstand fører en til optimal fordeling av finansielle ressurser til utviklingen av en vedlikeholdsstrategi. Det betyr at RCM har både en innvirkning på forsyningskvaliteten i tillegg til helsetilstanden til utstyret. [21, 22, 44]

4.5.5 Risked-Based Maintenance

Denne vedlikeholdsstrategien ble utviklet i flyindustrien for vedlikeholdsplanlegging der påliteligheten til systemet og strukturen i tillegg til ytelsen er en funksjon av design- og byggekvalitet. Vi har to forskjellige bruksområder nemlig én til systemer og én til strukturer/konstruksjoner. [21, 22, 44]

Til systemer:

Failure modes and effect analysis (FMEA) blir brukt for å identifisere alle former for svikt for enhver komponent i et system basert på dens funksjon. FMEA blir i blant tatt i bruk for å rangere sviktypen i henhold til hvor sannsynlig svikten inntreffer og totalomfanget av svikten. Sviktypen blir deretter kategorisert etter om feilen er synlig/merkbar eller skjult for operatøren i normal drift og videre sortert etter hvor sensitiv feilen er for de forskjellige industrisektorene (eks. trygghet, miljø, operasjon og økonomi). Fra den resulterende listen blir et sett med spørsmål stilt for å bestemme den mest effektive vedlikeholdsmetoden for enhver type feil/svikt. Utfallet kan derfor være en spesifikk tidsperiode enten til å bestemme tilstanden til komponenten, arbeid på enheten, forkaste enheten eller ikke gjøre noen ting. Det kan til og med foreslå null vedlikehold og kreve fullt redesign av komponenten. [21, 22, 44]

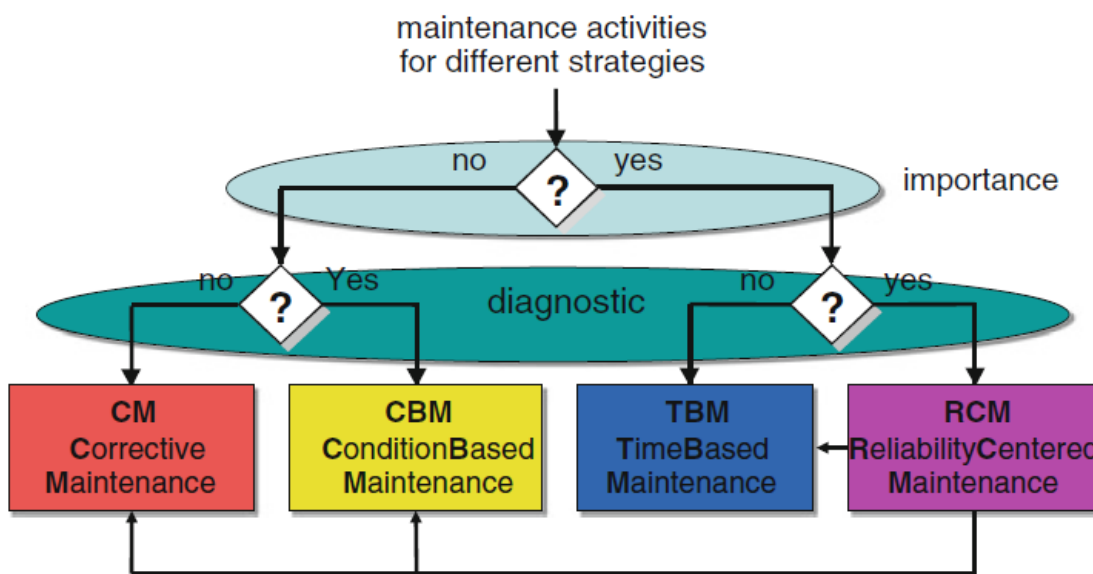
Til systemer/konstruksjoner:

Denne ble utviklet for å utforme inspeksjonsrutiner for å sikre et sterkt «skjelett» og derved sikkerhet. Konsekvenser av drift og økonomi har ingen betydning. Denne metodologien er basert på antakelsen at enheten har et «trygt» liv vanligvis relatert til slitasje. Hensikten med

inspeksjonen er å identifisere ulike komponenter og rangere dem ut i fra risikoen for skade grunnet slitasje, miljøpåvirkninger og ulykke ved bruk av en tabell basert på rangeringsfaktorer for enhver komponent. For ikke-signifikante områder benyttes rimelige visuell inspeksjon. [21, 22, 44]

4.5.6 Totalvurdering av vedlikeholdsstrategiene (VS)

Siden de tre første VS har mange ulemper som for eksempel at det er kostbart, tar tilstrekkelig lagringsplass, at alle enheter blir behandlet likt osv. har den fjerde (RCM) i det siste blitt benyttet ofte. RCM kan således betraktes som en «overordnet» vedlikeholdsstrategi som vist i Figur 3.25.



Figur 3.25: Her ser vi hvordan de ulike vedlikeholdsstrategiene relaterer til hverandre. Figuren er hentet fra [22].

Dersom det ikke er mulig eller behov for å fastslå viktigheten (hva slags rolle det har i systemet) og tilstanden til utstyret, er den mest gunstige strategien vanligvis korrektivt vedlikehold (CM) – på venstre gren av figuren. Den eneste grunnen til å implementere TBM er for å dokumentere inspeksjonen eller vedlikeholdsaktiviteten av en bestemt periode pga. juridiske krav. Et eksempel kan være leverandører som stiller ulike krav til gjennomføringen av vedlikeholdsarbeidet. Dette kan være tilleggsutstyr som luftkompressorer, heis etc. for å kontrollere sikkerheten til utstyret. [21, 22, 44]

Dersom det er økonomisk mulig å stille en diagnose og foreta en viktighetsvurdering havner vi automatisk på RCM. Hvis man starter fra RCM kan man gå videre til en annen strategi som de tre første (CM, TBM og CBM) strategiene som en funksjon av viktighetsgrad. For

eksempel hvis en pålitelighetsberegning viser at utstyret ikke har noen signifikant innflytelse på forsyningen av elektrisk energi kan CM anvendes hvis en utskiftning eller reparasjon kan utføres på kort sikt. Dette betyr at CM brukes i områder hvor man har mest erfaring eller som et resultat av pålitelighetsberegninger. [21, 22, 44]

4.6 Pågående utviklinger

Bedriften eSmart-systems har utviklet droner som kan ved hjelp av digitale verktøy som bildegjenkjenning forbedre vedlikeholdsinspeksjoner utført på kraftsystemet. Denne dronen kan analysere titusen bilder under en time som er mye mer enn hva et menneske kan gjøre i løpet av et år. Dette er mulig takket være kunstig intelligens som kategoriserer informasjonen og kjører den både i eSmarts utviklede plattform og Microsoft Azure. Denne bedriften er blant de som sakte kommer inn på utviklingen av et helhetsperspektiv innenfor overvåkning og beslutningsstøtte for vedlikehold og drift. [45]

Promaps er et sanntidsverktøy i risikoberegning for mulige feil i kraftnettet. Dette muliggjør beslutningsstøtte i overvåkning for feil siden kraftselskapene kan rykke ut i feltet før feilen inntreffer og blant annet avverge strømbrudd. Prosedyren går ut på å mate sanntidsinformasjon og komponentens historiske data inn i en matematisk algoritme for å beregne risikoen seks ganger i løpet av en time. Her ser man at man ennå er i startfasen for sanntidsovervåkning i risiko for feil fordi man ikke har et system som fungerer ennå. [46]

Her ser vi at enkelte sakte men sikkert glir inn mot et helhetsperspektiv innen sanntids overvåkning- og beslutningsstøtte for vedlikehold og drift. Fullstendig implementering av slike komplekse verktøy vil nok dessverre ta mange år, men vi vil forhåpentligvis havne der til slutt.

4. Oppsummering og forslag til videre arbeid

Ettersom nettkapasiteten stadig bygges ut blir flere og flere systemkomponenter integrert i systemet samtidig som dagens system utnyttes i all økende grad. Hvordan skal man sørge for at alle komponentene i systemet har utmerket helse døgnet rundt? Hvordan skal man i tillegg vite når systemkomponenter er i risikozonen for feil for å avverge en drastisk situasjon og i

verste fall strømbrudd? Det er akkurat derfor det er behov for et sanntids overvåknings- og beslutningsstøttesystem. Implementering av sensorer på ulike områder i kraftsystemet åpner muligheten for kontinuerlig overvåkning og tilstandskontroll. Det å vite om systemkomponent er i risikozonen for feil gjør det mulig for mannskap å håndtere situasjonen før feilen inntreffer. Dette er bare en ide som illustrerer sensorenes verdi og denne ordningen er ennå ikke blitt helt implementert da vi ennå er i begynnelsesfasen.

Implementering av sensorer i nettet byr på den andre siden på betydelige utfordringer. Enhver sensor vil jo generere utallige datamengder. Derfor er det svært viktig at man har gode overføringsteknologier som kan overføre data på en rask og sikker måte. Trådløse sensornettverk har for tiden stor popularitet og interesse, og forskere mener at dette er den optimale løsningen på dagens og morgendagens overføringsteknologi. Denne teknologien blir forsket på av ulike grupper og har dermed ulike fremgangsmåter. Det er blitt presentert en metode hvor sensorer blir brukt med noder og en annen metode hvor man benytter trådløse sensorer alene.

Det neste steget i informasjonsflyten er datainnsamling. I denne fasen er det meget viktig at man ikke lagrer all data sensorene generer da mye informasjon er repeterende og unyttig, og dette vil dessuten øke lagringsplassen som vil medføre vansker i analysen av data. For å takle dette problemet kan datakomprimeringsverktøy benyttes hvor dataen går gjennom en renselsesprosess før lagring. Selv om vi har denne renselsesprosessen er det likevel enorme datamengder som må bli analysert hvis feltarbeidere skal bli informert eller om dataen skal bli brukt i automatiske kontrollsystemer. Det er verdifullt med en teknologi som automatisk filtrerer og konverterer data til verdifull informasjon, i tillegg til at dataen blir strukturert og presentert på en oversiktlig måte for å forhindre at driftspersonell blir overveldet med for mye informasjon på en gang.

Antakelsen er at det hittil har vært et stort fokus på forskningen og prinsippene av elementene for seg selv, men ikke som et helhetlig bilde som danner grunnlaget for beslutningsstøttene og risikoovervåkingen i sanntid. Denne antakelsen kan bygges på at temaet er for komplekst for enkelte masterstudier eller selv PhD-studier. I denne oppgaven var målet å belyse de ulike elementene i informasjonsflyten for å bekrefte eller avkrefte denne antakelsen. Ut ifra min redegjørelse er konklusjonen at denne antakelsen bekrefte. Oppgaven belyser nemlig at det finnes mye forskning på sensorer, overføringsteknologier, datalagring og analyse når det

gjelder metoder, utføringer og utfordringer, men ingen av disse elementene i informasjonsflyten har alene kunnet bidra til sanntids beslutningsstøtte og risikoanalyssystem. Årsaken til dette er at forskningen fokuserer på det enkelte elementet alene. Selv om dette gir masse informasjon, er ikke dette nok for å skape sanntids beslutningsstøtte og risikoovervåkningssystem som er essensielt for optimal drift av kraftsystemet. For å kunne realisere slike store verktøy innen drift er det essensielt med helhetsperspektivet, og det er dermed ønskelig å motivere til forskning på helheten i informasjonsflyten. Belysning av elementene og utfordringene knyttet til disse i kraftsystemet har ikke bare klargjort at helhetsperspektivet ikke eksisterer, men studium og forståelse av hvert enkelt element er steget mot dannelsen av helhetsbildet da dette gir grobunn for økt og dypere innsikt. Vi trenger selvfølgelig som nevnt ytterligere forskning som tar den generelle informasjonsflyten til sikte. For å kunne forske på helhetsperspektivet er det først viktig å finne mulige årsaker på hvorfor det ikke eksisterer forskning på dette allerede. Er det fordi temaet er for komplekst for universiteter? Er det de enkelte bedrifter som har dette i praksis som må bidra til forskning i dette? Eller er det rett og slett for lite marked? En annen mulig årsak kan være at teknologien er umoden, altså at TRL er på et lavt eller uoptimalt nivå. Med dette menes at teknologikravet kan være høyere for å gi et sammenhengende bilde av enkelte elementer som allerede er så komplekse i seg selv.

Per i dag har man ett system for én måling. Det forklares av at når selskaper utvikler sensorer utformer de sensorer som passer deres egen plattform. Forslag til videre arbeid mer spesifikt er å utvikle et system som har muligheten for å ta sensordata fra ulike sensorer og samle alt i en plattform. Dette er meget krevende og for komplekst i og med at enhver sensor snakker sitt eget språk og har eget format. Da kan man heller utvikle en plattform som er bygd opp av moduler slik at man kan utføre «plug and play». For å eksemplifisere har driftssentralen storskjermer og man kan ikke holde øye med titusen storskjermer for å vite hvordan tilstanden er ute i nettet pga. den overflødige informasjonen. Man kan heller ha et system hvor man plugges inn/aktiverer ønsket sensor montert i nettet inn i plattformen. Dersom den kobles inn i plattformen vet man at sensoren virker og man kan deretter overvåke komponenten. Da har man en plattform som er modellert oppbyggbar. Fremfor å bygge en helhetsplattform som er meget vanskelig og kompleks kan man heller starte med noe mindre og gradvis bygge den opp. Det er nemlig ikke gjennomførbart å dimensjonere et system som vil fungere fullstendig i løpet av en dag eller i to. eSmart og Promaps er henholdsvis bedrift og verktøy som har begynt å utforske helhetsperspektivet i informasjonsflyten, og fungerer

dermed som bevis på at forskningen er i gang i riktig retning for å kunne skape de essensielle verktøyene innen vedlikehold, drift og risikoovervåkning. Vi er med andre ord et steg nærmere et effektivt og velfungerende kraftsystem som er rettet mot fremtidens utfordringer.

5. Referanser

- [1] S. M. Berljin, "Samtale," ed, 2017.
- [2] A. Phillips and L. v. d. Zel, "Sensor Technologies for a Smart Transmission System," EPRI, Dec. 2009. Hentet fra: <http://www.remotemagazine.com/images/EPRI-WP.pdf>
- [3] Luke van der Zel, "Substation Sensor Demonstration Project," EPRI2016. Hentet fra: <https://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUK Ewi0-cfjzsrVAhVPKVAKHRJ9DxMQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fpublicdownload.epri.com%2FPublicDownload.svc%2Fproduct%3D000000003002008143%2Ftype%3DProduct&usg=AFQjCNFkGhvKrrAB7yD2OCnFYwU8HkmjXg>
- [4] National Aeronautics and Space Administration, "Directional UAV Localization of Power Line Ultraviolet Corona," - Hentet fra: <https://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwioibv6gsvVAhXEJFAKHd88C7gQFggpMAA&url=https%3A%2F%2Ftechnology.nasa.gov%2Fpatent%2FLAR-TOPS-228&usg=AFQjCNH9MNNzUmOngzuIWtZWH485k2oGXQ>
- [5] Hafslund. (2017). *Hafslunds nettvirksomhet*. Hentet fra: <https://www.hafslund.no/omhafslund/nett/3082>
- [6] S. M. Berljin, "Forelesning fra FYS377 - Luftledninger," ed, 2015.
- [7] S. Andersen, M. M. Øberg, S. Veila, and H. Sundheim, "Energiskolen - Lærehefte," 2014. Hentet fra: http://www.statnett.no/Global/Dokumenter/Milj%C3%B8og%20samfunn/Energiskolen/statnett_1%C3%A6rehefte_oppslag.pdf
- [8] Statnett SF, "Systemdrifts- og markedsutviklingsplan (SMUP)," 2017. Hentet fra: <http://www.statnett.no/Global/Dokumenter/Kraftsystemet/Systemansvar/SMUP%202017-2021.pdf>
- [9] GARPUR, "Abstract," 2016. Hentet fra: https://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwizuK3U09XVAhVBMJoKHck6A1wQFggwMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.garpur-project.eu%2Fsystem%2Fresources%2FW1siZiIsIjIwMTYvMTEvMjMvMTRfMzhfMDhfNzk4X1B1Ymxpc2hhYmxlX3N1bW1hcnlfR0FSUFVSX0QxMS4xY19QZXJpb2RpbY19SZXBvcnRfTm9fMi5wZGYiXV0%2FPublishable%2520summary_GARPUR%2520D11.1b%2520Periodic%2520Report%2520No%25202.pdf&usg=AFQjCNGW_cC43yELmFrypB1obWAEID1EYw
- [10] GARPUR, "Publishable summary," 2015. Hentet fra: <https://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiW38iw09XVAhVxSZoKHT7dCV4QFggvMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.garpur-project.eu%2Fsystem%2Fresources%2FW1siZiIsIjIwMTUvMDcvMDgvMTFfMTRfMDNfNzA0X0dBUIBVUI9QZXJpb2RpbY19SZXBvcnRfTm9fMV9QdWJsaXNoYWJsZV9TVU1NQVJZX0QxMS4xYV8ucGRmIl1d%2FGARPUR%2520Periodic%252>

- [0Report%2520No%25201%2520-%2520Publishable%2520SUMMARY%2520%2528D11.1a%2529.pdf&usg=AFQjC NF8La6T9wJfK44ACTFamybDI0RVfA](#)
- [11] entsoe. (2015). *Who is ENTSO-E?*. Hentet fra: <https://www.entsoe.eu/about-entsoe/Pages/default.aspx>
- [12] Statnett. (2015). *Bente Hagem valgt til styreleder i ENTSO-E*. Hentet fra: <http://www.statnett.no/Media/Nyheter/Nyhetsarkiv-2015/Bente-Hagem-valgt-til-styreleder-i-ENTSO-E/>
- [13] Norges vassdrags- og energidirektorat. (2015). *AMS*. Hentet fra: <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/sluttbrukermarkedet/ams/>
- [14] elhub. *Elhub*. Hentet fra: <http://elhub.no/nb/om-elhub>
- [15] "Statnetts innspill til Energimeldingen " Statnett SF, Oslo2015. Hentet fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/39924ff2bd1d4d1da83cb86b187dae9d/statnett-sf.pdf>
- [16] U.S. Department of Energy, "Measurements, Communications, and Controls," 2015. Hentet fra: <https://energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/QTR2015-3E-Measurements-Communications-and-Controls.pdf>
- [17] Statnett SF, "Årsstatistikk 2016 - Driftsforstyrrelser, feil og planlagte utkoplinger i 1-22 kV-nettet " 2017. Hentet fra: <http://www.statnett.no/Global/Dokumenter/Kraftsystemet/Systemansvar/Feilstatistikk/%c3%85rsstatistikk%202016%201-22%20kV.pdf>
- [18] ABB, "Taking the first steps toward condition-based maintenance," 2014. Hentet fra: <http://new.abb.com/docs/librariesprovider139/default-document-library/wp-2-first-steps-to-condition-maint-wp.pdf?sfvrsn=2>
- [19] D. Y. R. Nagesh, S. A, and D. S. S. TulasiRam, "Real Time Decision Support for Energy Management " *Proceedings of the World Congress on Engineering* vol. 1, 2008.
- [20] ABB, "ABB Asset Health Center - End-to-end asset management that turns 'big data' into clear and actionable intelligence.," - . Hentet fra: https://library.e.abb.com/public/bd0874a998f1126b85257b12007123f8/abb_asset_services_brochure_1.31.pdf
- [21] R. S. Cowan and W. O. Winer, *Handbook of Technical Diagnostics*. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [22] G. Balzer and C. Schorn, *Asset Management for Infrastructure Systems*. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [23] Electric Power Research Institute, "Field Data Integration for Asset Management and Grid Operations," 2012. Hentet fra: <https://www.epri.com/#/pages/product/000000000001025000/>
- [24] A. Phillips, "Sensors and Operations," EPRI, July 2011. Hentet fra: <http://mydocs.epri.com/docs/TI/Sensors%20&%20Operations.pdf>
- [25] R. Schrieber, "Asset Health Center ", ABB, April 18, 2011. Hentet fra: <https://library.e.abb.com/public/88546c8d97b92480852578ef004ffcd8/PPO-000-2.pdf>
- [26] National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, National Academy of Engineering, and Committee on America's Energy Future. (2009). *America's Energy Future: Technology and Transformation*. Hentet fra: <https://www.nap.edu/read/12091/chapter/13>
- [27] L. v. d. Zel, "New Substation Sensor Technology Locates Partial Discharge to Provide Early Warning of Equipment Failure " EPRI2008. Hentet fra: <http://mydocs.epri.com/docs/corporatedocuments/sectorpages/pdm/pdunewsletterfinal3-24-08.pdf>

- [28] J. He, M. Li, G. Chen, and Z. Wang, "Error Analysis and Antenna Array Placement Optimization of Localization System for Partial Discharge in Substation," *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 90, pp. 104-107, 20. apr. 2014 2014.
- [29] J. Bolano, "Algorithms for Online Infrared Inspection and Monitoring in Substations," EPRI, California, USA, March 2016. Hentet fra: <https://www.epri.com/#/pages/product/3002007580/>
- [30] K. Øvstedal and Ø. A. Olsnes, "Eksplisjonsikring av transformatorer," Avdeling Haugesund - ingeniørfag, Høgskolen Stord/Haugesund, Haugesund, 2005.
- [31] EPRI, "Solid-state Dissolved Gas Analysis Sensors for Low-cost Transformer Monitoring " EPRI, California, USA, March 2013. Hentet fra: <https://www.epri.com/#/pages/product/000000003002000339/>
- [32] EPRI. (2005). *Development of a New Acoustic Emissions Technique for the Detection and Location of Gassing Sources in Power Transformers and LTCs: Phase 2 Results*. Hentet fra: <https://www.epri.com/#/pages/product/000000000001011708/>
- [33] EPRI. (2006). *Development of Multiplexed Fiber-Optic Sensors for On-line Monitoring of Electrical Faults and Thermal Faults Inside High Voltage Transformers*. Hentet fra: <https://www.epri.com/#/pages/product/000000000001012342/>
- [34] EPRI, "On-line Frequency Response Analysis System," 2001. Hentet fra: <https://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUK EwjImsW7gMrVAhWLKFAKHXdBbKQFgg0MAE&url=https%3A%2F%2Fpublicdownload.epri.com%2FPublicDownload.svc%2Fproduct%3D000000000001001942%2Ftype%3DProduct&usg=AFQjCNE6w6uLW5UHI3tRSNa2qX02FqI5RA>
- [35] Cornelius Plath and M. Pütter, "Dynamic analysis and testing of On-Load Tap Changer with dynamic resistance measurement," 1966. Hentet fra: <https://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=16&ved=0ahUK EwjFhrK25srVAhVFbxQKHACL8wQFgh3MA8&url=https%3A%2F%2Fwww.omicronenergy.com%2Fdownload%2Ffile%2Fa207466e7bc405ecd22dbec942a41199%2F&usg=AFQjCNHlfoUBfgWaTaHZkHbqciix-ic3qw>
- [36] K. Saugstad. (2015). *Lynavleder*. Hentet fra: www.snl.no/lynavleder
- [37] I. Y. H. GU, S. BERLIJN, I. GUTMAN, and M. H.J.BOLLEN, "PRACTICAL APPLICATIONS OF AUTOMATIC IMAGE ANALYSIS FOR OVERHEAD LINES," *22nd International Conference on Electricity Distribution*, 2013.
- [38] !!! INVALID CITATION !!! { }.
- [39] S. Harsha. (2014). *Robotic Monitoring of Power Systems* Hentet fra: <https://www.slideshare.net/harshasiliveru/robotic-monitoring-of-powersystems>
- [40] O. Dagdeviren, I. Korkmaz, F. Tekbacak, and K. Erciyas, "A Survey of Agent Technologies for Wireless Sensor Networks," *IETE TECHNICAL REVIEW*, vol. 28, pp. 168-184, 2014.
- [41] J. Lin, B. Zhu, P. Zeng, W. Liang¹, H. Yu¹, and Y. Xiao³, "Monitoring Power Transmission Lines Using a Wireless Sensor Network," *WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING*, vol. 15, pp. 1799-1821, 2015.
- [42] S. Katyara, J. Izykowski, B. S. Chowdhry, H. A. Musavi, and R. Hussain, "WSN-based monitoring and fault detection over a medium-voltage power line using two-end synchronized method," *Electr Eng*, 2016.
- [43] M. Chen, S. Mao, Y. Zhang, and V. C. M. Leung, *Big Data - Related Technologies, Challenges and Future Prospects*: Springer, 2014.
- [44] J. Doyle, "Asset Management," in *Overhead Lines*, K. O. Papailiou, Ed., ed, 2017.
- [45] eSmart systems. (-). *Connected Drone*. Hentet fra: <https://www.esmartsystems.com/products/connected-drone/>

- [46] S. Ø. Flæten. (2014). *Promaps kan forutse feil i strømnettet*. Hentet fra: <https://www.tu.no/artikler/promaps-kan-forutse-feil-i-stromnettet/275114>



Norges miljø- og biovitenskapelig universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway