

# El-sikkerhet for ladesystemer med jordfeil i elektriske kjøretøy

**Jørgen Rendum**

Master i energibruk og energiplanlegging

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Eilif Hugo Hansen, IEL

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for elkraftteknikk



NTNU



## MASTEROPPGAVE

- Kandidatens navn : Jørgen Rendum
- Emne : TET4905 Energibruk og energiplanlegging, masteroppgave
- Oppgavens tittel (norsk) : **El-sikkerhet for ladesystemer med jordfeil i elektriske kjøretøy**
- Oppgavens tittel (engelsk) : Electric safety for charging systems with ground fault in electric vehicles
- Oppgavens tekst : Elektriske biler har fått stor utbredelse i Norge, og dette har gitt mange utfordringer for utforming av de elektriske installasjonene for ladepunkt. Ladepunkt i tilknytning til privathus, borettslag, og offentlige områder, kan ha ulike krav til utforming. Men uansett er sikkerhetsaspektet viktig. Flere forhold er fortsatt under vurdering i både nasjonale og internasjonale standardiseringsorganer. Dette gjelder bl.a. tilkoblingspunkt, jordfeilvern og nettsystem. Særlig valg av jordfeilvern har vært mye diskutert, både hvordan jordfeilstrømmer med DC-komponenter vil påvirke ulike jordfeilvern, og ikke minst hvilke løsninger som er akseptable elsikkerhetsmessig i eksisterende installasjoner med ulike utførelser.
- Kandidaten skal
- vurdere elsikkerhetsmessige utfordringer ved AC-ladesystemer for elbil tilkoblet TN-, TT- og IT-nett.
  - undersøke hvordan ulike valg av type jordfeilvern, og kombinasjoner av flere typer, vil oppføre seg ved en eventuell jordfeil.
  - undersøke hva som kan være utslagsgivende for å få jordfeilstrømmer med DC-komponenter.
- Oppgavens gitt : 15.01.18
- Besvarelsen leveres innen : 11.06.18
- Besvarelsen levert : 06.06.18
- Kandidatens veileder : Eilif H. Hansen, NTNU

Trondheim, 15.01.18

faglærer



## Forord

Dette prosjektet er den avsluttende masteroppgaven utført ved masterprogrammet Energibruk og energiplanlegging ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) i Trondheim, hos institutt for elkraftteknikk. Masteroppgaven er avlagt gjennom studieprogrammets hovedprofil Energibruk i bygninger. Prosjektets varighet har vært 20 uker og tilsvarer 30 studiepoeng. Normalt er masteroppgaven en videreføring av et fordypningsprosjekt med samme tema, som blir gjennomført i høstsemesteret. I dette tilfellet har masteroppgaven et tema forskjellig fra fordypningsprosjektet, med en ny problemstilling.

Prosjektet tar for seg jordfeil ved lading av elektriske kjøretøy og hvordan det kan påvirke jordfeilvern i ulike fordelingssystemer. Prosjektet er utarbeidet på bakgrunn av tema og problemstilling fra normkomite 64-bygningsinstallasjoner (NK64), som forvalter normsamlingen NEK 400. Temaet er dagsaktuelt nå som det blir stadig flere elektriske kjøretøy på de norske veiene.

Jeg vil først rette en takk til prosjektets veileder Eilif Hugo Hansen. Jeg vil også takke ingeniørene ved instituttets servicelab for utstyr og hjelp til oppsett av laboratorieforsøket. Til slutt vil jeg også takke Arne Kvernbakken hos ABB og Odd Kleven hos Schneider Electric, som har bidratt med produkter til testing.

Trondheim, juni 2018

Jørgen Rendum



## Sammendrag

På bakgrunn av økende bruk av elektriske kjøretøy, tar denne rapporten for seg flere aktuelle forhold ved jordfeil under lading av elektriske kjøretøy. Likestrøm kan flyte til jord dersom det er en jordfeil i den elektriske ombord-kretsen til elektriske kjøretøy under lading. Likestrøm kan påvirke jordfeilvernens riktige drift, slik at det blir ufølsomt («blind») for ytterligere feilstrømmer og kan ikke garantere utkobling. Dette fenomenet kalles noen ganger for DC-blindhet.

For å opprettholde sikkerheten er det kommet nye nasjonale og internasjonale standarder. Flere forhold vedrørende jordfeil under lading av elektriske kjøretøy er under vurdering, som valg av jordfeilvern, antall faser og type nett-system kjøretøyet er tilkoblet. Rapporten gir innsikt i de ulike faktorene som er utslagsgivende ved valg av riktig jordfeilvern ved lading av elektriske kjøretøy.

Gjennom et laboratorieforsøk hvor ulike jordfeilvern type A er testet, er det konkludert med at jordfeilvern type A tåler likestrøm bedre enn hva som antas. Jordfeilvern type A med 30 mA merkeutløsestrøm kan opprettholde riktig drift ved påtrykket likestrøm fra opp under 60 mA til opp under 330 mA, avhengig av type vern og produsent. Samtidig er jordfeilvernens evne til å koble ut avhengig av forholdet mellom AC- og DC-strømstyrken i jordfeilstrømmen. Likestrøm vil mest sannsynlig ikke føre til en betydelig økning i utkoblingstiden til jordfeilvern type A. Jordfeilvern type A fra anerkjente produsenter kan mest sannsynlig installeres oppstrøms jordfeilvern type B uten påvirkning av likestrøm, forutsatt at begge vern har en merkeutløsestrøm på 30 mA.

Gjennom en litteraturstudie er det konkludert med at det er størst sannsynlighet for DC-blindhet i et TN-nett på grunn av muligheten for trefaset lading som kan føre til jevn likestrøm til jord. I et IT-nett uten andre feil, vil en eventuell jordfeil i ombordladeren ved lading ikke føre til DC-blindhet av jordfeilvernet. Jordfeilstrømmen i lavspente fordelingsnett vil være avhengig av impedansen i feilkretsen, men totalt sett er jordfeilstrømmen hovedsakelig avhengig av det elektriske kjøretøyet.

Valg av riktig jordfeilvern ved lading av elektriske kjøretøy vil være avhengig av ombordladeren. Dersom ombordladere har høy isolasjonsresistans, forsterket isolasjon og galvanisk isolasjon er det liten sannsynlighet for at en jordfeil i ombordladeren vil forårsake DC-blindhet på forankoblede jordfeilvern type A. Dersom det kommer strengere sikkerhetskrav til ombordladere kan risikoen for likestrøm til jord kraftig reduseres, eventuelt elimineres.





## Abstract

Due to the increased use of electric vehicles (EV), this report addresses several relevant conditions in the event of a ground fault when charging EV's. Direct current can flow to ground if there is a ground fault in the electrical on-board circuit for EV's during charging. Direct current may affect the proper operation of residual current devices (RCD), so that it becomes insensitive ("blind") to any further ground faults and tripping cannot be guaranteed. This phenomenon is sometimes called DC-blindness.

To maintain safety during charging, new national and international standards have been introduced. Several conditions regarding ground fault during charging of EV's are being considered, such as the choice of RCD, number of phases used and type of network the vehicle is connected to. This report provides insight into the various factors that are decisive when selecting the correct RCD for EV charging.

By means of laboratory tests on various types of RCD's type A, it has been concluded that RCD's type A tolerates direct current better than expected. RCD type A with rated residual operating current of 30 mA can maintain proper operation with applied direct current from up to 60 mA to up to 330 mA, depending on type and manufacturer. At the same time, RCD's ability to trip depends on the ratio between AC and DC in the fault current. Direct current will most likely not lead to a significant increase in the tripping time of RCD's type A. RCD's type A from reputable manufacturers can most likely be installed upstream of RCD's type B without any impact from direct current, provided both RCD's has a rated residual operating current of 30 mA.

Through a literature study it has been concluded that DC-blindness is most likely to occur in TN-system, due to the possibility of three-phase charging that can cause smooth DC residual current. In an IT-system without any other faults, a possible earth fault in the on-board charger will not result in DC-blindness of RCD. The earth fault current in low voltage distribution networks depends on the impedance in the fault circuit, but overall, the ground fault current depends mainly on the EV.

Choosing the right RCD for EV charging will depend on the onboard charger. If the on-board chargers have high isolation resistance, reinforced isolation and galvanic isolation, there is a low probability that a ground fault in the on-board charger will cause DC-blindness on RCD's type A. If stricter safety requirements are imposed on on-board chargers, the risk of DC residual currents can be greatly reduced, possibly eliminated.



## Innhold

Forord .....	i
Sammendrag .....	iii
Abstract .....	v
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Formål .....	2
1.3 Avgrensninger og metode .....	2
2. Lading av elektriske kjøretøy .....	3
2.1 Lademodus .....	3
2.1.1 Modus 1 .....	3
2.1.2 Modus 2.....	3
2.1.3 Modus 3.....	4
2.1.4 Modus 4.....	5
2.2 Forsyningsnettet .....	5
2.2.1 Lavspente fordelingssystemer .....	5
2.3 Lading av elbil fra boliginstallasjon.....	10
2.3.1 NEK 400.....	11
2.4 Ombordlader.....	13
2.4.1 Jordfeil i ombordlader .....	17
3. Jordfeilvern.....	21
3.1 Strømstyrt jordfeilvern .....	21
3.1.1 Typer jordfeilvern .....	22
3.1.2 DC-blindhet/funksjonssvikt .....	26
3.2 Strømgjennomgang .....	29
4. Laboratorieforsøk .....	33
4.1 Måleteknikk.....	33
4.2 Måleutstyr.....	35
4.3 Testobjekter.....	36
5. Resultater.....	37
6. Diskusjon.....	45
6.1 Laboratorieforsøk .....	45
6.2 Resultat.....	46

6.3 Jordfeilvern.....	48
6.4 Forskjell mellom nettsystemer .....	49
6.5 Jordfeil i ombordlader .....	51
6.6 Videre arbeid .....	53
7. Konklusjon .....	55
Referanseliste .....	57

# 1. Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Transportsektoren står for en stor del av Norges klimagassutslipp. Staten subsidierer elbiler som et virkemiddel for å redusere klimagassutslippene. Subsidieringen har ført til en stor andel elektriske kjøretøy i den norske bilparken. Derfor er Norge blitt en av de største elbilnasjonene. Ved inngangen av 2018 var det registrert 142 490 elbiler i Norge, ca. 97 % av de var personbiler [1].

Økende bruk av elektriske kjøretøy fører til bruksendringer hos den norske husholdningen. De fleste lader elbilen eller hybridbilen hjemme, via vanlig stikkontakt eller en dedikert ladestasjon. Dette medfører en stor andel nye effektkrevende laster i nettet. Derfor er det viktig at ladingen foregår hensiktsmessig og at el-sikkerheten blir opprettholdt.

Dersom det er en jordfeil i den elektriske ombord-kretsen til elektriske kjøretøy under lading, er det en mulighet for at det flyter likestrøm til jord. Likestrømmen kan påvirke jordfeilverns riktige drift. For å opprettholde sikkerheten er det kommet nye nasjonale og internasjonale standarder. Flere forhold vedrørende jordfeil under lading av elektriske kjøretøy er under vurdering, som valg av jordfeilvern, antall faser og type nett-system kjøretøyet er tilkoblet.

Disse forholdene blir vurdert av NEKs normkomite 64 - «Bygningsinstallasjoner» (NK64). NK64 har i oppgave å behandle nasjonale, europeiske og internasjonale elektrotekniske standardiseringer og elsikkerhet relatert til bygningsinstallasjoner. NK64 forvalter også NEK 400 - Elektriske lavspenningsinstallasjoner, en normsamling som skal bidra til tilfredsstillende sikkerhet og funksjon. [2]

Norsk Elektroteknisk Komite (NEK) er det norske medlemmet i de internasjonale standardiseringsorganisasjonene IEC og CENELEC. Ved utarbeidelse av Norske elektrotekniske normer må NEK følge de spilleregler som stilles på europeisk og globalt nivå. NEK kan ikke publisere nasjonale normer som teknisk er i strid med Europainormer (EN) eller harmoniseringsdokumenter (HD), men kan melde inn nasjonale avvik/tilpasninger. [3]

Det har vært mye diskusjon både internasjonalt og nasjonalt om hvilke typer jordfeilvern som bør benyttes ved lading av elektriske kjøretøy. I tillegg er det usikkerhet rundt hvilke typer jordfeilvern som bør benyttes ved enfaset og trefaset lading. Tidligere har standarder lagt opp til bruk av jordfeilvern type A ved enfaset lading, men dette er basert på TN-nett. I Norge er store deler av nettsystemet IT-nett. NK64 har måttet utarbeide normforslag uten fullstendig informasjon om hvordan jordfeilstrømmer vil oppføre seg ved enfaset og trefaset lading i IT-nett.

## 1.2 Formål

Formålet med dette prosjektet er å avdekke mer informasjon om hvordan en eventuell jordfeil vil oppføre seg ved lading av elektriske kjøretøy. Samtidig finne ut hva som kan være utslagsgivende for å få jordfeilstrømmer med DC-komponenter og vurdere hvordan slike strømmer vil påvirke tradisjonelle jordfeilvern, spesielt type A vern. I tillegg skal det avdekkes hvordan ulike fordelingsnett vil påvirke jordfeilstrømmen. Basert på dette skal rapporten gi bedre innsikt i hvilke faktorer som er utslagsgivende ved valg av riktig jordfeilvern ved lading av elektriske kjøretøy.

Gjennom et laboratorieforsøk på ulike jordfeilvern type A, skal følgende spørsmål bli besvart;

- Vil likestrøm forandre utkoblingstiden til jordfeilvern?
- Vil likestrøm føre til at jordfeilvernet ikke løser ut?
- Vil jordfeilvern trenge en høyere AC jordfeilstrøm for å koble ut når det samtidig påtrykkes en likestrøm?
- Hvor stor likestrøm må til for å degradere funksjonen til jordfeilvern?

## 1.3 Avgrensninger og metode

For å avgrense oppgaven tar den bare for seg lading av elektriske kjøretøy fra bygningsinstallasjoner, nærmere sagt hjemmelading og eventuelt lading på jobb. På bakgrunn av dette er det valgt å fokusere og teste jordfeilvern type A med merkeutløsestrøm på 30 mA, som er sett på som det mest utbredte jordfeilvernet i bygningsinstallasjoner. I denne rapporten er elektriske kjøretøy definert som ladbar elbil og ladbar hybridbil. Diskusjon og konklusjon er gjennomført på basis av modus 2 og modus 3 lading, som er de vanligste lademodusene for slike kjøretøy.

Det er gjennomført en litteraturstudie for å danne grunnleggende kunnskap rundt problemstillingen. Bakgrunnsinformasjon er hentet ved å ta kontakt med aktuelle aktører innen elsikkerhet i form av DSB, NELFO og NEK. I tillegg er ABB blitt kontaktet (produsent av jordfeilvern) for innspill om problemstillingen fra deres side.

På grunn av manglende kunnskaper i bransjen er det valgt å gjennomgå internasjonale forskningsrapporter for å finne eventuelle årsaker og sannsynlighet for jordfeil i elektriske kjøretøy. I tillegg er relevante standarder blitt oppsøkt og gjennomgått. Til slutt er det utført et laboratorieforsøk for å teste ulike jordfeilvern.

## 2. Lading av elektriske kjøretøy

### 2.1 Lademodus

Det finnes fire forskjellige lademoduser for lading av elbiler. De ulike lademetodene er utarbeidet av det internasjonale standardiseringsorganet (IEC) gjennom standarden IEC 61851-1:2017. Dette kapitlet vil se nærmere på de ulike metodene.

#### 2.1.1 Modus 1

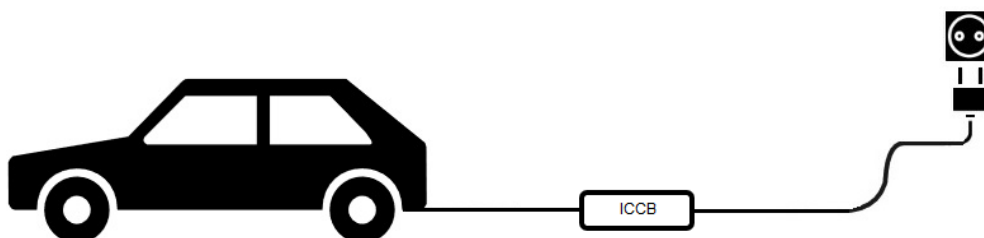
Dette er den simpleste lademetoden hvor det benyttes en vanlig kabel mellom bilen og tilkoblingspunktet. Her kobles kabelen til tilkoblingspunktet via standardiserte stikkontakter  $\leq 16$  A og  $\leq 250$  V AC énfase eller  $\leq 480$  V AC trefase [3]. Denne modusen brukes bare for enkle kjøretøy og eldre elbil-modeller. Fra Figur 1 kan man se at kabelen ikke har noen styringsboks som overvåker ladingen og derfor har denne modusen lavest sikkerhet.



Figur 1 Illustrasjon av lademodus 1.

#### 2.1.2 Modus 2

I likhet med modus 1 så lades det elektriske kjøretøyet via standardiserte stikkontakter. Disse standardiserte stikkontaktene kan enten være schuko-kontakt (NEK 502 kontakt) eller industrikontakt (NEK EN 60309). Det elektriske kjøretøyet tilkobles  $\leq 32$  A og  $\leq 250$  V AC énfase eller  $\leq 480$  V AC trefase [3]. Figur 2 viser ladekabelen som brukes. Ladekabelen er utstyrt med en styringsboks med kontrollfunksjoner. Denne boksen kalles «in-cable control box» (ICCB).



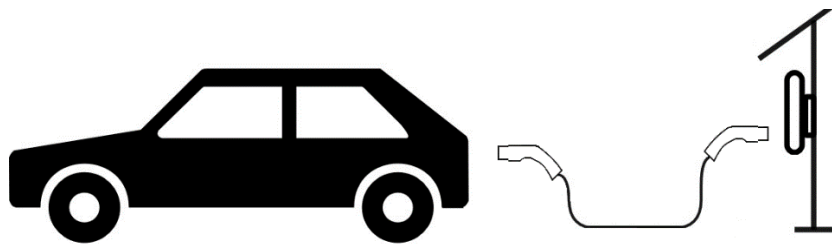
Figur 2 Illustrasjon av lademodus 2 med ICCB.

Styringsboksen skal overvåke ladingen og koble ut fasene dersom den oppdager en jordfeil. Ved hjelp av boksen kan man også regulere ladestrømmen, typisk mellom 8-16 A. Dersom tilkoblingspunktet er en vanlig stikkontakt må ladeboksen henges opp ved siden av. Styringsboksen kan veie fra 1-3 kg, mens en vanlig stikkontakt tåler maks 0,5 kg. For å unngå varmgang og brann i kontakten må den derfor avlastes. [4]

### 2.1.3 Modus 3

Det elektriske kjøretøyet tilkobles forsyningsnettet via en dedikert ladestasjon med integrert kontrollfunksjon [3]. Ladestasjonen fastmonteres på veggen og ladekabelen kan enten være fastmontert eller avtagbar via en type 2 kontakt. Kontroll- og sikkerhetsfunksjonene i modus 2 er integrert i ladestasjonen. Dette er den foretrekkende lademodusen på grunn av høyest sikkerhet.

Kjøretøyet tilkobles ladestasjonen enten via en type 1 eller type 2 kontakt. Disse kontaktene skal tåle en høy belastning over tid. Type 1 kontakten er et enfaset støpsel, mens type 2 kan enten være enfaset eller trefaset. Elbiler og plug-in hybridbiler leveres med enten type 1 eller type 2 ladekontakt. Figur 3 illustrerer hvordan det elektriske kjøretøyet tilkobles ladestasjonen.



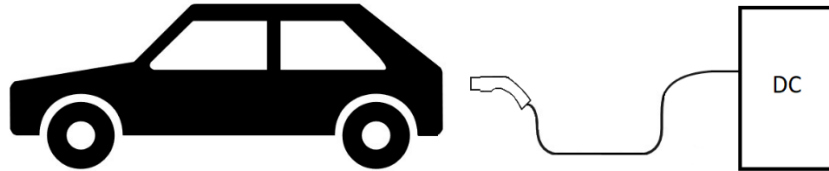
*Figur 3 Illustrasjon av lademodus 3.*

Det finnes mange forskjellige ladestasjoner fra ulike produsenter på markedet. Noen ladestasjoner kan inneholde jordfeilvern type B, mens andre er utstyrt uten noen jordfeilvern. Det finnes også ladestasjoner som er utstyrt med en DC-RCM modul (Residual current monitoring module).



#### 2.1.4 Modus 4

Her blir det elektriske kjøretøyet tilført likestrøm direkte ved at selve ladeenheten er utenfor kjøretøyet, se Figur 4. Ladestasjonen er fast tilkoblet AC-fordelingsnett med integrert kontrollfunksjon og lader. Likestrøm tilført direkte til batteriet gir raskere lading og modusen betegnes derfor som hurtiglading.



Figur 4 Illustrasjon av lademodus 4.

## 2.2 Forsyningsnett

Ny teknologi vil alltid føre til nye tekniske utfordringer. En av utfordringene med økt bruk av elektriske kjøretøy er hvordan eventuelle feil i kjøretøyet vil påvirke annet utstyr. Mye elektrisk utstyr som er tilpasset et europeiske TN-nettet kan fungere ustabil i et IT-nett. Elektriske apparater kan ofte ha innebygget sikkerhetsfunksjoner som overvåker jordfeil. Dersom et elektrisk apparat skruer seg av, trenger det ikke å bety at det har oppstått en jordfeil. Sikkerhetsfunksjoner i utenlandske apparater kan oppfatte at noe er galt når de tilkobles IT-nettet med lokal jording. Apparatet kan dermed skru seg av selv om det nødvendigvis ikke er farlig. [5]

Et godt eksempel på en elbil som ikke er designet for det norske forsyningsnett er Renault Zoe. Da bilen ble lansert i Norge i 2014, var det bare mulig å lade den med 400 V trefase. Det betyr at det bare var mulig å lade bilen via TN-nett, noe de fleste i norske husstander ikke har. For å løse problemet ble det utviklet en ladekabel med en innebygget skilletrafo som muliggjorde lading på IT-nett. [6]

### 2.2.1 Lavspente fordelingssystemer

Lavspente fordelingssystemer deles inn i tre forskjellige systemer, IT, TN og TT. Hvordan en eventuell jordfeil i et elektrisk kjøretøy vil forplante seg kan være avhengig av hvilket nettsystem bilen er tilkoblet.

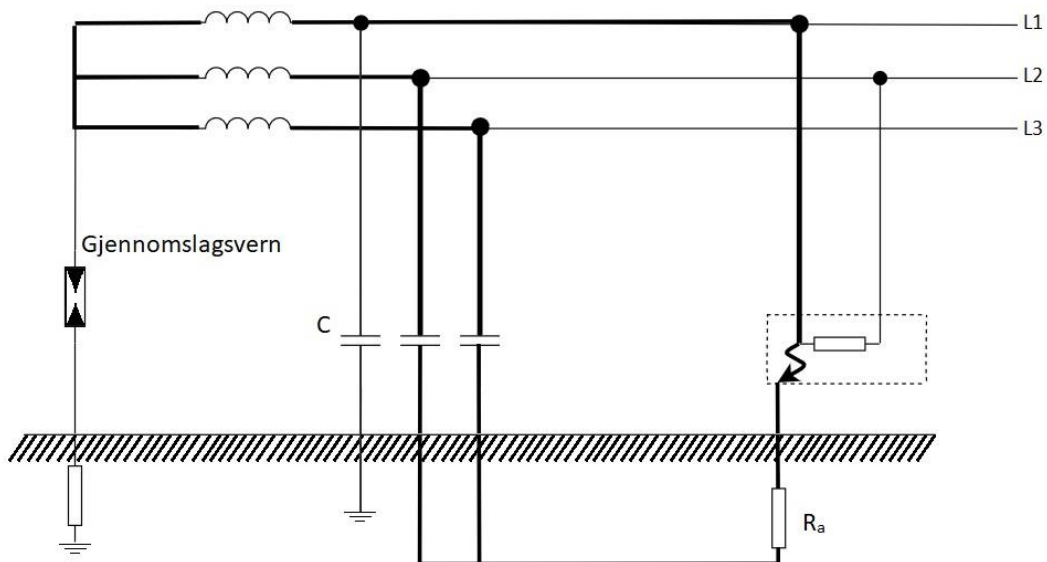
### *IT-system*

IT-nett er det vanligste nettsystemet i Norge. Bokstaven *I* som første bokstav forteller at alle spenningsførende deler er isolert fra jord. Bokstaven *T* som andre bokstav forteller at det er direkte forbindelse mellom utsatte anleggsdeler og installasjonens egen jordelektrode. I Norge er vanligvis transformatorens nullpunkt isolert fra jord via et gjennomslagsvern. Systemet opererer med en nominell spenning på 230 V for bygningsinstallasjoner. [7]

#### **Enpolet jordfeil**

Ved første jordfeil i et IT-nett vil feilstrømmen flyte tilbake til transformatorens nullpunkt via nettets kapasitanser mot jord og gjennom de friske fasene, se Figur 5. Dette gir høye impedanser som reduserer feilstrømmen slik at nettet kan ha en stående jordfeil.

Avledningsimpedansen mot jord består av kapasitanser og resistanser. De ohmske motstandene mellom faselederne og jord er såpas stor at de kan neglisjeres. [7]



*Figur 5 Enpolet jordfeil i IT-nett.*

Det er kapasitansene mellom hver fase og jord som gjør at det dannes en krets slik at det kan gå en strøm [8]. Denne kretsen er galvanisk adskilt mellom jord og de friske fasene.

Strømmen oppstår på grunn av den kapasitive effekten som oppstår mellom nettet og jord.

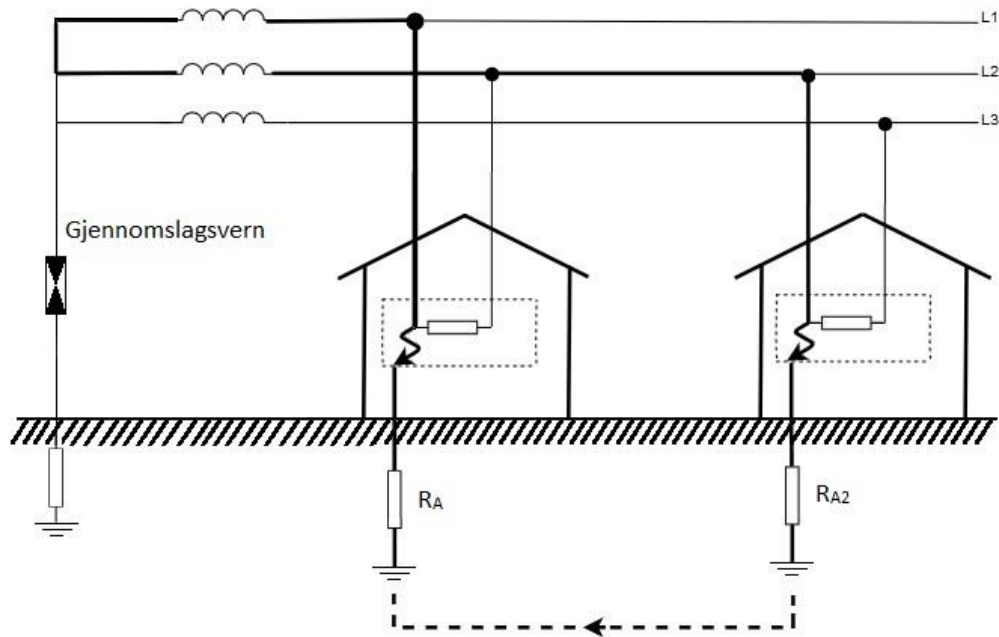
Kapasitansen mellom lederne og jord øker proporsjonalt med utstrekningen av nettet [9]. Det er vanskelig å beregne jordfeilstrømmen, men gjennom målinger er det vist at man kan regne med en maksimal jordfeilstrøm på 2 mA per kVA transformatorytelse [8].

I et friskt IT-nett danner kapasitanser og isolasjonsresistanser et symmetrisk stjernepunkt med 230 V linjespenning og 133 V fasespenning. Ved en direkte jordfeil vil man få linjespenning mellom de friske fasene og jord. Fasen til jord vil få samme potensiale som jord (null). På grunn av overgangsmotstanden mellom jord og jordelektroden vil spenningen mellom fasen og jord egentlig ikke bli null. I tillegg vil man ofte få en overgangsmotstand i selve feilstedet. [7]

Ved enpolet jordfeil med likestrøm til jord, vil potensialet til de friske fasene heves på grunn av den kapasitive effekten mellom jord og nettet, men det vil ikke gå noen likestrøm tilbake til nettet. [Samtale med professor Arne Nysveen 30.05.2018]. Siden alle spenningsførende deler i et IT-nett er isolert fra jord, vil jordfeilstrømmen ikke ha en direkte kobling tilbake til nettet. Derfor vil man ikke få noen likestrøm som kan påvirke jordfeilvernet.

### Topolet jordfeil

Dersom det oppstår jordfeil nummer to på en annen fase innenfor samme transformatorokrets, men i en annen installasjon, vil strømmen flyte slik det er vist i Figur 6. Den topolte feilstrømmen er egentlig en kortslutningsstrøm, men man må ta hensyn til jordelektroden. Feilstrømmen vil variere avhengig av jordsmonn, avstand mellom jordelektroden og overgangsmotstanden til jord. Derfor er det ingen garanti at feilstrømmen blir så stor at vernet løser ut i en slik situasjon. Dersom installasjonenes jordingsanlegg er sammenkoblet via nettselskapets jordingsystem, vil impedansen i feilkretsen reduseres. Da er det større sannsynlighet for at overstrømsvernet løser ut. [7]



Figur 6 Topolet jordfeil i IT-nett.

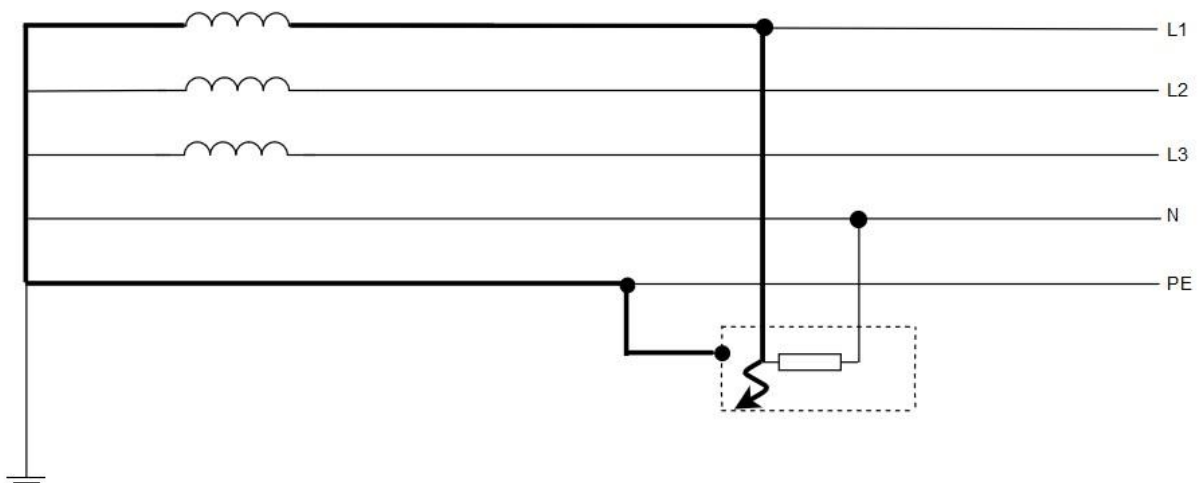
Frem til 2002 var det stort sett tillatt å drive anleggene videre med en jordfeil. Ved jordfeil nummer to kan det oppstå store lekkasjestrømmer som tar ukontrollerbare veier og forårsaker varmeutvikling. Derfor er det nå krav om jordfeilbryter på forbrukerкурser i IT installasjoner som er tilknyttet et allment IT distribusjonsnett. Dette kravet har ikke tilbakevirkende kraft, derfor kan det være stående jordfeilstrømmer i IT installasjoner som er installert før 2002. [7]

### *TN-system*

TN-nett er det vanligste nettsystemet i Europa. Bokstaven T som første bokstav forteller at det er direkte forbindelse mellom et spenningsførende punkt, normalt transformatorens nøytralpunkt, og jord. Bokstaven N som andre bokstav forteller at det er direkte forbindelse mellom utsatte anleggsdeler og nøytralpunktets jord. Utsatte anleggsdeler har direkte forbindelse til nøytralpunktet via PE- eller PEN-ledere. I TN-nett for bygningsinstallasjoner er linjespenningen 400 V og fasespenningen 230 V. Det betyr at enfase 230 V laster kobles mellom en faseleder og N-leder. Enfase 400 V laster kobles mellom to faser, og trefase 400 V laster tilkobles alle tre fasene. [7]

### **Enpolet jordfeil**

Siden utsatte anleggsdeler har direkte forbindelse til nøytralpunktet via PE-ledere, vil returstrømmen flyte tilbake til systems nullpunkt gjennom PE- eller PEN-leder, se Figur 7. Enpolet jordfeil er den vanligste feilen som oppstår i TN-systemer. På grunn av jordingsanleggets utforming vil impedansen i feilkretsen være lavere sammenlignet med IT- og TT-nett. I slike tilfeller vil feilstrømmen være så høy at strømtilførselen automatisk frakobles ved hjelp av sikringer [7]. Strømmen kan bli så høy at man kaller denne feilen for enpolet kortslutning.



*Figur 7 Enpolet jordfeil i TN-nett.*

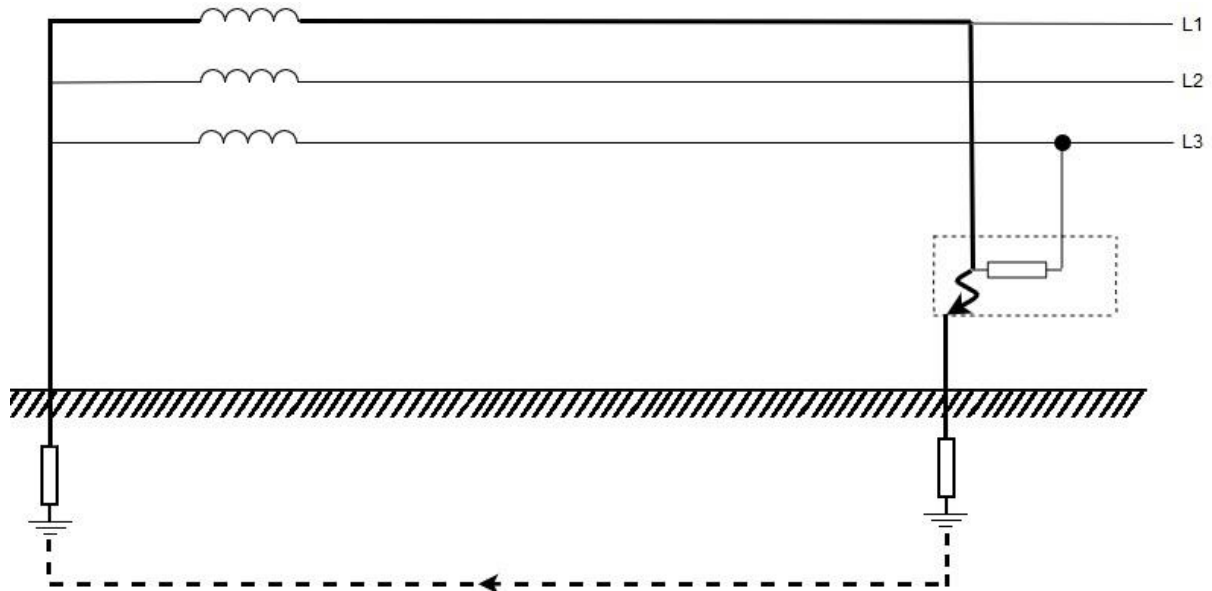
Samtidig kan jordfeilstømmen i noen tilfeller bli begrenset på grunn av overgangsmotstand i selve feilstedet. Det kan være tilfeller der det oppstår lekkasjestrømmer uten full jordslutning [7]. Dersom jordfeilen ikke fører til enpolet kortslutning, kan strømmen bli så lav at sikringer eller overbelastningsvern ikke kobler ut [10]. Slike feilstømmer kan håndteres ved å installere jordfeilvern. Dette blir ofte gjort i nye installasjoner ved å benytte jordfeilautomater.

### TT-system

De få TT-nettene i Norge var opprinnelig IT-nett. Noen nettselskaper har fått tillatelse til å drive nettene med direkte jordet nøytralpunkt på grunn av gamle gjennomslagsvern som ofte ga varige forbindelser til jord. TT-nett er derfor IT-nett med direkte forbindelse mellom transformatorens nøytralpunkt og jord. TT-system kan bare benyttes ved spenninger til og med 230 V. [7]

### Enpolet jordfeil

Ved enpolet jordfeil vil feilstømmen gå tilbake til transformatorens nullpunkt via installasjonens egen jordelektrode, jordsmonnet og jordelektroden til transformatoren, se Figur 8. Jordfeilstømmer vil derfor variere avhengig av jordelektrodens overgangsmotstand til jordsmonnet. Jordfeilstømmen vil sjelden overstige 5-10 A. [7]



Figur 8 Enpolet jordfeil TT-nett.

### 2.3 Lading av elbil fra boliginstallasjon

I eksisterende anlegg i bolig har man ofte en utendørs stikkontakt eller en egen kurs til garasjen. Slike installasjoner er beregnet til bruk av effektkrevende apparater som for eksempel kapp- og gjærsag og vil mest sannsynlig være beskyttet av et overbelastningsvern på minimum 16 A. Man kan derfor tenke seg at å plugge det elektriske kjøretøyet til lading er en enkel sak.

Dersom tilkoblingspunktet er en vanlig stikkontakt (schuko/NEK 502 kontakt) vil derimot kravene ikke være opprettholdt siden NEK 400 vil ha en tilbakevirkende effekt. Dette skriver DSB i en rapport om el-sikkerhet ved elbil-lading [4]. Der henviser de til §16 i forskrift om elektriske lavspenningsanlegg som sier at: *«Elektriske anlegg skal planlegges og utføres slik at mennesker, husdyr og eiendom er beskyttet mot fare og skader ved normal bruk og slik at anlegget blir egnet til den forutsatte bruk»* [11].

I dette tilfellet vil lading av elbil føre til en bruksendring på grunn av kontinuerlig belastning. En vanlig stikkontakt (schuko) er ikke egnet til langvarig belastning over 10 A, derfor vil anlegget ikke være egnet til den forutsatte bruk [4]. Dersom tilkoblingspunktet er en industrikontakt som kan håndtere strømmer fra 16 A til 125 A (avhengig av type), så er fortsatt kravene ikke opprettholdt siden bruksendringen fører til at installasjonen må oppgraderes til gjeldende regelverk.

Nettselskaper kommer med egne krav til ladestasjoner for å beskytte sine nett. For eksempel så anbefaler Hafslund Nett ikke installasjon av enfaset lading med over 20 ampere strømstyrke. Det kan skape skjevspenning og forstyrrelser i strømmettet. Det kan gi forstyrrelser og skader på elektrisk utstyr i eget hus, i tillegg kan det også påvirke naboene. Dersom man ønsker høyere ladeeffekt kan man installere en trefase ladestasjon. [12]

Problemet er at elbiler er produsert for TN-nett, mens i Norge har IT-nettet størst utbredelse. Rundt 1997 begynte nettleverandører å bygge 400 V TN-nett ved nye installasjoner, men fortsatt er over 70 % av distribusjonsnettet i Norge IT-nett. De fleste Europeiske land har TN-nett og elbiler er derfor designet for enfase 230 V og trefase 400 V (med N-leder). Dersom man ønsker en trefase ladestasjon trenger man derfor TN-nett, noe de fleste i Norge ikke har. Dersom man har IT-nett og likevel vil ha trefase lading, så må man installere en transformator som transformerer spenningen fra 230 V til 400 V. En slik installasjon vil være meget kostbar.

### 2.3.1 NEK 400

I 2014 kom den 5. utgaven av NEK 400 Elektriske lavspenningsinstallasjoner som er utarbeidet av NK64. På grunn av den økende bruken av elektriske kjøretøy i transportsektoren, er det utformet en ny delnorm; NEK 400-7-722 «Forsyning av elektriske kjøretøy». Kravene i den nye delnormen gjelder forbrukerkurser beregnet til lading av elektriske kjøretøy og beskyttelse ved tilbakemating til allment eller privat fordelingsnett fra det elektriske kjøretøyet. Dette kapittelet vil ta for seg relevante krav i delnormen og eventuelle endringer og tolkinger gjort av NK64.

#### 722.531.2 Strømstyrte jordfeilvern

*«Hvert tilkoblingspunkt skal være individuelt beskyttet av et allpolig strømstyrt jordfeilvern med merkeutløsestrøm  $\leq 30 \text{ mA}$ .» [3]*

*«Det strømstyrte jordfeilvernet som beskytter tilkoblingspunktet skal minst være av type A. Ved strømforsyning med flere faseledere og hvor egenskapene til belastningen ikke er kjent, skal beskyttelse mot DC-feilstrømmer anordnes, for eksempel bruk av strømstyrt jordfeilvern type B.» [3]*

Det ble en del henvendelser og spørsmål om enfasede tilkoblinger i 230 V IT- og TT-nett skal betraktes som en kobling med flere faseledere. I tillegg var det uklart hva som kreves for at belastningen er kjent. I en tolkning gitt fra NK64 sies det at i IT, TT og TN-systemer med 230 V, er belastningen alltid koblet mellom flere faseledere. Belastningen er kjent dersom tilkoblingspunktet benyttes av ett spesifikt kjøretøy og belastningen må analyseres ved hjelp av en nettanalysator. Jordfeilvern type B skal anvendes som beskyttelse med mindre fabrikanten kan dokumentere at type A gir tilsvarende sikkerhet. [13]

#### 722.55.01 Stikkontakter eller apparatinntak for elektriske kjøretøy

*«For modus 1 og modus 2 lading skal hvert tilknytningspunkt anordnes med:*

- *én stikkontakt eller apparatplugg i samsvar med NEK 60309-2, eller*
- *én stikkontakt i samsvar med NEK 502 dersom merkestrømmen for overstrømsvernet som beskytter stikkontakten er  $\leq 10 \text{ A}$ .» [3]*

Den 6. utgaven av NEK 400 er nå under utarbeidelse og vil tre i kraft 1. juli 2018. Delnormen 722 har vært ute på høring frem til 1. februar 2018. NK64 har gitt uttrykk for at bruk av strømstyrt jordfeilvern type A vil bli sterkt begrenset. Et utdrag fra betaversjonen er tatt med nedenfor.

### **NEK 400-7-722 BETA-versjon**

#### 722.305 Oppdeling av installasjoner

**722.305.101** «Det skal benyttes egen forbrukerkurs for overføring av energi til eller fra et elektrisk kjøretøy.»

**722.305.301** «Dersom det skal monteres ett nytt tilkoblingspunkt for elektrisk kjøretøy for bruk i en eksisterende, frittliggende privat garasje, carport eller utebod, kan dette tilkoblingspunktet, under den forutsetning at ulemper med utilsiktet utkobling av kursen aksepteres av eier, monteres på en eksisterende forbrukerkurs. Denne forbrukerkursen skal ikke forsyne andre tilkoblingspunkter og skal kun forsyne utstyr og stikkontakter montert i umiddelbar nærhet til tilkoblingspunktet som skal monteres.»

Et tilkoblingspunkt er i denne situasjonen definert som et «termineringspunkt i den faste installasjonen hvor elektrisk energi overføres til/fra ett elektrisk kjøretøy.»

#### 722.531.2 Strømstyrte jordfeilvern

**722.531.2.3.101** «Hvert AC tilkoblingspunkt skal være individuelt beskyttet mot virkningene av DC feilstrømmer. Beskyttelsen skal anordnes ved bruk av:

- strømstyrt jordfeilvern B, eller
- strømstyrt jordfeilvern Type A som sammen med et utstyr for detektering av DC sumstrømmer (RDC-DD) i samsvar med NEK IEC 62955, minst gir beskyttelse mot DC feilstrømmer tilsvarende til strømstyrt jordfeilvern Type B, eller
- strømstyrt jordfeilvern Type F som sammen med et utstyr for detektering av DC sumstrømmer (RDC-DD) i samsvar med NEK IEC 62955, minst gir beskyttelse mot DC feilstrømmer tilsvarende til strømstyrt jordfeilvern Type B.

*Strømstyrte jordfeilvern skal ha merkeutløsestrøm  $\leq 30$  mA, og skal være i samsvar med NEK EN 61008-1, NEK EN 60947-2 eller NEK EN 62423.»*

RDC-DD står for Residual Direct Current Detecting Device. De har som formål å fjerne forsyningen til elektriske kjøretøy i tilfeller hvor jevn DC-reststrøm lik eller over 6 mA detekteres. [14]



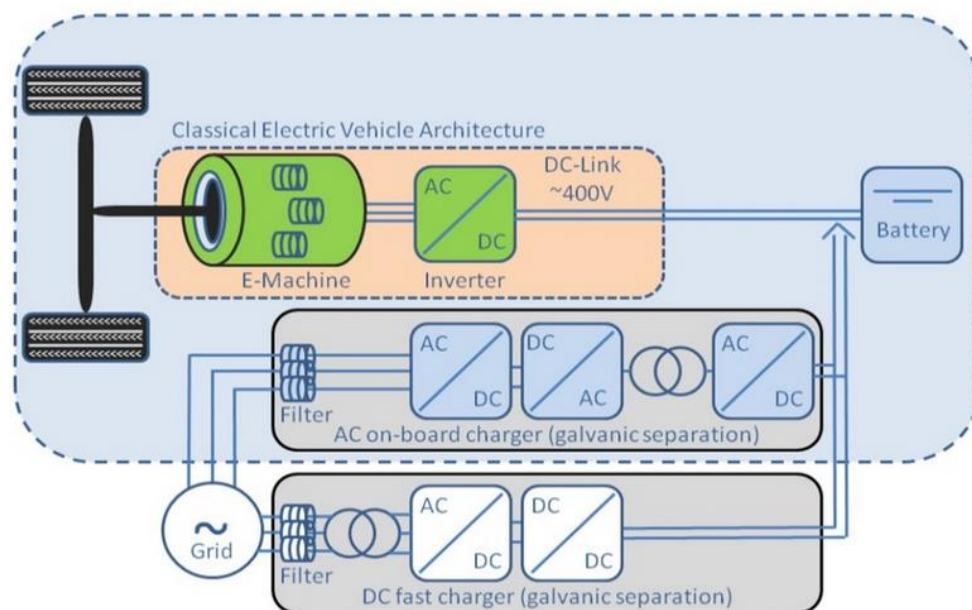
## 722.55 Valg og montasje av elektrisk utstyr – Annet utstyr

### 722.55.101.2 «AC tilkoblingspunkter for privat bruk skal være en:

- elbilkontakt i samsvar med NEK EN 62196-2, eller
- elbilplugg, fast tilkoblet via en kabel og i samsvar med NEKEN 62196, eller
- stikkontakt i samsvar med NEK EN 60309-2, eller
- en stikkontakt i samsvar med NEK 502 dersom stikkontakten er beskyttet av et overstrømsvern med merkestrøm  $\leq 10 A$ .»

## 2.4 Ombordlader

Elektriske kjøretøy kan enten lades ved å tilføre likestrøm direkte til batteripakken (modus 4) eller via ombordladeren («on-board charger» på engelsk, OBC) i bilen. Modus 4 lading kategoriseres som hurtiglading og er tilgjengelig via offentlige ladestasjoner. De andre modusene benyttes ved hjemmelading og har derfor størst utbredelse. Den vanligste metoden er lading via ombordladeren, hvor nettilførselen blir likerettet, filtrert og transformert til ønsket spenningsnivå. Denne metoden omfattes av lademodus 1, 2 og 3. Figur 9 illustrerer en enkel oppbygning av en elbil og hvordan den kan lades via en ombordlader eller med likestrøm direkte til batteriet.



Figur 9 Enkel oppbygning av elbil med ombordlader og modus 4 lading. [15]

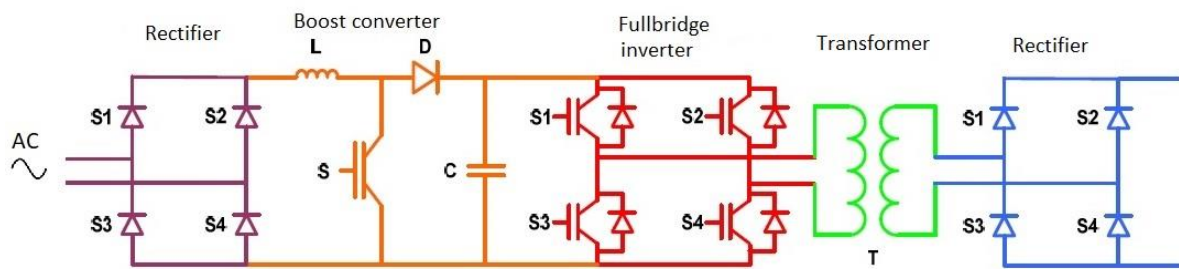
AC-lading via ombordladeren kan deles inn i enfase-lading og trefase-lading. Elbiler kan lades via vanlige stikkontakter, da har man enfase 230 V og ladekapasiteten er dermed begrenset til noen få kW. Lades derimot bilen via trefase kan man oppnå en større effekt, men hovedsakelig så er ladekapasiteten avhengig av ombordladeren [15]. Ladekapasiteten til ombordladeren vil være avhengig av dens utforming og vil være forskjellige fra type bil. Tabell 1 viser en oversikt over ladekapasiteten til ombordladere fra noen av de mest populære elbilene. I tillegg kan man se at de fleste ombordladerne er begrenset til enfaset lading.

*Tabell 1 Antall faser og ladekapasitet hos ulike bilmodeller.*

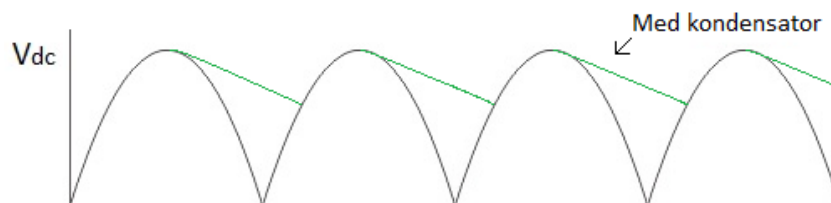
Bilmodell	Ladekapasitet [kW]	Faser
Hyundai Kona	7,2	1
Volkswagen E-Golf	7,2	1
BMW i3	3,7/7,4/11	1/3(11kW)
Nissan Leaf	3,3 eller 6,6 (tilleggsutstyr)	1
Tesla Model S	11/16,5	3
Opel Ampera-e	7,2	1
Kia Soul Electric	6,6	1
Hyundai IONIQ Electric	6,6	1
Volkswagen E-up	3,3	1
Peugeot iOn	3,0	1

En ombordlader kan enten være enveis eller toveis. En enveis ombordlader vil bare overføre energi en vei, fra nettet til batteriet. En toveis ombordlader kan overføre energi i begge retninger og muliggjør energioverføring fra bilen til nettet. Ombordladere kan klassifiseres som enten isolert eller ikke-isolert. Hovedforskjellen er at en isolert ombordlader har galvanisk isolasjon etter DC/DC omformerer ved hjelp av en transformator.

Oppbygningen av en ombordlader er kompleks, men hovedsakelig består den av et filter, PFC, likerettere, vekselretter, (transformator) og DC/DC omformere. Power factor correction (PFC) skal forbedre effektfaktoren ved å trekke en så nært sinusformet strøm som mulig fra nettet [16]. Kretsen i Figur 10 viser et forenklet eksempel på hvordan en ombordlader kan være oppbygget. I dette tilfellet er det en isolert ombordlader. Først blir vekselspenningen likerettet via en diodebro. I dette tilfellet er likeretteren en enfasebrokobling [17]. Spenningskurven etter likeretteren er vist i Figur 11, dersom likeretteren har en kondensator i parallell vil kurven få en grov glatting.

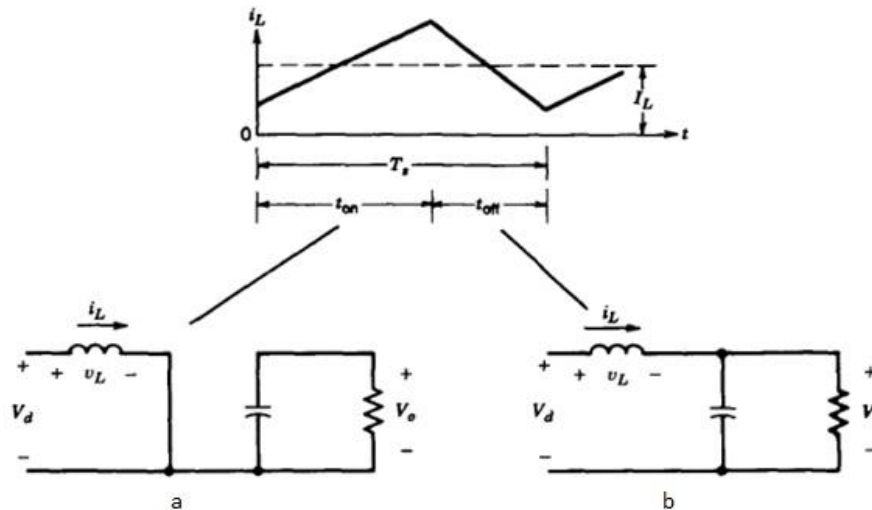


Figur 10 Skjematisk oppbygning av en ombordlader. [16]



Figur 11 Spenningskurven etter likeretting, med glatting av kondensator.

Likeretteren etterfølges av en DC-DC omformer (også kalt boost converter). Den har i oppgave å øke spenningsnivået, derav navnet boost. Når transistoren (S) er på, isoleres utgangen til omformeren og spolen blir tilført energi. Når transistoren er av, blir utgangen tilført energi fra både spolen og inngangen [18]. Begge disse tilstandene er illustrert i Figur 12, i tillegg viser figuren strømkurven gjennom spolen (L).



Figur 12 Strømkurve gjennom spolen i en boost converter. a) transistoren er av, b) transistoren er på. [18]

Boost converter etterfølges av en DC-DC omformer som inneholder en vekselretter, transformator og likeretter. Likestrømmen blir gjort om til vekselstrøm via vekselretteren, før spenningen blir transformert. Etter transformatoren blir strømmen igjen gjort om til likestrøm før den går til batteriet. Transistoren nevnt ovenfor, utfører høyfrekvent av- og påslag. Den høye frekvensen (5-50 kHz) betyr at transformatorens størrelse minskes betydelig [19]. Dette kommer av formelen for industert spenning [20]:

$$E = 4.44fN\Phi_{maks} \quad (1)$$

Hvor:

E = effektiv spenning industert

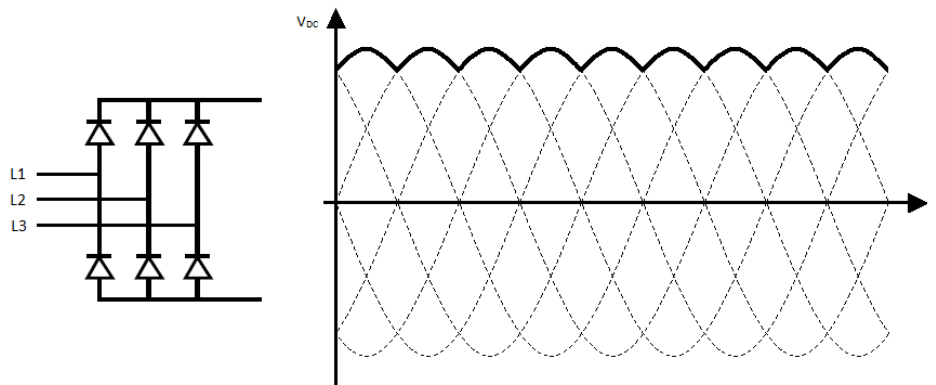
f = fluksens frekvens

N = antall vindinger på spolen

$\Phi_{maks}$  = fluksens toppverdi

4.44 = en konstant ( $2\pi/\sqrt{2}$ )

Dersom ombordladeren er designet for å håndtere trefaset tilførsel, kreves det at nettilførselen likerettes via for eksempel en seks-pulslikeretter, også kalt trefasebrukobling [17]. Eksempel på en slik likeretter kan ses i Figur 13. Fra figuren kan man se at spenningen får en jevnt høyere likeretting enn ved enfase. Metodene for likeretting nevnt ovenfor er ved hjelp av diodebro-koblinger. Likeretting via dioder er den enkleste og billigste metoden, og kategoriseres ofte som ukontrollert. Dersom likeretteren er kontrollert brukes det som regel tyristorer eller transistorer.



Figur 13 Trefaset likeretter og tilhørende spenningskurve.

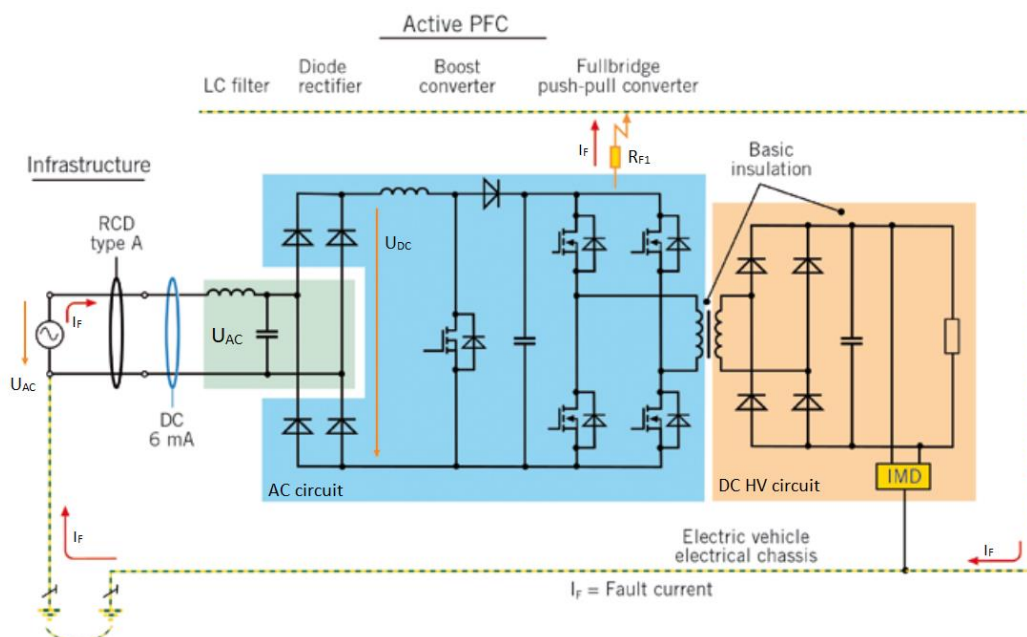
#### 2.4.1 Jordfeil i ombordlader

Strømforsyningssystemet i et elektrisk kjøretøy, kjent som «spenningsklasse B», kan ses som et isolert strømforsyningssystem når den kjører. I elektriske kjøretøy kan man få isolasjonsfeil i ombord-nettverket på grunn av forurensning, fuktighet, feilforbindelser eller mekaniske påvirkninger. En av de store utfordringene er å oppdage isolasjonsfeil tidlig. Ombordladeren kan for eksempel opprettholde sikkerheten ved å ha innebygget beskyttelsesegenskaper som overvåker isolasjonsfeil, gjennomfører automatisk selvtesting, permanent overvåking av koblingen mellom jord og det elektriske chassiset og deteksjon av symmetrisk isolasjonsfeil. [21]

Internasjonal standard ISO 6469-3 spesifiserer krav til elektriske fremdriftssystemer av elektrisk drevet kjøretøy for beskyttelse av personer i og utenfor kjøretøyet mot elektrisk støt. Standarden gjelder bare ombord-kretser for spenningsklasse B ( $60 < U \leq 1500$  V DC,  $30 < U \leq 1000$  AC). Minimum isolasjonsresistans skal minst være  $100 \Omega/V$  for DC og minst  $500 \Omega/V$  for AC. Skadelige effekter skal unngås dersom strømmen er innenfor sone DC-2 for DC, og sone AC-2 for AC (se kapittel 3.2). Kravet til isolasjonsresistans skal sørge for feilstrømmer på 10 mA (DC) og 2 mA (AC). [22]

En isolert lader-topologi er dominerende i elektriske kjøretøy. En isolert ombordlader gir galvanisk isolasjon mellom ombordladerens inngang og utgang gjennom en transformator. På grunn av den galvaniske isolasjonen blir en eventuell jordfeilstrom svært lav [23]. Ikke-isolerte DC-DC omformere har noen generelle fordeler som enkel struktur, høy effekt, høy pålitelighet, lav pris, størrelse, vekt osv. På den andre siden gir ikke-isolerte DC-DC omformere ingen galvanisk isolasjon [24]. Fabrikanten Brusa produserer ombordladere med forsterket- og galvanisk isolasjon. På grunn av forsterket isolasjon mellom DC-linken og jord (PE), kan laderen brukes sammen med jordfeilvern type A. I tillegg vil galvanisk isolasjon hindre muligheten for feilstømmer dersom det oppstår en jordfeil på en av terminalene til batteriet [25].

Figur 14 gir en illustrasjon av hvordan en eventuell jordfeil i ombordladeren kan forplante seg på det overliggende nettet. Dersom det oppstår en jordfeil etter likeretteren, via bilens elektriske chassis, har feilstømmen en direkte rute til forsyningsnettet. Det er fordi en beskyttelsesjordleder (PE-leder) skal være koblet mellom AC-forsyningsens jordterminal i ladeutstyret og det elektriske kjøretøyet [26]. Derfor er det mulig at DC-komponenter kan forplante seg i nettforsyningen. Hvordan feilstømmen vil flyte i fordelingsnettet er avhengig av hvilket nettsystem kjøretøyet er tilkoblet, se kapittel 2.2.1 Lavspente fordelingsystemer. Hvor ofte eller sannsynligheten for at slike jordfeil skjer, finnes det ikke noen tall eller oversikt på enda.

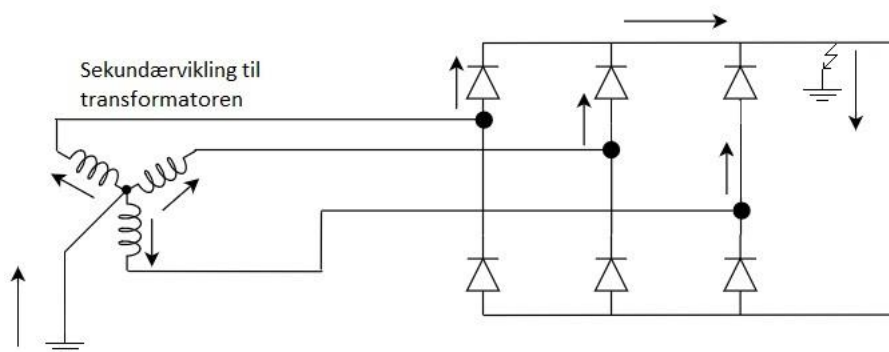


Figur 14 Jordslutning til chassis i ombordlader. [27]

I en spørreundersøkelse for å bestemme industrielle krav og forventninger om påliteligheten i kraftelektroniske omformere, ble halvlederkomponenter (dioder, transistor, tyristor o.l.) rangert som de mest skjøre komponentene. Det ble konkludert med at hovedårsakene til slitasje var på grunn av miljø, transienter og stor last. Spørreundersøkelsen ble gjennomført med en rekke høyprofilerte halvleder-producenter, integratorer, og brukere innen luftfart, automasjon, motordrift, kraftaktører og andre industrisektorer. [28]

Ved å bruke en trefaset likeretterbro er det større sannsynlighet for å få en feilstrøm med DC-komponenter [29]. Spenningskurvene ovenfor (Figur 11 og Figur 13) viser at ved trefaset likeretting vil spenningen aldri nå null, mens ved enfaset likeretting går spenningskurven til null ved hver halvbølge. Trefaset likeretting gir derfor en høyere og jevnere likestrøm.

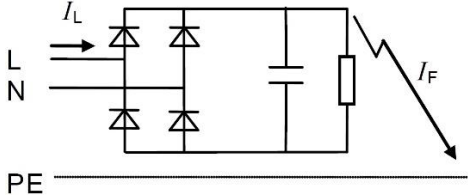
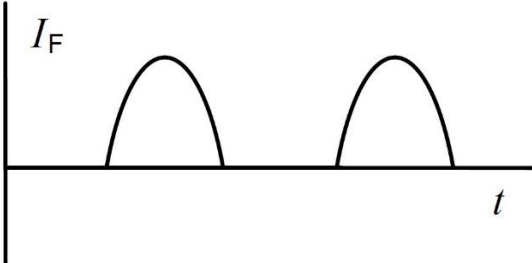
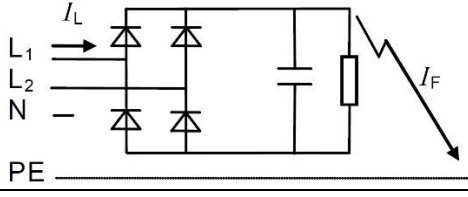
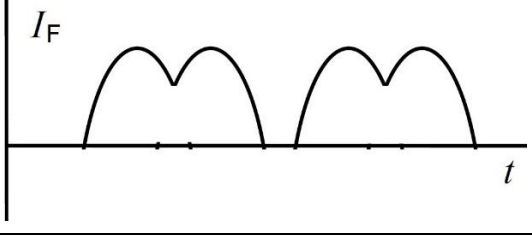
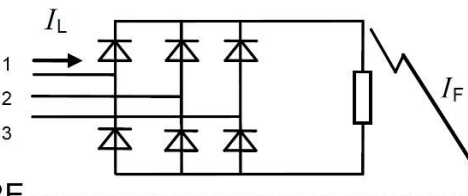
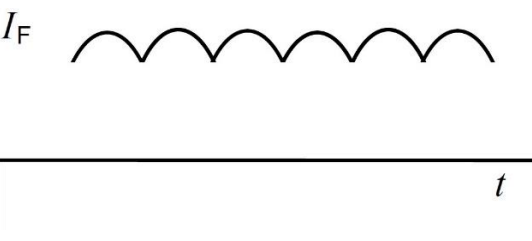
Figur 15 viser en jordfeil på DC-siden av en seks-puls likeretter, som resulterer i en DC-jordfeilstrøm. Diodene på den ene siden av brua, leder en strøm som er summen av laststrømmen og jordfeilstrømmen. Feilstrømmen er hovedsakelig begrenset av impedansen i strømmens returvei via jord. Alle tre fasene får like stor feilstrøm og systemet forblir derfor balansert.



Figur 15 Jordfeil etter seks-puls likeretter.

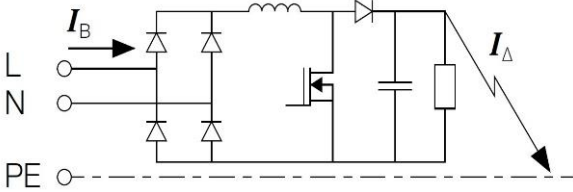
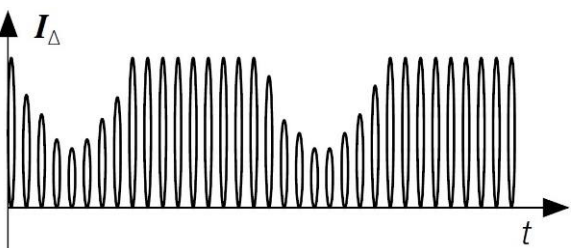
IEC har utarbeidet en oversikt over feilstrømmer som kan oppstå i kraftelektronikken i ulike strømforsyningsenheter. Tabell 2 viser en oversikt over relevante halvlederkretser man kan finne i strømforsyninger. Fra tabellen kan man se at omformere med enfasebrokobling vil feilstrømmen være pulserende, og dermed skal både type A og type B jordfeilvern være egnet.

Tabell 2 Halvlederkretser med jordfeil, feilstrømmens utforming og egnet jordfeilvern. [30]

Halvlederkrets	Feilstrøm	Egnet vern
<p>Two-pulse bridge</p> 		A eller B
<p>Two-pulse bridge between phases</p> 		B
<p>Six-pulse bridge</p> 		B

Tabell 3 viser en halvlederkrets med PFC, som finnes i ombordladere. Fra tabellen kan man se at feilstrømmen har høy frekvens. Dette er på grunn av transistorens raske av- og påslag som fører til en høy di/dt.

Tabell 3 Jordfeil i halvlederkrets med PFC, feilstrømmens utforming og egnet jordfeilvern. [31]

Halvlederkrets	Feilstrøm	Egnet vern
<p>Rectifier with active power factor correction (PFC)</p> 		B



## 3. Jordfeilvern

Jordfeilvern er utformet for å opprettholde sikkerheten i en elektrisk installasjon ved å sikre mot brann, personskade og materielle skader. Jordfeilvern skal gi beskyttelse ved feil eller fungere som tilleggsbeskyttelse dersom andre beskyttelsestiltak feiler. Jordfeilvern betraktes som et samlebegrep for jordfeilbrytere og strømstyrte jordfeilvern. Dette kapittelet vil gi en generell oversikt over jordfeilvernets oppbygning og funksjon, samt de ulike typene som finnes.

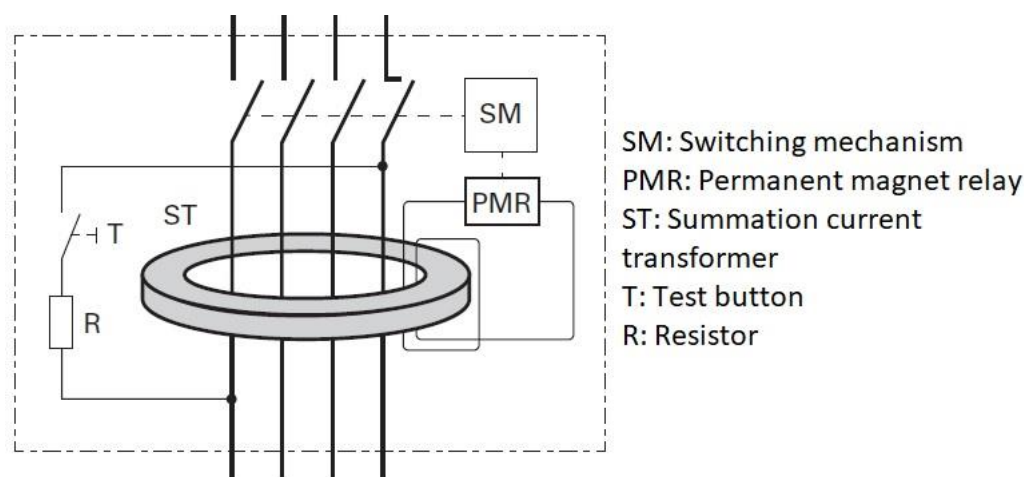
### 3.1 Strømstyrt jordfeilvern

NEK 400 beskriver strømstyrt jordfeilvern som et «mekanisk koblingsapparat beregnet på å slutte, føre og bryte strømmer under normale driftsforhold samt å åpne kontaktene når reststrømmen når en gitt verdi under spesifikke forhold. Et strømstyrt jordfeilvern kan være en kombinasjon av forskjellige elementer beregnet på å detektere, evaluere reststrømmen og slutte og bryte strømmen» [3]. Reststrømmen menes i dette tilfellet vektorsummen av den momentane verdien av strømmene som går gjennom vernet [7].

I 2002 ble det stilt krav til strømstyrt jordfeilvern i IT-nett. Utløsestrøm ble ikke spesifisert, derfor ble det ofte installert 100 mA eller 300 mA jordfeilbrytere foran hele anlegget [7].

I NEK 400:2014 er det krav om tilleggsbeskyttelse ved hjelp av strømstyrt jordfeilvern med merkeutløsestrøm ikke over 30 mA for stikkontakter med merkestrøm ikke over 20 A og som er beregnet til allmenn bruk av ikke sakkyndige, eller montert i boliger [3]. Kravet om tilleggsbeskyttelse som omfatter stikkontakter med merkestrøm ikke over 20 A, kom først i 2006. Dagens løsning vil i de fleste tilfeller være å bruke jordfeilautomater med merkeutløsestrøm på 30 mA [7].

Jordfeilbryterens oppbyggingen kan være utformet forskjellig av de ulike produsentene, men de fungerer prinsipielt på samme måte. Figur 16 viser en prinsipiell skjematisk fremstilling av hvordan en jordfeilbryter kan være oppbygget. En strømstyrt jordfeilbryter består i hovedsak av en sumstrømtransformator, utløseenhet, brytemekanisme og en testknapp. Alle laststrømmene og eventuell N-leder føres gjennom jernkjernen til sumstrømtransformatoren. I et feilfritt system vil den magnetiske effekten i hver leder kansellere hverandre og man får derfor ikke noe magnetfelt som kan indusere en spenning i sekundærviklingen. [32]



Figur 16 Skjematisk fremstilling av en jordfeilbryter. [33]

Sumstrømtransformatoren er oppbygd av en toroid-formet (ring-formet) kjerne som består av et ferromagnetisk materiale med en primærvikling og en sekundærvikling. Alle laststrømmene (og N-leder) føres gjennom toroiden og utgjør primærviklingen i sumstrømtransformatoren. Utløseenheten kan være et rele, en kontaktor eller aktuator som vil utløse brytemekanismen dersom det induseres en strøm i sekundærviklingen. En jordfeilbryter skal alltid være utstyrt med en testknapp for å enkelt teste brytefunksjonen. Testknappen skaper en ubalanse ved å lede en strøm utenom sumstrømtransformatoren via en resistor som simulerer en jordfeil.

Dersom det oppstår en jordfeil på lastsiden av vernet vil feilstrømmen gå via feilstedet og returnere via jord eller beskyttelsesledere. Systemet får dermed en strømubalanse mellom lederne som resulterer i at det produseres en magnetisk fluks i kjernen til transformatoren. Det er denne forskjellen mellom laststrømmene som kalles for reststrøm. Den resulterende vekslende fluksen i kjernen vil indusere en elektromotorisk spenning (ems) i sekundærviklingen som resulterer i en strøm i utløseenheten. Dersom reststrømmen overstiger verdien som kreves, vil brytemekanismen gjøre systemet spenningsløst. [34]

### 3.1.1 Typer jordfeilvern

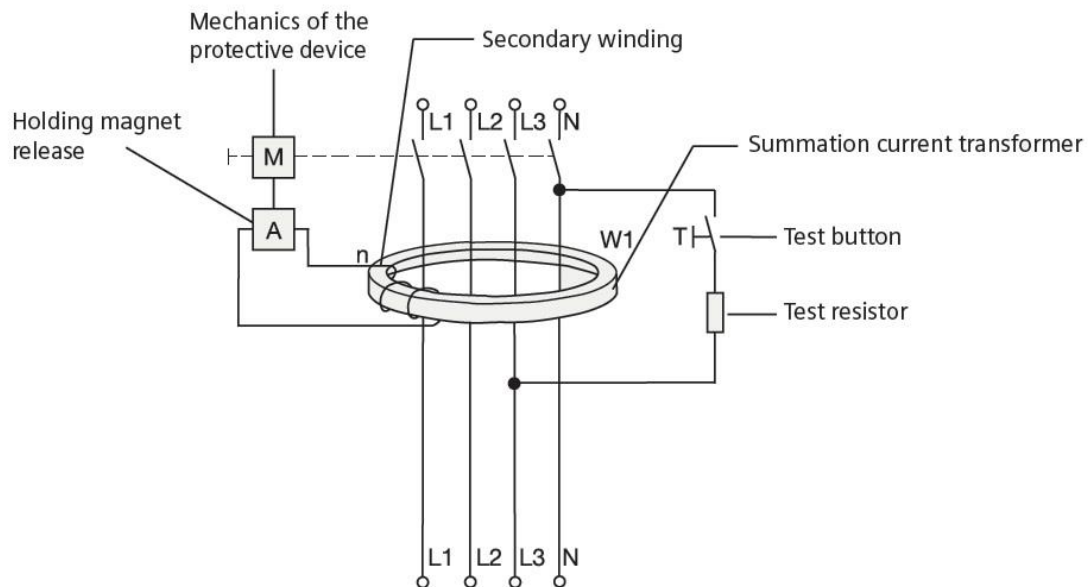
Jordfeilbrytere skilles fra hverandre basert på hvilke reststrømmer de er egnet til å oppdage. Med årene har det kommet forskjellige typer jordfeilbrytere for å tilfredsstille lastutviklingen.

#### **Type AC**

Jordfeilbryter type AC er bare egnet for å oppdage reststrømmer som har en ren sinusbølge. På grunn av økende bruk av kraftelektronikk er de derfor ikke egnet til dagens nett. Denne typen er derfor ikke godkjent å bruke i de fleste land, Norge inkludert.

## Type A

Type A er den vanligste jordfeilbryteren på markedet. Den er beregnet for bruk på nett med sinusformet strøm som kan ha innslag av pulserende likestrøm. I tillegg tåler den pulserende likestrøm med en overlappet likestrøm på 6 mA [35]. Figur 17 viser oppbygningen av en type A. Med unntak av utløseenheten, er oppbyggingen av type AC og type F identisk med type A. [32]



Figur 17 Skjematisk fremstilling av jordfeilbryter type A. [32]

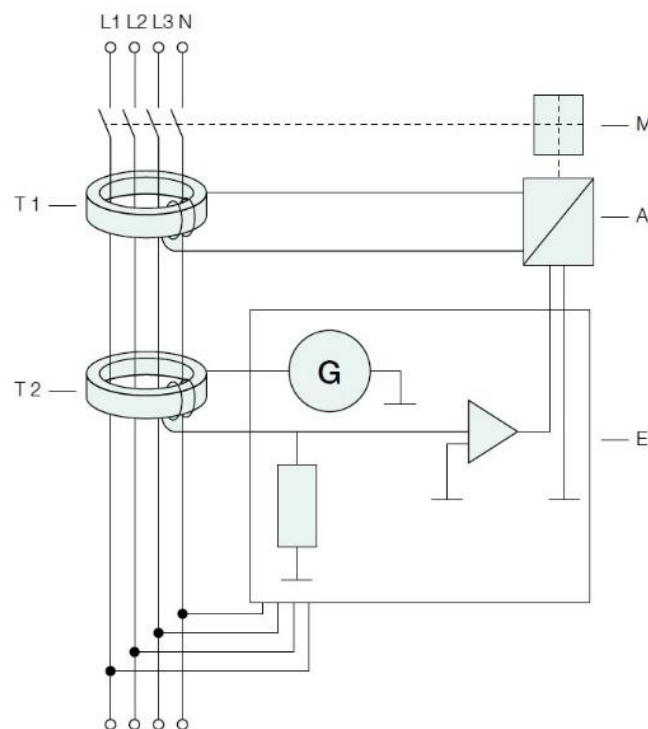
## Type F

Jordfeilbryter type F er tilegnet for laster med enfaset omformere og lignende utstyr (f.eks. vaskemaskiner). Type F er karakterisert på sin sterke immunitet mot feilaktig detektering av jordfeil [36]. De er egnet for å oppdage reststrømmer med blandet frekvenser opp til 1 kHz og jevn likestrøm opp til 10 mA skal ikke påvirke utløseeegenskapene [32].

## Type B

For å håndtere ulempene til type A og type AC, på grunn av reststrøm med DC-komponenter og/eller høy frekvens, er jordfeilbryter type B blitt utviklet. I tillegg til å tåle samme reststrømmer som type A kan type B detektere jevn DC-reststrøm. Type B passer for ulineære kretser som er i stand til å generere jordfeilstrømmer med høye likestrømskomponenter (< 6 mA) og/eller høy frekvens. Slike kretser kan være for eksempel likerettere, frekvensomformere, UPS, ladestasjoner for elbiler eller PV omformere. [31]

Figur 18 viser skjematisk oppbygning av type B jordfeilbryter. Fra figuren kan man se at den er utstyrt med to summasjonstrafoer i serie. Den øverste trafoen (T1) skal detektere vekslende og pulserende reststrømmer. Reststrømmer vil induisere en spenning i sekundærviklingen på samme måte som i type A og type AC. Den nederste trafoen (T2) skal detektere likestrøm. Den fungerer ved å utnytte den magnetiske metningen i det ferromagnetiske materialet kjernen består av. Sekundærviklingen påføres en kontinuerlig vekselspenning som magnetiserer materialet. Den elektroniske kretsen (E) detekterer induktansen i sekundærviklingen. En DC-reststrøm vil bringe toroidkjernen i metning og endre dens magnetiske permeabilitet, som dermed signaliserer utkoblingen av aktuatoren. [31]



Figur 18 Skjematisk fremstilling av jordfeilvern type B. [31]

### Type B+













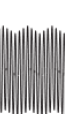
Type B+ har samme funksjonsområde som en vanlig type B, men i tillegg skal den oppdage reststrømmer med en frekvens opp til 20 kHz. [32]

## Jordfeilautomat

Hos husholdning er det vanligst å beskytte seg for jordfeilstrømmen ved hjelp av jordfeilautomater. Jordfeilautomater er en kombinasjon av et jordfeilvern og automatsikring (overbelastningsvern). Jordfeilmodulen i slike vern er av type A. Per dags dato finnes det lite jordfeilautomater med jordfeilmodul type B på markedet. De som finnes er relativt kostbare og fysisk større enn vanlige 2 modul jordfeilautomater.

Tabell 4 gir en oversikt over hvilke bølgeformer de ulike jordfeilvernene detekterer og strømgrensene de løser ut ved. Fra tabellen kan man se at type B har et bredere funksjonsområde enn resten.

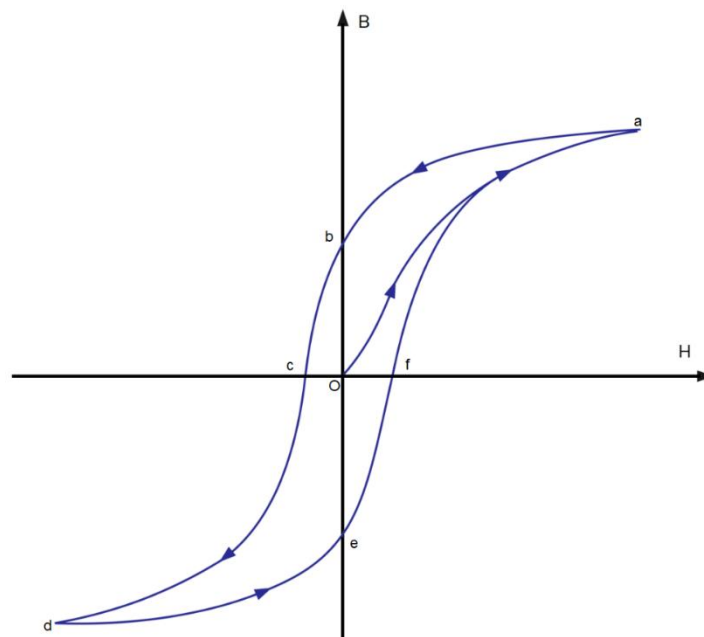
Tabell 4 Riktig funksjon og utløsningsstrømgrense til ulike typer jordfeilvern ved forskjellige jordfeilstrømmer. [31, 32]

Reststrøm		Riktig funksjon av jordfeilvern etter type				Utløsningsstrømgrense
		AC	A	F	B	
						
Vekslende		*	*	*	*	0.5 til 1.0 $I_{\Delta n}$
Enveis pulserende		-	*	*	*	0.35 til 1.4 $I_{\Delta n}$
Enveis pulserende med fasevinkelforsinkelse		-	*	*	*	Forsinkelsesvinkel 90° 0,25-1,4 $I_{\Delta n}$
		-	*	*	*	Forsinkelsesvinkel 135° 0,11-1,4 $I_{\Delta n}$
Enveis pulserende overlappet av likestrøm (+)		-	*	*	*	Maks. 1.4 $I_{\Delta n}$ + 6 mA (type A) + 10 mA (type F) +0,4 $I_{\Delta n}$ (type B)
Vekslende opp til 1 kHz		-	-	*	*	0.5 til 1.4 $I_{\Delta n}$
Tofase likerettet		-	-	-	*	0.5 til 2.0 $I_{\Delta n}$
Trefase likerettet						
Likestrøm uten rippel						
Multifrekvens		-	-	-	*	150 Hz: 0,5-2,4 $I_{\Delta n}$
		-	-	-	*	400 Hz: 0,5-6 $I_{\Delta n}$
		-	-	-	*	1 kHz 0,5-14 $I_{\Delta n}$

### 3.1.2 DC-blindhet/funksjonssvikt

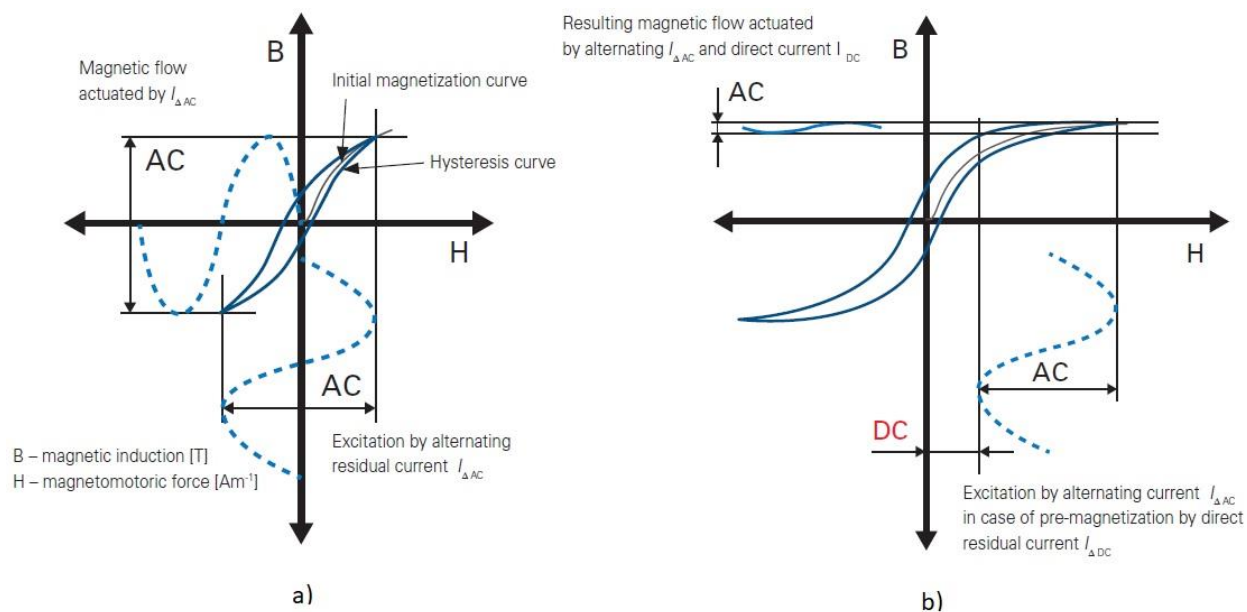
DC-blindhet er et begrep som brukes for å beskrive effekten av at kjernen i en sumstrømtrafo går i metning på grunn av likestrøm. Det kan forårsake funksjonssvikt av jordfeilvern type A. Jordfeil i en DC-link eller etter likeretting kan føre til at likestrøm flyter til jord. Likestrøm som går gjennom en sumstrømtrafo kan føre til metning av kjernen. En AC jordfeil er ment å indukere vekslende fluks i trafoen slik at det produseres en strøm i sekundærviklingen og derav utkobling. Når kjernen er blitt premagnetisert av likestrøm og går i metning, vil det kreve en høyere jordfeilstrøm for at verne skal løse ut. I verste fall vil vernet ikke løse ut [37].

Ved hjelp av en hysteresekurve kan man enklere forstå effekten. Hysteresese er «*det fenomenet at en tilstandsendring ikke forsvinner når påvirkningen fjernes, men først etter at en motsatt rettet påvirkning har virket med en viss styrke*» [38]. Figur 19 viser en hysteresekurve hvor det ferromagnetiske materialet er på forhånd umagnetisert (O).  $B$  er den magnetiske flukstettheten (angis i tesla), og  $H$  er magnetisk feltstyrke (angis i A/m). Fluksen flytter seg fra O, a, b, c, d, e, f, og tilbake til a. Materialet kommer ikke til den magnetiske tilstanden den hadde i utgangspunktet (O). Fluksen veksler mellom positiv og negativ verdi, slik som vekselspanning.



Figur 19 Hysteresekurve.

Hysteresekurven i Figur 20 illustrerer likestrømmens effekt på kjernen til sumstrømtrafoen. Ideell transformasjon skjer ved senterlinjen (a). Reststrøm tilsvarende  $I_{\Delta n}$  (50 Hz) produserer et magnetisk felt, og det induseres en spenning i sekundærviklingen som fører til utkobling. Premagnetisering av transformator kjernen med likestrøm vil skifte driftspunktet til det magnetiske materialet på h-aksen til høyre (b). Dersom samme reststrøm går gjennom kjernen nå, vil den induserte spenningen i sekundærviklingen være lavere og muligens ikke tilstrekkelig for at vernet skal løse ut. [39]



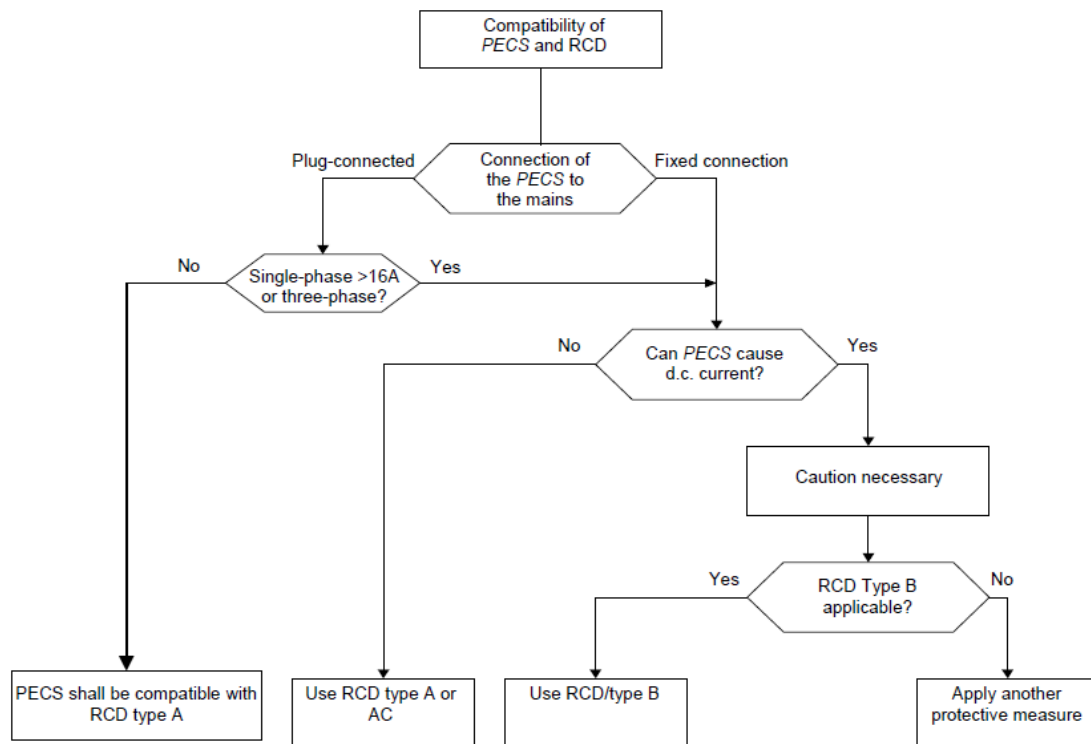
Figur 20 Hysteresekurve som illustrerer premagnetisering av jordfeilvern med likestrøm. a) viser ideell transformasjon, b) viser premagnetisering med likestrøm, som resulterer i en lavere induisert spenning [33]

En jevn DC-feilstrøm kan gjøre vernet ufølsom ovenfor ytterligere reststrømmer, eller gjøre det «blind» slik at dens beskyttende funksjon sviker [33, 40]. Økende bruk av apparater med kraftelektronikk på forbrukernivå kan føre til feilstrømmer med DC-komponenter og/eller høy frekvens, både i systemer med og uten feil. Slike strømmer er ikke beregnet på jordfeilvern type A og type AC, og kan derfor føre til at de ikke fungerer riktig. Som en regel skal type A tåle overlappet DC-reststrøm opp til 6 mA. Dersom reststrømmen er høyere kan riktig drift ikke garanteres. Lekkstrøm med DC-komponenter kan derfor føre til følgende ulemper på type A og type AC: [31]

- Lavere følsomhet slik at jordfeilbryteren ikke løser ut riktig ved jordfeil på utstyr som genererer strømmer med høye DC-komponenter eller høy frekvens.
- Lavere følsomhet slik at jordfeilbryteren ikke løser ut riktig ved jordfeil, selv om dert oppstår en sinusformet jordfeilstrøm.
- Feilaktig detektering av jordfeil.

En isolasjonsfeil eller direkte kontakt med visse typer kraftelektroniske omformere kan forårsake feilstrømmer med likestrømskomponenter til å strømme til PE-lederen og dermed redusere muligheten til jordfeilvern av typen A eller AC å gi riktig beskyttelse. Dersom slike omformere ikke skilles fra omgivelsene ved dobbel eller forsterket isolasjon, kan de forårsake jevne likestrømmer og er derfor inkompatibel med jordfeilvern type A. På grunn av dette har IEC utarbeidet et flytskjema for riktig valg av jordfeilvern til PECS (Power Electronic Converter Systems). [30]

Fra flytskjemaet i Figur 21 kan man velge jordfeilvern type A dersom man har en enfaset pluggbar tilkobling  $\leq 16A$ . Dersom tilkoblingen er enfaset  $> 16A$  eller trefaset og kraftelektronikken kan forårsake likestrøm til å strømme i PE-lederen, må man velge jordfeilvern type B eller en annen beskyttelsesmetode.



Figur 21 Flytskjema som fører til valg av type jordfeilvern oppstrøms for kraftelektroniske omformere. [30]

Alle jordfeilvern oppstrøms fra et jordfeilvern type B opp til forsyningstransformatoren skal være type B [30]. Siden jordfeilvern type B brukes sammen med laster som kan generere jordfeilstrømmer med DC-komponenter, kan feilstrømmen flyte gjennom andre typer jordfeilvern i samme krets. Selv om B-vern beskytter mot likestrømmer kan utkoblingsverdien være høy nok til å kompromittere vanlig drift av andre typer jordfeilvern. For eksempel vil et B-vern med 60 mA merkeutløsestrøm løse ut ved likestrømmer på minst 30 mA, som er nok til å påvirke andre typer jordfeilvern. [31]

Fra et tidligere forsøk på jordfeilvern (AC, A og B), er det blitt undersøkt om overharmoniske strømmer, høy frekvens og pulserende strøm fra omformere kan ha noen negativ effekt på vernenes drift. Fra forsøket er det vist at jordfeilvern AC, A og B detekterer feilstrømmer med en frekvens opp til 200 Hz, men over 200 Hz krever de at feilstrømmen er over 30 mA for å løse ut. Feilstrøm med ulike overharmoniske strømmer ga ingen betydelig økning av utkoblingstiden. Pulserende feilstrøm ga heller ingen betydelig økning i utkoblingstiden. Til og med type AC, som ikke er laget for å detektere pulserende feilstrømmer, hadde ingen betydelig økning i utkoblingstiden. Under forsøket ble det ikke testet med jevn likestrøm. [40]

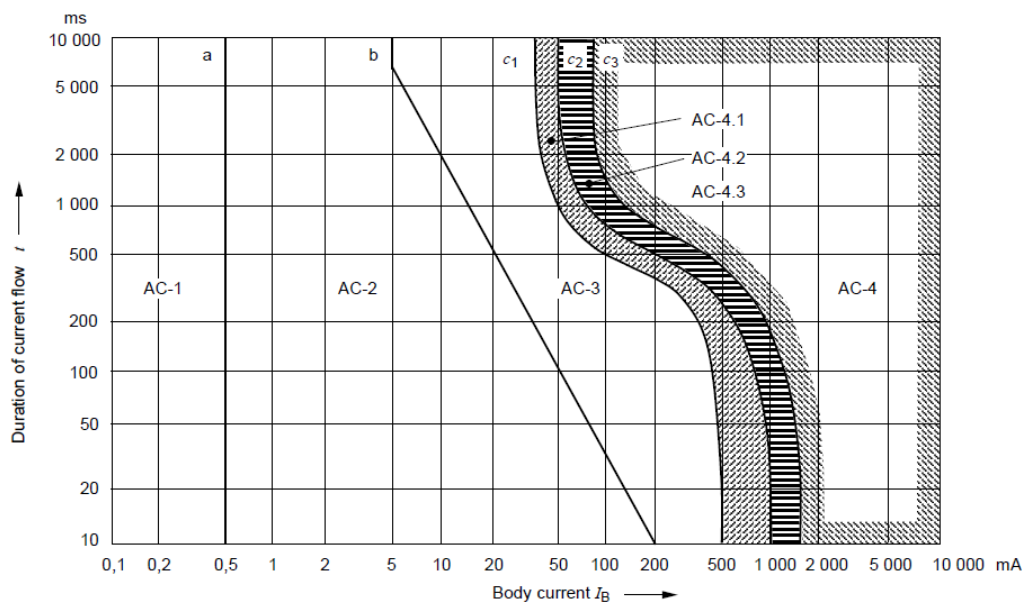


### 3.2 Strømgjennomgang

Personfare ved strømgjennomgang er hovedsakelig avhengig av størrelsen og varigheten av strømmen. Forholdet mellom strøm og spenning er ikke lineært fordi impedansen i menneskekroppen varierer med berøringsspenningen. Impedansen er avhengig av en rekke faktorer som strømbanen gjennom kroppen, berøringsspenningen, varigheten, frekvens, fuktigheten i huden, kontaktflate, trykkutøvelse og temperatur. [41]

#### Vekselstrøm

Vekselstrøm er mer skadelig for menneskekroppen enn likestrøm. En strømstyrke under 25 mA vil ikke virke direkte skadelig. Derimot kan en strøm ned til 15 mA føre til muskelkramper slik at en ikke klarer å løsrive seg. Langvarig strømgjennomgang ved 15 mA kan føre til skader eller død [7]. Sammenhengen mellom AC-strømstyrke og varighet er illustrert i Figur 22, og de fysiologiske effektene er vist i Tabell 5. Fra figuren nedenfor kan man lese av at en person skal tåle 30 mA (AC) strømgjennomgang i ca. 250 ms uten noen skadelige effekter.



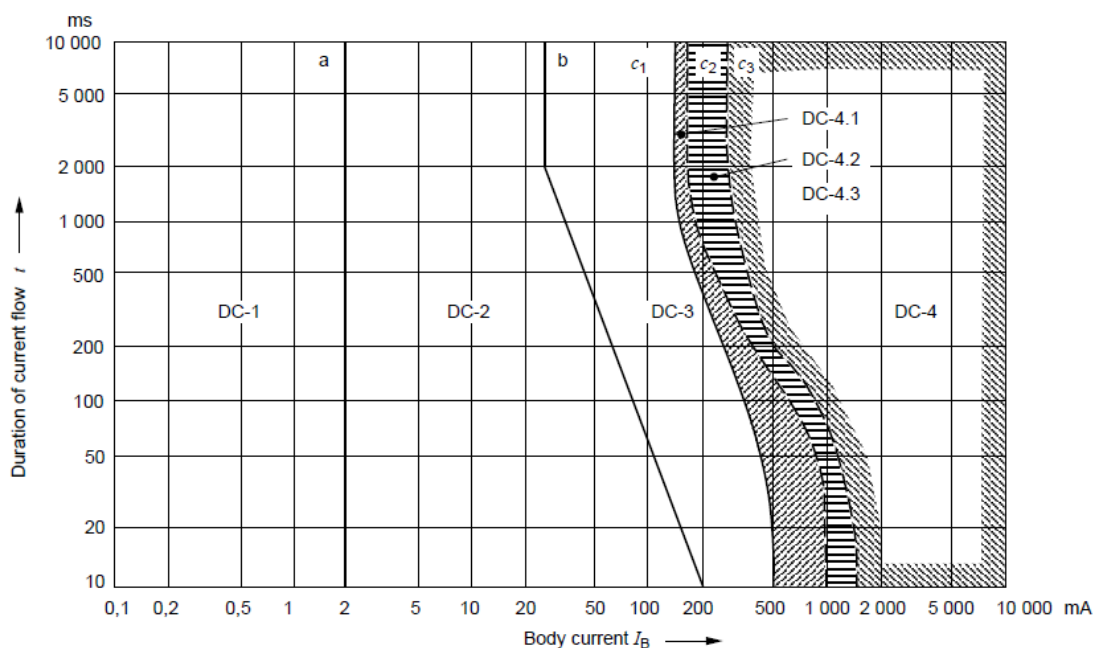
Figur 22 Varighet og strøm ved AC-strømgjennomgang med soneinndeling. [41]

Tabell 5 Soner, grenser og fysiologiske effekter ved AC-strømgjennomgang. [41]

Soner	Grenser	Fysiologisk effekter
AC-1	Opp til 0,5 mA kurve a	Vanligvis ingen effekt
AC-2	0,5 mA opp til kurve b	Følbar men vanligvis ingen skadelige fysiologiske effekter. Sannsynlighet for muskelsammentrekninger
AC-3	Kurve b og ovenfor	Sterke ufrivillige muskelsammentrekninger. Pusteproblemer. Forstyrrelser av hjertefunksjon. Mulighet for muskellammelse. Effekter øker med strømstyrke. Vanligvis ingen organisk skade.
AC-4	Ovenfor kurve $c_1$  $C_1$ - $c_2$ $C_2$ - $c_3$ Utover kurve $c_c$	Hjertestans, pusteproblemer, brannskader eller annen cellulære skader. Sannsynlighet for hjerteflimmer øker med strøm og eksponeringstid.  AC-4.1 Sannsynlighet for hjerteflimmer øker opp til ca. 5 % AC-4.2 Sannsynlighet for hjerteflimmer opp til ca. 50 % AC-4.3 Sannsynlighet for hjerteflimmer over 50 %

### Likestrøm

I motsetning til AC er det ingen definerbar grense for muskellammelse eller ikke-løsrivelse for DC. Kun det å slutte og bryte strømmen vil føre til smertefulle og krampaktige sammentrekninger av musklene. Ulykker med likestrøm er mindre hyppig, og dødelige elektriske ulykker oppstår bare under svært ugunstige forhold. Dette skyldes blant annet at løsriving er mindre vanskelig. I tillegg er terskelen for hjerteflimmer betydelig høyere enn for vekselstrøm. Sammenhengen mellom DC-strømstyrke og varighet er illustrert i Figur 23, og de fysiologiske effektene er vist i Tabell 6. Fra figuren nedenfor kan man lese av at en person skal tåle 30 mA (DC) strømgjennomgang i ca. 1 050 ms uten noen skadelige effekter. [41]



Figur 23 Varighet og strøm ved DC-strømgjennomgang med soneinndeling. [41]

Tabell 6 Soner, grenser og fysiologiske effekter ved DC-strømgjennomgang. [41]

Soner	Grenser	Fysiologisk effekter
DC-1	Opptil 2 mA kurve a	En liten følelse av prikking.
DC-2	2 mA opp til kurve b	Ufrivillig muskelsammentrekninger, men vanligvis ingen skadelige fysiologiske effekter.
DC-3	Kurve b og ovenfor	Sterke ufrivillige muskulære reaksjoner. Forstyrrelser og impulser i hjertet kan forekomme, økende med strøm og tid. Vanligvis ingen organisk skade.
DC-4	Ovenfor kurve c <sub>1</sub>  C <sub>1</sub> -c <sub>2</sub> C <sub>2</sub> -c <sub>3</sub> Utover kurve c <sub>c</sub>	Hjertestans, pusteproblemer, brannskader eller annen cellulære skader. Sannsynlighet for hjerteflimmer øker med strøm og eksponeringstid.  DC-4.1 Sannsynlighet for hjerteflimmer øker opp til ca. 5 % DC-4.2 Sannsynlighet for hjerteflimmer opp til ca. 50 % DC-4.3 Sannsynlighet for hjerteflimmer over 50 %

For beskyttelse mot elektrisk sjokk stilles det krav til automatisk utkobling ved feil. Tabell 41A i NEK 400 stiller krav til maksimal utkoblingstid for ulike fordelingssystem og spenningsnivå. Tabell 7 er et utdrag av denne tabellen hvor maksimal utkoblingstid stilles for de ulike fordelingssystemene. Fra tabellen ser man også at den maksimale utkoblingstiden til likestrøm er høyere enn ved vekselstrøm.

Tabell 7 Maksimal utkoblingstid ved feil for ulike nettsystemer. [3]

System	230V < U <sub>0</sub> ≤ 400 V	
	s	
	AC	DC
TN	0,2	0,4
TT	0,07	0,2
IT*	0,3	0,4

U<sub>0</sub> er nominell spenning mellom fase og jord. For IT-systemer er U<sub>0</sub> nominell linjespenning pga. spenningen til jord ved jordfeil på en fase.  
\*Ved feil nummer 2.



## 4. Laboratorieforsøk

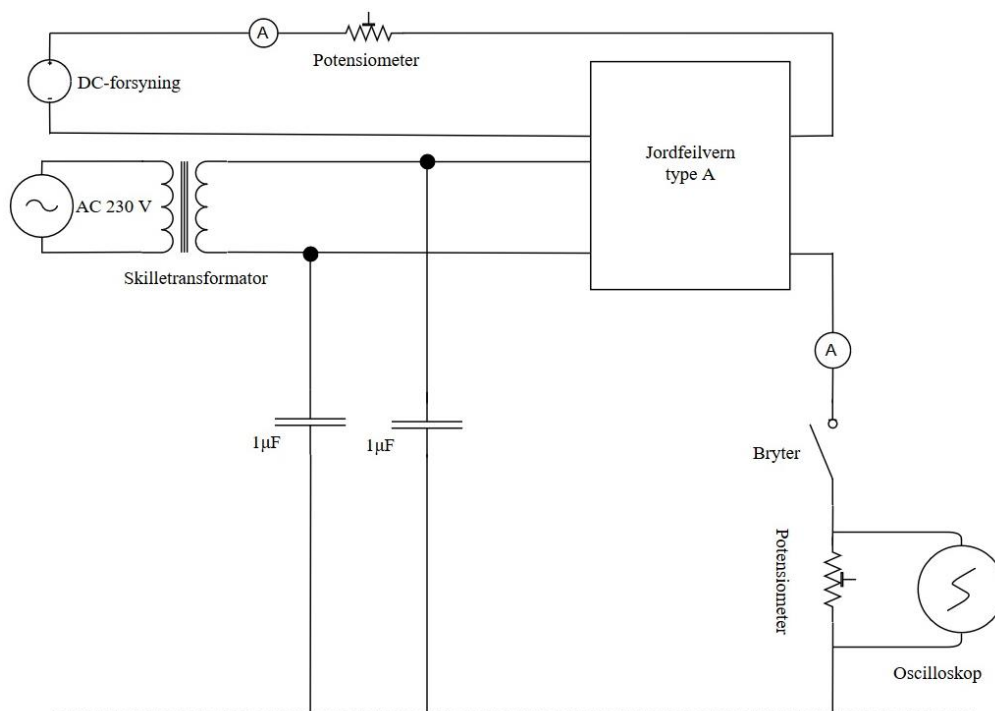
Det er blitt gjennomført målinger av utkoblingsegenskapene til jordfeilvern type A. En jordfeil i ombordladeren til et elektrisk kjøretøy kan føre til at det flyter likestrøm til jord, derfor er det blitt sett på hvilken effekt dette vil ha på vern. Målingene er gjennomført for å besvare følgende spørsmål:

- Vil likestrøm forandre utkoblingstiden til jordfeilvern?
- Vil likestrøm føre til at jordfeilvernet ikke løser ut?
- Vil jordfeilvern trenge en høyere AC jordfeilstrøm for å koble ut når det samtidig påtrykkes en likestrøm?
- Hvor stor likestrøm må til for å degradere funksjonen til jordfeilvern?

### 4.1 Måleteknikk

Utkoblingstidene ble først målt uten påtrykt likestrøm og ble brukt som en referanse for å enkelt se om likestrømmen degraderte utkoblingstiden til vernene.

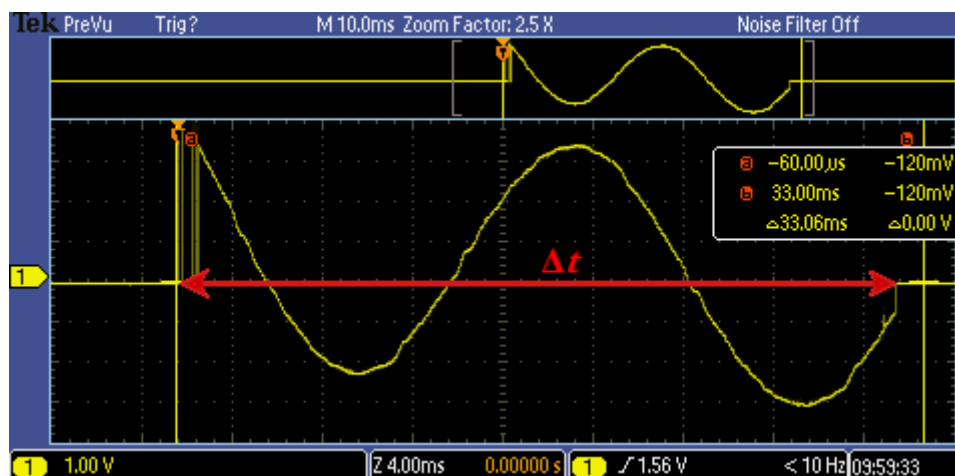
Figur 24 viser et koblingsskjema av hvordan forsøket var oppkoblet. Ved å bruke 4-polet vern ble AC-tilførselen tilkoblet to av fasene, mens DC-forsyningen ble koblet gjennom en av de to ledige fasene på vernet. Via en bryter og et potensiometer ble det lagt inn en «jordfeil». Kondensatorene gir en kapasitans mellom fasene og jord. Ved hjelp av kondensatorene og en skilletrafo blir installasjonen et isolert IT-nett.



Figur 24 Koblingsskjema over laboratorieoppsettet.

Ved hjelp av et potensiometer og et multimeter ble ønsket AC jordfeilstrom innstilt. Under alle utkoblingsforsøk ble AC-feilstrommen satt til 30 mA. Likestrømmen ble innstilt til ønsket verdi ved å regulere spenningen på DC-forsyningen. Ønsket likestrøm ble kontrollert med et multimeter i serie med DC-forsyningen. Utkoblingstiden ble målt med en likestrøm på syv ulike nivå; 0, 10, 15, 20, 40, 60 og 80 mA. På hvert nivå ble det gjennomført 20 utkoblinger på samtlige testobjekter. Testobjektene ble påtrykket likestrøm fra 5 sekunder til 15 sekunder før utkobling ble forsøkt. Det vil si, etter 5-15 sekunder ble bryteren koblet inn slik at det ble simulert en AC jordfeilstrom på 30 mA.

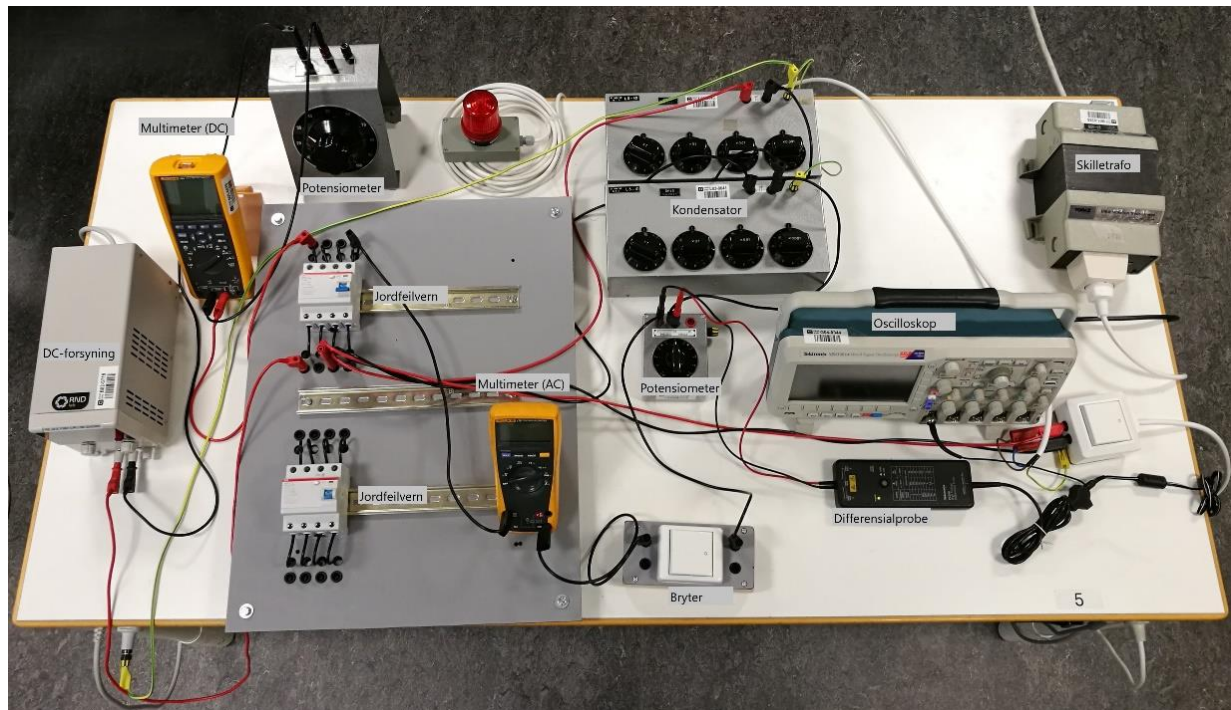
For å måle utkoblingsforløpet ble feilstrommen målt via et oscilloskop. Ved å legge inn bryteren oppstår det en ubalanse mellom faselederne slik at jordfeilvernet løser ut. Ved hjelp av triggerfunksjonen på oscilloskopet vises utkoblingsforløpet, fra bryteren kobles inn, til vernet løser ut. Dermed kan utkoblingstiden leses av på oscilloskopet slik det er vist i Figur 25.



Figur 25 Skjermbilde fra oscilloskopet av utkoblingsforløpet.

Når jordfeilvern ikke løste ut ved 30 mA AC, på grunn av likestrømmen, ble potensiometeret justert slik at resistansen sank gradvis. Dermed økte feilstrommen helt til jordfeilvernet ga utkobling. Likestrømmen ble ikke forandret. Dette ble gjort for å finne ut om vern trenger en høyere AC feilstrom for å løse ut ved påtrykket likestrøm, og eventuelt hvor stor økning som kreves. Ved å bruke MINMAX-funksjonen på multimeteret, ble vernets nødvendige utkoblingsstrøm avlest. MINMAX-funksjonen på multimeteret kan brukes for å ta opp eller overvåke signaler. Denne funksjonen vil registrere og midlertidig holde de høyeste (MAX) og laveste (MIN) verdiene som multimeteret måler. I tillegg vil måleren opprettholde et løpende gjennomsnitt (AVG) målt under overvåkningsprosessen. MAX-funksjonen ble brukt for å holde og lese av den høyeste feilstrommen jordfeilvernet løste ut på.

Figur 26 viser et bilde av selve måleoppsettet. På venstre side står DC-forsyningen, et multimeter og et potensiometer, som danner likestrømskretsen. Testobjektene ble tilkoblet et brett ved hjelp av DIN-skinner. Oscilloskopet ble tilkoblet kretsen via en differensialprobe.



Figur 26 Måleoppsettet.

## 4.2 Måleutstyr

- Oscilloskop: Tektronix MSO 2014 Mixed Signal Oscilloscope
- Multimeter: Fluke 175 True RMS Multimeter
- Multimeter: Fluke 289 True RMS Multimeter
- DC-strømkilde: RND LAB DC Power Supply RND 320-KD3005D
- DC-strømkilde: Power Supply EA\_PSI 5200-10 A
- Skilletransformator: Topaz Electronics, Ultra-isolation Transformer, 500 VA, 50&60 Hz, 230/120 V output
- Kondensator: DK 4 S maks 250 V
- Differensialprobe: Tektronix P5200 High voltage differential probe

### 4.3 Testobjekter

Tabell 8 viser en oversikt over alle testobjektene og medfølger relevant data.

Tabell 8 Testobjekter, ulike jordfeilvern.

Testobjekt ID	Varenummer	Vern	Merkestrøm [A]	Merkeutløsestrøm $I_{\Delta n}$ [mA]	Type	Produsent
ABB_25A	2CSF204101R1250	Jordfeilvern	25	30	A	ABB
ABB_40A	2CSF204101R1400	Jordfeilvern	40	30	A	ABB
ABB_32A	2CSR274101R1324	Jordfeil- automat	32	30	A	ABB
Schneider_25A	A9Z21425	Jordfeilvern	25	30	A	Schneider
Schneider_40A	A9Z21440	Jordfeilvern	40	30	A	Schneider
Siemens_25A	5SM3342-6	Jordfeilvern	25	30	A	Siemens
Siemens_40A	5SM3344-6	Jordfeilvern	40	30	A	Siemens



## 5. Resultater

Dette kapittelet presenterer resultatene fra målt utkoblingstid, laveste likestrøm som forårsaker DC-blindhet og nødvendig AC-feilstrøm for utkobling.

Utkoblingstiden i de ulike likestrømsnivåene sammenlignes med referansen ved ingen likestrøm påtrykket. I tillegg vurderes utkoblingstidene opp mot maksimal utkoblingstid ved feil fra Tabell 7;

- TN: 200 ms
- TT: 70 ms
- IT: 300 ms

Tabell 9 viser utkoblingstiden til ABB\_25A ved de ulike nivåene. Fra gjennomsnittsverdiene kan man se at det ikke er noen betydelig forskjell i utkoblingstiden mellom likestrømsnivåene og referansen. I alle nivåene har jordfeilvernet rask utkoblingstid som er innenfor maksimal utkoblingstid.

Tabell 9 Utkoblingstiden til testobjekt ABB\_25A

Likestrøm	0 mA	10 mA	15 mA	20 mA	40 mA	60 mA	80 mA
Utkobling	Utkoblingstid [ms]						
1	23.08	27.32	14.44	30.04	27.80	28.04	15.56
2	17.96	15.48	14.84	27.72	15.16	17.16	15.16
3	30.28	19.24	14.68	26.76	19.96	25.08	30.12
4	25.80	25.80	24.12	23.08	30.52	27.48	22.92
5	19.40	28.84	19.40	24.20	14.84	16.76	15.00
6	15.80	17.80	15.88	16.76	19.24	15.16	21.80
7	20.12	20.36	14.84	23.48	17.56	28.76	25.00
8	17.64	18.12	20.92	20.84	23.08	30.44	16.12
9	17.88	14.44	16.68	21.24	30.84	16.52	26.44
10	18.92	14.20	29.08	16.44	30.12	18.04	15.72
11	25.40	14.20	15.16	16.52	22.84	25.08	20.28
12	24.04	19.88	25.80	16.04	18.84	14.76	15.08
13	18.44	26.52	20.68	23.88	30.12	20.60	19.16
14	26.04	25.96	26.20	21.24	20.28	30.68	28.44
15	27.00	25.96	15.16	28.84	15.56	15.00	24.36
16	28.52	19.72	22.84	14.84	16.76	20.04	25.16
17	14.92	16.20	30.92	14.28	27.72	30.76	24.92
18	15.24	16.76	15.00	14.76	24.68	20.60	15.24
19	18.52	21.40	16.20	26.52	29.08	30.52	22.04
20	14.76	24.76	27.80	22.04	21.00	19.64	15.24
Gjennomsnitt	20.99	20.65	20.03	21.48	22.80	22.56	20.69

Tabell 10 viser utkoblingstiden til ABB\_40A ved de ulike nivåene. Fra gjennomsnittsverdiene kan man se at det ikke er noen betydelig forskjell i utkoblingstiden mellom likestrømsnivåene og referansen. I alle nivåene har jordfeilvernet har rask utkoblingstid som er innenfor maksimal utkoblingstid.

Tabell 10 Utkoblingstiden til testobjekt ABB\_40A

Likestrøm	0 mA	10 mA	15 mA	20 mA	40 mA	60 mA	80 mA
Utkobling	Utkoblingstid [ms]						
1	23.32	22.76	28.28	18.04	29.64	26.84	27.24
2	16.36	24.36	34.36	18.60	14.60	22.12	20.28
3	15.16	29.56	15.24	18.52	24.20	21.64	15.08
4	23.64	14.92	17.32	18.92	30.20	23.56	20.84
5	16.36	21.48	25.80	20.36	23.48	28.92	23.84
6	31.16	17.72	21.64	17.32	27.40	29.24	22.12
7	30.92	16.60	15.40	31.40	27.88	21.32	15.96
8	15.08	27.88	16.28	22.36	24.52	20.68	27.32
9	28.52	23.32	21.96	19.24	26.20	14.84	25.64
10	20.36	16.92	22.84	19.08	21.72	14.84	15.32
11	22.52	21.32	25.88	29.00	21.08	14.92	16.04
12	17.08	17.80	24.20	24.68	25.88	29.56	23.08
13	14.92	21.96	21.48	23.80	17.64	15.16	19.24
14	16.84	29.08	15.24	14.76	28.76	30.04	27.08
15	15.64	24.36	19.72	20.76	24.20	16.92	19.80
16	30.60	25.64	17.00	21.08	22.28	15.88	23.00
17	29.08	15.24	23.24	25.72	19.08	16.20	29.16
18	21.00	17.72	15.32	19.32	24.36	18.04	27.08
19	17.96	14.76	22.92	15.48	26.36	28.20	15.56
20	24.60	18.04	15.24	17.40	26.60	27.48	21.32
Gjennomsnitt	21.56	21.07	20.97	20.79	24.30	21.82	21.75

Tabell 11 viser utkoblingstiden til ABB\_32A ved de ulike nivåene. Fra gjennomsnittsverdiene kan man se at det ikke er noen betydelig forskjell i utkoblingstiden mellom likestrømsnivåene og referansen. I alle nivåene har jordfeilautomaten har rask utkoblingstid som er innenfor maksimal utkoblingstid.

Tabell 11 Utkoblingstiden til testobjekt ABB\_32A

Likestrøm	0 mA	10 mA	15 mA	20 mA	40 mA	60 mA	80 mA
Utkobling	Utkoblingstid [ms]						
1	41.80	26.68	31.84	36.60	41.40	42.32	35.52
2	29.76	29.80	29.84	41.96	41.08	45.80	46.32
3	30.72	37.96	45.92	29.68	30.00	29.56	44.80
4	37.72	31.24	22.28	38.08	38.32	37.80	31.20
5	34.68	30.20	30.76	38.40	41.92	41.16	44.96
6	38.68	29.88	45.32	43.12	33.04	22.44	34.52
7	31.24	29.40	35.48	42.48	45.36	45.40	43.24
8	28.76	43.48	30.40	35.08	30.80	35.24	29.64
9	41.48	33.96	30.16	44.84	39.20	32.04	37.92
10	26.04	29.40	32.32	31.96	29.44	29.96	41.20
11	31.12	32.60	40.08	38.80	32.64	32.36	38.00
12	41.80	29.48	33.52	32.96	38.80	44.12	31.36
13	35.60	39.96	45.68	33.80	32.40	32.92	41.96
14	41.84	42.00	45.84	37.48	42.40	29.24	31.72
15	24.16	30.08	40.56	33.08	30.80	37.68	30.36
16	44.48	37.76	36.44	31.80	30.48	29.52	39.32
17	32.36	30.64	38.68	29.56	41.44	32.32	31.88
18	31.88	45.60	31.48	43.56	24.08	38.16	32.04
19	35.16	24.48	45.16	29.56	37.44	24.16	38.84
20	42.48	30.56	23.72	29.96	38.24	30.08	44.84
Gjennomsnitt	35.09	33.26	35.77	36.14	35.96	34.61	37.48

Tabell 12 viser utkoblingstiden til Schneider\_25A ved de ulike nivåene. Fra gjennomsnittsverdiene kan man se en økning i utkoblingstiden ved påtrykket 60 mA likestrøm. Utkoblingstiden økte med 8,71 ms ved 60 mA sammenlignet med ingen likestrøm påtrykket. Utkoblingstiden er fortsatt langt innenfor kravene til maksimal utkoblingstid. Ser også en stor variasjon i utkoblingstiden ved dette nivået, fra 14,08 til 48,60, som tilsvarer en faktor på 3,45. Jordfeilvernet løste ikke ut ved 80 mA likestrøm påtrykket (DC-blindhet).

Tabell 12 Utkoblingstiden til testobjekt Schneider\_25A

Likestrøm	0 mA	10 mA	15 mA	20 mA	40 mA	60 mA	80 mA
Utkobling	Utkoblingstid [ms]						
1	24.72	25.92	23.44	18.88	20.72	14.08	-
2	24.00	25.88	14.40	25.84	28.48	37.84	-
3	21.68	25.76	13.76	17.28	26.00	40.32	-
4	14.64	14.08	23.12	20.88	20.80	37.84	-
5	19.04	18.56	18.80	15.84	22.72	27.36	-
6	21.92	22.72	16.56	25.92	14.24	14.72	-
7	26.08	24.08	20.00	20.40	14.48	48.60	-
8	29.12	14.88	14.00	24.48	22.16	30.34	-
9	29.52	14.72	17.28	18.96	19.20	31.65	-
10	20.00	25.92	27.36	16.80	23.60	14.21	-
11	14.64	24.00	29.76	19.92	20.24	29.41	-
12	14.72	29.12	27.04	20.32	23.20	14.61	-
13	23.28	14.88	29.68	14.24	27.60	14.69	-
14	28.96	23.52	17.44	29.84	19.44	14.45	-
15	21.36	13.84	16.32	20.80	24.16	44.61	-
16	13.76	28.16	16.32	23.36	15.76	43.57	-
17	13.52	14.00	18.96	16.48	25.04	39.68	-
18	21.68	14.08	25.04	19.36	18.80	41.92	-
19	27.92	16.32	29.04	23.28	21.76	27.00	-
20	13.92	17.92	14.00	14.88	30.00	31.72	-
Gjennomsnitt	21.22	20.42	20.62	20.39	21.92	29.93	-

Tabell 13 viser utkoblingstiden til Schneider\_40A ved de ulike nivåene. Fra gjennomsnittsverdiene kan man se økning i utkoblingstiden ved påtrykket 60 mA likestrøm. Utkoblingstiden økte 18,57 ms ved 60 mA sammenlignet med ingen likestrøm påtrykket. Det tilsvarer en faktor på 1,98. Utkoblingstiden er fortsatt langt innenfor kravene til maksimal utkoblingstid. Ser også en stor variasjon i utkoblingstiden ved dette nivået, fra 13,64 til 52,68, som tilsvarer en faktor på 3,86. I tillegg kan man se at jordfeilvernet ikke løste ut ved utkoblingsforsøk 14 ved 60 mA påtrykket. Jordfeilvernet løste ikke ut ved 80 mA likestrøm påtrykket (DC-blindhet).

Tabell 13 Utkoblingstiden til testobjekt Schneider\_40A

Likestrøm	0 mA	10 mA	15 mA	20 mA	40 mA	60 mA	80 mA
Utkobling	Utkoblingstid [ms]						
1	22.64	15.72	26.28	19.96	26.52	29.24	-
2	19.50	23.48	18.04	18.52	30.04	39.16	-
3	14.88	13.64	13.32	16.52	13.32	38.84	-
4	18.96	12.84	18.44	15.48	16.04	13.64	-
5	24.48	27.16	18.04	18.20	22.84	40.36	-
6	24.88	14.04	20.60	19.08	26.84	52.44	-
7	20.48	19.96	18.76	16.92	23.72	52.68	-
8	22.72	14.04	20.52	27.08	21.80	39.32	-
9	13.36	18.68	18.20	19.56	19.96	41.60	-
10	12.96	13.40	23.56	17.72	27.96	41.12	-
11	18.56	13.08	22.52	20.12	24.68	46.00	-
12	19.92	27.96	17.56	28.36	27.16	43.20	-
13	20.96	26.04	24.92	14.20	14.60	47.70	-
14	15.28	20.52	16.68	15.96	13.56	-	-
15	13.92	17.16	13.72	15.00	24.12	32.12	-
16	17.20	13.88	28.28	18.12	21.80	43.80	-
17	23.80	13.16	23.16	21.88	17.08	14.88	-
18	23.00	15.96	14.92	14.28	13.56	14.00	-
19	19.48	15.40	13.32	23.24	29.48	39.76	-
20	12.92	21.08	25.00	24.52	21.88	44.04	-
Gjennomsnitt	19.00	17.86	19.79	19.24	21.85	37.57	-

Tabell 14 viser utkoblingstiden til Siemens\_25A ved de ulike nivåene. Fra gjennomsnittsverdiene kan man se at det ikke er noen betydelig forskjell i utkoblingstiden mellom likestrømsnivåene og referansen. I alle nivåene har jordfeilautomaten rask utkoblingstid som er innenfor maksimal utkoblingstid.

Tabell 14 Utkoblingstiden til testobjekt Siemens\_25A

Likestrøm	0 mA	10 mA	15 mA	20 mA	40 mA	60 mA	80 mA
Utkobling	Utkoblingstid [ms]						
1	22.60	30.12	38.80	33.28	22.48	28.48	33.00
2	27.84	37.08	27.20	37.04	22.96	37.68	25.00
3	25.48	29.48	28.48	23.28	26.88	23.84	26.60
4	35.56	24.84	31.78	24.72	36.24	36.52	20.04
5	33.80	33.56	31.84	32.80	32.96	37.24	29.76
6	27.08	22.92	24.20	27.04	38.64	33.72	32.88
7	30.52	22.84	34.04	29.68	35.80	24.84	24.32
8	34.44	24.52	32.52	23.60	30.44	39.96	24.88
9	32.20	33.80	35.32	33.60	33.00	26.92	42.04
10	37.64	32.36	33.08	33.20	27.88	29.96	35.04
11	34.28	24.56	22.72	33.92	30.92	24.44	23.60
12	33.96	28.88	31.48	27.36	27.16	34.80	28.16
13	33.16	26.16	37.40	25.92	24.60	36.72	37.20
14	19.16	29.12	33.48	25.68	22.92	31.36	24.52
15	22.28	35.12	29.00	28.32	34.84	32.16	28.44
16	27.80	28.96	37.96	38.24	38.68	36.08	32.92
17	23.88	24.08	22.92	24.44	28.56	22.64	23.24
18	35.32	22.88	37.36	32.84	31.04	29.36	32.52
19	35.80	32.48	31.04	27.40	32.40	34.76	22.28
20	24.36	31.68	30.88	33.32	38.56	26.24	30.64
Gjennomsnitt	29.86	28.77	31.58	29.78	30.85	31.39	28.85

Tabell 15 viser utkoblingstiden til Siemens\_40A ved de ulike nivåene. Fra gjennomsnittsverdiene kan man se en liten økning i utkoblingstiden ved 40 mA likestrøm påtrykket. Utkoblingstiden er fortsatt langt innenfor kravene til maksimal utkoblingstid. Jordfeilvernet løste ikke ut når den ble påtrykket en likestrøm på både 60 mA og 80 mA (DC-blindhet).

Tabell 15 Utkoblingstiden til testobjekt Siemens\_40A

Likestrøm	0 mA	10 mA	15 mA	20 mA	40 mA	60 mA	80 mA
Utkobling	Utkoblingstid [ms]						
1	38.32	35.84	48.52	32.32	51.64	-	-
2	47.44	40.16	39.32	43.04	47.43	-	-
3	42.12	36.56	38.44	40.00	52.56	-	-
4	42.36	41.60	44.12	32.92	53.00	-	-
5	36.60	32.96	32.04	33.16	43.24	-	-
6	35.56	49.60	49.48	33.72	41.40	-	-
7	42.36	46.08	36.92	46.68	34.80	-	-
8	32.64	32.36	46.36	32.84	36.32	-	-
9	36.00	38.20	38.04	47.24	38.16	-	-
10	46.48	42.20	38.84	49.60	35.12	-	-
11	32.88	39.44	47.80	48.56	51.76	-	-
12	38.88	42.36	44.00	34.80	47.04	-	-
13	34.40	43.72	40.08	42.64	41.56	-	-
14	49.20	32.20	43.12	33.36	44.44	-	-
15	46.00	33.00	40.80	38.24	43.32	-	-
16	32.72	34.68	36.72	44.48	38.60	-	-
17	37.28	34.12	42.56	35.60	45.24	-	-
18	49.68	32.52	35.76	40.64	35.96	-	-
19	47.36	44.04	33.84	33.80	35.16	-	-
20	40.16	34.36	33.60	46.20	48.84	-	-
Gjennomsnitt	40.42	38.30	40.52	39.49	43.28	-	-

Tabell 16 viser en oversikt over den laveste likestrømmen som forårsaket DC-blindhet ved en AC-jordfeilstrom på 30 mA. I tillegg viser tabellen hvor høy AC-jordfeilstrom som førte til utkobling ved tilhørende likestrøm. Resultatene viser store forskjeller. ABB\_25A tålte en likestrøm opp under 330 mA før jordfeilvernet ikke løste ut. Både Schneider\_40A og Siemens\_40A ble «blind» for AC-feilstrommen ved 60 mA. Fra tabellen ser man at de testobjektene som tåler høyest likestrøm ikke trenger en stor økning i AC-feilstrommen.

*Tabell 16 Laveste likestrøm som forårsaket DC-blindhet og nødvendig økning i AC-feilstrom for utkobling.*

Testobjekt	DC-blindhet DC [mA]	Utkobling AC [mA]
ABB_25A	330	32.5
ABB_40A	320	30.67
ABB_32A	190	31.46
Schneider_25A	80	34.07
Schneider_40A	60	36.24
Siemens_25A	130	32.64
Siemens_40A	60	36.03



## 6. Diskusjon

### 6.1 Laboratorieforsøk

Så langt finnes det ikke noen oversikt eller innrapporterte hendelser hvor lading av elektriske kjøretøy har forårsaket DC-blindet av jordfeilvern. Under litteratursøk ble det heller ikke funnet noen forsøk som dokumenterer likestrømmens innvirkning på jordfeilvern.

Mesteparten av litteratur som nevner DC-blindhet er fra produsentene eller rapporter uten referanser som kan dokumentere effekten. Det ble derfor valgt å gjennomføre målinger for å utforske DC-blindhet nærmere.

Først var det tenkt at målingene skulle gjennomføres ved å etterligne en reell feilsituasjon. Tanken var å koble en likestrømskilde på en av fasene på lastsiden for å simulere en mulig feilstrøm man kan få ved jordfeil i eller etter likeretteren i ombordladeren. Den vekslende laststrømmen vil dermed få en overlagret likestrøm slik som i en reell situasjon.

Risikovurdering avdekket at denne metoden ga fare for person- og utstyrssikkerhet, på grunn av risiko for 230 V spenning over DC-forsyningen.

Etter risikovurderingen ble det valgt å koble likestrømskilden på den ene fasen til jordfeilvernet. Dermed kan vernet påtrykkes en likestrøm uten å risikere at likestrømskilden påtrykkes 230 V spenning. For å simulere en jordfeil ble et potensiometer koblet på den ene fasen på lastsiden av jordfeilvernet. Dermed ble det laget en ubalanse mellom fasene på samme måte som testknappen gjør. På denne måten kunne jordfeilvernet påtrykkes likestrøm samtidig som en vekslende feilstrøm ble koblet inn.

Under forsøket ble det brukt en skilletransformator for å oppnå et galvanisk skille mellom tilkoblet nettverk og egen installasjon. Dette ble gjort for å forsikre seg mot eventuell støy som kan påvirke målingene. Skilletransformatoren ble også benyttet for egen sikkerhet. Det ble koblet to kondensatorer mellom hver fase og jord for å oppnå den kapasitansen man har i ytre nett. Her ble det brukt 1 $\mu$ F, som tilsvarer et lite nett. I tillegg vil kondensatorene motvirke eventuell støy som kan bli tatt opp av oscilloskopet.

For å teste utkoblingstiden ble likestrømmen innstilt på syv ulike nivåer; 0, 10, 15, 20, 40, 60 og 80 mA. Samtidig var jordfeilstrømmen innstilt på 30 mA AC. På hvert nivå ble det utført 20 utkoblingsforsøk. Gjennomsnittsverdien av de 20 utkoblingsforsøkene på hvert nivå ble sammenlignet for å se om økende likestrøm ga en økende utkoblingstid. Det ble valgt å teste utkoblingstiden med en likestrøm opp til 80 mA. Maksimal likestrøm ble begrenset til 80 mA på grunn av DC-strømkildens (RND LAB DC Power Supply RND 320-KD3005D) begrenset kapasitet. En høyere likestrøm kunne ha vært oppnådd med en annen DC-strømkilde, men det hadde vært unødvendig tidsbruk. Likestrømmens spenn fra 0-80 mA, er sett på som tilstrekkelig da resultatene gir nødvendig informasjon til å se likestrømmen effekt.

Under forsøket ble det observert en relativt stor forskjell i utkoblingstid. Derfor ble det valgt å gjennomføre 20 utkoblingsforsøk på hvert nivå. Resultatene viste store forskjeller i utkoblingstiden på hvert nivå, med en faktor på 3,9 i største fall. Gjennomsnittet av 20 utkoblingsforsøk gir en bedre representasjon, slik at hvert nivå lettere kan sammenlignes. Den store forskjellen i utkoblingstid antas å være på grunn av forskjell i strømmens momentane verdi ved bryterens påslag. Selv om likestrømmen ble påtrykket med varierende tid (mellom 5-15 sekunder), før hvert utkoblingsforsøk, så skal det ikke ha noen innvirkning på utkoblingstiden. Premagnetisering av sumstrømtransformatorens kjerne vil skje tilnærmet momentant. Dette ble også observert under forsøket.

Siden de fleste testobjektene tålte en likestrøm opp til 80 mA, måtte en annen DC-strømkilde benyttes (Power Supply EA\_PSI 5200-10 A) for å teste vernenes maksimale toleranse for likestrøm. Vernene ble testet ved å koble inn en jordfeil på 30 mA samtidig som likestrømmen ble økt med 10 mA for hvert forsøk, helt til vernet ikke kunne løse ut. Dette ble gjort bare for å finne ut hvor høy likestrøm de ulike vernene kunne tåle. Utkoblingstiden ble ikke målt.

For å finne ut om jordfeilvern trenger en høyere AC feilstrøm for å koble ut når det samtidig påtrykkes en likestrøm, ble det valgt å øke AC feilstrømmen med potensiometeret samtidig som den maksimale strømmen ble målt med multimeterets MINMAX-funksjon. Dette er ikke nøyaktig målemetode, men den gir en indikasjon på hvor mye feilstrømmen må øke for at jordfeilvernet skal løse ut.

Det ble valgt å sette «jordfeilstrømmen» til 30 mA AC. Ved å bruke 30 mA, er det satt en naturlig grense for å se om jordfeilvernet er i stand til å sikre mot farlige strømmer. Dersom jordfeilvernet ikke løser ut ved 30 mA, kan man enkelt konstatere at vernet ikke sikrer mot livsfarlig strømgjennomgang.

En svakhet i forsøket er at det er testet jordfeilvern fra bare tre ulike produsenter. Vern fra flere produsenter burde ha vært testet for å skape en bedre oversikt over de ulike produsentene på markedet.

## 6.2 Resultat

Målingene er gjennomført for å besvare følgende spørsmål:

### - Vil likestrøm forandre utkoblingstiden til jordfeilvern?

Av syv ulike vern, var det to som ga en merkbar økning i utkoblingstiden. Begge vernene fikk økt utkoblingstid ved påtrykket 60 mA likestrøm. Likevel var den totale utkoblingstiden for begge vern innenfor kravet til maksimal utkoblingstid. Utkoblingstiden økte bare med 8,71 ms og 18,57 ms, som er lavere enn de største variasjonene i utkoblingstid på de fleste nivåene.

- **Vil likestrøm føre til at jordfeilvernet ikke løser ut?**

Alle jordfeilvern som ble testet under forsøket ville ikke løse ut når likestrømmen ble stor nok. Fra resultatene kan man se at det er stor forskjell på de ulike vernene.

- **Vil jordfeilvern trenge en høyere AC jordfeilstrøm for å koble ut når det samtidig påtrykkes en likestrøm?**

Alle testobjektene løste ut når AC feilstrømmen ble økt. I det «raskeste» tilfellet løste vernet ut med en økning fra 30 mA til 30,67 mA, en økning på 0,67 mA. Det «treigeste» tilfellet var en økning fra 30 mA til 36,24 mA, en økning på 6,24 mA. En relativt stor forskjell mellom de ulike vernene. Fra disse resultatene ser man at differansen mellom vekselstrøm og likestrøm er en viktig faktor på om vernet vil løse ut eller ikke. Denne situasjonen viste at jordfeilvernene koblet ut når differansen minsket.

- **Hvor stor likestrøm må til for å degradere funksjonen til jordfeilvern?**

Resultatene viste store forskjeller mellom de ulike testobjektene. Den laveste likestrømmen som førte til degradert funksjon, altså ingen utkobling, var 60 mA (Schneider\_40A og Siemens\_40A). I «beste» tilfelle tålte testobjektet (ABB\_330) en likestrøm opp under 330 mA.

Alle testobjektene tålte likestrøm bedre enn hva litteraturen tilsier. Jordfeilvern type A skal tåle likestrøm opp til 6 mA, over det kan riktig drift ikke garanteres. Fra resultatene må likestrømmen være betydelig høyere enn 6 mA før den påvirker vernets riktige drift. Likevel vil likestrømmen vil føre til metning av kjernen til sumstrømtrafoen. Dette vil være negativt dersom slike strømmer kan oppstå ved lading av elektriske kjøretøy.

Type vern og produsent er utslagsgivende for hvor høy likestrømmen må være før det oppstår DC-blindhet. Årsaken til den store forskjellen mellom produsentene kan ikke diskuteres uten mer informasjon om vernenes oppbygning. I dette tilfellet ble vern fra noen av de mest anerkjente produsentene testet. Det kan tenkes at jordfeilvern fra «billig-produsenter» har dårligere materialer, som kan gi større utslag.

Basert på resultatene kan man si at økt utkoblingstid på grunn av likestrøm ikke kan kategoriseres som degradering av vernet, da den totale utkoblingstiden er langt innenfor kravene til maksimal utkoblingstid. Resultatene viser at type A vern vil ha en rask utkobling. Utkoblingstiden vil øke med noen millisekunder ved økende likestrøm, helt til vernet blir «blindt». Type A vern vil enten ha en rask utkobling, eller ingen utkobling (dersom likestrømmen er stor nok).

Ladestasjoner til modus 3 lading kan ofte være utstyrt med et jordfeilvern type B. IEC sier at alle jordfeilvern oppstrøms fra et B-vern skal også være type B-vern. Basert på resultatene skal det ikke være noe problem å ha type A vern koblet oppstrøms fra et B-vern. Her er det forutsatt at A-vernet oppstrøms har merkeutløsestrøm 30 mA, siden type A vern med merkeutløsestrøm forskjellig fra 30 mA ikke er testet. Dette vil være aktuelt i installasjoner prosjektert etter 2006, hvor det sannsynligvis er installert 30 mA jordfeilautomater. Et 30 mA type B vern skal løse ut ved likestrømmer fra 15 mA til 60 mA. Laveste likestrøm som resulterte i DC-blindhet på type A vern var 60 mA. Dersom det er installert en jordfeilbryter type B nedstrøms fra en type A, vil B-vernet løse ut lenge før likestrømmen påvirker A-vernet.

Eldre installasjoner vil mest sannsynlig ha jordfeilvern med 100 mA eller 300 mA merkeutløsestrøm, eller ingen. Slike vern vil ha en lavere følsomhet ovenfor reststrømmer, og det kan derfor tenkes at de vil tåle en høyere likestrøm. Siden vern med merkeutløsestrøm > 30 mA ikke ble testet i denne omgangen, så er det ikke mulig å si noe bestemt om denne problemstillingen.

### 6.3 Jordfeilvern

Dersom jordfeil under lading av elektriske kjøretøy kan forårsake at likestrøm flyter til jord, kan det skape DC-blindhet på jordfeilvern type A. Problemet med DC-blindhet er at jordfeilvernet ikke kan garantere utkobling dersom det oppstår en ny jordfeil oppstrøms ladestasjonen. Jordfeil nummer to vil føre til en AC-reststrøm. Normalt skal jordfeilvern type A detektere sinusformede feilstrømmer, men på grunn av likestrømmens premagnetisering vil vernet ikke løse ut. Det vil føre til fare for strømgjennomgang. DC-blindhet vil bare gi fare for strømgjennomgang under selve ladingen av elektriske kjøretøy. Når ladingen avsluttes vil likestrømmen forsvinne og jordfeilvernet vil gå tilbake til riktig drift. En eventuell strømgjennomgang vil oppstå når ombordladeren har en jordfeil som gjør jordfeilvernet blindt, samtidig som det oppstår en jordfeil på samme kurs. Det vil da være en stående jordfeil med vekselstrøm som jordfeilvernet ikke vil detektere.

Som tidligere nevnt, er differansen mellom likestrømmen og vekselstrømmen en viktig faktor på om vernet vil løse ut. Fra resultatene kan man se at jordfeilvern vil gå fra DC-blindhet til utkobling ved å øke AC-feilstrømmen. I dette tilfellet vil jordfeilvern koble ut når differansen mellom likestrømmen og vekselstrømmen minsker. Jordfeil nummer to må derfor føre til en høyere jordfeilstrøm dersom vernet skal løse ut. Denne feilstrømmen vil være avhengig av overgangsmotstanden i selve feilstedet. Dersom feilen har full jordslutning skal det føre til utkobling av jordfeilvernet.

Diskusjonen rundt riktig valg av jordfeilvern ved lading av elektriske kjøretøy er ikke på grunn av fare for strømgjennomgang fra likestrøm. Dette henger nok sammen med at likestrømmen har en høyere terskel for å påføre skadelige fysiologiske effekter hos personer enn vekselstrøm. Basert på internasjonal standard (ISO 6469-3:2011) skal ombord-kretser være utført med isolasjonsresistans, slik at skadelige effekter unngås. Det vil medføre strømmer i sone DC-2, som betyr 2-200 mA (avhengig av varighet). Kravet til isolasjonsresistans skal sørge for en DC-feilstrøm på 10 mA. Dette vil være vanskelig å

dokumentere da feilstrømmen også er avhengig av impedansen i overliggende nett. Internasjonale standarder baserer seg som regel på TN-nett, hvor impedansen feilstrømmens returvei er lav sammenlignet med IT- og TT-nett. Derfor vil feilstrømmen mest sannsynlig være mindre i IT- og TT-nett.

Når man velger å sette ansvaret for sikkerheten på forbrukeren gjennom NEK 400, fremfor produsenter av elektriske kjøretøy eller ombordladere, kan det by på problemer. Folk flest kjenner ikke til NEK 400 og de kravene som stilles ved etablering av tilkoblingspunkt for lading av elektriske kjøretøy. Denne informasjonen kan også være manglende hos forhandlere av elbiler, slik at informasjonen ikke når frem til forbrukere. Selv om en selger kjenner til kravene, kan informasjonen bli utelatt for å ikke skremme kjøper med en ladestasjon eller annet tilleggsutstyr som kan medføre ekstrakostnader på flere tusen kroner. På en annen side vil kravene i NEK 400 øke kunnskapen til installatører rundt denne problemstillingen, og føre til økt sikkerhet ved etablering av nye elektriske anlegg.

#### 6.4 Forskjell mellom nettsystemer

Jordfeilstrømmens størrelsesorden og hvordan den vil forplante seg, vil være avhengig av hvilket nettsystem det elektriske kjøretøyet er tilkoblet. Fra figurene av de ulike nettsystemene ser man at feilstrømmen vil gå i en sluttet krets tilbake til feilstedet. Det betyr at en eventuell likestrøm vil bare forårsake DC-blindhet på jordfeilvern som tilhører kursen med jordfeil, og eventuelle jordfeilvern som ligger oppstrøms.

##### **IT-nett**

Det er vanskelig å si noe om hvordan en likestrøm vil påvirke den kapasitive effekten mellom nettet og jord. Uansett vil det ikke gå noen likestrøm tilbake til nettet ved enpolet jordfeil. En eventuell jordfeil i ombordladeren ved lading vil derfor ikke degradere funksjonen til jordfeilvern på den tilhørende kursen. Derfor kan man benytte jordfeilvern type A ved lading av elektriske kjøretøy på IT-nett.

På en annen side kan det oppstå, eller allerede være en jordfeil på en annen fase i et nærliggende elektrisk anlegg, for eksempel hos naboen. I slike situasjoner er det ingen garanti for at jordfeilstrømmen blir så stor at den fører til utkobling. Samtidig vil en slik situasjon føre til at jordfeilstrømmen får en direkte kobling til nettet. Dersom den ene jordfeilen i dette tilfellet er i en ombordlader, kan likestrøm derfor flyte i tilhørende kurser. Det kan medføre at jordfeilvern blir påvirket. For at likestrømmen skal ha noen innvirkning på de aktuelle jordfeilvernene, må strømmen være høy nok ( $\geq 60$  mA fra målinger).

I en slik situasjon vil jordfeilstrømmens størrelse være avhengig av flere faktorer som avstand mellom jordelektrode, jordsmonn og overgangsmotstand. Disse faktorene vil variere fra anlegg til anlegg, og det vil derfor være vanskelig å anslå feilstrømmens størrelsesorden. Impedansen i feilkretsen vil reduseres dersom installasjonenes jordingsanlegg er sammenkoblet via nettselskapets jordingsystem. Da kan feilstrømmen bli så høy at

overstrømsvernene løser ut. Man vil derfor ikke få problemer med DC-blindhet. Likevel vil en eventuell utkobling være avhengig overstrømsvernenes nominelle strøm.

Samtidig skal ombordladeren være utstyrt med isolasjonsresistanser som begrenser feilstrømmen. Dersom nettselskapets jordingssystem ikke er lagt frem i tillegg, vil feilstrømmen muligens være så lav at jordfeilvern type A ikke blir påvirket. Totalt sett er det liten sannsynlighet for DC-blindhet i IT-nett.

### **TN-nett**

TN-nett er det eneste nettsystemet som gir mulighet for trefaset lading. Det er derfor størst sannsynlighet for DC-blindhet på et slikt nett, siden man kan få både jevnt- og pulserende likestrøm til jord.

I et TN-nett vil en jordfeilstrom ofte bli så stor at strømtilførselen automatisk frakobles ved hjelp av sikringer. Det betyr at en eventuell jordfeil i en ombordlader må føre til en jordfeilstrom som er lavere enn kurssikringens nominelle strøm. Da vil man få en stående jordfeil med en likestrøm som flyter gjennom kursens jordfeilvern. Dersom jordfeilvernet er type A, kan likestrømmen føre til DC-blindhet. Som sagt vil dette skje dersom strømmen er så lav at verken overbelastningsvernet eller kurssikringen oppdager feilen.

Diskusjonen om å bruke jordfeilvern type B må derfor ha oppstått på grunn av at jordfeilstrommer ved lading av elektriske kjøretøy er lav. Lave jordfeilstrommer i et TN-nett oppstår på grunn av lekkasjestrømmer uten full jordslutning. Mest sannsynlig vil feilstrømmen være begrenset på grunn av kravet om isolasjonsresistans i ombordladeren. Det virker derfor som at sannsynligheten for en slik situasjon er større i et TN-nett enn i et IT-nett.

### **TT-nett**

I et TT-nett vil feilstrømmen sjelden overstige 5-10 A. Derfor er det liten sannsynlighet for at overstrømsvernet vil koble ut strømtilførselen ved en jordfeil. Da vil det være mulig at eventuelle DC-komponenter i feilstrømmen kan ha innvirkning på jordfeilvernet i tilhørende kurs. Feilstrømmen må samtidig være høy nok til at DC-komponentene påvirker vernet. Isolasjonsresistansen i ombordladeren sammen med høy overgangsmotstand til jord kan føre til at likestrømmen blir for lav til å påvirke jordfeilvernet.

## 6.5 Jordfeil i ombordlader

Det finnes ikke noen oversikt eller rapporter som omhandler problemer rundt elsikkerhet ved lading av elektriske kjøretøy. Valg av riktig jordfeilvern ved lading av elektriske kjøretøy har likevel fått mye oppmerksomhet av standardiseringsorganer. Hva kan være grunnen til oppmerksomheten rundt denne problemstillingen?

Dette kan være på bakgrunn av at halvlederkomponenter, som brukes i ombordladere, er sett på som skjøre komponenter som slites på grunn av miljø og stor last. Komponenter i et elektrisk kjøretøy opererer i et hardt miljø under kjøring, hvor de kan eksponeres for fuktighet og mekaniske påvirkninger. I tillegg medfører lading av elektriske kjøretøy en høy og langvarig belastning på komponentene. Fra flytskjemaet utarbeidet av IEC, skal det være jordfeilvern type B forankoblet enfaset ( $> 16 \text{ A}$ ) og trefaset kraftelektronisk utstyr som kan generere likestrøm. Grunnen til forankoblet jordfeilvern type B for enfaset laster  $> 16 \text{ A}$  og trefaselaster, kan være på grunn av den høye belastningen. En større last øker sannsynligheten for havari på halvlederkomponenter, som igjen kan medføre en større risiko for feil og DC-komponenter.

Når det er snakk om lading av elektriske kjøretøy blir det naturlig å se på forskjellen mellom enfaset- og trefaset lading. Ved enfaset lading er det liten sannsynlighet for å få en jevn likestrøm til jord. En jordfeil etter likeretteren vil føre til en pulserende strøm, som jordfeilvern type A skal detektere. Ved trefaset lading får man utnyttet alle tre fasestrømmene, og man får derfor en høy og relativt jevn likestrøm. Jordfeilvern type A vil derfor ikke klare å håndtere en jordfeil etter trefasebrukoblingen til ombordladeren. Dersom det oppstår en jordfeil et annet sted i ombordladeren, kan feilstrømmen se annerledes ut. Selv om det ikke oppstår en jevn likestrøm, kan man likevel få DC-komponenter til jord ved enfaset lading, dersom jordfeilen oppstår etter transistoren. Denne situasjonen er relevant for både enfaset og trefaset lading.

Transistorens høyfrekvente av- og påslag fører til en frekvens fra  $5 \text{ kHz}$  til  $50 \text{ kHz}$ . Dersom jordfeilen oppstår etter transistoren i en krets med PFC, vil feilstrømmen være en rask pulserende likestrøm med høy  $di/dt$ . Jordfeilvern type A vil ikke detektere en slik feilstrøm. Hvor store innvirkninger en slik feilstrøm vil ha ulike på jordfeilvern er uklart, men strømmer med DC-komponenter og høy frekvens kan føre til at jordfeilvern type A og AC ikke fungerer riktig. Selv om strømmen har høy frekvens skal jordfeilvern type B løse ut i en slik situasjon. Uansett må man anta at det er en mulighet for DC-komponenter til jord ved både enfaset og trefaset lading.

Den største andelen av elektriske kjøretøy er begrenset til enfaset lading. I Norge er det ytterligere begrenset til enfaset lading på grunn av stor utbredelse av IT-nett. Bør det stilles forskjellige krav mellom enfaset og trefaset lading? Sannsynligheten for jevn likestrøm etter enfaset likeretting er lav, men oppbyggingen til ombordladere er kompleks og derfor kan feilstrømmen muligens bli påvirket av andre komponenter. I tillegg kan det oppstå feilstrømmer med høyfrekvent likestrøm i kretser med PFC. Spørsmålet er vanskelig å besvare uten bedre innblikk i feilstrømmenes sannsynlighet eller størrelsesorden.

Basert på gjennomført litteratursøk kan man ikke med 100 % sikkerhet si at slike feilstrømmer forekommer ved lading av elektriske kjøretøy. Samtidig er det stort fokus rundt denne problemstillingen fra internasjonale og nasjonale standardiseringsorganisasjoner. Fokuset kan muligens stamme fra lignende erfaringer i annet kraftelektronisk utstyr. Likevel er det mulig at slike erfaringer ikke kan overføres til ombordladere.

Ombordladeren har innebygget beskyttelsesegenskaper for å oppdage isolasjonsfeil. Disse beskyttelsesegenskapene kan være overvåkning av isolasjonsfeil, permanent overvåkning av koblingen mellom jord og det elektriske chassiset og deteksjon av symmetrisk isolasjonsfeil. Eventuelle feil som kan oppstå på grunn av slitasje kan dermed oppdages tidlig nok slik at eventuelle feil kan forebygges. I tillegg er det krav om at ombordladeren skal ha isolasjonsresistans, slik at feilstrømmen blir begrenset. Basert på resultatene fra laboratorieforsøket, vil en likestrøm under 60 mA ikke degradere funksjonen til jordfeilvern type A. Kravet om jordfeilvern type B vil være ubetydelig dersom isolasjonsresistansen fører til feilstrømmer under ca. 60 mA.

På markedet finnes det ombordladere med forsterket- og galvanisk isolasjon, som begrenser feilstrømmer. På grunn av forsterket isolasjon kan slike ladere brukes sammen med jordfeilvern type A. Dersom forsterket isolasjon blir standard, kan kravet om type B vern bli irrelevant. Kan det være en årsak til at slike metoder ikke blir benyttet av produsenter? Grunnen kan være at forsterket- og galvanisk isolasjon kan føre til større og tyngre ladere. Unødvendig plassbruk og vekt er ikke ønskelig når det er sterk konkurranse for å få best mulig rekkevidde. Kanskje standardiseringen av ombordladere ikke er streng nok.

Totalt sett er det ombord-kretsen i elektriske kjøretøy man bør basere seg på ved valg av riktig jordfeilvern. Det finnes ingen generell standard på hvordan en ombordlader skal være oppbygget. Det er mye forskning og utvikling, og det kan derfor være vanskelig å si hvordan en jordfeil vil utarte seg. Dersom produsenter klarer å dokumentere at eventuelle jordfeil ikke vil oppstå, eller vil være under et gitt nivå, så er det egentlig ikke noen fare for strømgjennomgang.

Som tidligere nevnt finnes det ikke noen oversikt eller rapporter som omhandler problemer rundt elsikkerhet ved lading av elektriske kjøretøy. Det var mange elektriske kjøretøy på veiene før delnormen 7-722 kom i 2014. Likevel er det ikke mulig å finne noen tilfeller hvor lading av elektriske kjøretøy har forårsaket problemer med jordfeilvern. Det er derfor merkelig at den internasjonale elektrotekniske kommisjon (IEC) fremmer de nye kravene, og jobber for å gjøre de strengere i skrivende stund. Det virker som at det er lite kompetanse rundt denne problemstillingen, slik at standardiseringsorganisasjonene jobber med bedre føre var prinsippet.



## 6.6 Videre arbeid

Det bør forskes videre på ombord-kretser til elektriske kjøretøy for å evaluere sannsynligheten for jordfeil. Samtidig bør man undersøke nærmere hvilke jordfeilstrømmer som kan oppstå og strømmenes størrelsesorden. I tillegg bør man undersøke om eventuelle støygengerende fenomener ved lading av elektriske kjøretøy kan påvirke riktig funksjon av jordfeilvern eller overvåkningsmoduler. Dette kan være aktuelt i større ladestasjoner hvor flere elektriske kjøretøy lader samtidig, for eksempel i borettslag.

Videre arbeid kan også være å teste jordfeilvern fra flere produsenter for å undersøke om jordfeilstrømmer med DC-komponenter gir større utslag på vern fra «billig-produsenter». Samtidig se hvilke innvirkninger høyfrekvent pulserende likestrøm har på jordfeilvern.



## 7. Konklusjon

Resultatene tyder på at jordfeilvern type A tåler likestrøm bedre enn hva som antas. Jordfeilvern type A med 30 mA merkeutløsestrøm kan opprettholde riktig drift ved påtrykket likestrøm fra opp under 60 mA til opp under 330 mA, avhengig av type vern og produsent. Samtidig er jordfeilverns evne til å koble ut avhengig av forholdet mellom AC- og DC-strømstyrken i jordfeilstrømmen. Likestrøm vil mest sannsynlig ikke føre til en betydelig økning i utkoblingstiden til jordfeilvern type A. Jordfeilvern type A fra anerkjente produsenter kan mest sannsynlig installeres oppstrøms jordfeilvern type B uten påvirkning av likestrøm, forutsatt at begge vern har en merkeutløsestrøm på 30 mA.

Det er størst sannsynlighet for DC-blindhet i et TN-nett på grunn av muligheten for trefaset lading som kan føre til jevn likestrøm til jord. I et IT-nett uten andre feil, vil en eventuell jordfeil i ombordladeren ved lading ikke føre til DC-blindhet av jordfeilvernet. Jordfeilstrømmen i lavspente fordelingsnett vil være avhengig av impedansen i feilkretsen, men totalt sett er jordfeilstrømmen avhengig av ombord-kretsen til det elektriske kjøretøyet.

Valg av riktig jordfeilvern ved lading av elektriske kjøretøy vil være avhengig av ombordladeren. Dersom ombordladere har høy isolasjonsresistans, forsterket isolasjon og galvanisk isolasjon er det liten sannsynlighet for at en jordfeil i ombordladeren vil forårsake DC-blindhet på forankoblede jordfeilvern type A. Dersom det kommer strengere sikkerhetskrav til ombordladere kan risikoen for likestrøm til jord kraftig reduseres, eventuelt elimineres.



## Referanseliste

1. Statistisk sentralbyrå. *Over 140 000 elbiler i Norge*. 2018, Lastet ned [01.05.2018] Hentet fra: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/artikler-og-publikasjoner/over-140-000-elbiler-i-norge>.
2. NEK, *NK 64 - Bygningsinstallasjoner*. Lastet ned: [20.05.2018] Hentet fra: <https://www.nek.no/komiteer/nk64/>.
3. NEK, *Elektriske lavspenningsinstallasjoner*. 2014, NEK 400:2014 5. utgave.
4. Hanstad, J.S., *Lading av elektriske biler - planlegging og prosjektering av ladeinstallasjoner*. 2015.
5. Offergaard, S., *El-trøbbel i norske hjem*. 2016, Bygg.no, Lastet ned: [05.05.2018] Hentet fra: <http://www.bygg.no/article/1292507>.
6. Norsk-Elbilforening, *Renault Zoe R90 Z.E 40*. Lastet ned: [30.04.2018] Hentet fra: <https://elbil.no/elbil/renault-zoe-ze-40/>.
7. Hansen, E.H., *Elektroinstallasjoner*. 2010, Classica.
8. Korneliussen, T., *Jordingshåndboka*. 2000.
9. Svarte, S. og J.H. Sebergesen, *Kapasitans i lufplinjer og kablar*, in *Energiproduksjon og energidistribusjon*, Gyldendal, Editor. 2015. p. 65.
10. Alvestad, R., *Fordelingssystemer*. 1995, Elforlaget.
11. Justis- og beredskapsdepartementet, *Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg*. 1998.
12. Hafslund Nett, *Flere detaljer om elbil og lading*. 2017, Lastet ned: [10.04.2018] Hentet fra: <https://www.hafslundnett.no/kunde/elbil/15612>.
13. NK64, *Tolkninger av eller endringer i NEK 400 foretatt av NK 64*. 2015, Lastet ned: [03.05.2018] Hentet fra: <https://www.nek.no/standarder/produkter/tolkninger-nek-400/>.
14. IEC, *Residual direct current detecting device (RDC-DD) to be used for mode 3 charging of electric vehicles*. 2018, NEK IEC 62955:2018.
15. Harrop, P., *Integrating charging and traction systems in electric vehicles: Part 1*. 2016, Lastet ned [01.03.2018] Hentet fra: <https://www.idtechex.com/research/articles/integrating-charging-and-traction-systems-in-electric-vehicles-part-1-00009723.asp>.
16. Grenier, M., *Design of an on board charger for plug-in hybrid electrical vehicle (PHEV)*. 2009, Masteroppgave. Chalmers University of Technology Göteborg. Lastet ned: [13.04.2018] Hentet fra: <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/GrenierMathieuMSc.pdf>
17. Gunvaldsen, I. og K.A. Rosvold, *Likeretter*. 2017, Lastet ned [13.03.2018] Hentet fra: <https://snl.no/likeretter>.
18. Mohan, N., T. Undeland, og W. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2nd Edition*. 1995, John Wiley and Sons, INC. p. 172-173.
19. Wildi, T., *Special Transformers*, fra *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*. 2013, Pearson. p. 245-246.
20. Wildi, T., *Ideal Transformer*, fra *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*. 2013, Pearson. p. 189-190.
21. Bender, *Electrical safety for emobility*. 2015, Lastet ned [15.04.2018] Hentet fra: [http://www.bender-emobility.com/fileadmin/products/b/e/Emobility\\_PROSP\\_en.pdf](http://www.bender-emobility.com/fileadmin/products/b/e/Emobility_PROSP_en.pdf).
22. ISO, *Electrically propelled road vehicles - safety specifications*. 2011, ISO 6469-3:2011.
23. Albanna, A., et al. *Analysis of ground fault currents in isolated and non-isolated charging modules in electric vehicles*. fra *2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. 2015.

24. Yilmaz, M. and P.T. Krein, *Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013. **28**(5): p. 2151-2169.
25. Stengert, K. *On-board 22 kW fast charger "NLG6"*. fra 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27). 2013.
26. IEC, *Electric vehicle conductive charging system in Part 1: General requirements*. 2017, NEK IEC 61851-1:2017.
27. Hofheinz, W., H. Sellner, and W. Möll, *Charging electric vehicles*. ATZ elektronik, Lastet ned: [15.04.2018] Hentet fra: <https://www.bender-cn.com/fileadmin/content/BenderGroup/Documents/Article/en/Charging-Electric-Vehicles-ATZelektronik-worldwide-5-2012.pdf>.
28. Yang, S., et al., *An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011. **47**(3): p. 1441-1451.
29. Aldejohann, C., et al. *Having a cutting point - Testing and development environment at TU Dortmund University*. fra 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27). 2013.
30. IEC, *Safety requirements for power electronic converter systems and equipment. Part 1: General*. 2012, NEK IEC 62477-1:2012+AMD1:2016 CSV
31. Amadori, C., *Everything you wanted to know about Type B residual current circuit breakers but never dared to ask*. 2015, ABB technical journal - Day by DIN 1|15.
32. Siemens, *Residual Current Protective Devices*. 2016, Technology primer.
33. Štěpán, F., *Residual Current Devices*. 2017, Eaton.
34. Schneider Electric, *Electrical installation guide*. 2016.
35. IEC, *General safety requirements for residual current operated protective devices*. 2017, NEK IEC 60755:2017
36. ABB, *Protection against earth faults with Residual Current Devices*. 2013, Technical guide.
37. Gruhn, T., J. Glenney, og M. Savostianik, *Type B Ground-Fault Protection on Adjustable Frequency Drives*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018. **54**(1): p. 934-939.
38. Sandstad, J., *Hysterese*. 2018, Lastet ned: [30.05.2018] Hentet fra: <https://snl.no/hysterese>.
39. Doepke, *RCD principles*. 2017, Doepke UK Ltd, Technical publication.
40. Wieland, T., et al. *Influences on safety issues for inverter supplied grid structures*. fra 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability. 2012.
41. IEC, *Effects of current on human beings and livestock*. 2005, NEK IEC TS 60479-1:2005+AMD1:2016 CSV.