



Kunnskap for en bedre verden

# Resultater fra masteroppgaver tilknyttet IDE-prosjektet

IDE avslutningskonferanse 2024-08-21

Kjell Sand, professor emeritus, Institutt for elektrisk energi, NTNU

# Fem studenter - fire rapporter:

Masteroppgave

Sofie Morud Vågen

Digital tvilling for storskala demonstrasjonsprosjekt vedrørende intelligente distribusjonsnett

Masteroppgave i Energi og Miljø  
Veileder: Kjell Sand  
Juni 2021

NTNU  
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektronikk  
Institutt for elektrifisering

Masteroppgave

NTNU  
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektronikk  
Institutt for elektrifisering

Sofia Jøssang Kerchaoui

Digital tvilling for storskala demonstrasjonsprosjekt vedrørende intelligente distribusjonsnett – med vekt på modellering av automatisk trinnkobler- og batteristyring i svake distribusjonsnett

Masteroppgave i energi og miljø  
Veileder: Kjell Sand  
Juni 2021

NTNU  
Kunnskap for en bedre verden

INSTITUTT FOR ELEKTRISK ENERGI

TET4900 ELEKTRISK ENERGI OG ENERGISYSTEMER - MASTEROPPGAVE

Spenningsregulering i distribusjonsnett med økt integrasjon av solcelleanlegg og endret forbruksmønster

Av:  
Ola Furubaug

Masteroppgave

NTNU  
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektronikk  
Institutt for elektrisk energi

Mathias Aak Berg  
Gard Pedersen

Enhancing the energy efficiency of low voltage distribution grids through active voltage regulation

Masteroppgave i Energi og miljø  
Veileder: Basanta Raj Pokhrel  
Medveileder: Irina Oleinikova, Kjell Sand, Arnt-Magnar Forseth  
Juni 2024

NTNU  
Kunnskap for en bedre verden



Dato : 5.april 2024

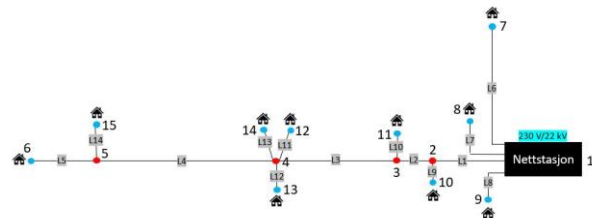
NTNU  
Kunnskap for en bedre verden

# Digitale tvillinger -Viktigste funn

- I svake nett med betydelig innslag av usymmetri mellom faser, gir ikke symmetriske lastflytberegninger (som jo er hovedmetoden brukt i nettanalyser) gode nok simuleringer i forhold til å gjenskape de virkelige forholdene som f.eks. brudd på FoL.
- Kommentar: Før arbeidet startet var hypotesen at symmetrisk lastflyt var tilstrekkelig, slik at utfordringen primært var å modellere ny teknologi (batterier/batteristyring, trinnkoblerstyring...) i tradisjonell lastflyt

# Sofie Vågen

- Målet med masteroppgaven: Å utvikle en digital tvilling som simulerer tilstanden i nettet så nøyaktig som mulig, og dermed kan benyttes til å identifisere brudd på Forskrift om Leveringskvalitet (FoL)
- Leveranser:
  - En digital tvilling som benytter AMS-data og usymmetriske lastflytberegninger implementert i Python.
  - Ulike metoder for identifisering av faserekkefølge basert på AMS-data er implementert og testet på et datasett. Metoder basert på prinsipalkomponentanalyse og k-means clustering er implementert i Python og kan benyttes som verktøy for å estimere faserekkefølgen i et nett ut ifra tidsserier av spenningsverdier fra AMS.

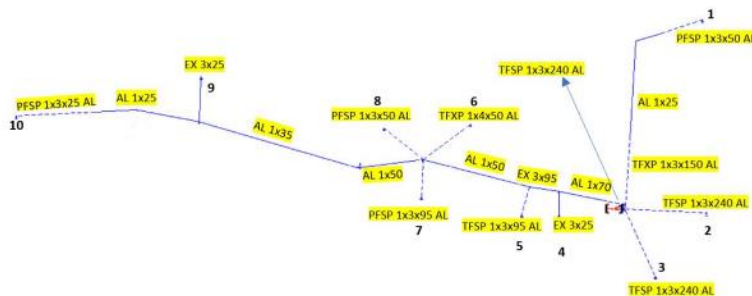


# Konklusjon Sofie Vågens arbeid:

- To av metodene for faseidentifisering gir tilnærmet identiske faserekkefølger.
- Resultatene av lastflytanalyser med disse faserekkefølgene gir kun 0,9 V avvik mellom simulerte og målte linjespenninger i den svakeste delen av nettet i democaset.
- Gitt forutsetningene og begrensningene i datagrunnlaget fra AMS, gir den etablerte digitale tvillingen en god nok representasjon av de fysiske forholdene i caset.
- Den vil derfor være et nyttig verktøy for simuleringer av virkningen av ny teknologi i nett gitt at metodene er implementert i hensiktsmessige verktøy hos nettselskapene.

# Sofia Jøssang Kerchaoui

- En studie av hvordan nettbatterier og hurtige trinnkoblere kan bidra til å løse spenningsutfordringer i et lavspent distribusjonsnett med stort spenningsfall og lav kortslutningsytelse.
- Teknologiene har sammen, og hver for seg, blitt uttestet ved bruk av digitale simuleringer i et av Elvias nettområder. Det aktuelle nettområdet er modellert i simuleringsverktøyet DIgSILENT PowerFactory, hvor reelle nettdata og AMS-data er hentet ut fra NetBas



## For å identifisere nytten av nettbatteri og trinnkobler i det aktuelle nettområdet, ble tre ulike caser studert:

- Optimal styring av tilkoblet nettbatteri ved bruk av kvasi-dynamiske lastflytanalyser.
- Optimal styring av trinnkobleren samt teste ut trinnkoblere innvirkning på nettspenningen simulert over ett døgn.
- Kombinasjon av trinnkobler og nettbatteri i det aktuelle nettområdet.

# Konklusjon

- Automatisk spenningsregulering med trinnkobler ble det beste alternativet for det spesifikke nettområdet, for å oppnå tilfredsstillende spenningskvalitet - laveste spenning simulert tunglastdøgn 211.6 V (symmetriske simuleringer).
- Nettbatteriet bidro også til god spenningsstøtte, men som et resultat av batteriets opplading, ble laveste spenning i symmetriske simuleringer estimert til 207 V.
- Siden høy usymmetri i nettet ble identifisert for det gjeldende nettområdet i prosjektoppgaven er 207 V, som er innenfor FoL, ikke vurdert til å være tilstrekkelig siden det i simuleringen ikke er tatt hensyn til usymmetri.
- Kombinasjonen av trinnkobler og nettbatteri i samme nettområde, førte til at trinnkobleren utførte færre omkoblinger i løpet av døgnet, samtidig som at batteriet brukte mindre av sin kapasitet. På denne måten ble det vist at de to teknologiene kombinert, kan dra nytte av hverandre.



# Ola Furuhaug

- Undersøke hvordan AMS måledata fra nettet kan brukes til for å forbedre spenningsreguleringen i distribusjonsnett med økt integrasjon av solcelleanlegg og endret forbruksmønster (EV etc.)
- Tiltak 1 - Foreslå metode for å finne optimal innstilling av manuell trinnkobler for distribusjonstransformatorer, basert på spenningsmålinger i distribusjonsnettet og hos kundene.
- Tiltak 2 - Foreslå strategi for spenningsregulering av automatisk trinnkobler for krafttransformator som også hensyntar toveis effektflyt spenningsstigning i de underliggende lavspenningsnettene.
- Uttesting av utviklede strategier i et nettområde hos Glitre

# 3-trinns metode som utnytter eksisterende infrastruktur i nettet

Trinn 1. Kartlegge eksisterende spenningsforhold i alle nettstasjoner/lavspenningsnett som forsynes fra samme krafttransformator og estimer «Karakteristiske spenningsparametere» til bruk i optimaliseringen

Trinn 2. Beregne optimalt reguleringsuttak (trinn) for manuelle trinnkobleren for nettstasjoner, basert på:

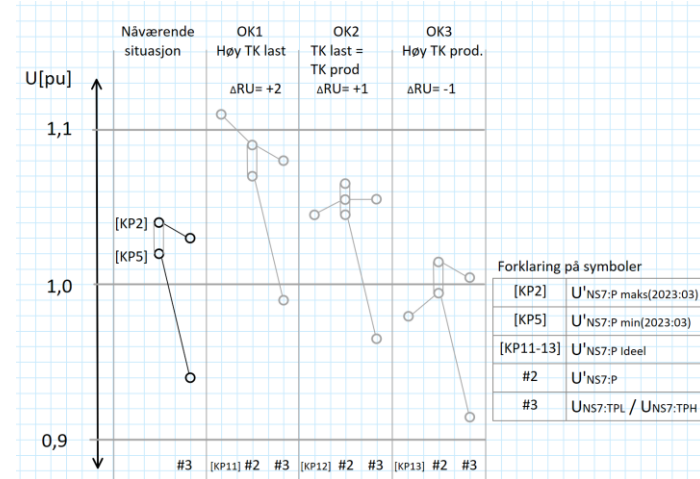
- Karakteristiske spenningsparametere fra trinn 1
- Valgt optimaliseringskriterium.

Trinn 3. Beregne optimal trinnings-strategi for automatisk trinnkobler til krafttransformator, basert på:

- Estimerte spenninger etter trinn 2
- Valgt optimaliseringskriterium.

# Optimaliseringskriterier

- [OK1] Høyest mulig tilknytningskapasitet for last
- [OK2] Lik tilknytningskapasitet for last og produksjon
- [OK3] Høyest mulig tilknytningskapasitet for produksjon



# Konklusjon

- Den foreslåtte metodikken virker svært bra for det distribusjonsnettets den er testet ut på.
- Antall timer pr. år med brudd på FoL var 330 timer med tradisjonell spenningsregulering og ingen justering av distribusjonstransformatorene
- Ved kun å optimalisere dynamisk settpunkt for regulering av krafttransformatoren, reduseres antall timer med brudd på FoL til 20 timer.
- Med både å optimalisere settpunkt og dessuten trinne distribusjonstransformatorene til et mer optimalt nivå, reduseres antall timer med brudd på FoL 2 timer.
- Og metoden kan iverksettes uten større investeringer.

# Mathias Aak Berg og Gard Pedersen

- Hvordan kan aktiv spenningsregulering i et distribusjonsnett preget av distribuerte energikilder og smarte laster redusere strømforbruk og tap, og dermed forbedre energieffektiviteten
- Utført i samarbeid med Tensio, NTNU og SmartVoltage AS
- For å undersøke denne problemstillingen er det gjennomført både simuleringer og laboratiemålinger.
  - Simuleringene var basert på et reelt lavspent distribusjonsnett til Tensio
  - Laboratorieoppsettet inkluderte et faktisk smarthus tilkoblet det nasjonale smartgrid-laboratoriet i Trondheim, som ble forsynt gjennom en lavspent distribusjonstransformator og kraftledninger.

Fagartikkel



Tensio AS i Trondheim har gjennomført et lovende prosjekt for å prøve ut en ny metode for regulering av spenning i distribusjonsnettet. Bildet viser Moholt transformatorstasjon.

## Ny metodikk for spenningsregulering sparer energi og minsker tap i nettet

Ny metodikk for spenningsregulering fører til at energitapet i transformatorer og distribusjonsnett reduseres, samt at lasten til nettkundene i områdene effektiviseres. Dersom funnene er representative for Norge, vil dette årlig tilsvare tre TWh, eller Innsparte kostnader på tre milliarder kroner per år. Tiltaket vil direkte kunne bidra til en reduksjon av nettleien, samt redusere flaskehals og nettleie ved at investeringsbehov i kraftnettet på alle nettnivå begrenses.

i forbindelse med det grønne skiftet.

**Forklaring av metodikken**  
Spenningsregulering i distribusjonsnettet skjer i dag automatisk via trimkoblerregulatorer på krafttransformatorene mellom regionalnett og høyspennings distribusjonsnett, som vist i figur 1. Denne reguleringen endrer omsetningsforholdet til krafttransformatoren som da påvirker spenningsforholdene. Reguleringen benytter spenningsmåling på krafttransformatorens sekundærside (11-22

Av: Arnt-Magnar Forseth, Tensio, Kjell Sand, NTNU, Fredrik Johansen, Safeline og Nicolai Fellberg, SmartVoltage

fikant reduksjon av nettapene gjennom å regulere spenningen i nettet på en hensiktsmessig måte i forhold til effektivitetsfølsomhet for spenning. En operativt test viser at innmatet

utgiftene til innkjøp av elektriske tap som i perioder kan være svært høye.

For sluttbrukerne oppnås lavere nettleie, fordi tapkostnadene og behovene for nettin-

# Resultater

- Simuleringene viser at lasten øker med høyere spenningsnivåer.
- Dette ble imidlertid ikke konsekvent observert i laboratoriemålingene, da flere apparater avvek fra forventet oppførsel, sannsynligvis grunnet oppførselen til interne styringsystem i apparatene.
- På motsatt side viser laboratoriemålingene at tapene i distribusjonsnettet øker med høyere spenningsnivåer, hovedsakelig grunnet transformatoren.
- Generelt indikerer resultatene at et lavere spenningsnivå stort sett vil redusere strømforbruket og tapene, og dermed forbedre energieffektiviteten.



# Kommentarer

- Virkningsgraden til elektriske apparater ved ulike spenningsnivå er vanskelig å modellere i simuleringene
- I simuleringene spesifiseres lasten og dens spenningsfølsomhet, men **arbeidet** som elektriske apparater skal utføre, er ikke modellert (f.eks. varmebehov som skal dekkes, mekanisk arbeid levert av motorer..) – og dette har betydning for varigheten for bruken av apparatene og dermed for sammenlagringen – som igjen påvirker samlet effekt og energi levert fra en transformatorstasjon.
- Med det tilfanget vi har nå i målinger i distribusjonsnettet og hos kundene, er det «enklest» å bruke disse til å estimere et forsyningsområdes spenningsfølsomhet – slik det er gjort i testprosjektet hos Tensio.

