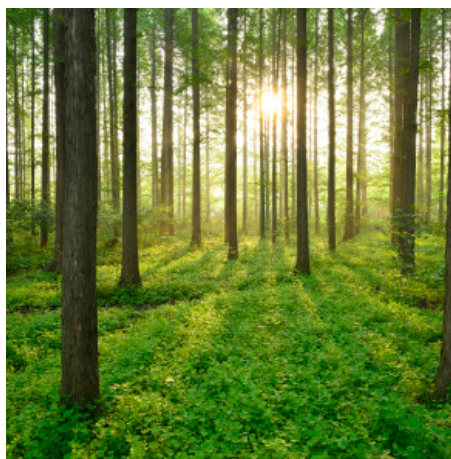


# FELBORTKOPPLING I MIKRONÄT

RAPPORT 2023:957



ELNÄTENS HÅLLBARA TEKNIK-  
UTVECKLING OCH DIGITALISERING



# Felbortkoppling i mikronät

Vägledning för utformning och inställning av  
felbortkopplingsystem i mikronät

ARVID BJÖREMARK, FLORIN STELEA  
LARS MESSING, JOHAN STELIN

ISBN 978-91-7673-957-0 | © Energiforsk oktober 2023

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

## Förord

**Projektet *Felbortkoppling i Mikronät* ingår i programmet Elnätens hållbara teknikutveckling och digitalisering. Med en ökad mängd decentraliserad generering, alltmer avancerade möjligheter till styrning och kontroll av generering, samt ökad mängd uppkopplade mätare och sensorer finns möjligheter att stärka nätens leveranssäkerhet, till exempel för att möjliggöra ödrift i vissa delar av nätet.**

Projektet har förutsättningslöst studerat och beskrivit vilka skyddsstrategier som lämpar sig för så kallade mikronät som oftast är kopplade mot överliggande elnät men som kan drivas som en ö.

Johan Stelin på DNV Sweden AB har varit projektledare, och han har samarbetat med Arvid Björemark, Florin Stelea och Lars Messing, även de från DNV.

Projektet har följt och biståtts av referensgruppen med deltagarna:

- Olle Bergström, Jämtkraft Elnät
- Amanda Gidén Hember, Öresundskraft
- Arne Berlin, Vattenfall Eldistribution
- Magnus Brodin, Skellefteå Kraft
- Stefan Aronsson, Jönköping Energi
- Michele Luvisotto, Hitachi Energy Sweden
- Joel Clementson, E.On Energidistribution

Stort tack också till programstyrelsen för deras initiativ och stöd till projektet:

- Kristina Nilsson, Ellevio (ordförande)
- Arne Berlin, Vattenfall Eldistribution
- Hampus Bergquist, Svenska kraftnät
- Ferruccio Vuinovich, Göteborg Energi Elnät
- Olle Bergström, Jämtkraft Elnät
- Per-Olov Lundqvist, Gävle Energi /Elinorr
- Magnus Sjunnesson, Öresundskraft
- Magnus Brodin, Skellefteå Kraft Elnät
- Oliwer Roos/Göran Sandström, Umeå Energi Elnät
- Tilda Nordin, Mälarenergi Elnät
- Karl-Johan Mannerback, Jönköping Energi Nät
- Johan Ribrant, Nacka Energi
- Matz Tapper, Energiföretagen Sverige
- Claes Wedén, Hitachi Energy Sweden
- Lisa Gerdin, RISE
- Magnus Lindström, Grid Diagnoze
- Staffan Bjurulf, Sveriges Ingenjörer (MF)

Följande bolag har deltagit som intressenter till projektet. Energiforsk framför ett stort tack till samtliga för värdefulla insatser.

Ellevio	Hitachi Energy Sweden
Vattenfall Eldistribution	Energiföretagen Sverige
Svenska kraftnät	Sveriges Ingenjörer, Miljöfonden
Göteborg Energi	Griddiagnoze
Statkraft Sverige	Energy Opticon
Fortum	Elinorr ekonomisk förening;
Mälarenergi Elnät	Bergs Tingslags Elektriska,
Öresundskraft	Blåsjön Nät,
Tekniska Verken i Linköping	Dala Energi Elnät,
Skellefteå Kraft Elnät	Elektra Nät,
Umeå Energi Elnät	Gävle Energi, Hamra
Jämtkraft Elnät	Besparingsskog,
Jönköping Energi Nät	Hofors Elverk,
Eskilstuna Strängnäs Energi & Miljö	Härjeåns Nät,
Karlstads El- och Stadsnät	Härnösand Elnät,
Borås Elnät	Ljusdal Elnät,
Falu Energi & Vatten	Malungs Elnät,
Borlänge Energi	Sandviken Energi Nät,
Nacka Energi	Sundsvall Elnät,
C4 Energi	Söderhamn Elnät,
PiteEnergi	Åsele Elnät,
Trollhättan Energi Elnät	Årsunda Kraft & Belysningsförening,
Skövde Energi	och Övik Energi Nät

Stockholm i oktober 2023

*Susanne Stjernfeldt*

Energiforsk AB  
Forskningsområde Elnät Vindkraft och Solel

## Sammanfattning

**Med en ökad mängd decentraliserad generering, alltmer avancerade möjligheter till styrning och kontroll av generering som utnyttjar intermittenta energikällor så som sol och vind, samt ökad mängd mätare och sensorer som är uppkopplade så finns det möjlighet att utnyttja detta till att stärka nätens leveranssäkerhet genom att driva delar av distributionsnät som mikronät.**

Hittills har mycket fokus riktats mot hur effekt- och spänningsbalans skall kunna upprätthållas i mikronät som kan drivas i önätsdrift där mikronätet inte längre är anslutet till det överliggande nätet. Att driva mikronät i önätsdrift, särskilt med omriktarbaserad generering, leder till nya utmaningar för reläskyddssystemen som fortfarande behöver kunna detektera och koppla bort fel inom kravställda förutsättningar. Föreliggande rapport har undersökt vilka krav som finns på området idag, vilka reläskyddslösningar som har använts i olika pilotprojekt för mikronät samt slutligen studerat tänkbara lösningar för reläskydd och kommunikation för framtida mikronät.

Vid avsaknad av synkronmaskin inom mikronätet förväntas felströmmen vara lägre vilket medför att det kan vara svårt att använda traditionella överströmsskydd. Vidare saknas det i Sverige i nuläget krav på att omriktaransluten generering skall bidra med minusföljdskomponent vid felströmsinmatning. Detta måste beaktas vid val av reläskyddslösningar då vissa algoritmer i reläskydd använder minusföljdskomponent.

Rapporten identifierar flera tänkbara lösningar för att detektera och koppla bort kortslutningar och jordfel på mellanspänningsnivå, tillsammans med tillämpbara kommunikationstekniker. I slutändan är det dock svårt att enskilt avgöra vilken lösning som är den mest lämpliga då detta påverkas av mikronätets topologi, vilken typ generering som finns och antalet brytställen. Rapporten ger vägledning för utformning och inställning av felbortkopplingssystem i mikronät.

## Nyckelord

Felbortkoppling, mikronät, distribuerad generering, önätsdrift, felströmsinmatning.

## Summary

**With an increasing amount of decentralized generation, more advanced abilities to regulate and control intermittent generation sources such as solar and wind, as well as an increased number of connected sensors, the opportunity has been created to use this to improve the reliability of the grid by operating parts of distribution grids as microgrids.**

So far, much focus has been directed on how to achieve power- and frequency balance within microgrids which are able to operate in island mode without an established connection to the main grid. Operating microgrids in island mode, especially with converter-based generation, leads to new challenges for protection systems which still need to be able to detect and clear faults within specified requirements. In this report requirements within the field, protection systems solutions for different microgrid pilot projects, workable solutions for both protection system solutions and communication solutions for future microgrids are studied.

For microgrids without synchronous machines the fault current is expected to be smaller which results in challenges for traditional overcurrent protection. Furthermore, there are no requirements today in Sweden that the converter-based generation should inject negative sequence current during fault current injection. This needs to be considered during design of protection systems since some algorithms within protective relays use the negative sequence component.

The report identifies several workable solutions which may detect and clear both short-circuits and ground faults in microgrids, along with suitable communication technologies. It is however hard to specify if a single solution is better than another since it is affected by the topology of the microgrid, the type of generation and the amount of circuit breakers. The report provides guidance for design and settings for protective relays in microgrids.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>9</b>
1.1	Omfattning och avgränsningar	9
1.2	Metod	9
1.3	Begrepp	10
<b>2</b>	<b>Kravspecifikation</b>	<b>11</b>
2.1	Ellagen och elsäkerhetsverkets Föreskrifter	11
2.1.1	SS-EN 50522 Beröringsspänning	13
2.1.2	Detektering och bortkoppling av fel	13
2.2	Nätkoder gällande produktion	14
2.2.1	Frekvenstålighet	14
2.2.2	Spänningstålighet	15
2.2.3	Feltålighet och återhämtning av aktiv effekt efter fel	15
2.2.4	Tillhandahållande av snabb felström	16
2.2.5	Upptäckta brister i nätkoderna gällande produktionskällor i mikronät	17
2.2.6	Exempel på hårdare kravställning av nätbolag och andra EU-medlemsländer	17
2.3	Sammanfattning av kravbild	18
<b>3</b>	<b>Mikronätets egenskaper</b>	<b>20</b>
3.1	Felströmsinmatning från olika typer av källor	20
3.1.1	Synkrogeneratorer	20
3.1.2	Asynkrogeneratorer	21
3.1.3	Vindkraftgeneratorer	22
3.1.4	Solcellsanläggningar	24
3.1.5	Energilager med batterier	24
3.1.6	Felströmsinmatning från omriktaransluten generering med varierande effekt (sol och vind)	25
3.2	Mikronätets uppbyggnad och anslutning	26
3.2.1	Planerad frånkoppling från överliggande nät	29
3.2.2	Oplanerad frånkoppling från överliggande nät	29
3.3	Kommunikation	29
3.3.1	Kommunikationsnätverksarkitektur och överföringsmedia	30
<b>4</b>	<b>Erfarenheter av felbortkoppling i mikronät</b>	<b>35</b>
4.1	E.ON SIMRIS	35
4.1.1	Utformning av skyddssystem	36
4.1.2	Problematik och utmaningar	36
4.2	Vattenfall eldistribution - Arholma	36
4.2.1	Utformning av skyddssystem	37
4.2.2	Problematik och utmaningar	38

4.3	Hailuoto Finland	38
4.3.1	Problematik och utmaningar	39
4.4	Cigré arbetsgrupp C6.22	40
<b>5</b>	<b>Realiserbara system för felbortkoppling och detektering</b>	<b>41</b>
5.1	Lösningar för kortslutningar på mellanspänningsnivå	41
5.1.1	Fasöverströmsskydd	42
5.1.2	Differentialskydd	43
5.1.3	Differentialskyddet skall ha momentan utlösningfunktion. Distansskydd	43
5.2	Lösningar för jordfel på mellanspänningsnivå	44
5.2.1	Nollpunktsspänningsskydd	44
5.2.2	Oriktade jordströmsskydd	45
5.2.3	Riktade jordströmsskydd	47
5.2.4	Skydd mot intermittenta jordfel	47
5.2.5	Admittansmätande jordfelsskydd	48
5.3	Felindikatorer	48
5.4	Nytt innovativt lösningsförslag	54
5.4.1	Eventuell applikation	55
5.5	Lösningar för fel på lågspänningsnivå	55
5.6	Skyddsfunktioner i den distribuerade genereringen	57
<b>6</b>	<b>Sammanställning av möjliga lösningar</b>	
<b>7</b>	<b>Slutsats och nästa steg</b>	<b>61</b>
7.1	Fortsatta studier	61
<b>8</b>	<b>Referenslista</b>	<b>63</b>



# 1 Inledning

Med en ökad mängd decentraliserad generering, alltmer avancerade möjligheter till styrning och kontroll av generering som utnyttjar intermittenta energikällor som sol och vind, samt ökad mängd mätare och sensorer som är uppkopplade till datanätverk (även för lägre spänningsnivåer) finns möjligheter att utnyttja detta för att stärka nätens leveranssäkerhet, till exempel för att möjliggöra önätsdrift i vissa delar av nätet. Begreppet mikronät har blivit ett etablerat begrepp för en del av ett nät som kan drivas antingen anslutet till övriga nätet respektive drivas som ett isolerat område i önätsdrift.

Arbetsgrupp C6.22 inom Cigré har tagit fram följande definition av ett mikronät: *"Microgrids are electricity distribution systems containing loads and distributed energy resources, (such as distributed generators, storage devices, or controllable loads) that can be operated in a controlled, coordinated way either while connected to the main power network or while islanded"*<sup>1</sup>.

Önätsdrift samt övergången till önätsdrift ställer flera krav på reglering för att kunna upprätthålla spännings- och effektbalans i systemet vilket kan medföra ett flertal utmaningar och svårigheter. Det är dock viktigt att även beakta att bortkopplingen från övriga nätet och övergång till önätsdrift väsentligt kan förändra förutsättningarna för felbortkopplingsystemet.

## 1.1 OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR

Detta projekt studerar och beskriver skyddsstrategier som lämpar sig för den typ av mikronät som kan drivas både anslutet till övriga nätet respektive drivas i önätsdrift. Vidare görs även en kartläggning av relevant kravbild samt vilka skyddsstrategier som har använts i olika pilotprojekt. Lösningar för att kunna reglera och uppnå effekt- och spänningsbalans studeras inte utan detta antas finnas implementerat.

Nät som alltid drivs i önätsdrift och saknar anslutning till övriga kraftsystemet studeras inte.

Mikronät baserade på likström (DC) behandlas inte inom ramen för projektet.

## 1.2 METOD

Arbetet har utförts i form av en litteraturstudie där material som berör mikronät, felströmsbidrag från olika typer av källor med mera har studerats. Vidare har även material och information samlats in från Vattenfall och E.ON:s projekt via deltagarna i referensgruppen.

---

<sup>1</sup> Microgrids 1 Engineering, Economics, & Experience, Working Group C6.22 Cigré, October 2015.

### 1.3 BEGREPP

ACER - Agency for the Cooperation of Energy Regulators

APRS - Adaptive Power Restoration System

BESS – Battery Energy Storage System

BPL – Broadband Power Line

CENELEC – Comité Européen de Normalisation Électrotechnique

Cigré – International Council on Large Electric Systems

DFIG – Doubly Fed Induction Generator

FAT – Factory Acceptance Test

IED – Intelligent Electronic Device

LFSM – Limited Frequency Sensitive Mode (begränsat frekvenskänslighetsläge)

PGM – Power Generation Module

PLC – Power Line Carrier

QoS – Quality of Service

RfG – Requirements for Generators (Avser EU 2016/631)

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

SoC – State of Charge

## 2 Kravspecifikation

### 2.1 ELLAGEN OCH ELSÄKERHETSVERKETS FÖRESKRIFTER

Ellagen innehåller bestämmelser om elnätsverksamhet, ansvar för det nationella elsystemet och handel med el. Lagen kan betraktas som grundläggande krav med låg detaljeringsgrad. I ellagens 3 kap 1 § (2022:596) anges följande om nätföretagets grundläggande skyldigheter:

*”Ett nätföretag ska i fråga om sitt elnät ansvara för drift och underhåll, utbyggnad vid behov, eventuella anslutningar till andra ledningsnät, att nätet är säkert, tillförlitligt och effektivt, och att nätet på lång sikt kan uppfylla rimliga krav på överföring av el.”*

Regeringen utser sedan genom förordningar lämpliga myndigheter för olika ansvarsområden. I Elsäkerhetsförordningen (2017:218) anges bland annat att elsäkerhetsverket är tillsynsmyndighet för elsäkerhet och får meddela föreskrifter som berör säkerhetskrav. Elsäkerhetsverket har i sin tur givit ut ELSÄK-FS 2022:1 *Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om hur starkströmsanläggningar ska vara utförda*. I föreskriftens 2 kap 1 § beskrivs god elsäkerhetsteknisk praxis enligt följande:

*”En starkströmsanläggning skall vara utförd enligt god elsäkerhetsteknisk praxis så att den ger betryggande säkerhet mot personskada och sakskada på grund av el.*

*Med god elsäkerhetsteknisk praxis avses tillämpning av dessa föreskrifter samt av den praxis i övrigt som har etablerats på elsäkerhetsområdet genom kompletterande standarder eller andra bedömningsgrunder.*

*Om svensk standard tillämpas som komplement till föreskrifterna anses anläggningen vara utförd enligt god elsäkerhetsteknisk praxis om inget annat visas. En anläggning får vara utförd på ett sätt som helt eller delvis avviker från svensk standard under förutsättning att motsvarande säkerhet uppnås. Om utförandet avviker från svensk standard ska de bedömningar som ligger till grund för utförandet dokumenteras.”*

I föreskriftens 3 kap beskrivs grundläggande säkerhetskrav som omfattar alla typer av starkströmsanläggningar. I 2 § beskrivs skydd av människor och husdjur enligt följande:

*”En starkströmsanläggning ska vara utförd så att människor och husdjur skyddas mot elchock som kan uppstå vid direkt beröring av spänningssatta delar eller av utsatta delar som blivit spänningssatta genom ett (1) fel.”*

I 5 kap Särskilda säkerhetskrav för högspänningsanläggningar preciseras kraven. För jordning och skydd mot beröring av spänningssatta delar anger 3 § följande:

*”Vid TN-system för lågspänning som är anslutet till en strömkälla från ett högspänningssystem får enpolig jordslutning i det anslutande högspänningssystemet orsaka en jordpotentialstegring om högst 100 V i lågspänningssystemets utsatta delar. Detta gäller enbart för TN-system som lämnar högspänningens påverkansområde.”*

Samma kapitel innehåller även krav på fränkoppling i § 4–7.

*”§ 4 I högspänningsanläggningar med jordslutningsströmmar överstigande 500 A ska jordslutningar fränkopplas inom 0,5 s. I starkströmsanläggningar för högspänning innehållande luftledning för högspänning med jordslutningsströmmar understigande 500 A ska jordslutningar fränkopplas inom 5 s.”*

*”§ 5 I högspänningsanläggningar med jordslutningsströmmar understigande 500 A i vilken det ingår*

- *en friledning i förstärkt utförande*
- *en friledning med belagda ledare, eller*
- *en luftledning utförd med kabel utan metallmantel eller skärm,*

*ska jordfelskydden ta högsta möjliga känslighet vid detektering av jordfel. Reläfunktionen för fränkoppling ska vara säkerställd för resistansvärden upp till 5 kOhm.”*

*”§ 6 I högspänningsanläggningar med jordslutningsströmmar understigande 500 A för högst 25 kV nominell spänning, i vilken det ingår luftledningar av något annat slag än vad som anges i 5 §, ska reläfunktionen för fränkoppling vara säkerställd för resistansvärden upp till 3 kOhm för jordfelskydden. Inom områden som inte omfattas av detaljplan får en sådan anläggning innehålla ett fåtal spann friledning med belagda ledare.”*

*”§ 7 I högspänningsanläggningar ska spänningssättningsvärdet vara sådant att betryggande säkerhet ges vid uppkommen jordslutning. Värdet ska anpassas till rådande förhållanden på platsen.*

*Allmänna råd*

*De rådande förhållanden som bör beaktas är:*

- *markresistivitet*
- *markens ytbeläggning, och*
- *om människor förväntas befinna sig på platsen.*

*För svenska förhållanden kan följande tilläggsresistanser till en mätresistans om 1 kOhm anses utgöra god elsäkerhetsteknisk praxis gällande beröringsspänningar:*

- *0 Ohm vid badplatser, lekplatser, campingplatser, skolgårdar eller liknande platser där kroppens kontakt med omgivningen kan förväntas ha små begränsningar.*
- *4 kOhm vid platser där människor kan förväntas befinna sig, exempelvis driftrum, gator, vägar eller parkeringsplatser, eller*
- *7 kOhm för övriga platser.*

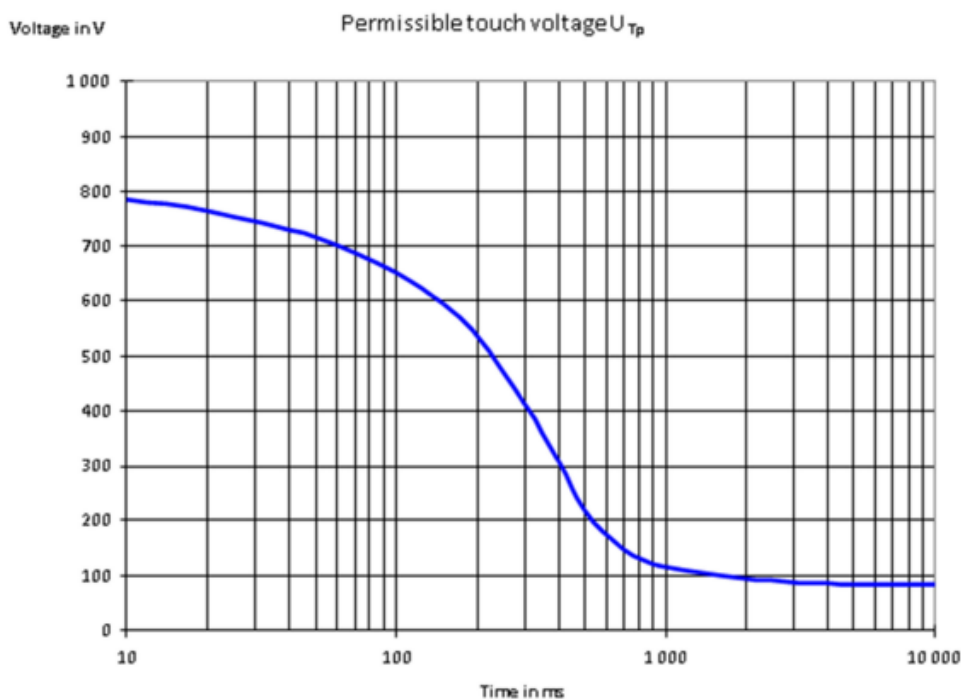
*I högspänningsanläggningar med jordslutningsströmmar överstigande 500 A, kan betryggande säkerhet anses föreligga om förhöjda markpotentialer till följd av jordslutningsströmmen är utjämnade och förekommande spänningar inte överstiger 220 V vid en mätresistans om 1 kOhm.”*

Elsäkerhetsverket gör ingen skillnad i sina krav på huruvida nätet drivs som ett mikronät eller inte.

Gällande kravbild för felbortkoppling på lågspänningssidan bör svensk standard uppfyllas.

### 2.1.1 SS-EN 50522 Beröringsspänning

I standarden SS-EN 50522 anges tillåten beröringsspänning som funktion av felbortkopplingstiden, se Figur 1 nedan. Enligt kapitel 2.1 är tillåten felbortkopplingstid för jordfel, vid jordslutningsströmmar understigande 500 A, 5 sekunder vilket enligt Figur 1 ger en tillåten beröringsspänning om cirka 80 V.



Figur 1. Beröringsspänning enligt SS-EN 50522.

### 2.1.2 Detektering och bortkoppling av fel

Fel som skall kunna detekteras och kopplas bort innefattar två- och trefasiga kortslutningar samt enfasiga jordslutningar i högspännings- såväl som lågspänningsanläggningar. Det behöver även, främst vid önätsdrift, finnas skydd mot avvikande (hög/låg) spänning och frekvens.

Skyddssystemet skall konstrueras för att kunna hantera ett primärt fel följt av ett fel i felbortkopplingssystemet. Detta innebär att det behöver finnas möjlighet till reservbortkoppling för samtliga fel bortsett från fel där det primära skyddet utgörs av en säkring. Reservbortkoppling kan utgöras av fjärrserv eller lokal objektsreserv.

Felbortkopplingen bör vara selektiv under förutsättning att det är möjligt och realistiskt att åstadkomma selektiv felbortkoppling.

Vidare behöver det även säkerställas att distribuerad produktion kan kopplas bort om denna riskerar att spänningssätta ett fel efter att nätet har kopplats bort. Stöd för detta finns exempelvis i IEC 61727 och EN 50549.

Enligt IEC 60050 kan tillförlitlighet delas upp i pålitlighet (dependability) och säkerhet (security). Pålitlighet avser sannolikheten att ett skydd inte felfungerar varpå det inte löser ut när det egentligen skall lösa ut medan säkerhet avser sannolikheten att ett skydd felfungerar och löser obefogat.

## 2.2 NÄTKODER GÄLLANDE PRODUKTION

Kraven på nya produktionsanläggningar (kraftproduktionsmoduler) regleras i den europeiska kommissionens förordning (EU) nr 2016/631 och förtydligas genom EIFS 2018:2.

Enligt artikel 5 i EU 2016/631 indelas kraftproduktionsmoduler i fyra kategorier (typ A, B, C och D). Gränsvärdena för tröskelvärden för de olika typerna regleras av EIFS 2018:2. 3 kapitlet, till att de tröskelvärden som anges för synkronområde Norden i EU2016/631 artikel 5.2 ska gälla. Dessa visas i Tabell 1 nedan.

Tabell 1: Gränsvärdena för synkronområde Norden för de olika typernas tröskelvärde

Gränsvärde för tröskelvärde för maximal kontinuerlig effekt, från och med vilket en kraftproduktions modul är av typ A	Gränsvärde för tröskelvärde för maximal kontinuerlig effekt, från och med vilket en kraftproduktions modul är av typ B	Gränsvärde för tröskelvärde för maximal kontinuerlig effekt, från och med vilket en kraftproduktions modul är av typ C	Gränsvärde för tröskelvärde för maximal kontinuerlig effekt, från och med vilket en kraftproduktions modul är av typ D
0,8 kW	1,5 MW	10 MW	30 MW

Det bör anmärkas att Norden har det högsta satta tröskelvärdet för typ B av alla synkronområden, där Irland-Nordirland med 0,1 MW har det lägsta tröskelvärdet.

Hur en produktionskälla klassas påverkar kravbilderna för den specifika produktionskällan utifrån nätkoderna. Generellt sett ökar kraven och mängden krav ju högre klass en produktionskälla har. Anmärkningsvärt är att det i EU2016/631 och EIFS2018:2 först för en typ B produktionsmodul krävs att man ska visa på överensstämmelse genom simulering och provning.

Angående felbortkoppling i mikronät kan kraven avseende frekvenstålighet, spänningstålighet, feltålighet och tillhandahållande av snabb felström vara extra intressanta, vilka presenteras i de kommande avsnitten.

### 2.2.1 Frekvenstålighet

Gällande frekvenstålighet gäller samma krav för alla typer av produktion (typ A, B, C och D) och regleras i EIFS 2018:2 3 kapitlet att:

1§ Den kortaste tidsperiod som en kraftproduktionsmodul av typ A, B, C och D ska kunna fungera inom frekvenser som avviker från nominellt värde utan att kopplas bort från nätet är:

- 30 minuter inom frekvensområde 47,5–48,5 Hz
- 30 minuter inom frekvensområde 48,5–49,0 Hz
- obegränsad inom frekvensområde 49,0–51,0 Hz
- 30 minuter inom frekvensområde 51,0–51,5 Hz.

2§ En kraftproduktionsmodul av typ A, B, C och D ska förbli ansluten till nätet och fungera vid frekvensändringshastigheter upp till 2,0 Hz/s. Värdet på frekvensändringshastigheten ska vara uppmätt i anslutningspunkten och beräknas över en tidsperiod på 500 ms.

7§ Den maximala minskningen av den aktiva uteffekten till följd av sjunkande frekvens under 49,0 Hz ska vara 3 procent för varje 1 Hz för kraftproduktionsmoduler av typ A, B, C och D.

### 2.2.2 Spänningstålighet

Spänningståligheten regleras i EIFS 2018:2 3 kapitlet genom

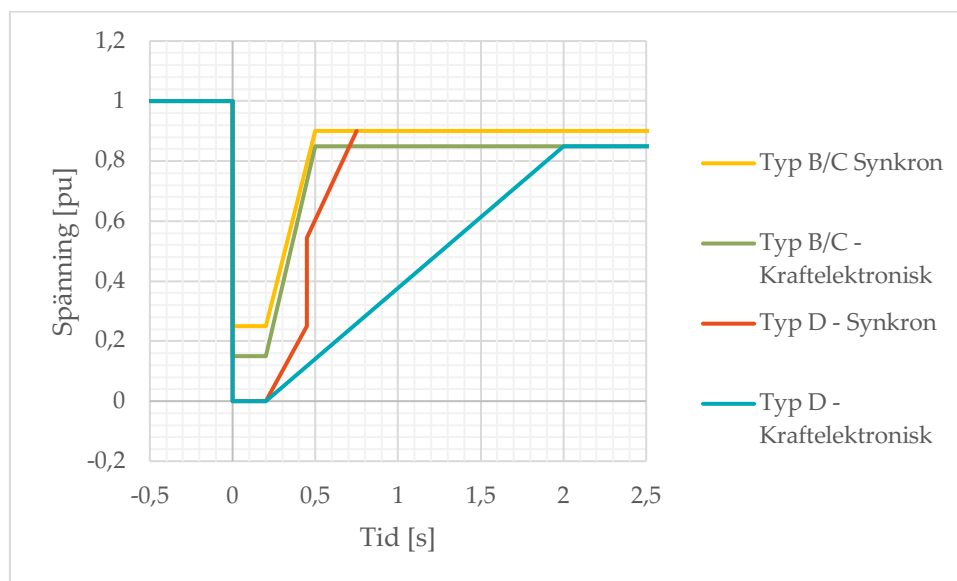
18 § Kraftproduktionsmodul av typ B, C och D ska kunna upprätthålla utmatning av aktiv effekt inom spänningsintervallet 90–105 procent spänning i anslutningspunkten

Detta innebär att inget direkt krav ställs på typ A, det vill säga produktionskällor under 1.5 MW.

### 2.2.3 Feltålighet och återhämtning av aktiv effekt efter fel

Enligt EIFS 2018:2, 3 kapitlet, krävs produktion av typ B och uppåt att de ska förbli anslutna till nätet med fortsatt stabil funktion efter ett fel i anslutningspunkten med spänningsprofil på felet utifrån produktionslag och typ.

De olika kraven skiljer sig åt om produktionskällan är synkron eller skilda från nätet med kraftelektroniska omriktare, dessutom är kravbilderna olika om produktionskällan är antingen typ B eller C, eller om den är av typ D. De olika krävda spänningsprofilerna visualiseras i Figur 2 nedan.



Figur 2: Kravställda feltålighetsprofiler för spänning enligt EIFS2018:2.

Gällande återhämtning av aktiv effekt efter fel ställer EIFS2018:2 kap 5 även krav på att också att kraftparksmoduler av typ B och uppåt ska kunna återhämta sin aktiva effekt efter fel inom 2 sekunder från det att spänningen i anslutningspunkten överstiger 90 procent. För synkrona kraftproduktionsmoduler gäller enligt EIFS2018:2 4 kapitlet att den aktiva uteffekten för typ B och uppåt ska ha återtagit samma nivå som innan fel inom 5 sekunder för fel som bortkopplas inom 100 ms.

Detta innebär att produktionsenheter mindre än 1,5 MW, vilka klassas som typ A, således inte har några krav i nätkoderna gällande feltålighet och återhämtning av aktiv effekt.

#### 2.2.4 Tillhandahållande av snabb felström

Felströmmen i systemet minskar när synkrona kraftproduktionsmoduler ersätts med annan generering. Genom att ställa krav för kraftparksmoduler på tillhandahållande av snabb felström kan felströmmen i systemet ökas. Snabb felström definieras enligt EU 2016/631 som; "en ströminmatning från en kraftparksmodul eller ett system för högspänd likström under och efter en spänningsavvikelse som orsakats av ett elektriskt fel, i syfte att fastställa ett fel med hjälp av elnätets skyddssystem i felets inledande skede och att ge stöd till bibehållen systemspänning i ett senare skede av felet och återställande av systemspänning efter att felet kopplats bort".

Enligt artikel 20.2 i EU 2016/631 ges rätten för den berörda systemansvarige tillsammans med den berörda systemansvarige för överföringssystemet att fastställa att en kraftparksmodul av typ B och uppåt ska tillhandahålla snabb felström både vid symmetriska och asymmetriska fel. Inga förtydliganden gällande kravet specificeras i EIFS 2018:2.



### 2.2.5 Upptäckta brister i nätkoderna gällande produktionskällor i mikronät

I många mikronät kan produktionskällor klassas som typ A vilket har visat sig sakna kravställning för flertalet funktioner som finns för typ B och uppåt. Detta lyfter behovet av att i det projektspecifika fallet undersöka vilka krav som behövs för produktionskällorna.

Gällande energilagrar i form av batterier reglerar EU2016/631 Artikel 3 paragraf 2 att kraftlagringsenheter är undantagna kraven i nätkoden om det inte rör sig om pumpkraftstationer.

Även i framtida mikronät kan det tänkas finnas en stor del produktionskällor med mindre installerad effekt och ett batterilager för att balansera nätet och bidra med felström, vilket lyfter behovet av att standardisera krav så de olika parterna har tydliga förhållningsregler.

Behovet av tydligare krav har även noterats av "European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators" (ACER) i deras Policy paper "*on the revision of the network code on requirements for grid connection of generators and the network code on demand connection*"<sup>2</sup>. För kravställning av typ A produktionsanläggningar lyfter ACER fram i paragraf 33 "Requirements for a type A PGMs", att dels en harmonisering av tröskelvärdena för Typ A/B kan hjälpa tillverkare av produktionsmoduler att lättare ta fram och sälja sina produkter i hela EU, och att en granskning av kravställningarna för typ A behövs. Här lyfts förmågor som feltålighet, återhämtning av aktiv effekt efter fel och "Active Power Control (APC)", men även Limited Frequency Sensitivity Mode – Underfrequency (LFSM-U) lyfts fram som tänkbart framtida område att kravställa.

ACER föreslår i rapporten genom paragraf 63 att en harmonisering av tröskelvärden mellan typ A och typ B genomförs och att utökad kravställning för typ A med områden såsom feltålighet och LFSM-U kan utöka driftsäkerheten ytterligare.

För energilagrar föreslår ACER genom paragraf 50 att det ska undersökas om samma krav som för produktionsmoduler ska tillämpas på energilagrar eller om särskilda krav för systemstabilitet behövs. I paragraf 65 rekommenderar ACER att en uppdaterad nätkod kan innehålla tekniska krav för energilagrar med hänsyn tagen till bland annat teknikval och konfiguration.

### 2.2.6 Exempel på hårdare kravställning av nätbolag och andra EU-medlemsländer

I europeiska kommissionens rapport "*Implementation of the network code on requirements for grid connection of generators*"<sup>3</sup> redovisas att det i dagsläget finns ett flertal medlemsländer i EU som har valt att ställa krav på funktioner för typ A

<sup>2</sup> ACER, 'ACER Policy Paper on the revision of the network code on requirements for grid connection of generators and the network code on demand connection', *Connection Codes* (26 September 2022), [https://acer.europa.eu/Position%20Papers/260908%20ACER%20GCNCs%20Policy%20Paper\\_final.pdf](https://acer.europa.eu/Position%20Papers/260908%20ACER%20GCNCs%20Policy%20Paper_final.pdf), hämtad 24 Maj 2023.

<sup>3</sup> Ali, M., Makki, E., Cazal, C. et al., European Commission, Directorate-General for Energy, (2021) Implementation of the network code on requirements for grid connection of generators – Final report. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/235293>.

generering såsom feltålighet trots att det inte är kravställt i EU2016/631. Generellt baseras dessa extra krav på standarden EN-50549, där European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) bland annat presenterar rekommenderade tekniska förmågor för typ A gällande feltålighet och LFSM-U (notera att det är rekommendationer och inte krav då den legala situationen gällande kravställning av områden som inte täcks in av EU2016/631 är tvistad om). Där presenteras också kravbild för bland annat överspänningar som vissa medlemsstater har valt att använda sig av. I Tyskland har man även valt att i nätkoderna för anslutning till hög- och mellanspänning ställa krav på att vid asymmetriska fel skall felströmsinmatning även ske med minusföljdskomponent<sup>45</sup>.

CENELEC specificerar också krav gällande energilager (till exempel LFSM-U), vilket inte anses stå emot EU2016/631 då energilager är frångått omfattningen av det dokumentet. I övrigt hanteras energilager i EN-50549 som en genererande enhet med krav (skall- och bör-krav) utefter det (med vissa specifika krav vid laddning). I Storbritannien ses även där energilager som kraftproduktionsmoduler när de arbetar som genererande enhet<sup>46</sup>.

### 2.3 SAMMANFATTNING AV KRAVBILD

Kraven på felbortkopplingssystemet i mikronätet sammanställs nedan i Tabell 2, både för drift mot nät och vid önätsdrift. Begreppen pålitlighet och säkerhet har hämtats från IEC 60050.

Tabell 2: Överblickstabell av de olika kravspecifikationerna med bör och skall krav.

Krav	Kopplat till nät	Önätsdrift med mikronät
	<b>Skall-krav</b>	<b>Skall-krav</b>
Känslighet jordfel	ELSÄK-FS 2022:1	Samma som vid drift mot nät
Beröringsspänning	ELSÄK-FS 2022:1 och SS-EN 50522	Samma som vid drift mot nät
Redundans	Skyddssystemet skall konstrueras för att kunna hantera ett primärt fel följt av ett fel i felbortkopplingssystemet	Samma som vid drift mot nät
Selektivitet	Ja	Ja, om möjligt och realistiskt att åstadkomma
Pålitlighet	Ja, baserat på praxis	Samma som vid drift mot nät
Säkerhet	Ja, baserat på praxis	Samma som vid drift mot nät
Tidskrav felbortkoppling	ELSÄK-FS 2022:1	Samma som vid drift mot nät

<sup>4</sup> Technical requirements for the connection and operation of customer installations to the medium voltage network (TCR medium voltage) English translation of VDE-AR-N 4110:2018-11.

<sup>5</sup> Technical requirements for the connection and operation of customer installations to the high voltage network (TCR high voltage) English translation of VDE-AR-N 4120:2018-11.

<sup>6</sup> Energy networks association (ENA), 'Engineering Recommendation G99 Issue 1 – Amendment 9 Requirements for the connection of generation equipment in parallel with public distribution networks on or after 27 April 2019', Connecting generation to the electricity networks (3 Oktober 2022), <https://www.energynetworks.org/operating-the-networks/connecting-to-the-networks/connecting-generation-to-the-electricity-networks>, hämtad 24 Maj 2023.

Gällande krav i nätkoderna för generering av typ A och energilager så skulle dessa kunna förtydligas på flera sätt men generellt kan man för ett mikronät tänka sig att antingen måste produktionskällorna kopplas från nätet vid fel för att undvika att de aktivt matar fel efter felbortkoppling av nätets skyddsfunktioner alternativt att det ställs krav på egenskaper som gör att produktionskällorna kan användas för att identifiera fel och bibehålla stabil funktion efter fel för att möjliggöra mikronät med selektiv frångkoppling och fortsatt drift efter fel i mikronätet. Detta skulle även kunna inkludera krav på injicering av minusföljdskomponent. Kravbilderna behöver även baseras på huruvida en spontan övergång till önätsdrift accepteras. Generellt lyfts behovet av harmoniserade krav på nationell nivå för att minska de projekt- och nätspecifika kraven.

## 3 Mikronätets egenskaper

### 3.1 FELSTRÖMSINMATNING FRÅN OLIKA TYPER AV KÄLLOR

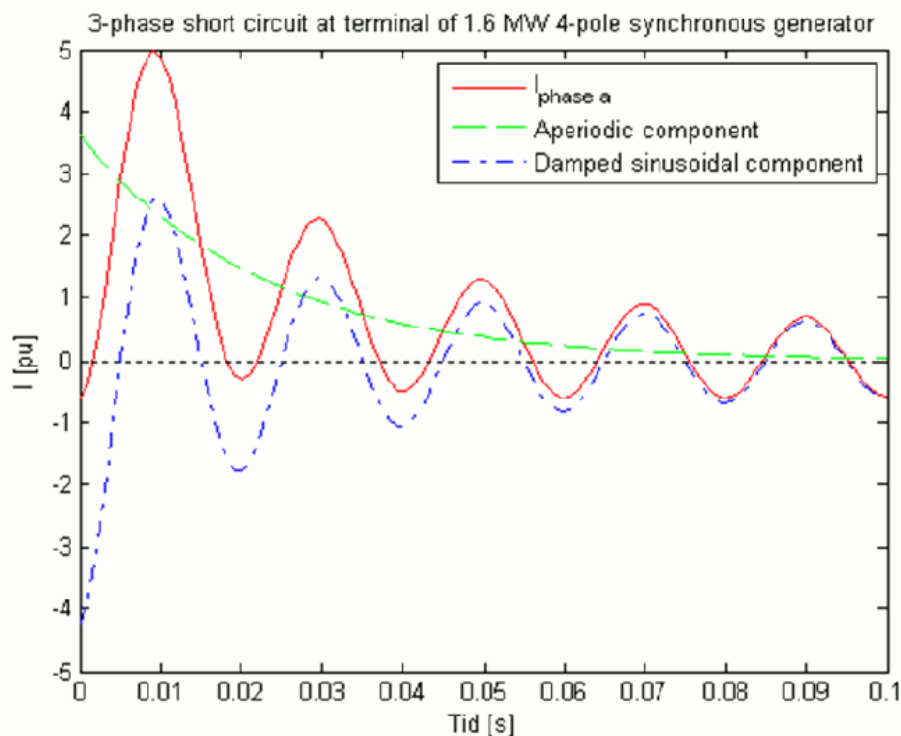
För att kunna identifiera de utmaningar och svårigheter som kan föreligga med avseende på felbortkoppling i mikronät är det relevant att först studera hur felströmsinmatningen från olika källor ser ut. I nedanstående kapitel beskrivs felströmsbidrag från olika källor vid fel beläget nära respektive kraftproduktionsmoduls anslutningspunkt.

#### 3.1.1 Synkrogeneratorer

Synkrogeneratorer karakteriseras av att de är direktanslutna till nätet och roterar synkront med nätfrekvensen. Vid fel nära generatorklämmorna kommer synkronmaskinen på grund av spänningsskillnaden mellan klämmorna och den interna spänningen att ge ifrån sig en hög felström. Felströmmen innehåller en dc-komponent och dess totala amplitud är betydligt högre än synkrogenerators märkström. Den initiala felströmmens AC-komponent (effektivvärde) kan typiskt vara cirka 4–7 gånger högre än generatorns märkström. DC-komponentens storlek beror när felet inträffar, det vill säga vid vilken fasvinkel, och är maximalt ca 2,8 gånger av initiala felströmmens effektivvärde. DC-komponentens avklingning beror på R/X-förhållandet. AC-komponenten ges av den interna spänningen innan fel samt synkrogenerators reaktanser och tidskonstanter. Nedan i Figur 3 visas ett exempel på felström från en 1,6 MW synkrogenerator vid trefasig kortslutning vid generatorklämmorna<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.

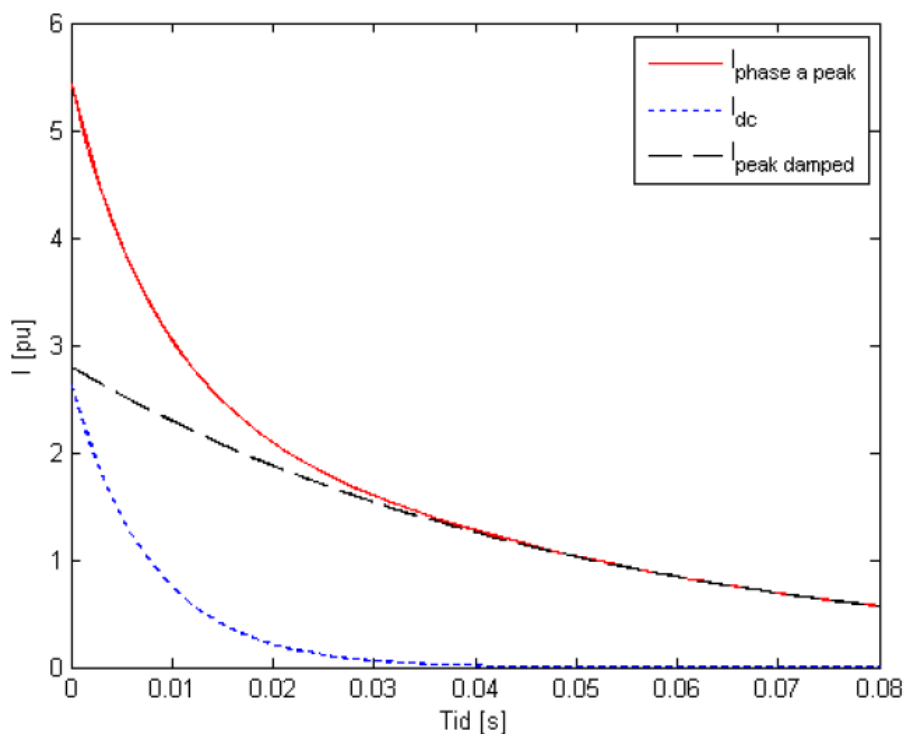


Figur 3. Felström från en 1,6 MW synkrongenerator vid trefasig kortslutning på generatorklämmorna<sup>8</sup>.

### 3.1.2 Asynkrongeneratorer

Asynkrongeneratorm karakteriseras av att den är direktansluten till nätet men att rotorn roterar med en viss negativ eftersläpning. Felströmsbidraget från en asynkrongenerator vid fel på generatorklämmorna är snarlikt felströmsbidraget från synkrongeneratorm. Felströmmen begränsas av reaktanserna och dess tidskonstanter. Den initiala felströmmen är typiskt cirka 4–7 gånger asynkrongeneratorms märkström. Nedan i Figur 4 visas ett exempel på felströmsbidrag från en asynkrongenerator<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.



Figur 4. Felströmsbidrag i en fas från asynkrongeneratoren vid trefasig kortslutning på generatorklämmorna<sup>9</sup>.

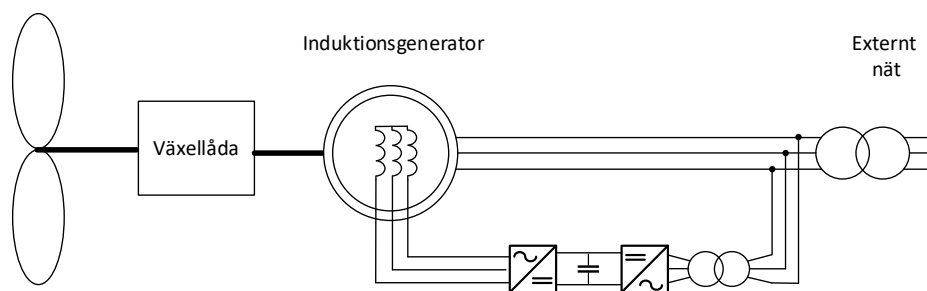
### 3.1.3 Vindkraftgeneratorer

Historiskt har det förekommit olika lösningar för att ansluta vindkraftturbiner till elnätet där de tidiga lösningarna var baserade på direktanslutna generatorer. De vindkraftgeneratorer som är aktuella vid installation idag är främst av typen doubly-fed induction generator eller fulleffektomriktare. Dess egenskaper med avseende på felströmsinmatning beskrivs nedan.

#### *Doubly-fed induction generator*

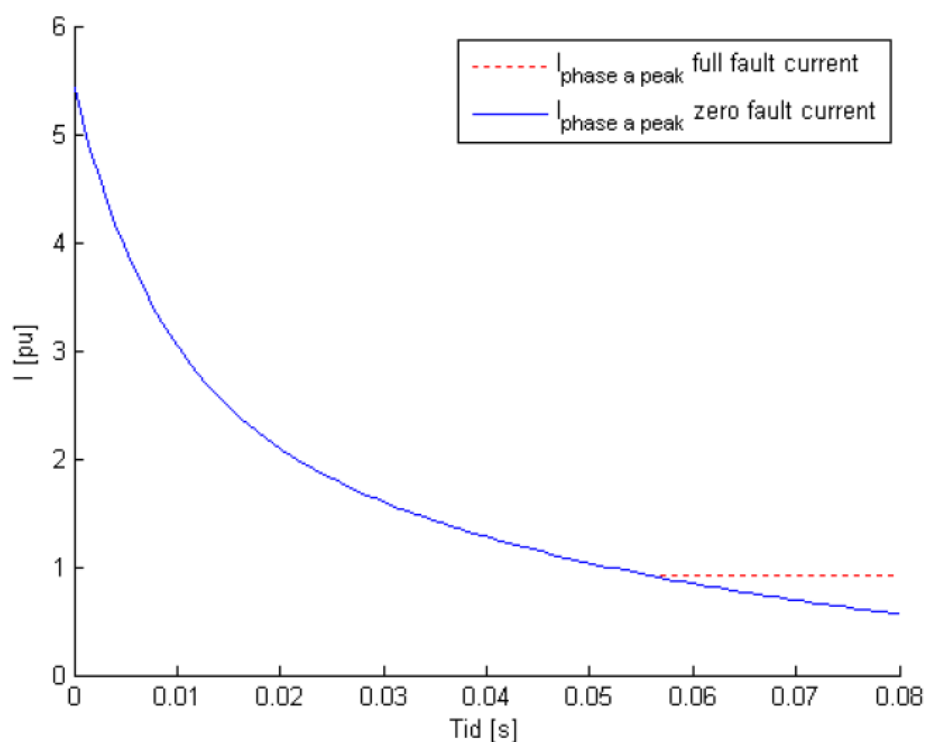
DFIG (doubly-fed inductor generator) består av en induktionsgenerator där statorn är direkt ansluten till nätet medan rotorn ansluts genom en kraftelektronisk omvandlare. Principen visas nedan i Figur 5. Lösningen medför att vindturbinen kan rotera med ett varvtal som avviker något från nätfrekvensen.

<sup>9</sup> L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.



Figur 5. Schematisk bild av doubly-fed inductor generator där rotorn ansluts via en kraftelektronisk omvandlare<sup>10</sup>.

Eftersom statorn är direkt ansluten till nätet blir felströmmens subtransienta del vid fel på generatorklämmorna liknande den subtransienta delen för en asynkrongenerator. När felströmmen har sjunkit till cirka 1–1,5 gånger märkström så kan dock felströmmens amplitud avvika jämfört med asynkrongeneratorn. Detta beror på huruvida kraftelektronikomvandlaren är konfigurerad för att bibehålla en felströmsinmatning kring 1–1,5 gånger märkström eller inte varpå felströmmen istället avtar. Felströmmens karakteristik i en fas vid en trefasig kortslutning på generatorklämmorna visas nedan i Figur 6<sup>10</sup>.



Figur 6. Felströmsbidrag i en fas från DFIG vid trefasig kortslutning på generatorklämmorna<sup>10</sup>.

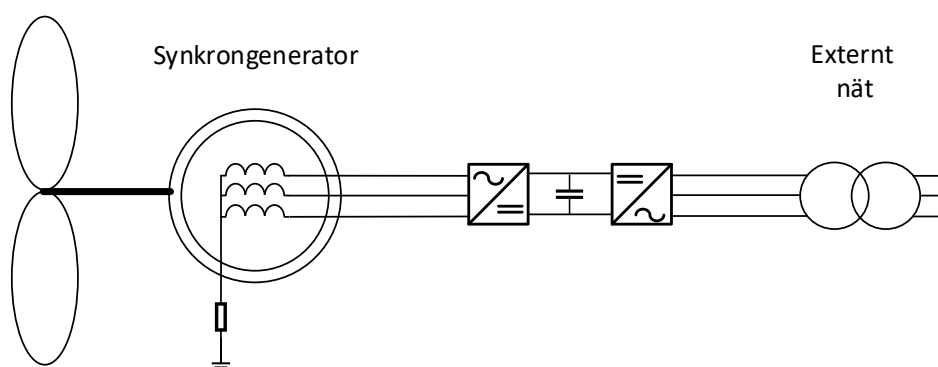
På grund av den magnetiska kopplingen mellan rotor och stator så kan det vid kortslutning induceras en spänning i rotorn som driver en hög ström i rotorn.

<sup>10</sup> L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.

Kraftelektroniken, som rotorn är ansluten via, riskerar därmed att utsättas för denna höga ström. Två vanliga typer av skydd mot detta är dels en så kallad DC Chopper vilket är en resistans i DC-mellanledet och dels en crowbar vilket är en tyristorkontrollerad resistans som ansluts till rotorkretsen. DC chopper begränsar överspänningar i DC-mellanledet medan crowbar kan kopplas in för att förhindra att höga strömmar flyter genom omriktaren. Om crowbar kopplas in och ur flera gånger under felförloppet så erhålls ett felströmsbidrag vars karakteristik avviker från sinusform och är svår att förutspå. Detta kan vara ett problem för impedansmätande skydd<sup>11</sup>.

#### *Fulleffektomriktare*

Vindkraftgenerator ansluten via fulleffektomriktare visas schematiskt nedan i Figur 7. Lösningen medför att vindturbinens varvtal helt skiljs från nätfrekvensen samtidigt som det blir möjligt att styra spänning och reaktiv effekt på nätsidan av omriktaren.



Figur 7. Schematisk bild av vindkraftgenerator ansluten via fulleffektomriktare till nätet<sup>12</sup>.

Felströmsbidraget från en fulleffektomriktare är typiskt begränsat till 1–1,5 gånger märkström. Det kan även finnas funktionalitet i omriktaren som ger prioritet för felströmsinmatning vid detektering av fel, dock fortfarande med begränsad amplitud<sup>12</sup>. Felströmmens karakteristik beskrivs mer ingående i avsnitt 3.1.6.

#### 3.1.4 Solcellsanläggningar

Solcellsanläggningar ansluts via fulleffektomriktare eftersom solcellerna genererar likspänning. Felströmsbidraget är liknande vindkraftverk som ansluts via fulleffektomriktare<sup>11</sup>. Felströmmens karakteristik beskrivs mer ingående i avsnitt 3.1.6.

#### 3.1.5 Energilager med batterier

Energilager med batterier ansluts via omriktare till elnätet. Därmed bedöms felströmmens karakteristik bli liknande den som uppträder från distribuerad

<sup>11</sup> Short circuit contribution of new generating units connected with power electronics and protection behaviour, ENTSO-E, 2019.

<sup>12</sup> L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.



generering som ansluts via omriktare vilket beskrivs i avsnitt 3.1.6. Det bör dock i sammanhanget nämnas att batteriets State of Charge (SoC) kan påverka den tillgängliga felströmmen från batteriet<sup>13</sup>. Dock kan omriktaren fortfarande utgöra en flaskhals med hänsyn till dess termiska begränsningar.

### 3.1.6 Felströmsinmatning från omriktaransluten generering med varierande effekt (sol och vind)

Enligt tidigare beskrivning så är felströmmen från en omriktare typiskt begränsad till 1-1,5 gånger dess märkström. Detta gäller dock för den tidsperiod av felströmmen där omriktarens kontrollenhet har hunnit begränsa felströmmen så att de i omriktaren ingående komponenternas termiska tålighet inte överskrids. Om omriktaren är bestyckad med kondensator i DC-mellanledet så kan felströmmen initialt vara ännu högre, upp till över 2 gånger märkström under en transient period. Förekomsten av kondensator i DC-mellanledet frikopplar även feldynamiken från variationer i solinstrålning och vindhastighet<sup>14</sup>. Under den transienta perioden är det svårt att förutse strömkurvans utseende då den typiskt avviker från sinusform. Detta kan leda till mätfel i impedansmätande skydd<sup>15</sup>.

När det gäller sekvensinnehållet i felströmsbidraget vid asymmetriska fel så är minusföljdskomponentens amplitud minimal<sup>14</sup>. Många europeiska nätkoder ställer inte heller krav på felströmsinmatning innehållandes minusföljdskomponent vid asymmetriska fel. Funktionaliteten är dock möjlig att implementera i omriktarnas kontrollenheter. Avsaknad av minusföljdskomponent kan påverka prestandan för impedansmätande skydd om skydden använder algoritmer baserade på minusföljdskomponent för att identifiera felbehäftade faser.

Till skillnad mot synkrogeneratorn sker felströmsinmatningen från omriktaransluten generering med en dynamisk fasvinkel som kan variera under felförloppet och anta resistiv, induktiv eller kapacitiv karaktär. Detta kan leda till negativ påverkan på riktade skydd där fasvinkeln används för att identifiera riktningen<sup>16</sup>.

<sup>13</sup> Saleh A. Saleh et al., On the factors affecting battery unit contributions to fault currents in grid-connected battery storage systems, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 58 2022.

<sup>14</sup> J Quispe et al., Transmission line protection challenges influenced by inverter-based resources: a review, , Protection and Control of Modern Power Systems 2022,7.

<sup>15</sup> Short circuit contribution of new generating units connected with power electronics and protection behaviour, ENTSO-E 2019.

<sup>16</sup> Aboutaleb Haddadi et al., Impact of inverter based resources on system protection, Energies 2021,14.

### 3.2 MIKRONÄTETS UPPBYGGNAD OCH ANSLUTNING

Begreppet mikronät är ingen renodlad term för en definierad nättopologi, utan varje mikronät kan vara unikt till utformningen. Uppdelning och klassificering av mikronät skulle exempelvis kunna göras utifrån antal kunder, mängden distribuerad generering, typ av generering och typ av nät som ingår i mikronätet. I detta projekt avser begreppet mikronät ett distributionsnät eller en del av ett distributionsnät som har en radial anslutning till överliggande nät. Delen av mikronätet som ansluter till överliggande nät antas vara ett mellanspänningsnät, t.ex. ett 10 kV nät som är jordat med Petersenspole och nollpunktmotstånd.

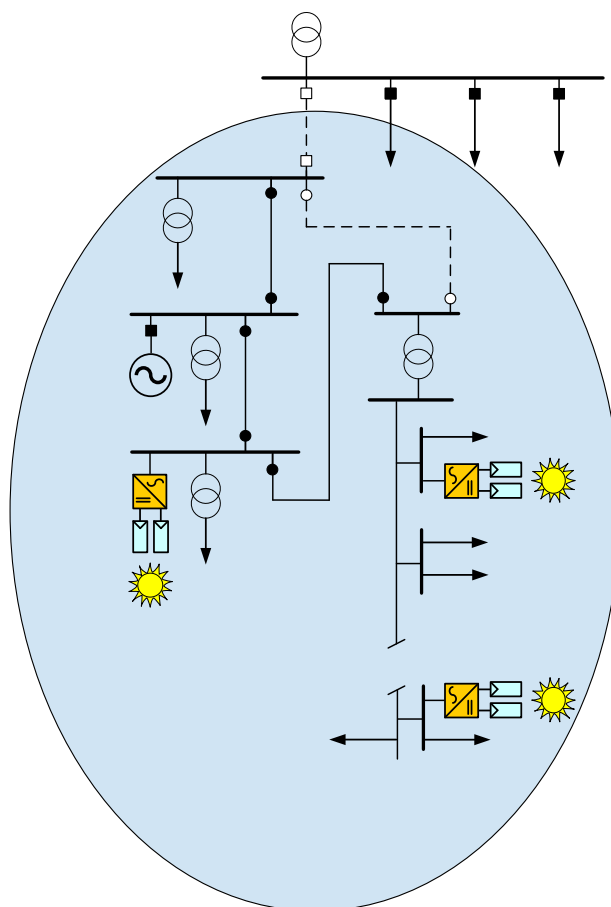
I begreppet mikronät antas att dessa nät skall vara små beträffande lasteffekt och geografisk utbredning. Utomlands, exempelvis i utvecklingsländer, kan begreppet mikronät avse ett mindre önät som alltid drivs i önätsdrift då utbyggnadsgraden för det centrala kraftsystemet är låg alternativt att mikronätet ligger i ett geografiskt svåråtkomligt område.

I Sverige är det troligen hela eller delar av befintliga distributionsnät som skulle kunna bli aktuella att driva som mikronät i framtiden. Med utbyggnad av distribuerad generering i dessa nät fås möjlighet till önätsdrift som i sin tur minskar behovet av förstärkning eller upprustning av radiell matning från det yttre kraftsystemet. I dagsläget kan det vara så att etablering av små industrier i glesbygd begränsas av risk för elavbrott i befintliga distributionsnät. Många småindustrier är beroende av tillförlitlig elförsörjning. Etablering av mikronät kan troligen möjliggöra betydligt ökad leveranssäkerhet i många fall.

Ofta antas att distribuerad generering i mikronät kommer att utgöras av vindkraft och solceller. Ett alternativ till detta skulle kunna vara att etablera mikronät där småskalig vattenkraft, upp till ca 2 MW, redan existerar. Detta möjliggör enklare önätsdrift beträffande effekt- och spänningsreglering. Vidare förenklas etablering av omriktaransluten generering såsom vind och sol. Detta projekt antar att mikronäten kan innefatta både en kombination av synkronmaskinbaserad generering och omriktaransluten generering samt endast omriktaransluten generering.

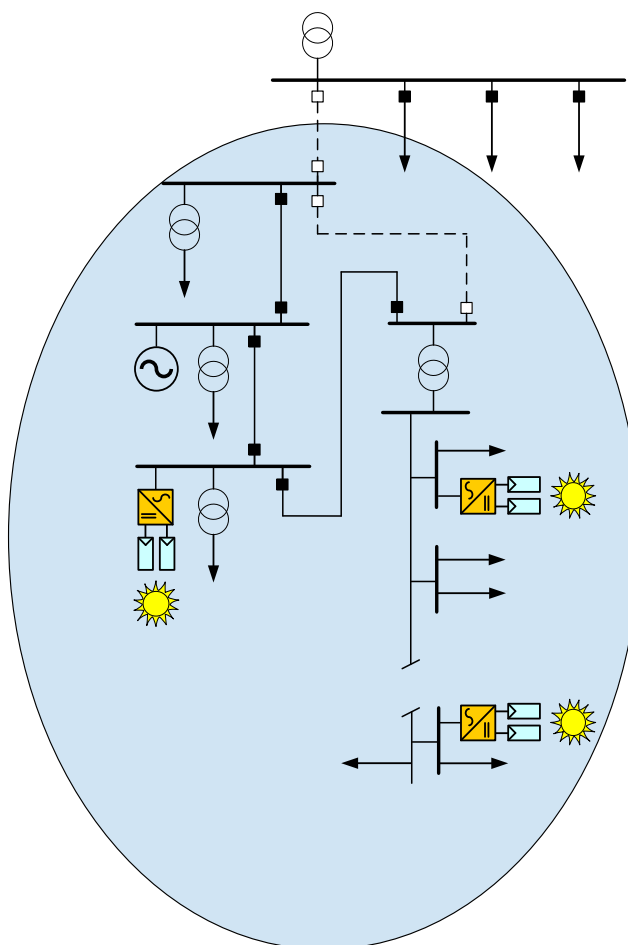
Det är inte möjligt att beskriva mikronät utan att beröra kommunikationssystem, vilket är en förutsättning för att ett mikronät skall kunna fungera. Kommunikationen kan bygga på en rad olika tekniska lösningar. Förutsättningar för kommunikationssystemet beskrivs vidare i kapitel 3.3.

Vilken typ av nät som ingår kan påverka skyddsutformningen då det i landsbygdsnät kan finnas begränsat antal kopplingsorgan. Detta illustreras nedan i Figur 8. Med denna typ av nät blir det svårt att uppnå selektiv bortkoppling av fel på mellanspänningsnivå då det begränsade antalet effektbrytare medför att felet leder till nedsläckning.



**Figur 8. Exempel på mikronät med få effektbrytare (kvadrat) och flera frånskiljare (cirkel) på mellanspanningsnivå inom mikronätet.**

Om antalet brytställen i stället hade varit fler, se Figur 9 nedan, så finns helt andra möjligheter att uppnå selektiv bortkoppling av fel på mellanspanningsnivå inom mikronätet. Således är topologin viktig då den påverkar förutsättningarna för felbortkopplingsystemet och varje fall kan anses vara unikt. Antalet brytställen kan även antas skilja sig mellan gamla och nya nät samt även beroende på var nätet är beläget, exempelvis ute på landsbygden. I kapitel 5 analyseras därför felbortkopplingsystem som lämpar sig både för nät med få brytställen på mellanspanningsnivå respektive nät där antalet brytställen är betydligt fler på mellanspanningsnivå.



Figur 9. Exempel på mikronät med ett större antal effektbrytare (kvadrat) på mellanspänningsnivå i mikronätet.

När det gäller felbortkopplingsystemet så behöver hänsyn tas till att felströmsinmatning kan ske på många olika ställen i distributionsnätet vilket kan leda till oönskad bortkoppling av friska delar av nätet såvida inte felbortkopplingsystemet är anpassat för distribuerad felströmsinmatning<sup>17</sup>. Vidare kan även kortslutningseffekten antas vara låg vid önätsdrift. Detta kan vara utmanande dels för felbortkopplingsystemet samt dels för balansen i nätet vid lastförändringar, exempelvis motorstart.

Ett etablerat begrepp inom kraftsystem är "N-1" kriterium, vilket oftast syftar på att systemet skall kunna drivas vidare inom givna gränser efter att ett fel har inträffat. När det gäller mikronät så kan innebörden av detta tolkas på flera olika sätt. Exempelvis om mikronätet har övergått i önätsdrift efter ett fel i överliggande nät så skulle detta fel kunna utgöra "N-1" felet. Om mikronätet däremot är av större karaktär, som möjliggör selektiv bortkoppling av fel inom mikronätet vid önätsdrift, och skall kunna drivas i önätsdrift en längre period så kan det tolkas som att mikronätet bör kunna drivas vidare efter ett fel i önätsdrift. Detta blir dock en filosofisk fråga då ett sådant fel kan utgöra "N-2". Vid långvarig önätsdrift kommer dock "N-2" att återgå till "N-1" efter en tidsperiod. Det finns dock ingen

<sup>17</sup> L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.

entydig definition av hur lång önätsdriften behöver vara för att ett nytt fel skall anses vara "N-1".

Beroende på vilka acceptanskriterier som tillämpas av nätbolagen för olika mikronät så kan det vara acceptabelt med ett kortare avbrott i samband med fel inom mikronätet vid önätsdrift. Detta torde dock främst vara aktuellt för fel på mellanspänningsnivå.

Vid jordfel finns det en risk att spännings- och frekvensbalans uppstår mellan distribuerad generering och jordfelet när yttre nät har kopplats bort. Detta kan leda till både person- och anläggningsskador. Det behöver därför säkerställas att distribuerad produktion inte förblir inkopplad och fortsätter att mata jordfelet<sup>18</sup>, alternativt att felbehäftad anläggning (t.ex. ledning) fränkopplas.

### 3.2.1 Planerad fränkoppling från överliggande nät

Mikronätet antas kunna drivas i önätsdrift efter en avsiktlig fränkoppling från överliggande nät. Detta kan teoretiskt ske på två olika sätt, antingen fränkoppling medelst avbrott följt av dödnätstart eller en sömlös övergång till önätsdrift utan avbrott för kunderna. Med planerad fränkoppling avses i föreliggande rapport att den radiella anslutningen mellan överliggande nät och mikronätet bryts avsiktligt. Troligtvis kan detta ske genom att genereringen i mikronätet styrs så att nollutbyte med det externa nätet erhålls varpå fränkoppling sker.

Automatik och kommunikation som erfordras för att kunna upprätthålla spännings- och effektbalans förutsätts finnas på plats i detta projekt. Dock behöver föreslagna skyddslösningar fungera både vid ansluten drift mot överliggande nät samt vid önätsdrift.

### 3.2.2 Oplanerad fränkoppling från överliggande nät

En oplanerad fränkoppling från överliggande nät kan ske vid fel i överliggande nät, avvikande spänning och frekvens eller fel på anslutningen till överliggande nät. Detta är komplicerat att analysera då det i princip, beroende på hur nätet ser ut, finns ett stort antal olika felfall där olika delar av överliggande nät respektive mikronätet hamnar i önätsdrift beroende på var bortkopplingen sker. Samtidigt behöver det även säkerställas att den distribuerade genereringen inte fortsätter att spänningssätta felstället.

## 3.3 KOMMUNIKATION

Övervakning och styrning av ett mikronät, men även automatisering och felbortkoppling baserat på avancerade och nya funktioner kräver etablering av kommunikation från driftcentralen till olika noder / stationer / anslutningspunkter men även inom själva mikronätet mellan olika enheter (så kallad M2M – Machine to Machine kommunikation).

<sup>18</sup> L Messing et al., Jordfelsdetektering i mellanspänningsnät, Energiforsk rapport 2015:158

I dagsläget är normalt sett kontroll, styrning och övervakning av distributionsnät baserat på den information som samlas in av enheter placerade i fördelningsstationer eller till en begränsad utsträckning i lokalnätstationer och förmedlas till driftcentralen. Eventuella centrala enheter för styrning av mikronät tillämpas naturligt, men begränsat till vissa enstaka pilot- och forskningsprojekt.

Mikronätkonceptet som möjliggör för integrering av förnybara energikällor har utvecklats på senare tid till smart mikronätkonceptet. För att möta den snabbt växande energiefterfrågan kan mikronätet och dess kommunikationssystem vara en möjlig lösning. Kommunikationssystemet behöver vara utformat för att säkerställa informationsöverföring med erforderlig prestanda relaterat till den nya distribuerade generering som tillkommer mer och mer på region- och lokalnättnivå. Intelligent enheter som reläskydd, lokala kontroller och olika styrsystem för kraftelektronik inom ett mikronät behöver en infrastruktur för utbyte av information och koordinering av funktionalitet. Detta gäller både mellan enheter men även mot överordnade övervaknings- och styrsystem. Framsteg inom mikronätforskningen har utvecklat mikronätkonceptet från klassiska, rent mikronätkraftnät till mer avancerade kraft- och kommunikationsnätverk. Kommunikationsinfrastrukturen hjälper till att kontrollera och hantera den opålitliga effekt som de flesta kraftgenereringselement i mikronät (t.ex. vindturbiner och solcellspaneler) levererar, direkt till deras styrsystem och höjer övervakningsnivå och styrbarhet av elementen (brytare, lastfrånsljare, etc.) som definierar mikronätets topologi. Även om kommunikationsteknologier erbjuder vissa fördelar för övervakning och kontroll, genererar de andra komplikationer på grund av t.ex. paketförlust och paketfördröjning.

Detta kapitel fokuseras på kommunikationens inverkan på mikronätets prestanda gällande felbortkoppling, och redovisar olika krav för datautbyte och systemsvar i ett felbortkopplingssystem för olika element av nätet. Med fokus på den nivån - för att säkerställa återställandet av elektriska parametrar - identifieras standarder, nätverksprotokoll och kommunikationstekniker som är relevanta för interoperabilitet mellan mikronät och överliggande nät eller delar av mikronätet, inklusive båda driftlägena: önätsdrift och nätansluten drift.

Kapitlen presenterar och exemplifierar teoretiska tillvägagångssätt och praktiska implementeringar som tar hänsyn till effekterna av kommunikationsnätverket på mikronätets allmänna prestanda.

### 3.3.1 Kommunikationsnätverksarkitektur och överföringsmedia

För stabil drift av mikronätet och pålitlig strömförsörjning är korrekt koordination mellan de intelligenta elektroniska enheterna (IED) nödvändig. Samordning mellan effektbrytarna hjälper till att isolera felet i elnätet. Det är nödvändigt att använda en kommunikationsbuss och upprätthålla ett standardkommunikationsprotokoll över det distribuerade kraftnätet. Flera samordningsmetoder och selektivitetstekniker föreslås med hjälp av smarta IED. För tillförlitlig strömförsörjning kommer de element som finns i kraftnätet och kommunikationsnätet att ha redundanta element på strategiska platser med hög vikt som ges för snabbare realtidskommunikation.

Mikronätfältelementen, såsom tex. sol-, vind- och vattenkraft), batterilagringsanläggningar och laster samt nätstationer utbyter information med varandra. Kommunikationsnätverken kan vara trådbundna eller trådlösa.

#### *Trådbundet kommunikationsnätverk*

1. PLC(Power Line Carrier): Det finns flera olika PLC bärfrekvens-teknologier och protokoll – i det här fallet övervägs "narrowband PLC", en uppsättning tekniker som kan uppnå bithastigheter på cirka 2-130 kbps, på låg-, mellan- och högspänningsnät.
2. BPL (Broadband Power Line): I början utsågs BPL som en lösning för bredbandsinternet i hem och kontor. Idag finns det begränsade tillämpningar av BPL för internettjänster, men mikronätet representerar en relevant nisch som skulle kunna erbjuda tillväxtmöjligheter.
3. Optisk fiber: En kraftfull kommunikationsteknik baserad på optiska fiberkablar med mycket hög bandbredd och mycket låga fördröjningar. Att bygga upp ett fiberoptiskt nätverk är relaterat till kostsamma infrastrukturinvesteringar, men fler och fler fiberoptiska nätverk används, främst för internetanvändning men även för nätbolags egna WAN utbyggnader.

#### *Trådlösa kommunikationsnätverk*

1. Private Wireless , RF – Radio Frequency/Radiolänk : Nätverksteknik med mest dragkraft i USA idag, tillhandahålls av ett antal mikronät-specialister.
2. Private Wireless , Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth;
3. Public Wireless (LTE/3G/4G/5G/GSM/GPRS) Det tredje mest populära alternativet för mikronätskommunikation på senare år.

Trådlösa kanaler är mer mångsidiga än trådbundna eftersom de är ekonomiskt lönsamma och skalbara genom att helt enkelt inkludera nya noder och routrar utan extra installation av kablar. Mobilnätverk (3G, 4G och snart 5G) är robusta tekniker men fungerar i licensierade radiofrekvenser. Därför innebär användningen av dessa tekniker genom tredjepartsanläggningar en hög driftskostnad. Därför har tekniker som Wi-Fi eller ZigBee bättre kostnads-nyttoförhållande. Men eftersom dessa trådlösa tekniker använder olicensierade frekvenser är de mer mottagliga för störningar, krav på siktlinje och säkerhetsfrågor, vilket kan resultera i en hög varians i latens och dataförluster.

I nedanstående Tabell 3 och Tabell 4 sammanställs de tekniska detaljerna för de olika trådbundna och trådlösa tekniker som föreslås för mikronätskommunikation. Fördelar och nackdelar för de olika teknikerna i samband med mikronät identifieras och kommunikationsteknikens lämplighet för olika applikationer i mikronät listas. Utöver detta behöver även IT-säkerhetsbegränsningar beaktas.

Tabell 3. Sammanställning av tekniska detaljer för olika kommunikationsteknologier.

Typ	Teknologi	Maximal täckning	Bredband	Frekvens
Trådbundna	Optisk fiber	100 km	10 Mbps -100 Gbps	Ljus
	Partvinnad kabel	<500 m	10 Mbps – 10 Gbps	<25 MHz <500 MHz
	Frekvensbärare (BPL)	<10 km	5 – 15 Mbps	1 – 50 MHz
	Frekvensbärare (PLC)	<50 km	2 – 130 kbps	5-95 kHz
Trådlösa	Radiolänk - RF	<20 km	100 – 400kbps	900 MHz / 2400 MHz
	Mobilnät 3G	50 km	<20 Mbps	800/850/900/ 1800/1900/2100 MHz
	Mobilnät 4G	50 km	<100 Mbps	2600 MHz
	Mobilnät 5G	50 km	<10 Gbps	<6 GHz
	Wi-Fi	100 m	11 Mbps - 10 Gbps	2,4/5,9 GHz
	ZigBee	100 m	250 kbps	2,4 GHz
	Bluetooth	100 m	1 Mbps	2,4 GHz



Tabell 4. Sammanställning av fördelar, nackdelar och applikationer för olika kommunikationstekniker vid tillämpning i mikronät.

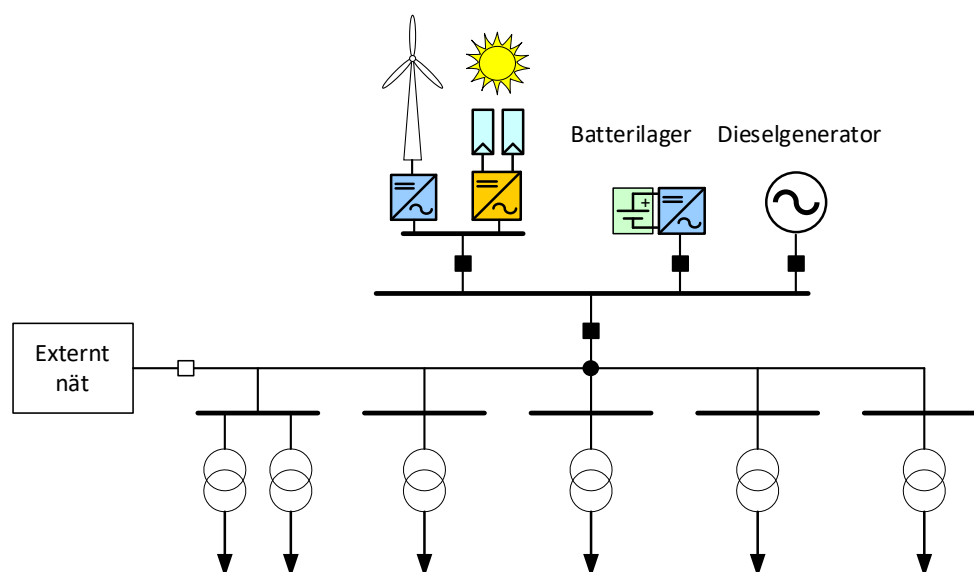
Typ	Teknologi	Fördelar	Nackdelar	Applikationer
Trådbundna	Optisk fiber	- Hög hastighet - Låg interferens - Låg fördröjning / svarstid (latency)	- Kostsam teknologi - Komplex skalbarhet - Relativ hög förvaltningskostnad	- Felbortkopplings-system - Spännings- och frekvensstyrning
	Partvinnad kabel	- Enkelt installation - Enkel konfiguration	- Högre kostnader med ökad kapacitet	- Felbortkopplings-system - Spännings- och frekvensstyrning
	Frekvensbärare (PLC och BPL)	- Låg implementeringskostnad - HomePlug kompatibel	- Fast topologi med punkt-till-punktanslutningar  - Komplex skalbarhet	- Styrning av effektflödet - Icke tidskritisk spännings- och frekvensreglering - Apparatmanövrar och styrning, driftuppbyggnad
Trådlösa	Mobilnät 3G	- Byggt för datapaketöverföring - Faciliteter för andra applikationer (t.ex telefoni)	- Höga driftkostnader  - Låga QoS-tal	- Icke tidskritisk spännings- och frekvensreglering - Apparatmanövrar och styrning, driftuppbyggnad
	Mobilnät 4G	- Byggt för datapaketöverföring och TCP/IP trafik och Intranet applikationer - Faciliteter för andra applikationer	- Höga driftkostnader  - Låga QoS-tal	- Icke tidskritisk spännings- och frekvensreglering - Apparatmanövrar och styrning, driftuppbyggnad
	Mobilnät 5G	- Byggt TCP/IP trafik och Intranet applikationer - Faciliteter för andra applikationer - Låg svarstid och fördröjningar	- Begränsad täckning - Ny teknologi	- Icke tidskritisk spännings- och frekvensreglering - Apparatmanövrar och styrning, driftuppbyggnad

Typ	Teknologi	Fördelar	Nackdelar	Applikationer
Trådlösa	Wi-Fi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Billigare teknologi</li> <li>- Enklare konfigurering</li> <li>- Bra skalbarhet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Känslig för störningar</li> <li>- Högre kostnader för IT-säkerhet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Styrning av effektflödet</li> <li>- icke tidskritisk spännings- och frekvensreglering</li> <li>- Apparatmanövrar och styrning, driftåteruppbyggnad</li> </ul>
	ZigBee	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Billigare lösning</li> <li>- Lågeffekt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Låghastighet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Styrning av effektflödet</li> <li>- icke tidskritisk spännings- och frekvensreglering</li> <li>- Apparatmanövrar och styrning, driftåteruppbyggnad</li> </ul>
	Bluetooth	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Billigare teknologi</li> <li>- Lågeffekt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dålig täckning och väggpenetrering</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Icke tidskritisk spännings- och frekvensreglering (inom 0,5 – 3 s)</li> <li>- Apparatmanövrar och styrning, driftåteruppbyggnad</li> </ul>

## 4 Erfarenheter av felbortkoppling i mikronät

### 4.1 E.ON SIMRIS

I den skånska byn Simris har E.ON under år 2017–2019 drivit en testanläggning av förnyelsebara energikällor och test av mikronät för att demonstrera hur ett nät med upp till 100% förnyelsebara generationskällor hade kunnat se ut. En översiktlig bild av nätet visas i Figur 10 nedan.



Figur 10: Översiktsbild av nätuppbyggnaden i Simris.

Mikronätet i Simris designades som ett tillägg på redan befintligt nät. Där 150 kunder redan fanns i distributionsnätet fördelade över 5 olika ställverk. Simris matas från det överliggande nätet på 10 kV-sidan av en 20/10kV-station. För att skapa mikronätet har ett så kallat lokalt energisystem designats. Detta består utöver den förnyelsebara produktionen i området även av ett 0,33 MWh / 0,8 MW energilager, baserat på batterier, som agerar som spännings- och frekvensreferens (så kallad grid forming) och för balanskraft. Utöver detta finns en biodiesलगenerator på 0,48 MW som reserv vilken startas automatiskt av kontrollsystemet om energinivån hos batteriet går under en specificerad nivå. Kontrollsystemet kan hantera att styra nätet så det är i virtuell önätsdrift genom att styra BESS-enhetens referensvärden för aktiv och reaktiv effekt så att utbytet med överliggande nät blir noll. Mikronätet kan även gå över till verklig önätsdrift genom att först ingå i virtuell önätsdrift, med nollutbyte med yttre nät, för att sedan koppla bort det överliggande nätet. Simris har inte designats för att hantera plötslig oplanerad önätsdrift ("unintentional islanding").<sup>19</sup>

<sup>19</sup> H. Wilms et al., "Microgrid Field Trials in Sweden: Expanding the Electric Infrastructure in the Village of Simris," in IEEE Electrification Magazine, vol. 6, no. 4, pp. 48-62, Dec. 2018, doi: 10.1109/MELE.2018.2871295.

#### 4.1.1 Utformning av skyddssystem

I nätanslutet läge kopplar skydd i matande station bort kortslutningar.<sup>20</sup>

I önätsdrift bygger skyddssystemets utformning i Simris på principen att all felström matas från samma ställverk. Ett riktat överströmsskydd på utgående fack från det matande ställverket blir det primära skyddet mot kortslutningar i mellanspänningsnätet. Som reserv finns ytterligare ett riktat överströmsskydd i facket med kopplingen till BESS. För fel vid lågspänningssidan hos produktionskällorna (vind och sol) så skyddas dessa primärt av ett eget riktat överströmsskydd, även i denna situation agerar skyddet hos facket till BESS som reserv. Reservgeneratoren skyddas primärt genom inbyggda skydd (säkringar) samt av ett överströmsskydd i kopplingsfacket, primärt tänkt som reserv ifall säkringarna ej löser ut i önätsdrift. För fel i lågspänningsnätet mot kunder skyddas detta primärt av säkringar med god marginal inom ansatta kravtider även i önätsdrift. Bidragen från den distribuerade genereringen, i form av solpaneler, har bortsetts från i utredningen.<sup>20</sup>

Det bör noteras att Batteri-omriktarsystemet har överdimensionerats för att kunna leverera en felström på  $2xI_n$  i 2 sekunder för att enklare kunna detektera strömmarna som uppstår vid fel.<sup>20</sup>

Jordfel hanteras av nollpunktsspänningsskydd placerade i två av facken i ställverket som det primära skyddet för jordfel. Noterbart är att känsligheten på dessa skydd uppdateras vid önätsdrift (3 k $\Omega$  till 5 k $\Omega$ ).<sup>20</sup> Konsekvensen av att det primära skyddet för ett jordfel är nollpunktsspänningsskydd blir att ett jordfel i 10kV nätet, vid önätsdrift, medför nedsläckning, det vill säga att selektivitet för dessa fel saknas.

#### 4.1.2 Problematik och utmaningar

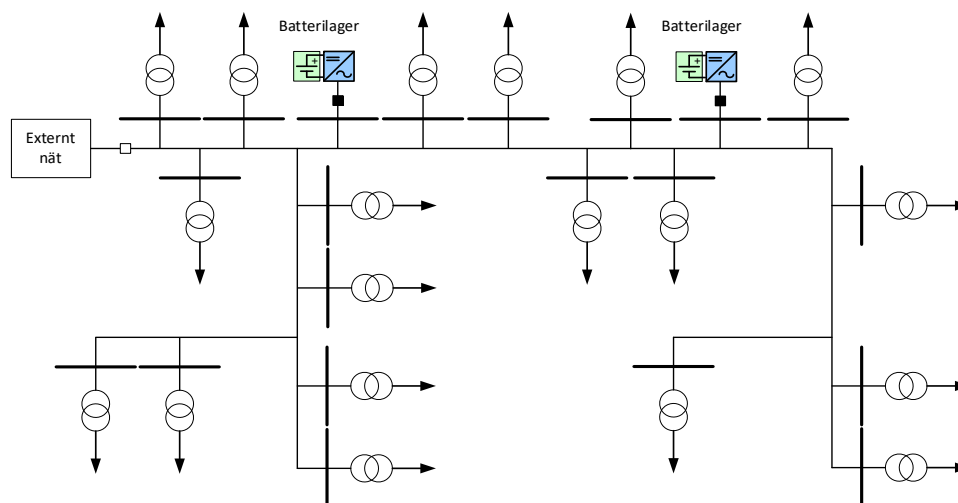
Genom att samla all produktion i samma punkt har felbortkopplingsstrategin kunnat förenklas. En problematik med vald design av skyddssystemet är att jordfel inne i ön kommer leda till icke-selektiv nedstängning av hela ön. Det noteras också att den distribuerade genereringen inte kopplas bort direkt av felbortkopplingsstrategin, vilket ställer krav på att de själva kopplas bort vid fel av sina egna ingående skydd och inte fortsätter mata ett fel i 10 kV-nätet.

## 4.2 VATTENFALL ELDISTRIBUTION - ARHOLMA

Vattenfall Eldistribution bedriver ett pilotprojekt där ön Arholma utanför Norrtälje skall kunna drivas som ett mikronät. En översiktlig bild av nätet visas i Figur 11 nedan. Nätet består av en radial 10 kV-matning med 19 stycken lågspänningstransformeringar till 400 V. Det finns ingen ringmatning på ön och endast en kopplingspunkt mot fastlandet finns (längst till vänster i bild). Inom mikronätet förekommer energilager i form av 2st batterier. Den enda genereringen som finns på ön är solceller. Mikronätet skall kunna drivas i önätsdrift vid störningar i matningen från fastlandet eller planerad avställning av matningen.

<sup>20</sup> Anton Dahlgren, "Felbortkopplingsutredning LES Simris", E.ON Energidistribution AB utredning D18-0192118 utgåva 1.0

Syftet med projektet har varit att skaffa kunskap samt utvärdera och undersöka olika lösningsalternativ<sup>21</sup>.



Figur 11. Översiktsbild av nätuppbbyggnaden för Vattenfall Eldistributions pilotprojekt på Arholma.

Mellanspanningsbrytaren på ö-sidan av kabelförbindelsen till land utgör gräns för mikronätet, där brytarläget utgör villkor för att detektera önätsdrift. Övergång till önätsdrift kan ske avsiktligt (planerat) eller oplanerat vid fel. Fel som kan leda till oplanerad önätsdrift är obefogade utlösningar, spännings- och frekvensskydd samt fel i matande kabeln som bortkopplas efter reläskyddsutlösning. Övergången till önätsdrift sker mjukt utan avbrott för kunderna<sup>21</sup>.

Mellanspanningsnätet på Arholma har utrustats med Petersenspole för att säkerställa att systemet fortfarande är jordat enligt samma princip som resten av nätet vid önätsdrift. Dock saknas parallellkopplade nollpunktsmotstånd på ön, till skillnad mot mellanspanningsnätet på fastlandet<sup>21</sup>.

#### 4.2.1 Utformning av skyddssystem

Vattenfalls krav på felbortkopplingssystemet har varit att det inte får vara sämre i önätsdrift än vad det är vid ansluten drift. Detta gäller inte bara möjligheten att detektera och koppla bort fel utan även antalet förväntade störningar. Det har dock gjorts vissa kompromisser med avseende på selektivitet vid önätsdrift då det har varit svårt att uppnå selektivitet för vissa lågspänningsfel.

Det skall alltid finnas möjlighet till reservbortkoppling av fel. Vid utformning av felbortkopplingssystemet har man betraktat både ansluten drift och önätsdrift samt fel i mellanspanningsnätet och lågspänningsnätet för båda driftläggningarna. Kravet som sattes upp för Arholma är att jordfel, på mellanspanningsnivå, upp till och med 3000  $\Omega$  skall detekteras och kopplas bort, vilket uppfylls genom nollpunktsspänningskydd på mellanspanningsnivån. I andra fall kan kravet vara 5000  $\Omega$ , se avsnitt 2.1. Detta ger således en oselektiv bortkoppling vilket släcker ned Arholma om önätsdrift föreligger när felet inträffar. Fokus har dock varit att

<sup>21</sup> Intervju 20230227 med Arne Berlin, Firas Daraiseh och Yiming Wu Vattenfall R&D.

identifiera vid vilka felfall batterierna måste kopplas bort och säkerställa att så faktiskt kommer att ske<sup>22</sup>.

Strömderivatamätande skydd har installerats för att detektera höghögsmiga jordfel på lågspänningssidan vid önätsdrift. Skydden mäter på batteriterminalerna vilket medför att utlöst skydd leder till avbrott. Enligt Vattenfalls bedömning är det möjligt att särskilja strömökningen vid ett höghögsmigt jordfel mot alla typer av lastökningar som kan förekomma på Arholma. Olika scenarion har provats vid FAT<sup>22</sup>.

Reläskyddens inställningar ändras vid övergång till önätsdrift vilket medför att ett kommunikationssystem är nödvändigt. Ett flertal olika kommunikationslösningar skall utvärderas inom olika områden på Arholma, bland annat trådlös kommunikation via mobilnät (4G), tillämpning av kommunikationsprotokollet IEC 61850 och fiberlösningar<sup>22</sup>.

Felströmsinmatning från batterierna sker i de röda cirkelarna i Figur 11. På grund av batteriernas ringa storlekar så föreligger inte krav på störningstålighet enligt RfG. Felströmsinmatningen från solcellerna är mycket liten<sup>22</sup>.

#### 4.2.2 Problematik och utmaningar

På förhand bedöms systembalansering ha varit den största utmaningen för Vattenfall. Det har inte förelegat några tekniska hinder med avseende på att detektera och koppla bort fel. Dock har ekonomiska begränsningar medfört att vissa lågspänningssfel kommer att detekteras och kopplas bort på mellanspänningsnivå eftersom en del lågspänningsfördelningar inte har moderniserats<sup>22</sup>.

En annan begränsning har varit leverantörsmarknaden där det har varit svårt att involvera större aktörer i pilotprojektet. Vattenfall bedömer att det beror på projektrisken<sup>22</sup>.

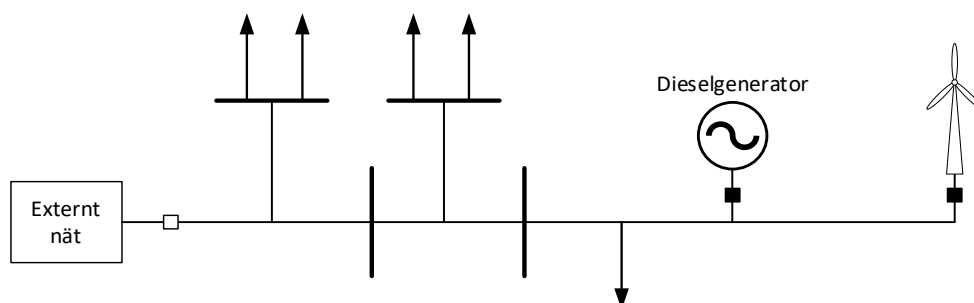
Driftmässiga erfarenheter finns ännu inte att rapportera då systemet inte är tagit i drift. FAT är genomfört hos leverantören men utrustningen har inte levererats<sup>22</sup>.

### 4.3 HAILUOTO FINLAND

Hailuoto är Finlands största ö med 1000 bofasta invånare och cirka 600 sommarstugor. Ön används i ett pilotprojekt av bland annat ABB för att studera felbortkopplingssystem för mikronät. Ett enklare enlinjeschema för den del av Hailuoto som utgör mikronätet visas nedan i Figur 12. Mikronätet består av en 21 km lång 20 kV radialmatning som ett flertal lågspänningstransformeringar ansluts till. I nätet finns två generatorer, ett 0,5 MW vindkraftverk som består av en direktansluten asynkrongenerator och ett dieselaggregat om 1,5 MW. Målsättningen är att en del av ön skall kunna drivas som ett mikronät vid både avsiktlig och oavsiktlig bortkoppling av det externa nätet. Avsiktlig övergång till önätsdrift sker genom extern SCADA signal till mikronätet. Vid oavsiktlig

<sup>22</sup> Intervju 20230227 med Arne Berlin, Firas Daraiseh och Yiming Wu Vattenfall R&D.

bortkoppling av det externa nätet kan övergången till önätsdrift ske med ett kortare avbrott beroende på dieselaggregatets driftläggning<sup>23</sup>.



Figur 12. Översiktsbild av nätupbyggnaden för pilotprojektet för att studera mikronät på Hailuoto i Finland.

Vid anslutningspunkten till det externa nätet finns en kontrollenhet vars uppgift är att detektera önätsdrift och skicka signaler till dieselaggregatet som går över i spännings- och frekvensreglering<sup>23</sup>. I arbetet med att analysera felbortkopplingssystemet har ett flertal driftfall beaktats vilket inkluderar fel när mikronädet är anslutet till yttre nät, fel när mikronädet är anslutet till yttre nät samtidigt som den distribuerade genereringen är ansluten, avsiktlig övergång till önätsdrift, önätsdrift och övergång till önätsdrift genom dödnätstart<sup>24</sup>.

I pilotprojektet har det konstaterats att det föreligger svårigheter vid användning av överströmsskydd i mikronät på grund av låg kortslutningseffekt och att effektens riktning kan variera. Distans- och differentialskydd pekas ut som möjliga lösningar för nya framtida mikronät. En annan möjlig lösning som utvärderas inom projektet är att nyttja olika inställningsgrupper med set-värden för skyddsfunktionerna i reläerna. Vid övergång till önätsdrift skickar kontrollenheten en signal till reläskydden varpå dessa använder andra set-värden i önätsdrift. Exempelvis kan nollpunktspänningsskyddets tidsfördröjning ändras eftersom man inte behöver förhålla sig till jordfelskyddets tidsfördröjningar i det externa nätet vid önätsdrift. Kommunikationen som används bygger på IEC 61850. Systemet används även för att ändra överströmsskyddens inställningsvärden när dieselaggregatet är i drift och mikronädet är anslutet till det externa nätet<sup>23</sup>.

#### 4.3.1 Problematik och utmaningar

De största utmaningarna med avseende på skyddssystemet bedöms vara den stora andelen distribuerad produktion och önätsdrift. Idealt sett vill nätägaren att skyddssystemet skall anpassas efter aktuell driftläggning där den föredragna metoden är att välja mellan olika fördefinierade inställningsgrupper i reläskydden.

<sup>23</sup> Laaksonen et al, Adaptive Protection and Microgrid Control Design for Hailuoto Island, IEEE Transactions on Smart Grid Vol 5, No 3, May 2014.

<sup>24</sup> Alexandre Oudalov, New Technologies for Microgrid Protection, ABB Corporate Research, Santiago 2013 Symposium on Microgrids.

Detta sker genom att en central enhet kommunicerar med reläskydden i mikronätet<sup>25</sup>.

#### 4.4 CIGRÉ ARBETSGRUPP C6.22

Arbetsgrupp C6.22 hos Cigré har sammanställt en rapport som beskriver funktionalitet, teknik samt fördelar och ekonomiska motiv med mikronät. Rapporten innehåller en hel del information men är dessvärre något tunn när det gäller skyddssystem. Arbetsgruppen har dock konstaterat att felbortkoppling kan skilja sig väsentligt vid önätsdrift jämfört med ansluten drift på grund av lägre kortslutningseffekt. Vidare konstaterar man även att frekvens- och spänningstransienter kan bli annorlunda vid önätsdrift och kan falla utanför vad som normalt anses vara acceptabelt vid ansluten drift. Detta kan medföra utmaningar om spännings- och frekvensskydd finns installerade i mikronätet och särskild vikt behöver läggas vid inställning av dessa skydd<sup>26</sup>.

---

<sup>25</sup> Alexandre Oudalov, New Technologies for Microgrid Protection, ABB Corporate Research, Santiago 2013 Symposium on Microgrids.

<sup>26</sup> Microgrids 1 Engineering, Economics, & Experience Working Group C6.22 Cigré, October 2015.



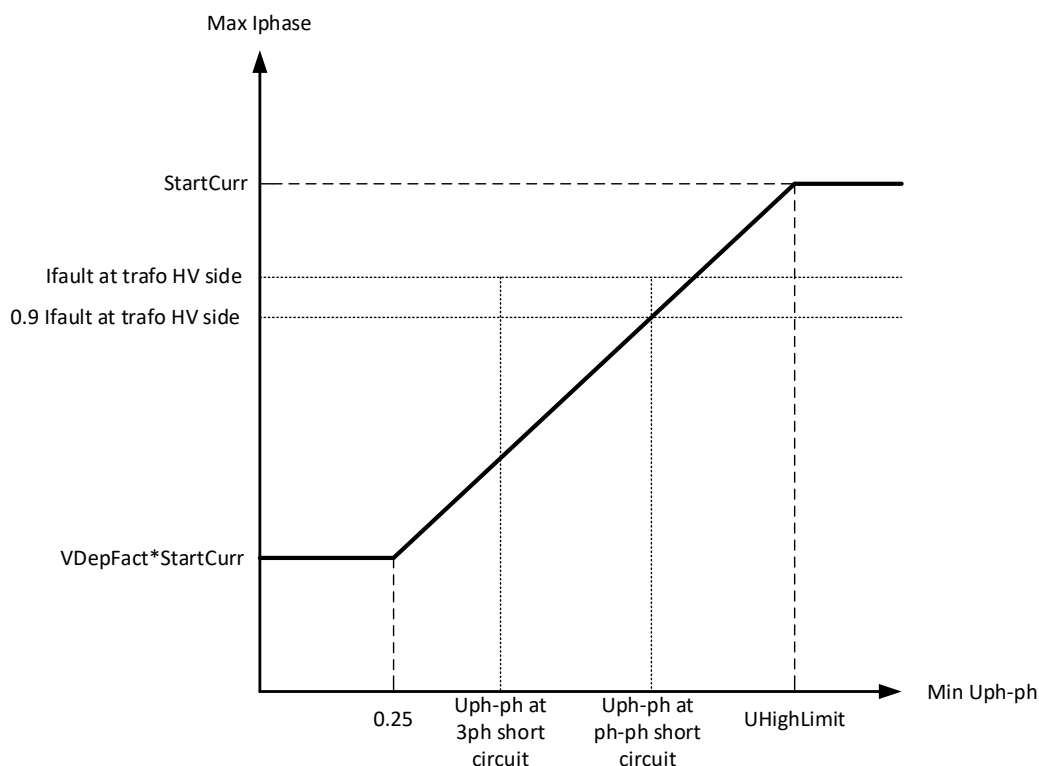
## 5 Realiserbara system för felbortkoppling och detektering

### 5.1 LÖSNINGAR FÖR KORTSLUTNINGAR PÅ MELLANSPÄNNINGSNIVÅ

Lokal omriktaransluten generering har begränsad felströmsutmatning, ofta i storleksordningen 100–150 % av märkström enligt avsnitt 3.1.6. Vidare har felströmmen samma effektriktning som den normalt genererade strömmen. Följden är att konventionella fasöverströmsskydd inte är lämpliga för mikronät med denna typ av generering. Det är viktigt att matning av felström från de omriktaranslutna genereringarna kan detekteras och fränkopplas. Om felström inte fränkopplas snabbt och säkert kan detta innebära fara för människor, fara för brand och annan skada på egendom.

Angående olika alternativ för skyddsprinciper i mellanspänningsnätet:

- Fasöverströmsskydd: Normalt sett inte lämpligt på grund av låga felströmmar vid omriktaransluten generering med samma effektriktning som den normalt genererade strömmen.
- Spänningsberoende fasöverströmsskydd där funktionsströmmen är beroende av spänningen, se Figur 13 nedan. Kan till viss del motverka bristen på hög felström.



Figur 13. Exempel på karakteristik för spänningsberoende fasöverströmsskydd<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> ABB 1MRK 602 072 UEN REG670.

- Fasöverströmsskydd med riktad funktion: Eftersom lastström och felström har i stort sett samma riktning så blir funktionaliteten hos en skyddsfilosofi baserad på denna lösning osäker.
- Fasöverströmsskydd med blockeringskoppling: På grund av låg felström blir en skyddsfilosofi med denna lösning komplicerad.
- Strömskydd som mäter minusföljdsström: Kan detektera tvåfasiga kortslutningar och eventuellt enfasiga jordfel med god känslighet. Dock fås inte minusföljdsström vid trefasig kortslutning. Skyddsfunktionen kan vara komplement till andra skyddsfunktioner. Det finns dock en risk att skyddstypen inte är lämplig vid avsaknad av synkronmaskin i önätsdrift eftersom det i Sverige saknas krav på att felströmsinjiceringen från omriktarbaserad generering skall innehålla minusföljdskomponent.
- Differentialskydd: Ett absolut selektivt skydd som kan ha god känslighet för två- och trefasiga kortslutningar. Erfarenhet finns ned till 20 % av strömtransformatorns märkström. Skyddet kräver dock kommunikation.
- Distansskydd/Underimpedansskydd: Möjliggör selektiv felbortkoppling även för små felströmmar, normalt sett ned till 10% av skyddets märkström. Analys krävs för varje enskilt fall där även sidoinmatning från generering beaktas. Vissa algoritmer använder dock minusföljdskomponent för att identifiera felbehäftad fas vilket kan vara problematiskt.
- För mikronät med få brytställen kan en alternativ metod vara att kunna identifiera felstället och sedan frånskilja felet under avbrott. Detta beskrivs vidare i kapitel 5.4.

### 5.1.1 Fasöverströmsskydd

Fasöverströmsskydd fungerar väl när mikronätet är anslutet till yttre nät eller vid önätsdrift med synkronmaskin i drift. Vid önätsdrift utan synkronmaskin är dock felströmmen begränsad vilket innebär försvårande detektering av alla kortslutningar. Denna nackdel kan till viss del hanteras med fasöverströmsskydd där funktionsvärdet är beroende av spänningen. Det bör även vara möjligt att använda fasöverströmsskydd när asynkrongenerator finns, dock behöver det beaktas att felströmsbidragets transienta förlopp är väldigt kort.

#### *Inställningsprincip*

Skyddet ska inte ge bortkoppling för maximal lastström ( $I_{last,max}$ ) eller vid förväntade dynamiska händelser exempelvis motorstart eller inkoppling av transformator. Därför behöver fasöverströmsskyddet normalt sett ställas med marginal mot detta. Det behöver även verifieras att det löser vid minsta kortslutningsström ( $I_{k2min}$ ). Denna ström fås vid tvåfasig kortslutning längst ut på definierad skyddszon. Skyddet kan ställas enligt följande:

$$1,2 \cdot \frac{I_{last,max}}{\eta} \leq I_{inställning} \leq 0,75 \cdot I_{k2min}$$

Där  $\eta$  är skyddets återgångsförhållande. Tidsfördröjning av fasöverströmsskyddet skall ställas så att selektivitet mellan skydd i serie skall säkerställas.

Skyddstypen bedöms dock inte vara lämplig för de flesta mikronät på grund av låg felström i förhållande till maximal lastström eller inkopplingsström (t ex vid motorstart). För att säkerställa tillförlitlig och säker felbortkoppling från fasöverströmsskydd krävs oftast omfattande analyser där speciellt önätsdrift med olika driftbetingelser beaktas.

### 5.1.2 Differentialskydd

En möjlig lösning, om än exklusiv, är att införa differentialskydd på mellanspänningsnivån i mikronätet. Detta ger en absolut selektiv bortkoppling av kortslutningar vid drift mot nät, övergång till önätsdrift och önätsdrift. Differentialskydden är oberoende av var inmatning av kortslutningsström sker och möjliggör detektering av relativt små kortslutningsströmmar. Erfarenhet finns ned till 20 % av strömtransformatorns märkström. Metoden är dock exklusiv i form av att den erfordrar brytare och mätning i varje nätstation samt kommunikation mellan alla nätstationer inom mikronätet.

Omställning av parametervärden i skydden behöver oftast inte göras. Däremot bedöms det inte realistiskt att använda differentialskydd för detektering och bortkoppling av jordfel (gäller för alla typer av höghmigt jordade nät).

#### *Inställningsprincip*

Kan ställas med god känslighet. Normal är lägsta funktionsvärde för differentialskydd ca 10 % av skyddets märkström. Om långa kablar eller ledningar förekommer kan viss laddningsström beroende på driftkapacitansen behöva beaktas. Differentialskyddet skall ha momentan utlösningssfunktion.

### 5.1.3 Distansskydd

En möjlig lösning för att detektera och koppla bort kortslutningar i mellanspänningsnätet inom mikronätet är distansskydd. Detta kan implementeras på många olika sätt, exempelvis i samtliga nätstationer vid en stor mängd brytare eller enbart i de punkter i mikronätet där inmatning sker.

Felströmsinmatning från omriktaransluten generering skilja sig från matning från synkrogeneratorer. Dels är felströmmen begränsad (låg källimpedans), dels är typiskt minsföljdskomponenten minimal. För vissa omriktare används injicering av minsföljdsström, exempelvis så är detta kravställt i Tyskland. Erfarenheten av detta med avseende på distansskydd är begränsad. Vid avsaknad av minsföljdsström, exempelvis i mikronät med endast omriktaransluten generering, kan reläskyddstillverkare behöva konsulteras med avseende på hur detta kan påverka algoritmerna i distansskydden.

#### *Inställningsprincip*

Normalt sett kan distansskydd ställas in med flera zoner med olika räckvidd. Exempelvis kan zon 1 ställas in för att täcka 85 % av ledningens impedans medan

zon 2 kan ställas in på 125 % av ledningens impedans. Vid behov kan ytterligare en zon 3 användas samt en bakåtriktad zon 4. Zon 2, 3 och 4 måste vara tidsfördröjda för att erhålla selektivitet mot andra distansskydd i nätet. Det är även möjligt att nyttja samverkansprinciper mellan skydd.

I mikronät behöver särskilt sidoinmatning och låg källimpedans beaktas vid framtagning av inställningsnivåer. I dessa fall måste nätberäkningar genomföras.

Det skall noteras att distansskydd kan vara olämpliga vid korta ledningar.

## 5.2 LÖSNINGAR FÖR JORDFEL PÅ MELLANSPÄNNINGSNIVÅ

- För detektering och bortkoppling av jordfel används normalt känsliga strömskydd och spänningsskydd som mäter nollföljdsström respektive nollföljdsspänning. Detta beskrivs vidare i kapitel 5.2.
- Alternativa jordfelsskydd: Admittansmätande jordfelsskydd och transientmätande jordfelsskydd. Detta beskrivs vidare i kapitel 5.2.

### 5.2.1 Nollpunktsspänningsskydd

Nollpunktsspänningsskydd har använts i de tre exempelprojekten som presenterades i kapitel 4. Skyddsuppbyggnaden är enkel och det utgör ett effektivt jordfelsskydd för mellanspänningsnät. Nackdelen är att jordfel ger nollpunktsspänning i hela nätet varpå det inte är möjligt att erhålla selektiv bortkoppling av jordfel med skyddstypen. Vidare finns det även en risk att oselektiv bortkoppling (oselektiv mot eventuella strömmätande jordfelsskydd) sker vid intermittenta jordfel på grund av oscillerande nollpunktsspänning<sup>28</sup>. Om enbart nollpunktsspänningsskydd används så medför det totalavbrott vid jordfel inom mikronätet. Tidsselektivitet mot jordströmsskydd i matande mellanspänningsnät kan dock erhållas enligt den princip som har använts i Hailuoto, se kapitel 4.3, där adaptiva inställningsvärden tillämpas och en central enhet kommunicerar med nollpunktsspänningsskyddet varpå tidsfördröjningen är kortare vid önätsdrift.

#### *Inställningsprincip*

Bör ställas för att uppfylla kravet på känslighet ( $R_f = 3$  eller  $5 \text{ k}\Omega$ ).

Nollpunktsspänning skall beräknas:

$$\bar{U}_0 = \frac{\bar{U}_{fas}}{1 + 3 \cdot \frac{R_f}{Z_0}}$$

$Z_0$  är systemets kapacitans till jord parallellkopplad med de impedanser som kopplats mellan transformatornollpunkten och jord:

$$\bar{Z}_0 = -jX_c // 3 \cdot R_N // j3 \cdot X_N \quad \Omega / fas$$

där  $X_c$  är nätets kapacitiva reaktans till jord (ohm/fas),

<sup>28</sup> L Messing et al., Jordfelstdetektering i mellanspänningsnät, Energiforsk rapport 2015:128.

$R_N$  är nollpunktsmotståndets resistans och

$X_N$  är nollpunktsreaktorns reaktans.

Viss tidsfördröjning bör användas för att erhålla selektivitet mot strömmätande jordfelskydd. Om skyddet utgör primärskydd mot jordfel vid önätsdrift kan tidsfördröjningen kortas ned alternativt tas bort. Dock behöver tidsfördröjning finnas vid drift mot nät.

### 5.2.2 Oriktade jordströmsskydd

I kapitel 4.2 beskrevs att Arholma vid önätsdrift drivs utan nollpunktsmotstånd eftersom detta är beläget i mellanspänningsnätet på fastlandet. Situationen skulle kunna vara likartad för flera delar av befintliga distributionsnät som skulle kunna vara aktuella att drivas som mikronät i framtiden, det vill säga att nollpunktsmotståndet är anslutet till matande transformators neutralpunkt vilket kan vara utanför den definierade gränsen för mikronätet

Oriktade jordströmsskydd är enkla till sin uppbyggnad och består typiskt av ett strömrelä som matas med summaströmmen ( $3I_0$ ) från den skyddade ledningen/kabeln. Skyddsinställningen är förhållandevis enkel med amplitud och tidsfördröjning. Oriktade jordströmsskydd kan vanligtvis inte detektera och koppla bort intermittenta jordfel<sup>29</sup>.

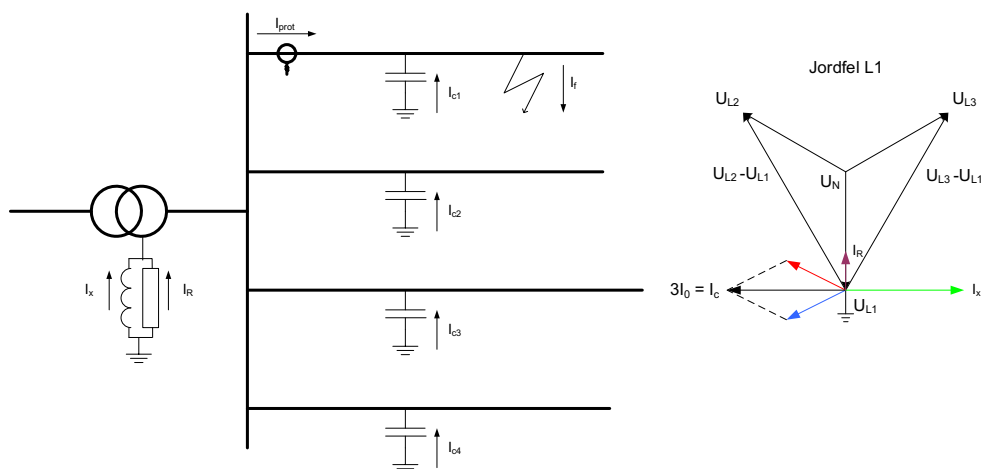
Oriktade jordströmsskydd kan vara en tänkbar lösning för att detektera och koppla bort jordfel i mellanspänningsnätet, dock krävs tillräcklig kapacitiv jordfelsström oavsett driftläggning. För reservbortkoppling kan nollpunktsspänningsskydd användas.

Oriktade jordströmsskydd kan troligen användas både vid ansluten drift och önätsdrift. Vid önätsdrift görs dock bedömningen att ett nollpunktsmotstånd bör kopplas in vid övergång till önätsdrift.

#### *Inställningsprincip*

Skyddet bör ställas så att det inte löser för det egna objektets (ledning eller kabel) kapacitiva jordfelsström vid fel på andra ledningar. Det behöver verifieras att tillräcklig känslighet kan uppnås. Jordfelsströmmen åskådliggörs nedan i Figur 14: Jordfelsström vid fel på ledning. Riktade jordströmsskydd. Vid stumt jordfel i nätet blir spänningen till jord i felbehäftad fas noll. Nollpunkten spänningssätts till spänningen i felbehäftad fas före fel med ombytt tecken. För de friska faserna fås huvudspänning till jord enligt figuren. De spänningarna ger upphov till kapacitiva jordfelsströmmar. Nollpunktsspänningen ger upphov till en reaktiv jordfelsström i motfas med den jordfelsströmmen. Vilket minskar felströmmen i felstället. Nollpunktsmotståndet kommer att ge en strömkomposant i fas med nollpunktsspänningen.

<sup>29</sup> L Messing et al., Jordfelsdetektering i mellanspänningsnät, Energiforsk rapport 2015:128.



**Figur 14: Jordfelsström vid fel på ledning. Riktade jordströmsskydd**

Ett alternativ till de oriktade jordströmsskydden kan vara att använda riktade jordströmsskydd. Detta kan kombineras med inkoppling av nollpunktmodstand på lämplig plats i mikronätet för att erhålla en väldefinierad aktiv strömkomponent. Lösningen används redan idag exempelvis i vissa sjukhus och hjälpkraftanläggningar i kraftverk för att erhålla en definierad aktiv strömkomponent vid jordfel under önätsdrift. Det finns även riktade jordströmsskydd baserade på kapacitiv komponent för att bestämma riktningen, detta erfordrar dock att det alltid finns tillräcklig kapacitiv jordfelsström tillgänglig oavsett driftläggning. Detta kräver således analys av enskilda fall och är beroende av hur det aktuella mikronätet ser ut.

Strömmätning kan ske på samma sätt som för det oriktade jordströmsskyddet. Riktningen kan bestämmas genom att jämföra strömmens fasvinkel med nollföljdsspänningens vinkel. Skyddsinställningen är förhållandevis enkel och selektivitet kan uppnås genom tidsfördröjningar. Vid en stor mängd seriekopplade ledningar kan feltiden dock bli så lång att det inte går att uppfylla kravställd felbortkopplingstid. För reservbortkoppling kan nollpunktsspänningsskydd användas. Likt de oriktade jordströmsskydden så kan vanligtvis inte riktade jordströmsskydd, med säkerhet, detektera intermittenta jordfel<sup>30</sup>.

Skyddstypen kan även kombineras med fjärrutlösningar och blockerings signaler.

Riktade jordströmsskydd kan troligen användas både vid ansluten drift och önätsdrift. Vid önätsdrift måste ett nollpunktmodstand kopplas in vid övergång till önätsdrift. För reservbortkoppling kan nollpunktsspänningsskydd användas.

#### *Inställningsprincip*

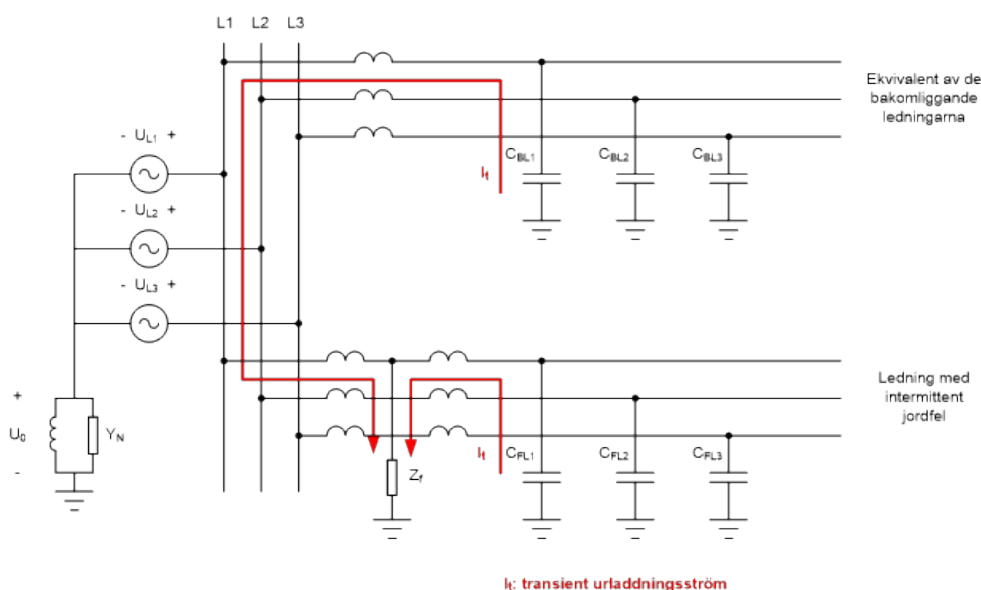
Bör ställas in med hänsyn till nollpunktmodstandets aktiva komponent och mättransformatorns egenskaper. Selektivitet mellan strömmätande jordfelsskydd kan erhållas genom tidsfördröjningar, dock inom kravställd tid och med selektivitet mot nollpunktsspänningsskydd.

<sup>30</sup> L Messing et al., Jordfelddetektering i mellanspänningsnät, Energiforsk rapport 2015:128.

### 5.2.3 Skydd mot intermittenta jordfel

I bland annat kapitel 5.2.2 beskrevs det kortfattat att de strömmätande jordfelsskydden vanligtvis inte kan detektera och koppla bort intermittenta jordfel. En möjlig lösning är att använda transientmätande jordfelsskydd för att kunna detektera och koppla bort intermittenta jordfel.

Funktionen för transientmätande jordfelsskydd är beroende av nätets utformning, särskilt vid önätsdrift. Detta beror på att skyddet måste ha viss kapacitans<sup>31</sup> för att få en transient ström att mäta. Se Figur 15 nedan.



Figur 15. Urladdningsström vid intermittent jordfel<sup>31</sup>.

Vid önätsdrift kan det vara osäkert om felfria ledningar kan ge tillräcklig kapacitiv urladdningsström för att ett transientmätande jordfelsskydd kan ge skyddsfunktion. Analys måste göras för olika driftfall, speciellt för önätsdrift. Vidare bedöms analysen av amplitud och varaktighet av transienten vara relativt osäker.

#### Inställningsprincip

Bör ställas med hänsyn till den urladdningsström som kan fås givet mikronätets topologi och driftläggning. Särskild kontroll erfordras för önätsdrift.

### 5.2.4 Admittansmätande jordfelsskydd

Ett annat alternativ till jordströmsskydden är att använda admittansmätande jordfelsskydd. Skyddstypen beräknar admittansen för den skyddade ledningen och jämför denna med en förbestämd admittanskaraktistik. Att ta fram inställningsvärden kräver omfattande analyser eftersom hänsyn behöver tas till möjliga kopplingslägen och admittans hos anslutna nollpunktsapparater<sup>32</sup>.

<sup>31</sup> L Messing et al., Jordfelstdetektering i mellanspänningsnät, Energiforsk rapport 2015:128.

<sup>32</sup> L Messing et al., Jordfelstdetektering i mellanspänningsnät, Energiforsk rapport 2015:128.

Vid önätsdrift kan det vara osäkert om felfria ledningar kan ge tillräcklig aktiv (om inget nollpunktsmotstånd är inkopplat) jordfelsströmström för att ett admittansmätande jordfelsskydd ska kunna ge skyddsfunktion. Analys måste göras för olika driftfall, speciellt för eventuella möjliga driftfall i önätsdrift.

Det har även utvecklats multifrekvensadmittansmätande jordfelsskydd som skall kunna detektera och koppla bort både grundtons och intermittenta jordfel<sup>33</sup>.

#### *Inställningsprincip*

Skydden behöver ställas in med hänsyn till admittansen hos skyddat objekt (ledning/kabel) samt hos bakomliggande nät inklusive nollpunktsutrustning. Analys behöver göras för samtliga driftläggningar.

### **5.3 FELINDIKATORER**

Felindikatorer har funnits på marknaden under ett antal år, exempelvis i form av en enkel apparat som hängs upp på den övervakade ledningen. Principen kan bygga på att en ändring av primärströmmen i en ledare ger upphov till ett ändrat magnetfält vilket kan detekteras. Både kortslutningar och jordfel kan detekteras. Genom att placera feldetektorer på flera olika strategiska ställen i mikronätet så går det att bestämma felströmmens väg genom mikronätet och därmed avgöra var felet är beläget. Det finns även felindikatorer anpassade för att användas i kabelnätverk<sup>34</sup>. Felindikatorer utgör dock inte utlösande skydd utan ger endast signal vid genomgående felström.

Felindikatorer bedöms kunna användas för att detektera jordfel i mikronät, dock kan användningsområdet för att detektera kortslutning i mikronät vara begränsat med tanke på att felströmmarna kan vara låga vid omriktarbaserad generering. Detta gäller troligen främst vid önätsdrift då det kan vara tveksamt om felindikatorer har tillräcklig känslighet.

### **5.4 NYTT INNOVATIVT LÖSNINGSFÖRSLAG**

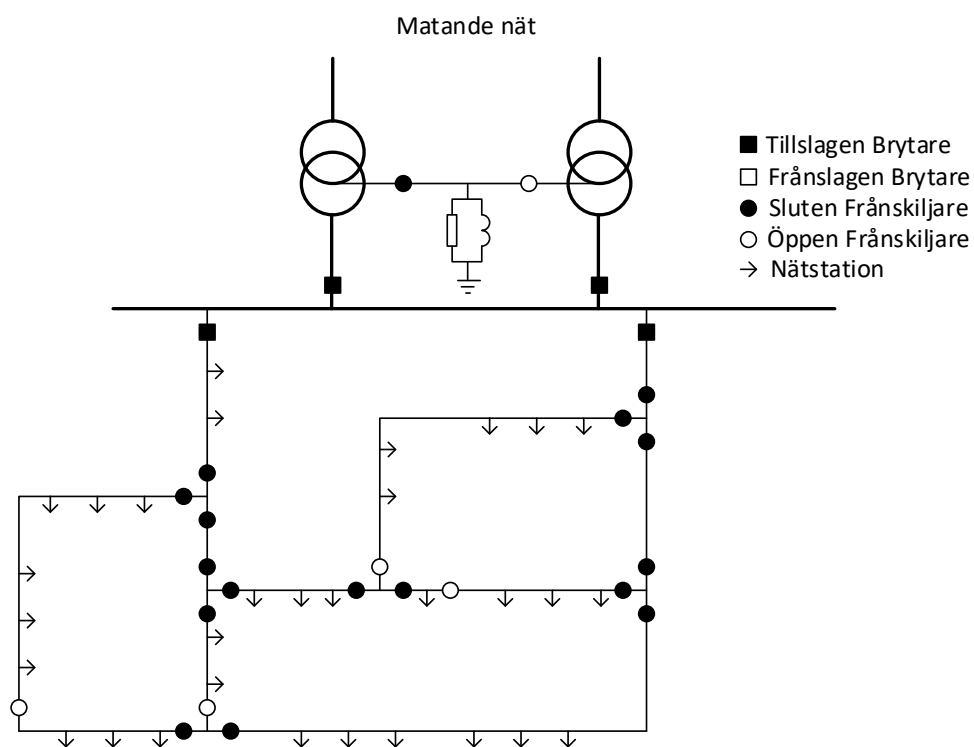
För att kunna definiera ett lösningsförslag behöver det definieras vad som kan anses vara rimligt beträffande felbortkoppling i mikronät. Det är fullt möjligt att detektera och koppla bort kortslutningar och jordfel. Det kan dock vara praktiskt svårt att möjliggöra selektiv felbortkoppling. Detta beror på att effektbrytare normalt inte finns ute i näten. Frånskiljare finns dock ofta vid varje nätstation. Frånskiljarna kan inte bryta felström, såvida det inte är lastfrånskiljare samt att felströmmen är av samma storleksordning som lastströmmen, men de antas kunna fjärrmanövreras, i spänningslöst tillstånd, vid återuppbyggnad av mikronätet efter felbortkoppling. I praktiken kan detta vara en ekonomisk fråga där t.ex. möjligheten att fjärrmanövrera kan vara sämre i befintliga nät på landsbygden. Om felstället kan identifieras frånskiljs felbehäftad anläggning och driften återupptas. För identifiering av felbehäftad anläggning finns enkla feldetektorer som kan

<sup>33</sup> Ari Wahlroos et al., Application of Novel Multi-frequency Neutral Admittance Method into Earth-Fault Protection in Compensated MV-networks, ABB White paper 2017.

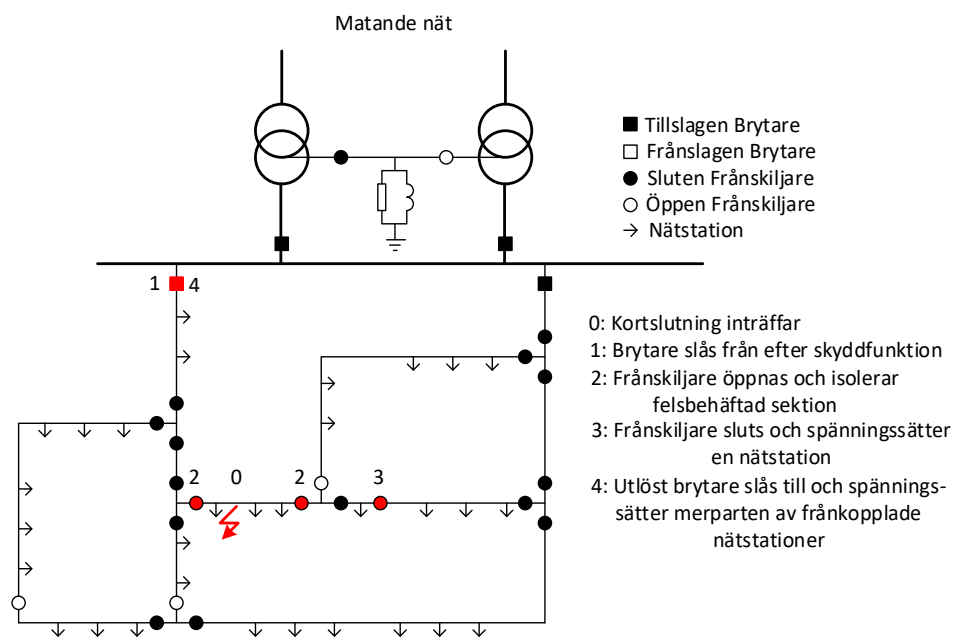
<sup>34</sup> Nortroll Product Catalog, Fault Passage Indicators to locate short circuit and earth faults.



placeras i nätstationerna. Dessa använder oftast strömdetektering. På grund av små felströmmar kan denna detektering vara osäker, se vidare i kapitel 5.3. Ett alternativ kan vara fellokalisering baserad på impedansmätning i utgående fack i matande station. Detta alternativ är dock inte användbart för jordfelsdetektering. Exempel på nät med felbortkoppling och återuppbyggnad visas nedan i Figur 16 och Figur 17.

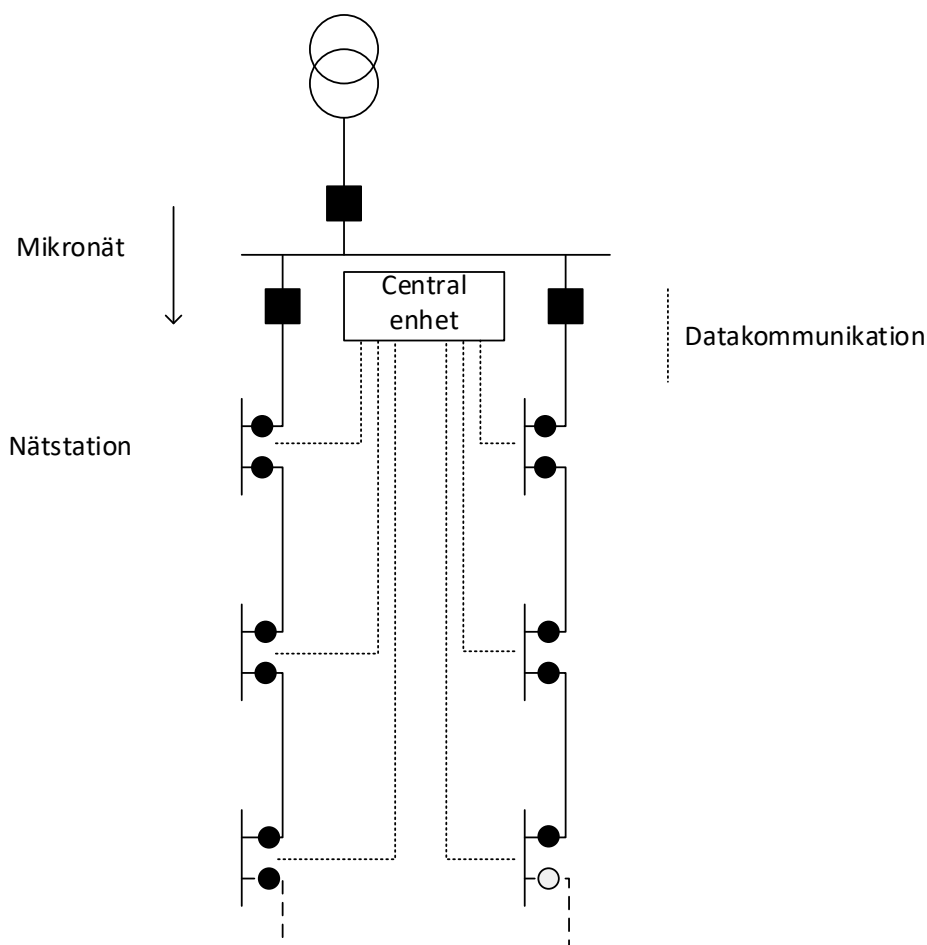


Figur 16. Driftläggning innan fel inträffar.



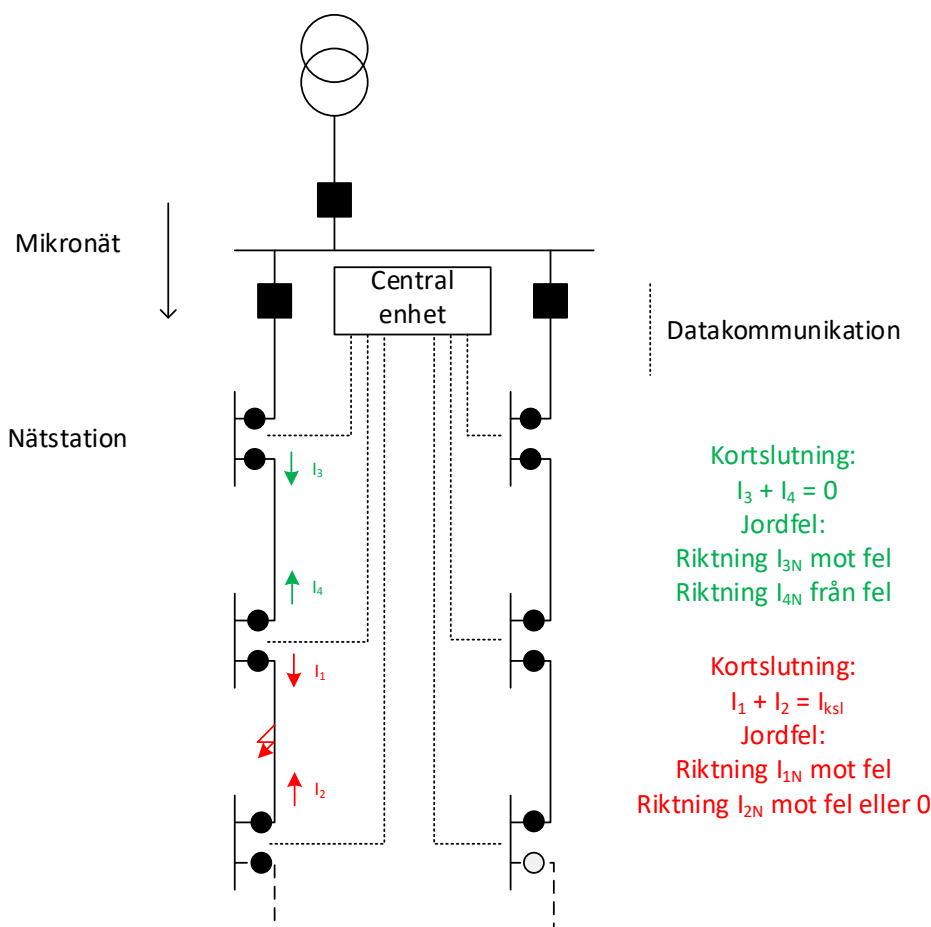
Figur 17. Exempel på händelseföljd vid kortslutning.

I Figur 18 visas ett exempel på hur ett system för fellokalisering skulle kunna byggas upp kring en centralenhet. Transformatorn ingår i matande nät.



Figur 18 Översiktlig utformning av ett system för feldetektering.

Det presenterade systemet finns inte i nuläget men kan vara ett uppslag för framtida utveckling. I varje nätstation mäts fasströmmar och nollföljdsströmmar för varje anslutande kabel. Mätning av nollföljdsström medför till skillnad från traditionella differentialskydd att det blir möjligt att identifiera jordfel. I nätstationen sker omvandling till komplexa visare som sänds till den centrala enheten där detektering av kortslutning och jordfel sker. Tidsreferens för omvandling till komplexa visare skickas från den centrala enheten till varje nätstation. I den centrala enheten finns differentialskyddsfunktion för varje delsträcka och nätstation samt riktade jordfelskyddsfunktioner. Feldetektering för en kabel/friledning kan förenklat ske enligt Figur 19.



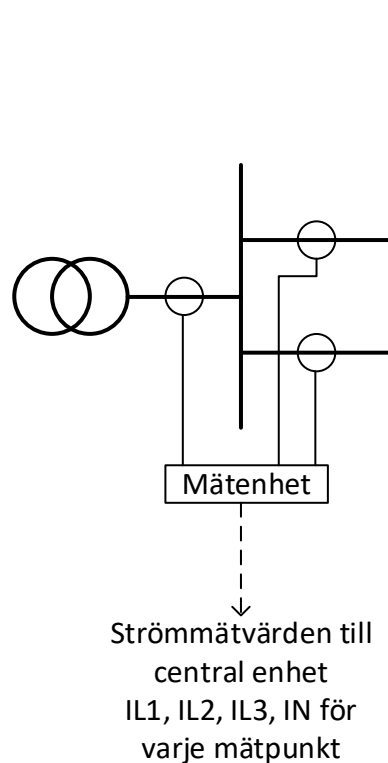
Figur 19 Exempel på feldetektering.

Vid kortslutning: I den centrala enheten finns differentialskyddsinstanser för varje delsträcka, vilket innebär att felbehäftad ledningssektion identifieras. Bortkoppling sker sedan i matande station. Från den centrala enheten skickas bortkopplingssignal till ansluten generering på aktuell radialledning.

Vid jordfel: För att hantera jordfel så behöver det i den centrala enheten finnas en funktion som jämför fasvinkel för nollföljdsström för de två mätpunkterna för varje delsträcka. Därmed kan felbehäftad delsträcka identifieras. Bortkoppling sker sedan i matande station. Från den centrala enheten skickas bortkopplingssignal till ansluten generering på aktuell radialledning. Bortkoppling vid jordfel kombineras lämpligen med nollpunktsspänningskriterium eftersom spänningssättning av jordfel behöver kopplas bort även om t.ex. nollpunktsmotstånd kopplas bort som en följd av felbortkoppling.

Efter felbortkoppling i matande station kan felbehäftad ledningssträcka fränkopplas i spänningsslöst tillstånd och reservmatningsväg kan etableras. Efter detta kan spänningssättning av nätet ske. Exempel på mätpunkter visualiseras i Figur 20.

## Nätstation med eller utan generering

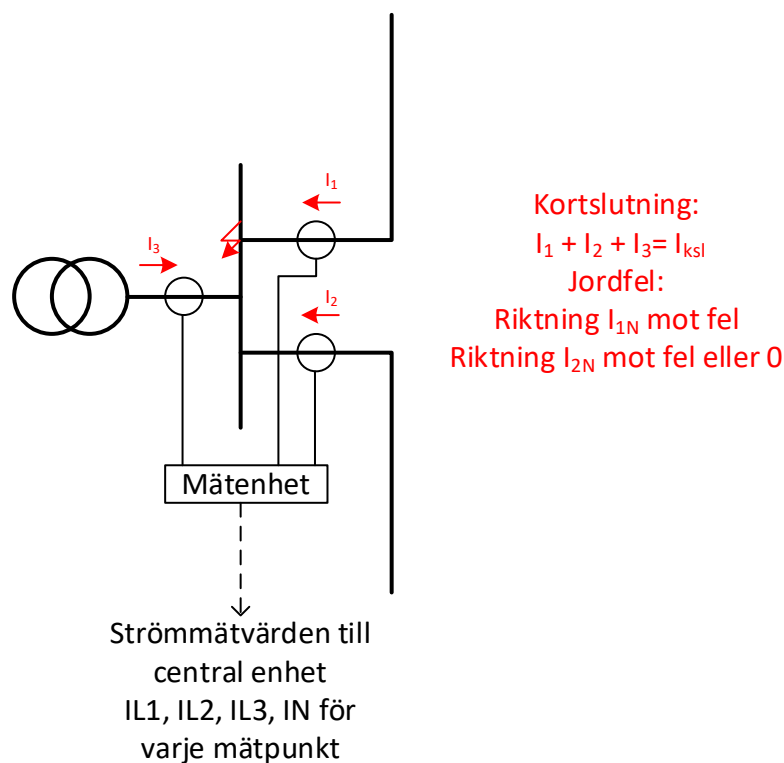


**Figur 20. Exempel på mätpunkt i nätstation med eller utan distribuerad generering.**

Specifikation lokal mätenhet (ofta benämnd local I/O): 4 strömtransformator ingångar för varje mätpunkt. Strömmarna samplas och konverteras till numeriska visare: belopp och fasvinkel. De komplexa strömmarna överförs via datakommunikation till den centrala enheten. Observera att tidsreferens sänds från den centrala enheten till alla nätstationer, alternativ: tidsreferens från GPS-mottagare så att tidssynkronisering uppnås. Konvertering till numeriska visare med fasvinkel förutsätter samma tidsreferens för alla nätstationer, därmed kan fasvinkeln beräknas. Nätstationen skall kunna ta emot binära signaler för manöver av kopplingsapparater. Kommunikation mellan nätstation och den centrala enheten skall ha tillräcklig prestanda (inklusive att tidsfördröjningen inte är för lång) för den dataöverföring som krävs. Likspänningssystem erfordras i varje nätstation.

Vid samlingsskenefel: Vid kortslutning på samlingsskena i nätstation (mellan mätpunkterna) kan en differentialskyddsfunktion, i centralenheten, detektera detta fel och ge bortkoppling i matande station och eventuell lokal felströmsinmatning till nätstationerna anslutna till aktuell radialledning. Separata instanser erfordras för varje skyddszon. Vid jordfel på samlingsskena i nätstation (mellan mätpunkterna) kan en funktion som jämför fasvinkel för nollföljdsström för de två mätpunkternas anslutande fack detektera detta fel och ge bortkoppling i matande station och eventuell lokal felströmsinmatning till nätstationerna anslutna till aktuell radialledning. Detta visualiseras i Figur 21.

## Nätstation med eller utan generering



Figur 21 Exempel på feldetektering på högspänningssidan i nätstation.

Vid kortslutning mellan mätpunkt och transformator, i transformator och på nedspänningssidan skall högspänningssäkring på transformatorn koppla bort felet. Säkringsfunktion behöver analyseras för varje enskilt fall. Om felströmmen är för låg vid något felfall, exempelvis vid fel på nedspänningssidan av transformatorn, kan ett alternativ vara att införa transformatordifferentialskydd.

Vid jordfel mellan mätpunkt och transformator respektive i transformatorns högspänningsslindning sker felbortkoppling på samma sätt som för jordfel på samlingsskenan. OBS: transformatorn antas ha  $\Delta$ -lindning eller ojordad Y-lindning på högspänningssidan.

Principen är troligen applicerbar på nät med varierande driftläggningar, t ex mikronät vid önätsdrift.

#### 5.4.1 Eventuell applikation

Vattenfall har anskaffat ett system: Adaptive Power Restoration System (APRS). APRS utgörs av avancerad logik för driftomläggning i elnätet efter felbortkoppling. Funktionen i sig genomför ingen numerisk analys av felströmmar/spänningar. Funktionen använder information från annan utrustning såsom reläskyddsenheter eller felindikatorer i nätet. Detta skulle även kunna ske från ovan beskrivna feldetekteringssystem.

APRS kan genomföra automatiska omkopplingsmanövrar alternativt ge beslutsstöd för operatörer som gör omkopplingarna manuellt (via fjärr).

När felläge identifierats sker vissa lastflödesanalyser i APRS för att finna bästa alternativ för omkoppling. Risk för överbelastning eller oacceptabla spänningsnivåer identifieras. Detta innebär krav på detaljerad nätdata för lastflödesberäkningar.

Ovanstående princip är obeprövad och därför krävs visst utvecklingsarbete innan implementering. Vidare finns i dagsläget inte ett sådant system på marknaden.

## 5.5 LÖSNINGAR FÖR FEL PÅ LÅGSPÄNNINGSNIVÅ

Då lågspänningssidan är direktjordad blir felströmmarna vid jordfel av samma storleksordning som vid kortslutning. För lågspänningssidan av kundanläggningar används normalt säkringar alternativt strömskydd integrerade i lågspänningsbrytare. Eftersom kortslutningseffekten reduceras vid önätsdrift måste analys göras beträffande acceptabel felbortkopplingstid vid olika feltyper.

I kapitel 4.2.1 beskrevs att vid önätsdrift av Arholma kommer vissa höghögga jordfel på lågspänningssidan att i stället kopplas bort på mellanspänningssidan. Om även mätningen sker på mellanspänningssidan så kräver det att det är möjligt att särskilja felen på lågspänningssidan från strömökningen vid alla typer av tänkbara lastvariationer, vilket bedöms kunna vara komplext. Fel på lågspänningssidan bör detekteras och kopplas bort på lågspänningssidan så långt det är möjligt.

Som komplement till säkringar eller strömskydd integrerade i lågspänningsbrytare skulle underspänningsskydd kunna användas. Säkringars utlösningvillkor behöver dock kontrolleras vid lägsta tillgängliga kortslutningseffekt i mikronätet. Den lägsta tillgängliga kortslutningseffekten beror på mikronätets topologi och vilken distribuerad generering som är i drift. Om det inte är möjligt att säkerställa att tillräcklig felströmsinmatning finns tillgänglig vid önätsdrift för att erhålla specificerad kortslutningseffekt så kan ett alternativ vara att krävställa att det skall finnas anslutna batterilager med specificerad kapacitet och som är laddade till en viss nivå vid önätsdrift i syfte att öka kortslutningseffekten.

Normalt bestäms felströmmarnas storlek av transformatorns reaktans (transformator till lågspänning). Vid önätsdrift kan dock kortslutningseffekten minska så att felströmmen vid fel på lågspänningssidan blir för låg. Analys måste göras från fall till fall.

## 5.6 SKYDDSFUNKTIONER I DEN DISTRIBUTUEDE GENERERINGEN

En del distribuerad generering har skyddsfunktioner integrerade i sin kontrollutrustning. Integrerade skyddsfunktioner bör undersökas för att säkerställa att adekvata skyddsfunktioner finns samt att dessa även är koordinerade med skydd i mikronätet. Skyddsfunktioner som skall finnas är över- och underspänningsskydd samt över- och underfrekvensskydd. Om adekvata skyddsfunktioner inte finns integrerade så skall dessa implementeras i separata

skydd. Dessa skyddsfunktioner skall ha en viss tidsfördröjning för att den distribuerade genereringen inte skall lösa under ett transient förlopp i samband med fel i nätet. Exempelvis skall underspänningsskyddet vara tidsfördröjt så att det inte löser under den spänningsdipp som uppstår vid kortslutning i överliggande regionnät eller stamnät innan felet har kopplats bort. Det behöver även säkerställas att jordfel på mellanspänningsnivå inte fortsätter att matas från den distribuerade genereringen. För produktionsmoduler av typ B, C och D bör det kontrolleras att inställningarna, utöver att harmonisera med kraven i RfG, även är lämpliga för fel vid önätsdrift. Även skyddsfunktioner i produktionsmoduler typ A bör undersökas.

Kravet på bortkoppling av felströmsinmatning från distribuerad generering skall gälla generellt och inte bara för mikronät.



## 6 Sammanställning av möjliga lösningar

Nedan i Tabell 5 sammanställs fördelar och nackdelar med olika tänkbara lösningsalternativ för bortkoppling av fel inom mikronät. Det är väldigt svårt att specificera vilken kombination av lösningsalternativ för att detektera och koppla bort både kortslutningar och jordfel som är mest lämplig i mikronät. Nätets topologi, tillgänglig felström, typ av produktionskällor och dess placering i nätet samt antal brytställen kommer skilja mellan olika mikronät varför varje fall behöver analyseras för sig.

Sammanställningen av tänkbara kommunikationslösningar med avseende på skyddssystem i kapitel 3.3.1 visade att det finns en stor mängd lösningar för kommunikation. I nuläget bedöms trådbundna lösningar vara lämpligast för felbortkoppling. Dessa kan vara antingen rent radiellt till huvudenheten eller vara byggd i serie via nätstationer. Trådlösa lösningar kan dock användas för apparatmanövrar och icke tidskritisk reglering.

Tabell 5. Sammanställning av fördelar och nackdelar för olika lösningsalternativ.

Lösningalternativ	Fördelar	Nackdelar	Övrigt
Fasöverströmsskydd	Enkla principer för inställning.  Fungerar väl när mikronätet är anslutet till yttre nät.	Låg felström vid önätsdrift kan vara problematiskt.  Analysen för att ta fram inställningsvärden kan vara omfattande på grund av många möjliga driftläggningar.	Behöver kombineras med jordfelskydd.
Differentialskydd	Absolut selektiv bortkoppling av kortslutningar, även vid låga felströmmar.	Exklusiv lösning, kräver kommunikation och brytare i varje nätstation, såvida inte skydden endast skall användas för detektering medan bortkoppling sker i annan punkt i nätet.	Behöver kombineras med jordfelskydd.  Inte praxis i denna typ av distributionsnät.

Lösningalternativ	Fördelar	Nackdelar	Övrigt
Distansskydd	<p>Enkla principer för inställning, kan dock vara komplicerat beroende på förutsättningarna, exempelvis vid sidoinmatning.</p> <p>Kan fungera väl även vid låga felströmmar jämfört med fasöverströmsskydd.</p> <p>Kan implementeras antingen i samtliga nätstationer eller där inmatning av felström sker.</p>	<p>Problematiskt vid korta avstånd på grund av noggrannheten.</p> <p>Risk för problem i önätsdrift om minusföljdsströmmen är låg. Möjlig problematik bör analyseras i samråd med skyddstillverkare, alternativt att inmatning av minusföljdsström krävs om detta saknas i erforderlig mängd.</p> <p>Låg källimpedans vid önätsdrift kan även vara problematiskt.</p>	<p>Behöver kombineras med jordfelskydd.</p> <p>Inte praxis i denna typ av distributionsnät.</p>
Nollpunktsspänningskydd	<p>Enkelt och effektivt jordfelskydd för mellanspänningsnät.</p>	<p>Inte möjligt att erhålla selektiv bortkoppling av jordfel.</p> <p>Risk att bortkoppling sker oselektivt vid intermittenta jordfel.</p>	<p>Lämpligt som reservskydd för övriga jordfelskydd, om mikronätet är av sådan art att selektiv bortkoppling av jordfel vid önätsdrift eftersträvas.</p>
Oriktade jordströmsskydd	<p>Förhållandevis enkel inställningsprincip.</p>	<p>Kan vanligtvis inte detektera intermittenta jordfel.</p> <p>Osäkert om tillräcklig kapacitiv jordfelsström finns utan nollpunktsmotstånd som bidrar med aktiv jordfelsström. Risk att jordfel inte detekteras.</p>	

Lösningalternativ	Fördelar	Nackdelar	Övrigt
Riktade jordströmsskydd	Förhållandevis enkel inställningsprincip (tidsselektivitet) för att erhålla selektivitet.	Kan vanligtvis inte detektera intermittenta jordfel.  Osäkert om tillräcklig kapacitiv jordfelsström finns utan nollpunktsmotstånd som bidrar med aktiv jordfelsström. Risk att jordfel inte detekteras.	Kan även kombineras med fjärrutlösningar och blockerings signaler för att erhålla selektivitet.  Bör/Måste kombineras med inkoppling av nollpunktsmotstånd för att erhålla väldefinierat aktiv strömkomponent vid önätsdrift.
Intermittent jordfelsskydd		Funktionen är beroende av nätets utformning eftersom viss kapacitans behövs. Kräver analys av olika driftfall, särskilt önätsdrift.  Analys av amplitud och varaktighet hos transienten bedöms vara relativt osäker, vilket kan innebära utebliven eller felaktig funktion.	Kan utgöra komplement till övriga jordfelsskydd för att kunna detektera intermittenta jordfel.
Admittansmätande jordfelsskydd	Det finns admittansmätande skydd på marknaden som enligt leverantörerna skall kunna detektera både grundtons och intermittenta jordfel.	Behöver finnas tillräcklig kapacitiv jordfelsström för alla driftfall. Kräver analys, speciellt för önätsdrift.	
Felindikatorer	Enkel princip som har funnits på marknaden ett antal år.	Användningsområde för att detektera kortslutningar i önätsdrift kan vara begränsad på grund av låg felström.	Felindikatorer är inte utlösande skydd utan ger endast signal vid genomgående felström.

Lösningalternativ	Fördelar	Nackdelar	Övrigt
Nytt innovativt lösningförslag	<p>Kan användas i mikronät där antalet brytställen är begränsat.</p> <p>Kan detektera felstället vid både kortslutning och jordfel.</p>	<p>Finns inte ännu, behöver utvecklas.</p> <p>Felet behöver frånskiljas under avbrott, såvida inte brytställen finns.</p>	<p>Det behöver säkerställas att primärfel kopplas bort även vid fel inom felbortkopplingssystemet, inklusive fel i kommunikationsutrustning, fel i central enhet med mera.</p>

## 7 Slutsats och nästa steg

Mikronätets topologi, typ av generering och antal brytställen kommer ha stor betydelse för utformning av reläskyddssystemet och dess kommunikation. Alla mikronät kommer att behöva analyseras separat för att kunna avgöra vad som är den lämpligaste uppsättningen av reläskyddsfunktioner. Rapporten beskriver ett flertal lösningar som kan fungera även vid önätsdrift, vissa med kompletteringar i form av exempelvis inkoppling av nollpunktsmotstånd. I praktiken kan dock utöver tekniska begränsningar även ekonomiska begränsningar påverka val av lösningsmetod.

Generellt bör samma krav på felbortkopplingssystemet tillämpas för mikronät vid drift mot nät och vid önätsdrift. Dock kan krav gällande selektivitet vid önätsdrift möjligtvis relaxeras beroende på de specifika förutsättningarna. Kravbilden behöver även baseras på huruvida en spontan övergång till önätsdrift accepteras

Kravställning i nätkoder är ursprungligen framtagna för att erhålla ett driftsäkert och stabilt kraftsystem. Det är inte säkert att detta fullt täcker in mikronätsapplikationer, exempelvis huruvida krav på feltålighet är tillräckliga för distribuerad generering vid önätsdrift av mikronät. I föreliggande rapport lyfts bristen på krav för typ A generering framför allt gällande feltålighet och inmatning av snabb felström, vilket hade kunnat förenkla framtagandet av skyddsfilosofi. Även bristen på krav för batterilager lyfts fram. Avsaknad av injicering av minusföljdskomponent kan vara ett problem för reläskydd där minusföljd används av de interna algoritmerna för att identifiera felbehäftad fas. I Tyskland har man krävställt att omriktarbaserad generering skall bidra med minusföljdsström vid fel. Det skulle kunna vara relevant att undersöka liknade krav för Sverige samt hur det påverkar kraftelektroniken och vilka andra konsekvenser detta hade fått.

### 7.1 FORTSATTAS STUDIER

Som en fortsättning på projektet skulle en fallstudie kunna genomföras. Denna fallstudie kan te sig på helt olika sätt, exempelvis en teoretisk undersökning av hur andra reläskyddslösningar hade kunnat fungera för pilotprojekten Arholma och Simris. Det skulle också kunna vara av mer praktisk karaktär där man även sätter upp skyddslösningar på plats, som dock endast får signalera vid fel och inte vara kopplade till utlösningsskretsarna.

Som ett alternativ till detta så skulle det vara möjligt att studerareläskyddslösningar för en del av ett vanligt distributionsnät som planeras för att kunna köras i önätsdrift i framtiden.

Det bör även utredas huruvida mikronät kan vara ett alternativ till nätförstärkningar i vissa områden. I samband med detta bör det även fastslås vilka gränser som gäller för tillgänglighet i mikronät jämfört med de vanliga näten.

Hur oavsiktlig ödrift av distribuerad generering kan undvikas, exempelvis vid spänningssättning av jordfel, bör undersökas djupare. Detta gäller oavsett om den

distribuerade genereringen är ansluten till ett mikronät eller ett vanligt distributionsnät.

Vidare bör även dynamiken inom mikronät studeras. Även om felbortkopplingssystemet kan vara utfört för att kunna detektera och koppla bort fel vid önätsdrift så är dynamiken viktig för den fortsatta driften av mikronätet efter felet. Det kan vara så att de dynamiska fenomen som kan förekomma vid önätsdrift är av sådan art att det finns behov av ytterligare kravställning.

Harmoniserad kravbild för mikronät samt i nätkoderna för batterilager och typ A produktionsmoduler är av framtida intresse. Här kan t.ex. studier vad andra länder gjort och vilka krav som hade kunnat tillämpas i Sverige vara ett naturligt nästa steg.

## 8 Referenslista

1. Microgrids 1 Engineering, Economics, & Experience, Working Group C6.22 Cigré, October 2015.
2. ACER, 'ACER Policy Paper on the revision of the network code on requirements for grid connection of generators and the network code on demand connection', *Connection Codes* (26 September 2022), [https://acer.europa.eu/Position%20Papers/260908%20ACER%20GCNCs%20Policy%20Paper\\_final.pdf](https://acer.europa.eu/Position%20Papers/260908%20ACER%20GCNCs%20Policy%20Paper_final.pdf), hämtad 24 Maj 2023.
3. Ali, M., Makki, E., Cazal, C. et al., European Commission, Directorate-General for Energy, (2021) Implementation of the network code on requirements for grid connection of generators – Final report. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/235293>.
4. Technical requirements for the connection and operation of customer installations to the medium voltage network (TCR medium voltage) English translation of VDE-AR-N 4110:2018-11.
5. Technical requirements for the connection and operation of customer installations to the high voltage network (TCR high voltage) English translation of VDE-AR-N 4120:2018-11.
6. Energy networks association (ENA), 'Engineering Recommendation G99 Issue 1 – Amendment 9 Requirements for the connection of generation equipment in parallel with public distribution networks on or after 27 April 2019', *Connecting generation to the electricity networks* (3 Oktober 2022), <https://www.energynetworks.org/operating-the-networks/connecting-to-the-networks/connecting-generation-to-the-electricity-networks>, hämtad 24 Maj 2023.
7. L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.
8. L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.
9. L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.
10. L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.
11. Short circuit contribution of new generating units connected with power electronics and protection behaviour, ENTSO-E, 2019.
12. L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.

13. Saleh A. Saleh et al., On the factors affecting battery unit contributions to fault currents in grid-connected battery storage systems, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 58 2022.
14. J Quispe et al., Transmission line protection challenges influenced by inverter-based resources: a review, , Protection and Control of Modern Power Systems 2022,7.
15. Short circuit contribution of new generating units connected with power electronics and protection behaviour, ENTSO-E 2019.
16. Aboutaleb Haddadi et al., Impact of inverter based resources on system protection, Energies 2021,14.
17. L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.
18. L Messing et al., Wind Power and Fault Clearance, Final Report, Elforsk rapport 10:99.
19. H. Wilms et al., "Microgrid Field Trials in Sweden: Expanding the Electric Infrastructure in the Village of Simris," in IEEE Electrification Magazine, vol. 6, no. 4, pp. 48-62, Dec. 2018, doi: 10.1109/MELE.2018.2871295.
20. Anton Dahlgren, "Felbortkopplingsutredning LES Simris", E.ON Energidistribution AB utredning D18-0192118 utgåva 1.0
21. Intervju 20230227 med Arne Berlin, Firas Daraiseh och Yiming Wu Vattenfall R&D.
22. Intervju 20230227 med Arne Berlin, Firas Daraiseh och Yiming Wu Vattenfall R&D.
23. Laaksonen et al, Adaptive Protection and Microgrid Control Design for Hailuoto Island, IEEE Transactions on Smart Grid Vol 5, No 3, May 2014.
24. Alexandre Oudalov, New Technologies for Microgrid Protection, ABB Corporate Research, Santiago 2013 Symposium on Microgrids.
25. Alexandre Oudalov, New Technologies for Microgrid Protection, ABB Corporate Research, Santiago 2013 Symposium on Microgrids.
26. Microgrids 1 Engineering, Economics, & Experience Working Group C6.22 Cigré, October 2015.
27. ABB 1MRK 602 072 UEN REG670.
28. L Messing et al., Jordfelsdetektering i mellanspänningsnät, Energiforsk rapport 2015:128.
29. L Messing et al., Jordfelsdetektering i mellanspänningsnät, Energiforsk rapport 2015:128.
30. L Messing et al., Jordfelsdetektering i mellanspänningsnät, Energiforsk rapport 2015:128.



31. L Messing et al., Jordfelsdetektering i mellanspänningsnät, Energiforsk rapport 2015:128.
32. L Messing et al., Jordfelsdetektering i mellanspänningsnät, Energiforsk rapport 2015:128.
33. Ari Wahlroos et al., Application of Novel Multi-frequency Neutral Admittance Method into Earth-Fault Protection in Compensated MV-networks, ABB White paper 2017.
34. Nortroll Product Catalog, Fault Passage Indicators to locate short circuit and earth faults.

# FELBORTKOPPLING I MIKRONÄT

I det här projektet har vi undersökt vilka krav som finns för felbortkoppling i mikronät på idag, vilka reläskyddslösningar som har använts i olika pilotprojekt för mikronät samt slutligen studerat tänkbara lösningar för framtida mikronät. Flera tänkbara lösningar för att detektera och koppla bort kortslutningar och jordfel på mellanspänningsnivå har identifierats. I slutändan är det dock svårt att enskilt avgöra vilken lösning som är den mest lämpliga då detta påverkas av mikronätets topologi, vilken typ generering som finns och antalet brytställen.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på [energiforsk.se](http://energiforsk.se).

