

Prosjektrapport

Sluttrapport EarlyWarn

Sammendrag av resultater fra KSP EarlyWarn

Forfatter(e):

Christian Andresen

Rapportnummer:

2021:00819 - Åpen

Oppdragsgiver(e):

Lyse Elnett, Tensio TN, Statnett, Nettalliansen, Hydro Energi AS, Haugaland Kraft Nett, NTNU, Norges Forskningsråd

SINTEF Energi AS
Postadresse:
Postboks 4761 Torgarden
7465 Trondheim
Sentralbord: 45456000
energy.research@sintef.no

Foretaksregister:
NO 939 350 675 MVA

Prosjektrapport

Sluttrapport EarlyWarn

Sammendrag av resultater fra KSP EarlyWarn

EMNEORD:

Maskinlæring,
prediksjon, kraftsystem,
spenningsforstyrrelser

VERSJON

1.0

DATO

2021-08-24

FORFATTER(E)

Christian Andresen

OPPDRAGSGIVER(E)

Lyse Elnett, Tensio TN, Statnett, Nettalliansen, Hydro
Energi AS, Haugaland Kraft Nett, NTNU, Norges
Forskningsråd

OPPDRAGSGIVERS REFERANSE

-

PROSJEKTNUMMER

502001582

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:

23

SAMMENDRAG

Denne rapporten summerer opp aktiviteten i KSP-prosjektet EarlyWarn. Prosjektet er et Kompetanse- og Samarbeidsprosjekt finansiert av Norges Forskningsråd og industriaktører. Prosjektet har hatt som fokus å utvikle og teste prediktive algoritmer/modeller for feil og ustabiliteter i kraftsystemet basert på anvendelse av datadrevne metoder. Modellene som er utviklet i prosjektet er testet både på historiske og sanntids måledata fra kraftsystemet, og resultatene er publisert i åpne kanaler. Prosjektet har inkludert 3 masteroppgaver og 2 PhD-oppgaver. Rapporten refererer i hovedsak til publiserte arbeider ved beskrivelse av detaljer rundt hvert enkelt resultat.

UTARBEIDET AV

Christian Andre Andresen

SIGNATUR



KONTROLLERT AV

Bendik Nybakk Torsæter

SIGNATUR



Bendik Nybakk Torsæter (Aug 24, 2021 14:38 GMT+2)

GODKJENT AV

Knut Samdal

SIGNATUR



Knut Samdal (Aug 24, 2021 14:44 GMT+2)

RAPPORTNUMMER

00819

ISBN

978-82-14-
07646-2

GRADERING

Åpen

GRADERING DENNE SIDE

Åpen

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
0.1	2021-05-19	Første utkast
1.0	2021-08-24	Endelig versjon for signering

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon og overordnede mål	6
1.1	Innhold og struktur for rapporten	7
2	Prosjektstruktur	7
2.1	Organisasjon og deltagere	7
2.2	Arbeidspakker og fremdriftsplan	8
2.3	Økonomi.....	9
3	Resultater	11
3.1	Oversikt over arbeider	11
3.2	PhD-arbeider	11
3.3	Masteroppgaver.....	12
3.3.1	Masteroppgave Kristian Wang Høiem.....	12
3.3.2	Masteroppgave Vemund Santi	12
3.3.3	Masteroppgave Halvor Kvernes Meen og Camilla Jahr	13
3.4	Journal og konferanse artikler	13
3.4.1	Fault Detection and Prediction in Smart Grid.....	14
3.4.2	Mode Shape Estimation using Complex Principal Component Analysis and k-Means Clustering	14
3.4.3	Incipient Fault Prediction in Power Quality Monitoring.....	14
3.4.4	Power Oscillation Monitoring using Statistical Learning Methods	15
3.4.5	Estimation of oscillatory mode activity from PMU measurements	15
3.4.6	Comparative study of event prediction in power grids using supervised machine learning methods.....	16
3.4.7	Clustering and Dimensionality-reduction Techniques Applied on Power Quality Measurement Data.....	16
3.4.8	Impact of the Temporal Distribution of Faults on Prediction of Voltage Anomalies in the Power Grid.....	16
3.4.9	Impact of seasonal weather on forecasting of power quality disturbances in distribution grids.....	17
3.4.10	The value of multiple data sources in machine learning models for power system event prediction	17
3.4.11	(Not yet accepted) Live Prediction of Power Quality Anomalies	18
3.5	Programmer og pilotkode	18
3.5.1	Automatisk Hendelsesanalysator (AHA).....	18
3.5.2	Dynamisk Dataset Generator (DDG).....	18
3.5.3	Pilotkode for pilotering hos Tensio TN (Demo)	19
3.5.4	Kraftsystemsimulator (Simulator)	19
3.5.5	API for nedhenting av værdata (Weather)	19

3.6	Notater og andre populærvitenskapelige resultater	19
3.6.1	Notater.....	19
3.6.2	Populærvitenskapelige artikler og presentasjoner	20
4	Måloppnåelse	20
5	Mulig videreføring.....	22
6	Leveranser	23

BILAG/VEDLEGG

Klikk eller trykk her for å skrive inn tekst.

Sammendrag

Denne rapporten oppsummerer målsetninger og resultater fra KSP-prosjektet EarlyWarn, støttet av Norges Forskningsråd og industripartnere. Rapporten støtter seg på publiserte arbeider som er produsert under prosjektets gjennomføringsfase for å beskrive detaljresultater. Det er her bare gitt en oversikt over hoved- og delmål for prosjektet, samt referanser til hvilke av de publiserte arbeidene som dekker de forskjellige målene. Rapporten gir også en oversikt over økonomien til prosjektet.

EarlyWarn-prosjektet har hatt som hovedmål å frembringe kompetanse på og modeller for tidlig varslings av uønskede hendelser i kraftsystemet. Metodisk tilnærming har vært bruk av stordata og maskinlæringsmetoder for å lage modeller med prediktiv evne. Som input til modellene har sensordata fra PMU- og PQA-instrumenter plassert i det norske kraftsystemet vært benyttet. Totalt er over 240 år (alle sensorer kombinert) med sammenhengende dataserier fra mer enn 45 sensorer benyttet. Prediktive modeller med statistisk signifikant prediksjonsevne har blitt utviklet og testet både på historiske data og gjennom pilotering hos et distribusjonsnettselskap (DSO) med måledata i nær sanntid. Treffsikkerheten til de testede modellene er ikke funnet tilstrekkelig for operasjonell implementering. Mulige videre arbeider for å øke denne treffsikkerheten er foreslått og publisert i fagfelleverderte kanaler.

Executive summary

This report summarizes the objectives and results from the KSP project EarlyWarn, supported by the Research Council of Norway and industry partners. The report mainly builds on published work and results produced during the operational phase of the project for detailed description of the results, herein is only given an overview of main- and sub-objectives and references to which published work that contains the details for each objective. The report also gives an overview of the economics of the project.

The EarlyWarn project has had as main objective to produce competence and models for early warning of undesired events in the power system. The methodological approach has been utilization of big-data and machine learning techniques for the creation of predictive models. As input to the models, data from PMU and PQA sensors placed in the Norwegian power grid has been utilized. In total, over 240 years (combined for all sensors) of continuous field data from over 45 locations has been utilized. Predictive models with statistically significant predictive ability have been developed and tested both on historic data and through piloting with a distribution system operator (DSO) on near real-time field data. The accuracy of the developed models has not been found to be sufficient for operationalisation. Potential further work to improve this accuracy has been suggested in the project and published in peer-reviewed channels.

1 Introduksjon og overordnede mål

Prosjektet EarlyWarn var et *Kompetanseprosjekt for næringslivet* (KSP) støttet fra Norges Forskningsråd og et konsortium av industriaktører i perioden 2017-2021. Prosjektet har vært ledet av SINTEF Energi AS ved avdeling Energisystemer og har inkludert bidrag fra SINTEF Digital og utdanning av to PhD'er fra NTNU.

Prosjektet ble innvilget under navnet "EarlyWarn - Proactive detection and early warning of incipient power system faults", og har hatt fokus på prediksjon av feilhendelser i kraftsystemet, både på distribusjons- og transmisjonsnivå.

Prosjektets hovedmål har vært å:

Utvikle og validere nye modeller og verktøy for forbedret situasjonsforståelse, samt system- og komponenttilstandsestimering i transmisjonssystemet. Fokus vil være på proaktiv deteksjon av systemustabiliteter og komponentfeil under utvikling, og dermed tillate tidlig intervensjon og forebyggende tiltak for å unngå avbrudd.

Dette hovedmålet er videre spesifisert gjennom fire definerte delmål:

D1: Utvikle algoritmer for å gjenkjenne og identifisere karakteristiske strøm- og spenningsbølgeformer forårsaket av degradering eller skadede kraftsystemkomponenter.

D2: Utvikle algoritmer for gjenkjenning og prediksjon av transiente "wide-area"-ustabiliteter og underforliggende årsaker

D3: Utvikle metoder og krav for sanntids og kontinuerlig innsamling, analyse og visualisering av sensordata fra flere kilder, inkludert PMU og PQA

D4: Undersøke tilleggsverdien av sensordata fra integrering av forskjellige kilder med komplementære egenskaper.

Siden prosjektsøknaden er skrevet på engelsk, og hoved-/delmålene over er oversatt til norsk fra den opprinnelige prosjektsøknaden som prosjektet bygger på, er de opprinnelige målene gjengitt i Figur 1.

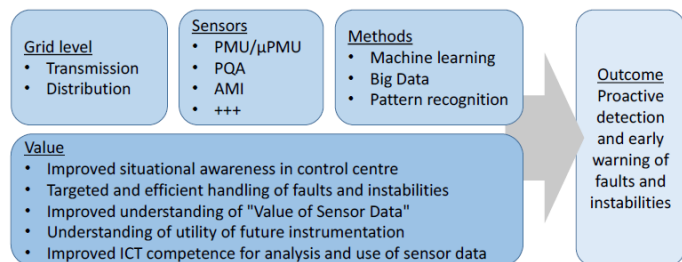
I "kapittel 4 Måloppnåelse" finnes en gjennomgang av måloppnåelsen for hovedmål og delmål, og i resultatseksjonen (kapittel 3) vil det bli referert til hvilket delmål hvert arbeid refererer til.

Primary objective:

Develop and validate new models and tools to improve situational awareness as well as system and component state estimation in the transmission system. Focus will be on proactive detection of system instabilities and incipient component failure, thus allowing for early intervention and mitigating actions to avoid service disruptions.

Secondary objectives:

1. Develop algorithms for recognition and identification of characteristic power and current waveform distortions caused by degrading or damaged power system components.
2. Develop algorithms for recognition and prediction of transient wide-area instabilities, and identification of underlying root causes.
3. Establish methods and requirements for real-time and continuous collection, analysis and visualization of sensor data from multiple sources, including PMU and PQA.
4. Establish knowledge of and guidelines for the added value of sensor data by integration of different sources with complementary capabilities.



Figur 1: Opprinnelige mål (objectives) for prosjektet slik som de er formulert i prosjektsøknaden som prosjektet bygger på.

1.1 Innhold og struktur for rapporten

Denne rapporten er en sluttrapport for prosjektet, og presenterer overordnede mål, organisering (inklusive økonomi), resultater og noen tanker rundt potensiell videreføring av arbeidet. Resultatseksjonen presenterer resultater svært kortfattet, og støtter seg på leveranser som er produsert i løpet av prosjektet. Dette er i stor grad konferanse- og journalartikler, masteroppgaver, blogginnlegg/populærvitenskapelige artikler og kode som er produsert eller videreutviklet under prosjektet.

En oversikt over leveransene i prosjektet finnes i kapittel 6.

2 Prosjektstruktur

Dette kapittelet gir en kort oppsummering av prosjektets deltagere og arbeidspakkestruktur.

2.1 Organisasjon og deltagere

EarlyWarn har vært organisert som et KSP-prosjekt i avdeling Energisystemer i SINTEF Energi AS, med Christian Andresen som prosjektleder. Prosjektet har hatt deltagelse fra NTNU (Institutt for datateknologi og informatikk og Institutt for elkraftteknikk) og fra SINTEF Digital (avdeling Software and Service

Innovation). En rekke industriaktører har støttet prosjektet, og konsortiet inkluderer Statnett, Lyse Elnett, Nettalliansen, Tensio TN, Haugaland Kraft Nett og Hydro Energi AS. Prosjektet er støttet av Norges Forskningsråd gjennom deres program EnergiX, gjennom prosjektnummer "268193 – EarlyWarn – Proactive detection and early warning of incipient power system failure".

2.2 Arbeidspakker og fremdriftsplan

Prosjektet er delt inn i 5 tematiske arbeidspakker pluss en administrativ pakke og to PhD-pakker, dette er illustrert i Figur 2. Figuren viser også overordnet fremdriftsplan for prosjektet. Årlige arbeidsplaner har vært utarbeidet og godkjent av styringskomiteen i forkant av hvert år. Det har også vært halvårlige styringskomitemøter for å vurdere status for prosjektet mellom hver ny årsplan.

WP1 – Data Inventory: Arbeidspakken har hovedsakelig omhandlet oversikt over og tilrettelegging av tilgjengelige datakilder. En sommerstudent (senere masterstudent) hadde i oppgave å skrive programkode for formattering av kildedata til dataserier for bruk til maskinlæring. Dette er programvaren Dynamic Dataset Generator (DDG) som er tilgjengelig for partnerne i prosjektet. Denne programvaren har i løpet av prosjektet blitt videreutviklet.

WP2 – State-of-the-art: Arbeidspakken har som hovedoppgave å danne oversikt over hva som er state-of-the-art innen tidlig varsling av hendelser med bruk av datadrevne metoder. Studien avdekket at det meste av litteraturen tilgjengelig omhandlet karakterisering av hendelser og i mindre grad varsling av kommende hendelser. Jevnlige litteratursøk har blitt gjennomført etter at arbeidspakken ble avsluttet for å avdekke mulig utvikling. Disse litteratursøkene er godt gjengitt i masteroppgavene sitert under.

WP3 – Anomaly detection: Arbeidspakken er en av de største arbeidspakkene, og omhandler metoder for predikering av uønskede hendelser. Et vidt spekter av metoder er benyttet, og en rekke publikasjoner er skrevet rundt resultatene. Disse er referert til under. Metodene er validert gjennom pilotstudie i tett samarbeid med PhD #2.

WP4 – WACS monitoring: Arbeidspakken omhandler wide-area-control-systems og har hatt fokus på effektpendling over større områder. Både deteksjon og prediksjon av disse, samt utvikling av dempertilsetser for å korrigere/forebygge svingninger. Arbeidet er tett knyttet til PhD #1.

WP5 – Combination of Data Sources: Arbeidspakken har sett på mulige gevinster ved å kombinere forskjellige datakilder for å øke treffsikkerheten til metodene, og særlig metodene utviklet i WP3. Denne arbeidspakken har også vist vei mot mulige valg for videreføring av arbeidet i EarlyWarn.

Activity	Deliverables/Milestones ^(b)															
	2017		2018				2019				2020				2021	
	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Project Management		P ₁	P ₂				P ₃				P ₄				P ₅	R ₁
Data Inventory (WP1)				M ₁												
State-of-the-art (WP2)					J _{1,2}											
Anomaly detection (WP3)							C ₁				C ₂ /M ₂			J ₃		
WACS monitoring (WP4)								C ₃				C ₄ /M ₃			J ₄	
Comb. Data source (WP5)													C ₅			J ₅ , R ₂
PhD #1 NTNU				P _{PhD}			D			D			D	T		
PhD #2 NTNU						P _{PhD}				D			D		D	T

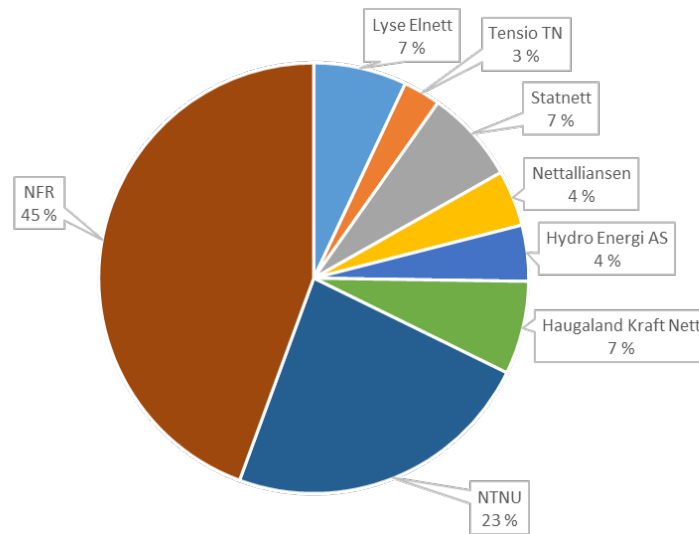
Figur 2: Overordnet arbeidspakkestruktur og fremdriftsplan for EarlyWarn.

2.3 Økonomi

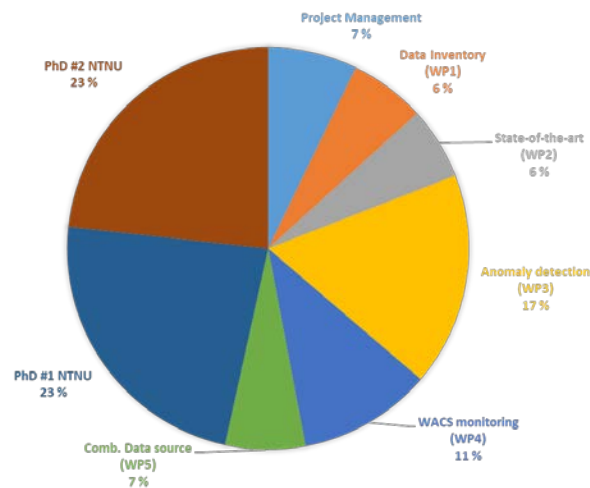
Prosjektet har hatt et totalbudsjett på 14 268 kNOK. Budsjettet er detaljert per år og partner i Figur 3, fordelingene er også detaljert i Figur 4, Figur 5 og Figur 6. I løpet av prosjektperioden har Haugaland Kraft Nett og Hydro Energi AS tiltrådt prosjektet som partnere. Prosjektet har hatt jevnt pådrag over prosjektperioden og avsluttes svært nært budsjett.

Kostnader	2017	2018	2019	2020	2021	Totalt
SINTEF Energi	400	1789	1438	1539	570	5736
SINTEF Digital	17	466	481	235	175	1374
PhD 1 NTNU		1110	1099	1125		3334
PhD 2 NTNU		530	1099	1125	580	3334
NTNU Prof. Tid	50	100	100	100	40	390
Internasjonalt samarbeid		30	40	30		100
Totalt	467	4025	4257	4154	1365	14268
Finansiering	2017	2018	2019	2020	2021	Totalt
Lyse Elnett	210	250	250	250	40	1000
Tensio TN	85	100	100	100	15	400
Statnett	210	250	250	250	40	1000
Nettalliansen	125	150	150	150	25	600
Hydro Energi AS		75	175	175	175	600
Haugaland Kraft Nett		250	250	250	250	1000
NTNU		1075	1113	1146	0	3334
NFR	340	1880	1961	2029	124	6334
Totalt	970	4030	4249	4350	669	14268
NFR Finansieringsrate	0,35	0,47	0,46	0,47	0,19	0,44

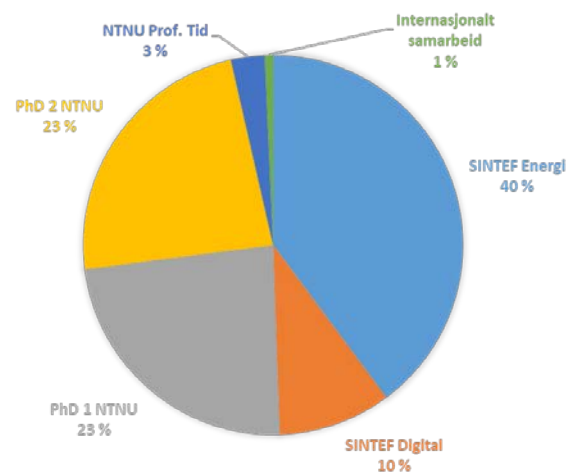
Figur 3: Totalbudsjett for EarlyWarn inklusive kostandfordeling og finansieringsfordeling per partner.



Figur 4: Finansiering per partner



Figur 5: Kostnad per arbeidspakke



Figur 6: Kostnad per partner

3 Resultater

Dette kapittelet gir en oversikt over de resultatene som er frembrakt i prosjektet. Denne rapporten støtter seg sterkt på publikasjoner og andre leveranser som er gjennomført i løpet av prosjektperioden, og vil dermed ikke gå i detalj på noen av resultatene. Rapporten refererer til de detaljerte arbeidene hvor resultatene er beskrevet, og leseren refereres til disse for detaljer rundt et gitt resultat.

3.1 Oversikt over arbeider

Gjennom prosjektperioden har prosjektet levert:

- 2 PhD'er (begge kandidatene har PhD-perioder som strekker seg utover prosjektets levetid. PhD-oppgavene til hver kandidat vil bli tilgjengeliggjort for partnerne når de er tilgjengelige.)
- Masterstudenter (3 masteroppgaver)
- 2 sommerstudenter
- 4 journalartikler og 10 konferanseartikler (10 akseptert og 4 under utarbeidelse eller review når denne rapporten skrives)
- 3 Blogginlegg/populærvitenskapelige artikler i bransjetidsskrift/webinarer
- Programvare
- 4 Prosjektnotater
- Avslutningsrapport
- Det er avholdt:
 - Oppstartsmøte i plenum
 - Fysisk dedikerte oppstartsmøter med hver partner
 - 6 styringsgruppemøter med samtlige partnere
 - 12 statusmøter med samtlige partnere
 - Avslutningsmøte med samtlige partnere

3.2 PhD-arbeider

To PhD-kandidater har arbeidet på prosjektet, begge med oppstart i 2018. Begge kandidatene har PhD-perioder som strekker seg utover prosjektets levetid, og PhD-oppgaver er derfor ikke tilgjengelig for disse kandidatene når denne rapporten skrives. Disse vil bli tilgjengeliggjort for partnerne når dette er mulig.

Torfinn Tyvold (<https://www.ntnu.no/ansatte/torfinnt>) er stipendiat ved Institutt for datateknologi og informatikk ved NTNU og har hatt Heri Ramampiaro og Helge Langseth som veiledere og kontaktpersoner. Torfinn har hovedsakelig arbeidet med prediksjon av uønskede hendelser i nettet basert på PQA-data og ved hjelp av datadrevne metoder. Han har arbeidet med utvikling av prediktive modeller, programvaren som prosjektet leverer (DDG og AHA) og tett med piloten hos Tensio TN. Detaljer om programvaren DDG og AHA gis i kapittel 3.5.

Hallvar Haugdal (<https://www.ntnu.no/ansatte/hallvar.haugdal>) er stipendiat ved Institutt for elkraftteknikk ved NTNU og har hatt Kjetil Uhlen som veileder. Hallvar har arbeidet hovedsakelig med wide-area monitoring and control (WAMC), og har hovedsakelig benyttet PMU-data til identifisering og karakterisering av uønskede fenomener samt forebyggende/korrektive tiltak på systemnivå.

Begge PhD-kandidatene har deltatt aktivt i prosjektet og presentert arbeider fortløpende i styringskomitémøter, statusmøter og møter i prosjektgruppen. Arbeidet er dokumentert gjennom programvare som er tilgjengeliggjort for partnerne (se punkt under) og publikasjoner, i tillegg til de direkte presentasjonene av resultatene. Leseren refereres til listen over publikasjoner under og NTNU sine hjemmesider for oppdatert liste over publikasjoner.

3.3 Masteroppgaver

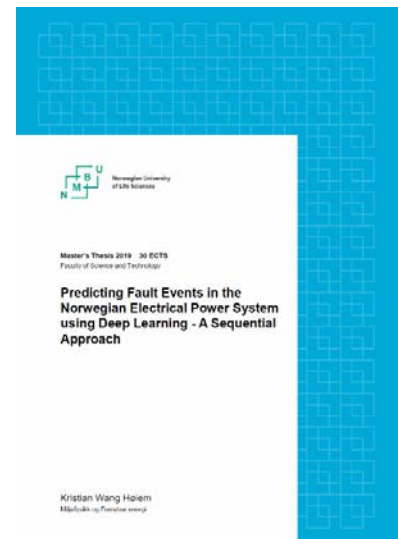
Til sammen 4 masterstudenter har arbeidet i EarlyWarn og skrevet 3 masteroppgaver (den ene er en fellesoppgave for to studenter). Studentene har gjort betydelig arbeid innen oppdatering av state-of-the-art innenfor fagfeltet, uttesting av metodiske valg, utvikling av programvare og analyse av data. En kort oppsummering av oppgavene og innhold er gitt under. Oppgavene blir inkludert i leveransen til partnerne.

3.3.1 Masteroppgave Kristian Wang Høiem

Oppgaven ble levert ved NMBU i mai 2019 med tittelen "Predicting Fault Events in the Norwegian Electrical Power System using Deep Learning - A Sequential Approach". Fokuset var utforskende dataanalyse, tilrettelegging av data for trening av maskinlæringsmodeller, skriving av programvare for uthenting av feillister og vurdering av forskjellige maskinlæringsmetoder. Kristian har oppdatert programvare for uthenting av feillister som er tilgjengelig for partnerne i prosjektet, og har laget oversikter over antall hendelser på de forskjellige nodene benyttet i prosjektet. Veileder var Heidi Samuelsen Nygård (NMBU) og bi-veileder var Christian Andresen (SINTEF Energi) og Bendik Torsæter (SINTEF Energi).

Oppgaven er tilgjengelig på: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2608290/h%C3%B8iem2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

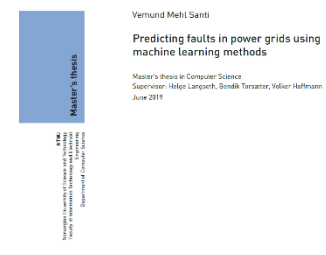
Kristian har arbeidet som Energitraineé etter sin masterutdanning, og har fortsatt arbeidet i EarlyWarn som trainee hos SINTEF Energi. Arbeidet har blant annet blitt dokumentert i artikler under, som gir kvantitative sammenligninger mellom forskjellige maskinlæringsmetoder.



3.3.2 Masteroppgave Vemund Santi

Oppgaven ble levert ved NTNU i juni 2019 med tittelen "Predicting faults in power grids using machine learning methods". Fokuset var trening av maskinlæringsmodeller, vurdering av treningsparametere for prediksjon, optimalisering av metaparametere for maskinlæringsmodellene og variasjon av varslingshorisonten. Vemund gjennomførte studier for innholdet av harmoniske komponenter i PQA-data benyttet til prediksjon og undersøkte metoder for å benytte disse til prediksjon av uønskede hendelser. Hans arbeid resulterte i publikasjon av én av artiklene referert til under.

Oppgaven er tilgjengelig på: [NTNU Open: Predicting faults in power grids using machine learning methods](#)



3.3.3 Masteroppgave Halvor Kvernes Meen og Camilla Jahr

Oppgaven ble levert ved NTNU i juni 2020 og hadde tittelen "Power Wave Analysis and Prediction of Faults in the Norwegian Power Grid". Fokus var trening og vurdering av treningsparametere for prediksjon ved hjelp av maskinlæringsmodeller. Halvor og Camilla testet ut en rekke metoder som involvert benyttelse av selve bølgeformen ved forskjellige tidsoppløsninger, fourier-transform av tidssignalene og wavelett-transform av signalene. De gjennomførte utstrakte tester av hyperparametere for maskinlæringsmodellene og oppdaterte state-of-the-art-litteratursøket. Veileder var Helge Langseth (NTNU).



Halvor Kvernes Meen and Camilla Jahr
Power Wave Analysis and Prediction of
Faults in the Norwegian Power Grid
Master's thesis in Computer Science
Supervisor: Helge Langseth
June 2020

Oppgaven er tilgjengelig på: https://github.com/halkver/NTNU-Project/blob/master/NTNU_Project.pdf



3.4 Journal og konferanse artikler

Prosjektet har levert en rekke journal- og konferanseartikler. Ved prosjektets slutt er det godkjent 10 artikler og 4 artikler er enten under utarbeidelse eller avventer review. Siden PhD-kandidatene står for en stor del av artikkelproduksjonen, og disse har en PhD-periode som strekker seg utover prosjektperioden, er ikke dette unaturlig. Alle artikler som blir akseptert etter prosjektperioden er slutt vil bli rapportert og tilgjengeliggjort for partnerne. Alle aksepterte artikler ved prosjektslutt vil bli vedlagt i dokumentasjonen.

Under følger en kort oppsummering av hver enkelt artikkel med publiseringskanal, link til publikasjonen og gjengivelse av abstrakt fra artikkelen som beskriver innholdet. Alle artikler som blir akseptert vil bli distribuert til partnerne selv etter prosjektslutt.

3.4.1 Fault Detection and Prediction in Smart Grid

Publiseringskanal: 2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)

Abstract: —Modern society is to a larger and larger extent dependant on electric energy, and hence the reliance on and utilization of the electric grid is increasing steadily. At the same time the production and consumption patterns are changing from large centralized generation of electric power and pure consumers to distributed generation (DG) and more complex consumers. This transition causes higher stress on an aging infrastructure and major investments are required over the coming years to maintain a reliable supply of electric energy. Better monitoring solutions and predictive methods can increase the possible utilization of the existing grid and reduce the fault frequency. This paper presents some current challenges in the grid and a possible monitoring solution and fault prediction method. This is exemplified with statistics and field-measurements from the Norwegian power grid.

Link: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2579059/Haugdal-Fauld+Detection.pdf?sequence=1>

3.4.2 Mode Shape Estimation using Complex Principal Component Analysis and k-Means Clustering

Publiseringskanal: 2019 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA)

Abstract: We propose an empirical method for identifying low damped modes and corresponding mode shapes using frequency measurements from a Wide Area Monitoring System. The method consists of two main steps: Firstly, Complex Principal Component Analysis is used in combination with the Hilbert Transform and Empirical Mode Decomposition to provide estimates of modes and mode shapes. The estimates are stored as multidimensional points. Secondly, the points are grouped using a clustering algorithm, and new averaged estimates of modes and mode shapes are computed as the centroids of the clusters. Applying the method on data resulting from a non-linear power system simulator yields estimates of dominant modes and corresponding mode shapes that are similar to those resulting from modal analysis of the linearized system model. Encouraged by the results, the method is further tested with real PMU data at transmission grid level. Initial results indicate that the performance of the proposed method is promising.

Link: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2647776>

3.4.3 Incipient Fault Prediction in Power Quality Monitoring

Publiseringskanal: 2019 CIRED Conference Proceedings.

Abstract: European and global power grids are moving towards a Smart Grid architecture. Supporting this, advanced measurement equipment such as PQAs and PMUs are being deployed. These generate vast amounts of data upon which machine learning models capable of forecasting incipient faults can be built.

We use live measurements from nine PQA nodes in the Norwegian grid to predict incipient interruptions, voltage dips, and earth faults. After training ensembles of gradient boosted decision trees on spectral decompositions of cycle-by-cycle voltage measurements, we evaluate their predictive performance. We find that interruptions are easiest to predict (95 % true positive, 20 % false positives). Earth faults and voltage dips are more challenging. Our models outperform naïve classifiers. We have explored forecast horizons of up to 40 seconds, but we have indications that forecast horizons of at least a few minutes are feasible.

Link: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2618627>

3.4.4 Power Oscillation Monitoring using Statistical Learning Methods

Publiseringskanal: 2019 IEEE Milan PowerTech.

Abstract: This paper describes development and testing of a method for estimation of electromechanic modes and corresponding mode shapes from frequency or voltage angle measurements in Wide Area Monitoring Systems. The method uses Complex Principal Component Analysis to perform a decomposition of the dynamics captured in the measurements, reducing any detected oscillations into sets of parameters. The numerous sets of parameters generated after a time period can be interpreted as points or observations in high-dimensional space, on which a clustering algorithm can be applied to pinpoint areas where high densities of points are accumulated. Results show that highly accurate estimates of oscillatory modes in the power system and their mode shapes can be derived by averaging the point observations belonging to each cluster. Important development described in this paper includes the use of voltage angle as input and testing on a medium size power system simulation model with synchronized measurements from 44 nodes. Furthermore, introduction of the DBSCAN clustering algorithm shows very promising results when applying the method to recorded phasor measurements from the Nordic power system.

Link: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2632851>

3.4.5 Estimation of oscillatory mode activity from PMU measurements

Publiseringskanal: 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe).

Abstract: We propose a method for estimating the activity of oscillatory modes in power systems. The frequencies and mode shapes of the modes of interest are assumed to be known beforehand, either from linear modal analysis or from empirical mode estimation methods, and are used in combination with measurements from Phasor Measurement Units to estimate the instantaneous mode excitation in terms of amplitude and phase. The estimation is carried out using non-linear least squares to fit a set of curves to the measured data. Combining mode shapes with measured data allows the activity to be estimated from only a low number of consecutive measurement snapshots, resulting in a problem of low computational complexity that can be solved fast enough for the method to run online. The purpose of estimating the mode activity is, firstly, to contribute to increased situational awareness and facilitate methods that build further upon this information, and secondly, to be able to synthesize signals that can serve as input to controllers for power oscillation damping. It is expected that using this excitation measure will result in a more robust controller that is less prone to disturbances and noise.

Link: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2729724>

3.4.6 Comparative study of event prediction in power grids using supervised machine learning methods

Publiseringskanal: 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe).

Abstract: There is a growing interest in applying machine learning methods on large amounts of data to solve complex problems, such as prediction of events and disturbances in the power system. This paper is a comparative study of the predictive performance of state-of-the-art supervised machine learning methods. The event prediction models are trained and validated using high-resolution power quality data from measuring instruments in the Norwegian power grid. The recorded event categories in the study were voltage dips, ground faults, rapid voltage changes and interruptions. Out of the tested machine learning methods, the Random Forest models indicated a better prediction performance, with an accuracy of 0.602. The results also indicated that rapid voltage changes (accuracy = 0.710) and voltage dips (accuracy = 0.601) are easiest to predict among the tested power quality events.

Link: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2680094>

3.4.7 Clustering and Dimensionality-reduction Techniques Applied on Power Quality Measurement Data

Publiseringskanal: 2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)

Abstract: The power system is changing rapidly, and new tools for predicting unwanted events are needed to keep a high level of security of supply. Large volumes of data from the Norwegian power grid have been collected over several years, and unwanted events as interruptions, earth faults, voltage dips and rapid voltage changes have been logged. This paper demonstrates the application of clustering and dimensionality-reduction techniques for the purpose of predicting unwanted events. Several techniques have been applied to reduce the dimensionality of the datasets and to cluster events based on analytical features, to separate events containing faults from a normal situation. The paper shows that the developed predictive model has some predictive capability when using balanced datasets containing similar number of fault events and non-fault events. One of the main findings, however, is that this predictive capability is significantly reduced when using unbalanced datasets. Thus, the development of an accurate predictive model based on normal power system conditions, i.e. an unbalanced dataset of events and non-events, is a topic for further research.

Link: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9203294>

3.4.8 Impact of the Temporal Distribution of Faults on Prediction of Voltage Anomalies in the Power Grid

Publiseringskanal: 2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)

Abstract: Is it possible to reliably predict voltage anomalies in the power grid minutes in advance using machine learning models trained on large quantities of historical data collected by power quality analysers (PQA)? Very little previous research has been done on this topic. To investigate whether this is possible a machine learning model was developed that attempts to predict voltage anomalies 10 minutes in advance based on the presence of early warning signs in the preceding 50 minutes. The model was trained on

voltage data collected from 49 measuring locations in the Norwegian power grid. Although results were inconclusive, it was observed that the time that has passed since the previous fault at the same location is a major factor to consider when estimating the probability that a new fault is imminent. It was observed that the probability that a new fault is imminent is proportional to the logarithm of the time passed since the previous anomaly. This means that the risk of a new anomaly is drastically reduced as more time passes since the previous anomaly. This is important to take into consideration when attempting to develop a model that estimates the probability that a new fault is imminent.

Link: <https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/1832820/>

3.4.9 Impact of seasonal weather on forecasting of power quality disturbances in distribution grids

Publiseringskanal: 2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)

Abstract: Power supply disruptions, including short-time disturbances, can lead to large direct and indirect financial losses. The ability to predict the risk of these disturbances allows for preventive actions and increases the reliability of the supply. This paper investigates the impact of using seasonal data of combined common weather conditions on the power quality prediction in distribution grids. Our main contribution consists of weather-based predictive models for three types of events that frequently occur in these grids, as well as an analysis of the influence of two training approaches: with either seasonal or all-year data, on their performance. All developed models score higher than arbitrary guessing; in several instances the improvement is considerable. It is demonstrated that in some cases the models improve when the training data is limited to a subset corresponding to a particular meteorological season. Examining variable importance values and distributions of the models' data, it is shown that this situation takes place particularly when weather conditions correlated with the occurrence of power grid events vary across seasons.

Link: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9203492>

3.4.10 The value of multiple data sources in machine learning models for power system event prediction

Publiseringskanal: 2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)

Abstract: We describe a method for assessing the value of additional data sources used in the prediction of unwanted events (voltage dips, earth faults) in the power system. Using this method, machine learning models for event prediction using (combinations of) different data sources are developed. The value of each data source is the improvement in model performance it brings. In addition, feature importance is retrieved using SHapley Additive exPlanations (SHAP). The methodology is applied to models that predict faults based on power quality and weather data. We find that models that combine sources outperform models using either in isolation. They predict ground faults and voltage dips with AUCs (Area Under Curve) of 0.74 and 0.80, respectively. Meteorological data appears more valuable than power quality data and the most important features are dew point, month of the year, and the power spectral density at 4.7 Hz.

Link: Paper will be public and linkable in September 2021.

3.4.11 (Not yet accepted) Live Prediction of Power Quality Anomalies

I tillegg til de ovennevnte artiklene er det sendt inn et fullt manuskript som omhandler piloten gjennomført hos Tensio TN. Denne artikkelen beskriver en fullstendig modell for predikering, dataflyt for trening av modellen og gjennomføring av predikasjoner, samt prediksjonsevnen til modellen. Artikkelen er under innsendelse, men vedlegges i materialet som leveres til partnerne siden den gir en god oversikt over resultatene innen anvendelse av de prediktive modellene som er utviklet i prosjektet.

Abstract: A model for live prediction of power quality anomalies has developed and tested on historical and live data from the Norwegian power grid. The model continuously predicts, with low latency, the probability that a fault will occur within the next few minutes, and sounds an alarm if the probability crosses a pre-determined threshold. The steps of the model workflow are presented in detail together with numerical results utilizing field data and case-studies showcasing different aspects of the model's behaviour. The main finding was that the model struggled with predicting the first fault in each fault cluster, but was able to catch most non-initial faults in each cluster because of the temporal clustering that faults exhibit.

3.5 Programmer og pilotkode

Prosjektet har utviklet en stor mengde programvare og pilotkode for å generere treningsdatasett fra de lagrede PQA- og PMU-dataene, og for å teste forskjellige maskinlæringsmodeller med varierende input. Det er viktig å merke seg at dette er forskningsprogramvare og pilotsystemer, og de er ikke designet eller testet for operasjonell bruk.

For å sikre konfidensiell tilgang til programvare for alle partnere er det lastet opp versjoner til SINTEF sin plattform for deling av kode: `code.sintef.no`. Det er behov for innloggingsautentifikasjon for å logge seg inn der, og dette fås ved å kontakte prosjektleder. Ved innlogging kan programvaren lastes ned som et vanlig git-repository. Det ligger også ved programvare i leveransepakken fra prosjektet.

Det er lastet opp 5 forskjellige programvarepakker:

3.5.1 Automatisk Hendelsesanalysator (AHA)

Denne programvaren søker i databaser fra Elspec PQA-instrumenter for å identifisere forskjellige hendelser i tidsseriene. Det er dermed mulig å hente ut lister over antall og tidspunkt for eksempel for jordfeil fra et bestemt instrument. Prosjektet har bygget på en tidligere versjon av AHA og oversatt denne fra Matlab til Python. I tillegg er det tilført en del ekstra funksjonalitet som blant annet inkluderer metadata for hver hendelse, bedre eksportmuligheter for hendelseslister og brukerdefinering av hendelsestyper.

3.5.2 Dynamisk Dataset Generator (DDG)

Denne programvaren genererer treningsdatasett basert på hendelseslister. Det er lagt opp til at lister fra AHA kan benyttes direkte, men brukeren kan selv spesifisere sine egne typer hendelser. Programvaren leser data fra database med PQ-data fra en Elspec-database. Brukeren spesifiserer hvilke parametere, varighet og oppløsning treningsdatasettene skal ha. Brukeren spesifiserer også hvor mange treningssett

som skal genereres som ikke er knyttet til uønskede hendelser og hvor langt unna definerte hendelser disse skal ligge i tid.

3.5.3 Pilotkode for pilotering hos Tensio TN (Demo)

Denne programvaren er den som er benyttet til å gjennomføre piloten hos Tensio TN. Den er en komplett kode for innhenting, prosessering og presentasjon av resultat i Grafana. Det er et utgangspunkt for eventuelle DSO'er som ønsker å implementere et slikt varslingsystem, men tilpassing til lokal løsning bør påregnes.

3.5.4 Kraftsystemsimulator (Simulator)

Dette er en simulering av et kraftsystem med flere generatorer og linjer. Generatorene kan settes opp til å svinge mot hverandre via justering av parameterne i systemet. Effekten av forskjellige dempetilsatser kan studeres, og tilsatsenes parametere kan justeres for å se effekten av dette. Simulatoren har et godt utviklet grafisk grensesnitt og kan kjøres i sanntid.

3.5.5 API for nedhenting av værdata (Weather)

Dette er et enkelt API for nedhenting av værdata fra MET.no. Værdata er stadig mer utbredt som input til prediksjonsverktøy, og effektiv nedhenting av slike data blir stadig viktigere både for trening av operasjonell bruk.

3.6 Notater og andre populærvitenskapelige resultater

Prosjektet har produsert en rekke notater og populærvitenskapelige artikler, samt et webinar. Selv om de fagfellovderte artiklene har tatt betydelig mer ressurser, har det vært en målsetning for prosjektet også å levere mer populærvitenskapelige fremstillinger.

Under følger en kort oppsummering av disse leveransene med link. Notatene finnes i dokumenteringspakken som hver partner får.

Som en oppsummering for prosjektet er webinarer gitt som en del av Smartgridsenteret sin webinarserie 16. juni 2021 velegnet. Videre er bloggen som er skrevet en god oversikt over resultatene i prosjektet.

3.6.1 Notater

- AN 18.12.26 Datagrunnlag og metode for prediksjon av feilhendelser i kraftsystemet
- AN 18.12.50 Dynamisk datasettgenerator (DDG)
- AN 18.12.51 Gapanalyse for EarlyWarn-prosjektet
- AN 21.12.26 Retningslinjer for implementering av feildeteksjonssystem

3.6.2 Populærvitenskapelige artikler og presentasjoner

- Brukermøte spenningskvalitet 2018
- Brukermøte spenningskvalitet 2019
- The Great Challenge (Olavshallen, 2019)
- Seminar ved DTU januar/februar 2019 av Hallvar Haugdal
- Artikkel i Energiteknikk april 2019
- Blogg om EarlyWarn på SINTEF sine nettsider
- Artikkel i fagbladet Energi (EuroPower)
- Produksjonsteknisk konferanse (Energi Norge, 2020)
- Blogg på SINTEF sine web-sider: <https://blogg.sintef.no/tag/earlywarn/>
- The Norwegian Smartgrid Center – Webinarserie 16. juni 2021 ([Webinarserie juni 2021: Tidlig varsling av hendelser i kraftsystemet ved bruk av stordataanalyse - YouTube](#))

4 Måloppnåelse

Prosjektet har arbeidet gjennom hele prosjektperioden for å oppfylle målene som er spesifisert i prosjektbeskrivelsen. Hovedmål og delmål er listet opp i kapittel 1, men er gjentatt under med en vurdering av grad av måloppnåelse inkludert. Det er referert til spesifikke arbeider som beskriver i detalj arbeidet innenfor hvert målområde.

Prosjektets hovedmål har vært:

Utvikle og validere nye modeller og verktøy for forbedret situasjonsforståelse, samt system- og komponenttilstandsestimering i transmisjonssystemet. Fokus vil være på proaktiv deteksjon av systemustabiliteter og komponentfeil under utvikling, og dermed tillate tidlig intervensjon og forebyggende tiltak for å unngå avbrudd.

Vurdering av måloppnåelse: Prosjektet har utviklet og testet modeller for prediksjon av ustabiliteter og feil med tilhørende verktøy for generering av datasett og innhenting av relaterte data. Modellene har blitt testet både i operativt miljø og på historiske data for å vurdere deres prediktive evne. Selv om modellene har demonstrert statistisk signifikant prediktiv evne innen prediksjon av hendelser og ustabiliteter før de inntreffer, har det ikke vært mulig å demonstrere tilstrekkelig treffsikkerhet til at de kan benyttes operasjonelt. En detaljert beskrivelse av treffsikkerheten til modellen og deres generelle oppførsel er utførlig beskrevet i artikkelutkastet "Live Prediction of Power Quality Anomalies" som er inkludert i materialet som er distribuert til partnerne.

Dette hovedmålet er videre spesifisert gjennom fire definerte delmål:

D1: Utvikle algoritmer for å gjenkjenne og identifisere karakteristiske strøm- og spenningsbølgeformer forårsaket av degradering eller skadede kraftsystemkomponenter.

Vurdering av måloppnåelse: Prosjektet har undersøkt bølgeformer og karakteristiske signaturer knyttet til degradering og skadede komponenter ut fra de data og hendelser som har vært tilgjengelig for prosjektet. Statistisk analyse av 1000+ hendelser er gjennomført ved statistisk analyse og trening av maskinlæringsmodeller basert på selve bølgeformen ved forskjellig frekvensoppløsning, ved Fourier-transform og ved wavelett-transform. Detaljerte resultater finnes i masteroppgaven til Halvor Kvernes Meen og Camilla Jahr, og i de publiserte artiklene "Clustering and Dimensionality-Reduction Techniques Applied on Power Quality Measurement Data" og "Impact of the Temporal Distribution of Faults on Prediction of Voltage Anomalies in the Power Grid", som er inkludert i materialet som er distribuert til partnerne.

D2: Utvikle algoritmer for gjenkjenning og prediksjon av transiente "wide-area"-ustabiliteter og underforliggende årsaker

Vurdering av måloppnåelse: Prosjektet har utviklet algoritmer for gjenkjenning av transiente ustabiliteter og testet disse på feltdata. Det er utviklet og testet dempningstilsatser for forebygging/dempning av slike ustabiliteter. Detaljerte resultater er beskrevet i de publiserte artiklene "Mode Shape Estimation using Complex Principal Component Analysis and k-Means Clustering", "Power Oscillation Monitoring using Statistical Learning Methods" og "Estimation of oscillatory mode activity from PMU measurements", som er inkludert i materialet som er distribuert til partnerne.

D3: Utvikle metoder og krav for sanntids og kontinuerlig innsamling, analyse og visualisering av sensordata fra flere kilder, inkludert PMU og PQA

Vurdering av måloppnåelse: Prosjektet har utviklet og demonstrert metoder for innhenting, analyse og visualisering av sensordata fra flere kilder. Dette er blant annet beskrevet i prosjektnotatene, i artikkelutkastet "Live Prediction of Power Quality Anomalies" og gjennom eksempelkode som er tilgjengelig for partnerne.

D4: Undersøke tilleggsverdien av sensordata fra integrering av forskjellige kilder med komplementære egenskaper.

Vurdering av måloppnåelse: Prosjektet har undersøkt tilleggsverdien av sensordata fra inkludering av komplementære kilder. Hovedsakelig har dette vært meteorologiske data som er inkludert, og modeller er trent på kombinerte datasett. Problemstillingen er diskutert og belyst i de publiserte artiklene "Impact of seasonal weather on forecasting of power quality disturbances in distribution grids" og "The value of multiple data sources in machine learning models for power system event prediction". Kombinering av komplementære datakilder er identifisert som den mest lovende metoden for å øke den prediktive evnen (og dermed treffsikkerheten) til modellene som er utviklet og testet i prosjektet.

Oppsummerende kommentarer for måloppnåelsen til prosjektet:

- Prosjektet har suksessfullt anvendt de metoder som er beskrevet i prosjektforslaget på definert problemstilling og publisert dette på internasjonalt nivå som indikerer robust metodeanvendelse.
- Treffsikkerheten til metodene/modellene som er produsert er testet og kvantifisert gjennom både testing på historiske data og sanntidstesting (begge feltdata). Treffsikkerheten er lavere enn hva som var håpet ved prosjektstart, og for lav til operasjonell anvendelse.
- Det hadde vært ønskelig at prosjektet hadde vært mer spisset mot mer avgrensede problemstillinger og hadde tatt flere datakilder i bruk for å nå disse.
- Prosjektresultatene indikerer at treffsikkerheten kan økes ved inkludering av flere uavhengige kilder.
- Det er et uttalt mål ved Kompetanse- og samarbeidsprosjekt (KSP) fra Norges Forskningsråd å utvikle ny kunnskap og bygge forskningskompetanse som samfunnet eller næringslivet trenger. EarlyWarn har vært svært kompetansehevende innen anvendelse av datadrevne metoder på kraftsystemdata.

5 Mulig videreføring

Som beskrevet i kapittel 4, har kombinasjon av komplementære datakilder blitt identifisert som den mest lovende metoden for å øke treffsikkerheten til metodene som er utviklet. Det er svært mange mulige datakilder som kan kombineres. Derfor må det utvises forsiktighet slik at innføringen av store mengder støy (data uten forklaringsverdi) ikke hindrer utnyttelsen av de kildene som faktisk inneholder prediktiv informasjon. Det er mulig at metodene selv sorterer ut hvilke data som har forklaringsverdi, men dette stiller store krav til data volum og kvalitet. I artikkelen "The value of multiple data sources in machine learning models for power system event prediction" diskuteres både mulige datakilder, deres verdi og en kvantitativ metode for å avgjøre tilleggsverdien av å kombinere datakilder. Dette måles i kvantifisering av prediktiv evne.

Det er flere mulige valg ved en eventuell videreføring av arbeidet i EarlyWarn. Som beskrevet i kapittelet over hadde det vært ønskelig med mer spissing av prosjektet. Slik EarlyWarn er utformet, spenner det over mange spenningsnivå og skiller mellom "wide-area"-overvåkning og mer lokalisert komponentovervåkning. En oppfølger burde ekspandere på datakilder og heller fokusere på gitte spenningsnivå og mer konkrete problemstillinger. Slike kan være spesifikke typer komponentfeil eller spesifikke typer forstyrrelser for sluttbruker. Valg av spesifisering vil være med på å avgjøre hvilke partnere som det vil være naturlig å involvere i et slikt arbeid.

6 Leveranser

Prosjektet leverer en samlet pakke med leveranser til partnerne som dekker alle punkt over. Dette består av:

- 2 doktoravhandlinger (leveres når de er ferdige, PhD-perioden strekker seg utover prosjektperioden for begge PhD'er)
- 3 masteroppgaver (4 masterstudenter)
- 10 godkjente artikler (4 arbeider under utarbeidelse. Leveres når godkjente)
- 4 blogginnlegg/artikler i bransjetidsskrift/webinarer
- Programvare som beskrevet i kapittel 3.5
- Avslutningsrapport og notater