

Alexandra M. Gunar  
Vitaly Ørjansen Karpov

## Modellering av radiaalt mikronett i Febdok med UPS-vekselretter som distribuert energikilde

Undersøke modellering av  
mikronettinstallasjoner med veksellrettere for  
nett- og batteridrift, ved hjelp av  
dimensjoneringsverktøy i Febdok.

Bacheloroppgave i Elektroingeniør- elkraft  
Veileder: Tor Arne Folkestad  
Juni 2022



Alexandra M. Gunar  
Vitaly Ørjansen Karpov

# **Modellering av radiaalt mikronett i Febdok med UPS-vekselretter som distribuert energikilde**

Undersøke modellering av mikronettinstallasjoner med vekselrettere for nett- og batteridrift, ved hjelp av dimensjoneringsverktøy i Febdok.

Bacheloroppgave i Elektroingeniør- elkraft  
Veileder: Tor Arne Folkestad  
Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk  
Institutt for elkraftteknikk



Kunnskap for en bedre verden



|  |            |
|--|------------|
| Innholdsfortegnelse  | I          |
| <i>Innholdsfortegnelse</i>   |            |
| <b>Oppgavetekst</b>  | <b>III</b> |
| <b>Forord</b>  | <b>IV</b>  |
| <b>Sammendrag</b>  | <b>V</b>   |
| <b>Abstract</b>  | <b>VI</b>  |
| <b>Problemstilling</b>   | <b>1</b>   |
| <b>1 Innledning</b>  | <b>2</b>   |
| 1.1 Hensikt med programmet Febdok for installasjoner av mikronett      | 2          |
| 1.2 Mikronett Campus Evenstad  | 2          |
| 1.3 Begrunnelse  | 3          |
| 1.4 Avgrensninger  | 3          |
| 1.5 Bruksområde  | 4          |
| 1.6 Disposisjon  | 4          |
| <b>2 Teoretisk referanseramme</b>                                      | <b>5</b>   |
| 2.1 Prosjektering i Febdok   | 5          |
| 2.1.1 Dimensjonering av kurs og Installasjoner i Febdok                | 5          |
| 2.1.2 Nettsystemer i Febdok- Topologi                                  | 7          |
| 2.1.3 Hvordan fungerer beregningene i Febdok                           | 10         |
| 2.1.4 Utforming av installasjon og beskyttelse                         | 15         |
| 2.1.5 Forskrifter i Febdok   | 15         |
| 2.2 Mikronett  | 16         |
| 2.2.1 DER - Distribuerte energikilder.                                 | 17         |
| 2.2.2 Kommunikasjon, kontroll og styring i mikronett.                  | 18         |
| 2.2.3 Beskyttelsesprinsipper   | 20         |
| 2.2.4 Metoder for planlegging av mikronett                             | 21         |
| 2.3 Topologier   | 22         |
| 2.3.1 Arkitektur til Mikronett.  | 22         |
| 2.3.2 DER topologier   | 25         |
| 2.4 Kortslutningsbidrag fra en inverter.                               | 28         |
| 2.4.1 Feilstrømbidrag fra en vekselretter                              | 28         |
| 2.4.2 Beregning av inverter ekvivalent.                                | 29         |
| 2.5 Mikronett på Campus Evenstad.                                      | 32         |
| <b>3 METODE</b>  | <b>33</b>  |
| 3.1 Modellering av mikronett topologier i Febdok                       | 33         |
| 3.2 Kortslutningsbidrag fra vekselretter og beregningsmodell i Febdok. | 36         |
| <b>4 RESULTAT</b>  | <b>38</b>  |
| 4.1 Modellering av mikronett topologier i Febdok                       | 38         |
| 4.2 Beregningsmodell av Mikronett i Febdok                             | 40         |
| 4.3 Simuleringsresultater fra Febdok beregninger.                      | 47         |
| <b>5 ANALYSE</b>   | <b>57</b>  |
| 5.1 Modellering av mikronett topologier i Febdok                       | 57         |
| 5.2 Beregningsmodell av Mikronett i Febdok                             | 57         |
| 5.3 Simuleringsresultater fra Febdok beregninger                       | 58         |
| <b>6 DISKUSJON</b>   | <b>60</b>  |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.1 Topologier i Mikronett  | 60        |
| 6.2 Prosjektering av mikronett  | 61        |
| 6.3 Diskusjon av funn og resultat   | 63        |
| <b>7 KONKLUSJON</b>   | <b>65</b> |
| 7.1 VIDERE ARBEID   | 66        |
| <b>BEGREPSLISTE</b>   | <b>67</b> |
| <b>TABELL LISTE:</b>  | <b>69</b> |
| <b>FIGUR LISTE:</b>   | <b>70</b> |
| <b>LITTERATURLISTE</b>  | <b>72</b> |
| <b>VEDLEGG</b>  | <b>75</b> |
| Vedlegg A - Simuleringsresultater   | 75        |
| Vedlegg B – Kortslutningsberegning resultater fra W. Kjær sin masteroppgave om Mikronett campus Evenstad. | 86        |

# Oppgavetekst

Oppgaven er formulert av faglig ansvarlig, Ola Johansson fra Solcellespesialisten.

## ELK5: Beregne kortslutningsstrømmer i Mikroanlegg

Studenter: Vitaly Ørjansen Karpov og Alexandra M. Gunar

Veileder v/NTNU: Tor Arne Folkestad

Oppdragsgiver: Solenergi Spesialisten AS

Kontaktpersoner: Alemayehu Gebremedhin, kontor i 3. etg i B-bygget, tlf: 611 35 174

Mikroanlegg er energi-/el-anlegg som består av lokal kraftproduksjon så vel som konvensjonelt forbruksutstyr. Lokal kraftproduksjon skjer i økende grad ved hjelp av kraftelektronikk, typisk invertere. Disse bidrar til kortslutningsstrømmer i anlegget på en annen måte enn kraftnettet.

### Oppgave

Hvordan påvirker kraftelektronikk i lokal kraftproduksjon kortslutningsstrømmer i el-anlegg? Hvilke egenskaper i invertere er avgjørende for å få en mer korrekt beregning av kortslutningsstrømmer?

Hvordan fungerer kortslutningsberegninger i etablert programvare (f.eks. Febdok) og hvor nøyaktig er slik beregning ift. kortslutningsstrømmer fra virkelige invertere?

Kan man foreslå forbedring i etablert programvare for kortslutningsberegninger?

### Oppgavens mål

Avdekke evt. vesentlige svakheter i eksisterende metoder for beregning av bidrag til kortslutningsstrømmer fra kraftelektronikk i mikroanlegg.

Evt. foreslå forbedringer beregning av kortslutningsstrømmer fra kraftelektronikk.

### Oppgavens krav

- Redegjøre for eksisterende modeller for beregning av kortslutningsstrømmer fra kraftelektronikk.
- Redegjøre for evt. bedre beregningsmetode for beregning av kortslutningsstrømmer fra kraftelektronikk.
- Synliggjøre størrelse på avvik mellom eksisterende beregningsmetoder og evt. forbedringer.
- Sammenligne beregninger fra etablert programvare for beregning av kortslutningsstrømmer med målinger fra faktiske invertere brukt i dag

# Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet ved Norges Teknisk Naturvitenskapelig Universitet i Gjøvik. Det er et avsluttende prosjekt for to avgangsstudenter ved Elkraftteknikkstudiet, Vitaly Ørjansen Karpov og Alexandra M. Gunar. Oppgaven er tilrettelagt gjennom samarbeidet mellom universitet og Solcellespesialisten, med et innspill til statlig forskningsprosjekt for mikronett på Campus Evenstad.

Mikronett på Campus Evenstad er et innovativt prosjekt fra Statsbygg som belyser utviklingen av energianlegg med fornybare energikilder i Norge. Campus har også lokal energiproduksjon og bilbatteri som en del av det elektriske systemet.

Denne rapporten beskriver teori rundt mikronettssystemer og prosjektering i dimensjoneringsprogrammet Febdok. Prosjektgruppen har som mål å modellere mikronettinstallasjon, for så å belyse beregningsmodell og simuleringsresultater videre i rapporten. Simulering er gjort av hele mikronettet på Campus Evenstad. Denne oppgaven har gitt prosjektgruppen mulighet til å lære seg prosjektering av ulineære topologier og bli kjent med mikronettstrukturen i Norge.

I den anledningen ønsker prosjektgruppen å takke veilederen, Tor Arne Folkestad for bidrag og god hjelp underveis. Samtidig ønsker vi å rette en takk til Ola Johansson fra Solcellespesialisten som har gitt oss en unik mulighet samt hjulpet oss med sin kompetanse og motivasjon. Det rettes også stor takk til Nelfo for oppklaring og tilbakemeldinger. For denne muligheten ønsker prosjektgruppen å takke kontaktperson Alemayehu Gebremedhin som under samarbeid med Solcellespesialisten sikret oppgaven.

Til slutt ønsker vi å rette stor takk til familie, kone og samboer for kontinuerlig støtte og oppmuntring gjennom studier.

Vitaly Ørjansen Karpov      Bergen, mai 2022

Alexandra M. Gunar      Gjøvik, mai 2022



# Sammendrag

I denne besvarelsen belyses problemstillingen; Undersøke modellering av mikronettinstallasjoner med vekselrettere for nett- og batteridrift ved hjelp av dimensjoneringsverktøy i Febdok.

Rapporten deles inn i hovedkapitler; teoretisk referanseramme, valg av metode, presentasjon av simuleringsresultater, simuleringsanalyse, diskusjon og til slutt konklusjon.

For å skape et faktagrunnlag om mikronett har prosjektgruppen innhentet litteratur fra forskningsrapporter, *Oria* biblioteket på universitet og studert materialet tilsendt om forskningsprosjektet på Campus Evenstad. Materialet av simuleringsfiler og risikovurdering for batteribank utarbeidet av Ola Johansson fra Solcellespesialisten. Prosjektgruppen fikk lisensen av NTNU for dimensjoneringsprogrammet Febdok, som er utviklet av Nelfo. Sammen med tilgang til emnet IELEG2119 i NTNU Trondheim. Emnet omfatter kurs i Febdok på tre deler som foreleses av produksjef i Febdok, Gjermund Hovde. I tillegg har prosjektgruppen brukt brukerstøtte, fagsjef og markedsjef i Nelfo til å avklare problemstillinger og få faglig innsyn i Febdok. Under teoretiske referanserammer har prosjektgruppen dannet et fundament for en forståelse av mikronett topologier og bruksområde i Febdok. Under metode beskrives simulerings- og beregningsmetoden i Febdok. Før det redegjøres for diskusjon av resultatene og valg av metoden for simulering av mikronett på Campus Evenstad.

I konklusjonen blir problemstillingen belyst med tre delspørsmål som beskrives under;

## *Hvordan fungerer prosjekteringsmetode av mikronett i etablert programvare Febdok?*

Simuleringsmuligheter for topologi av radiale mikronett beskrives i denne rapporten med, Campus Evenstad som utgangspunkt. Undersøkelsen for modellering av mikronettinstallasjoner viser at det er mulig å simulere de i Febdok. Med forbehold om simulering begrenset til radiale AC-installasjoner og begrensning av kretsteori som konfigureres i en UPS -modell.

## *Hvordan kan driftssikkerhet i mikronettinstallasjon verifiseres under feiltilstander?*

Rapporten tar for seg beskrivelse av Febdok som et dimensjoneringsprogram, med beregningsmetoden for kortslutningsbidrag fra vekselrettere og dokumentasjon av kravspesifikasjoner for vern og kabler med hensyn på selektivitet belyses. Case med mikronettinstallasjoner utfordres med beregningsverktøy i Febdok for nett- og batteridrift. Febdok prosjekterer i tråd med NEK 400, FEL og samtlige IEC-standarder. Ut ifra undersøkelsene og resultatene kan det sannsynlig konkluderes med at ifølge Nelfo er simuleringsresultatene ført i programvaren tilstrekkelig for å dokumentere sikkerhetskrav og ivareta beskyttelse for installasjonen i henhold til normer.

## *Kan man foreslå forbedring i etablert programvare for kortslutningsberegninger og brukervennlighet?*

Herunder redegjøres analysen for kortslutningsbidrag fra invertere og beregningsmodell i Febdok. Beregningsmodellen for kortslutningsbidrag i UPS med innstillinger for inverter-data undersøkes i Febdok. Deretter sammenlignes beregninger fra modellen av eksisterende anlegg med beregning i Febdok. Følgende analyse viser til tilpasninger og forenklinger av metode i grunn for utfordring av brukervennlighet i programvaren. I simuleringsresultatene for installasjonen under normaldrift oppnår sikker utkoblingstid og selektivitet for alle vern. Under enkelte feiltilstander simulert i øydrift blir utkoblingen av effektbrytere forsinket. Simuleringsresultater blir konkludert med resultatene i Masteroppgaven til W. Kjær der det presiseres at installasjonen er driftssikker under øydrift. Etter evaluering av oppnådde resultater foreslår prosjektgruppen forbedringer i programvaren for å tilrettelegge for nåværende og framtidige mikronettinstallasjoner. Videre aspekter som må undersøkes belyses under videre arbeid.

# Abstract

This bachelor thesis is based on following problem statement; Examine the modeling of microgrid installations with inverters operating in off-and on-grid using dimensioning tools in software Febdok.

This report of the thesis is divided into main chapters; theoretical frame of reference, choice of method, presentation of simulation results, simulation analysis, discussion and finally conclusion.

To create a factual basis about the micronet, the project group has obtained literature from research reports, the Oria library at the university and studied the material sent about the research project at Campus Evenstad. The material of simulation files and risk assessment for battery bank prepared by Ola Johansson from Solcellespesialisten. The project group received the license from NTNU for the dimensioning program Febdok, which has been developed by Nelfo. Together with access to the subject IELEG2119 in NTNU Trondheim. The subject includes courses in Febdok in three parts which are lectured by product manager in Febdok, Gjermund Hovde. In addition, the project group has used user support, department manager and marketing manager in Nelfo to clarify issues and gain professional insight into Febdok. Under theoretical frameworks of reference, the project group has formed a foundation for an understanding of microgrid topologies and areas of use in Febdok. Under method, the simulation and calculation method are described in Febdok. Before it is explained for discussion of the results and choice of the method for simulation of microgrids on Campus Evenstad.

In the conclusion, the problem is elucidated with three sub-questions which are described below;

How does the micronet networking method work in established Febdok software?

Simulation possibilities for topology of radial microgrids are described in this report based on Campus Evenstad. The study for modeling of microgrid installations shows that it is possible to simulate those in Febdok. Subject to simulation limited to radial AC installations and limitation of circuit theory configured in a UPS model.

How can reliability in microgrid installation be verified under fault conditions?

The report of the thesis addresses the description of Febdok as a dimensioning program, with the calculation method for short-circuit contributions from inverters and documentation of requirements specifications for protection switch and cables with regard to selectivity is elucidated. Case with microgrid installations is challenged with calculation tools in Febdok for mains and battery operation. Febdok designs in line with NEK 400, FEL and all IEC standards. Based on the investigations and results, it can probably be concluded that according to Nelfo, the simulation results entered in the software are sufficient to document safety requirements and ensure protection for the installation in accordance with standards.

Can one suggest improvement in established software for short circuit calculations and ease of use?

The analysis of short-circuit contributions from inverters and calculation model in Febdok is described below. The calculation model for short-circuit contributions in UPS with settings for inverter data is examined in Febdok. Calculations from the model of existing facilities are then compared with calculations in Febdok. The following analysis refers to adaptations and simplifications of method due to the challenge of user-friendliness in the software. In the simulation results for the installation during normal operation, safe switch-off time and selectivity for all protection switches are achieved. During some fault conditions simulated in island operation, the switch-off of circuit breakers is delayed. Simulation results are concluded with the results in W. Kjær's Master's thesis where it is emphasized that the installation is reliable during island operation. After evaluating the results achieved, the project team proposes improvements to the software to facilitate current and future microgrid installations. Further aspects that must be investigated are elucidated during further work.

## Problemstilling

Denne oppgaven er et samarbeid mellom NTNU og Solcellespesialisten som er leverandør for batteribank og inverter i et statlig forskningsprosjekt, Campus Evenstad. Underveis har det oppstått utfordringer for installasjonen under nettdrift (nettbaseredrift) og øydrift (batteridrift), samtidig som simulering av installasjonen i sin helhet ikke lot seg gjøre. Simuleringen av hele forskningsprosjektet var nødvendig for fullstendig dimensjonering og dokumentasjon, dette ble løst av Ola Johansson med å dele opp anlegget og simulere tilførsel og deler av mikronett under øydrift og normaldrift hver for seg.

Endelig problemstilling belyser hoveddelen av rapporten:

«Undersøke modellering av mikronettinstallasjoner med vekselrettere for nett- og batteridrift ved hjelp av dimensjoneringsverktøy i Febdok.»

Det ble konkludert at gitt prosjektoppgave (se oppgavetekst) inneholder en rekke usammenhengende problemstillinger, som var relevant for forskningsprosjektet på Campus Evenstad ifølge Johansson. Ut ifra problemstillingene i oppgaveteksten ble det utarbeidet mål, det blir konkretisert i delmål som belyser form av metode for undersøkelse i rapporten:

### Delmål 1

Hvordan fungerer prosjekteringsmetode av mikronett i etablert programvare (f.eks. Febdok).

Målet er å avdekke og analysere topologier som er mulig å simulere i et bestemt program, ut ifra dette simulere modeller av mikronett med radial topologi i Febdok.

### Delmål 2

Hvordan kan driftssikkerhet i mikronettinstallasjon verifiseres under feiltilstander

Målet er å ha et sikkert anlegg med rett dimensjonering av vern og kabel, for oppnåelse av rett dimensjonering må det tas høyde for kortslutningsbidrag fra vekselrettere og selektivitet mellom vern i installasjonen.

### Delmål 3

Kan man foreslå forbedring i etablert programvare for kortslutningsberegninger og brukervennlighet?

Målet er å komme med tilbakemelding om mulig forbedring av brukervennlighet og beregningsmodell for mikronettinstallasjoner. Tilbakemeldingene blir konkluder ut ifra analysen av kortslutningsbidrag fra campus Evenstad mikronett i Febdok og sammenligning av beregningene fra en eksisterende modell i Simulink.

Et forskningsprosjekt som denne rapporten gir utveksling av erfaring og kunnskapsdeling fra flere faggrupper, med bred oversikt og tolkning av normer for elektriske installasjoner og internasjonale standarder. Innsikten fra faggruppen implementeres i prosjektering av et anlegg, hvor NEK400 og FEL ligger til grunn for dokumentasjon av elektriske installasjoner. Målingene og grunnlagsverdiene for beregninger er hentet fra campus Evenstad, med forbehold om mangel på enkelte dimensjoneringsverdier. For beregning og modellering ble dimensjoneringsverktøyet Febdok benyttet.

# 1 Innledning

## 1.1 Hensikt med programmet Febdok for installasjoner av mikronett

Nelfo sin programvare Febdok brukes for å prosjektere radiale nettinstallasjoner.

Febdok foretar lineære, lavspente installasjonsløsninger for bolig, offshore, sykehus, industri og næringsbygg (GÖTHNER, 2019). Installasjoner i form av strålenett, med varme- og energikilder vil være utfordrende å prosjektere i Febdok.

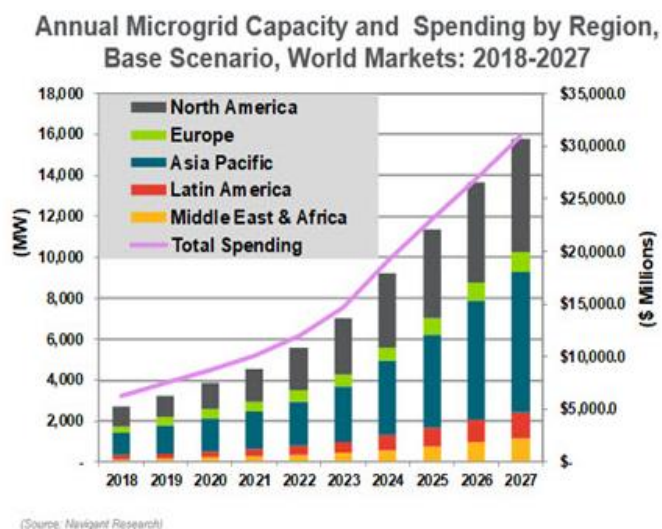
I Norge har programvaren et høyt antall tverrfaglige brukere og er et rimelig dimensjoneringsverktøy med medlemsrabatt og brukerrettigheter for flere per lisens (HivePower, 2021).

Prosjektering av installasjon i Febdok utføres i tråd med forskrifter (FEL og NEK 400). De er implementert i programvaren på forhånd. Det er ikke nødvendig å detaljprosjekterte etter forskrifter utover dette (GÖTHNER, 2019). Programvaren har et beregningsverktøy som foretar kortslutningsberegninger og selektivitet for prosjekterte installasjoner. Samtidig håndteres nødvendig dokumentasjon i tråd med kravspesifikasjoner. Febdok har en håndterbar brukerterskel med tilgjengelig informasjon via Nelfo, da det tilbys kurs, hjelpefunksjon i programmet og brukerveiledning. Blant disse kan det være utfordrende å finne veiledning for ulineære installasjonsmetoder med flere kilder og last (Knowledge, 2018).

Febdok har egenskaper til å tilpasse strømkilder og vern så lenge leverandør tillater det ved oppgitte verdier for registeret i Febdok. Med et vern, - kabel og strømskinneregister kan det legges til egendefinerte vern, kabel og strømskinner som ikke ligger registrert, men verifiseres av leverandør (Regjeringen, 2006). Databasen tillater justeringer på innstillinger av elektronisk vern etter fabrikants merkesystem. Nelfo oppdaterer innhold i databasen for Febdok kontinuerlig.

## 1.2 Mikronett Campus Evenstad

Mikronett er et begrenset området med elektrisk distribuert anlegg som kan driftes i perioder fra hovednettet i øyedrift-tilstand (GÖTHNER, 2019). Pålitelighet og egenskap til å driftes i frakoblet tilstand gjør mikronettinstallasjoner kjent globalt (HivePower, 2021).



Figur 1 Markedsanalyse for mikronett av Peter Asmus, for Navigant Research

(Knowledge, 2018)

I figur 1 tar Peter Asmus for seg en prognose av kapasitet per kostnadsanalyse i 2018 for mikronett i øyedrift og nettdrift globalt. Han er ekspert på fornybare energikilder og har studert mikronettmarkedet over ni år (Knowledge, 2018).

Mikronett er miljøvennlig og kompatibel med ulike fornybare energikilder, det er muligheter for overvåkning, implementering av smartnett og lagringskapasitet vha. batterianlegg. Mikronett er økonomisk da det tilbys statlige støtteordninger for energi og klimatiltak i samarbeid med Pilot – E, Innovasjon Norge og Enova. Det tilbys også støtteordninger i form av tiltaksdekning og reduksjon i nettleie (Regjeringen, 2006, Solenergiforening, 2021, klimapartnere, 2020).

Mikronettinstallasjoner har begynt å etablere seg i det norske markedet og det er dermed behov for økt kunnskap om installasjon og drift av slike anlegg (Knowledge, 2018). Foreløpig benyttes det internasjonale standarder for mikronett, Norge kommer sakte men sikkert etter med utvikling av forslag til revidert elmarkedsdirektivet. Dette i form av høringer EU 2019/944 for regelverk av smarthus med DER distribuert energikilde for plusskunder. Mikronettinstallasjoner i Norge blir utført med konsesjonsplikt i henhold til § 3-1 i energiloven (Regjeringen, 2020, EcoInside, 2021).

Campus Evenstad er et prøveprosjekt for statsbygg med to mikronett, der MG2 «microgrid» er radialnett mens MG1 er et strålenett med flere energikilder. Anlegget produserer energi i form av elektrisitet og varme, det elektriske anlegget inneholder batteribank, solceller og flisfyrt anlegg som produserer strøm vha. CHP «Combined heat & power». Bilbatteri med V2G funksjon er en del av det elektriske systemet (EcoInside, 2021, Kjær and Høidalen, 2020). Under gjennomføring av denne Bacheloroppgaven hadde prosjektgruppen tilgang til en masteroppgave av W. Kjær «Assessing the Microgrid at Campus Evenstad». Denne oppgaven ble brukt som kilde til grunnleggende informasjon om mikronettet og beregningsresultater var sammenlignet med resultater i denne masteroppgaven.

### 1.3 Begrunnelse

Med den teknologiske utviklingen dagens samfunn står ovenfor vil energiforbruket øke parallelt ifølge SSB og NVE sine analyser av strømforbruk. Ettersom forbrukere har et økt behov for energiflyt i dag og i nær framtid er det avgjørende at det investeres i fornybare energikilder som har kapasitet til å lagre produsert energi og samtidig regulere produksjon etter forbruk. Det er derfor aktuelt med kostnad- og energibesparende løsninger som tar hensyn til klima og miljø.

Mikronett som selvdriфт, batterilagring og produksjon av fornybare energi er en aktuell ressurs for kraftproduksjon i dag, sett i sammenheng med høye strømpriser, driftssikkerhet og miljøtiltak. Det er samtidig en langsiktig utfordring med å regulere kraftproduksjon med påvirkning av sentral og regionalnett, som vil nødvendiggjøre en form for regelverk for å avdekke krav for distribusjonsnettssystemoperatør og forbruker for mikronettinstallasjoner. Dette regelverket er nødvendig for å verne, sikre prosjektering, drift og vedlikehold av mikronettinstallasjoner som Campus Evenstad på en forsvarlig måte med standarder som omfatter produksjon i Norge (NVE, 2022).

Når det kommer til planlegging og utføring av mikronettinstallasjoner velges arbeidsplattform for prosjektering ut ifra lønnsomhets og effektivitet. Febdok er mest utbredt som prosjektering og beregningsverktøy for elektriske anlegg i Norge, dermed vil programvaren foretrekkes når utviklingen av avanserte installasjoner foretas med tanke på kostnad og tilgjengelighet (Nelfo, 2022c). Mikronett med løsninger som innebærer flere energikilder, med Campus Evenstad som modell er i dag for utfordrende å prosjektere i Febdok. Nelfo har tatt utfordringene i betraktning og jobber med løsninger for en ny versjon som kan «tilpasses mikronett på sikt». Tilpasningene gjøres for å tilrettelegge programmet til forbruker, ifølge fagsjef for elektronikk i Nelfo.

### 1.4 Avgrensninger

I denne oppgaven blir det sett på programvaren Febdok sine egenskaper til å løse mikronettinstallasjoner med distribuerte energikilder som på Campus Evenstad. Simuleringen av installasjonen blir bygd på eksisterende modell som er løst av ingeniør Ola Johansen ved Solcellespesialisten 2021. Det blir redegjort

for beregningene Febdok foretar, på bakgrunn av forskrifter som omfatter kortslutnings og energiberegninger.

Det undersøkes samtidig selektivitet-analyse i Febdok. Topologi av mikronettinstallasjon for Campus Evenstad blir simulert og beskrevet i rapporten, ettersom det er den eneste topologien prosjektgruppen har simulerings- og parameterverdiene til disposisjon.

## 1.5 Bruksområde

Fordypning i mikronett som kombineres med fornybare energikilder og smartnett kan ha en positiv påvirkning på kraftproduksjon og strømpriser, med stabil drift og forbruk. (EcoInside, 2021),(Knowledge, 2018) Ved å supplere mikronettinstallasjoner med opprinnelig sentral og regionalnett vil det være mer nytte av fornybare energikilder for klima og miljø.

Ved prosjektering av mikronettinstallasjoner med DER i en tilgjengelig programvare som bedriften/universitetet allerede har disponibel vil effektivisere løsninger og dermed enkelt videreføre dokumentasjon for inkludering og formidling av kunnskap om nye løsninger raskere.

## 1.6 Disposisjon

Oppgavens struktur er som følger:

### *Kap. 2 Teoretiske referanserammer.*

Omhandler teoretiske referanserammer på bakgrunn av fagområder undersøkt videre i oppgaven. Fagområdene inkluderer Febdok, Mikronett og Topologi.

### *Kap. 3 Metode*

Beskriver framgangsmåte for prosjektering og redegjør for utvikling av mikronettinstallasjoner i Febdok.

### *Kap. 4 Resultater*

Avdekker problemløsning for utfordringene i Febdok omhandlet mikronettinstallasjoner. Synliggjør bidrag fra mikronettinstallasjonen i Febdok.

### *Kap. 5 Analyse*

Analyserer kortslutning- og energiberegninger i Febdok. Redegjøres for kortslutningsbidrag mhp. Invertere og selektivitet.

### *Kap. 6 Diskusjon*

Diskusjon av løsningene for resultatet.

### *Kap. 7 Konklusjon*

Konkludering av løsninger og avgrensinger som ble nødvendig. Foreslår videre undersøkelse.

## 2 Teoretisk referanseramme

Omhandler teoretiske referanserammer på bakgrunn av fagområder undersøkt videre i oppgaven. Fagområdene inkluderer Febdok, Mikronett og Topologi.

### 2.1 Prosjektering i Febdok

Febdok benyttes som modelleringsverktøy for radiale mikronettinstallasjoner med distribuerte energikilder. Mikronettinstallasjonen som undersøkes i denne oppgaven befinner seg på Campus Evenstad i dag. Det er i grunn en utfordring med modellering og dokumentasjon i tråd med forskrifter av et radiale mikronett med distribuerte energikilde (NEK, 2018, EcoInside, 2021). Ettersom Febdok er programmert til å dokumentere dimensjonering av alle installasjonene i tråd med NEK 400 og andre relevante forskrifter for installasjoner, blir det benyttet som verktøy for dette prosjektet (Nelfo, 2022b).

Ved å belyse tydelige mangler for arbeidsområdet i programmet vil det gi Nelfo forbedringspotensialet i utviklingsprosessen for lansering av oppdatert versjon for å ivareta brukerens behov (Nelfo, 2022b).

Febdok brukes av rådgivere, installatører og ingeniører over hele Scandinavia siden første lanseringen i 1991 (Nelfo, 2022b). Prosjektering av installasjoner med flere kilder som tas med i denne oppgaven er kjent problematikk i dag ifølge Nelfo (Nelfo, 2022b).

Opgaven omhandler prosjektering av installasjoner i nåværende versjon av Febdok. Dermed legges det vekt på programvarens fordeler i dagens versjon (NEK400:2018, 2018a). Dessuten vil det redegjøres kun for fordelene som benyttes for prosjektering av mikronettinstallasjonen videre i oppgaven. Det er deriblant flere innstillinger for forsyninger med blant annet transformator i Febdok som ikke nevnes i denne oppgaven (Nelfo, 2022a).

For utvidelsen av hver versjon i programmet, tar Nelfo høyde for behovene hos brukere. Med dagens versjon som ble gitt ut for ett år siden kom oppdateringer i følge av rettelser i Febdok og leverandørdatabasen. Programrettelser tilsvarende;

- Minste kortslutningsstrøm fra generator ved konkrete konfigurasjoner
- Utvidet maksimal, nominell spenning  $U_n$  [V] for generator i grunn for definisjon av spenningen større enn 1000 volt
- Kontroll av merkekorttidsstrøm for strømskinner i nærheten av generator.

(NEK400:2018, 2018a)

#### 2.1.1 Dimensjonering av kurs og Installasjoner i Febdok

Febdok er først og fremst et dimensjoneringsprogram. Siden brukere av Febdok har ulik utdanningsbakgrunn og formål av installasjoner, må det tilpasses etter tilvarende behov. I dialogboksen «Febdok hjelp» ligger det en oversikt over ulike utfordringer som kan forekomme under dimensjonering av installasjoner i Febdok (Nelfo, 2022a). Oversikten tar for seg noen framgangsmåter og begrunnelser bak innstillingene i programmet.

*Hvordan prosjektere i Febdok?*

For å prosjektere et anlegg i Febdok starter brukeren med å definere anlegget ved å oppgi anleggsnavn, fordelingssystem, forsyningsspenning og akseptabelt spenningsfall. Det velges så forsyningsmetode;

- Direkte fra nettet
- Forankoblet transformator
- UPS

Etter valgt forsyningsmetode skal belastningsstrøm og utforming av beskyttelse for anlegget dokumenteres. Det velges så kabeltype, strømskinne og tverrsnitt. Etterfulgt av konfigurering av innstillingene for valgte vern i anlegget. Deretter utføres kontroll og vurdering av selektivitet mellom vernene i oppstrøm og nedstrøm. Videre formidles innføring og struktur for Febdok installasjonen.

Dimensjoneringsbasis i henhold til utgavene av NEK 400 kan kun endres i ettertid, dersom man velger FEB 91, NEK 400:2006 eller eldre dimensjoneringsbasis. Det vil *kun* da være mulig å velge ny dimensjoneringsbasis i anlegget.

Ved start, gitt at brukeren har oppdatert lisens og innloggingsdata, kan brukeren velge å begynne eller avslutte med en gjennomgang av innstillinger. Herunder justeres oppsettet etter behov for egenspesifisert prosjektering av anlegget. Justeres for å registrere vaner av gjentakende prosjekter med fordeling, kabel og vern med følgende valgmuligheter;

- Endre parameterverdiene for systemspenning og frekvens
- Nummerering og navngivning
- Innstilling av varsling for spenningsfall med egenspesifiserte grenseverdier, som løses med valgmuligheter for endring av tverrsnitt ved angitte tilfeller
- Manuel innføring av forhåndsregnet eller kjente verdier for kortslutningsstrømmer og effektfaktor,  $\cos \varphi$  tidlig i systemet

Dersom samtidighetsfaktor for alle forbrukerkurser er kjent, kan beregning av spenningsfall ved å benytte sammenlagret-strøm velges. Egenspesifiserte verdier som har blitt ført inn fra før kan når som helst erstattes med standardverdier foreslått av Febdok. Ved å velge *avansert visning* er det mulig å konfigurere verdier for resistans R og reaktans X for en foranliggende kortslutningskrets.

Under dialogen «Kabel/strømskinner» velges kabelens referanseinstallasjonsmetode i tråd med NEK 400-5-52 Tabell 52 (NEK400:2018, 2018a). Dersom kabelen har ulike referanseinstallasjonsmetoden velges den metoden med «*dårligst*» strømføringssevne. For parallelle kurser skal det dokumentere med totalantall av kabler som ligger parallelt. Febdok tar hensyn til korreksjonsfaktoren for fastsettelse av strømføringssevne til kabelen.

Det er viktig å følge med dersom referanseinstallasjonsmetoden «E» blir brukt. Febdok vil automatisk legge på annen korreksjonsfaktor på 0,7 og det kan føre til at strømføringssevnen blir lav. Under omgivelsestemperatur skal det oppgis høyest verdi for omgivelsestemperatur for strømløs kabel.

Korreksjonsfaktor blir foreslått ved registrering av antall parallelle kurser. Det er mulig å endre for egenspesifisert verdi dersom det ikke strider med anbefalinger.

Lengden mellom fordeling og kabelens endepunkt dokumenteres for beregning av kabelens resistans og reaktans. Verdiene vil påvirke spenningsfall og kortslutningsstrømmer.

Ved valg av strømskinner må kapslingsgraden velges om det skal være fullt eller halvt tverrsnitt på nøytral- eller PEN-leder. Feilstrømmer i anlegget påvirkes av valget til kapslingsgraden.

Febdok beregner strømføringssevne for kabelen i *ampere* [A] på bakgrunn av referanseinstallasjonsmetode, kabeltype og kabeltverrsnitt. Verdiene Febdok beregner automatisk gis i «blå» felt og endres ikke manuelt. Ved kursdialog «Gruppering» kan belastningen velges mellom transformator og UPS med unntak av distribuert belastning. Belastningen er lik fordelt med lik avstand for uttakene tilsvarende veily. For fasebelastninger må det defineres antall faser og føring av nøytralleder ved en-fase belastning for TN-systemer (Nelfo, 2022a).



## 2.1.2 Nettsystemer i Febdok- Topologi

Velg mellom følgende forsyningstype for anlegget;

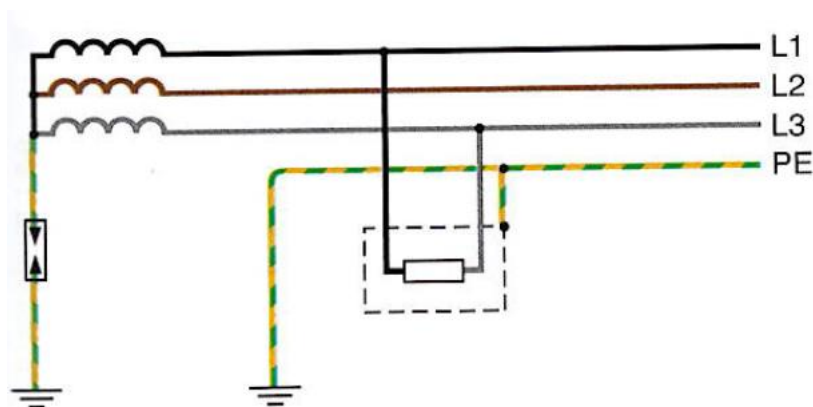
- Lavspent strømforsyning
- Generatorforsyning
- Høyspent strømforsyning

Det oppgis fordelingsystem, fasefordeling og verdier for karakteristiske parametere. I dialogvinduet «første fordeling» oppgis startposisjon for beregningene av spenningsfall i systemet. Under dialogen «valg av strømforsyning» i Febdok vil innstillinger for fordelingsystemene ha noen få utmerkelser som nevnes videre i teorien.

Registrert data for høyeste omgivelsestemperatur påvirker utkoblingstid og -strøm for fordelingen. Medet Justeringer av termiske kurver blir kontrollert i Febdok mot omgivelsestemperaturen. Innføring av belastningsdata for anlegget kan føres i strøm- eller effektverdi. Videre beregner Febdok resten av spenningen og effektverdier. Febdok kontrollerer så sammenlagret strøm mot oppgitt belastning. Dette vil være synlig i hovedstrømbildet for fordelingen.

Verdien for effektfaktor  $\cos \varphi$  for kortslutningskrets avhenger av fordelingstype. Videre skal det defineres data for foranliggende nett i dialogen «oppstrøms nett». Et nettsystem og forsyningsmetode velges for installasjonen. Dersom systemet forsynes fra generator, skal parametere oppgis og registreres allerede i fordelingsdialogen (Nelfo, 2022a).

### Foranliggende IT-system



Figur 2 IT-system med gjennomslagsvern(dineuter) hentet fra fordelingsystemer i montørhåndboken for NEK 400:2018

(Ormbostad and Elektroinstallatørernes, 2010)

Innstillinger av strømforsyning for foranliggende IT-nett velges i dialogen «forsyning direkte fra nettet» i Febdok. Deriblant oppgis største og minste kortslutningsstrøm, kabler i startposisjon av anlegget samt effektfaktor mellom resistans og reaktans i transformatoren. Ut ifra hvor mange faser første fordeling har, skal det opplyses om maksimal *trepolet* og minimal *topolet* kortslutningsstrøm med effektfaktor. Ved å legge inn verdier for impedans vil Febdok beregne verdien for kortslutningsstrømmer som blir vist i «avansert visning».

Jordfeilstørmnivå  $I_{dmax}$  og  $I_{dmin}$  [mA] vil bli gitt av Febdok i tråd med NEK 400-4-41. Ved maksimal jordfeilstørm i mA som er ca. 2 ganger transformatorstørrelsen i kVA og minimal jordfeilstørm i mA er ca. 0,5 ganger transformatorstørrelsen i kVA (NEK400:2018, 2018c). Verdien for den maksimale jordfeilstørm benyttes ved beregning av jordovergangsresistans for en jordelektrode i Febdok. Ved å velge jordfeilvern for utkobling av første jordfeil, velges denne med mindre nominell utløserstrøm enn verdien for minste jordfeilstørm.

Maksimal overgangsresistans for jordelektroden blir beregnet i Febdok i tråd med NEK 400-4-411 og tavlenormen EN60439. Forutsatt at inntakskabel tilsvarende utstyrsklasse (I) forlegning med fordelingen som har «beskyttelse mot sjokk og integritet av beskyttelsesleder». Eller dersom inntakskabel frem til første jordfeilvern er av utstyrsklasse (II)/ dobbelt isolert forlegning. Utkobling ved første jordfeil med en overgangsresistans av høy verdi som forårsaker en berøringsspenning høyere enn 50 V utgår. Som følge av for liten jordfeilstrøm for overspenningsvernkursen til å løse ut ved første jordfeil i et IT-nett (NEK400:2018, 2018c).

Det blir beregnet dobbel jordslutningsstrøm for IT systemer, med et startpunkt av ytterste foranliggende fordelingen som har jordelektrode. Ved å velge for jordelektrode og eller utjevningsforbindelse vil Febdok anta at det er utjevningsforbindelse i fordelingen. Utvalg av jordelektrode type har ingen betydning for beregningene i Febdok. Det utføres ingen sjekk mot utkoblingsbetingelser for tilførselskabel med hensyn på jordfeil i tråd med NEK 400-4-41:411 i programmet (NEK400:2018, 2018c).

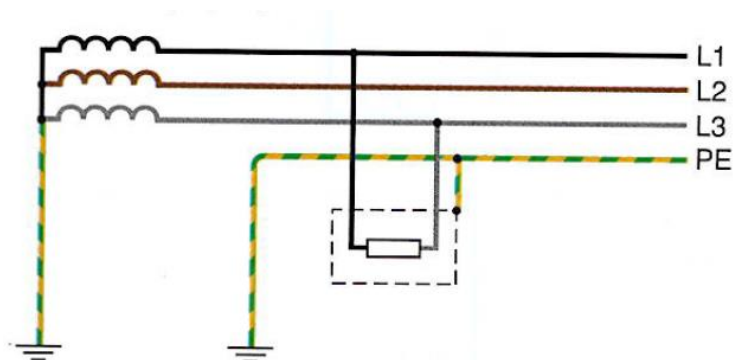
I dialog «Forsyning fra transformator» for IT-system dokumenteres nettspenningen i kV. Som følge beregner Febdok reaktans og resistans på høyspentsiden. Verdiene for kortslutningsytelsesnivå; maksimal- og minimaltilstand for det foranliggende høyspentsiden dokumenteres i «[MVA] sammen med nettspenning. Febdok beregner så den respektive kortslutningsstrømmen  $I_k$  (min/max) i [kA] til foranliggende nett, som dokumenteres i feltet under kortslutningsytelsen.

Under jordingsforhold vedrørende lavspenningsnett dokumenteres følgende verdier;

- Største- dimensjonerende jordfeilstrøm  $I_{dmax}$  [mA]
- Minste dimensjonerende jordfeilstrøm  $I_{dmin}$  [mA]
- Maksimum utløserstrøm for jordfeilvern i installasjonen
- Overgangsresistans for jordelektroden  $R_a$  uten jordfeilvern

Dimensjonerende jordfeilstrøm nivå  $I_{dmax}$  og  $I_{dmin}$  [mA] vil bli gitt av Febdok i tråd med NEK 400-4-41, tilsvarende foranliggende nett for IT-system forsynt direkte fra nettet. Sammen med høyest utløserstrøm for jordfeilvern og maksimal overgangsresistans for jordelektrode (Nelfo, 2022a).

#### Foranliggende TT-system



Figur 3 TT-system hentet fra fordelingssystemer i montørhåndboken for NEK 400:2018

(Ormbostad and Elektroinstallatørernes, 2010)

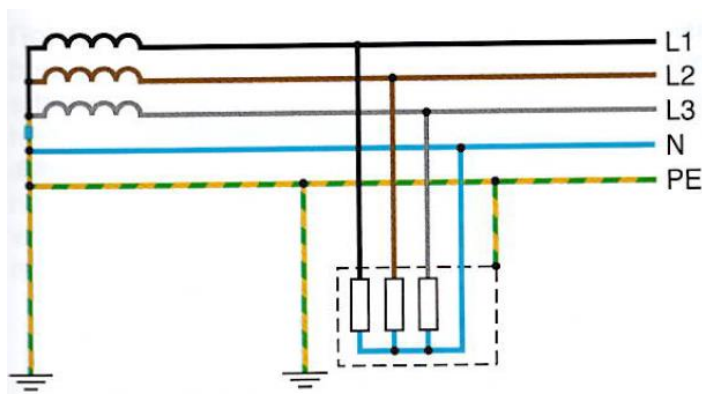
Herunder beskrives foranliggende TT-system ved valg av strømforsyning i Febdok med forsyning direkte fra nettet. Høyest utløserstrøm for jordfeilvern [mA] kontrolleres av Febdok etter valg av jordfeilvern og jordfeilautomater i anlegget. Videre føres det automatisk inn verdi for nominell utløserstrøm. Tilsvarende IT-system blir maksimal overgangsresistans for jordelektroden i TT-systemet beregnet i Febdok i tråd med NEK 400-4-411 og tavlenormen EN60439. Deretter oppgis verdi for maksimal forventet berøringsspenning og høyest utløserstrøm for jordfeilvern. (NEK400:2018, 2018c)

Under dialog «forsyning fra transformator» i TT-system vil innstillingene for kortslutningsytelsesnivå i MVA og nettspenning være tilsvarende for IT-system.

Innstillingene for systemjording indikerer plassering, enten ved transformatoren eller en lavspentfordeling. I tilfellet for installasjon med flere transformatorer, vil Febdok anta plasseringen av jord i lavspentfordeling.

Jordingsforhold vedrørende lavspenningsnettets beskriver kriterier for høyeste utløserstrøm for jordfeilvern i anlegget og maksimal overgangsresistans for jordelektroden under foranliggende IT-system. Tilsvarende innstillinger for IT-nett vil Febdok dokumentere jordfeilvern og jordfeilautomater for installasjonen med største nominell utløserstrøm. Sammen med beregning av maksimal jordovergangsresistans med hensyn på berøringspenning og høyest utløserstrøm for jordfeilvern i installasjonen. (Nelfo, 2022a)

#### Foranliggende TN-S-system



Figur 4 TN-S-system med nøytralleder hentet fra fordelingsystemer i montørhåndboken for NEK 400:2018

(Ormbostad and Elektroinstallatørernes, 2010)

Herunder beskrives foranliggende TN-S-system ved valg av strømforsyning i Febdok med forsyning direkte fra nettet. Kortslutningsnivå for TN-S system innebærer at registres følgende verdier på forhånd;

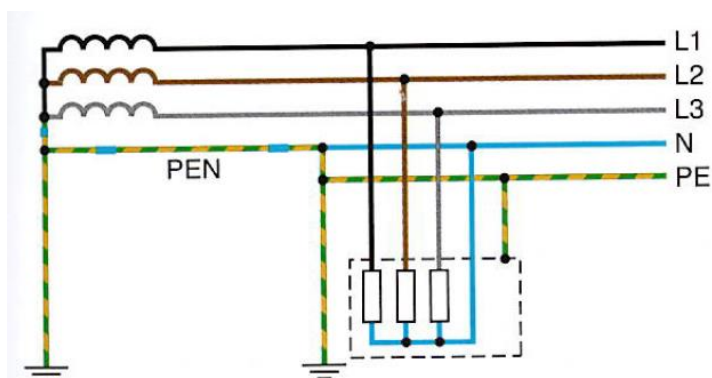
- Maksimum *trepolet* kortslutningsstrøm eller *topolet* i følge av to faser i første fordeling
- Maksimal *enpolet* kortslutningsstrøm mellom fase og nøytralleder
- Minimal *topolet* kortslutningsstrøm mellom fase og nøytralleder
- Minimal *enpolet* kortslutningsstrøm mellom fase og nøytralleder.

I tillegg tas det hensyn til

- Maksimal *enpolet* jordfeilstrøm mellom fase og beskyttelsesleder
- Minimal *enpolet* jordfeilstrøm mellom fase og beskyttelsesleder
- Respektiv effektfaktor for hver verdi i jordfeil- og kortslutningsstrøm
- Forsyning fra transformator for foranliggende TN system med dokumentasjon for nettspenning
- Kortslutningsytelsesnivå i [MVA] tilsvarende i beskrivelsen for IT- og TT-system.

(Nelfo, 2022a)

### Foranliggende TN-C-S-system



Figur 5 TN-C-S-system hentet fra fordelingsystemer i montørhåndboken for NEK 400:2018

(Ornbostad and Elektroinstallatørernes, 2010)

Herunder beskrives foranliggende TN-C-S-system ved valg av strømforsyning i Febdok med forsyning direkte fra nettet. I tillegg til kortslutningsnivåene med maksimum trepolet kortslutning og minimum topolet kortslutning er det tatt hensyn til PEN *Protective Earth Neutral* i et TN-C-S system dvs. beskyttelsesleder kombinert med nøytralleder. Videre oppgis maksimum og minimum *enpolet* jordfeilstrom mellom fase og PEN. I tillegg til effekt faktoren tilsvarende for kortslutningsnivåer. (Nelfo, 2022a)

#### 2.1.3 Hvordan fungerer beregningene i Febdok

Ved å registrere maksimal omgivelsestemperatur i fordelingen vil Febdok stille inne vernets termiske kurver for utkoblingstid og -strøm mot oppgitt temperatur. Belastningens merkestrøm blir beregnet av Febdok vha. verdier for effekt faktor  $\cos \varphi$  og aktiv effekt P. Effektfaktor er nødvendig for beregning av aktiv effekt og spenningsfall. I tilfeller hvor effektfaktoren er ukjent vil sannsynlig verdi oppgis i Febdok.

Derimot med oppgitt belastningsstrøm beregner Febdok aktiv effekt  $P_n$  [KW], selv om alle kjente verdier kan føres inn. Tilsynelatende effekt  $S_n$  [VA] beregnes i Febdok forutsatt at verdier ovenfor er oppgitt. Det er overført nominell spenning fra dialogen «definisjon av anlegg» (Nelfo, 2022a).

#### For kortslutningsstrømmer/feilstømmer

For IT system bli feilstrom ved dobbel jordslutning beregnet i startfasen av jordelektrode eller utjevningsforbindelse i Febdok. Programvaren unngår beregning av jordfeilstømmer og kontroll av utkoblinger på overspenningsvern i tilfeller med montert jordfeilvern og jordfeilvern kombinert med overstrømsvern i installasjonen. I tilfellet med montert jordfeilvern og jordfeilvern kombinert med overstrømsvern i installasjonen blir ansett som ivaretatt beskyttelse for personskaade.

Maksimal overgangsresistans for jordelektroden  $R_a$  beregnes i Febdok. Forhåndsverdier for beregninger i tråd med NEK 400 av maksimalt tillatt berøringspenning på 50 V sammen med maksimal jordfeilstrom ved første jordfeil. Febdok beregner kortslutningsstrømmer som blir vist i «avansert visning» ut ifra oppgitte impedansverdier. Beregningene for kortslutningsstrømmen blir beregnet med verdiene for kortslutningsytelse for det foranliggende høyspentnettet og spenningen. Etter utførte beregningene for jordfeil- og kortslutningsstrømmer i Febdok, tar programmet høyde til tiden for kabelens strømføringsevne. Deretter kontrolleres vern for raskt nok utløsning, gjennomsluppet energi og bryteevne i Febdok. Formålet med oppgitt overspenningsverntype er kun for dokumentasjon.

Belastningen etter UPS, dokumenteres fordelingstype og fasekobling under dialogen for «forankoblet UPS» som belastning. For denne oppgaven benyttes UPS med dataspesifikasjoner for inverter *VICTRON Quattro 48/15000/200-100*. UPS blir dermed betraktet som en inverter i installasjonen for distribuerte

energikilder i mikronett. Derfor neglisjeres statisk switch. For konfigurasjonsinnstillinger valgt i oppgaven se kapittel oppsett av UPS-kurser under metode.

Det som skjer inne i UPS'en er ikke relevant for beregningene i Febdok. Den leverer energi nedstrøms og beregningene utføres med hensyn på verdier inn på likeretter og ut fra vekselretter. Prinsippene for beregning med UPS se kapittel «UPS beregning» i teori.

Ved avvik fra manuell beregning sammenlignet med beregningene gjort i Febdok kontrolleres;

- Beregningsmetode tilsvarende med kortslutningsberegninger i henhold til NEK60909
- Kontrollerer Kabelregister i Febdok
- Kontrollerer verdier for Impedans  $Z[\Omega]$  og Resistans  $R[\Omega]$ .

Måleresultat direkte fra nettet kan føre til måleravvik med forutsetningene for status av tilstand i nettet mhp. kortslutningsytelse. Herunder skal målingene mellom maksimal og minimal kortslutningstrøm oppgis for beregninger i Febdok. Ta hensyn til at måleutstyr kan ha måleavvik. Med eksempel på gitt promille av impedans vil det avvike fra Febdok beregninger med målt verdi på 40 kA kortslutningsområde, avviker med mer eller mindre 6- til 7kA.

Febdok benytter seg av en rekke standarder og tekniske rapporter på bakgrunn av beregningene. De refereres til under dialogen «Febdok Hjelp» i programmet. Videre i teorien nevnes noen få standarder som berøres i beskrivelsen under beregning eller prosjekteringsmetoden. Beregningene i Febdok per i dag defineres med utgangspunkt i en hovedstrømkilde med muligheter for ubegrenset antall generatorer i beregningen på ubegrensede plasseringer i installasjonen. I dette tilfelle bli bidraget beregnet for angitte retninger i installasjonen. (Nelfo, 2022a)

### *Spenningsfall*

Spenningsfall beregnes under dialogen «kabel» er målt i prosent med hensyn på belastning for vektorverdier med vinkelretning i Febdok. Prosentandel «Til belastning» beregnes med hensyn på spenningsfallet fra inntaket eller fordeling, dokumentert tidligere i anlegget under dialog «definisjon av anlegg».

Spenningsfallet beregnes fra kabelen i tilfelle fraværende fordeling. Verdien beregnes i prosentandel fra hovedkurs til og med siste fordeling, beregnes under dialog «Til siste fordeling». Langs kabel/strømskinne beregnes prosentandel for spenningsfallet for kabelen. Maksimal kabel/skinnelenge måler grenseverdi for varsling av spenningsfallet oppgitt på starten av «definisjon av anlegg». Deretter viser Febdok spenning som måles ved belastning under nominell spenning gitt ved «spenning ved belastning i volt og verdi for installasjonens nominelle spenning, etterfulgt av verdi for effekttapet i kabelen eller strømskinnen målt i [kW]. (Nelfo, 2022a)

### *Vernets bryteevne og utkoblingstid*

Under innstillinger for verndatabasen i Febdok velges vern med hensyn til kombinasjon av utløse- og bryteevne. For effektbrytere gitt i leverandørdatabasen med fabrikkinnstilt bryteevne og egenspesifisert utløseevne for vernet med hensyn på belastningsstrøm. For bryteklasser inngår egenspesifiserte innstillinger for verntyper;

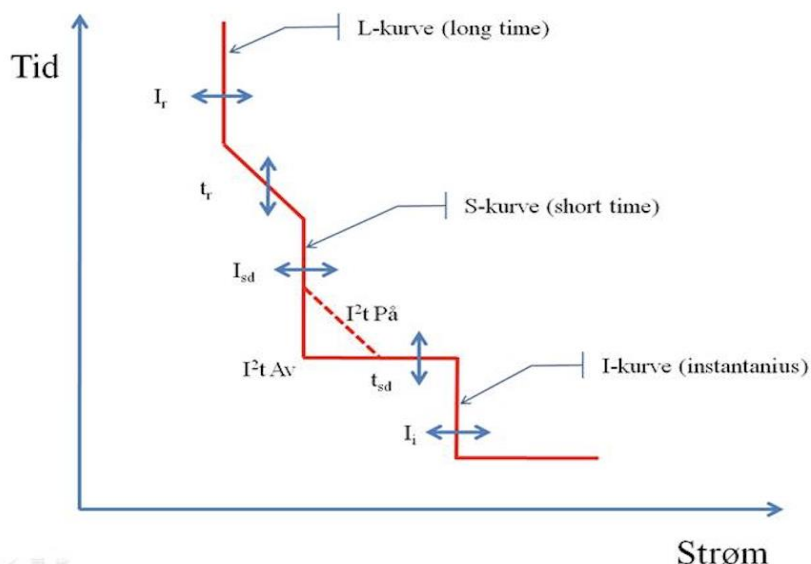
- Automat
- Effektbryter
- Motorbeskyttelse
- Smeltesikring

I følge Nelfo vil Febdok foreta valg av vern på bakgrunn av «grov antagelse». Under valg av vern vil sannsynligvis foreslå vern som mangler tilstrekkelig overbelastning-, kortslutning og/eller personbeskyttelse ved utelatt jordfeilvern. Følgende kontrolleres med innstillinger for kontroll av vern.

Febdok stiller spørsmål for vern med lav servicebryterevidet  $I_{cs}$  og høy brytereviden  $I_{cu}$  i forhold til høyeste kortslutningsstrøm i fordelingen. I tillegg stilles spørsmål til krav for utløsertiden ved tilfeller der kortslutning overstiger 5 sekunder. I dette tilfellet vil vernet slå ut ved oppstart for eksempel en motorkurs. Vern med sakkyndig betjening velges i henhold til EN60947, med hensyn til beregning av  $I_{cu}, I_{cs}, I_{cw}$  og  $I_{cm}$  [kA]. Ved tilfeller for usakkyndig betjening velges vern i henhold til NEK EN 60898.

Febdok optimaliserer utvalget av vern for belastningen i tråd med FEL (Forskrifter for elektriske lavspenningsanlegg) og NEK 400. Utvalget av vern med oversikt av termiske egenskaper, belastningsstrøm og kabelens strømføringsvevnet, vernets innstillinger med hensyn på kortslutning og feilstrømmer for kretsen (NEK400:2018, 2018a).

Under installasjoner med komponenter eller angitte vern som ikke inngår i databasen, skal leverandøren for komponenten kontaktes for registrering av egenspesifisert dokumentasjon.



Figur 6 Prinsippskisse tid/strøm for innstillinger av elektroniske tidsforsinket vern i FebDok under dialogen «Hjelp»

(Nelfo, 2022a)

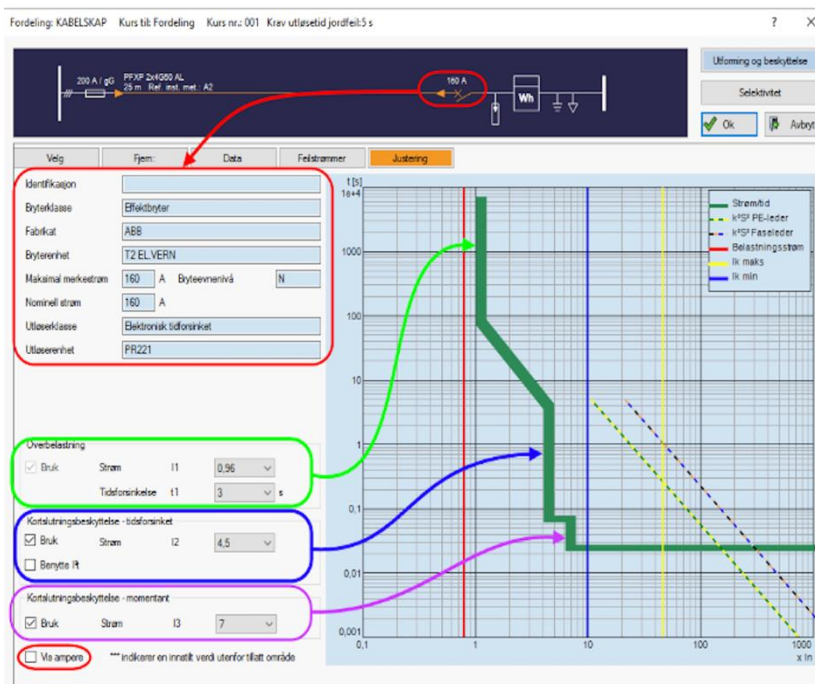
Kravene for vern i FEL/ NEK 400 omhandler først og fremst belastningen til vernet. Kravene for personbeskyttelse, overbelastning- og kortslutningsbeskyttelse er påvirket av belastningstypen og belastningsstrøm. Elektroniske tidsforsinkende vern kan reguleres i Febdok med justeringsmuligheter fra leverandør. Justeringene omfattes ved;

- Termisk justering med hensyn på overbelastning med innstillinger «L» for lang tid.
- Korttidsjustering med hensyn på kortslutning «S» for kort utkoblingstid.
- Momentan justering med hensyn på kortslutning «I» for Instantaneous.

Se figur 6, prinsippskisse for utkoblingstid med gjennomsluppet energi  $I^2 t$ .

Under i figur 8 vises utløserkurve for vernet under justering. Nederst til venstre er det et eksempel på justerbare muligheter for et kontinuerlig vern i Febdok som kan være nyttig for oppnåelse av ønsket

selektivitet, så lenge det er i tråd med NEK 400 og godkjent av leverandøren. Enkelte vern forekommer med nedtrekkmenyer i form av step-funksjon. (Nelfo, 2022a)



Figur 8 Eksempel på Innstillinger av elektroniske vern i FebDok under dialogen «Hjelp»

Ip».

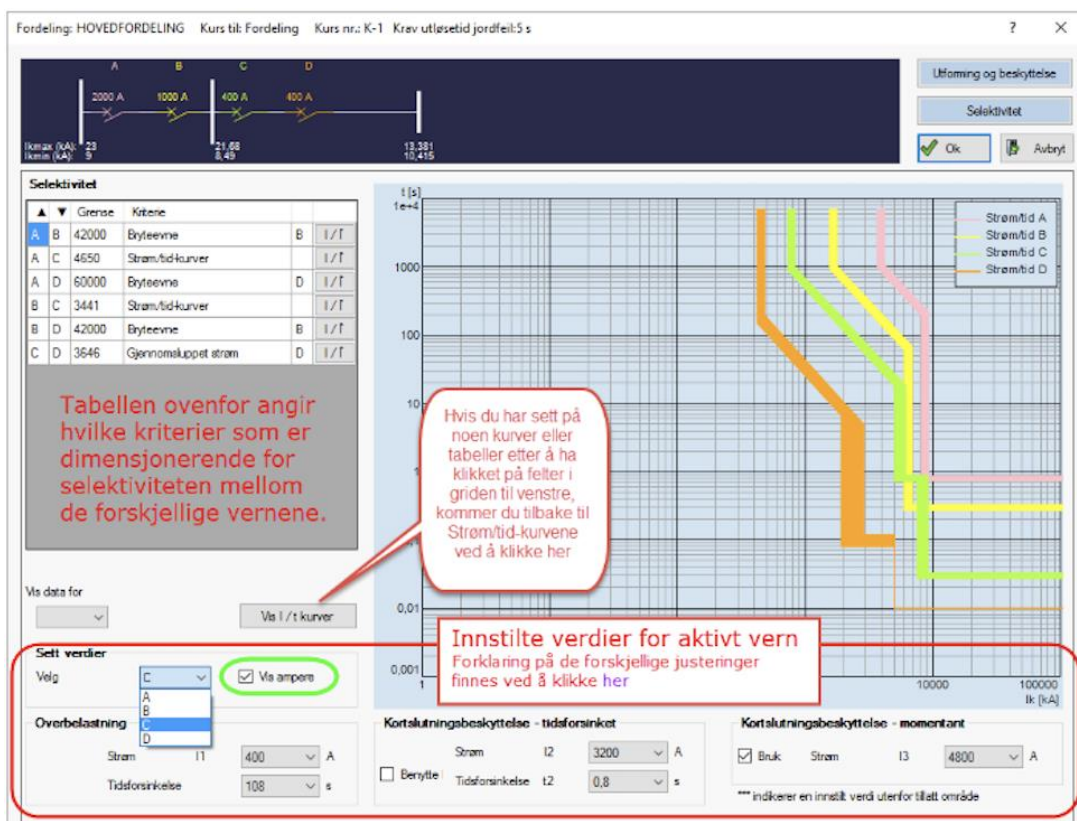
(Nelfo, 2022a)

### Selektivitet (selektivitetsanalyse)

Selektivitet oppnås med at de nærmeste vern slår ut ved en feil i nettet. Dette innebærer at resten av anlegget kan fortsette sikker drift siden feilen er indikert av nærmeste eller innstilt vern som koblet ut for å unngå at hele anlegget blir spenningsløst ved kortslutning eller jordfeil. Selektivitet bestemmes mellom overstrømsvernet og det vernet som er koblet foran oppstrømskursen. Dersom det er valgt separate vern for oppstrømskursene kan det oppnås selektivitet for alle fire vern i nettet.

Grenseverdiene for utkoblingen bestemmes av produsenten og settes for at riktig vern skal kobles ut ved feil. Med delvis selektivitet vil kun et overstrømsvern nærmest feilen løse ut etter at kortslutningsstrømmer overstiger verdi på mindre enn maksimal forventet kortslutningsstrøm.

«Selektivitet som oppnås mellom elektriske komponenter vil bidra med kontinuitet i strømtilførsel, beskytter mot tap av forsyning for kurser med nødvendig beskyttelse.» (NEK400:2018, 2018a)



Figur 9 Et eksempel for selektivetsanalyse i Febdok fra kursdialogen "Selektivitet".

(Nelfo, 2022a)

Øverst i figur 9 vises oversikt over selektivetsgrenser mellom vernene navngitt med bokstav og farge. Det er ikke tillatt å endre innstillinger for justering av vern i forankoblede kurser med;

- Automater
- Effektbryter
- Motorbeskyttelse
- Smeltesikringer

Nelfo angir anbefalinger fra NEK 400-310 Strømforsynings pålitelighet. Det vurderes for hvert enkelt tilfelle om det skal innebære spesielle krav til pålitelighet for strømforsyning med følgende kontroll av tilfeller ved (II) «Valg av vern for å oppnå selektivitet.» Dette vurderes i samarbeid med kunden i forhold til grenseverdiene gitt av Febdok i selektivetsanalysen. (NEK400:2018, 2018a)

Utløserkurvene for strøm/tid er nødvendig dokumentasjon for en helhetlig vurdering av selektivitet sammen med selektivitetstabeller fra vernleverandør. Kurvene dokumenterer utløsning og selektivitet mellom vern under oppstrøm og nedstrøm. Ved å legge de oppå hverandre sammenlignes følgende verdier manuelt ut ifra utløsningskurven:

- kabelens strømføringsevne  $I_z$
- vernets kortslutningsytelse  $I_c$
- belastningsstrøm  $I_n$



Det er i tillegg *sterkt* anbefalt med utvalg av vern fra samme leverandør som brukes i installasjonen.

Øverst i tabellen på figur 9 er det oppsatt selektivitet mellom to og to vern med til sammen fire vern i anlegget, med utløserkurver i tid/strømdiagram for alle fire vern i anlegget til høyre på figuren.

Eksempelet er hentet fra dialogen «Hjelp» i Febdok. I ifølge tabellen er det oppnådd selektivitet opp til 42 kA mellom A og B, B og D. Helt opp til 60kA mellom A og D. Febdok viser til selektivitetstabellen at mellom vern A og C, B og C må Strøm/tid-kurven undersøkes manuelt i forhold til forventet feilstrøm /kortslutning. Samtidig som det er gjennomsluppet energi mellom selektivitet for vern C og D. Her vises det at gjennomsluppet energi for C-vernet er lavere enn energien som skal til for å løse ut D-vernet.

Ved å velge vern ut ifra nedtrekkmenyen nederst til venstre i figur 9 viser Febdok oversikt over innstillingene for vernet med innhold av;

- Verndata
- Bryteenhet
- Bryteevne
- Utløserenhet

(ABB, 2016, Nelfo, 2022a)

#### *UPS-modell i Febdok*

Feilstrømmer i UPS-modell er avhengig av feil impedans i kretsen. UPS detekterer feiltilstand når strømmen blir større enn maksimal overlast strøm. Etter at feiltilstand registrert, leverer UPS en feilstrøm i løpet av bestemt tid. Det betyr at en eventuell må kobles ut, før UPS kobler ut. UPS feilstrøm i febdok tar høyde for impedans i nedstrøms nettet. Det vil si at strømmen minker når avstand til feil stedet øker. Ohms lov brukes for å regne ut feilstrøm fra en UPS i Febdok.

### 2.1.4 Utforming av installasjon og beskyttelse

Innstillinger for overstrømsvern under dialog «utforming av beskyttelse» tar hensyn til tilfeller med *ingen-, felles- eller kortslutningsbeskyttelse*. Med ingen overstrømsvern i kursen vil programmet kontrollere for overbelastning og kortslutningsbeskyttelse i kabel med forankoblet-vern. Uten et forankoblet-vern utgår undersøkelse av beskyttelsen for kabelen i Febdok. Kontrollert beskyttelse utgår dersom kabelen til grupperingen blir tatt vekk i tilfeller for innstillinger ved tilkoblende komponenter. Ved valg av fellesvern vil kabelen sikres for overbelastning og kortslutning. For IT- og TN-system med unntak av «utkobling ved første jordfeil» vil dette vernet omfatte \*FEF §2-4 «beskyttelse mot elektrisk sjokk». Felles vern velges ved tilfeller for kombinert beskyttelse mot overstrøm og jordfeilvern med hensyn til personbeskyttelse. Febdok undersøker kun utkobling på bakgrunn av beskyttelse for kortslutning og jordfeil uten tilkoblet jordfeilvern.

Jordfeilbryter/-varsler plasseres ved belastning eller ved start av kursen. Nominell utløserstrøm skal oppgis for innstillinger av jordfeil.

Utjevningsforbindelse NEK 400-4-41 Beskyttelse mot elektrisk sjokk: 411 Beskyttelsesmetode automatisk utkobling av strømtilførselen (NEK400:2018, 2018a).

### 2.1.5 Forskrifter i Febdok

Bryterkarakteristikk for vernet med beskyttelse for overbelastning av leder skal tilfredsstille begge kravene i NEK 400-4-431.4 og 5-553.2, sammen med tilleggskravet for ledertverrsnitt for PVC isolasjon tom. 4mm<sup>2</sup> og koordinering mellom ledere og vern ref. avsnitt 823.433.1. Kabelen skal til en hver tid føre lavere strøm en kabelens tåleevne IZ (NEK400:2018, 2018a).

$$I. I_b \leq I_n \leq I_z \quad I_b \leq I_z \text{ «gjelder under fast last» (2.1)}$$

$$II. I_2 \leq 1,45 * I_z \text{ «utgår ved fast last» (2.2)}$$

$$I_2 = K_n \cdot I_n \quad (2.3)$$

(NEK400:2018, 2018a)

Formelen for  $I_2$  er for vernets utkoblingsstrøm innen innstilt tid (inntil en time) gitt av leverandør eller produktstandard. Febdok opprettholder beskyttelse mot kortslutning i tråd med FEL-NEK400 ved kontroll av bryteevne for vernet. Vernets bryteevne skal være større eller lik maksimal kortslutningsstrøm for installasjonen. I tillegg kontrolleres at energien ved største kortslutningsstrøm ikke overstiger energien for maksimal tåleevne i kabelen. Programmet tar samtidig hensyn til utkobling av vern ved minste kortslutningsstrøm på tampen av kabelen. (NEK400:2018, 2018a)

Berøringsbeskyttelse mot personskaade opprettholdes ved utkobling av overspenningsvernet i tråd med NEK 400-4-411 for TN – system med høy kortslutningsstrøm og IT-system ved første jordfeil med feilstrøm ved dobbel jordslutning. (NEK400:2018, 2018a)

Beregningene for jordfeil-og kortslutningsstrømmer i Febdok med grunnlag for CLC Rapport: 64003/TR 50480:2011 omfatter kravene for maksimalstrøm med spenning på  $1,1 * U_n$  nominell spenning med leder temperatur på  $20^\circ C$  og minimalstrøm med spenning på  $0,95 * U_n$  nominell spenning  $U_n$ . Viser til påvirkningene som spiller inn for ledertemperaturen på minimale strømmer.

Referansebetegnelser henhold til NEK EN 81346 omhandler identifikasjon for automatisk generering for alle forbrukerkurser, fordelinger, grupperinger, skinnefordelinger, avgrensninger og tilkoblingspunkter i Febdok.

(Nelfo, 2022a, NEK400:2018, 2018a)

## 2.2 Mikronett

Definisjon på et mikronett i det Store Norske leksikon er:

*«Et mikronett er et lokalt avgrenset overføringsnett som ved behov eller ønske kan koble seg fra det overliggende nettet og driftes videre med lokalprodusert eller lagret kraft».* (Lillebo, 2020)

Avgrensede overføringsnett kan variere i størrelse, antall laster, typer energikilder og energilagring metoder. Når behovet er å sikre nødvendig energitilførsel og driftssikkerhet for kritiske laster i en installasjon, kan energikilder installeres i nærheten av kunder og kritiske laster. I praksis betyr det å koble en generator eller en batteribank til den samme samleskinne som disse lastene er koblet til. En slik oppsett samler laster, kilder og kabling mellom dem på et sted. Er lokal produsert effekt stor nok, kan installasjon drives uavhengig av det øvrige overføringsnettet. Koblingspunkt mellom forsyningsnettet og mikronettet kalles for Point of Connection (POC) (Utvik et al., 2018) eller Point of Common Copling (PCC)(Mahdavi Tabatabaei et al., 2020).

Definisjon fra det Store Norske leksikon beskriver best ikke-isolert mikronett, kan også kalles for nettilknyttet mikronett (Utvik et al., 2018). Denne konfigurasjon sikrer best utnyttelse av lokal energiproduksjon (IEC\_62898\_1, 2017). Overskudd kan selges til nettet, samtidig som nettet kan brukes til å fylle på tappet energilager. Slik fleksibilitet kan brukes for peak-shaving. Energi til effektkrevende laster leveres fra lokal ESS i et mikronettet på de tidspunktene strømprisen er høy, eller belastning på nettet i nærliggende området er høyere enn gjennomsnittet (Roness, 2021). På steder adskilte fra eksisterende strømnnett, mikronett klassifiseres som isolerte. Det kan være både praktiske og økonomiske argumenter imot å koble lokalt strømnnett til fordelingsnettet. Isolerte mikronett er selvforsynte, noe som krever kontroll på produksjon, lagring og forbruk av energi.

En variant av selvforsynt, nettilkoblet mikronett kalles virtuell mikronett. Den har ikke mulighet for øydrift, men kunstig øymodus kan defineres når det går ingen strøm gjennom PCC (Müller et al., 2021). Denne oppgaven ser vekk fra denne drift modusen.

Mahdavi Tabatabaei deler mikronett i fem typer fra markedets standpunkt: kommersielle, kommunale, campus, militære og fjern/isolerte mikronett. Denne grupperingen baser seg på mikronettets sine egenskaper, som igjen er basert på kunder sine behov (Mahdavi Tabatabaei et al., 2020). I vår case er det et campus mikronett som skal drifte viktige laster ved eventuelt strømutfall, samt brukes som et forskningsprosjekt for SINTEF. På campus testes implementering av flere DER og ESS i strømmettet under reale driftsforhold (SINTEF, 2020).

### 2.2.1 DER - Distribuerte energikilder.

DER er en samlebetegnelse for både Distribuert Generasjon (DG) og energilagring system (ESS). DG kobles til nettet gjennom en inverter eller roterende maskin med transformator. Det krever forskjellige kontrollsystemer under normal drift og øydrift. For å unngå feilstrømmer under innkobling til hovednett, må DG synkroniseres med frekvensen og spenning til denne (Ray et al., 2011). DG som leverer DC-spenning trenger en DC/AC inverter for å kobles til en AC-mikronett. For DG med roterende generatorer kan bruk av inverter vurderes under prosjektering.

Dieselgenerator, mikroturbin, hydrogen celle teknologi, solcelle paneler og vind-turbiner er de mest vanlige eksempler på slike energikilder. Den norske regjeringen har satt et mål for å redusere klimagassutslipp med 50% inne 2030. Dette er en del av FNs bærekraft mål nr 13 om å stoppe klimaendringer ved å begrense gjennomsnittstemperatur stigning (Regjeringen, 2021). Valget av energikilder til et nytt mikronett i dag må begrunnes med behov- og kostnads analyse. Denne rapporten beskriver de mest vanlige fornybare energikilder i et mikronett.

#### *Solceller*

PV system gjør om sollyset til elektrisk energi, det fører til flere ulemper. Energiproduksjon er avhengig av tiden på døgnet. Over halvparten av døgnet produserer solceller ikke strøm. Effekten produsert fra en gjennomsnittlig solcellepanel er 150-200W per m<sup>2</sup> (Catlow, 2021). Høye effekt behov krever store areal for installasjon av PV-paneler. Fordelen er at levetiden for et solcelleanlegg kan være opp til 40 år. Flertallet av seriøse produsenter garanterer 80% effekt produksjon etter 25 år (Fusen, 2018). Mesteparten av klimagass utslipp skjer under produksjon og etter levetiden til paneler. Under drift PV-paneler forurenses ikke nærliggende miljø.

#### *Synkron generator*

Den består av en motor eller turbin som beveger rotor til elektrisk motor. Magnetisk felt mellom rotoren og statoren produserer strøm og spenning som kan leveres til andre laster. I en dieselgenerator eller en Combined Power and Heat (CHP) blir potensiell energi lagret i kjemiske forbindelser i drivstoff gjøres om til kinetisk energi, så konverteres til elektrisk energi for overføring. Vind- og vannturbiner settes i bevegelse av medium (vind og vann) som har høy kinetisk energi. Slike maskiner krever kontroll av frekvens og spenning for å levere nødvendig kvalitet til mikronettet (Mahdavi Tabatabaei et al., 2020).

Dieselgenerator kan kjøres døgnet rundt. Derfor passer den best som en back-up kilde når fornybare kilder leverer for lite eller ingen energi i det heletatt. En CHP drives av treverk pellets og har bruksmønster tilsvarende en dieselgenerator. Samtidig har pellets lavere klimagass utslipp, siden treverk er et karbonnøytralt materiell.

#### *Fornybare energikilder - RES*

Fornybare energikilder (RES) har et varierende mønster i energiproduksjon. Strømvavbrudd og periodevis variabel effektlevering er den største ulempen. Det kan delvis løses med å økning av kapasitet på installasjon, utvidelse av produksjon med andre typer generatorer og bruk av ikke fornybare kilder som

back up. I stedetfor kan energilagringssystemer (ESS) implementeres i Mikronett (A. Rahman et al., 2015). En ESS er en fellesnevner for varierende energikilder i et mikronett. Den gir stabil og balansert kraftleveranse i øymodus. Under normal drift overskuddskraft lagres i ESS til seinere bruk. Ved behov leverer ESS kraft til fordelingsnett.

I ESS konverteres elektrisk energi tilbake til mekanisk, elektrokjemisk, elektromagnetisk eller varme energi. ESS som energikilde gir tilleggskapasitet under strømforbruk topper, forenkler RES integrasjon og sikrer energi for kritiske laster hos sluttbrukere. Geografisk plassering, størrelse av mikronett og effekt behovet bestemmer energilagringssystem. Fra figur 8.5 i (Mahdavi Tabatabaei et al., 2020) elektrokjemiske batterier (Pb, NiCd, Li-ion) har et bredt effekt spekter mellom 1-1000 kWh lagringskapasitet og 1 – 1000 kW effekt. Batteribank blir det naturlige valget for mikronett i større boligbygg og næringsbygg, der volum til ESS er avgjørende ved begrenset areal. En konverter lader batteribanken og leverer strøm tilbake til nettet, derfor klassifiseres en batteribank som en DER med kraftelektronikk grensesnitt. Typer laster varierer i et mikronett. Både ohmske og induktive laster kan drives på et mikronett under normal drift. I øydrift DER-energi kilder må prosjekteres for laster med eventuelle høye startstrømmer, noe som krever å overdimensjonere invertere i forhold til normal drift.

Mikronett arkitektur diskuteres seinere i rapporten. Figur 10 under viser en prinsippskisse for et Mikronett som inneholder batteribank, solcelle-system, vind generator og laster. Dette er eksempel på et parallelt mikronett, hvor alle distribuerte energikilder er koblet til den samme tilførsel i hver del av mikronett. Denne konfigurasjon tillater å kontrollere hver enkel DG uavhengig, og kapasitet kan enkelt utvides med flere kilder etter behov. Parallellkobling passer best for lavvoltage distribusjon, for høyspenningssystemer er det en fordel å seriekoble DG for å bygge opp til nødvendig spenningsnivå (Sun et al., 2022).

*I. Patrao et al. / Renewable and Sustainable Energy Reviews 43 (2015) 415–424*

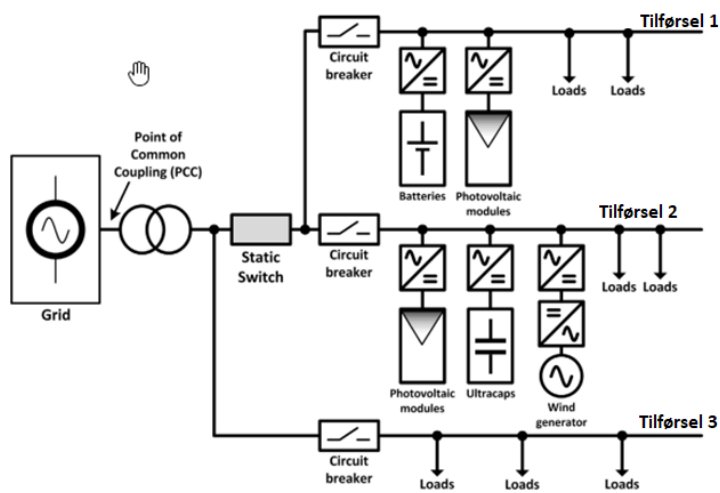


Fig. 3. AC microgrid architecture.

*Figur 10 Eksempel på en AC mikronett topologi*

*(Patrao et al., 2015)*

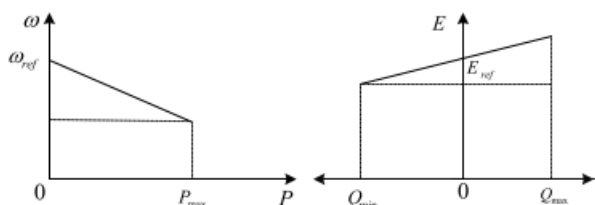
### 2.2.2 Kommunikasjon, kontroll og styring i mikronett.

En DER tilkoblet AC-nett trenger å levere energi til den samme frekvens, spenning og fase-vinkel som nettet har. Avvik fra å være synkronisert reduserer kvaliteten på levert kraft, sinuskurven blir mer forvrengt og fører til harmoniske strømmer som igjen kan føre til utkobling av en DER eller pendling av harmoniske strømmer i deler av mikronett. Det skaper unødvendig belastning på elektronikken i DER (Saeed et al., 2021). Under feilforhold går det store strømmer i DC-krets i en DER. Det fører til at

synkronisering med nettet forsvinner. Derfor er det nødvendig for en DER å kontinuerlig synkronisere frekvens, spenning og fasevinkel på utgangen. Metode for synkronisering må møte standardkrav beskrevet i internasjonale standarder: IEEE1547, IEEE 1588-2008, IEC1727, IEEE 929-2000 (Mahdavi Tabatabaei et al., 2020). Disse metodene bygger på prinsippet for en kontroll løkke, der målte parametere sammenlignes med standard innstillinger og justeres fortløpende. PLL og FLL er mye brukte metoder (Mahdavi Tabatabaei et al., 2020). Ved valg av utstyr er det nødvendig å sjekke at synkroniseringsmetode tilsvarer standarden. Standarden NEK 62898 beskriver sentralisert og desentralisert kontrollprinsipp. Den første krever en hoved kontrollenhet med kommunikasjon mellom den og alle enhetene i mikronettet (IEC, 2017).

Kommunikasjonsmodell i et mikronett består av tre nivåer, hvor det øverste nivået overvåker den totale energiflyten mellom mikronett og fordelingsnett. Det mellomste nivået kontrollerer spenning og frekvens variasjon forårsaket av enkle komponenter. På det laveste nivået er det kommunikasjon mellom målere, vern rele, feilovervåkere og DG i mikronettet. Slik styringskontroll gir mulighet for bedre balansert spenning, smart energi bruk og presis produksjonskontroll (Kumar et al., 2019, Sun et al., 2022). Et slik hierarki krever egne kommunikasjonsprotokoller og utstyr for hvert nivå. Utstyret fra forskjellige produsenter kan ha forskjellige protokoller. Forventet levetid på et mikronett kan være mellom 10 og 40 år, mens kommunikasjonsutstyret har levetid på 10-20 år. IEC 61850 standard gir en protokoll for automasjon og kommunikasjon i en energi system. Den beskriver blant annet nødvendighet for enkel integrasjon av nytt utstyr i eksisterende system (Mahdavi Tabatabaei et al., 2020).

Desentralisert kontrollprinsipp innebærer at hver enkel kontrollenhet styrer sin komponent i mikronett ut ifra målinger kontrollenhet selv utfører. Som regel måles det strøm, spenning eller frekvens (IEC, 2017). Med bakgrunn kommunikasjons hierarkiet beskrevet over, ligger desentralisert kontroll på det laveste nivået, men uten direkte kommunikasjon mellom enhetene. Hver enkel kontrollenhet krever manual innstillinger før den kan settes i drift. Toleransegrenser for spenningsfall og frekvensavvik må innstilles før idriftsettelse av mikronettet. For å minimisere spenningsfall mellom parallelle DER bør de kobles til en felles samleskinne. Det gir mindre tap på referanseverdier for spenning og frekvens (Ahmed et al., 2020). Master – slave kontroll er en av desentraliserte prinsipper. Den krever kommunikasjon mellom master og slave enheter. Slave får direkte signaler om frekvens og spenning som den skal levere, derfor er en PLL-enhet for synkronisering unødvendig. Ulempen oppstår når master – enhet havarerer. Løsningen kan være å bytte mellom masterenheter med spenningskapende egenskaper i tilfeldig rekkefølge. Droop-based kontroll er teknikk uten kommunikasjon mellom DER enheter. Fordelen er enkel implementering av flere DER i mikronett med parallelle omformere. Metoden tar utgangspunktet i egenskaper til synkron generator med aktiv og reaktiv effekt. Som avbildet på grafen i figur 11, styres frekvens ved å forandre på aktiv effekt produksjon, spenning reguleres ved å justere reaktiv effekt ut av omformeren. Reaktiv effekt kan være induktiv og reaktiv. En ulempe med metoden er at den er tilpasset høyinduktiv nett, mens lavspenningsnett har tilnærmet ingen reaktans. Det finnes flere metoder som forbedrer «Droop» kontroll. (Ahmed et al., 2020)



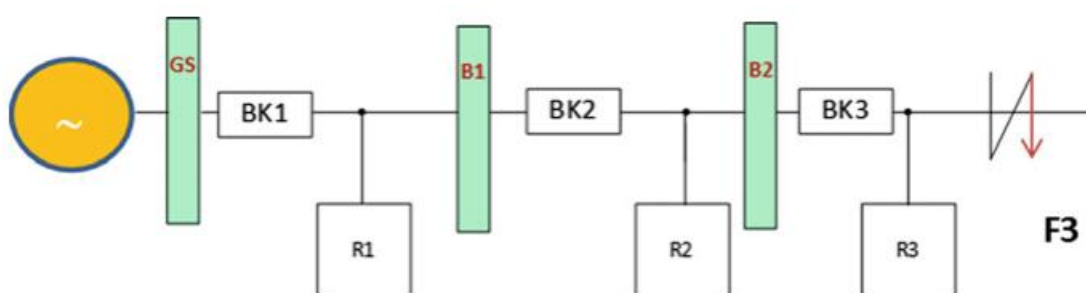
Figur 11 Prinsipp for Droop kontroll

(Ahmed et al., 2020)

## 2.2.3 Beskyttelsesprinsipper

Målet med drift av både konvensjonell strømfordelingsnett og mikronett-anlegg er pålitelig drift og tilgang til energi når forbruker trenger det. Ved planlegging av en installasjon er det nødvendig å dimensjonere for effekt levert til sluttbruker. For å opprettholde pålitelighet, må anlegget prosjekteres med beskyttelse mot eventuelle feil under forskjellige driftssenario og strømrørninger. Det konvensjonelle fordelingsnettet har en-vei energiflyt, den overføres fra generatorer og overføringsnett på høy-spenningside til belastninger på mellom- og lav-spenningside. Slik utforming kan brukes der det ikke er nødvendig å flytte energi i flere retninger, som i parallell eller ring topologi.

En pålitelig drift ved en feil på nett eller utstyr kan beskrives som å begrense utkoblinger av vern til det området der feil oppstår. Det er ønskelig å opprettholde energi tilførsel til flest mulige kunder stabil. I ring- og parallelt fordelingsnett kan bruk av relevern med kommunikasjon og tidsforsinkelser isolere feilstedet, mens energi kan fortsatt levers til alle kunder gjennom den parallelle tilførselen. Når et vern slår ut i et radiale fordelingsnett blir all tilførsel nedstrøms det vernet blir strømløst. Det er ønskelig at det første oppstrømsvernet nærmest feilstedet slår ut. I et radiale fordelingsnett er kortslutningsytelse høyest ved trafo og lavest nær brukeren og lasten. Figur 12 under viser tre vern fra venstre til høyre. Forskjellige kortslutning ytelse og tidsforsinkelser mellom disse vern gir selektivitet mellom vern, vernet nærmest feilstedet kobler ut. BK1 trenger høyest kortslutningsytelse, BK3 lavest. Bruk av relevern er ikke utbredt i lavspenning fordelingsnett grunnet pris. Smeltesikringer og automatvern (MCB) beskytter fra overstrømmer i lavspenning fordelingsnettet.



(Mahdavi

Tabatabaei et al., 2020)

Figur 12 Prinsipp for radiale fordelingsnett med avbildet feil på nettet

DC distribusjon kan ikke vernes med teknikker brukt i AC-fordelingsnett (Mahdavi Tabatabaei et al., 2020). Derfor bruk av DER med DC/AC invertorer forenkler beskyttelse av en mikronett-installasjon. Hver enkel DER har sin egen kortslutningsstrøm bidrag ved eventuell feil, samtidig som bidraget kan variere med tiden på døgnet eller produksjonsmønstre. Det kompliserer implementering av DER-kilder i radialnett. For å opprettholde selektivitet og unngå strømflyt i to retninger kan DER-kilder grupperes sammen og fordeles i flere mikronett. Under øydrift er DER tilkoblet en samleskinne som opererer som en oppstrøms strømkilde i radialnett. Feilstrømmer nedstrøms den samleskinne blir avtagende og passive vern oppnår selektivitet.

Andre beskyttelsesmetoder i AC-mikronett baseres på overvåking av spenningsnivå, kontinuerlig måling av impedans (avstandsrele), differanserele og overstrømsrele. Slike rele diskuteres ikke i denne oppgaven. Deres hoved oppgave er beskyttelse av DER mot overlast.

### Jording

Jording i en elektrisk installasjon har som funksjon å lede vekk feilstrømmer til jord og begrense berøringspenning til 50V under en feil. Disse tiltakene ivaretar sikkerhet til mennesker, dyr og eiendom.

FEL stiller de sikkerhetskrav i paragraf 16, planlegging og vurdering av risiko (Nelfo, 1998). Det samme gjelder for mikronett. IEC 62898 beskriver jording installasjon i nett-tilkoblet mikronett. Kabel- og isolasjonsmaterialer skal tåle ytre påvirkninger fra omgivelser. Jording av DER og annet utstyr skal samsvare med jording metode med resten av installasjon. For lavspenning mikronett gjelder det IEC 60364 eller NEK 400:2018 som bygger på IEC 60364. For isolerte mikronett gjelder det FEL krav og IEC TS 62257-5. (IEC, 2017)

Generelt for lavspenninginstallasjon gir NEK 400 teoretisk grunnlag og veiledning til utførelse av jording-anlegg. Når det er beskyttelses elektroder flere steder i installasjon, skal de kobles sammen på en eller flere sammenkoblede hodejordskinner. Jorningsopplegget skal utføres slik at den er tilgjengelig over alt i installasjon. Det kan være maskeformet, stjerneformet eller ring jording-topologi. NEK 400 setter krav til beskyttelsesledere og utjevningsleder. Den første anvendes til beskyttelses jording, den skaper forbindelse til første elektrofordeling og jordfeilkrets går gjennom den lederen. Utjevningsleder sørger for ingen potensialforskjell mellom to ledende konstruksjoner. Metallrør jordet fra hoved jordskinne eller jordleder fra en elektrisk motor til nærliggende metall arbeidsbenk er eksempler på en utjevning. (J. E. Ormbostad, 2018)

### *N-leder i mikronett-installasjoner*

Mikronett-installasjon består av flere strømkilder. For lavspenningsinstallasjoner, samling av normative referanser NEK400 beskriver TN-fordelingssystem og Norsk særegen krav for tilkobling av flere strømkilder i systemet. Paragraf 303.2.1.2 tar opp mulighet for flyt av feilstrømmer mellom flere strømkilder gjennom beskyttelses ledere. Dette fører til brann, elektromagnetisk støy og korrosjon i utstyr og ledere. For å minimisere sannsynlighet for feilstrømmer, setter NEK400 følgende krav. Nullpunkter i energikilder skal ikke jordes direkte. Disse nullpunktene skal forbindes med hverandre gjennom felles PEN-leder. Den skal jordes slik at alle nullpunkter får felles jordtilkobling. I hovedfordeling etableres det en lask til N-leder i installasjon fra PEN-lederen (NEK400:2018, 2018b),(J. E. Ormbostad, 2018). Utførelse av det siste kravet må prosjekteres for hver enkel mikronett topologi. Hovedfordeling kan ha flere kilder som lever strøm til den, eller flere hovedfordelinger etter felles samleskinne i mikronett kan gå til flere bygg. Overgang fra TN.C nett til TN-C-S må planlegges i installasjon. Ved prosjektering av vern og valg av kabler skal kravet fra NEK 400:2018 «*Det skal ikke monteres bryter eller frakoblingsutstyr i PEN-lederen.*» følges (NEK400:2018, 2018b).

### 2.2.4 Metoder for planlegging av mikronett

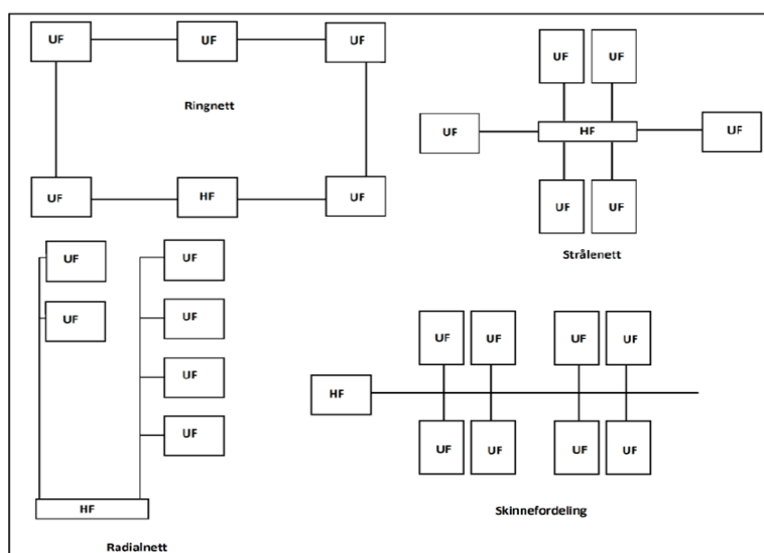
En nyinstallasjon av en mikrogenerator er en større økonomisk utgift, enn tilkobling til nærliggende eksisterende fordelingsnett (Lotfi and Khodaei, 2017). Den økonomiske fordelingen kan blant annet være produksjon av energi lokalt under «Peak power» perioder. Planlegging og simulering av hele livsforløpet til installasjonen kan være nødvendig før den investeringen blir gjort. Den grunnleggende informasjonen modellering baseres på er kundenes ønsker, effekt på produksjonskapasitet og nødvendig energi behov. NEK 62898-1 standard foreslår punktliste som skal dekke nødvendig informasjon for en realistisk modellering av AC-mikronett installasjon. Utfordringen for standardiseringen av planlegging er varierende behov i et mikronett. Matematisk sett er det mange variabler. Mixed Integer Linear Programming (MILP) er optimaliseringsalgoritmer som gjør beregninger med mange variabler overkommelig (Stadler et al., 2020). For mindre installasjoner deler av planlegging kan simuleres for deg selv. I sin masteroppgave har Håkon Duus utdypet hvilken optimaliserings programmer og verktøy som kan brukes til mikronett planlegging (Duus et al., 2015). Denne oppgaven tar for seg beskyttelse mot elektriske feil i mikronett del av planlegging. Vurdering av last, dimensjonering av kabler, valg av vern og evne til å opprettholde sikkerheten for personer og dyr i elektrisk installasjon del av mikronett.

Lastanalyse er grunnleggende under planlegging av mikronett. Laster som krever effekt under driften når DER skal levere energi er avgjørende for dimensjonering av produksjon kapasitet. Under beregning trenger man å vite både aktiv og reaktiv effekt. Invertere kan stilles inn med en effektfaktor,  $\cos(\phi)$ , som

last trenger. Det må tas høyde for fremtidige økning av belastning og varierende effekttopper i løpet av et døgn.

## 2.3 Topologier

Begrepet topologier i denne oppgaven har tre betydninger, topologi for mikronett-installasjon, topologi for tilkobling av inverter og topologi av fordelingsnett. Mikronett topologier beskriver hvordan strømkilder, laster og vern kobles sammen i installasjoner. Inverter topologi beskriver antall faser, inn/utganger og antall invertorer per fase i en installasjon. Topologier for fordelingsnett innebærer strukturen for oppkoblingen av et nettverk av elektriske bygginstallasjoner. Det finnes flere typer topologier for fordelingsnett som radially, stjerne-nett, maskenett og skinnfordeling. For denne oppgaven blir det benyttet topologi for stjerne og radialnett. Radialnett er fordelingsnett med flere belastninger som fordeles på samme kabelskinne. Stjerne-nett eller strålenett er nett som forsynes med en stige-kabel til hver belastning. Mikronett-, fordelingsnett- og inverter topologi begrepene er aktuelle for prosjektering av mikronettinstallasjoner.



Figur 13 Lavspennings fordelingsnett topologier

(Hansen, 2010)

### 2.3.1 Arkitektur til Mikronett.

Et synonym for mikronett topologi er arkitektur. Mikronett kan prosjekteres til å være en fase eller tre fase fordelingsnett. Den kan være tilkoblet lavspenning fordeling (LV) eller høyspenning nett (MV). Dette er avhengig av størrelse og bruksområdet. Arkitektur til mikronett deles i flere forskjellige grupper eller typer. Det er avhengig av hvordan man ønsker å klassifisere sammenkoblinger mellom AC og DC deler av mikronett (Patrao et al., 2015). I denne oppgaven defineres det fire forskjellige typer AC, DC, hybrid og SST-basert mikronett. Variasjon ligger i koblingsmetoder mellom DC og AC samleskinner. Konfigurasjon av kobling til hoved samleskinne mellom AC strømkilder, DC-strømkilder, laster og energilagring enheter avgjør typen mikronett blir klassifisert som (Mahdavi Tabatabaei et al., 2020).

#### AC-mikronett

Dette er den mest vanlige varianten av mikronett-anlegg. Fordelingsnett mellom produsenten og forbrukeren av elektrisk kraft er hovedsakelig AC nett både for høy og lavspenning deler av nettet. Det gir mulighet å lage lokale mikronett som en del av eksisterende installasjon i nærheten av kunde. Til dette brukes DER som mindre vindkraft generatorer, PV-installasjoner, diverse små turbiner som CHP, hydrogen



lagring eller batteri bank i kombinasjon med en DC/AC omformer. AC del av omformerens kobles direkte til AC fordelingsnett til en felles samleskinne. Den samleskinnen kan anses som oppstrøms nett under simuleringer av installasjon (Patrao et al., 2015). Slike installasjoner produserer energi nær kunden og bidrar til mindre overføringstap gjennom høyspenningslinjer. Samtidig oppstår det utfordringer som stabilitet i energiproduksjon etter behov og synkronisering mellom flere DER. Utfordringer oppstår ved tilkobling av flere kilder i et mikronett. Dette løses ved å iverksette avanserte kontroll og kommunikasjonsmetoder i mikronett mellom DER og laster (Ahmed et al., 2020).

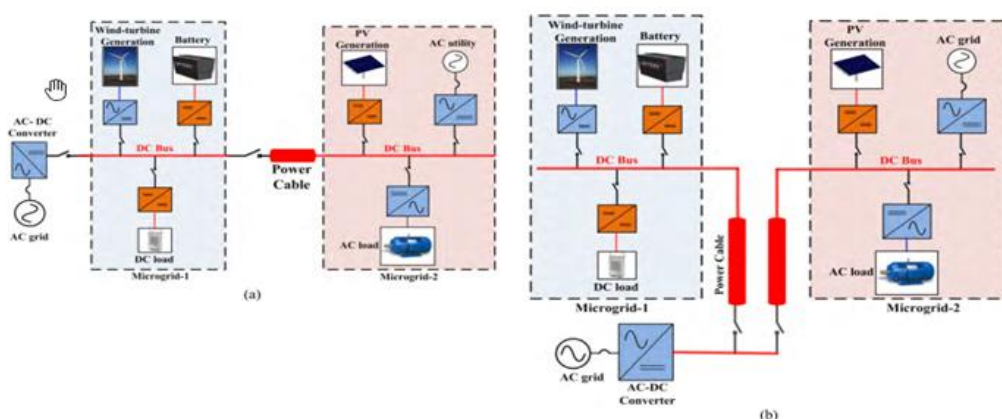
Faktorer som eksisterende installasjon, plassering av DER og laster er avgjørende for valg av topologi type i et mikronett. Maskenett (ringnett) gir mulighet å opprettholde strømforsyning ved en feil på fordelingsnett. Strømmen har to veier å gå frem til laster. Ulempen er at i øymodus vil både prioriterte og uprioriterte laster være tilkoblet ringnettet som tilsvarer felles samleskinne for anlegget. Ved flere feil på ringnett kan deler av installasjon komme i uønsket øymodus.

Et mikronett som er normalt tilkoblet kraftnettet, øymodus prioriteres for kritiske laster. Ved å bruke strålenett eller radialnett fordeles laster på flere bus eller fordelinger. Figur 10 viser et radiale mikronett bestående av tre tilførsler. Tilførsel 1 og 2 inneholder energikilder og prioriterte laster, resterende uprioriterte laster kobles til tilførsel 3. Under øymodus slår Static-switch ut og da har mikronett to fordelingslinjer som kan drives sammenkoblet som en nett eller hver for seg som to mindre mikronett. Kontroll strategi og kommunikasjon mellom komponenter i mikronett er avgjørende om mikronettet skal deles opp i deler eller drives som et større system. Eksempler på AC-mikronett i Norge i dag er Campus Evenstad, Rye mikronett og Utsira mikronett (Müller et al., 2021).

### DC-mikronett

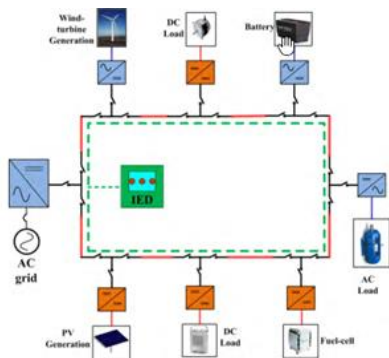
I DC-mikronett har en hoved samleskinne som fordeler energi koblet til DC kilder og laster. AC kilder og laster trenger en omformer for tilkobling til DC. Mikronett kan være tilkoblet AC nett under normal drift. De tre vanlige topologi konfigurasjoner er radial, ring og sammenkoblet konfigurasjon.

Radial konfigurasjon innebærer at alle laster, kilder og tilkobling til fordelingsnettet kobles til den samme DC-bus. For en enkel mikronett utforming prosjekteres det en DC-bus per mikrogrid. Flere mikronett kan parallell- eller seriekobles. Seriekobling har problemer med stabilitet under øymodus, mens parallell mikronett gir bedre selektivitet. Figur 14 viser et eksempel på serie og parallelt koblet DC mikronett.



Figur 14 Eksempel på DC mikronett koblet i serie (a) og parallelt (b)

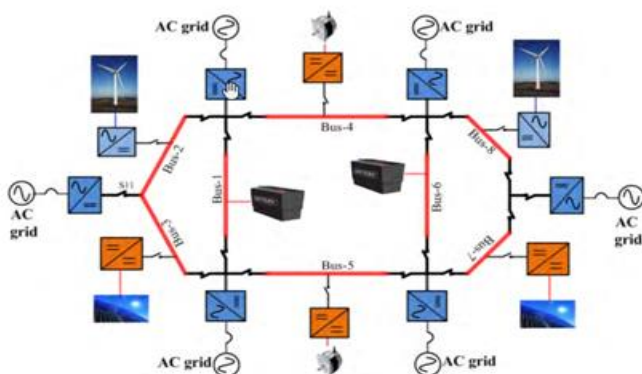
Ring konfigurasjon under feil på DC-bus gir bedre selektivitet og energi tilførsel fra to retninger til laster. Eksempel vises i figur 15. Det er to mulige veier for strømmen å gå i ringen. Vern med kommunikasjon er gunstige for ring arkitektur.



Figur 15 DC-mikronett ringformet

Hovedfordelen til DC-mikronett er minimalt antall DC/AC omforminger mellom DER og last og at ingen reaktive tap finner sted i DC fordelingsnett (Ahmed et al., 2020).

Sammenkoblet konfigurasjon er en oppgradering av ring arkitektur med flere tilkoblinger til forskjellige AC-fordelinger og flere DC-bus på tvers av ringen. Det gir et mesh nettverk, eksempel i figur 16.



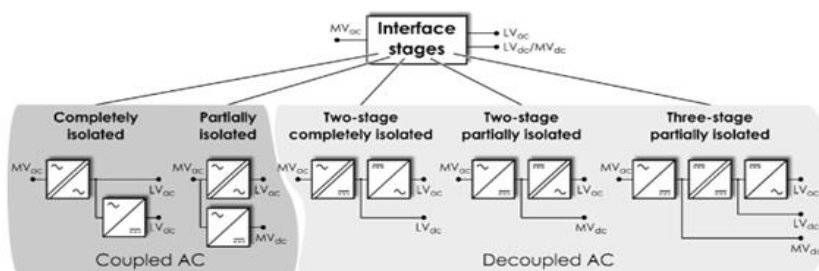
(Kumar et al., 2017)

Figur 16 DC-mikronett som Mesh-nettverk

Eksempler på 760V DC-mikronett i Norge i dag er Airport Arena – Ateas bygg i Rogaland (Cowi, 2020) og Orkdal folkehelsesenteret (Norconsult, 2019).

### Hybrid mikronett

Denne type nett kan defineres på forskjellige måter ut ifra hvor tilkoblingspunkt til foranliggende AC-fordelingsnett. Hybrid topologiene kan deles i to grupper, koplet sammen AC og frakoblet AC. Den første gruppen har AC-bus koblet til høyspenningside av kraftnettet direkte gjennom en trafo. Fordelen med denne topologien er behov for omformere til DC-bus med lavere kapasitet noe som gir lavere kostnader. I frakoblet type, kobles DC-bus mellom MV AC side og LV-AC side. I stedetfor trafo blir AC/DC og DC/AC omformere brukt. Feil blir isolerte på hver sin bus. Det krever enklere og uavhengig kontroll og beskyttelsesstrategi for AC- og DC-buser. Eksempler på topologier vises i figur 17 under.

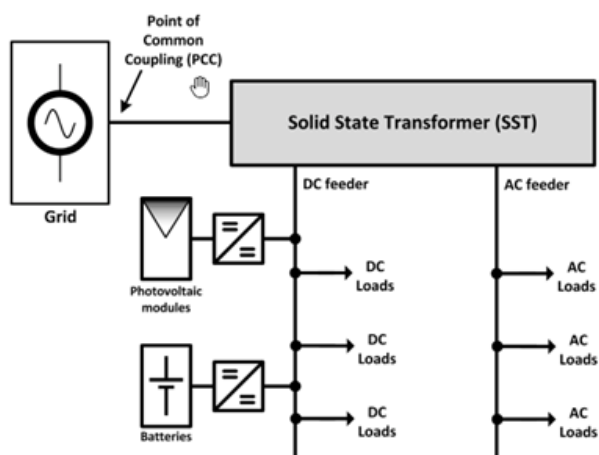


(Unamuno and Barrena, 2015)

Figur 17 Flere typer hybrid mikronett

### SST mikronett:

SST står for solid state transformer – elektronisk transformator. Nett transformatoren blir erstattet av SST. Den har både DC og AC lav spenning utganger. DC laster og kilder kobles til den første utgangen, mens AC-laster eller eksisterende AC installasjon kobles til den andre utgangen. SST kan levere energi fra DC avgang til AC. Fordelen er høy kvalitet på frekvens og spenning, enkel tilkobling av DC laster og DER, kan styres sammen med DC kilder og størrelsen på selve transformatoren er flere ganger mindre enn AC/AC trafo med tilsvarende ytelse. Ulemper er høyere pris, begrenset levetid grunnet kraftelektronikk og større tap på utgangene. Figuren under viser SST-topologi eksempel.



(Patrao et al., 2015)

Figur 18 SST mikronett topologi eksempel

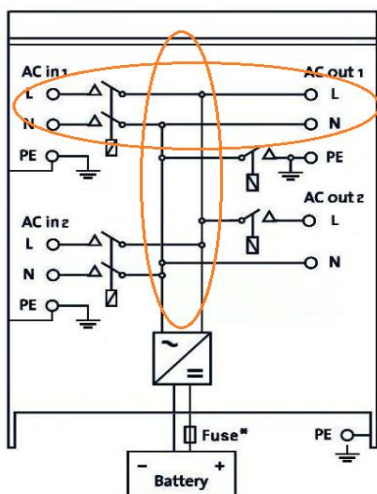
### 2.3.2 DER topologier

I denne rapporten innebærer DER—topologier arrangement av elektriske tilkoblinger, plassering av likerettere, vekselretter/ladere, og transistor sammensetning. DER-topologi velges under planleggingsfase.

Planlegning av mikrogrid krever analyse av produksjonskapasitet til distribuerte energikilder. Bidraget fra fornybare kilder kan variere avhengig av tid på døgnet og årstid. Mer detaljert design, enn ved planlegning av konvensjonell installasjon, er nødvendig for å få økonomisk gunstig installasjon over tid. (Side 58, (Rahmani-Andebili, 2021))

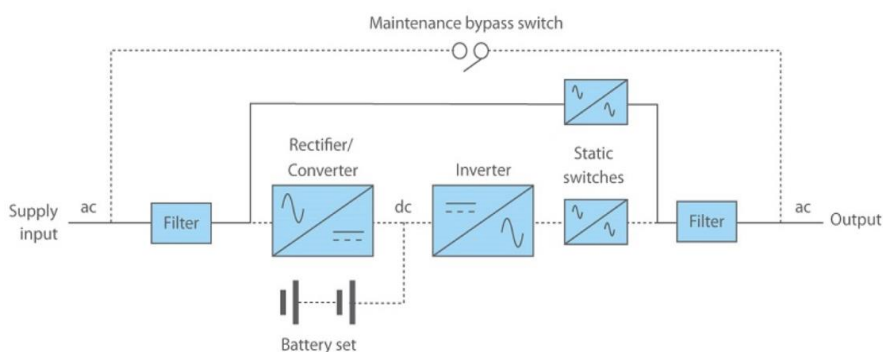
Denne oppgaven tar ikke for seg AC synkrone generatorer som kan brukes i mikronett. Videre i denne rapporten omtales kun inverter-basert energikilder for mikronett. De deler seg i to grupper. Invertere leverer energi kun i en retning, fra DC til AC side og omformere sender energi mellom lagringsmedium og nettet.

En batteribank og en UPS brukes til lagring av energi. De består av batterier som lagrer energi og omformere som lader batteriene og leverer strøm tilbake til nettet ved behov. Batteribank kobler inn når det er behov for elektrisk energi. Det kan være at spenning forsvinner fra nettet, eller mikronett går over til øydrift. Batteribank kobles til AC-nett i parallell, mens en strømtilførsel går gjennom en UPS både under normal drift og under batteridrift. En UPS leverer energi når spenning forsvinner på inngangen. For å minimisere innkoblingstid kobles batterilader til oppstrøms nett og inverter kobles til nedstrømsnett (last). Under normal drift går elektrisk energi gjennom laderen og vekselretter til belastning, samtidig som batterier lades. Når spenning forsvinner på inngangen til batterilader, får vekselretter fortsatt DC-spenning og strømtilførsel forblir opprettholdt (Aamir).



Figur 19 Batteribank utganger i en omformer for parallell tilkobling til nettet

(Victron, 2021)



Figur 20 Enlinjeskjema til en online UPS

(Service, 2022)

Figuren 19 viser en batteribank tilkoblet parallelt gjennomgående AC-bus i en omformer. Eneste forskjell fra en UPS er at spenning og strøm mellom nettet og lasten ikke blir omgjort til DC under normal drift.

Figuren 20 viser en skjematisk fremstilling av en online-UPS. De har separate AC-tilkoblinger for oppstrøms nett og last. Batterier tilkoblet egen DC-samleskinne/bus. Static switch er en direkte kobling mellom AC-inn og AC-ut UPS tilkobling internt inn i UPS. Den brukes til å forbikoble UPS når en intern eller ekstern elektrisk feil oppstår. Eksternfeil er kortslutning eller jordslutning i fordelinger eller laster etter UPS. Vedlikehold bypass switch er en manuell bryter som kobler forbi UPS under service og vedlikehold. (Service, 2022)

### *Inverter-basert energikilder.*

Det er flere måter å klassifisere inverter på etter egenskaper som belastning, sinusurve karakteristikk, spennings- eller strømkilde, antall faser, tilkoblinger og variasjoner i PWM teknikker. Nedenfor beskrives kort hva disse egenskapene innebærer.

Sinusurve karakteristikk deles i firkantet sinusurve, ren sinusurve og modifisert sinusurve. Ren sinusurve tilsvarer spenningskurve fra en konvensjonell synkron generator, den leverer best kraft kvalitet til belastninger beregnet tilkobling til vanlig strømnett (Kansagara, 2018). PWM kontroll teknikker varierer ut ifra ønskede egenskaper i en inverter, denne rapporten går ikke dypere inn på det. Type belastning og fordelingsnett avgjør antall faser og antall tilkoblingsklemmer en inverter trenger. I Norge er

hovedsakelig TN- og IT-fordelingsnett, både 1&2 fase og 3 fase systemer. Forskjellen ligger på spenning mellom fase og Jord. 230V for TN og 133V for IT. Tre topologier er aktuelle for tilkobling i norske fordelingsnett, en-fase inverter, tre-fase inverter uten N og tre-fase inverter med N. Eksempler vises i figurene under:

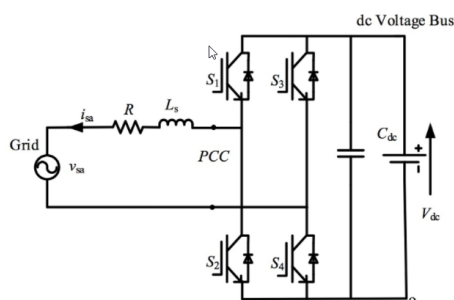
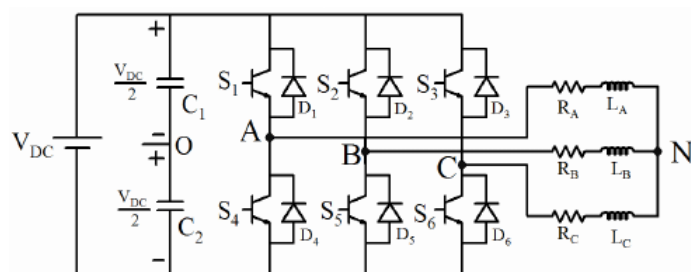


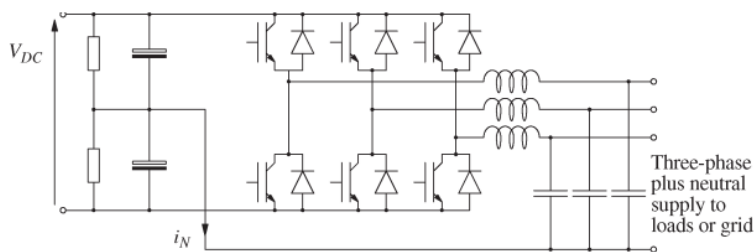
Fig. 1. Single-phase Grid-connected Converter (Chegg.com, 2022)

Figur 21 Enlinjeskjema for en-fase inverter



(Ürgün, 2008)

Figur 22 Enlinjeskjema for tre-fase inverter

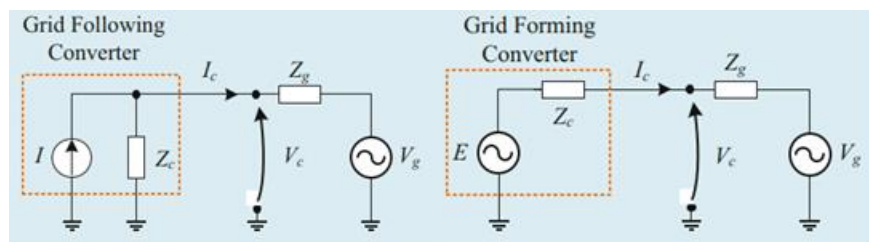


(Zhong et al., 2006)

Figur 23 Enlinjeskjema for tre-fase inverter med N-leder

### Konverter og invertere som spenning- eller strømkilde.

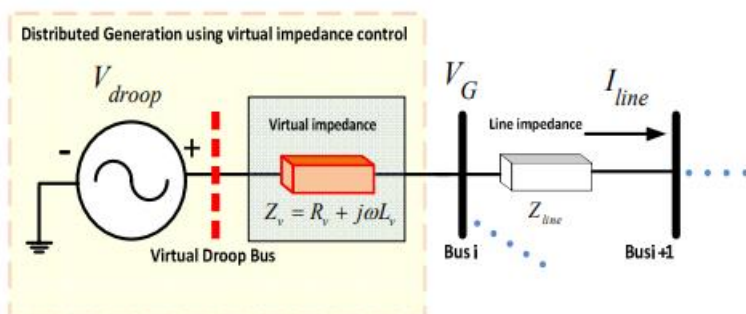
Konvertere kan klassifiseres etter deres funksjon og nett-formende egenskaper. Mahdavi Tabatabaei beskriver tre typer nett-følgende (Grid following), nett-formende (Grid forming) og nett-opprettende (Grid supporting) (Mahdavi Tabatabaei et al., 2020). Figur 24 viser ekvivalenter for disse omformere.



(Sun et al., 2022)

Figur 24 Enlinjeskjema for nettfølgende og nett formende omformer

Nett-følgende konvertere leverer energi til nettet når det finnes en annen kilde som bestemmer frekvens i nettet. Den typen konvertere kan levere spenning og frekvens som blir målt av Phase locked loop kontroll. Den simuleres som en strømkilde med impedans i parallell. Den kan ikke levere energi i øymodus, når ingen andre nett-formende konverter er til stede i mikronettet. Nett-formende konvertere produserer ideal AC-spenning med en bestemt frekvens. Ekvivalent kretsen til slike konvertere er spenningskilde i serie med utgangsimpedans. Denne konverteren klarer å drive varierende laster ved å reagere på spenningsfall og levere spenning i øymodus. UPS og batteribanker i mikronett kobles til nettet gjennom slike konvertere. For at Grid-forming konvertere detekterer feilstrømmer trenger den kontrolltekniker som virtuell impedans (Sun et al., 2022). Nett- opprettholdende invertere opererer som en spenningskilde. I øymodus brukes de når inverter til en DER eller ESS ikke klarer å opprettholde ønsket spenningsnivå. Under normal drift gir de bidrag til bedre spenningskvalitet (Mahdavi Tabatabaei et al., 2020). Virtuell impedans kontroll bygger på utvidelse av P/Q-Droop kontroll teknikk med en modul som lager virtuell impedans på utgangen til en DER. Droop kontroll fungerer best på reaktive belastninger, samtidig som både forandringer i ohmsk motstand og reaktans på lasten påvirker spenningsforskjellen mellom flere DER i parallell. Det fører til uønsket sirkulering av strømmer, som igjen gir feil reaktiv effekt bidrag fra DER til nettet. (Li, 2016) Figuren under viser modell av en DER med Virtuel impedans kontroll. Den består av en spenningskilde  $V_{droop}$  i serie med en virtuell impedans  $Z_v$ , koblet til et fordelingsnett med linje impedans  $Z_{line}$ .



(Li, 2014)

Figur 25 Modell av en DER med virtuell impedans kontroll

Total impedans i den modellen er summen av virtuell impedans  $Z_v$  og linje impedans  $Z_{line}$ :

$$Z_T = R_L + \Delta R + j\omega(X_L + \Delta X)$$

For å kontrollere Q uavhengig fra P, kontroll krets i DER simulerer virtuell impedans som kompenserer for både ohms belastning ( $R_L + \Delta R$ ) og reaktans differanse ( $\Delta X$ ) i  $Z_T$ . Da gjenstår det kun linje impedans  $Z_L$ . Dette gir mulighet å kontrollere utgangsspenning fra vekselretter  $V_G$  ved hjelp av Q og utgangsfrekvens ved hjelp av P uavhengig av hverandre (Li, 2016).

## 2.4 Kortslutningsbidrag fra en inverter.

### 2.4.1 Feilstrømbidrag fra en vekselretter

I motsetning til synkron og induksjon generatorer har vekselrettere ikke bevegelige deler og derfor er feilstrømmer ikke avhengig av elektromagnetiske påvirkninger fra generator. Feilstrøm fra en inverter faller til nominal kortslutningsstrøm mye raskere enn feilstrøm fra en roterende generator. Varighet og amplitude til kortslutningsstrøm kan tilpasses på en inverter til en viss grad ut ifra kretsen den er tilkoblet (Kroposki, 2010). Elektriskenergi leveres til inverter av en DC-kilde. Inverter gjør den om til sinusformet spenning og strøm ved hjelp av transistorkretsen. Den slår av og på transistorer med en gitt sekvens, det skaper ønsket spenning og frekvens på AC utgangen. En feil på AC side av inverter fører til spenningsfall på AC-utgang, inverter må øke amplitude til utgangsspenning for å kompensere for dette, høyere strøm

begynner å gå gjennom transistorer. Etter feil har oppstått, er det to muligheter for en inverter. Koble ut momentant, for å unngå økt strøm i transistor kretsen, eller øke levert spenning og strøm i løpet av noe tid, for å klare å tilføre kortslutningsbidrag til feil.

## 2.4.2 Beregning av inverter ekvivalent.

I denne rapporten brukes Thevenin ekvivalent og grunnleggende kretsanalyse for å finne kortslutningsytelse, merkeytelse og merkestrøm. Stjernetkobling av 6 en-fase inverttere, to inverttere i parallell. Å se på en omformer som en strøm/spenning kilde er en forenkling, kontroll krets for transistorer brukt i en inverter blir ikke tatt hensyn til, sinuskurven antas å være ideal. Eventuelle feilstrømmer på DC-side er ikke med i betraktning, vern mot den type feil beregnes utenom AC installasjon.

Thevenin ekvivalent beregnes for hvilken som helst del av en krets, to koblingspunkter i en større krets kan simuleres som en spenningskilde i serie med en impedans. I første steget erstattes alle spenningskilder med kortslutning og strømkilde med brud (åpen krets). Kretsanalyseteknikker gir en impedans ekvivalent for kretsen. Det andre steget er å sette tilbake spenningskilder og strømkilder og finne spenning over koblingspunkter ved å bruke spenningsdeling prinsippet. Kretser avbildet i figur 26.



(Tina, 2020)

Figur 26 Steg en og to i Thevenin ekvivalent utregning

Effekt for en trefasekilde er summen av effekt per fase:

$$P_{tot} = 3 * P_{fase}; Q_{tot} = 3 * Q_{fase};$$

$$S_{tot} = \sqrt{9 * P_{fase}^2 + 9 * Q_{fase}^2} = 3 \sqrt{P_{fase}^2 + Q_{fase}^2} = 3 * S_{fase} \quad (2.4)$$

Formel for tilsynelatende effekt for 3-fase fordelingsystem og strømmen beregnet ut ifra denne:

$$S_{tot} = \sqrt{3} * V_L I_L \Rightarrow$$

$$I_L = \frac{S_{tot}}{\sqrt{3} * V_L} \quad (2.5)$$

For en inverter er spenning oppgitt som utgangsspenning på inverter klemmene.

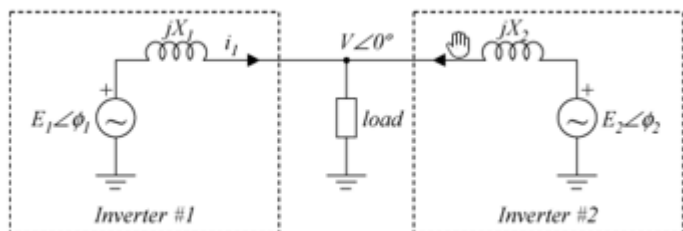
$$\text{Ohms lov: } V = I * Z \Rightarrow Z = \frac{V}{I} \quad (2.6)$$

$$\text{Parallele impedanser: } Z_{||} = \frac{Z_1 * Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

For stjernetkobling fasestrøm  $I_{fase} = I_{linje}$  linjestrømmen i tre-fase system.

### Parallele invertere

For invertere/omformere i parallell brukes Thevenin-ekvivalent for å finne ny indre impedans. Spenningskilde blir den samme, så lenge  $\cos(\phi_1) = \cos(\phi_2)$ , det forutsetter synkronisering mellom spenningskilder. Figur 27 viser skjematisk representasjon av to parallelle kilder leverer energi til en last.



(a)

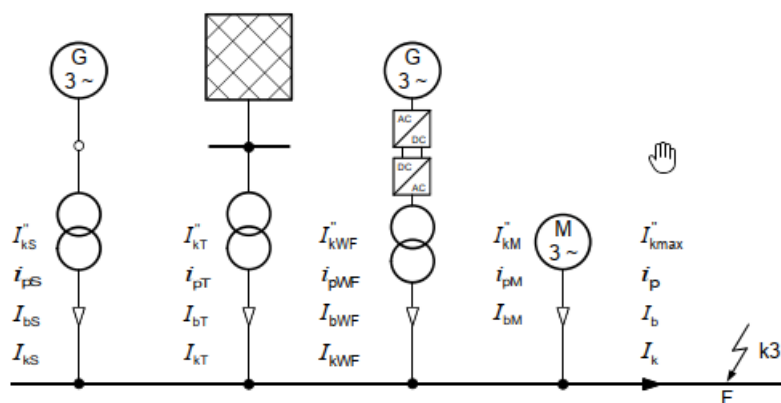
(Guerrero et al., 2005)

Figur 27 Skjema for to kilder i parallell

Kortslutningsbidragstid til forskjellige invertere varierer. For å opprettholde driften må feil elimineres før inverter med den korteste feilstrømbidrag tid kobler ut. I demisjonering av beskyttelse rapporten går ut ifra den korteste tiden blant invertere.

### Beregning av feilstrømmer etter NEK 60909.

NEK 60909 foreslår følgende fremgangsmåte for beregning av kortslutningsstrømmer: settes opp tre impedans matriser, positiv, negativ og null. Matriser kobles sammen i en krets på forskjellige måter for hver type feil, som fase-fase, fase-jord eller tre-fase kortslutning. Så settes spenningskilde i feilpunktet. PV-omformere settes som strømkilder i denne kretsen og spenningskilde omformer (VSC) settes som impedans. I korreksjonsfaktor C tabellen finnes det verdier for å korrigere spenningskilde med for å finne største eller minste kortslutningsstrøm. Modell for bidraget fra flere energikilder til en samleskinne vises i figur 28.

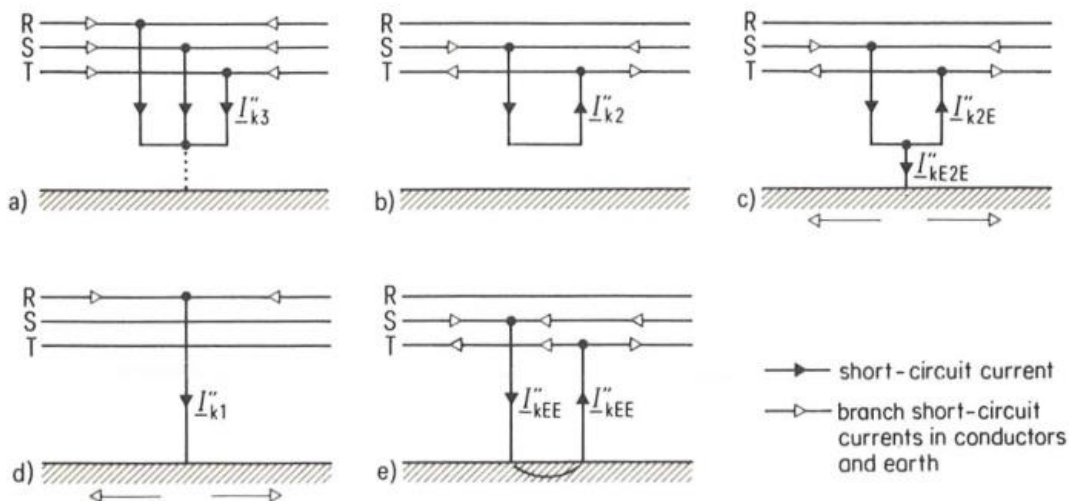


Figur 28 Flere parallelle kilder forsyner en BUS med kortslutning

SCC fra flere kilder inn på felles samleskinne beregnes som summen av kortslutningsbidrag fra hver enkel konverter,  $I_k = \sum_i I_{ki}$  (IEC\_60909-0, 2016)

I et trefasesystem kortslutningsstrømmer kan det forekomme ut ifra fem mulige feilkombinasjoner mellom spenningsførende ledere og jord. Figur 29 viser kortslutning mellom alle tre faser i a). b) viser feil mellom to faser, mens c) avbilder feil mellom to faser og jord. Fase til jord, også kalles for jordfeil vises på d). og e) viser dobbelt jordfeil mellom to forskjellige faser og jord.





(Roeper et

al., 1985)

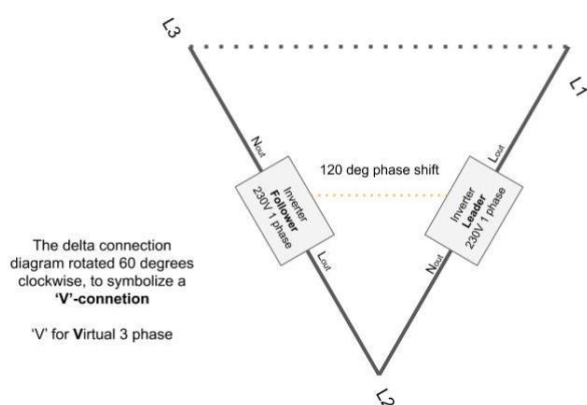
Figur 29 Typer kortslutninger i en tre-fase fordelingsnett

Minste og største kortslutningsstrøm levert av en vekselretter må oppgis av produsent. En vekselretter kan levere en normal strøm opp til en bestemt ytelse. I tillegg spenningsformende vekselretter kan levere en feilstøm i kort tidsperiode ved behov. Når styrekretsen registrer strømtrekk over normal ytelse, blir det tolket som feil. Vekselretter kan ikke bestemme om det er en kortslutning, økning av belastning eller en midlertidig startstrøm.

### Virtuell tre-fase IT-nett

Ved hjelp av to en-fase inverter koblet i V-forbindelse kan det settes opp Delta-koblet 230V strømkilde for IT-nett. Det heter deltfasedrift, virtuell tre-fase system. Figur 30 viser den første inverter settes opp som master og den andre som slave. N-tilkobling på master kobles til L-tilkobling på slave inverter. Ved å sette opp rette innstillinger for to invertere, faseforskyvning mellom L1 og L3 blir  $120^\circ$  og spenning mellom L1 og L3 lik 230V. Prinsippet avbildet i figuren under:

A 'V' connection diagram - for virtuell 3 phase system from 2 single phase, phase shifted, inverters



Solcellespesialisten

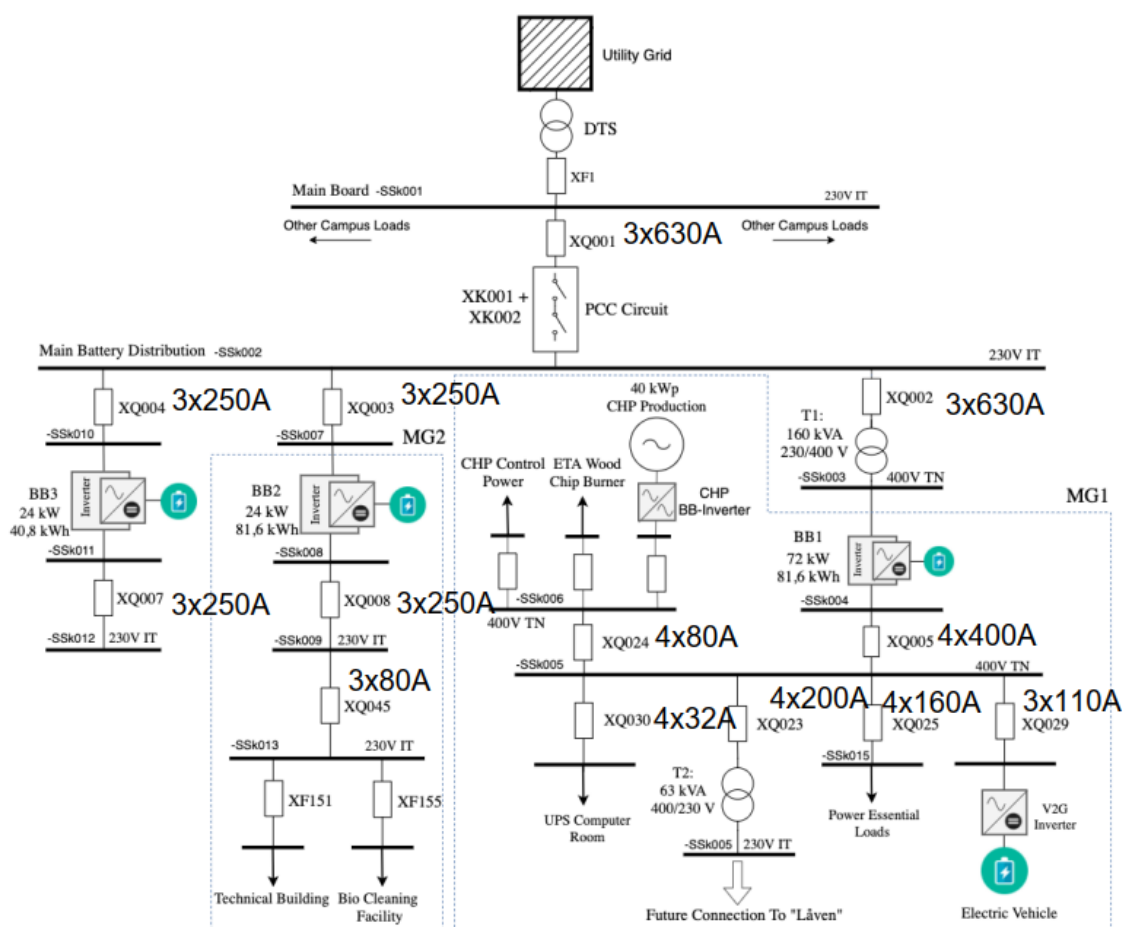
(AS, 2021)

Figur 30 V-tilkobling av to vekselrettere i tre-fasenett

Kortslutningsstrøm beregnes ved hjelp av Ohms lov ved å legge sammen kortslutningsytelser til begge invertere også finne strømmen som i ligning 2.5.

## 2.5 Mikronett på Campus Evenstad.

Mikronett-installasjon på Campus Evenstad består av to mikronett MG1 og MG2 som drives selvstendig under øymodus, siden det finnes verken sentralstyringsenhet eller kommunikasjon mellom MG1 og MG2. MG1 har en batteribank med maks effekt på 72 kW og MG2 har en batteribank BB2 med maks effekt på 24 kW. En bryter i tilkoblingspunkt (PCC) mellom mikronett og hovedfordelingsnett kobler styrer driften mellom nettilkoblet og isolert (øydriфт). I tillegg til BB1 har MG1 også en CHP-generator og en V2G elbil batteri. MG2 har ingen energikilder utenom batteribanken. CHP drift styres manuelt av ansatte på campus, den har anti-øydriфт innstilling på 200 ms. Det betyr hvis spenning faller eller øker 15%, skal CHP koble ut etter 200 ms. V2G har ingen tydelig brukermønster. Figuren under viser enlinjeskjema for mikronett-installasjon på campus Evenstad. Størrelse på vernet ble lagt på den originale referansen. (Kjær and Høidalen, 2020, AS, 2021)



Figur 31 Oversikt over mikronett-installasjon på Campus Evenstad

## 3 METODE

Dette kapitlet beskriver metoder som er brukt for å besvare hovedproblemstilling. For å klare bygge en diskusjon rundt problemstillingen, ble det definert delmål. Det innebar litteraturstudier, analyse av funnet teori, oppsett av en simuleringsmodell og selve simuleringen. Underveis i studium var flere delmål oppdatert, forandret og sammenslått. Som resultat av dette blir oppgaven oppdelt i to deler. Den første bygger på teori og beskriver utfordringer med å modellere forskjellige mikronett topologier i Febdok. Den andre inneholder nødvendige beregninger for simuleringer og oppsett for modell av mikronett i Febdok.

### 3.1 Modellering av mikronett topologier i Febdok

Da oppgaven ble tildelt ble det gjort undersøkelse for andre mikronettinstallasjoner. Som i utgangspunktet ville bli konkludert med installasjonen i statlig forskningsprosjekt, Campus Evenstad. Undersøkelsen gikk stort sett ut på bakgrunnsteori rundt topologier av mikronettinstallasjoner uten begrensninger i geografisk utgangspunkt. Dvs. at fokuset gikk ut på innhenting av opplysninger om alle tilgjengelig og fungerende mikronett topologier internasjonalt. Deretter foretas en anvending av undersøkte topologier med å modellere de som mikronettinstallasjoner i Febdok. I grunn for at minst en av undersøkte topologier for mikronett var kompatibel med prosjekteringskriteriene i dimensjoneringsprogrammet. Undersøkelse av teori, samt modellering i Febdok med foretatte begrensninger for alle undersøkte topologier ble tidskrevende. Deretter ble delmålet endret til modellering av mikronett installasjonen for Campus Evenstad i Febdok. Følgende innebærer utfordringer med oppnåelse av divergerende løsninger fra eksisterende modell, prosjektert av Ola Johanson fra Solcellespesialisten. Samtidig oppfylle prosjekteringskriteriene i Febdok for verifisert installasjon i henhold til kravene i FEL og NEK400.

Forskningsprosjektet på Campus Evenstad med sine to mikronett, inkluderer DER *distribuerte energikilder* som solceller, synkronerenerator og fornybare energikilder. Se kapittel «Mikronett Campus Evenstad» under teori.

Konstruksjon av modellen i Febdok belyser utfordringene for både valg av kilder med vern og dimensjonering av installasjonen etter systemtegnning fra mikronett på Campus Evenstad.

Herunder undersøkes teorien rundt oppsettet av kilder parallelt og beregningsmodell i Febdok. Det benyttes «hjelp» funksjon i Febdok, spørsmål til brukerstøtte og emailforveksling med produsent og fagsjef i Nelfo. I mellomtiden undersøkes kravspesifikasjonene og teorien for beregning av kortslutningsstrømmer fra invertere.

Under prosjektering vil programmet sørge for at installasjonen dekker leverandørkrav og forskrifter i FEL og NEK. For å sikre en forsvarlig prosjektering og dokumentasjon av anlegget. Det ble gjort undersøkelse av hvilke regelverk av normer og forskrifter som Febdok foretar og når de implementeres, under «prosjektering i Febdok» i teori. For å oppnå driftssikkerhet i installasjonen velges innstillingene i «Utforming av beskyttelse» og «Selektivitet».

Med ferdigstilt modell av mikronett installasjonen i Febdok kontrolleres verdiene i forhold til beregningsverdiene utført i masteroppgaven til William Kjær. Verdiene kontrolleres med kriteriene i Febdok som er i henhold til NEK 400 og deretter begrunnes. For å oppnå driftssikkerhet i installasjonen velges innstillingene i «Utforming av beskyttelse» og «Selektivitet». Med den førstnevnte velges jord og utjevningssbeskyttelse. I den andre ser man et bilde for utløsningskurver og tabell av selektivitet mellom utvalgte vern opp til fire. Der selektivitet oppnås mellom to og to vern. Overstrømsvernet og det vernet som er koblet foran oppstrømskurs. Selektivitet er avhengig av innstillinger og kravspesifikasjoner for vern. Se «selektivitet» under teori.

### **Metode for modellering i Febdok.**

Ved simulering av mikronettinstallasjon i Febdok er det nødvendig med forståelse av brukergrensesnitt i programmet. Simuleringsmetode i Febdok bygger på en fremgangsmåte oppgitt av Febdok veiledning. Energibehovet, belastninger, ca. kabellengder og beskyttelsesmetoder må være forhåndsbestemt. Beregningen i Febdok viser hvor mye gjennomsluppet energi som går gjennom et feilpunkt og om hver enkelt komponent i feilstrømkretsen tåler energimengden. Febdok kan også sjekke at beskyttelsesgrad og forlegningsmetode tilfredsstiller sikkerhetskrav i FEL og NEK.

Utgangspunkt for Febdok modell i denne rapporten er enlinjeskjema av Mikronett installasjon på Evenstad. Diagrammet er tatt fra William Kjær sin masteroppgave side 32. (Kjær and Høidalen, 2020) Figuren avbilder installasjon slik den var planlagt i 2019. Deler av installasjon kan ha blitt forandret siden. Oppgaven har ikke et mål om å simulere oppdatert modell av Evenstad mikronett. Konklusjoner kan ekstrapoleres til fremtidige forandringer. William beskriver mikronett 1 (MG1) og mikronett 2 (MG2), men forholder seg til å simulere MG1. Denne rapporten analyserer begge mikronett. Alle belastninger, vern størrelse, kabellengder og kabeltversnitt refereres til W. Kjær sin masteroppgaven og Ola Johansson sin risikovurdering (AS, 2021).

For å oppdage utfordringer som oppstår i modellering av et mikronett ble det forsøkt laget en komplett modell av installasjon med både MG1 og MG2 i samme simulering.

### **Fremgangsmåte for simuleringer**

Modellering av en installasjon startet med å opprette et nytt anlegg, der basisinformasjon om anlegget måtte fylles ut. Det første vinduet er den første fordelingen i installasjon. Valget består av oppstrøms nett, generator og oppstrøms nett med trafo. Identifikasjon, beskrivelse, belastning og omgivelses skrives inn manuelt. Annen informasjon som normativ referanse, fordelingsnett og fasekoblinger er en nedtrekks-meny der valgene beskriver tekniske aspekter til installasjon. Spenningsfallberegning grunnlaget og C-faktor grunnlaget velges også her.

Den første fordelingen trenger informasjon om jordelektrode, utjevningsforbindelser eller et overspenningsvern på anlegget. I samme vindu, under fane Oppstrøms nett føres inn minste og største kortslutningsstrømmer sammen med effektfaktoren. Også her maksimal overgangsresistans til jord blir regnet ut når største dimensjonerende jordfeilstrom er kjent.

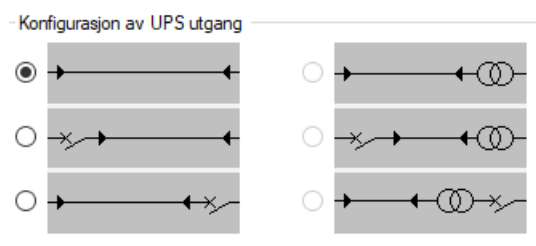
Videre settes alle fordelinger opp i simulert installasjon. Hver fordeling trenger beskrivelse og informasjon om forventet belastning. Under «Utforming og beskyttelse» fane spesifiseres plassering og sammensetting av hovedvern (felles eller separat), jordfeilbryter, jordelektrode (tilstedeværelse og type), måler, kontakter og isolasjonsklasse på tilførsel til den fordelingen. Videre ved å klikke på kabel symbol i en-linjeskjema i øverste del av vindu bestemmes kabeltype, forlegning metode, omgivelses temperatur og lengde. Vern velges ved å klikke på «vern symbol». Ved å sette inn ønsket vern egenskap, begrenses utvalget til noen få vern. Funksjon «sjekk vern i listen» sjekker at vernet tilfredsstiller sikkerhetskrav. Det kommer opp et rødt eller blått varsel for et vern hvis det ikke kobler ut feilstrøm raskt nok. Enkle belastningskurser settes opp på tilsvarende måte som tilførsler til fordelinger. Type belastninger velges i menyen øverst i programmet. Belastning kan ytterligere spesifiseres i egenskapsvinduet.

### **Oppsett av UPS kurser**

Febdok har innebygget verktøy for beregning av UPS kurs. En UPS har kortslutningsytelse egenskaper som tilnærmet lineær kortslutningsstrøm bidrag over et bestemt tidsintervall. Inverter på AC-utgang oppfører seg slik under en feil i kretsen. Ser på UPS i Febdok som en inverter i simuleringer i rapporten. UPS kan velges som en modul når en ny fordeling, gruppering, avgrening, belastning, stikkontaktkurs eller lyskurs blir opprettet. Etter en UPS-modul kan det settes opp fordelinger, forbrukerkurs og belastninger.

UPS-modell i programmet velges fra et register. I motsetning til vern- og kabelregister har både generator- og UPS-register ingen komponenter lagret i databasen. Informasjon om hver enkel type UPS må legges inn manuelt av brukeren. Under fane «Dokumenter/rapporter» finnes et skjema («UPS forespørsel») med nødvendige data for beregninger av installasjoner med UPS. Leverandør kan oppgi disse data. Skjemaet ble brukt for å finne nødvendige inverter parametere for å simulere den som en UPS. Skjema finnes under resultater.

Ved punkt av felles tilkobling (PCC) er grense mellom fordelingsnett og mikronett. Systemspenning for hele installasjon på Evenstad er 230V IT-fordelingsnett. Mens Mikronett MG1 har TN-C 400V fordelingsystem. I starten av MG1 er det plassert en transformator T1 med ytelse 160kVA. Den befinner seg rett før batteribanken BB1, derfor kan den simuleres med å velge UPS-modell med transformator på inngang. På utgangen er det flere aktuelle valgmuligheter for forskjellige beskyttelsesmetoder av ledere tilkoblet utgangen. Simuleringer i rapporten inneholder ikke vern i vekselretter. For å opprettholde beskyttelse av ledere og kabler mellom to vekselretter koblet parallelt per fase i tre-fase stjernekobling kan det monteres et vern mellom hver leder og UPS-tilkoblinger. Velger konfigurasjon uten foranliggende vern avbildet i figuren 32 nedenfor. Da ledere mellom vekselrettere og SSK004 vernes av vern på AC-utganger i BB1. Men den kan simulere relevern innebygd i Victron inverter/lader. Egenskaper til den simuleres etter verdier for maksimal overlaststrøm, kortslutningsstrøm og tiden inverter kan tåle ytelsen.



Figur 32 Konfigurasjon av en UPS-utgang, ingen vern etter utgangen

### Metode for oppdeling av mikronett i installasjoner per kilde

For å simulere et mikronett i Febdok må det sjekkes at nettet har radial topologi. Hvis det ikke er tilfelle, kan installasjon deles opp og simuleres separat. Kortslutningsbidrag til parallellkoblet energikilder legges sammen når de blir omgjort til theveninekvivalent. Når feil oppstår imellom to energikilder, skal vern på begge sider av feilen koble ut for å opprettholde drift på andre deler av installasjon der feil ikke påvirker direkte. I dette tilfelle kan ikke bidraget fra kilder legges sammen, men simuleres hver for seg. Modeller skal ta høyde for normal- og øydrift. Det er avgjørende hvilken DER som er nettførende i det siste tilfelle. Utkobling av masterenhet fører til at hele mikronettet mister tilførsel.

Den andre metoden for å simulere en energikilde er å sette egenskapene til den inn i oppstrømsnett og første fordeling. For beregninger under normaldrift kan kortslutningsbidrag under 5% ignoreres. Retning av energiflyt avgjør kortslutningsytelse på feilsteder. Topologi trenger å analyseres for mulige feil, retning på energiflyt og hvilket vern som skal slå ut for å avgrense feil.

### Kontrollmetode.

DER i mikronett på Evenstad har ikke sentralisert kontroller. Under normal drift følger begge energikilder droop-kontroll metode, aktiv og reaktiv effekt tilpasses for å opprettholde nødvendig spenning og frekvens. BB1 kommuniserer med SD-anlegg til campus gjennom en PLS. Gjennom den skal batteribank status overvåkes, energiflyt til og fra batteriene og øymodus aktiveres – rele i BB1 omformer får beskjed

om å koble ut forbindelse til oppstrøms nett. Overgang til øydrift er aktuelt når spenning på tilførselsnettet overstiger feilmargin på  $\pm 10\%$ . SD-anlegg kobler ut kontaktor ved PCC og kobler inn øymodus på BB1. CHP-vekselretter har nettfølgende egenskaper og tåler derfor spenningsforstyrrelser i kun 20 ms. BB1 inverter er nødt til å levere tilfredsstillende spenningskvalitet i løpet av denne tiden. Hvis ikke CHP-generatoren startes på nytt manuelt etter en utkobling. Som følge av det som er beskrevet over og at Febdok har ingen aktive komponenter for å simulere styring, må simuleringer i Febdok deles opp i normal- og øydrift. Det lages ingen modell for omkoblingsfase.

### 3.2 Kortslutningsbidrag fra vekselretter og beregningsmodell i Febdok.

Det undersøkes først kravspesifikasjoner og teori for beregning av kortslutningsstrømmer fra invertere. Beregningsmodell i Febdok foretar energi og kortslutningsberegninger. Det er derfor nødvendig med verdiene som oppgis i startfasen ved «definisjon av anlegget» for at Febdok skal foreta videre beregninger i installasjonen. Det oppgis kjent verdi for belastning og Febdok beregner de ukjente verdiene. Se «hvordan fungerer beregningene i Febdok» under teori. Kortslutningsberegningene i form av kortslutningsstrøm skal oppgis under

#### Simulering av en vekselretter som en UPS-modul.

UPS-veiledning fra Febdok forteller at kortslutningsytelser beregnes som konstant bidrag i løpet av en tid. En forenkling der en DER-vekselretter også har en konstant kortslutningsstrøm gir mulighet å sette et likhetstegn mellom dem. Videre i oppgaven brukes Febdok sin UPS-beregningsmodell som en vekselretter. Invertere til BB1 og BB2 i mikronett sammensatt som kombinasjon av en-fase invertere i tre-fase Y-konfigurasjon og V-konfigurasjon. Seks invertere kobles i stjerne med N-utgang som felles koblingspunkt, hvor to invertere kobles i parallell per fase i BB1. I BB2 er det IT-nett med 230V strømkilde. Her ble det brukt oppsett av to V-koblet invertere. En inverter for L1-L2 og L2-L3, mens L1-L3 er en virtuell fase. Teorien for beregninger av ekvivalenten for begge er beskrevet i teorikapittel 2.4. For utregning av Thevenin ekvivalenter for parallelle strømkilder, blir DER behandlet som spenningskilder. Da er to parallelle identiske DER anses som en spenningsladet med to like impedans i parallell. Metoden kan forenkles ytterligere ved å summere kortslutningsytelser fra hver enkel parallell kilde, så lenge  $\cos(\phi)$  er lik for hver av dem. Samtidig resultater i tabell 6 viser at kortslutningsbidraget kan finnes ved å legge sammen effekter først, så regne ut fasestrøm. Den korteste tiden for varighet av kortslutningsstrøm settes inn i UPS-modellen.

Victron Quattro inverter/lader har to AC-inn- og utganger. Den første (AC1) tilkobles inverter og kan levere 100A strøm totalt. Denne utgangen forbeholdes kritiske laster, inverter mater strøm inn på den utgangen under øydrift og blandet drift. Den andre inn- og utgangen (AC2) brukes til ikke kritiske laster som kan kobles ut under øydrift. Strømmen gjennom denne leveres kun fra nettet.

#### Analyse av installasjon og kortslutningsscenarier.

Gruppen analyserte mikronettinstallasjon på Evenstad for å bestemme og spesifisere simuleringer i Febdok. Hele den elektriske installasjon i Evenstad kan simuleres samlet i Febdok, både MG1, MG2 og hovedfordeling. Ulempen med en større modell er at det kan være lett å miste oversikt over komponenter på skjermen. Den komplette installasjon deles opp for å ivareta oversikten av resultatet. Feiltilfeller på kurser og fordelingskinner analyseres ut ifra topologien til installasjon, plassering av tavler, tilførsler og avgreninger. Lastbeskrivelser beskriver de viktige fordelinger for driftssikkerhet av anlegget. Valg av feiltilfeller som var allerede regnet på i en annen simulering av Evenstad i Simulink (12) gir et diskusjonsgrunnlag.

### **Valg av vern.**

Informasjon om vern brukt i modeller er hentet fra masteroppgaven til Kjær W. Det oppgis størrelser, belastningsstrøm innstillinger og bryteevne for vernet. Produsenten er Generell Electric. Bruk av vern fra samme produsent i modellen gir selektivitet samsvar mellom vern oppgitt av produsenten. Vern ble valgt etter beste evne ut ifra oppgitte egenskaper.

## 4 RESULTAT

Problemstilling for oppgaven ble delt opp i delmål som representerer underpunkter i rapportens undersøkelse. Første delmål var å undersøke mulige mikronett topologier deretter modellere dem i Febdok. Det andre delmålet gikk ut på å redegjøre for kortslutningsbidrag fra vekselrettere og beregningsmodell i Febdok med å modellere flere feiltillfeller basert på en eksisterende installasjon. Resultater for begge delmålene deles opp i tre underkapitler. I den første beskrives det hva litteraturstudium om mikronett topologier ga som resultat. I delkapittel to forklares det hvordan modellen simuleres i Febdok og hvilke egenskaper er nødvendig å ta med. Siste delkapittel viser resultater fra simuleringen i Febdok. Simuleringer delt opp i MG1 og MG2 modeller, samtidig som MG1 har fire modeller for å simulere feiltillfeller som undersøkes.

### 4.1 Modellering av mikronett topologier i Febdok

Undersøkelse for mikronettinstallasjoner ga resultat for flere topologier med distribuerte og fornybare energikilder. Hvor blant annet følgende topologier av mikronett blir tatt til betraktning;

- vekselsrettetmikronett
- likerettmikronett
- SST- (solid state transformer)
- hybridmikronett

For å kunne konkludere med topologien av mikronettet på Campus Evenstad var kriteriene for innhold av distribuerte energikilder avgjørende. Overnevnte undersøkelser av topologier for mikronett var inkompatible med prosjekteringskriteriene i dagens versjon av Febdok. Siden Febdok foretar hovedsakelig beregninger i vekselrettetsystemer og med en hovedstrømkilde.

Samtidig som det var utfordrende med prosjektering av andre topologier enn radialnett for oppbygging av fordelingsnettet i Febdok. Beslutningen for endring av delmål var nødvendig for tidsbesparing når det viste seg at undersøkte topologier var inkompatible. Med mangler på data for nødvendig kortslutning- og energiverdier for prosjektering i Febdok var det ikke løsbart. I grunn ble mikronettinstallasjonen for Campus Evenstad modellert i Febdok ve å bruke eksisterende verdier for energiberegninger og kortslutninger fra modellen til Ola Johansson. Begge mikronettene ble simulert med distribuert energikilde som modelleres ved hjelp av en UPS i Febdok.

Med løsningen gitt i denne oppgaven er det henholdsvis mulig å simulere mikronettene MG1 og MG2 samtidig, både i batteri- og nettdrift. Det innebærer simulering av et stort hovedstrømbilde for hele installasjonen i Febdok. Det kan derfor være uoversiktlig å jobbe i, men det er en mulighet nå å simulere hele anlegget med mikronett og kilder på samme tid. I tillegg konfigureres UPS som invertere i Febdok. Som gjør det mulig for Febdok å analysere kortslutningsbidrag fra vekselrettere. Se simulering av vekselretter som en UPS-modul under teori.

Prosjekteringskriteriene i Febdok ivaretas for en verifisert installasjon i henhold til kravene i FEL og NEK400. Febdok registrerer feilforhold i effektbrytere fra GE med tilfeller:

- Vernets merkesstrøm  $I_n$  er for stor i forhold til kabelens strømføringssevne  $I_z$
- Vernets ultimate bryteevne  $I_{cu}$  er for liten i forhold til feilstrøm. Febdok kan løse dette ved å kontrollere «backuptabell» mot foranliggende vern noe som ikke er registrert i tilfelle. Løser dette ved å hente tabellen ved bryteevne.
- Vernet løser ut jordfeilstrøm for sent motstridende av krav til utkobling. Da kobles UPS ut før Vernet kobler ut feilstrøm for beskyttelse mot elektrisk sjokk blir ivaretatt.
- Vernet mangler bryteevne i kA for aktuell spenning som legges inn ved hjelp av verndata fra vernleverandør. Mangler utløserverdi  $I_4$ .



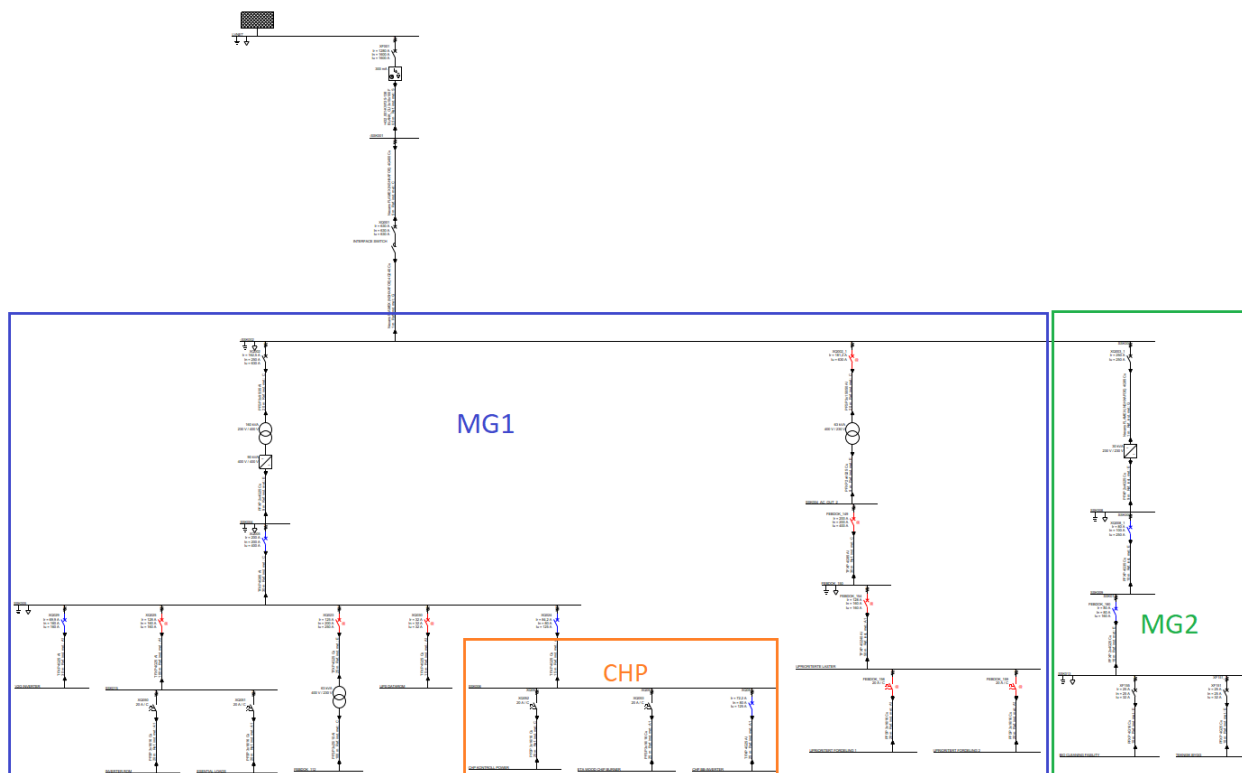
- Vernets verdi for termisk konfigurering motstrider godkjente verdier for konfigureringsområdet gitt av leverandør i Febdok.

Valg av kilder med vern og dimensjonering av installasjonen etter systemtegnning fra mikronett på Campus Evenstad. Med leverandørdata fra GE sine vern i Febdok. Se vedlegg A-1.3 «vern som er brukt i Febdok simulering.»

For konfigurering av verdier med vekselrettere som UPS, brukes Thevenin ekvivalent for sammenlagte kilder i Febdok. Dvs. at kortslutningsytelser legges sammen fra bidragene for hver sett. Verdiene fra sammenlagte bidrag for 6 invertere koblet parvis per fase parallelt oppgis i Febdok under konfigurasjon av UPS ved valg av register. Se «beregning av parallelle invertere» 2.4 i Teori.

Febdok beregner i dag med utgangspunkt i en hovedstrømskilde. Det kan plasseres ubegrenset antall generatorer i beregningen på ubegrensede plasseringer. En slik beregning tar også høyde for bidrag i flere retninger. Nelfo har batteri- og solcelleinstallasjoner på planen, men ikke begynt aktiv implementering av denne funksjonen. Inverter med doble utganger kan til en viss grad håndteres med UPS allerede.

Konfigurasjon av UPS i Febdok tilsvarende en inverter er i dag mulig med kun en tilpasning som skal godkjennes av leverandøren. Febdok er hovedsakelig et program for AC-beregning. For UPS beregnes verdier inn på likeretter og ut fra vekselretter. Siden den blir betraktet som en kilde og det oppgis dermed kortslutningsbidrag for lang tid og korttid når belastningen overstiger strømverdi gitt over maksimal overbelastning. Det som skjer inne i UPS'en er ikke relevant for Febdok sine beregninger. UPS i Febdok gir kun kortslutningsbidrag i nedstrøms UPS.



Figur 33 Ferdigstilt modell av mikronett installasjon i Febdok på campus Evenstad

Viser til figur 33 med ferdigstilt modell av forskningsprosjekt med mikronett på Campus Evenstad. Simulering av hele modellen av begge mikronett i installasjonen. Det var ikke optimalt for et godt oversiktsbilde med tanke på oppløsning og blir derfor delt opp under analysering av resultat.

## 4.2 Beregningsmodell av Mikronett i Febdok

### Feiltilfeller og Kortslutningsscenarioer for MG1.

Begrep feiltilfeller og kortslutningsscenarioer brukes som sinomimer i oppgaven. For å simulere både øydrift og normaldrift, modelleres installasjon som to separate fordelinger med og uten batteribank. Som beskrevet tidligere inverter/lader brukt på Evenstad installasjon har to inn- og utganger. Utgang nr. to (AC-out 2) er kun aktiv under normaldrift når den er i bruk, kan den simuleres som egen fordelingskurs i tillegg til UPS-kurs i modellen. Når det er nødvendig å skille mellom kortslutningsbidrag fra en enkel inverter og summen av parallelle inverters kreves det også hver sin simulering eller to like UPS-kurser med forskjellige kortslutningsytelser og tider i UPS-beregningsmodell.

Modeller deles opp slik at vern og fordelingsnummerering er oversiktlig og lik i flere modeller.

Tabell 1 Liste over modeller for simulering av mikronett på Campus evenstad

|          |   |
|----------|---|
| Modell 1 | MG1 normaldrift, med AC1 og AC2 som egen fordelinger        |
| Modell 2 | MG1 øydrift, parallelle kilder slått sammen (UPS + CHP+V2G) |
| Modell 3 | MG1 øydrift, kun BB1 bidrag som UPS                         |
| Modell 4 | MG1 øydrift, kun CHP bidrag                                 |
| Modell 5 | MG2 modell i øydrift  |

Analyse av kortslutningsscenarioer bygger på Kjær W. sin masteroppgave. (Kjær and Høidalen, 2020)

Følgende kortslutningsscenarioer blir analysert:

Tabell 2 Kortslutningsscenarioer som simuleres og undersøkes i Mikronettinstallasjon på Evenstad

| Kortslutnings-scenarioer | Beskrivelse av feil  | Gruppe av vern som kobler ut feilen |
|--------------------------|--|-------------------------------------|
| Under normaldrift        |  |                                     |
| 1                        | Kortslutning på samleskinne SSK005 i Hovedfordeling                            | XF001->XQ001->XQ002->XQ005          |
| 2                        | Kortslutning på CHP-styring kursen   | XQ001->XQ002->XQ005->XQ024          |
| 3                        | Kortslutning på UPS datarom kursen   | XQ001->XQ002->XQ005->XQ030          |
| 4                        | Kortslutning på kursen med Essensielle laster (Power essential loads), SSK015. | Vern XQ005->XQ025->XQ051->XF051_1   |
| Under øydrift            |  |                                     |

|    |   |                              |
|----|---|------------------------------|
| 5  | Kortslutning på samleskinne SSK005 i Hovedfordeling   | kun XQ005                    |
| 6  | Kortslutning på samleskinne SSK006 i CHP fordeling  | XQ005->XQ024                 |
| 7  | Kortslutning på UPS datarom kursen  | XQ005->XQ030->XQ030_1        |
| 8  | Kortslutning på kursen med Essensielle laster (Power essential loads), SSK015   | XQ005->XQ025->XQ051->XQ051_2 |
| 9  | Kortslutning på kursen med Essensielle laster (Power essential loads), SSK015, men undersøker strømflyt fra CHP mot SSK005 under øydrift - Kortslutning på CHP-styring kursen | XQ054                        |
| 10 | MG2 kortslutning på en dummy forbruker kurs (figur 36)  | XQ008->XQ045->XF155->XF155_1 |

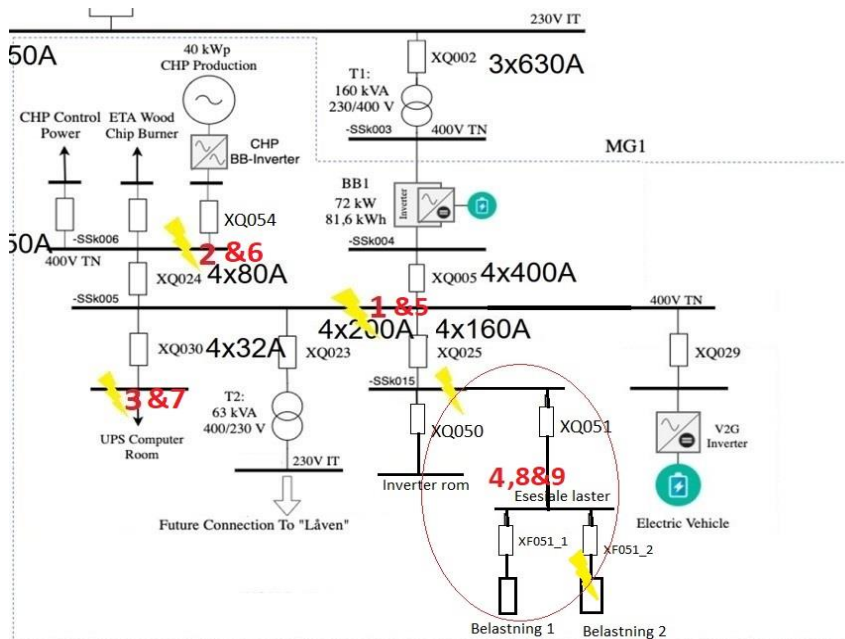
I tillegg til feil beskrevet over, simuleres det kortslutninger på enden av dummy-kurser i tekniske fordelinger. Feil avbildes i figur 34 under resultater. Denne oppgaven tar kun for seg feil som oppstår under kortslutning i installasjon.

#### **Kontrollmetode.**

Mikronett på Evenstad har ikke sentralisert kontrollenhet. Kontaktor i PCC overfører signal om overgang til øymodus til BB1 gjennom SD-anlegget. Da kobler omformer i BB1 om til batteridrift. Febdok gir mulighet å sette inn en kontaktor i installasjon, men den har ingen styringsfunksjoner. Derfor er det ikke mulig å simulere overgang mellom normal og batterimodus i modellen.

#### **De aktuelle feil stedene og vern i modellen**

Feil tilfelelr for MG1 avbildes i figuren under.



Figur 34 MG1 en-linjeskjema med nummerert feil tilfeller

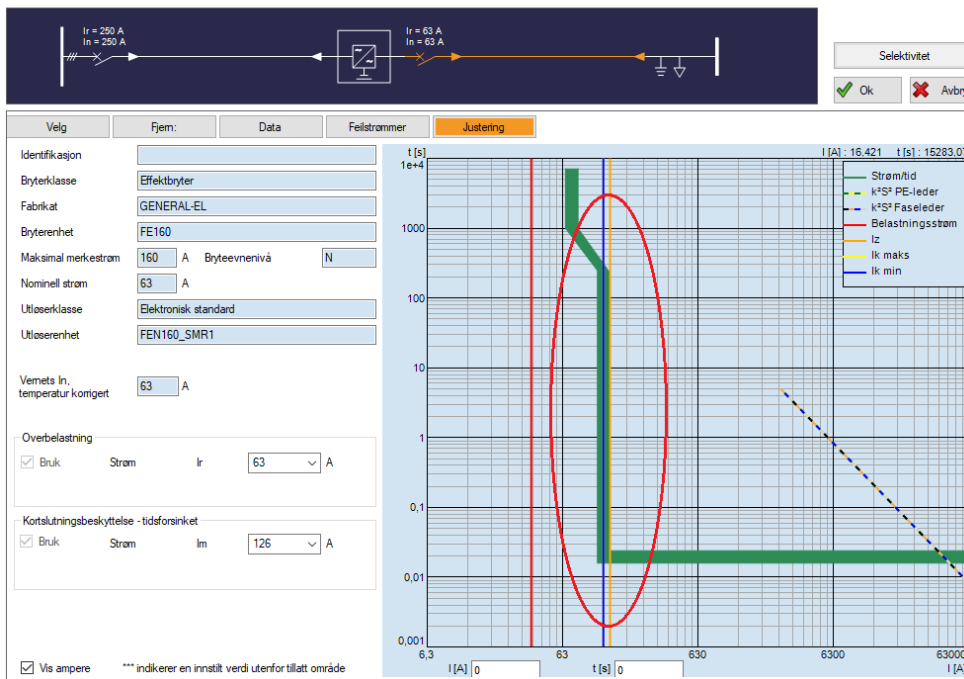
Simuleringsmodell for MG1 gir kortslutningsverdier for og selektivitet mellom vern: XQ005, XQ024, XQ025, XQ030, XQ050, XQ051, XF023\_1, XF024\_1, XF029\_1, XF030\_1, XF050\_1 og XF051\_1.

Kursen XQ023 som heter til Låven blir ikke simulert i Febdok, siden den representerer last med tilsvarende impedanser som kurs XQ025. XQ029 blir ikke tatt med i simulering verken under normal eller øydrift. Men kortslutningsbidraget fra V2G er tatt med i modellen der MG1 simuleres i øydrift med parallelle kilder slått sammen.

For MG2.

I både MG1 og MG2 modellen ble ikke det innebygde vernet på AC-utgang i UPS simulert, siden det var utfordrende å finne et vern i Febdok database som hadde nødvendige  $I_r$  og  $I_m$  verdier. Figur 35 viser at  $I_m$  er nødt til å være kun ca. 1,5 gang høyere enn  $I_r$ . Det er utfordrende å finne vern med tilsvarende bryteregenskaper for å simulere oppførsel til AC-ut vern på batteribanken. Vernet klarer ikke å koble ut

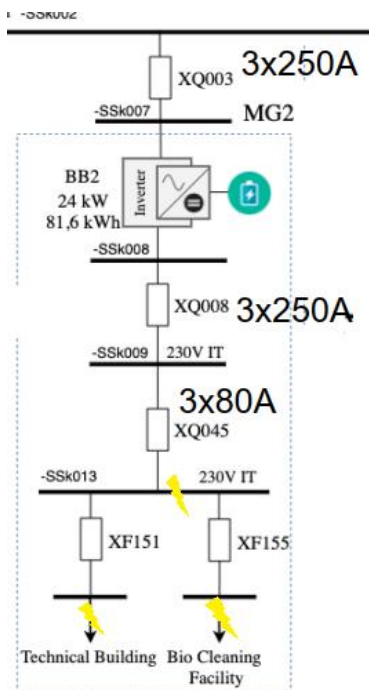
momentant den minste kortslutningsstrømmen.



Figur 35 Utfordring med å simulere vern på AC-utgang i UPS

I MG2 kortslutnings scenarier avbildes i figur 36.

Simuleringsmodell for MG2 gir kortslutningsverdier og selektivitet mellom vern: XQ008, XQ045, XF151, XF155, XF155\_1 og XF155\_2.



Figur 36 MG2 en-linjeskjema med avbildet kortslutninger

## Effektbehov beskrivelse for mikronett på Evenstad

### Laster:

Tabell 3 Belastninger på Campus Evenstad brukt i Febdok modellen

| Load                     | Nominal $S_L$ [kW] | Nominal $I_L$ [A] |
|--------------------------|--------------------|-------------------|
| UPS Computer Room        | 5.0                | 7.22              |
| ETA Wood Chip Burner     | 5.0                | 7.22              |
| CHP Control Power        | 7.0                | 10.10             |
| Bio Cleaning Facility    | 6.0                | 8.66              |
| Technical Building       | 7.0                | 10.10             |
| Inverter Room            | 6.0                | 8.66              |
| Power Essential Loads    | 6.0                | 8.66              |
| Additional load after T2 | Variable           | Variable          |

(Kjær and Høidalen, 2020)

Alle laster i tabellen over hører til MG1 utenom «Bio Cleaning Facility» og «Technical Building», de er plassert på MG2. Også maksimal effekt levert til MG2 gjennom tilkobling av BB2 fra nettet er 14kW. (Kjær and Høidalen, 2020) Valg av kabel og vern baseres på denne effekten. Antagelser er gjort for kabellengder i MG2 grunnet manglende informasjon.

### Energikilder:

Effekt levert fra batteribanker beskrives av leverandøren av batteribank installasjon i «FDV – Batterianlegg Campus Evenstad» del 6.

Tabell 4 Ytelse til batteribanker og antall invertere per batteribank på Campus Evenstad installasjon

| Batteribank | TFM-kode | Invertere                    | Max effekt |
|-------------|----------|------------------------------|------------|
| BB1         | =462.001 | 6 x Victron Quattro 15000/48 | 72 kW      |
| BB2         | =462.002 | 2 x Victron Quattro 15000/48 | 24 kW      |
| BB3         | =462.003 | 2 x Victron Quattro 15000/48 | 24 kW      |

(AS, 2021)

Egenskaper til hver enkel Victron Quattro vekselretter/lader er oppgitt av produsent, data er gitt i tabell 4:

Tabell 5 Egenskaper til Victron Quattro vekselretter/lader

|                                     |                          |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Type                                | Victron Quattro 15000/48 |
| Inngangsspenning [V]                | 230                      |
| Utgangsspenning [V]                 | 230                      |
| Tilsynelatende effekt [VA]          | 15000                    |
| Aktiv effekt [W]                    | 12000                    |
| Maks effekt [W] varighet 0,6 sekund | 25000                    |
| Maks overlast Ik min [A]            | 65                       |
| Kortslutning Ik maks [A]            | 108,5                    |
| Tid kortslutning [s]                | 0,6                      |

## Resultater for kortslutningsstrøm-ekvivalent for UPS-modell i Febdok.

Tabell 6 Kortslutningsstrøm UPS-ekvivalent for parallelle kilder

| Vekselretter/UPS | Maks ytelse ved feil [kVA] | Tilsynelatende effekt, maks overbelastning effekt [kVA] | Maks feil strøm [A], Linjestrøm | Min feilstrøm = Maks overlast [A], Linjestrøm | Maks tid feilstrøm opprettholdes [s] |
|------------------|----------------------------|---|---------------------------------|---|--------------------------------------|
| BB1              | 150                        | 90  | 217                             | 130   | 0,6                                  |
| CHP              | Ca. 95                     | 50  | 137                             | 73  | 0,6                                  |
| V2G              | N/A                        | 10  | 22                              | 17  | 0,6                                  |
| BB1 + CHP+V2G    | 245                        | 140   | 376                             | 220   | 0,6                                  |
| BB2              | 50                         | 30  | 125,5                           | 76  | 0,6                                  |

## Vern data for Febdok modell:

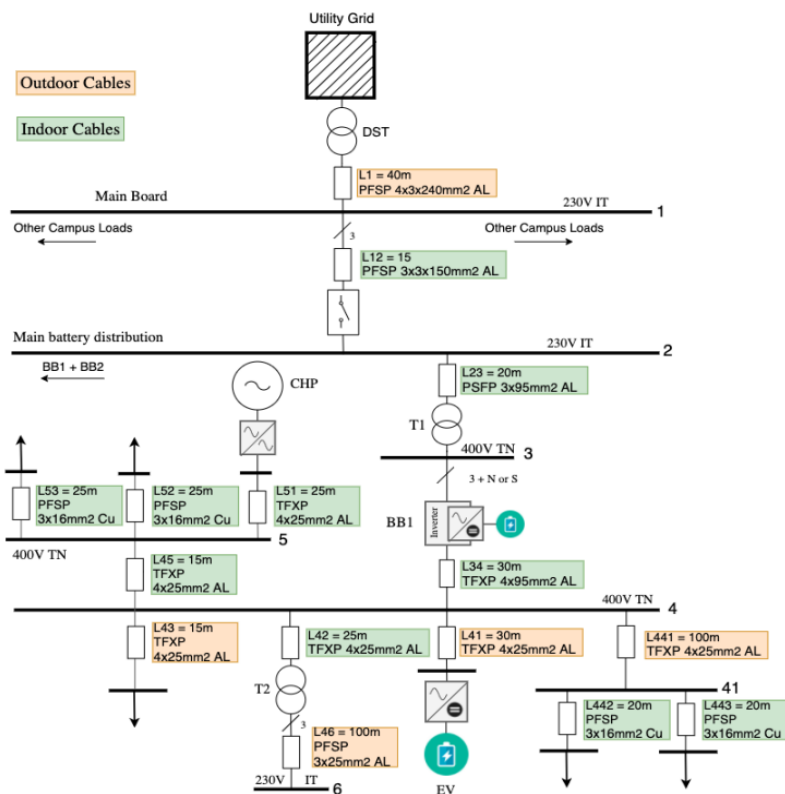
Tabell 7 Vern data oppgitt for campus Evenstad

| Breaker ID | Opr. V | Size  | Frame | Trip Unit | Cat. | $I_m$ [A] | $I_r$ [A] |
|------------|--------|-------|-------|-----------|------|-----------|-----------|
| XQ001      | 230    | 3x630 | FG    | ETU       | A    | 2520      | 252       |
| XQ002      | 230    | 3x630 | FG    | ETU       | A    | 1890      | 189       |
| XQ003      | 230    | 3x250 | FE    | TMTU      | A    | 1875      | 200       |
| XQ004      | 230    | 3x250 | FE    | TMTU      | A    | 1875      | 200       |
| XQ005      | 400    | 4x400 | FG    | ETU       | A    | 800       | 200       |
| XQ007      | 230    | 3x250 | FE    | TMTU      | A    | 1250      | 125       |
| XQ008      | 230    | 3x250 | FE    | -         | A    | -         | -         |
| XQ023      | 400    | 4x200 | FE    | TMTU      | A    | 1000      | 160       |
| XQ024      | 400    | 4x80  | FD    | TMTU      | A    | 800       | 64        |
| XQ025      | 400    | 4x160 | FE    | TMTU      | A    | 1000      | 128       |
| XQ029      | 400    | 3x110 | FE    | ETU       | A    | 220       | 33        |
| XQ030      | 400    | 4x32  | FE    | ETU       | A    | 230       | 25        |
| XQ045      | 230    | 3x80  | FD    | TMTU      | A    | 800       | 64        |

(Kjær and Høidalen, 2020)

## Kabellengder og tverrsnitt.

Verdier for lengder og tverrsnitt til kabler brukt i Febdok simulering er tatt ifra William Kjær sin oppgave side 121. Resultater vist nedenfor i figur 37 og tabell 8. (Kjær and Høidalen, 2020)



Figur 37 Kabellengder og tverrsnitt i MG1 en-linje skjema

Tabell 8 Kabellengder i MG1

| Line | Length [m] | Line | Length [m] |
|------|------------|------|------------|
| L1   | 40         | L42  | 25         |
| L12  | 15         | L46  | 100        |
| L23  | 20         | L43  | 15         |
| L34  | 30         | L45  | 15         |
| L441 | 100        | L51  | 25         |
| L442 | 20         | L52  | 25         |
| L443 | 20         | L53  | 25         |
| L41  | 30         |      |            |

Følgende kabeltverrsnitt måtte økes for å få å unngå «for lite tverrsnitt» feilmelding i modeller:

Tabell 9 Kabler med økt tverrsnitt i forhold referanser i kilder



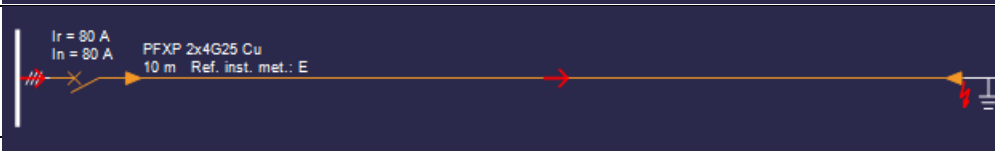



| Tilførsel | Type/tverrsnitt            |
|-----------|----------------------------|
| L1        | Strømskinne 3x10x100F      |
| L12       | FLAMEX (NSHXAFOE) 4G400 Cu |
| L23       | PFSP 2x3x95/35 AL          |
| L441      | TFXP 4G150 AL              |

L1 og L12 kabeltyper og tverrsnitt var oppgitt av prosjektingeniør fra Solcellespesialisten.



## Kortslutningsstrømmer beregnet i Febdok

Tabell 10 Typer kortslutningsstrømmer Febdok beregner

| Type kortslutningsstrøm beregnet i Febdok | Kortslutning avbildet i en linje skjema  |
|---|--|
| Ik 3p maks                                |    |
| Ik 3p maks ende                           |    |
| Ik 3p min                                 |    |
| Ik 2p maks                                |   |
| Ik 2p maks ende                           |  |
| Ik 2p min                                 |  |

## 4.3 Simuleringsresultater fra Febdok beregninger.

### 4.3.1 Modell 1 - MG1 normaldrift med AC1 og AC2 som egne fordelinger

Hovedkursskjema fra Febdok modellen

Se vedlegg A - Hovedkursskjema til MG1 normaldrift, med AC1 og AC2 som egne fordelinger simuleringer i Febdok.

Det første vedlegget i figur 51 viser AC1&2 simulert samtidig i Febdok. Grunnet utskrift oppløsning i Febdok og i prinsippet lik kortslutningsstrøm på de endelige forbrukerkursene ser denne rapporten kun på analyse av MG1 normaldrift med AC1. Figur 52 til 54 viser hovedkursskjema i bedre oppløsning.

## Resultat for kortslutningsytelser og utkoblingstid

Tabell 11 Aktuelle resultater for kortslutningsstrømmer og utkoblingstid for vern i MG1 normaldrift

| Vern nummer | Type feilstrøm  | $I_k$ [kA] | Kabel<br>$t=k^2S^2/I^2$ [s],<br>tiden kabel tåler | $T_{\text{utkobling}}$ [s] |
|-------------|-----------------|------------|---|----------------------------|
| XF001       | Ik 3p maks ende | 25,35      | 27,33   | 0,049                      |
|             | Ik 2p min       | 15,41      | 73,9  | 0,049                      |
| XQ001       | Ik 3p maks ende | 23,03      | 2,22  | 0,041                      |
|             | Ik 2p min       | 14,05      | 5,97  | 0,041                      |
| XQ002       | Ik 3p maks ende | 15,3       | 0,89  | 0,041                      |
|             | Ik 2p min       | 10,7       | 1,82  | 0,041                      |
| XQ005       | Ik 3p maks ende | 6,534      | 1,87  | 0,028                      |
|             | Ik 2p min       | 5,66       | 2,49  | 0,028                      |
| XQ025       | Ik 3p maks ende | 4,12       | 11,72   | 0,02                       |
|             | Ik 2p min       | 2,42       | 34,06   | 0,022                      |
| XQ030       | Ik 3p maks ende | 5,12       | 0,49  | 0,026                      |
|             | Ik 2p min       | 3          | 1,42  | 0,026                      |
| XQ024       | Ik 3p maks ende | 5,12       | 0,49  | 0,008                      |
|             | Ik 2p min       | 3          | 1,42  | 0,008                      |
| XQ051       | Ik 3p maks ende | 3          | 0,37  | 0,016                      |
|             | Ik 2p min       | 1,78       | 1,1   | 0,016                      |
| XF051_2     | Ik 3p maks ende | 1,08       | 0,409   | 0,016                      |
|             | Ik 2p min       | 0,64       | 1,2   | 0,017                      |

Forklaring til tabell 11:

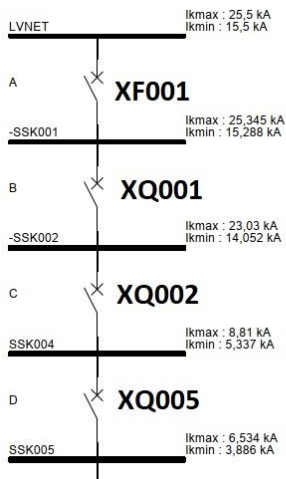
$I_k$  – Største eller minste kortslutningsstrøm som går gjennom vernet når en tre- eller to-polt kortslutning oppstår.

Kabel t er den tiden i sekunder kabellengden mellom vernet og kortslutningspunktet tåler uten å ta skade.

T-utkobling er den tiden i sekund vernet bruker for å koble ut kortslutningen.

[Selektivitetskurve mellom de aktuelle vern](#)

Kortslutningsscenariet 1:



## Selektivetsanalyse

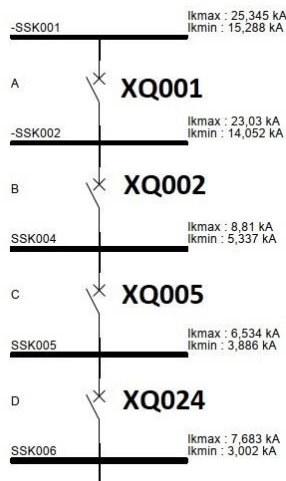
Kurs nr.: 1

| Vern | Fabrikat   | Type                            | $I_n$ [A] |
|------|------------|---------------------------------|-----------|
| A    | SCHNEIDER  | NS1600N MICROLOGIC 2.0 E 1600 A | 1600      |
| B    | GENERAL-EL | FG630 630 A FGN630_SMR2 630 A   | 630       |
| C    | GENERAL-EL | FG630 630 A FGN630_SMR2 250 A   | 250       |
| D    | GENERAL-EL | E400 400 A E400_EN 200 A        | 200       |

| Vern  | Selektivitet [A] | Selektivetskriterie  | Bestemmende vern |
|-------|------------------|----------------------|------------------|
| A - B | 3456             | Strøm/tid-kurver     |                  |
| A - C | 2323             | Gjennomsluppet strøm | C                |
| A - D | 1987             | Strøm/tid-kurver     |                  |
| B - C | 2106             | Gjennomsluppet strøm | C                |
| B - D | 1811             | Strøm/tid-kurver     |                  |
| C - D | 113              | Strøm/tid-kurver     |                  |

Figur 38 MG1 i normaldrift Selektivetsresultater for kortslutning nr1

Kortslutningsscenariet 2:



## Selektivetsanalyse

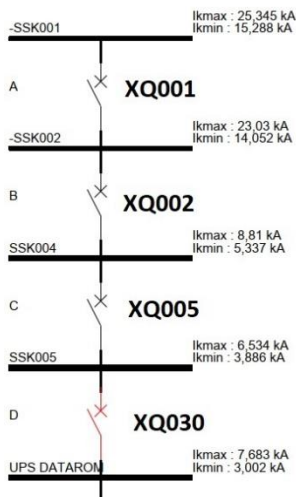
Kurs nr.: 5

| Vern | Fabrikat   | Type                          | $I_n$ [A] |
|------|------------|-------------------------------|-----------|
| A    | GENERAL-EL | FG630 630 A FGN630_SMR2 630 A | 630       |
| B    | GENERAL-EL | FG630 630 A FGN630_SMR2 250 A | 250       |
| C    | GENERAL-EL | E400 400 A E400_EN 200 A      | 200       |
| D    | GENERAL-EL | D125 125 A D125_RE_40 80 A    | 80        |

| Vern  | Selektivitet [A] | Selektivetskriterie  | Bestemmende vern |
|-------|------------------|----------------------|------------------|
| A - B | 2106             | Gjennomsluppet strøm | B                |
| A - C | 1811             | Strøm/tid-kurver     |                  |
| A - D | 1811             | Gjennomsluppet strøm | D                |
| B - C | 113              | Strøm/tid-kurver     |                  |
| B - D | 113              | Strøm/tid-kurver     |                  |
| C - D | 1000             | Strøm/tid-kurver     |                  |

Figur 39 MG1 i normaldrift Selektivetsresultater for kortslutning nr2

Kortslutningsscenariet 3:



### Selektivetsanalyse

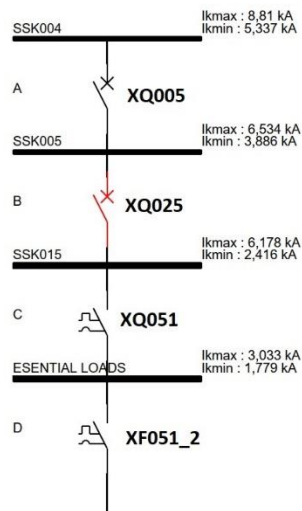
Kurs nr.: 4

| Vern | Fabrikat   | Type                          | $I_n$ [A] |
|------|------------|-------------------------------|-----------|
| A    | GENERAL-EL | FG630 630 A FGN630_SMR2 630 A | 630       |
| B    | GENERAL-EL | FG630 630 A FGN630_SMR2 250 A | 250       |
| C    | GENERAL-EL | E400 400 A E400_EN 200 A      | 200       |
| D    | GENERAL-EL | E32 32 A E32_EN_32 32 A       | 32        |

| Vern  | Selektivitet [A] | Selektivetskriterie        | Bestemmende vern |
|-------|------------------|----------------------------|------------------|
| A - B | 2106             | Gjennomsluppet strøm       | B                |
| A - C | 1811             | Strøm/tid-kurver           |                  |
| A - D | 1811             | I4-verdi, strøm/tid-kurven | A                |
| B - C | 113              | Strøm/tid-kurver           |                  |
| B - D | 540              | I4-verdi, strøm/tid-kurven | B                |
| C - D | 1600             | I4-verdi, strøm/tid-kurven | C                |

Figur 40 MG1 i normaldrift Selektivetsresultater for kortslutning nr3

### Kortslutningsscenarioet 4:



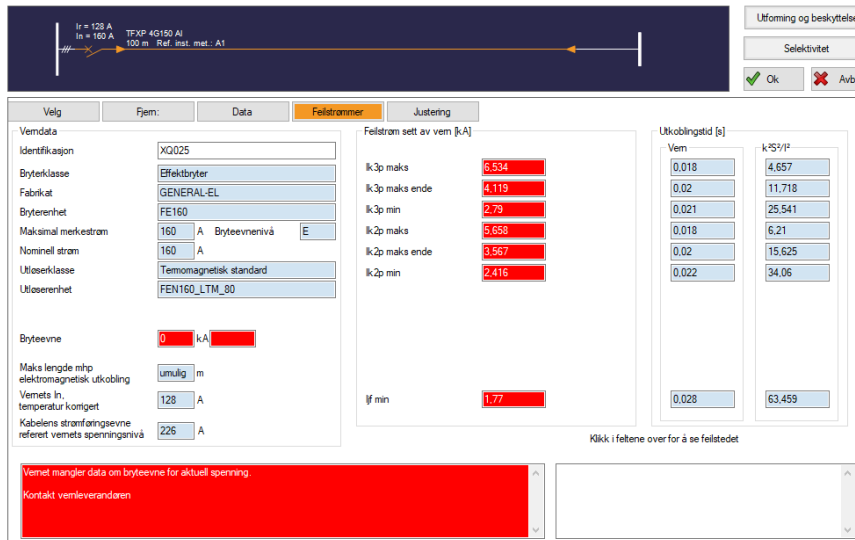
### Selektivetsanalyse

Kurs nr.: 2

| Vern | Fabrikat   | Type                      | $I_n$ [A] |
|------|------------|---------------------------|-----------|
| A    | GENERAL-EL | E400 400 A E400_EN 200 A  | 200       |
| B    | GENERAL-EL | FE160 FEN160_LTM_80 160 A | 160       |
| C    | GENERAL-EL | G100_C 20 A               | 20        |
| D    | GENERAL-EL | G100_C 16 A               | 16        |

| Vern  | Selektivitet [A] | Selektivetskriterie  | Bestemmende vern |
|-------|------------------|----------------------|------------------|
| A - B | 210              | Strøm/tid-kurver     |                  |
| A - C | 1455             | Gjennomsluppet strøm | C                |
| A - D | 1631             | Gjennomsluppet strøm | D                |
| B - C | 1058             | Gjennomsluppet strøm | C                |
| B - D | 1219             | Gjennomsluppet strøm | D                |
| C - D | 23               | Strøm/tid-kurver     |                  |

Figur 41 MG1 i normaldrift Selektivetsresultater for kortslutning nr4



Figur 42 Vern XQ025 mangler data om bryteevne for aktuell spenning.

Følgende effektbrytere mangler data om brytereve for aktuell systemspenning i Febdok sin vern database: XQ025, XQ030.

#### 4.3.2 Modell 2 - MG1 øydrift, parallelle kilder slått sammen (BB1 + CHP+V2G)

Hovedkursskjema fra Febdok modellen

Se vedlegg A - Hovedkursskjema til MG1 øydrift, der batteribank og CHP simulert som parallell strømkilde som UPS-modell, figur 55-57.

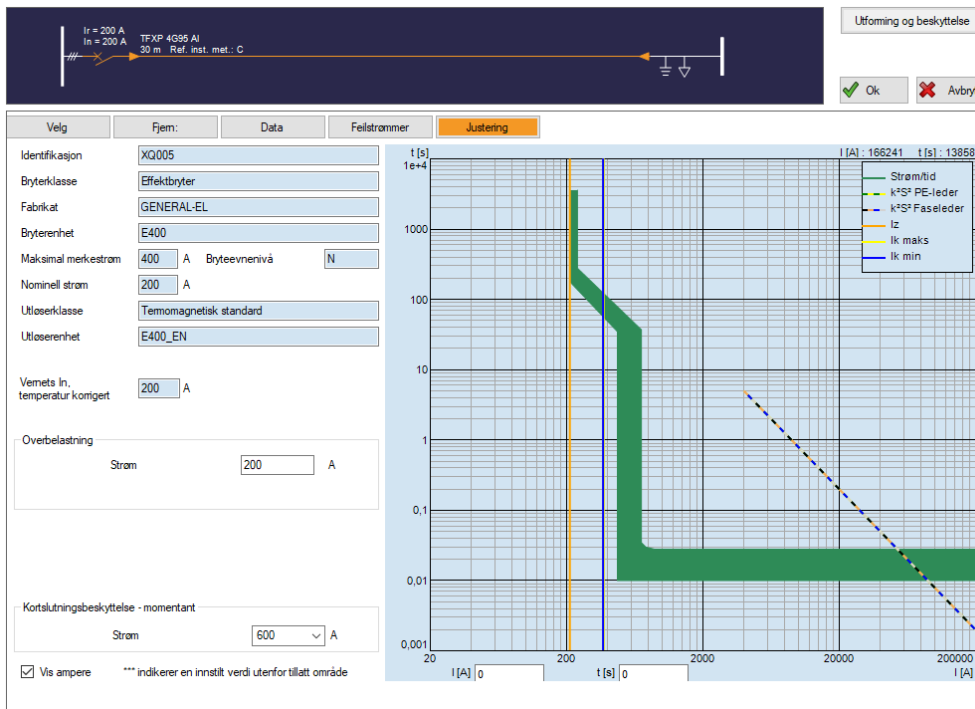
#### Utskrift av kortslutningsytelser

Beregningsresultater til XF001, XQ001 og XQ002 er like til MG1 modell i normaldrift.

Tabell 12 Resultater for kortslutningsstrømmer og utkoblingstid for vern i MG1 øydrift (BB1+CHP+V2G)

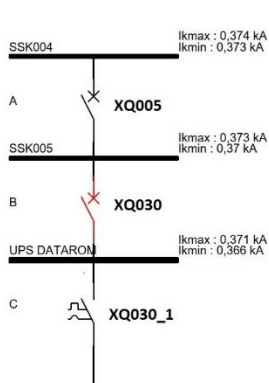
| Vern nummer | Type feilstrøm  | Ik[kA] | Kabel<br>$t=k^2S^2/I^2[s]$ | T <sub>utkobling</sub> [s] |
|-------------|-----------------|--------|----------------------------|----------------------------|
| XQ005       | Ik 3p maks ende | 0,373  | 573                        | 122                        |
|             | Ik 2p min       | 0,372  | 576                        | 124                        |
| XQ025       | Ik 3p maks ende | 0,359  | 42,8                       | 281                        |
|             | Ik 2p min       | 0,347  | 45,9                       | 310,9                      |
| XQ030       | Ik 3p maks ende | 0,371  | 92,9                       | 0,026                      |
|             | Ik 2p min       | 0,369  | 93,8                       | 0,026                      |
| XQ051       | Ik 3p maks ende | 0,356  | 26,7                       | 0,025                      |
|             | Ik 2p min       | 0,342  | 28,9                       | 0,026                      |
| XF051_2     | Ik 3p maks ende | 0,338  | 4,167                      | 0,022                      |
|             | Ik 2p min       | 0,312  | 4,89                       | 0,023                      |

Selektivitetskurve mellom de aktuelle vern  
Kortslutningsscenariet 5:



Figur 43 MG1 i øydrift (BB1+CHP+V2G) vern XQ005 bryteevne for kortslutningsscenariet 5

### Kortslutningsscenariet 7:



### Selektivetsanalyse

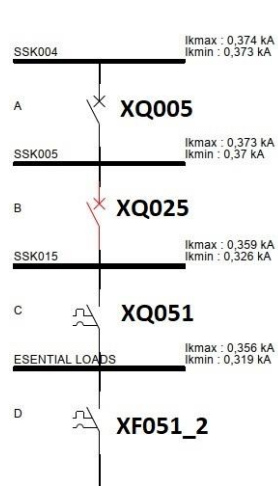
Kurs nr.: 1

| Vern | Fabrikkat  | Type                     | $I_n$ [A] |
|------|------------|--------------------------|-----------|
| A    | GENERAL-EL | E400 400 A E400_EN 200 A | 200       |
| B    | GENERAL-EL | E32 32 A E32_EN_32 32 A  | 32        |
| C    | GENERAL-EL | G100_C 16 A              | 16        |

| Vern  | Selektivitet [A] | Selektivetskriterie        | Bestemmende vern |
|-------|------------------|----------------------------|------------------|
| A - B | 471              | I4-verdi, strøm/tid-kurven | A                |
| A - C | 330              | Gjennomsluppet strøm       | C                |
| B - C | 139              | Strøm/tid-kurver           |                  |

Figur 44MG1 i øydrift (BB1+CHP+V2G) Selektivetsresultater for kortslutningsscenariet 7

## Kortslutningsscenariet 8:



### Selektivetsanalyse

Kurs nr.: 2

| Vern | Fabrikat   | Type                      | $I_n$ [A] |
|------|------------|---------------------------|-----------|
| A    | GENERAL-EL | E400 400 A E400_EN 200 A  | 200       |
| B    | GENERAL-EL | FE160 FEN160_LTM_80 160 A | 160       |
| C    | GENERAL-EL | G100_C 20 A               | 20        |
| D    | GENERAL-EL | G100_C 16 A               | 16        |

| Vern  | Selektivitet [A] | Selektivetskriterie  | Bestemmende vern |
|-------|------------------|----------------------|------------------|
| A - B | 210              | Strøm/tid-kurver     |                  |
| A - C | 254              | Gjennomsluppet strøm | C                |
| A - D | 330              | Gjennomsluppet strøm | D                |
| B - C | 394              | Gjennomsluppet strøm | C                |
| B - D | 493              | Gjennomsluppet strøm | D                |
| C - D | 23               | Strøm/tid-kurver     |                  |

Figur 45 MG1 i øydrift (BB1+CHP+V2G) Selektivetsresultater for kortslutningsscenariet 8

### 4.3.3 Modell 3 - MG1 øydrift, kun BB1 bidrag (kun BB1)

Hovedkursskjema fra Febdok modellen

Se vedlegg A - Hovedkursskjema til MG1 øydrift, med kun BB1 bidrag simuleringer i Febdok, figur 58-60.

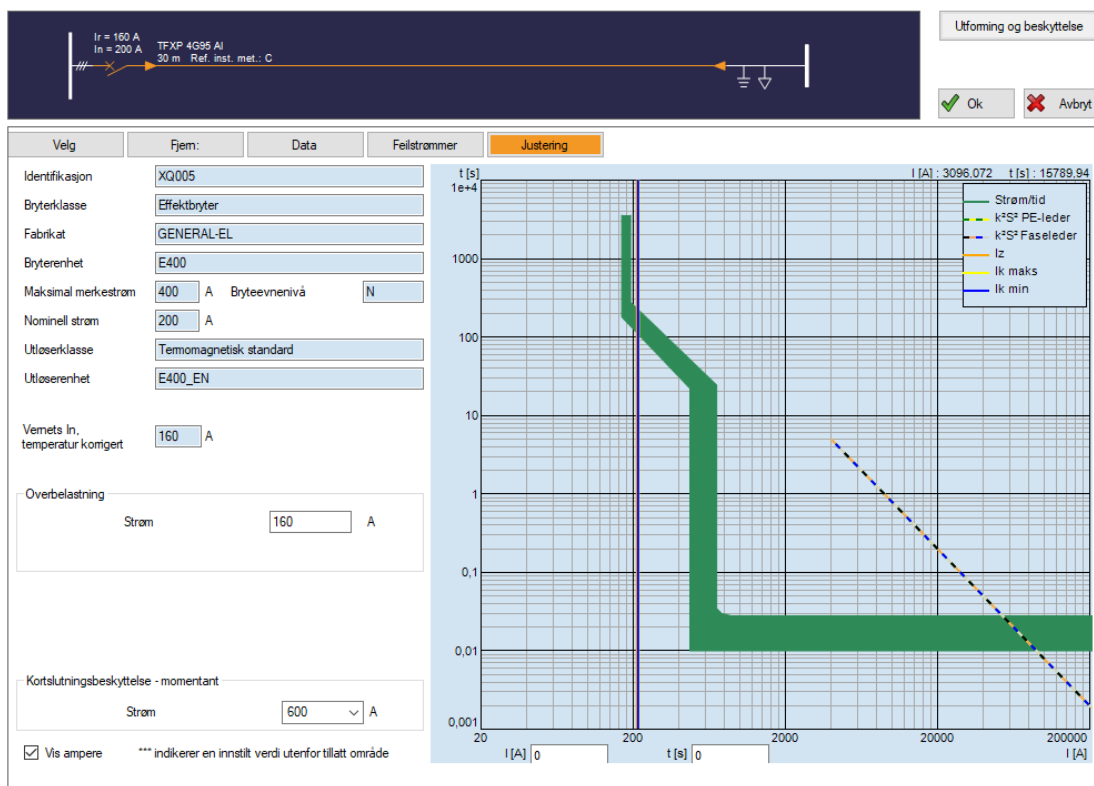
### Utskrift av kortslutningsytelser

Beregningsresultater til XF001, XQ001 og XQ002 er like til MG1 modell i normaldrift.

Tabell 13 Resultater for kortslutningsstrømmer og utkoblingstid for vern i MG1 øydrift kun BB1

| Vern nummer            | Type feilstrøm  | $I_k$ [kA] | Kabel<br>$t=k^2S^2/I^2$ [s] | $T_{utkobling}$ [s] |
|------------------------|-----------------|------------|-----------------------------|---------------------|
| XQ005                  | Ik 3p maks ende | 0,217      | 1693                        | $I_k < I_2$         |
|                        | Ik 2p min       | 0,217      | 576                         | $I_k < I_2$         |
| XQ024                  | Ik 3p maks ende | 0,217      | 271                         | 131                 |
|                        | Ik 2p min       | 0,217      | 271                         | 131                 |
| XQ025                  | Ik 3p maks ende | 0,217      | 117                         | 1370                |
|                        | Ik 2p min       | 0,217      | 117                         | 1370                |
| XQ030                  | Ik 3p maks ende | 0,217      | 271                         | 0,038               |
|                        | Ik 2p min       | 0,217      | 271                         | 0,038               |
| XQ051                  | Ik 3p maks ende | 0,217      | 71,9                        | 0,059               |
|                        | Ik 2p min       | 0,217      | 71,9                        | 0,059               |
| XF051_2                | Ik 3p maks ende | 0,217      | 10,1                        | 0,036               |
|                        | Ik 2p min       | 0,217      | 10,1                        | 0,036               |
| XQ054 (kun CHP bidrag) | Ik 3p maks ende | 0,136      | 298                         | 466                 |
|                        | Ik 2p min       | 0,134      | 298                         | 466                 |

## Selektivitetskurve mellom de aktuelle vern Kortslutningsscenariet 5:



Figur 46 MG1 i øydrift (BB1) vern XQ005 bryteevne for kortslutningsscenariet 5

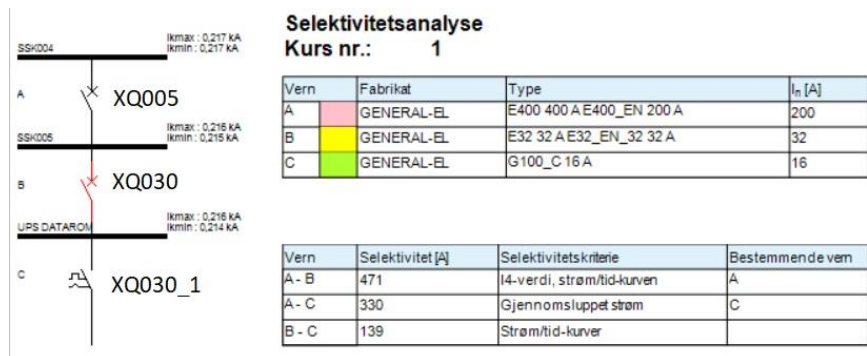
## Kortslutningsscenariet 6:



Figur 47 MG1 i øydrift (BB1) Selektivitetsresultater for kortslutningsscenariet 6

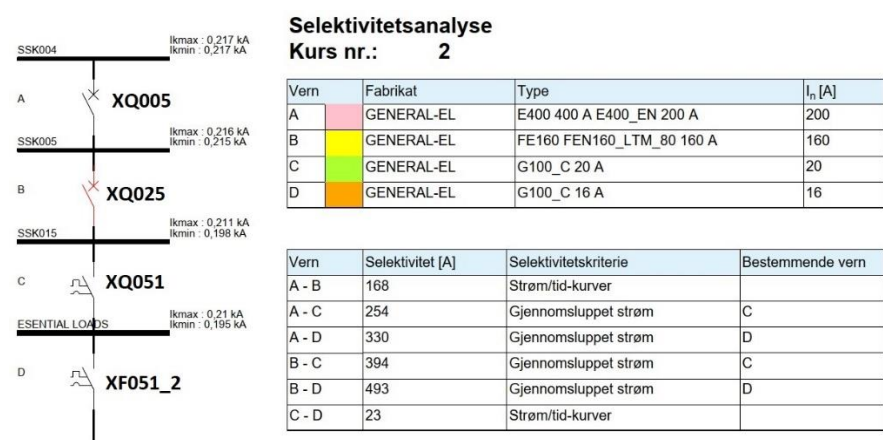


## Kortslutningsscenariet 7:



Figur 48 MG1 i øydrift (BB1) Selektivetsresultater for kortslutningsscenariet 7

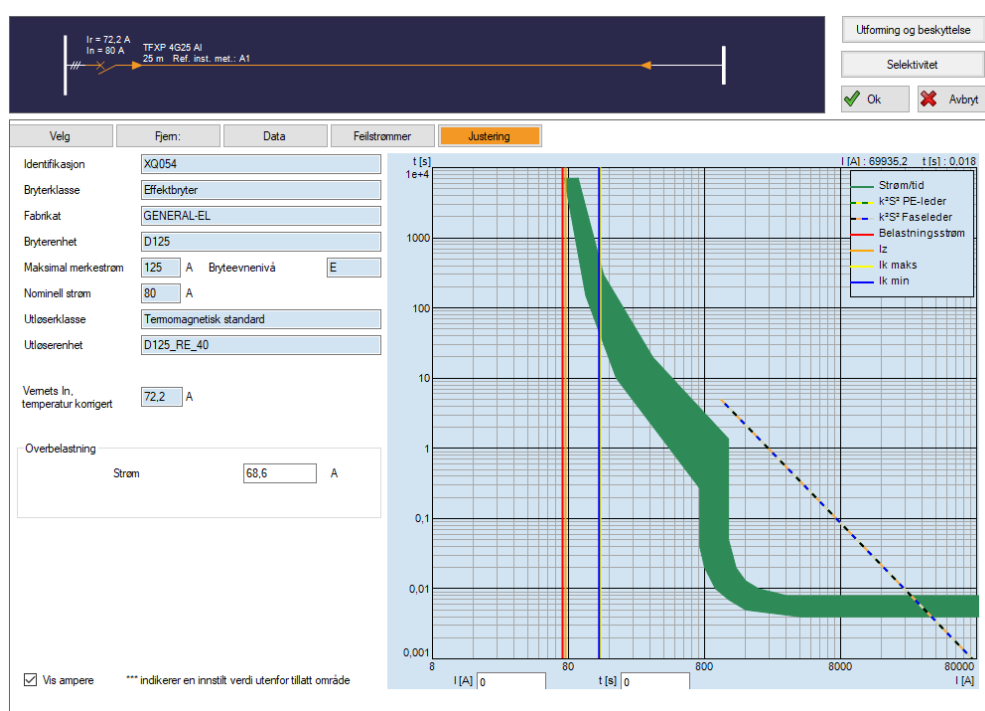
## Kortslutningsscenariet 8:



Figur 49 MG1 i øydrift (BB1) Selektivetsresultater for kortslutningsscenariet 8

## Kortslutningsscenarier 9:

### 4.3.4 Modell 4 - MG1 øydrift kun CHP som UPS



Figur 50 MG1 i øydrift (CHP som UPS) vern XQ054 bryteevne for å koble ifra CHP kortslutningsscenariet 9

### 4.3.5 Modell 5 - MG2 modell i øydrift

#### Modell i Febdok

MG2 har også blitt simulert og resultater tatt med i rapporten i vedlegg A. Hovedkursskjema til MG2 simuleringer i Febdok avbildet på figur 61 og 62. Kortslutningsytelser og utkoblingstid under øydrift – vedlegg A, tabell 14. Selektivitetskurve mellom de aktuelle vern under øydrift – vedlegg A, figur 63.

## 5 ANALYSE

### 5.1 Modelling av mikronett topologier i Febdok

Under resultatet ble det beskrevet hvilke mikronett topologier det er mulig å simulere i Febdok. Det redegjøres for valget av mikronett topologi på Campus Evenstad, samt beskrivelse av egenskaper som må oppgis i Febdok for å utføre simuleringer. Det ble gjort en vurdering om nødvendighet på oppdeling av mikronettetsimulering, for å få et perspektiv i simuleringsbildet under arbeidet i Febdok.

I utgangspunktet var det meningen å modellere flere mikronett topologier for å sammenligne beregninger og utdraget fra dem. Under prosjektering ble det oppdaget at energi og kortslutningsverdier for undersøkte topologier av mikronett ikke var tilgjengelig for alle. Da topologiene skulle brukes til et konkluderende resultat i forskningsprosjektet var det utfordrende uten tilgang på verdiene. For å spare tid ble det tatt avgjørelse som endte opp med simulering av Campus Evenstad.

Under prosjektering av modellen i et lineært dimensjoneringsprogram skiller oppsettet av løsningsmodellen seg fra anleggsskjema. Viser til løsningsmodellen i resultatkapittelet på figur 33 og anleggsskjema for Campus Evenstad fra masteroppgaven til Kjær W. på figur 31 i teorikapittelet. Da det ble gjort vurderinger for modellering av samleskinnene i MG2 og MG1 ble tilførselsgrenene av koblinger med vern og kilder endret for å tilpasse programmet. Siden modellering i Febdok kun prosjekterer lineært i radialnett, tilpasses modellen fra anleggsskjema i stjerne- til radialnett. Det har ingenting å si for endringer eller påvirkninger av nettet som den står per i dag på Campus Evenstad. Da endringene for modellen er kun estetiske og var nødvendig for prosjekteringsstilpasninger.

Komplett løsningsmodell på figur 33 med to mikronett. MG1 i øydrift som er batteridrevet med UPS til venstre og MG2 i øydrift med batterikoblet UPS ytterst. Sammen med MG1 med AC2 i normaldrift/tilkoblet nettspenning i midten. MG1 og MG2 med utganger fra vekselretter AC1 og AC2 er simulert samtidig. AC1 er tilkoblet inverter med bidrag på opptil 100A under blandet- og øydrift. Utgangen AC1 er påvirket av kritiske laster. AC2, Inn- og utgangen mates med nettstrøm. Kobles ut under øydrift, påvirket av ukritiske laster.

Utfordring med å avbilde topologiene til modeller i Febdok som et komplett bilde, øker med størrelsen på installasjon som skal modelleres. Febdok tillater å skrive ut oversiktsbildet opp til format A0, med det er utfordrende å sette inn slike utskrifter inn i rapporten. For å få detaljer frem, ble hele installasjon skrevet ut i A4 format på flere tegninger. Kurser og fordelinger som ikke hadde innflytelse på simulerings resultater har blitt fjernet fra modellen.

Løsningsmodellen deles opp i MG1 på figur 34 og MG2 på figur 36. Det er gir i tillegg mulighet til å simulere for begge mikronett i normal- og øydrift med utganger for invertere (i normaldrift), parallelle kilder slått sammen (i øydrift), med bidrag fra batteribank BB1 og med bidrag fra CHP. MG2 simuleres for seg selv for et mer oversiktlig bidrag fra MG1 i overnevnte tilfeller. Det er et enkelt mikronett som det rettes mindre søkelys på av resultat. Framfor MG1 som er et større mikronett med flere kilder.

Utfordring under prosjekteringen var simulering av flere kilder i øydrift og flere utganger i UPS på batteribanken. Modellen er prosjektert uten last og med hensyn på kilder og vern i dimensjoneringsprogrammet. Da lastene for fornybare energi og varme ikke er en del av denne oppgaven selv om løsningsmodellen er tilrettelagt for dem. Det er i utgangspunktet en utfordring med implementering av lastene da programmet kun tar

### 5.2 Beregningsmodell av Mikronett i Febdok

Løsningsmodellen ble delt mer og mer opp for tilfellene i tabell 1. med oversikt over simuleringsmodeller av mikronett på Campus Evenstad. Det gir et oversiktlig simuleringsbilde og bidrag fra hvert tilfelle.

Ti feiltilfeller ble funnet ved å analysere topologien på mikronettet og sammenlignet med simuleringer for anlegget som var gjort av William Kjær. De er listet opp i tabell 2. For å beholde oversikt og simulere alle

feil måtte det lages flere modeller for normal- og øydrift for MG1. Egen modell for MG2. Ti feiltilfeller har én eller flere foranliggende vern som kobler ut ved en kortslutning. Disse vern er listet opp fra oppstrøms til nedstrøms under resultater for hvert enkelt kortslutningstilfelle. Selektivitetsanalyse for hver gruppe av vern viser strøm/tid forhold som forteller om vernet nærmest feil stedet kobler ut først.

Febdok har ingen mulighet for å simulere styringskrets for overgang mellom normal og øydrift. Derfor må omkoblingstid på 20 ms neglisjeres i modelleringen.

Tilfelle nr. 9 beskriver simulering under øydrift. I simuleringsmodell nr.2, den med parallelle kilder, gir det ikke mening å modellere feil på SSK015, fordi at begge samleskinner skal behandles som det samme punktet i modell 2.

Kortslutning på kursen med Essensielle laster (Power essential loads), SSK015, men undersøker strømflyt fra CHP mot SSK005 under øydrift - Kortslutning på CHP-styring kursen

Den nødvendige data for ytelse til energikilder, belastninger, vekselretter egenskaper og kabeldata var funnet i William Kjær sin masteroppgave, i datablad til produsenter og oppgitt av leverandøren av installasjon. Den informasjon vises i tabeller 3 til 9. Tabell 6 viser resultater for beregning av UPS-ekvivalenter av parallelle vekselrettere som plottes inn i UPS-modell i Febdok.

Tabell 10 viser alle seks typer kortslutningsstrømmer Febdok beregner. Det minste og største kortslutningsstrømmer som kan oppstå hvor helst mellom vernet og enden av kabel. Febdok beregner kun de tilfellene som er avgjørende for demisjonering av beskyttelse (vern). Det er i begynnelsen og på enden av en tilførselskabel.

### 5.3 Simuleringsresultater fra Febdok beregninger

De forskjellige simuleringene i Febdok presentert i resultat kapitlet beregner kortslutningsverdier til feiltilfeller på samleskinner SSK005, SSK006, SSK015 og i UPS datarom fordeling. Beregningsresultater for alle vern som skal beskytte installasjon under disse feil er tatt med i kapitlet og som vedlegg. Også selektivitet mellom dem og nærliggende vern beregnet og brukt som resultater fra simuleringer.

#### *Resultater fra modellen.*

Resultater deles inn i delkapitler etter Febdok-modeller fra tabell 1. Resultater av simuleringer for normaldrift og MG2-modell viser ingen feil i bryteevne og for selektivitet mellom vern. Disse er av mindre interesse for diskusjon. Utenom Vern nr XQ025 og XQ030, disse vern mangler data om bryteevne for 400V spenningsnivå. Dataen skal være innlagt i Febdok sin database, men brukeren kan også oppdatere det selv.

Resultater av simuleringer for øydrift deles etter feiltilfeller.

#### Nr. 5 Kortslutning på samleskinne SSK005 i Hovedfordeling

Effektbryter XQ005 kobler ut 122 sekunder etter en kortslutning oppstår. Vernet er feil demisjonert og klarer ikke å koble ut innebygget vern i vekselretter kobler ut. For å opprettholde redundans XQ005 burde slått ut før 600 ms. Hele MG1 mister spenning og må settes i drift på nytt.

#### Nr. 6 Kortslutning på samleskinne SSK006 i CHP fordeling

I dette tilfellet kommer kortslutningsytelse fra begge sider av samleskinne. Gjennom vern XQ024 går det kun BB1 kortslutningsbidrag. Vernet kobler ut i løpet av 131 sekunder, dette fører til utkobling av BB1 innebygget vern, som i tilfellet over. Hele MG1 mister spenning og må settes i drift på nytt.

#### Nr. 7 Kortslutning på UPS datarom kursen

Vern XQ030 kobler ut i løpet av 26 millisekund både i modell 2 og 3, det er raskere enn 600 ms som BB1 bruker på å koble ut. Også CHP blir ikke påvirket, siden anti-øymodus vern holder i 200 ms etter en kortslutning – anti-islanding krav.

Nr. 8 Kortslutning på kursen med Essensielle laster (Power essential loads), SSK015

Feil på SSK015 kobles ut av XQ025 i løpet av 281 sekunder. Det fører til utkobling av BB1 vern, MG1 mister spenning og oppstart må kjøres på nytt. Feil som skjer på en «dummy» forbruker kurs, blir koblet ut av vern XF051\_2 momentant.

Nr. 9 Kortslutning på kursen med Essensielle laster (Power essential loads), SSK015, Kun CHP-bidrag i UPS, teste XQ054. Vernet koblet ut etter 466 sekunder. Dette tilfelle tester at vern foran CHP kobler ut feil oppstrøms vernet. Siden vern utkoblingstid er over 200 ms, anti-øymodus vern må koblet CHP ut.

Full selektivitet mellom vern i MG1 under normaldrift oppnås kun mellom to vern som har høyere verdi for selektivetsstrøm, oppgitt i tabeller 37-40, enn feilstrøm gjennom det laveste vernet. Kun i dette tilfelle oppnås full selektivitet. De fleste vern i modellen oppnår ikke det, da brukes begrepet delvis-selektivitet. Det krever analyse av selektivetskurver for å danne seg et bilde av hvilket vern som slår ut først under feil. I øydrift er selektivitet mellom vern også varierende. Ca. halvparten av vern sammensetninger oppnår selektivitet gjennom gjennomsluppet strøm, men andre har kun delvis selektivitet og må analyseres i Strøm/tid kurve.

Hovedstrømskjema for Febdok-modeller er ikke tatt med under resultater, men er lagt ved under vedlegg kapittel. Vern nummerering beskrevet i resultater under figur 34 og 36 og de gir oversikt over vern topologi i anlegget. Hovedstrømskjema for Febdok-modeller er kun tenk som visualisering av hvordan modellen ser ut i Febdok.

## 6 DISKUSJON

### 6.1 Topologier i Mikronett

Undersøkelse til denne oppgaven startet med en litteraturstudiet for å etablere oversikt over eksisterende typer mikronett. Fordelingsnett typer i et mikronett ble undersøkt ytterligere. AC-, DC- og hybridmikronett er det mest vanlige topologiene brukt i mikronett installasjoner. Forskjell ligger i hvilken type spenning hovedsamleskinnen har, AC eller DC. Felles DC-bus gir mulighet å koble alle inverter-basert likespennings energikilder til samme punkt, også gjøre om DC til AC spenning ved behov. utfordringer med DC nett er begrenset utvalg av DC-kortslutningsvern på markedet. I en AC-mikronett trenger hver enkel DC-energikilder en DC/AC inverter. Det gir fleksibilitet både under planlegging av en ny mikronett installasjon og utvidelse av eksisterende AC-mikronett. Dagens fordelingsnett hos forbruker i Norge er hovedsakelig lavspennings AC-nett. Under prosjektering kan AC-mikronettet tilpasses allerede eksisterende fordelingsnett som en kunde allerede har. Eventuelt deles opp nyinstallasjon og knytte fordelinger til hver sin mindre mikronett. Ved eventuelt utvidelsesbehov kobles flere DER med DC/AC-inverter til AC-samleskinne uten større kostnader for utvidelse av fordelingsnettet. Under prosjektering av AC-mikronett må topologien velges mellom radial-, maske- eller ringnett. Valget må samsvare med lokale elektrotekniske krav til en lavspenningsinstallasjon. I Norge er det mest brukt radialnett og stjernenett og i teoridelen ble det tatt med noen eksempler på radial AC-mikronett. Campus Evenstad er et av de eksemplene.

#### *UPS /DER topologi*

I et vanlig elektrisk fordelingsnett energikilde representert som oppstrøms nett, mens i et nett-tilkoblet mikronett kommer energibidraget fra lokale DER i tillegg til oppstrøms nett. Utganger på inverter til en DER kobles parallelt til strømmnettet for å levere energi. Det gjelder både PV-invertere, vind-turbiner og V2G invertere. Unntaket er når online-UPS brukes som en energikilde, tilkobling er fortsatt parallell, men spenningen blir omformet fra AC til DC og igjen fra DC til AC i tilkoblingspunktet. For å forenkle modellering av en DER i et mikronett i normal drift, kan ekvivalentmodellen settes til å være en strømkilde og i parallell med hovedtilførsel. Under prosjektering i øydrift betrakter spenningsformende DER som en spenningskilde og variasjon av tilkoblingspunktene neglisjerer, samtidig som det åpnes mulighet for bruk av UPS-modell som en inverter-modell.

#### *Metodediskusjon*

Topologistudiet er første delmålet som gir fundament for videre undersøkelse av simulering i Febdok. Teorigrunnlaget for topologier ble funnet gjennom en litteraturstudiet med hovedsakelig Oria, som søkemotor for referanser. Søket foregår blant flere norske og utenlandske forskningsbibliotek og databaser for faglitteratur og akademiske tidsskrifter. Google scholar var også brukt i mindre grad. Noen søkeord ga like resultater i begge søkemotorer. Ulempen med å bruke Oria og Google scholar var antall resultater når søkeordet ikke var presis nok. For å finne konkret informasjon, for eksempel om kortslutningsstrømmer i AC-mikronett måtte søkeord består av flere formuleringer for å sortere vekk uaktuelle resultater.

Alternativet til å bruke søkemotorer var å søke i en forskningsdatabase. Hver enkel database inneholder begrenset antall kilder, derfor blir antall resultater per søk lavere og det gjør lettere å analysere dem. Litteraturstudiet som metode anses i denne undersøkelsen som pålitelig, siden resultater funnet underveis i studiet er hentet fra forskjellige kilder og definisjoner og beskrivelser av Mikronett, UPS og vekselrettere i disse kildene har lik beskrivelse og betydning. Det indikerer at det akademiske samfunnet er enig om definisjon til begrep som omhandler mikronett topologier. Det gir ytre validitet og resultater kan generaliseres uten å finne flere kilder som omhandler de samme problemstillinger. En svakhet med metoden som kan trekkes frem er personlig bias og kildekritikk. For eksempel, istedenfor å søke informasjon om delmål til problemstillingen, kan kilder undersøkes for informasjon som passer til formulering av problemstilling. Løsning på dette er å være kritisk til egne funn underveis i søkeprosessen.

## 6.2 Prosjektering av mikronett

I undersøkelsesfasen av denne oppgaven ble det etablert en oversikt over eksisterende typer mikronett. Et mikronett varierer i størrelse og kvalifiseringer. Mikronett prosjekteres etter egenskaper og parametere, som for eksempel bruksområdet, fordelingsnett, strømkilder og belastninger. Ut ifra størrelsen og bruksområde har det noe å si på egenskapene et mikronett har. Det benyttes fjernstyrte mikronett til å forsyne strømløse landsbyer, militæroperasjoner og industrielle prosjekter. Batteridrevet parallelt med nettdrevet mikronett av isolerte strømnnett, brukes til å forsyne; større- og mindre byer, universitet, campuser, sykehus, datasentre og mye mer. I Norge brukes mikronett mer som et forskningsprosjekt for å fremme fornybar energi med miljøvennlige løsninger, med lagringsteknikk basert på batteri og hydrogen. Eksempel på dette er Evenstad-, Byneset- Utcira-, Skagerak- og Brattøra- mikronett som er de største prosjektene i landet per dag.

For å prosjektere nåværende, men også framtidige mikronettinstallasjoner i Norge er det et behov for variasjon av nett-topologier, kilder og mulighet til å simulere de i nett- og øymodus, samtidig konstruere muligheter av en eksisterende installasjon med utbygging av mikronett. I samarbeid med norsk elektrisk komite som kan definere omfattende normer og forskrifter som innebærer sikker installasjon og drift for mikroinstallasjoner. Parallelt med elmarkedsdirektivet for rammene i drift og produksjon av selvforsynte mikronettanlegg i Norge. Programvaren må tillate simulering på bakgrunn av topologi, kortslutningsytelser i nettet, og anleggets funksjonalitet. Febdok har per i dag et godt utgangspunkt, med NEK 400 på bakhånd av prosjektering og dokumentasjon sammen med håndtering av enkle lavspentinstallasjoner av radialnett. En videreutvikling av programvaren er nødvendig for å kunne håndtere flere kilder og ulike topologimodeller av mikronett optimalt. Nelfo har batteri- og solcelleinstallasjoner på planen, men ikke begynt aktiv implementering av denne funksjonen.

Under prosjektering av installasjoner er det nødvendig med en god oversikt av anlegget. Eksempel på optimaliseringsmuligheter for et oversiktsbilde der man kan klikke inn på enkelttilfelle, åpne det i eget vindu eller zoomer mer inn på den når man jobber med prosjektering. Dette for å unngå å dele opp simuleringer av anlegget i flere deler. Tilrettelegging for komplekse installasjoner med flere komponenter samt større informasjonsinnhold. Med optimalisert utskriftsløsning av simuleringen med utvalg av utskrift for utvalgte antall fordelinger. Der løsning i Febdok per i dag tillater er en eller alle i Febdok.

Når modellen for et mikroanlegg er tegnet, vil det være nødvendig med å konkretisere verdier for den. I Febdok bes det om enkelte energi- og kortslutningsverdier på starten av prosjektering. Mens utforming for beskyttelse kan oppgis når modellen er på plass. For å kontrollere underveis om kabel, vern eller andre komponenter som installeres videre i anlegget ikke er motstridende med FEL og NEK. Febdok beregner kortslutningsytelse og legger opp for selektivitet med utløsningskurver for vern. For å kunne gå inn i vernregisteret og endre spesifikasjoner for vern med hensikt til å tilpasse justering for oppnåelse av selektivitet mellom to og to vern om gangen.

Den optimale programvaren har simuleringsmuligheter for å teste, optimalisere og validere forbedringer under trygge rammer, for å distribueres etter verifikasjon og med sikkerhet. Den må nødvendigvis ta for seg eller i det minste legge opp til ved prosjektering;

- dimensjonering av ledninger, skinner og vern
- beregningene for kortslutningsstrømmer med kontroll av utkoblingstid for vern
- selektivitetsanalyse for alle kurs, laster, samleskinner
- backup/kaskade beskyttelse mellom vern.

Samtidig ta høyde for samtlige beregninger i en installasjon;

- berøringspenninger og spenningsfall
- beregninger av UPS i både nett- og batteridrift

- generatorinstallasjoner
- primær eller sekundærsiden av skilletrafo

I tillegg er det en fordel dersom simuleringsprogrammet kan utarbeide nødvendig dokumentasjon av installasjonen underveis som anlegget prosjekteres.

I Febdok er det mulighet for å legge sammen bidrag fra invertere i parallell og konfigurere de i UPS modellen. Deretter tilpasse beregninger manuelt for DER og last siden det ikke er en del av simuleringen. Spesielt for prosjektering av mikronettinstallasjoner mangles løsninger for invertere med batterianlegg og DER som en del av installasjonen. I løsningsmodellen blir UPS bidraget sett på som en DER.

Det utviklet deriblant en rekke simuleringsprogrammer for hver energikilde i blant annet Europa og USA. HOMER(*Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources*) er en programvare for simulering og optimalisering av mikronett. Det er mulig å simulere mikronettinstallasjoner sammen med distribuerte energikilder. Programvaren er produsert av NREL (National Renewable Energy Laboratory) og videreutviklet av Homer Energy i USA. Den tar for seg følsomhetsanalyse som ifølge finansleksikon er en sensitivitetsanalyse for kontantstrøm og lønnsomhet i forhold til utgangspunktet for prosjektet. Det virker som en effektiv og løsningsorientert programvare dersom man skulle håndtere mikronettinstallasjoner. Dette programmet har ikke blitt testet ut av prosjektgruppen, men kun dannet grunnlag gjennom undersøkelse for brukervennlighet. Dersom prosjektgruppen tidlig kunne anse begrensningene for mikronettinstallasjoner i Febdok ville rapporten vinklet i en retning av mulige simuleringsprogrammer. Der resultatet ville ha blitt sammenlignet mellom simuleringsanalysene for hver programvare, med et kostnadsperspektiv i bakhånd. Det hadde vært mer effektivt med å finne løsningen for hele mikronettinstallasjonen sammen med alle laster, med større hensyn på feilanalyse.

#### Håndtering av feil i Febdok

Febdok tar kun for seg minimale og maksimale feiltilfeller for kortslutning og jordslutning.

Programmet foreslår løsninger til feiltilfeller som oppstår under feil dimensjonering, utelatt verdi eller inkompatible vern i nettet.

Vernbeskrivelse er hentet i fra masteroppgaven til Kjær W. og mangler spesifikasjoner for et vern. Det er i tillegg ikke funnet bryteevne for vernet. Dette opplyser Febdok og viser det som feil i hovedbilde. Dersom det ikke er oppnådd selektivitet mellom vern vil Febdok vise til verntabell. Selektivitet etter selektivitetstabeller dokumenteres og kontrollerer automatisk i Febdok ved bruk av vern fra ulike leverandører. Verdier for lengder og tverrsnitt til kabler brukt i simulering er tatt ifra William Kjær sin oppgave og viser til at Febdok oppdaget at kabeltverrsnitt i tabell 9 måtte økes for å få å unngå «for lite tverrsnitt» i feilmelding for modellen.

UPS i Febdok tar for seg modell for batteri, veksel- og likeretter. Der leverandørdata for vekselrettere og batteri kan legges inn og dermed konfigurere en UPS i Febdok. Programmet tillater ikke parallellkobling av UPS per i dag. I løsningsmodellen for simuleringen brukes Thevenin ekvivalent for sammenlagte kilder for å legge sammen flere UPS i parallell. Med seks vekselrettere som er koblet parallelt parvis på installasjonen i anleggskjema på Campus Evenstad. Optimal UPS topologi burde tillatt parallelle koblinger for batteri og vekselrette konfigureringer for å unngå avvik i verdiene. Samtidig kunne simulert UPS som invertere hver for seg. I større anlegg med flere batteri eller invertere i parallell enn tillatt innganger for UPS. Febdok tar ikke hensyn til dynamisk oppførsel av invertere og respons av utgangene. Bidrag og utganger for likerettersiden er ikke simulert da programmet kun simuleres i AC. Beregninger av topolet kortslutning med samtidig jordfeil utføres ikke i Febdok. Det resulterer til at høyeste kortslutnings- og støtstrømmen tilfeller ikke blir beregnet.



I denne rapporten er målingene for verdiene av energi og kortslutning som legges for beregningsgrunnlag i Febdok hentet fra Evenstad i både simuleringen av Johansson, og målingene Kjær brukte i oppgaven. I normaldrift for løsningsmodellen av simulering benyttes oppstrømsverdiene fra Johansson sine målinger/verdier fra risikovurderingen. Verdiene i rapporten varierer fra kortslutningsverdiene fra oppgaven til Kjær. Selv om vern oppfører seg likt.

Prosjektgruppen har ikke synliggjort eller redegjort for målingene og kun lånt for prosjekteringsformål. Det kan derfor settes spørsmål til måling reliabilitet, men som neglisjeres i rapporten. Dermed er det gjort forenklinger i beregningsmetoden på bakgrunn av målingene. Kortslutningsverdiene beregnes så av Febdok ved å oppgi «lånte» verdier. Kortslutningsberegningene er like bra som de oppgitte verdiene i Febdok. Det blir nevnt i veiledning for kortslutningsstrømmer Ik av Nelfo om usikkerhet mellom målte og beregnende kortslutningsverdier. Der det blir konkludert med at målingene kan foretrekkes i installasjoner med lav kortslutningsytelse. Dersom prosjektgruppen hadde fått gjennomført målinger av kortslutningsytelsen i anlegget hadde rapporten vinklet mot reliabilitet av målinger mot beregningsverdiene sammen med feiltilstander og avvik.

## 6.3 Diskusjon av funn og resultat

Under

### *Feilscenarier*

På Campus Evenstad mikronett installasjon, kabler vernet med et vern og vernet plassert i starten av en fordelingstilførsel. Vernet skal detektere feil langs hele kabellengde til neste nedstrøms vern. For å analysere feiltilfeller funnet i resultat kapittel er det kun nødvendig med største tre-fase kortslutningsstrøm på ende av tilførselen (Ik 3p maks ende) og den minste kortslutningsstrøm på enden av tilførselen (Ik 2p min). Rastrende verdier for feiltilfeller fremvist i tabell 10 ble ikke tatt med som vedlegg, de gir ingen hensiktsmessig informasjon om utkoblingstider for vern under feil. Feiltilfeller ble funnet ved å analysere driftssikkerhet til MG1 og MG2 installasjoner. Analysen baserer seg på erfaring, kunnskap og forståelse av elektrotekniske normer.

Metode for å bestemme feiltilfeller er et av stegene under prosjektering av et elektrisk anlegg. Underveis i prosjektering er det grunnleggende å bestemme feiltilfeller og finne vern løsning for dem. Begrensning i metode er kunnskapsnivå til den som utfører analysen. Beregningsverktøy som Febdok kan være et hjelpeverktøy i dette tilfelle, den beregner de verste feiltilfeller og varsler når deler av anlegget ikke holder sikkerhetskrav fra forskriftene.

### *Parallele kilder*

For å bruke UPS-modell som en vekselretter i parallell i Febdok, krever den verdier for ytelse, kortslutningsstrømmer og tider for varighet av dem legges inn i modellen, for å simulere bidraget fra flere invertere i parallell legges kortslutningsstrøm fra de aktuelle invertere sammen. For vekselretter med forskjellige varighet på kortslutningsstrøm gjøres det en forenkling og den korteste tiden brukes for ekvivalent. En slik metode er en forenkling i kretsteori. En vekselretter er en kraftelektronikk krets, der strømmen bestemmes av hastighet på switching og effekt til DC-kilde. Mens spenning-impedans ekvivalent tar ingen hensyn til DC-krets under feiltilstand og hvordan sinuskurven forandrer seg rett etter en kortslutning har oppstått.

Den alternative simuleringen utført av W. Kjær i Simulink bruker 2-L VSC modell der både transistorer og DC-kildespenning påvirker modellen. Samtidig i oppgaven påpekes det at DC-side har en begrenset påvirkning på kortslutningsstrømmer i en slik modell. Dette er en svakhet i begge metodene nevnt over når DC-side del av vekselretter neglisjeres eller forenkles betydelig under AC-kortslutning. Spesielt med hensyn på første titalls millisekunder av kortslutning.

### *Kortslutningsberegninger*

Diskusjon delen om utkoblingstider, størrelser på kortslutningsstrømmer og selektivitet mellom vern i MG1 deles opp i normal- og øydrift. Under normaldrift er verdier for kortslutningsstrømmer ( $I_k$ ) som går

gjennom alle effektbrytere og vern i modellen er høyere enn minste kortslutningsstrøm vernet klarer å koble ut magnetisk ( $I_m$ ), det vises i Tabell 11 kolonne 3. I dette tilfellet skal verne koble ut momentant. Beregnet utkoblingstider ligger under 50 ms. Med tanke på grunnleggende beskyttelses prinsipp, skal vernet koble ut før kabel begynner å ta skade. For normal drift er den tiden ( $t_{kabel}$ ) flere ganger lengre enn utkoblingstiden til vernet. Alle vern under normaldrift kobler ut rask nok. Verdiene for kortslutningsstrømmer og utkoblingstider i resultatet fra W. Kjær sin masteroppgave varierer fra resultater i denne oppgaven, men beskyttelse for alle kurser blir oppfylt. Det er kun vern XQ029 for V2G installasjon kobler ikke ut når den leverer strøm til nettet. Men anti-øymodus vern skal kobler ut vekselretter i slik tilfelle.

I denne oppgaven var kortslutningsbidraget til V2G tatt med under øymodus beregninger, men kursen XQ029 var ikke simulert i modellen, siden den har en oppførsel tilsvarende lik CHP inverter, kun annerledes kortslutningsytelser. I feilpunktet på tilførselskabel til V2G eller CHP inverter, må både foranliggende og inverter vern koble ut, slik at effektflyt fra begge sider i tilførselskabel blir stoppet. Da er det Anti-øymodus vern som gjør denne jobben i en vekselretter.

I øymodus er det flere effektbrytere som har for høy magnetisk utkoblingsstrøm og de kobler ut på overlast flere hundre sekunder etter en kortslutning har skjedd. Som resultat i beregningen i Febdok, fører kortslutninger på hoved samleskinne (SSK005), CHP-fordeling (SSK006) og essensielle laster (SSK015) fører til utkobling av vern på BB1 og MG1 mister spenning. Kun feil i UPS fordeling og forbrukerkurser for Essentials laster blir utkoblet, mens resten av MG1 driftes som normalt. W. Kjær kommer til den samme konklusjon i tilsvarende feil tilfeller i sin oppgave. Verdier for kortslutninger i øydrift i begge simuleringer har liten avvik, mens utkoblingstider avviker med flere titalls sekunder. Men den tiden er relevant, med en gang verdien passerer utkoblingstider for vern innebygget i vekselretter. Mulig grunn for utkoblingstider kan være vern-modell forskjeller. Febdok bruker vern med data levert av produsent, mens i Simulink brukeren bygger egen modell for vern og legger inn parametere selv.

Det er to par med vern XQ030 – XQ005 og XQ024 – XQ005 som har ikke selektivitet mellom dem i MG1. under normaldrift i MG1 installasjon er det oppnådd delvis selektivitet og det krever nærmere analyse av strøm/tid kurver og gjennomsluppet strøm for hvert vern. Vern som står under kolonne «Bestemmende vern» i tabeller 37-40 forteller hvilket av vern-paret Febdok beregner til å være avgjørende. I sin helhet har vern på anlegget tilfredsstillende selektivitet, men noen av feiltilfeller kan føre til utkobling av hele MG1 frem for kun den delen der feil er. Under øydrift er det kun selektivitet i UPS fordeling og på forbruker kurser (16 amper) i andre fordelinger. For vern par XQ030 – XQ005 og XQ024 – XQ005 er det ikke selektivitet mellom dem i MG1. Tilsvarende konklusjon gjør også W. Kjær ut ifra sin modell. For normaldrift selektivitetsverdier variere betydelig mellom disse to modellene, grunnet er forskjellige verdier fra kortslutningsberegninger. For Øydrift derimot er det like kortslutningsverdier både i Febdok og Simulink beregninger. Liten variasjon kan forklares med likhet i impedans i prosjektert installasjon og lik BB1 kortslutning ytelse som var oppgitt av leverandøren til den. Siden invertere har lave kortslutningsstrømmer sammenlignet med vanlig fordelingsnett, er det vanskelig å finne vern med så presise selektivitetskurver hvor  $I_4 - I_5$  strømverdier for magnetisk utkobling varierer gradvis med titalls amper.

Beregningsmetoder som er diskutert i avsnitt over baserer ut ifra forskjellige beregningsmodeller, som begge bruker lik data for vern og strøm. Fordelen med å simulere i Simulink er at modellen kan bygges som en elektrisk eller elektronisk krets, styrekretsen kan legges inn og komponentenes egenskaper defineres av brukeren. Dette gir mulighet til å lage en modell som gir mer nøyaktige resultater enn en modell i Febdok vil kunne gi. På sin side er Febdok et mer brukervennlig verktøy. Vern, kabler og UPS er lagrede komponenter i programmet og brukeren trenger kun å sette dem sammen for å oppnå et resultat. Det er ikke nødvendig med dybdekunnskap om PWM- og kontrolltekniker for en inverter.

## 7 KONKLUSJON

*Tittel:* Modellering av radiale mikronett i Febdok med UPS-vekselretter som distribuert energikilde

*Problemstilling:* «Undersøke modellering av mikronettinstallasjoner med vekselrettere for nett- og batteridrift ved hjelp av dimensjoneringsverktøy i Febdok.»

Prosjekteringsmetode av større mikronettinstallasjoner krever programvare som støtter installasjoner med flere strømkilder og tillater oppsett av forskjellige topologier. Tiltros for at radial AC-fordelingsnett er den mest brukte installasjonsmetoden i lavspente fordelingsnett i Norge per i dag, kan nye mikronett prosjekteres både som hybrid eller DC-nett og være ringformet.

I Febdok er det kun mulig å sette opp radial AC topologi, dette er den største begrensningen med verktøyet og gruppen har ikke funnet en løsning for det. I rapporten var det gitt et eksempel på AC-radial mikronett med batteribank, campus Evenstad MG2. Ved å bruke UPS-modell i Febdok som en DER, kunne installasjon simuleres både som normal og øydrift modell, det var ikke nødvendig med tilpasning av oppsettet. Et større mikronett tilsvarende MG1 på Campus Evenstad gir utfordringer med flere parallell strømkilder og stjerneformet nett. UPS-modell i Febdok ble ytterligere brukt for å simulere parallell strømkilder i modeller for MG1. Egenskapene til vekselretter-baserte kilder som kortslutningsytelser og varighetstid for kortslutningsstrøm måtte omgjøres til en ekvivalent, deretter bruke ekvivalent data i UPS-modellen. Denne løsningen er nødvendig siden Febdok ikke tillater å ha energikilder etter en UPS i modellen. Simulering av DC og hybrid mikronett lar seg ikke gjøre i Febdok.

Fordelen med å prosjektere en mikronettinstallasjon i Febdok er at beregninger av feilstrømmer, spenningsfall, vern og kabel sine tåleevner av gjennomsluppet energi utføres på bakgrunn av NEK400, FEL og flere IEC-standarder. Resultatet av en beregning i Febdok kan brukes som dokumentasjon for å bekrefte at sikkerhetskrav for elektrisk installasjon er ivarettatt. I normal driftsmodus under feiltilstand på installasjon kommer hoved kortslutningsbidraget fra oppstrømsnettet, det disse verdiene vern blir demisjonert for. Simuleringsresultater viser at under normal drift tilfredsstiller alle vern utkoblingstider og selektiviteter dem imellom. Utkoblingen skjer kun på den delen av anlegget som har feil. Bidrag fra DER kan neglisjeres under normal drift hvis det er under 5% av den totale kortslutningsstrømmen. I øydriftsmodus under feiltilstand kommer mesteparten av kortslutningsbidraget fra batteribank og generator, denne verdien er mye lavere enn bidrag fra oppstrømsnett. Resultater fra Febdok beregninger viser at flere effektbrytere ikke kobler ut tidsnok under flere kortslutningsscenarioer. Innebygget vern i vekselrettere i batteribank og generator må koble ut for at kraftelektronikken ikke skal havarere. Anlegget mister redundans mellom vern siden det er tilnærmet ingen selektivitet mellom effektbrytere og vern i vekselrettere. Når feil oppstår kun i den ene delen av installasjon, kan det føre til at hele mikronettet 1 (MG1) miste spenning og krever gjeninnkobling. Resultat av kortslutningsberegninger og selektivitet i denne rapporten samsvarer med resultater av en tidligere masteroppgave om mikronett campus Evenstad, men i denne rapporten påpekes også at prosjekterende uttrykker at anlegget er driftssikkert under øydrift.

På bakgrunn av simulering av en mikronett installasjon utført i denne oppgaven er det flere funksjoner gruppen savnet i programmet Febdok. Det å ha mulighet til å legge inn egendefinerte vern i modell for å simulere vern til vekselretter i en DER. Oppdatere vern registeret, fordi at noen vern mangler informasjon. Mulighet for å sette opp flere vekselretter-baserte energikilder i parallell på en UPS-kurs. Mulighet for utskrift av resultater for både normal og øydrift fra en UPS-kurs, slik at det er ikke nødvendig å lage egen kurs for å simulere normaldrift. DC-feil problematik i en vekselretter og kraftelektronikk beregninger på AC-side er ikke mulig å simulere i Febdok i dag, men det kunne gitt en bedre beskrivelse av feilstrømmens oppførsel. Disse forslagene kan gjøre oppsett av mikronett enklere, samtidig som installasjoner av høyere kompleksitet kan simuleres i Febdok.

## 7.1 VIDERE ARBEID

På bakgrunn av funn i rapporten og konklusjon ble det utarbeidet temaer og problemstillinger for fremtidige oppgaver om mikronett på campus Evenstad. Det er planlagt flere utvidelser både med energikilder og sentralisert styring, som kan være aktuelt for videre undersøkelser. Forslag kommer under:

- Tilpasning av vern i Febdok med hensyn på simulering av DER som UPS.
- Hvordan påvirker kraftelektronikk i lokal kraftproduksjon kortslutningsstrømmer i el-anlegg?
- Avdekke evt. vesentlige svakheter i eksisterende metoder for beregning av bidrag til kortslutningsstrømmer fra kraftelektronikk i mikroanlegg.
- Evt. foreslå forbedringer beregning av kortslutningsstrømmer fra kraftelektronikk.
- Redegjøre for eksisterende modeller for beregning av kortslutningsstrømmer fra kraftelektronikk. (Må ha tilgang på målinger/verdier for modeller)
- Redegjøre for evt. bedre beregningsmetode for beregning av kortslutningsstrømmer fra kraftelektronikk.
- Synliggjøre størrelse på avvik mellom eksisterende beregningsmetoder og evt. forbedringer.
- Sammenligne beregninger fra etablert programvare for beregning av kortslutningsstrømmer med målinger fra faktiske invertere brukt i dag

# BEGREPSLISTE

## A

AC1 og AC2 er inn- og utganger på batteribankene

## B

Belastningsstrøm- In

BB1 og BB2 -batteribank 1 og 2

## C

c-faktor – Spenningsfaktor for beregninger av maksimal og minimal feilstrøm i henhold til NEK IEC 60909-0:2016

CHP-(Combined heat and Power)Kraftvarme

## D

DER- distribuerte energikilder

## E

Effektfaktor  $\cos \varphi$  er forholdet mellom P, aktiv effekt [W] og S, tilsynelatende effekt [VA]

## F

Febdok- program for dimensjonering av elektriske installasjoner

FEB91 – Forskrifter for elektriske bygningsinstallasjoner m.m. 1.1.1991

FEL- Forskrifter for elektriske lavspenningsanlegg

FEF- Forskrift om elektriske forsyningsanlegg

Frekvens- gjentakelse av periodisk (T) fenomen per tidsenhet  $f=1/T$

Feilstrømmen som flyter gjennom jordingsanlegget til utstyrets utsatte deler i lavspenningsinstallasjoner ved den første feiler i dette (Tabell 44A)- Id [A]

## H

Høy servicebryterevnet - Icu

## K

Kabelens strømføringsevne- Iz

Kilo-[k] 1000

Korreksjonsfaktor-  $K_{\theta}$  ( $\rho_{20-70^{\circ}\text{C}} = 1,2$  (1,25 ifølge NEK 400:2018 )

Kortslutningsimpedans Zk0

## L

Lav servicebryterevnet – Ics

## M

Merkekorttidsstrøm Icw

MG1 og MG2- ,mikronett 1 og 2

Mikronett – Uavhengig og pålitelig energiinstallasjon

Millisekund-[ms]

## N

NEK – Norsk elektroteknisk Komite

Nelfo- Landsforening i NHO-organiserer elektro ekom heisbedriftene og systemintegratorer

## P

PEN- *Protective Earth Neutral*

## R

Reaktans- X

Referanseinstallasjonsmetode

Resistans- R

Respektive kortslutningsstrømmen- Ik (min/max) i [kA]

## S

Samtidighetsfaktor- sannsynligh for at alle komponenter/enheter er koblet samtidig  
Sammenlagret strøm-forbrukerkurenes belastning summeres med hensyn på samtidighetsfaktor  
Spenningsfall-  $\Delta u$  [V] spenningen over komponent med strøm gjennom  
*Statisk switch-statisk vender som kan koble om to forskjellige spenningskilder ved feil eller brudd*  
Strøm- Amper [A]

Systemspenning- nominellspenning  $U_n$

## **U**

UPS Uninterruptible Power Supply (Avbruddsfri strømforsyning)

## **V**

V2G-bilbatteri

Vernets kortslutningsytelse-  $I_c$

Vernets nominelle bryteevne  $I_{cn}$  (NEK EN 60898, usakkyndig betjening)

Vernets servicebryteevne-  $I_{cs}$

Vernets maksimal/ultimate bryteevne  $I_{cu}$  (NEK EN 60947, sakkyndig betjening)

## **W**

Watt-[W]

## TABELL LISTE:

|   |    |
|---|----|
| Tabell 1 Liste over modeller for simulering av mikronett på Campus evenstad .....   | 40 |
| Tabell 2 Kortslutningsscenarier som simuleres og undersøkes i Mikronettinstallasjon på Evenstad .....                       | 40 |
| Tabell 3 Belastninger på Campus Evenstad brukt i Febdok modellen .....  | 44 |
| Tabell 4 Ytelse til batteribanker og antall inverttere per batteribank på Campus Evenstad installasjon.....                 | 44 |
| Tabell 5 Egenskaper til Victron Quattro vekselretter/lader.....   | 44 |
| Tabell 6 Kortslutningsstrøm UPS-ekvivalent for parallelle kilder.....   | 45 |
| Tabell 7 Vern data oppgitt for campus Evenstad.....   | 45 |
| Tabell 8 Kabellengder i MG1 .....   | 46 |
| Tabell 9 Kabler med økt tverrsnitt i forhold referanser i kilder .....  | 46 |
| Tabell 10 Typer kortslutningsstrømmer Febdok beregner .....   | 47 |
| Tabell 11 Aktuelle resultater for kortslutningsstrømmer og utkoblingstid for vern i MG1 normaldrift .....                   | 48 |
| Tabell 12 Resultater for kortslutningsstrømmer og utkoblingstid for vern i MG1 øydrift (BB1+CHP+V2G)                        | 51 |
| Tabell 13 Resultater for kortslutningsstrømmer og utkoblingstid for vern i MG1 øydrift kun BB1 .....                        | 53 |
| Tabell 14 Aktuelle resultater for kortslutningsstrømmer og utkoblingstid for vern i MG2 øydrift .....                       | 84 |
| Tabell 15 Resultater fra kortslutningsberegninger og utkoblingstider fra W. Kjær sin modell for mikronett på Evenstad ..... | 86 |

## FIGUR LISTE:

|   |    |
|---|----|
| Figur 1 Markedsanalyse for mikronett av Peter Asmus, for Navigant Research .....  | 2  |
| Figur 2 IT-system med gjennomslagsvern(dineuter) hentet fra fordelingsystemer i montørhåndboken for NEK 400:2018 .....      | 7  |
| Figur 3 TT-system hentet fra fordelingsystemer i montørhåndboken for NEK 400:2018.....                                      | 8  |
| Figur 4 TN-S-system med nøytralleder hentet fra fordelingsystemer i montørhåndboken for NEK 400:2018 .....                  | 9  |
| Figur 5 TN-C-S-system hentet fra fordelingsystemer i montørhåndboken for NEK 400:2018.....                                  | 10 |
| Figur 6 Prinsippskisse tid/strøm for innstillinger av elektroniske tidsforsinket vern i FebDok under dialogen «Hjelp» ..... | 12 |
| Figur 7: Eksempel på Innstillinger av elektroniske vern i FebDok under dialogen «Hjelp» .....                               | 13 |
| Figur 8 Eksempel på Innstillinger av elektroniske vern i FebDok under dialogen «Hjelp» .....                                | 13 |
| Figur 9 Et eksempel for selektivetsanalyse i Febdok fra kursdialogen "Selektivitet" .....                                   | 14 |
| Figur 10 Eksempel på en AC mikronett topologi.....  | 18 |
| Figur 11 Prinsipp for Droop kontroll .....  | 19 |
| Figur 12 Prinsipp for radiale fordelingsnett med avbildet feil på nettet.....   | 20 |
| Figur 13 Lavspennings fordelingsnett topologier .....   | 22 |
| Figur 14 Eksempel på DC mikronett koblet i serie (a) og parallelt (b) .....   | 23 |
| Figur 15 DC-mikronett ringformet .....  | 24 |
| Figur 16 DC-mikronett som Mesh-nettverk .....   | 24 |
| Figur 17 Flere typer hybrid mikronett.....  | 24 |
| Figur 18 SST mikronett topologi eksempel .....  | 25 |
| Figur 19 Batteribank utganger i en omformer for parallell tilkobling til nettet.....  | 26 |
| Figur 20 Enlinjeskjema til en online UPS.....   | 26 |
| Figur 21 Enlinjeskjema for en-fase inverter .....   | 27 |
| Figur 22 Enlinjeskjema for tre-fase inverter .....  | 27 |
| Figur 23 Enlinjeskjema for tre-fase inverter med N-leder .....  | 27 |
| Figur 24 Enlinjeskjema for nettfølgende og nett formende omformer .....   | 27 |
| Figur 25 Modell av en DER med virtuell impedans kontroll .....  | 28 |
| Figur 26 Steg en og to i Thevenin ekvivalent utregning.....   | 29 |
| Figur 27 Skjema for to kilder i parallell .....   | 30 |
| Figur 28 Flere parallelle kilder forsyner en BUS med kortslutning .....   | 30 |
| Figur 29 Typer kortslutninger i en tre-fase fordelingsnett.....   | 31 |
| Figur 30 V-tilkobling av to vekselrettere i tre-fasenett.....   | 31 |
| Figur 31 Oversikt over mikronett-installasjon på Campus Evenstad .....  | 32 |
| Figur 32 Konfigurasjon av en UPS-utgang, ingen vern etter utgangen.....   | 35 |
| Figur 33 Ferdigstilt modell av mikronett installasjon i Febdok på campus Evenstad .....                                     | 39 |
| Figur 34 MG1 en-linjeskjema med nummerert feil tilfeller .....  | 42 |
| Figur 35 Utfordring med å simulere vern på AC-utgang i UPS.....   | 43 |
| Figur 36 MG2 en-linjeskjema med avbildet kortslutninger .....   | 43 |
| Figur 37 Kabellengder og tverrsnitt i MG1 en-linje skjema .....   | 46 |
| Figur 38 MG1 i normaldrift Selektivetsresultater for kortslutning nr1 .....   | 49 |
| Figur 39 MG1 i normaldrift Selektivetsresultater for kortslutning nr2 .....   | 49 |
| Figur 40 MG1 i normaldrift Selektivetsresultater for kortslutning nr3 .....   | 50 |
| Figur 41 MG1 i normaldrift Selektivetsresultater for kortslutning nr4 .....   | 50 |
| Figur 42 Vern XQ025 mangler data om bryteevne for aktuell spenning. ....  | 51 |
| Figur 43 MG1 i øydrift (BB1+CHP+V2G) vern XQ005 bryteevne for kortslutningsscenarioet 5 .....                               | 52 |
| Figur 44MG1 i øydrift (BB1+CHP+V2G) Selektivetsresultater for kortslutningsscenarioet 7 .....                               | 52 |
| Figur 45 MG1 i øydrift (BB1+CHP+V2G) Selektivetsresultater for kortslutningsscenarioet 8 .....                              | 53 |
| Figur 46 MG1 i øydrift (BB1) vern XQ005 bryteevne for kortslutningsscenarioet 5.....  | 54 |
| Figur 47 MG1 i øydrift (BB1) Selektivetsresultater for kortslutningsscenarioet 6.....                                       | 54 |



|  |    |
|--|----|
| Figur 48 MG1 i øydrift (BB1) Selektivitetsresultater for kortslutningsscenariet 7.....                         | 55 |
| Figur 49 MG1 i øydrift (BB1) Selektivitetsresultater for kortslutningsscenariet 8.....                         | 55 |
| Figur 50 MG1 i øydrift (CHP som UPS) vern XQ054 bryteevne for å koble ifra CHP kortslutningsscenariet 9 .....  | 56 |
| Figur 51 Febdok Evenstad modell av MG1 normaldrift, med AC2 som egen fordeling.....                            | 75 |
| Figur 52 Febdok Evenstad modell av MG1 normaldrift kun AC1-utgang del 1.....                                   | 76 |
| Figur 53 Febdok Evenstad modell av MG1 normaldrift kun AC1-utgang del 2.....                                   | 77 |
| Figur 54 Febdok Evenstad modell av MG1 normaldrift kun AC1-utgang forbrukerkurser for essensielle laster ..... | 77 |
| Figur 55 Febdok Evenstad modell MG1 øydrift, parallelle kilder slått sammen (UPS + CHP+V2G) del 1 .....        | 78 |
| Figur 56 Febdok Evenstad modell MG1 øydrift, parallelle kilder slått sammen (UPS + CHP+V2G) del 2 .....        | 79 |
| Figur 57 Febdok Evenstad modell MG1 øydrift, parallelle kilder forbrukerkurser for essensielle laster .....    | 79 |
| Figur 58 Febdok Evenstad modell for MG1 øydrift, kun BB1 bidrag som UPS del 1.....                             | 80 |
| Figur 59 Febdok Evenstad modell for MG1 øydrift, kun BB1 bidrag som UPS del 2.....                             | 81 |
| Figur 60 Febdok Evenstad modell for MG1 øydrift, kun BB1 bidrag forbrukerkurser for essensielle laster         | 81 |
| Figur 61 Febdok Evenstad MG2 modell i øydrift.....   | 82 |
| Figur 62 Febdok Evenstad MG2 modell i øydrift essensielle laster .....   | 83 |
| Figur 63 MG 2 Selektivitetsresultater i øydrift kurs XF155_1 .....   | 84 |
| Figur 64 Kortslutningsstrøm målinger på SSK005 samleskinne i hovedfordeling.....                               | 87 |

# LITTERATURLISTE

- A. RAHMAN, H., MAJID, M. S., REZAEI JORDEHI, A., CHIN KIM, G., HASSAN, M. Y. & O. FADHL, S. 2015. Operation and control strategies of integrated distributed energy resources: A review. *Renewable & sustainable energy reviews*, 51, 1412-1420.
- ABB. 2016. Selektivitet i lavspenningsinstallasjoner. *Selektivitet i lavspenningsinstallasjoner. Generellt om selektivitet Spesielle utfordringer Dagens løsninger Fremtidens løsning?* [Online]. Available: <https://docplayer.me/4300390-Selektivitet-i-lavspenningsinstallasjoner-generellt-om-selektivitet-spesielle-utfordringer-dagens-losninger-fremtidens-losning.html> [Accessed 24.04.2022].
- AHMED, M., MEEGAHAPOLA, L., VAHIDNIA, A. & DATTA, M. 2020. Stability and Control Aspects of Microgrid Architectures-A Comprehensive Review. *IEEE access*, 8, 144730-144766.
- AS, S. C. C. S. 2021. FDV - Batterianlegg Campus Evenstad  
Del 6 - Risikovurdering iht. FEL og FoL.
- CATLOW, A. 2021. *How Much Electricity Can I Generate with Solar Panels?* [Online]. Available: <https://www.theecoexperts.co.uk/solar-panels/how-much-electricity> [Accessed 11 april 2022].
- CHEGG.COM. 2022. *Single-phase Grid-connected converter* [Online]. Available: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/single-phase-bi-directional-grid-connected-voltage-source-converter-shown-fig-1-draw-simpl-q31073145> [Accessed 26 april 2022].
- COWI. 2020. *VIL DET GRØNNE SKIFTET SPRENGE STRØMNETTET VÅRT?* [Online]. Available: <https://www.cowi.no/om-cowi/nyheter-og-presse/vil-det-gronne-skiftet-spreng-stromnett-et-vart> [Accessed 10.02 2022].
- DUUS, H., FOSSO, O. B. & MOLINAS, M. 2015. An Integrated Tool for Microgrid Design in Rural Areas. NTNU.
- ECOINSIDE. 2021. *Evenstad perfekt for energiopplæring* [Online]. Available: <http://ecoinside.nu/evenstad-perfekt-for-energiopplaering/> [Accessed 24 april 2022].
- FUSEN. 2018. *Forventet levetid for solcellepaneler* [Online]. Available: <https://blogg.fusen.no/alle/forventet-levetid-solcellepaneler> [Accessed 11 april 2022].
- GUERRERO, J. M., LUIS GARCIA DE, V., MATAS, J., CASTILLA, M. & MIRET, J. 2005. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control. *IEEE transactions on industrial electronics (1982)*, 52, 1126-1135.
- GÖTHNER, F. 2019. *Microgrids: What are they, virtual impedance and a control concept for inverters in islanded microgrids* [Online]. Available: <https://blog.sintef.com/sintefenergy/electric-power-components/microgrids-what-are-they-virtual-impedance-and-a-control-concept-for-inverters-in-islanded-microgrids/> [Accessed 24 april 2022].
- HANSEN, E. H. 2010. *Elektroinstallasjoner*, Classical forlag AS.
- HIVEPOWER. 2021. *The Rise of Microgrids in Developing Countries*. [Online]. Available: <https://www.hivepower.tech/blog/the-rise-of-microgrids-in-developing-countries> [Accessed 10 mai 2022].
- IEC, N. 2017. 62898-1:2017 Microgrids PArt 1: Guidelines for microgrid projects planing and specification. Geneva, Switzerland: IEC.
- IEC\_60909-0 2016. NEK 60909-0 Kortslutningberegninger. *Del 0 Beregninger av strømmer*. Geneve: IEC.
- IEC\_62898\_1 2017. Microgrids. 4. *General principles*.
- J. E. ORMBOSTAD, K. M. H. 2018. *Normguiden NEK 400:2018*, Oslo, Elforlaget.
- KANSAGARA, R. 2018. *Introduction to Different Types of Inverters* [Online]. Available: <https://circuitdigest.com/tutorial/different-types-of-inverters> [Accessed 26 april 2022].
- KJÆR, W. & HØIDALEN, H. K. 2020. Assessing the Microgrid at Campus Evenstad. NTNU.
- KLIMAPARTNERE. 2020. *GRØNNE TILSKUDD- OG STØTTEORDNINGER* [Online]. Available: <https://klimapartnerne.no/gronne-tilskudd-og-stotteordninger/> [Accessed 24 april 2022].

- KNOWLEDGE, M. 2018. *What's Driving Microgrids toward a \$30.9B Market?* [Online]. [Accessed 10 mai 2022].
- KROPOSKI, J. K. A. B. 2010. Understanding Fault Characteristics of Inverter-Based Distributed Energy Resources. 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393. National Renewable Energy Laboratory.
- KUMAR, D., ZARE, F. & GHOSH, A. 2017. DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects. *IEEE access*, 5, 12230-12256.
- KUMAR, S., ISLAM, S. M. & JOLFAEI, A. 2019. Microgrid communications - protocols and standards.
- LI, C. A. C., SANJAY K. AND VASQUEZ, JUAN C. AND GUERRERO, JOSEP M. 2014. Power flow analysis algorithm for islanded LV microgrids including distributed generator units with droop control and virtual impedance loop. *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, 3181-3185.
- LI, Y. A. Z. S. A. Q. X. A. G., JOSEP M. 2016. Droop control with an adjustable complex virtual impedance loop based on cloud model theory. *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 3223-3228.
- LILLEBO, M. 2020. *Definisjon av mikronett* [Online]. Available: <https://snl.no/mikronett> [Accessed 08. april 2022].
- LOTFI, H. & KHODAEI, A. 2017. AC Versus DC Microgrid Planning. *IEEE transactions on smart grid*, 8, 296-304, 297.
- MAHDAVI TABATABAEI, N., KABALCI, E. & BIZON, N. 2020. *Microgrid Architectures, Control and Protection Methods*. 1st 2020. ed. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer.
- MÜLLER, C. M., SAND, S. E., FOSSO, O. B. & LIEN, K. M. 2021. A study of microgrids in Norway. NTNU.
- NEK400:2018 2018a. Elektriske lavspenningsinstallasjoner. NEK.
- NEK400:2018 2018b. Elektriske lavspenningsinstallasjoner. NEK.
- NEK400:2018 2018c. Elektriske lavspenningsinstallasjoner. NEK.
- NEK 2018. *NEK 400*, Norsk elktroteknisk komite.
- NELFO 1998. FEL Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg med viledning. Oslo.
- NELFO 2022a. Febdok Help. 6.0.223 ed.
- NELFO. 2022b. *Introduksjon til Febdok* [Online]. Available: <https://www.nelfo.no/produkter-tjenester/programvare/febdok/om/> [Accessed].
- NELFO. 2022c. *Unikt og effektivt verktøy* [Online]. Available: <https://www.nelfo.no/artikler/2021/febdok--et-effektivt-hjelpemiddel/> [Accessed 10 mai 2022].
- NORCONSULT. 2019. *Verdens første energipositive bade- og idrettsanlegg* [Online]. Available: <https://www.mynewsdesk.com/no/norconsult/pressreleases/verdens-foerste-energipositive-bade-og-idrettsanlegg-2951791> [Accessed 03.04 2022].
- NVE. 2022. *Lover og regler* [Online]. Available: <https://www.nve.no/konsesjon/konsesjonsbehandling-av-solkraft/lover-og-regler/#:~:text=Det%20fremgår%20av%20energiloven%20§,drives%20uten%20konsesjon%20ette%20energiloven> [Accessed 10 mai 2022].
- ORMBOSTAD, J. E. & ELEKTROINSTALLATØRERNES, L. 2010. *Montørhåndboka : NEK 400:2010*, Oslo, Elforl. : ELFO.
- PATRAO, I., FIGUERES, E., GARCERÁ, G. & GONZÁLEZ-MEDINA, R. 2015. Microgrid architectures for low voltage distributed generation. *Renewable & sustainable energy reviews*, 43, 415-424.
- RAHMANI-ANDEBILI, M. 2021. *Design, Control, and Operation of Microgrids in Smart Grids*. 1st 2021. ed. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer.
- RAY, P. K., MOHANTY, S. R. & KISHOR, N. 2011. Disturbance detection in grid-connected distributed generation system using wavelet and S-transform. *Electric power systems research*, 81, 805-819.
- REGJERINGEN 2006. St.meld nr. 11, Om støtteordningen for elektrisitetsproduksjon fra fornybare energikilder (fornybar elektrisitet). *In: ENERGIDEPARTEMENT, O.-O. (ed.)*.

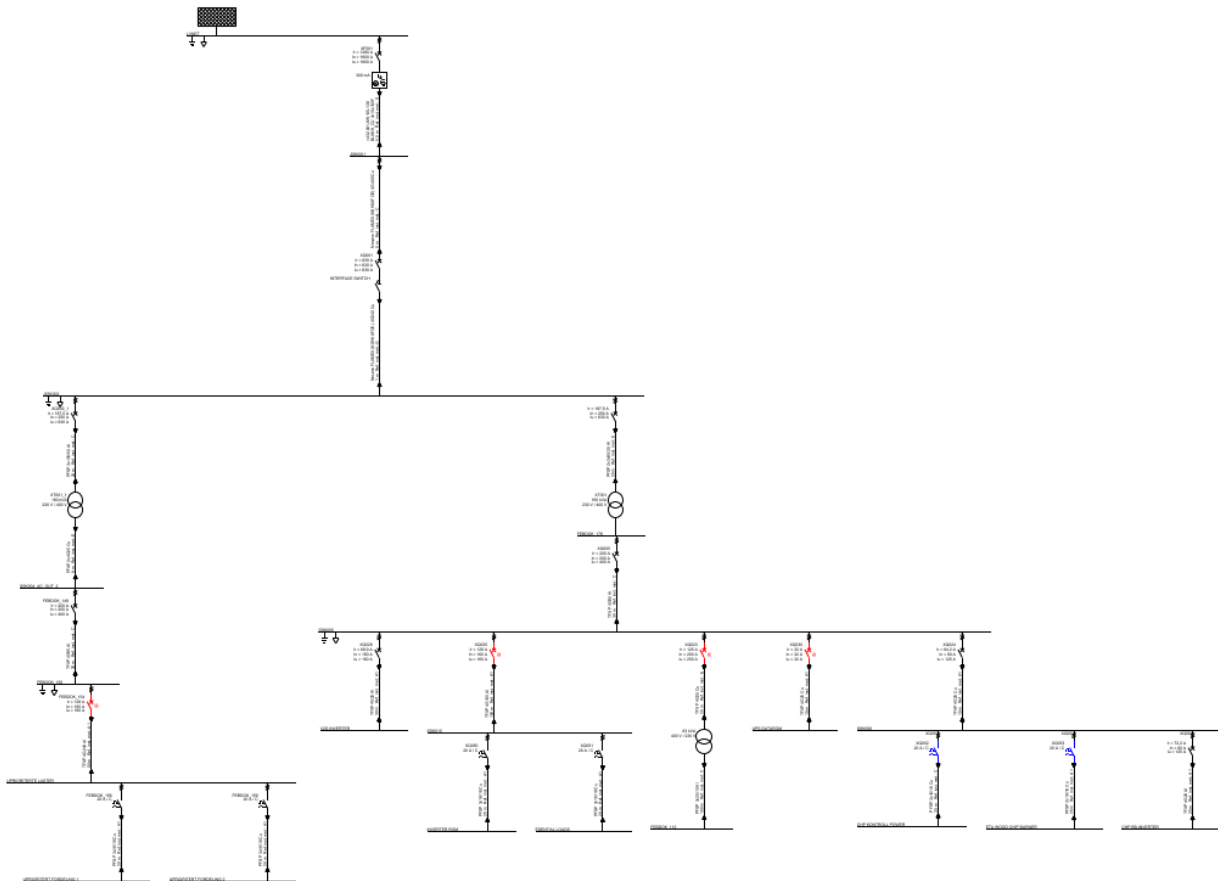
- REGJERINGEN. 2020. *Revidert elmarkedsdirektiv* [Online]. Available: <https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2017/jan/forslag-til-revidert-elmarkedsdirektiv-/id2540020/> [Accessed 10 mai 2022].
- REGJERINGEN. 2021. *Klimaendringer og norsk klimapolitikk* [Online]. Available: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/klimaendringer-og-norsk-klimapolitikk/id2636812/> [Accessed 10 april 2022].
- ROEPER, R., MITLEHNER, F., EHMCKE, B. & WEBS, A. 1985. *Short-circuit currents in three-phase systems*, Berlin, Siemens Aktiengesellschaft.
- RONESS, S. 2021. *Masteroppgave Energilagring i mikronett : økonomiske effekter av ulike lagringsteknologier og - strategier*. Master, NORGES HANDELSHØYSKOLE.
- SAEED, M. H., FANGZONG, W., KALWAR, B. A. & IQBAL, S. 2021. A Review on Microgrids' Challenges & Perspectives. *IEEE access*, 9, 166502-166517.
- SERVICE, C. P. 2022. *WHAT DOES A BYPASS SWITCH IN A UPS SYSTEM DO?* [Online]. Available: <https://www.constantpowerservices.com/questions/6-what-does-a-bypass-switch-in-a-ups-system-do> [Accessed 25 april 2022].
- SINTEF. 2020. *Mikronett for å opprettholde strømforsyning i lokale strømnnett* [Online]. Available: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/mikronett-for-a-oppretholde-stromforsyning-i-lokale-stromnett/> [Accessed 10.04.2022].
- SOLENERGIFORENING, N. 2021. *Støtteordninger* [Online]. Available: <https://www.solenergi.no/sttteordninger> [Accessed 24 april 2022].
- STADLER, M., PECENAK, Z., MATHIESEN, P., FAHY, K. & KLEISSL, J. 2020. Performance comparison between two established microgrid planning MILP methodologies tested on 13 microgrid projects. *Energies (Basel)*, 13, 4460.
- SUN, Y., HOU, X., LU, J., LIU, Z., SU, M. & GUERRERO, J. M. 2022. *Series-Parallel Converter-Based Microgrids : System-Level Control and Stability*. Cham: Springer International Publishing AG.
- TINA, D. 2020. *THÉVINENS TEOREM* [Online]. Available: <https://www.tina.com/no/thevenins-theorem/> [Accessed 26 april 2022].
- UNAMUNO, E. & BARRENA, J. A. 2015. Hybrid ac/dc microgrids—Part I: Review and classification of topologies. *Renewable & sustainable energy reviews*, 52, 1251-1259.
- UTVIK, K., SAND, K. & NILSEN, A. H. 2018. Systematikk for planlegging av mikronett - Eksempel på bruk ved reelt casestudie: Utsira Mikronett. NTNU.
- VICTRON. 2021. *Victron Energy Quattro 48/15000/200/-100/100-230V manual* [Online]. Available: [https://www.victronenergy.com/upload/documents/Manual-Quattro-5k-8k-10k-15K-100-100A-230V-\(firmware-xxxx4xx\)-EN-NL-FR-DE-ES-SE-IT.pdf](https://www.victronenergy.com/upload/documents/Manual-Quattro-5k-8k-10k-15K-100-100A-230V-(firmware-xxxx4xx)-EN-NL-FR-DE-ES-SE-IT.pdf) [Accessed].
- ÜRGÜN, S. 2008. *three-phase inverter circuit without N* [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Three-phase-inverter-circuit\\_fig1\\_4368618](https://www.researchgate.net/figure/Three-phase-inverter-circuit_fig1_4368618) [Accessed 26 april 2022].
- ZHONG, Q. C., LIANG, J., WEISS, G., FENG, C. & GREEN, T. C. 2006.  $H_\infty$  control of the neutral point in four-wire three-phase DC-AC converters. *IEEE transactions on industrial electronics (1982)*, 53, 1594-1602.
- AAMIR, M. *Design of a Non-isolated Single Phase Online UPS Topology with Parallel Battery Bank for Low Power Applications*, Singapore, Singapore: Springer Singapore.

# VEDLEGG

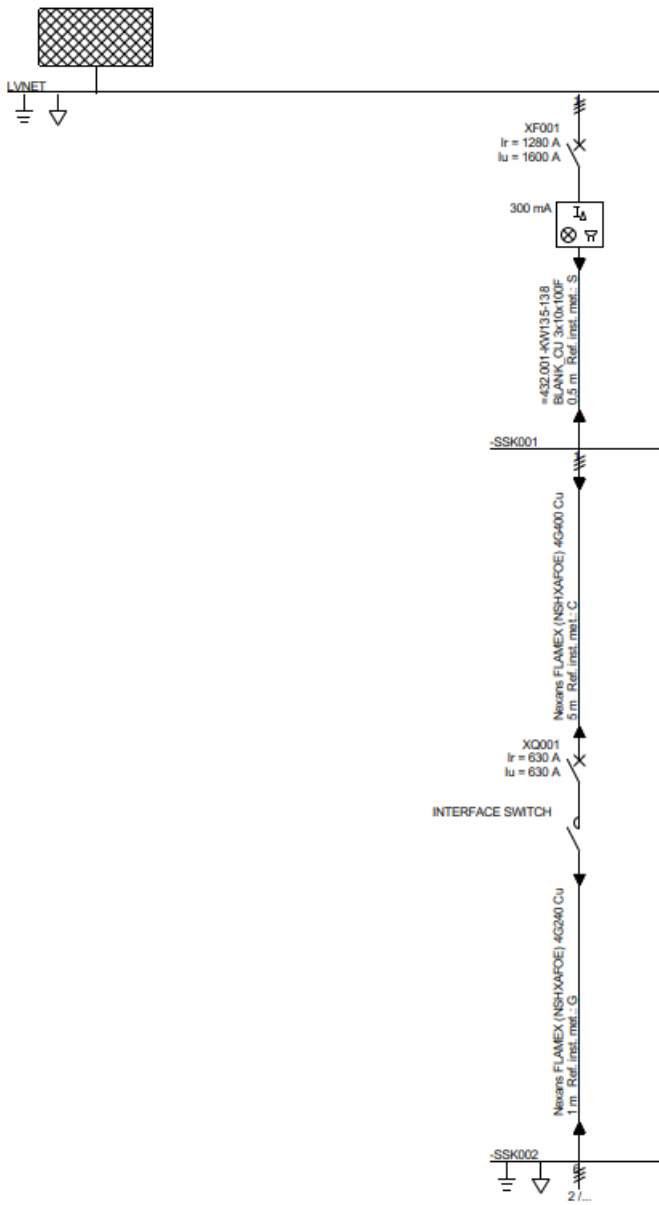
## Vedlegg A - Simuleringsresultater

### 1.1 Hovedkursskjema til simuleringer i Febdok.

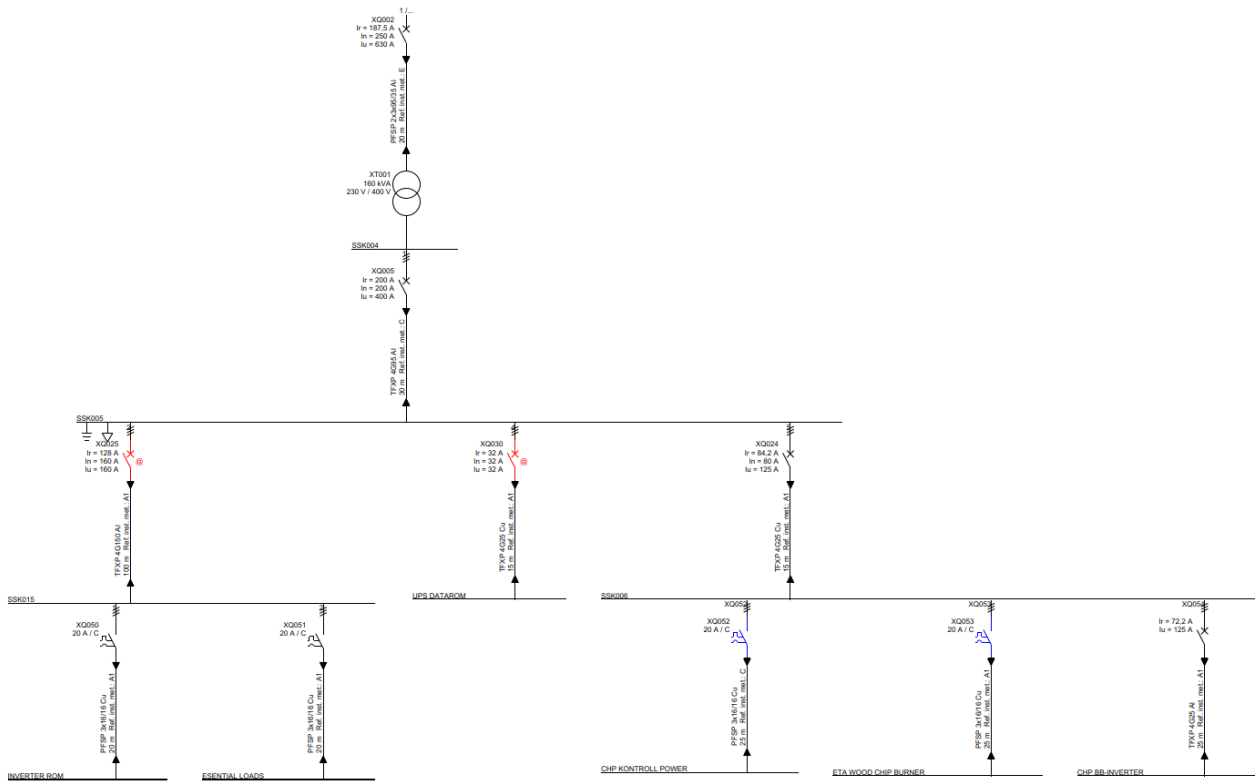
Modell 1 - MG1 normaldrift, med AC1 og AC2 som egen fordelinger



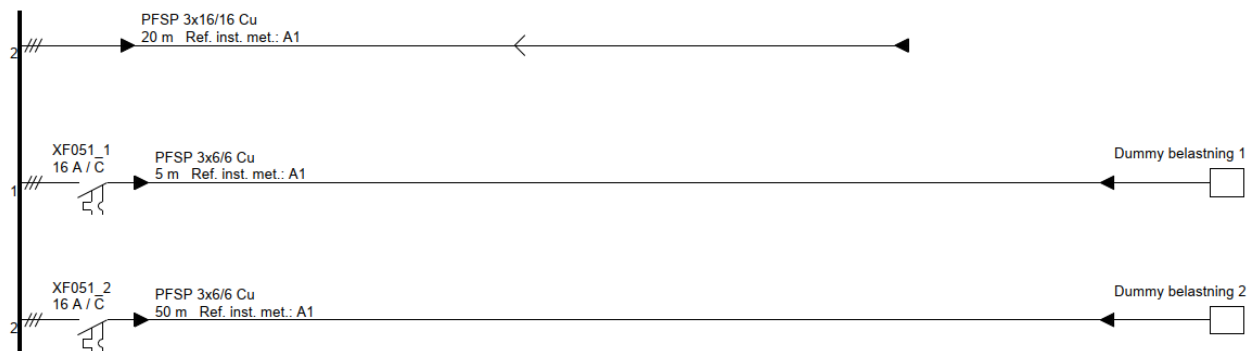
Figur 51 Febdok Evenstad modell av MG1 normaldrift, med AC2 som egen fordeling



Figur 52 Febdok Evenstad modell av MG1 normaldrift kun AC1-utgang del 1

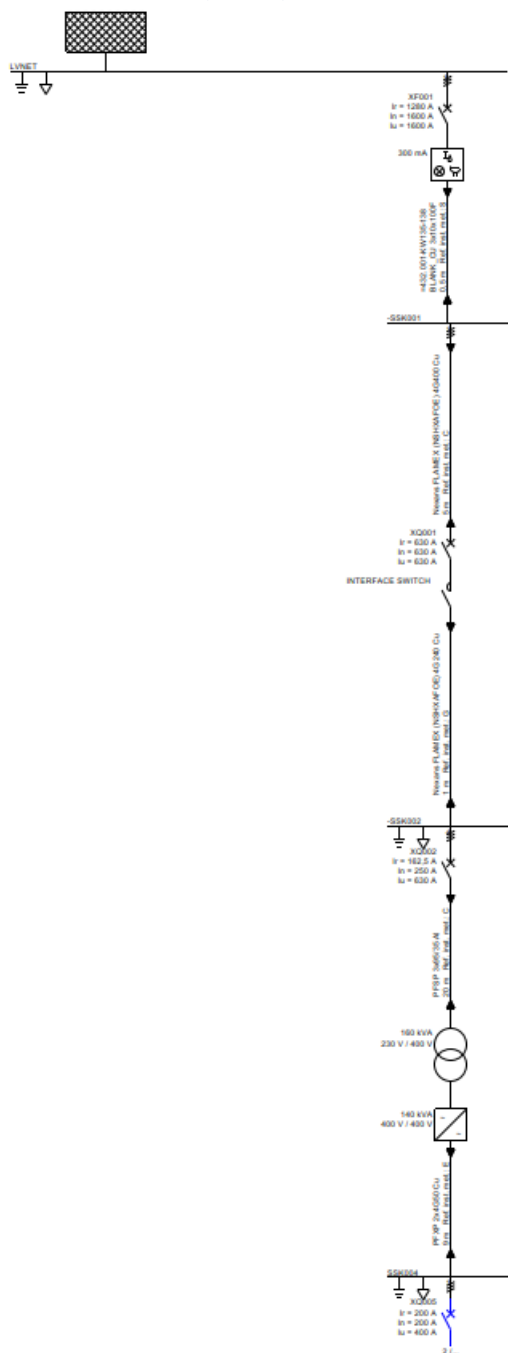


Figur 53 Febdok Evenstad modell av MG1 normaldrift kun AC1-utgang del 2



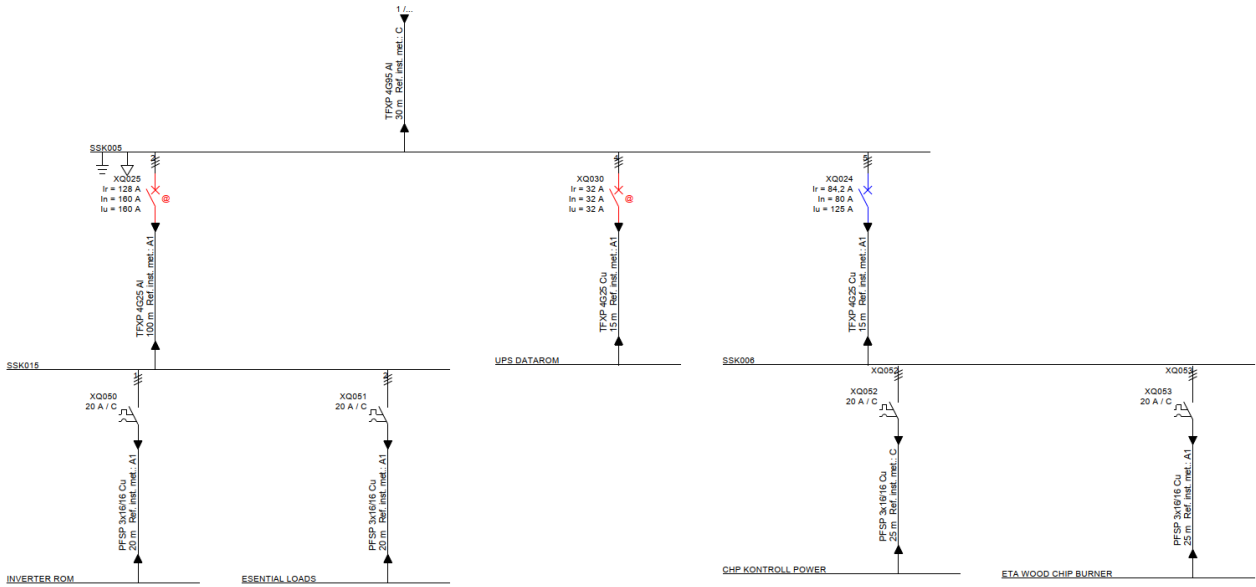
Figur 54 Febdok Evenstad modell av MG1 normaldrift kun AC1-utgang forbrukerkurser for essensielle laster

Modell 2 - MG1 øydrift, parallelle kilder slått sammen (UPS + CHP+V2G)

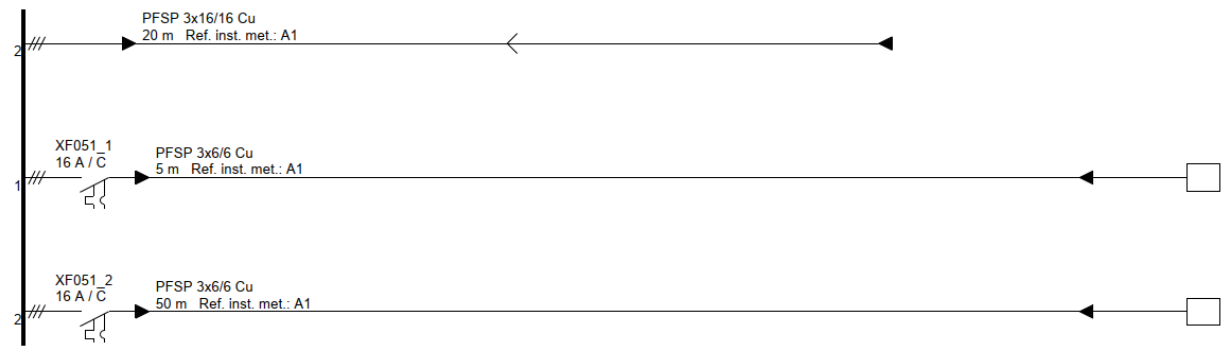


Figur 55 Febdok Evenstad modell MG1 øydrift, parallelle kilder slått sammen (UPS + CHP+V2G) del 1



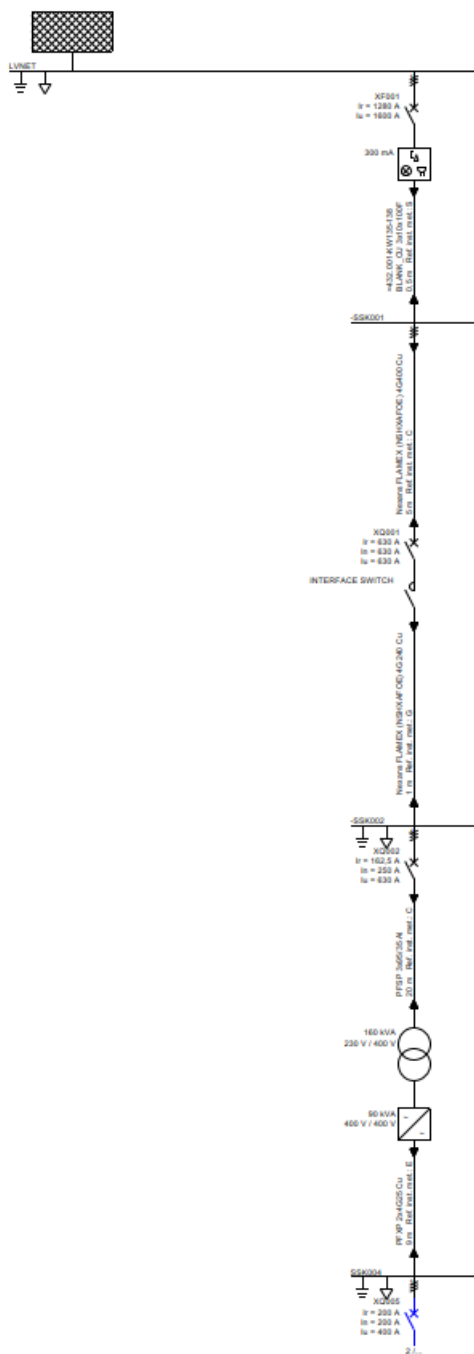


Figur 56 Febdok Evenstad modell MG1 øydrift, parallelle kilder slått sammen (UPS + CHP+V2G) del 2

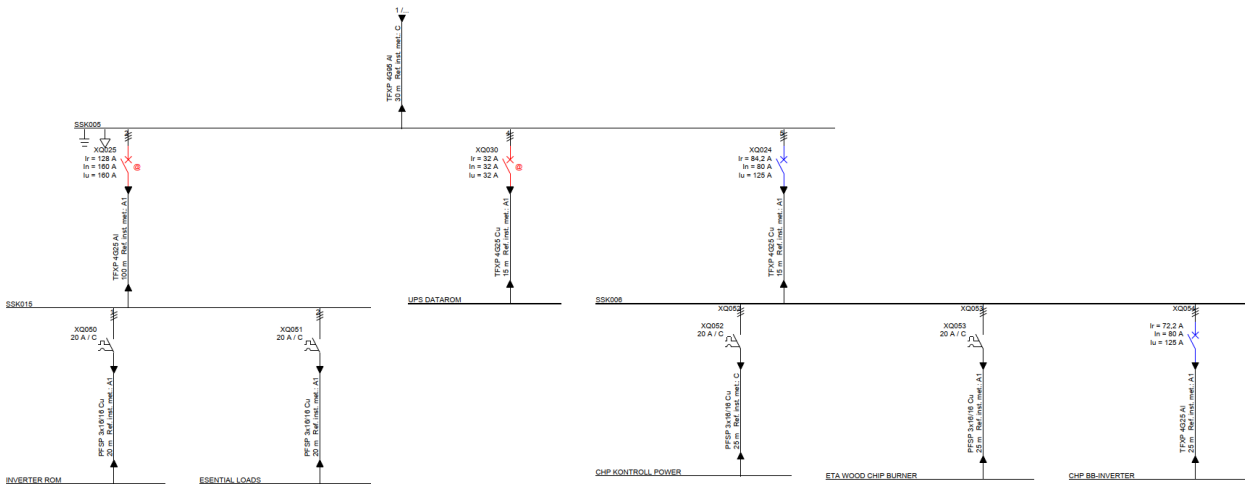


Figur 57 Febdok Evenstad modell MG1 øydrift, parallelle kilder forbrukerkurser for essensielle laster

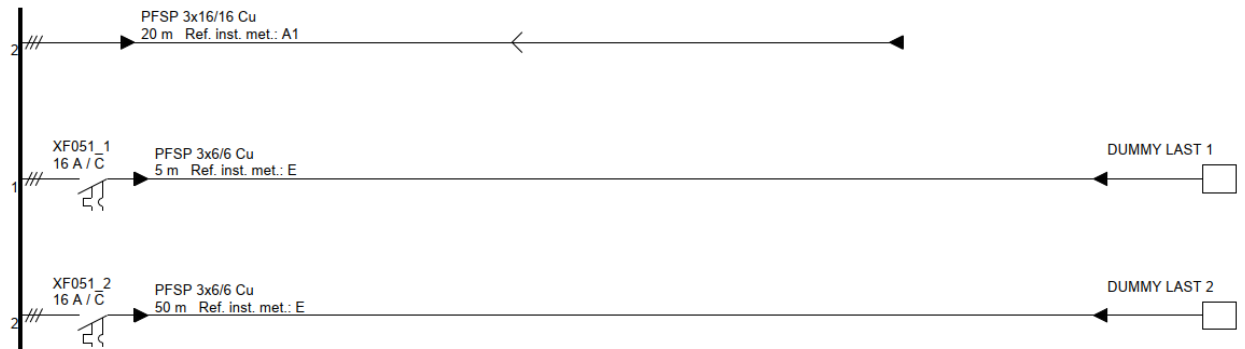
Modell 3 - MG1 øydrift, kun BB1 bidrag som UPS



Figur 58 Febdok Evenstad modell for MG1 øydrift, kun BB1 bidrag som UPS del 1

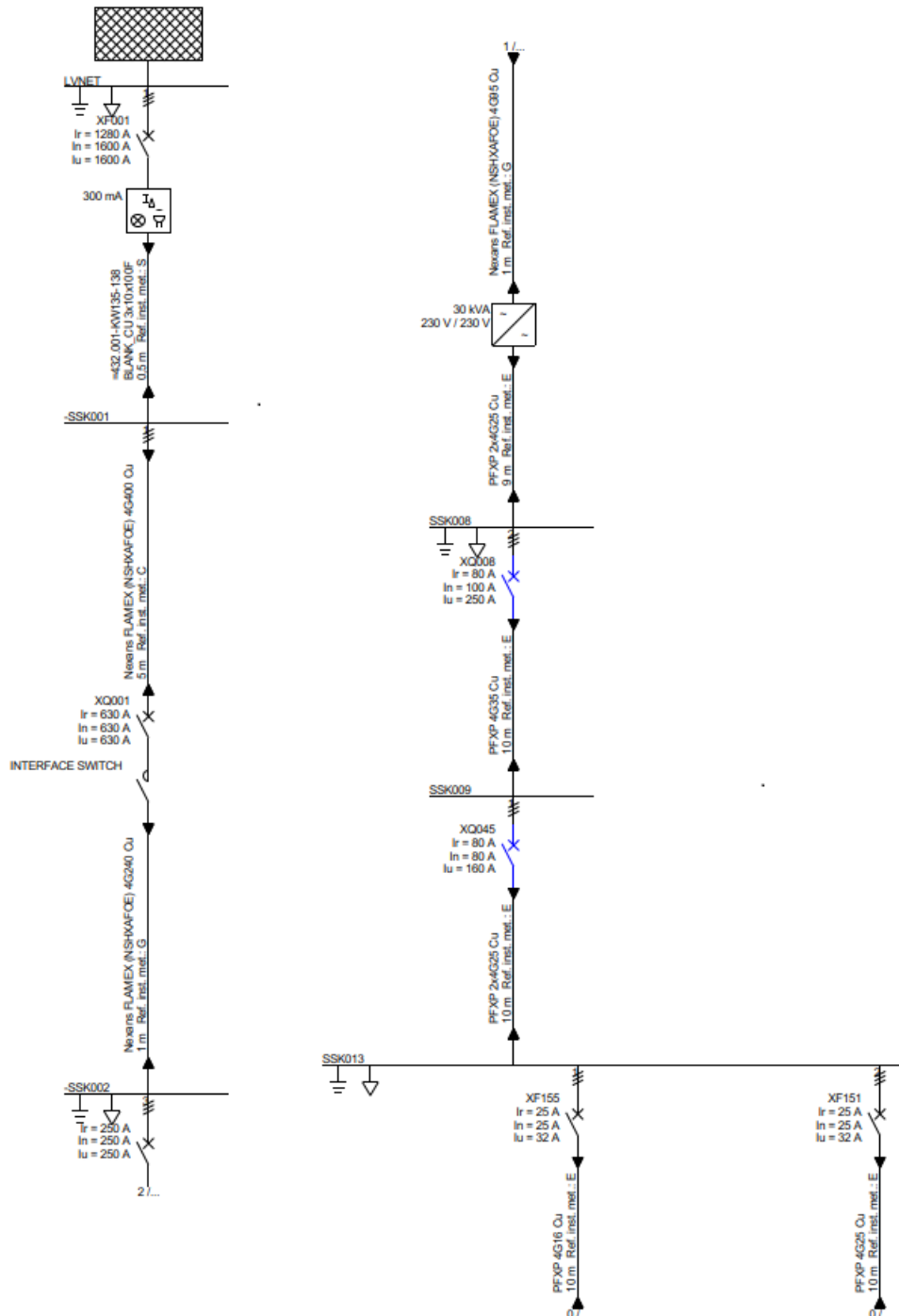


Figur 59 Febdok Evenstad modell for MG1 øydrift, kun BB1 bidrag som UPS del 2

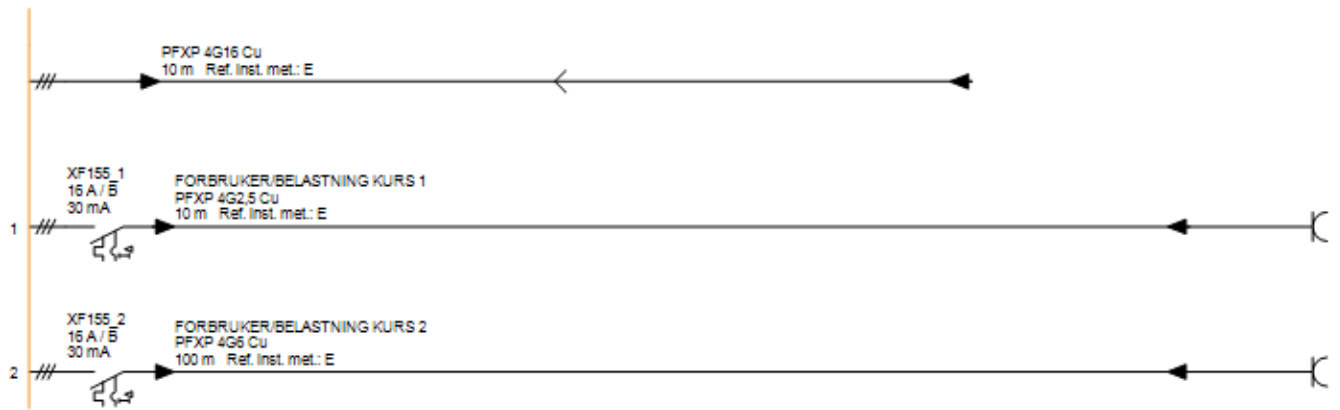


Figur 60 Febdok Evenstad modell for MG1 øydrift, kun BB1 bidrag forbrukerkurser for essensielle laster

Modell 5 - MG2 modell i øydrift.



Figur 61 Febdok Evenstad MG2 modell i øydrift



Figur 62 Febdok Evenstad MG2 modell i øydrift essensielle laster

## 1.2 Verdier for kortslutningsytelser og utkoblingstid

Modell 5 MG2 i øydrift

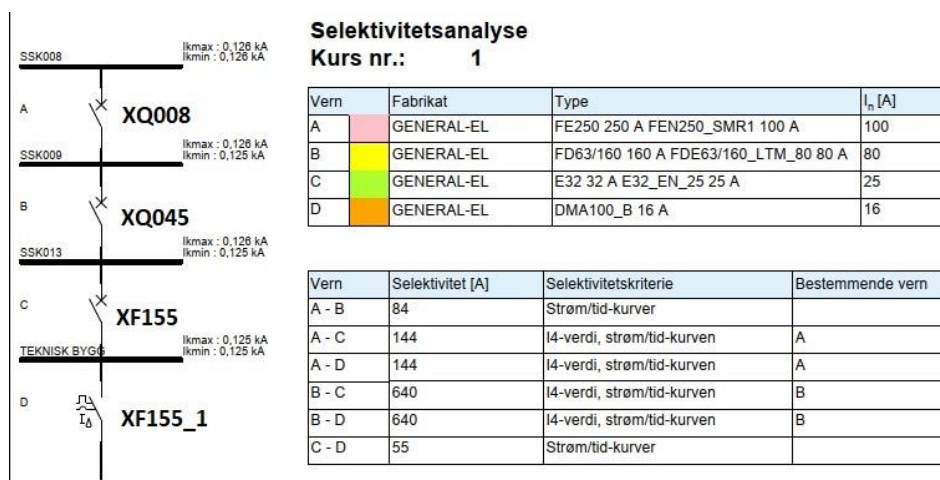
### Resultat for kortslutningsytelser og utkoblingstid

Øydrift

Tabell 14 Aktuelle resultater for kortslutningsstrømmer og utkoblingstid for vern i MG2 øydrift

| Vern nummer | Type feilstrøm     | $I_k$ [kA] | Kabel<br>$t=k^2S^2/I^2$ [s] | $T_{utkobling}$ [s] |
|-------------|--------------------|------------|-----------------------------|---------------------|
| XQ008       | $I_k$ 3p maks ende | 0,126      | 1020                        | 596                 |
|             | $I_k$ 2p min       | 0,126      | 1020                        | 596                 |
| XQ045       | $I_k$ 3p maks ende | 0,126      | $I_k < I_z$                 | 2065                |
|             | $I_k$ 2p min       | 0,125      | $I_k < I_z$                 | 2065                |
| XF155       | $I_k$ 3p maks ende | 0,125      | 217                         | 0,026               |
|             | $I_k$ 2p min       | 0,125      | 217                         | 0,026               |
| XF155_1     | $I_k$ 3p maks ende | 0,123      | 5,4                         | 0,039               |
|             | $I_k$ 2p min       | 0,122      | 5,6                         | 0,040               |

### Selektivitetskurve mellom de aktuelle vern



Figur 63 MG 2 Selektivetsresultater i øydrift kurs XF155\_1

### 1.3 Vern brukt i Febdok simulering.

#### MG1

Vern brukt i FebDok simulering.

| Fabrikat   | Bryterenhet | $I_{ru}$ [A] | Bryteevnenivå | $I_n$ [A] | Utløserenhet     |    | Antall |
|------------|-------------|--------------|---------------|-----------|------------------|----|--------|
| GENERAL-EL | D125        | 125          | E             | 80        | D125_RE_40       | 3p | 2      |
| GENERAL-EL | E32         | 32           | E             | 32        | E32_EN_32        | 3p | 1      |
| GENERAL-EL | E400        | 400          | N             | 200       | E400_EN          | 3p | 1      |
| GENERAL-EL | FE160       | 160          | E             | 160       | FEN160_LTM_80    | 3p | 1      |
| GENERAL-EL | FG630       | 630          | N             | 250       | FGN630_SMR2      | 3p | 1      |
| GENERAL-EL | FG630       | 630          | N             | 630       | FGN630_SMR2      | 3p | 1      |
| GENERAL-EL | G100_C      | 16           | B             | 16        | G100_C_10        | 3p | 4      |
| GENERAL-EL | G100_C      | 20           | B             | 20        | G100_C_10        | 3p | 4      |
| SCHNEIDER  | NS1600N     | 1600         | N             | 1600      | MICROLOGIC 2.0 E | 3p | 1      |

#### MG2

Vern brukt i FebDok simulering.

| Fabrikat   | Bryterenhet   | $I_{ru}$ [A] | Bryteevnenivå | $I_n$ [A] | Utløserenhet     | $I_{\Delta n}$ [mA] |    | Antall |
|------------|---------------|--------------|---------------|-----------|------------------|---------------------|----|--------|
| GENERAL-EL | DMA100_B      | 16           | B             | 16        | RCBO NEK B16A    | 30                  | 3p | 3      |
| GENERAL-EL | E32           | 32           | N             | 25        | E32_EN_25        |                     | 3p | 2      |
| GENERAL-EL | FD63/160      | 160          | E             | 80        | FDE63/160_LTM_80 |                     | 3p | 1      |
| GENERAL-EL | FE250         | 250          | N             | 100       | FEN250_SMR1      |                     | 3p | 1      |
| GENERAL-EL | FE250 PREMEON | 250          | L             | 250       | FEN 250 PREMEON  |                     | 3p | 1      |
| GENERAL-EL | FG630         | 630          | N             | 630       | FGN630_SMR2      |                     | 3p | 1      |
| SCHNEIDER  | NS1600N       | 1600         | N             | 1600      | MICROLOGIC 2.0 E |                     | 3p | 1      |

Vedlegg B – Kortslutningsberegning resultater fra W. Kjær sin masteroppgave om Mikronett campus Evenstad.

Tabell 15 Resultater fra kortslutningsberegninger og utkoblingstider fra W. Kjær sin modell for mikronett på Evenstad

| Feiltilfeller   | Vern  | Strøm [A] | Utkoblingstid tid |
|---|-------|-----------|-------------------|
| <b>2&amp;6. Kortslutning på CHP-styring kursen</b>  |       |           |                   |
| Normaldrift   | XQ001 | 2154      | 4s                |
|   | XQ002 | 2154      | 400ms             |
|   | XQ005 | 1312      | 70 ms             |
|   | XQ024 | 1332      | 14,5 ms           |
|   | XQ029 | 23        | Ingen             |
| Øydrift   | XQ005 | 214       | 57s               |
|   | XQ024 | 138       | 17s               |
|   | XQ029 | 23        | Ingen             |
| <b>3&amp;7. Kortslutning på UPS datarom kursen</b>  |       |           |                   |
| Normaldrift   | XQ001 | 2132      | 4s                |
|   | XQ002 | 2132      | 400ms             |
|   | XQ005 | 1297      | 70ms              |
|   | XQ024 | 138       | 77s               |
|   | XQ029 | 23        | Ingen             |
|   | XQ030 | 1451      | 5ms               |
| Øydrift   | XQ005 | 215       | 57s               |
|   | XQ024 | 140       | 17s               |
|   | XQ029 | 23        | Ingen             |
|   | XQ030 | 376       | 7ms               |
| <b>4&amp;8. Kortslutning på kursen med Essensielle laster (Power essential loads), SSK015</b> |       |           |                   |
| Normaldrift   | XQ001 | 1322      | 7s                |
|   | XQ002 | 1322      | 5,5s              |
|   | XQ005 | 789       | 110ms             |
|   | XQ024 | 83        | >1 time           |
|   | XQ025 | 892       | 6s                |
|   | XQ029 | 22        | Ingen             |
| Øydrift   | XQ005 | 213       | 57                |
|   | XQ024 | 137       | 17                |
|   | XQ025 | 372       | 12,3              |
|   | XQ029 | 23        | Ingen             |



| <b>Grid-connected mode</b> |                     | <b>Islanded mode</b> |                     |
|----------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Fault current = 1637       |                     | Fault current = 374  |                     |
| <b>From</b>                | <b>Contribution</b> | <b>From</b>          | <b>Contribution</b> |
| Grid                       | 1364                | Grid                 | 0                   |
| BB1                        | 132                 | BB1                  | 212A                |
| CHP                        | 138                 | CHP                  | 139A                |
| V2G                        | 22A                 | V2G                  | 23A                 |

Figur 64 Kortslutningsstrøm målinger på SSK005 samleskinne i hovedfordeling

