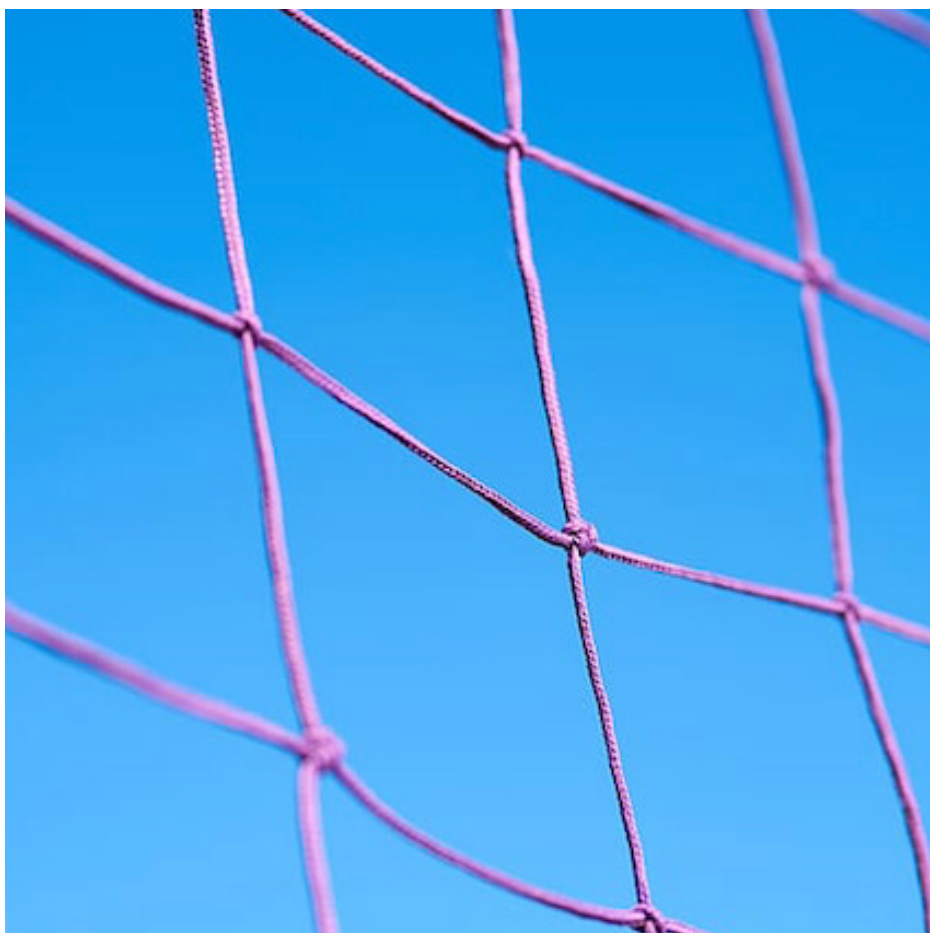
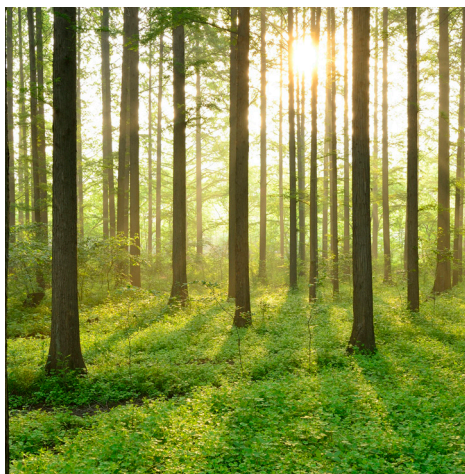


JORDFELSBRYTARE OCH KOMPONENTER FRÅN DC TILL 150 KHZ – EN RISKBEDÖMNING

RAPPORT 2021:819



Jordfelsbrytare och komponenter från DC till 150 kHz – en riskbedömning

**SARAH RÖNNBERG, JIL SUTARIA, ANGELA ESPIN-DELGADO,
NASER NAKHODCHI, MATH BOLLEN**

ISBN 978-91-7673-819-1 | © Energiforsk januari 2022

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

Förord

Programmet Risk- och Tillförlitlighetsanalys har i samråd med Elsäkerhetsverket uppmärksammat att det kan förekomma liktrömsläckage från solpanelsinstallationer och installerade elbilsladdare som kan slå ut jordfelsbrytare. För att undersöka området närmare, initierade programmet projektet *Jordfelsbrytare och (kvasi)likströmskomponenter – en riskbedömning*. Resultaten kan användas som en riskbedömning vid val av olika typer av jordfelsbrytare.

Projektet *Jordfelsbrytare och (kvasi)likströmskomponenter – en riskbedömning* initierades i programmet Risk- och Tillförlitlighetsanalys 2016-2020 och godkändes i efterföljande program Risk- och Tillförlitlighetsanalys 2021-2025. Projektgruppen bestod av Sarah Rönnberg och Math Bollen som har styrt arbetet samt tre doktorander, Naser Nakhodchi, Angela Éspin Delgado och Jil Sutaria som utfört simuleringar och mätningar. Samtliga har arbetat på Luleå Tekniska Universitet i Skellefteå.

Energiforsk tackar Mikael Carlsson på Elsäkerhetsverket för granskningsinsatser och deltagarna i referensgruppen för deras föredömliga insatser i projektet:

- Alexander Bäckström, Svea Solar
- Anna Werner, Svensk solenergi
- Anders Richert, Elsäkerhetsverket
- Per Höjevik, Elsäkerhetsverket
- Robert Nyden, Garo
- Michael Bartonek, Eaton
- Paolo Faure, ABB
- Luca Ghezzi, ABB

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

- Jenny Paulinder, Göteborg Energi Nät (ordförande)
- Emil Welin, Vattenfall Eldistribution
- Josefine Grundius / Petter Sandberg, Ellevio
- Mari Jacobsson Ueda, Svenska kraftnät
- Göran Hamlund, Elinorr
- Magnus Brodin, Skellefteå Kraft Elnät
- Mattias Jonsson, Umeå Energi
- Hampus Halvarsson, Jämtkraft
- Johan Mikkelsen, Öresundskraft
- Henric Johansson, Jönköping Energi Nät
- Fredrik Byström Sjödin, Installatörsföretagen
- Carl Johan Wallnerström, Energimarknadsinspektionen (adjungerad)
- Anders Richert, Elsäkerhetsverket (adjungerad)

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

- Vattenfall Eldistribution AB,
- Ellevio AB,
- Svenska kraftnät,
- Göteborg Energi Nät AB,
- Elinorr,
- Jämtkraft Elnät AB,
- Skellefteå Kraft Elnät AB,
- Öresundskraft AB,
- Umeå Energi Elnät AB,
- Kraftringen Nät AB,
- Jönköping Energi Nät AB,
- Installatörsföretagen,
- AB PiteEnergi,
- Karlstads El och Stadsnät,
- Karlskoga Elnät AB

Rapporten har tagits fram med finansiellt stöd från Energimyndigheten.

Stockholm i januari 2022

Susanne Stjernfeldt

Energiforsk AB

Forskningsområde Elnät Vindkraft och Solel

Sammanfattning

Jordfelsbrytare används i lågspänningsinstallationer för att upptäcka jordfel genom att indirekt mäta summaströmmen (läckströmmen). Jordfelsbrytare är avsedda att skydda personer vid direktkontakt med ledande delar av anläggningen under ett fel. En jordfelsbrytare kan falla på två olika sätt, underlåtenhet att lösa ut eller falskutlösning där den förra är den allvarligaste när det gäller konsekvens för personsäkerhet.

Jordfelsbrytare av olika typer och tillverkare, vanligt förekommande på marknaden, har testats och en påverkan ses när summaströmmen innehåller likström, kvasi-likström, övertoner och supratoner. Viktigt att notera är att även om en påverkan ses så är denna påverkan inte av den grad att funktionaliteten av jordfelsbrytarna äventyras. En riskanalys har gjorts över utbredningen, från en kundanläggning till en annan, av frekvenskomponenter från likström till 150 kHz. Resultaten visar att likström inte propagerar till angränsande anläggningar på ett sätt som kan negativt påverka jordfelsbrytare. För höga frekvenser finns en viss utbredning men dessa komponenter har en mindre påverkan på jordfelsbrytare.

Summary

Residual current devices (RCDs) are used in low voltage installations to detect earth faults by indirectly measuring the sum of the currents flowing in the phases and neutral conductor (leakage current). RCDs are intended to protect persons in direct contact with conductive parts of the system during a fault. An RCD can fail in two different ways, failure to trip or false tripping where the former is the most serious in terms of consequences for personal safety.

RCDs of various types and manufacturers, commonly used on the market, have been tested and an effect is seen when the residual current contains dc, quasi-dc, harmonics and supraharmonics. It is important to note that even if an impact is seen, this impact is not to the extent that the functionality of the RCD is compromised. A risk analysis has been performed on the distribution, from one customer facility to another, of frequency components from dc to 150 kHz. The results show that dc does not propagate to adjacent facilities in a way that can negatively affect RCDs. High frequencies propagate to a certain degree, but these components have a smaller effect on RCDs.

Innehåll

1	Inledning	8
2	Likströmskomponenter	9
3	Utbredning av likström i lågspänningsnät	11
4	Vågformsdistorsion (övertoner, undertoner, supratoner)	16
5	Utbredning av vågformsdistorsion i lågspänningsnät	18
6	Test av jordfelsbrytare	20
	Test 1, 34.5 kHz med en magnitud på 80 % av summaströmmens 50 Hz komponent.	23
	Test 2, 11.5 kHz samt 150 Hz (0° or 180° fasvinkel) med en magnitud på 100 % av summaströmmens 50 Hz komponent.	23
	Test 3, 4 Hz med en magnitud på 48 % av summaströmmens 50 Hz komponent.	23
	Test 4, Halvvågslikriktad summaström 50 Hz med 11,5 kHz med en magnitud på 137 % av summaströmmens 50 Hz komponent	24
	Test 5, likström	25
	Test 6, Summaström med frekvens≠50 Hz	25
	Test 7, utlösningstid	26
7	Påverkan på människan	27
8	Slutsatser	28
9	Referenser	29

1 Inledning

Jordfelsbrytare används i lågspänningsinstallationer för att upptäcka jordfel genom att indirekt mäta summaströmmen (läckströmmen). Dessa enheter är avsedda att skydda personer vid direktkontakt med ledande delar av anläggningen under ett fel. En jordfelsbrytare kan falla på två olika sätt, underlåtenhet att lösa ut eller falskutlösning där den förra är den allvarligaste när det gäller konsekvens för personsäkerhet. Det finns olika typer av jordfelsbrytare på marknaden och vissa installationer kräver vissa typer av jordfelsbrytare, t.ex. vissa solcellsanläggningar kräver en extern jordfelsbrytare som kan detektera likström [1] och detsamma gäller för vissa elbilsladdare. För de flesta vanliga lågspänningsinstallationer finns det inget krav på vilken typ av jordfelsbrytare som ska installeras även om installationen kan ha ansluten utrustning som producerar övertoner, supratoner, undertoner (kvasi-dc) eller likström.

2 Likströmskomponenter

Typiska effekter av likströmskomponenter i elnäten är: mättnad av utrustning med magnetkärnor (t.ex. transformatorer), ökad korrosion och fel på skyddsanordningar. Likströmsinjektion från växelriktarbaserad utrustning orsakas huvudsakligen av asymmetri eller fel inuti växelriktaren. Särskild uppmärksamhet måste ägnas åt enheter med högre effektvärde och transformatorlösa topologier. Vanliga exempel för sådana enheter är exempelvis solcellsväxelriktare och elbilsaddare.

En omfattande översikt över likströmskomponenter i lågspänningsnät finns i [2].

Ett antal vetenskapliga publikationer visar mätningar av likströmmar från solcellsväxelriktare. En Australiensk studie visar uppmätta nivåer av likström som varierar mellan 2,4 mA och 180 mA från fem olika växelriktare med märkeffekt mellan 2 kW och 5 kW [3]. Växelriktare med märkeffekt mellan 2,3 kW och 5 kW avsedda för den europeiska marknaden har undersökts i [4] och likströmmar i intervallet 60 mA och 225 mA uppmättes.

Tillåten likströmnivå som får härröra från solcellsväxelriktare begränsas av internationella standarder. För en- eller trefasanslutna solcellsanläggningar anslutna till lågspänningsnät i Sverige gäller SS-EN 50549-1. Denna standard ger inget gränsvärde utan nämner att generatoranläggningar inte ska injicera likström. Hänvisning görs istället till IEC/TR 61000-3-15 där ett informativt appendix anger att nivån på tillåten likströmskomponent varierar mellan 0,25% och 1% av nominell ström i olika länder, några exempel ges i Tabell 1 [5]. I IEC/TR 61000-3-15 noteras också att dessa nivåer representerar en liten del av transformatorns totala belastning och att likströmskomponenter från multipla källor kan kompensera varandra. Den resulterande likströmskomponenten från ett antal anläggningar behöver således inte öka linjärt med antalet.

Tabell 1 Sammanställning av gränsvärden för likström från solcellsanläggningar [5]

Land	Standard	Maximal tillåten likström
USA	IEEE 1547 IEEE 929-2000	0.5% av märkström
UK	ER G83/1	0.25 % av märkström
Tyskland	DIN VDE 0126-1-1	1A (Total injection) [States in the case of DC current injection greater than 1A, disconnection is mandatory in 0.2s]
Italien	CEI 0-21	0.5% av märkström
Australien	AS 4777.2	0.5% av märkström

Likströmsinjektion från växelriktare till elnätet kan delas upp enligt nedanstående kategorier:

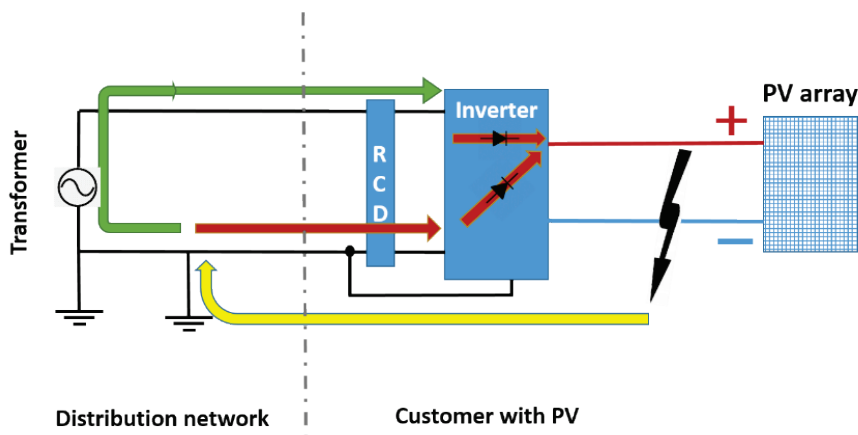
1) Normal drift

Asymmetri i pulsbreddsmodulationen kan orsaka att likström injiceras till elnätet. Denna asymmetri kan bero på ett antal saker [6, 7, 8]:

- Asymmetri i kopplingsschemat.
- Fördröjning av påslagnings- och avstängningsstatus för halvledarna.
- Gate driver-kretsar är inte exakt identiska.
- Mätfel i ström- och spänningsprovtagning som härrör från sensorer eller A/D-omvandlaren.

2) Fel på likströmssidan

Om ett jordfel uppstår på likströmssidan av växelriktaren så flyter en ström till jord. Denna ström strömmen kan i vissa fall vara upp till hundra Ampere [9, 10] och är baserad på storleken på solcellssystem, platsen för felet och miljöförhållanden vid installationen. Slingan för den resulterande felströmmen illustreras i Figur 1. Denna felström kan innehålla en 50 Hz komponent, likströmskomponent, lågfrekventa övertoner, över- mellan eller supratoner beroende på växelriktarens topologi.



Figur 1 Slinga för den likström som uppstår vid ett fel på likströmssidan av växelriktaren

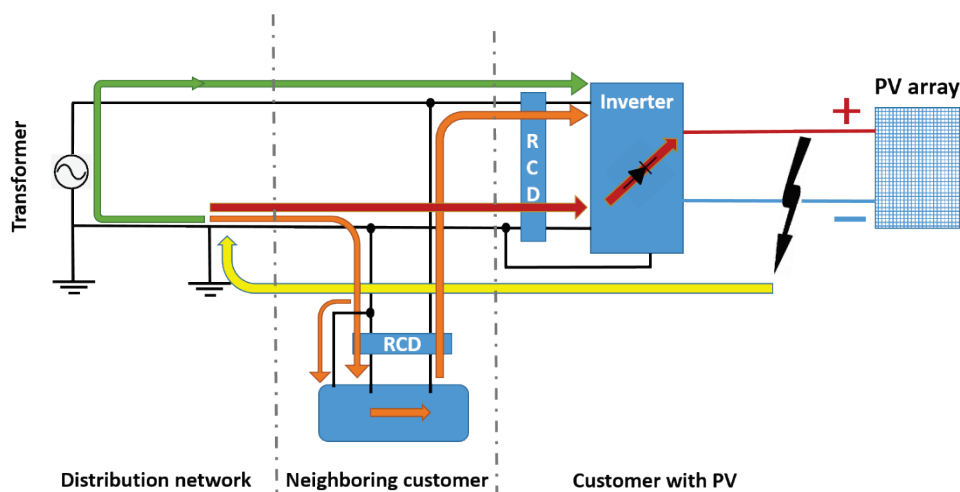
För att förhindra att en farlig situation uppstår på grund av felströmmen utrustas solcellsinstallationer med en jordfelsbrytare.

3 Utbredning av likström i lågspänningsnät

Solcellsinstallationer kan avge likström till elnätet under både normal drift och vid ett fel på likströmssidan som diskuteras i Avsnitt 2. Likströmmen som injicerar till nätet under normal drift, på grund av asymmetri hos växelriktaren har begränsad storlek och flödar i både fas- och neutralledare och kan därför inte påverka funktionaliteten hos jordfelsbrytare i lågspänningskunders installationer. Den kan fortfarande påverka distributionstransformatorn och i ett område med hög penetration av solcellssystem kan den flytta transformatorns driftspunkt till mättnad och bidra till ökade övertonsspänningar. Storleken på kvasi-likströmskomponenter (här definierat som en frekvenskomponent med en frekvens högre än 0 Hz och upp till 4 Hz) i en eventuell läckström är också försumbar och kan inte spridas till elnätet och påverka grannkundernas jordfelsbrytare.

Likström som härrör från jordfel på likströmssidan är mer benägen att sprida sig till elnätet och kan potentiellt orsaka jordfelsbrytarrelaterade problem. I grund och botten bör felet upptäckas av jordfelsbrytaren för solcellssystemet där felet uppstått och växelriktaren måste kopplas bort från nätet. Vid fel på solcellssystemets skyddsenhet och jordfelsbrytare kan denna felström strömma till marken och följaktligen till elnätet.

Figur 2 visar olika möjliga vägar för jordfelsström i ett lågspänningsnät med TN-C-S-jordning. Ström orsakad av jordfel vid likströmssidan strömmar till marken och når till neutralledaren genom den punkten där neutral och skyddsjord kombineras. Vid denna punkt finns det tre vägar för strömmen. Strömmen kan sluta kretsen genom transformator som illustreras med grön pil i Figur 2. En annan möjlig väg är vägen tillbaka genom neutralledaren till växelriktaren och kretsen sluts då av växelriktarens omkopplingsenheter som visas med de röda pilarna i Figur 2. Slutligen kan strömmen flöda genom neutralledaren och PE-ledaren och nå en angränsande kund där kretsen sluts, som det illustreras av den orangea pilen i Figur 2. För det sista fallet när strömmen strömmar till angränsande kund kan den teoretiskt påverka jordfelsbrytaren där och orsaka oönskad utlösning. Detta skulle dock innebära att samtidiga fel uppstått på jordfelsbrytare och likströmssidan av solcellsinstallationen och sannolikheten för detta måste bedömas som liten.



Figur 2 möjliga vägar för jordfelsström

En förenklad modell över likströmsutbredningen i ett lågspänningsnät visas i Figur 3 där

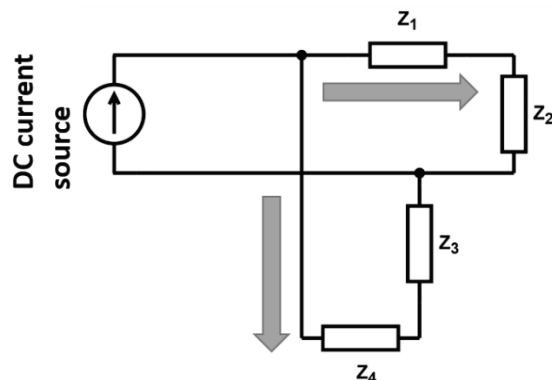
Z_1 : resistansen i matarkabeln

Z_2 : resistansen i distributionstransformatorn, fas till neutral

Z_3 : resistansen i serviskabeln

Z_4 : resistansen hos utrustning i angränsande installation

Likströmsdelen av jordfelström modelleras av en likströmskälla. Impedanserna Z_1 och Z_3 är av samma ordning och förhållandet mellan Z_2 och Z_4 bestämmer hur likströmmen går tillbaka till felstället. Det bör noteras att endast den resistiva delen av impedansen är av intresse när det gäller utbredning av likström. I detta sammanhang kan transformatorn modelleras med sin magnetiserande gren och idealt nollmotstånd vilket ger mycket låg resistans i jämförelse med närliggande installation. Detta ger att likströmmen går till transformatorn, inte till angränsande kund. Under det övergående tillståndet när en likströmsförändring inträffar kommer transformatorns induktans ge hög impedans med tidskonstanten $\tau = L / R$ där L är transformatorns induktans och R betecknar resistansen sedd från transformatorn. Under det övergående tillståndet när ett jordfel uppstår, har transformatorn hög impedans och det finns möjlighet för felströmmen att sprida sig andra vägar, som har lägre motstånd, exempelvis till en angränsande kund.



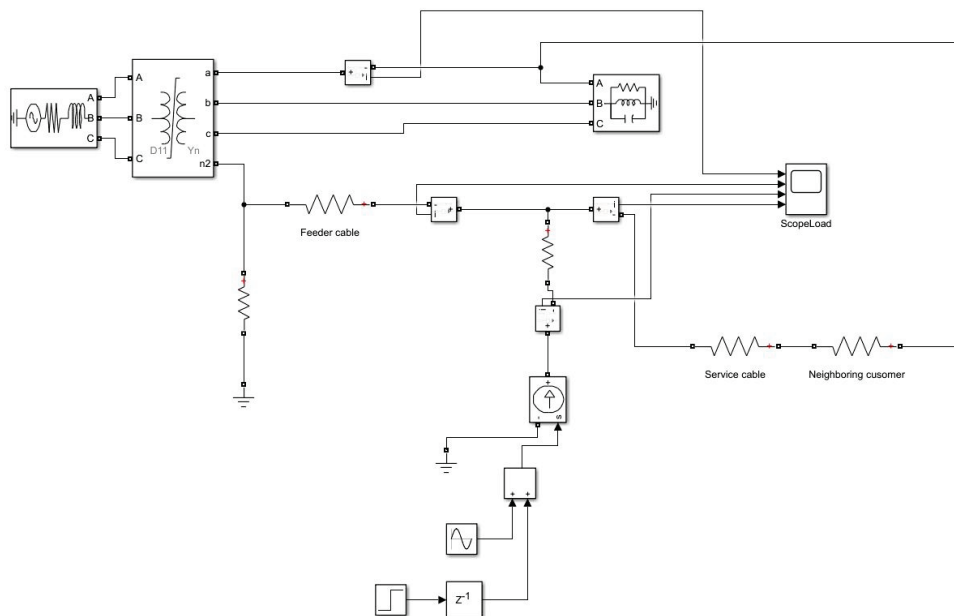
Figur 3. Förenklad modell över likströmsutbredning

En simuleringsmodell har utvecklats i MATLAB för att undersöka utbredningen av likström i ett lågspänningsnät. Likströmmen under ett jordfel simuleras med hjälp av en kontrollerad strömkälla som injicerar 10 A likström till nätet. Modellparametrar listas i Tabell 3. Notera att detta illustrerar ett fall med en mycket hög likströmskomponent och att en realistisk nivå ligger långt under detta värde, även om lågspänningsnätet skulle innehålla ett större antal likströmskällor. Värde på 10 A valdes för enkelhetens skull och för att visa på ett absolut "värsta fall". Ytterligare förenklingar har gjorts här då modellen inte tar hänsyn till att under ett verkligt fel i ett verkligt lågspänningsnät så finns ett antal apparater inkopplade vilket ytterligare bidrar till att denna simuleringsmodell är att betrakta som ett absolut "värsta fall". Modellen som presenteras i [12] har använts som bas för lastmodellen (Figur 5). För den förenklade modellen (introducerad i Figur 3), ersätts nätet med en likströmskälla, resultaten för detta fall visas i Figur 6. Under den initiala tiden (cirka 1 ms) efter felet inträffat, flödar felströmmen till angränsande kund på grund av hög transformatorimpedans, men efter denna övergående period flödar felströmmen mot transformatorn. Resultaten utifrån denna förenklade modell visar att ingen farlig situation uppstår där en likströmskomponent förväntas flyta till angränsande anläggning och där störa ut en jordfelsbrytare. Då modellen representerar ett absolut värsta fall så dras slutsatsen att detta inte förväntas bli ett problem i verkliga lågspänningsnät där likströmskomponenten är signifikant lägre och där anslutna laster bidrar till impedansen. Notera att tiden mellan att en jordfelström börjar flyta och att jordfelsbrytaren förväntas lösa ut är signifikant längre än 1 ms (jmf. Figur 16).

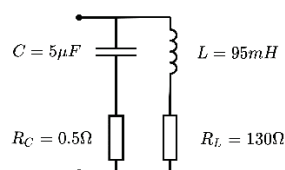
Tabell 2 Modellparametrar

Parameter		Value
Transformer	Rated power	250 kVA
	Magnetizing resistance	600 k Ω
	Magnetizing inductance	1900 H
	X/R	3
	Per unit impedance	4%
Residential load	R_C	0.5 Ω
	C	5 μ F
	R_L	130 Ω
	L	95 mH

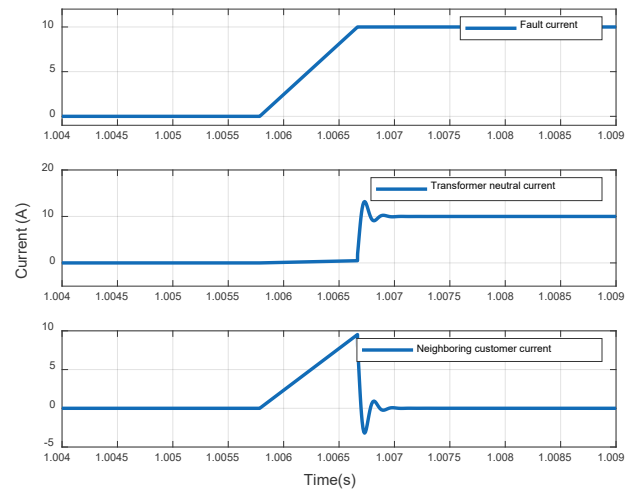
I Figur 7 visas resultaten från den mer detaljerade modellen då en likström injiceras då nätet matas från en växelspänningskälla. Samma slutsatser kan dras här, under en mycket kortvarig tid då felet uppstår kan en ström flyta till angränsande anläggning innan den övergår till att flyta mot transformatorn. Hur lång denna tid är beror på transformatorns induktans och den ekvivalenta resistansen hos nätet (sett från transformatorn).



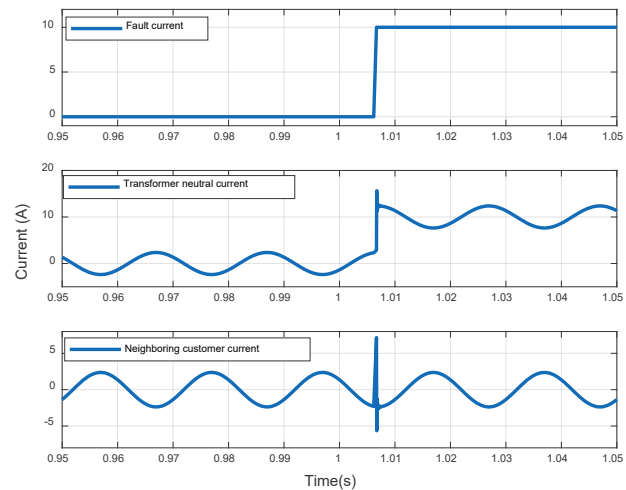
Figur 4 Modell över likströmsutbredning



Figur 5 Modell över hushållslast



Figur 6. Resultat från den förenklade modellen (jmf. Figur 3), felström (överst), ström till transformatorn (mitten), ström till angränsande kund (nederst)



Figur 7 Resultat från den mer detaljerade modellen (jmf. Figur 4), felström (överst), ström till transformatorn (mitten), ström till angränsande kund (nederst)

4 Vågformsdistorsion (övertoner, undertoner, supratoner)

Övertoner definieras som heltalsmultiplar av systemfrekvensen dvs. $n * 50 \text{ Hz}$ där n är ett heltal mellan ett och 40 (frekvenser upp till 2 kHz i ett 50 Hz system). Dessa övertoner uppstår när laster med en icke-linjär karaktär avsluts till nätet. Exempel på sådana laster kan vara växelriktare, LED belysning, datorer osv.

Övertonsströmmen från en solcellsinstallation regleras internationellt i IEC 61727 (ersatt av SS-EN 50549-1 och SS-EN 50549-2 i Sverige) där det anges att totala övertonsströmmen (THDI) ska vara lägre än 5 % av märksströmmen. Även de individuella strömövertoner, upp till 33:e övertonen, har gränsvärden givna i IEC 61727 enligt Tabell 3. Noterbart är att dessa gränsvärden endast gäller då spänningsdistorsionen inte anses bidra till ökade nivåer strömdistorsion.

Tabell 3 Gränsvärde strömövertoner enligt IEC 61727

Udda övertoner	Gränsvärde
3 tom 9	Mindre än 4 % av märksström
11 tom 15	Mindre än 2 % av märksström
17 tom 21	Mindre än 1,5 % av märksström
23 till 33	Mindre än 0,6 % av märksström
Jämna övertoner	Gränsvärde
2 tom 8	Mindre än 1 % av märksström
10 tom 32	Mindre än 0,5 % av märksström

Supratoner definieras som alla frekvenskomponenter i ström eller spänning med en frekvens mellan 2 kHz och 150 kHz. Supratoner kan alltså vara även icke heltalsmultiplar av systemfrekvensen. Supratoner injiceras till elnätet av utrustning med en switchad nät-del, exempelvis växelriktare, LED belysning, datorer osv. [13]. Typiskt ligger supratonsdistorsionen från en solcellsinstallation i frekvensbandet under 20 kHz och kan ha en magnitud på ett hundratals mA, jämförbart med magnituden på individuella övertoner. Det finns för närvarande inte någon standard som begränsar supratoner från solcellsanläggningar.

Frekvenskomponenter med en frekvens lägre än systemfrekvensen kallas undertoner (eng. subharmonics) eller subsynkrona frekvenser. För mycket låga frekvenser, under ett antal hertz, kan man också tala om kvasi-dc eller kvasi-likström. Undertoner alstras typiskt i exempelvis ljusbågsugnar och frekvensomriktare [14]. Frekvenskomponenter under 50 Hz kan injiceras av solcellsanläggningar exempelvis på grund av arbetssättet hos maximum power point tracker (MPPT) eller ö-drift detektering [15].

Även supratoner kan ge upphov till förekomsten av undertoner eller kvasi-dc. Två närliggande supratonsfrekvenser kan skapa en så kallad svävningsfrekvens (eng. beat frequency) [16] och utrustning med en diodlikriktare kan injicera undertoner när matande spänning innehåller supratoner [17].

Beskrivningen ovan gäller övertoner, undertoner och supratoner (även kallad våformsdistorsion) som flyter i fas och neutralledaren, för att de ska påverka en jordfelsbrytare krävs att dessa strömmar flyter en alternativ väg.

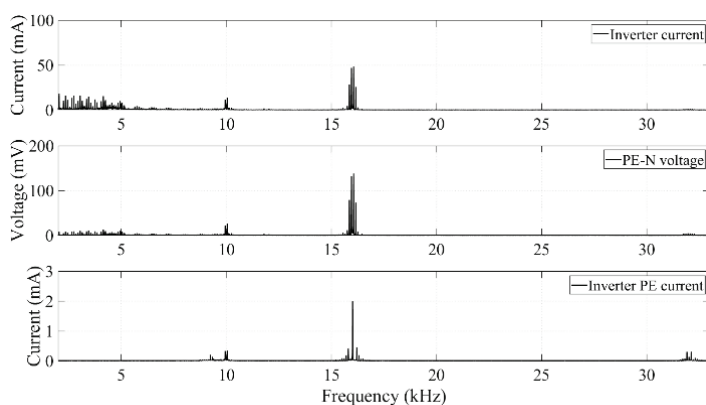
5 Utbredning av vågformsdistorsion i lågspänningsnät

Läckström definieras som summan av alla fasströmmar och strömmen i neutralledaren. Läckströmmar existerar i de allra flesta anläggningar och uppstår när en del av fasströmmen inte returnerar via neutralledaren. Man brukar skilja på läckström som returnerar till jord genom PE-ledaren och vagabonderande strömmar som hittar en väg som inte involverar kraftsystemet (exempelvis genom metallstrukturer i byggnaden eller vattenledningar).

Läckströmmar från vanligt förekommande hushållsapparater har testats i [18] där resultaten visar att frekvenskomponenter från likström upp till 150 kHz kan ses i läckströmmen. Läckströmmar i samband med solcellsinstallationer kan uppstå på likströmssidan genom parasitkapacitanser mellan solcellsmodulen och jord eller via EMI filtret på växelströmssidan av växelriktaren som har en kapacitans kopplad mot PE (de så kallade Y-kondensatorerna). Då kopplingen mot jord går via en kondensator så finns ett frekvensberoende och impedansen minskar när frekvensen ökar enligt:

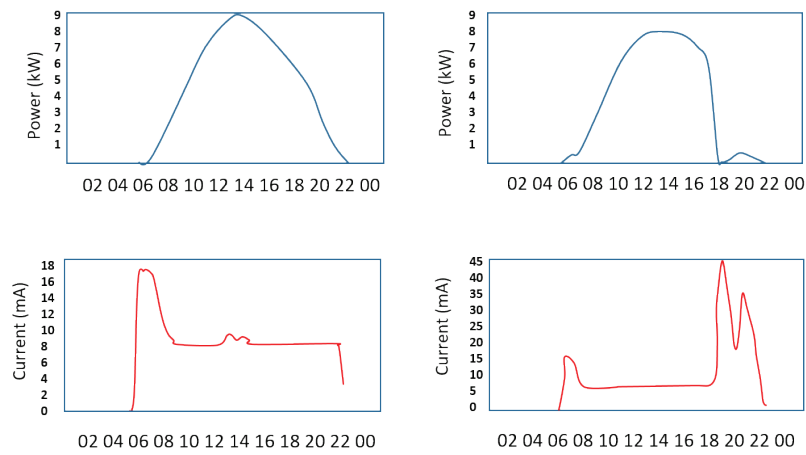
$$X_C = \frac{1}{\omega C} \text{ där } \omega = 2\pi f$$

Läckströmmar uppstår alltså i högre grad för övertoner och supratoner (jämfört 50 Hz) och för likström inte alls då en kondensator blockerar likström. En mätning vid en 2,5 kW enfasansluten solcellsanläggning ses i Figur 4. Mätningen visar att i det här fallet går cirka 4 % av den 16 kHz komponent som återfinns i fasströmmen genom PE-ledaren i form av en läckström [19].



Figur 8 Frekvensspektrum av supratoner uppmätta vid en solcellsinstallation, fasström (överst), spänning mellan N och PE (mitten) och ström i PE (nederst) [19]

Läckströmmar på likströmssidan beror på växelriktarens design, strukturen på solcellsmodulen samt väderförhållanden och eventuell smuts på panelernas struktur. Ett exempel på läckströmmar från en solcellsmodul visas i Figur 9 där effekten av dagg (vänster) och regn (höger) ses [20]. Denna påverkan från omgivningen ger att läckströmmen inte är konstant utan kan variera signifikant över tid.



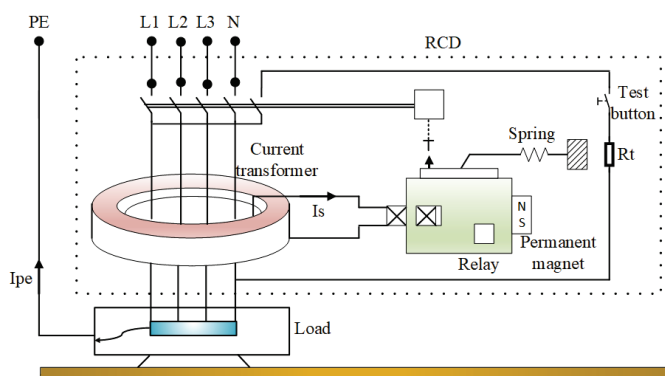
Morning condensation

Heavy rain

Figur 9 Läckström på grund av kondens (vänster) och regn (höger) [20]

6 Test av jordfelsbrytare

Principen för jordfelsbrytare är mätning av den algebraiska summan av alla fasströmmar och strömmen i neutralledaren med hjälp av en summeringstransformator. Denna summa överensstämmer med läckströmmen och kallas summaströmmen, I_{Δ} (uttryckt som rms -värde). Under normal drift och när det inte finns några läckströmmar är $I_{\Delta} = 0$. När exempelvis ett jordfel inträffar och $I_{\Delta} \neq 0$, detekteras detta av jordfelsbrytaren som slår ifrån utrustningen eller installationen inom en förutbestämd tid (normalt 40 ms).



Figur 10 Schematisk bild av funktionen hos typisk jordfelsbrytare [21]

Jordfelsbrytarna kännetecknas av deras nominella summaström, $I_{\Delta n}$, deras utlösningstid och deras typ. Typen definierar egenskaperna hos den summaström för vilken utlösning av jordfelsbrytaren säkerställs, och för vilken summaström jordfelsbrytaren säkerställs vara immun. Det finns olika typer tillgängliga på marknaden. Typ AC är specificerad för drift vid 50/60 Hz och typ A 50/60 Hz och 6 mA glättad likström [IEC 61008-1]. Typ F och B är specificerade för drift upp till 1 kHz och för 10 mA pulserande likström [IEC 62423].

Jordfelsbrytarens funktion har studerats utifrån två kriterier:

- Jordfelsbrytare måste lösa ut vid fel. Underlåtenhet att göra detta resulterar i en risk för personer som kommer i kontakt med elektrisk utrustning i anläggningen.
- Jordfelsbrytare måste vara immun mot läckströmmar under normal drift. Underlåtenhet att göra det leder till falskutlösning av jordfelsbrytaren och efterföljande avbrott i elförsörjningen.

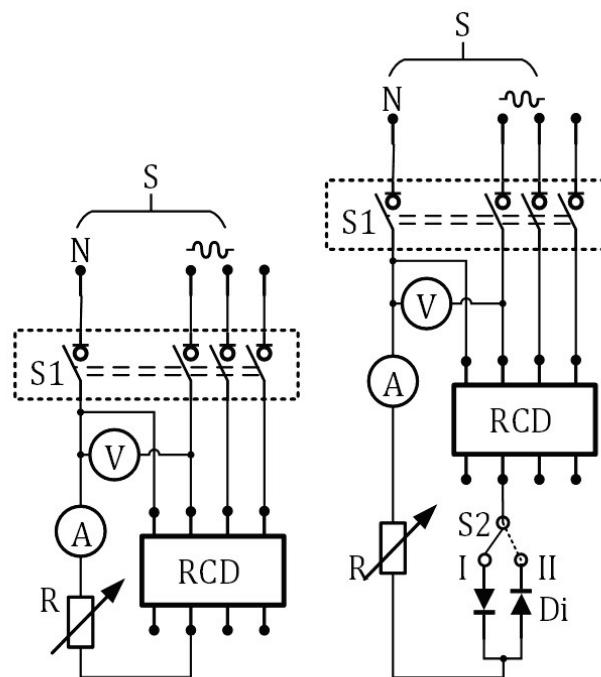
Ett experiment har utformats för att studera hur dc, kvasi-dc, övertoner och supratoner påverkar driften av jordfelsbrytare. Fjorton jordfelsbrytare som är vanligt förekommande på den europeiska marknaden, från olika tillverkare och typer har testats (Tabell 1). Utlösningsströmmen, $I_{\Delta-trip}$, vilket är värdet på summaströmmen I_{Δ} som får en jordfelsbrytare att lösa ut (uttryckt som rms-värde) har studerats. Först har $I_{\Delta-trip}$ karakteriserats för två basfall då summaströmmen bestått av endast en 50 Hz komponent (sinusformad ström och halvvågslikriktad ström). Resultaten för dessa två basfall redovisas i Tabell 6. Ett antal testströmmar

har sedan utvecklats bestående av 50 Hz tillsammans med kvasi-dc (upp till 4 Hz), övertoner och supratoner. Jordfelsbrytarna har utsatts för dessa testströmmar och $I_{\Delta-trip}$ har jämförts mot basfallet för att bedöma om och hur jordfelsbrytaren påverkats.

Tabell 4 Jordfelsbrytare som ingått i studien

Jordfelsbrytare	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$I_{\Delta n}$ (mA)	30					300					30		300	30
Typ	A							AC	B		A		B	F

Testerna utförs i enlighet med [22] och [23] genom uppkopplingen som visas i Figur 5. Med hjälp av det variabla motståndet ökas summaströmmen (I_{Δ}) från ett värde som inte är högre än 0,2 gånger märksummaströmmen ($I_{\Delta n}$) tills jordfelsbrytaren löser ut. $I_{\Delta-trip}$ (rms) mäts med en Fluke amperemeter. Uppkopplingen gör det möjligt att testa I_{Δ} upp till cirka 500 mA.



Figur 11 Experimentell uppkoppling för sinusformad ström (vänster) och halvvågslikriktad ström (höger).

Enligt standarder [22, 23] måste jordfelsbrytaren lösa för $I_{\Delta-trip}$ mellan $0,5I_{\Delta n}$ och $I_{\Delta n}$. Två villkor har använts i denna studie:

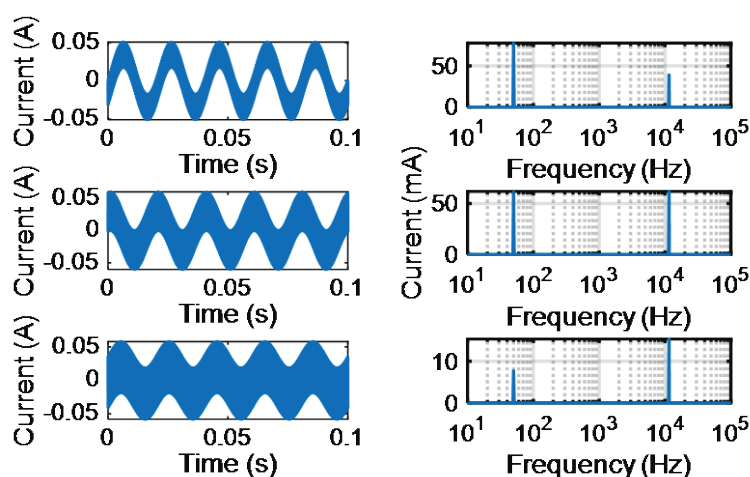
- $I_{\Delta-trip} < 0,5I_{\Delta n}$, falskutlösning
- $I_{\Delta-trip} > I_{\Delta n}$, miss att detektera fel

Samtliga tester har upprepats fem gånger och medelvärdet av de försöken har använts i resultaten. Total avvikelse visas i kolumn tre (sinus) och fem (halvvågsl riktnad) i Tabell 6.

Tabell 5 $I_{\Delta\text{-trip}}$ för basfallet för samtliga jordfelsbrytare

RCD	Sinusoidal		Half-wave pulsating	
	Avg (mA)	Tol +/- (mA)	Avg II (mA)	Tol I +/- (mA)
1	19.9	1	16.4	1
2	20.3	1	22.0	1
3	20.9	2	22.8	1
4	19.9	1	17.9	1
5	19.6	1	17.7	1
6	199.7	3	192.0	1
7	201.4	4	195.0	1
8	218.2	10	No trip	NA
9	225.9	7	No trip	NA
10	240.1	4	215.1	1
11	20.2	1	22.2	1
12	20.7	1	21.0	1
13	229.5	4	157.2	1
14	19,6	1		

Ett antal olika testströmmar har definierats där olika frekvenskomponenter och magnituder har överlagrats på en summastöm vid 50 Hz. Strömmen $I_{\Delta\text{-trip}}$ när jordfelsbrytaren löst ut har detekterats och jämförts mot $I_{\Delta\text{-trip_base}}$. Figur 6 visar ett exempel på testströmmar i tidsdomän (vänster) och frekvensdomän (höger). Om inte annat anges så är det endast 50 Hz komponentens magnitud som använts för att utvärdera prestandan hos jordfelsbrytaren.



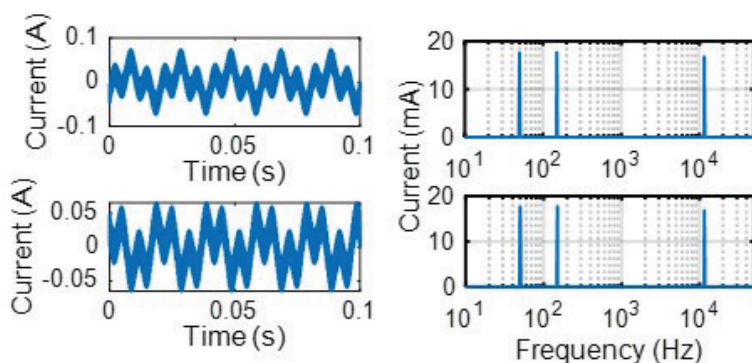
Figur 12 Testströmmar 50 Hz med överlagrade supratoner. Uppifrån: supratoner 50 %, 100 % och 200 % av 50 Hz komponentens magnitud.

Test 1, 34.5 kHz med en magnitud på 80 % av summaströmmens 50 Hz komponent.

För samtliga jordfelsbrytare gäller att totala magnituden av $I_{\Delta-trip} > I_{\Delta-trip_base}$ med minst 31 % för denna testström. Om hänsyn tas för endast 50 Hz komponenten i testströmmen så $I_{\Delta-trip} > I_{\Delta-trip_base}$ för 10 av 13 jordfelsbrytare. Det krävs alltså en 50 Hz ström med högre magnitud för att jordfelsbrytaren ska lösa ut om summaströmmen också innehåller en frekvenskomponent på 34,5 kHz. Notera att $I_{\Delta-trip} < I_{\Delta n}$ ändå uppfylldes för samtliga jordfelsbrytare.

Test 2, 11.5 kHz samt 150 Hz (0° or 180° fasvinkel) med en magnitud på 100 % av summaströmmens 50 Hz komponent.

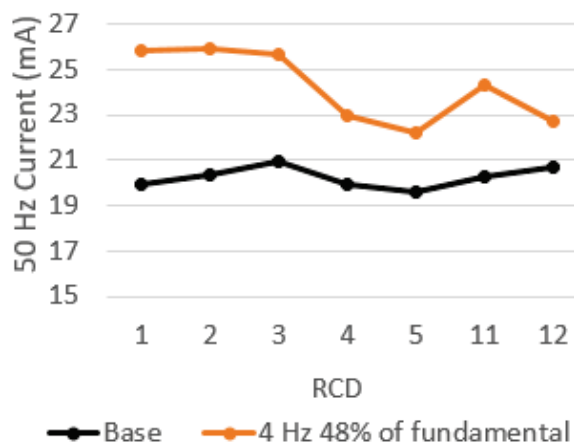
För samtliga jordfelsbrytare gav denna testström (150 Hz, fasvinkel 0°) att jordfelsbrytaren löser ut för en 50 Hz ström med lägre magnitud jämfört $I_{\Delta-trip_base}$. För fem av jordfelsbrytarna understeg värdet $I_{\Delta-trip} < 0,5I_{\Delta n}$ vilket uppfyller villkoret för falskutlösning, notera dock att samtliga jordfelsbrytare uppfyllde $I_{\Delta-trip} < I_{\Delta n}$. Resultaten för 150 Hz, fasvinkel 180° kan inte generaliseras utan varierar beroende på jordfelsbrytare. Dessa resultat kan förklaras med det faktum att en 150 Hz komponent med fasvinkel 180° ger en kurvform med högre toppvärde jämfört med fasvinkel 0° vilket ses i Figur 8.



Figur 13 Testström Test 2. 150 Hz komponentens fasvinkel 180° (övre) och fasvinkel 0° (nedre)

Test 3, 4 Hz med en magnitud på 48 % av summaströmmens 50 Hz komponent.

För jordfelsbrytare med märkström 30 mA (typ A) krävdes en högre summaström (vid 50 Hz) för att jordfelsbrytaren skulle lösa ut när summaströmmen också innehöll en 4 Hz komponent. Jordfelsbrytare av typ A med märkström 300 mA visade en liknande trend medan för typ AC och typ B krävdes en lägre magnitud av summaströmmen (50 Hz). Detta var förväntat då dessa typer är designade att också detektera likström. Samtliga jordfelsbrytare uppfyllde $I_{\Delta-trip} < I_{\Delta n}$.



Figur 14 $I_{\Delta-trip_base}$ och 50 Hz komponenten av $I_{\Delta-trip}$ för fallet med en 4 Hz komponent överlagrad på summaströmmen.

Avvikelse från basfallet för de tre första testerna redovisas i Tabell 7. Exempelvis krävdes en 7,5 % högre 50 Hz ström för jordfelsbrytare 1 under Test 1 jämfört basfallet medan för Test 2 (0°) var strömmen 9,7 % lägre. Jordfelsbrytare nummer 14 tillkom under projektets gång och fanns inte med under dessa experiment.

Tabell 6 Sammanställning Test 1, Test 2 och Test 3

Jordfelsbrytare	Avvikelse från basfall (procentuell skillnad)			
	Test 1	Test 2 (0°, 180°)		Test 3
1	7,5	-9,7	16,6	29,6
2	9,0	-23,8	-12,0	27,3
3	13,7	-27,0	-8,6	22,6
4	7,1	-34,6	-26,0	15,4
5	2,7	-32,4	-23,9	13,3
6	7,4	-31,1	-22,9	23,2
7	5,5	-32,3	-24,2	23,0
8	4,4	-27,3	-43,5	-24,7
9	3,6	-28,9	-44,6	-24,9
10	7,5	-19,8	-29,9	-8,9
11	3,7	-14,7	10,8	20,2
12	8,5	-21,3	-2,0	9,7
13	2,4	-37,5	-28,6	-23,2

Test 4, Halvvågslikriktad summaström 50 Hz med 11,5 kHz med en magnitud på 137 % av summaströmmens 50 Hz komponent

Jordfelsbrytare av typ AC löste inte ut under detta test. Denna typ av jordfelsbrytare löser inte heller ut för en summaström bestående av endast en halvvågslikriktad 50 Hz ström (se Tabell 7). Någon slutsats av supratoners

påverkan kan därför inte dras. För övriga jordfelsbrytare syntes ingen effekt av den överlagrade 11,5 kHz komponenten.

Test 5, likström

För detta test har jordfelsbrytaren utsatts för en likströmskomponent överlagrat 50 Hz. Likströmskomponentens magnitud har ökats i steg om 10 mA för varje experiment och magnituden på den 50 Hz summaström som behövs för att jordfelsbrytaren ska lösa ut har noterats. I detta test anses jordfelsbrytaren blockerad när villkoret $I_{\Delta\text{-trip}} \geq I_{\Delta n}$ är uppfyllt. Resultaten visas i Tabell 7 och som förväntat så klarar jordfelsbrytare av typ B att summaströmmen innehåller en likströmskomponent utan att blockeras. För jordfelsbrytare typ A krävdes en likströmskomponent med magnitud mellan 50 mA och 160 mA (märkström 30 mA) och mellan 140 mA och 150 mA (märkström 300 mA). Typ AC blockerades vid 140 mA och typ F vid 215 mA. Detta ska jämföras med den tillåtna magnituden på 6 mA likström (för typ A och AC) och 10 mA (för typ B och F). Samtliga jordfelsbrytare klarade alltså kraven med god marginal.

Tabell 7

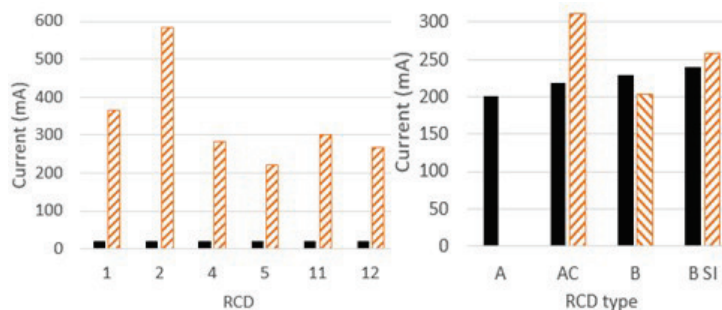
Jordfelsbrytare	Typ	likström (mA) som uppfyller $I_{\Delta\text{-trip}} \geq I_{\Delta n}$
1	A, 30 mA	100
2	A, 30 mA	160
3	A, 30 mA	Ej uppfyllt
4	A, 30 mA	80
5	A, 30 mA	80
6	A, 300 mA	740
7	A, 300 mA	750
8	AC, 300 mA	140
9	AC, 300 mA	140
10	B, 300 mA	Ej uppfyllt
11	A, 30 mA	50
12	A, 30 mA	60
13	B, 300 mA	Ej uppfyllt
14	F, 30 mA	215

Test 6, Summaström med frekvens≠50 Hz

Ett antal tester genomfördes där summaströmmen inte innehöll någon 50 Hz komponent.

- 150 Hz, $I_{\Delta\text{-trip}} \geq I_{\Delta n}$ för alla testade jordfelsbrytare utom nummer 7 och nummer 10 som löste för en summaström strax över 300 mA.
- 11,5 kHz (test utfört på jordfelsbrytare 1 till 5, samtliga 30 mA), en summaström på 102 mA lades på utan att jordfelsbrytarna löste ut.
- 2 kHz (jordfelsbrytare 7 och 8, båda 300 mA), en summaström på 400 mA lades på utan att jordfelsbrytarna löste ut.

- 4 Hz, för jordfelsbrytare typ A med märkstöm 30 mA gäller $I_{\Delta\text{-trip}} \gg I_{\Delta n}$ vilket ses i Figur 9. De två jordfelsbrytarna av typ A med märkström 300 mA löste inte ut för en summaström bestående av 4 Hz.



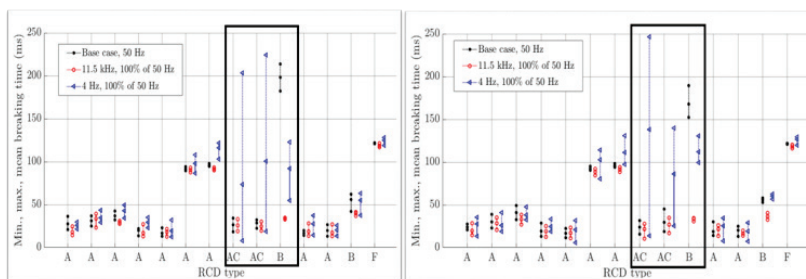
Figur 15 Utlösningsström för 50 Hz (svart) och för 4 Hz (streckad) för 30 mA jordfelsbrytare (vänster) och 300 mA (höger)

Test 7, utlösningstid

Tester har utförts för att utröna om utlösningstiden för en jordfelsbrytare påverkas av att summaströmmen består av ytterligare frekvenskomponenter. Tre testströmmar testades; ett basfall med endast 50 Hz, ett fall med 11,5 kHz överlagrad och ett fall med 4 Hz. I de båda senare fallen hade den pålagda frekvensen samma magnitud som 50 Hz komponenten. Två olika försök har gjorts:

- Plötslig uppkomst av en jordfelsström. Denna test utförs genom att brytare S1 i Figur 6 sluts.
- Förmåga att lösa ut under pågående fel.

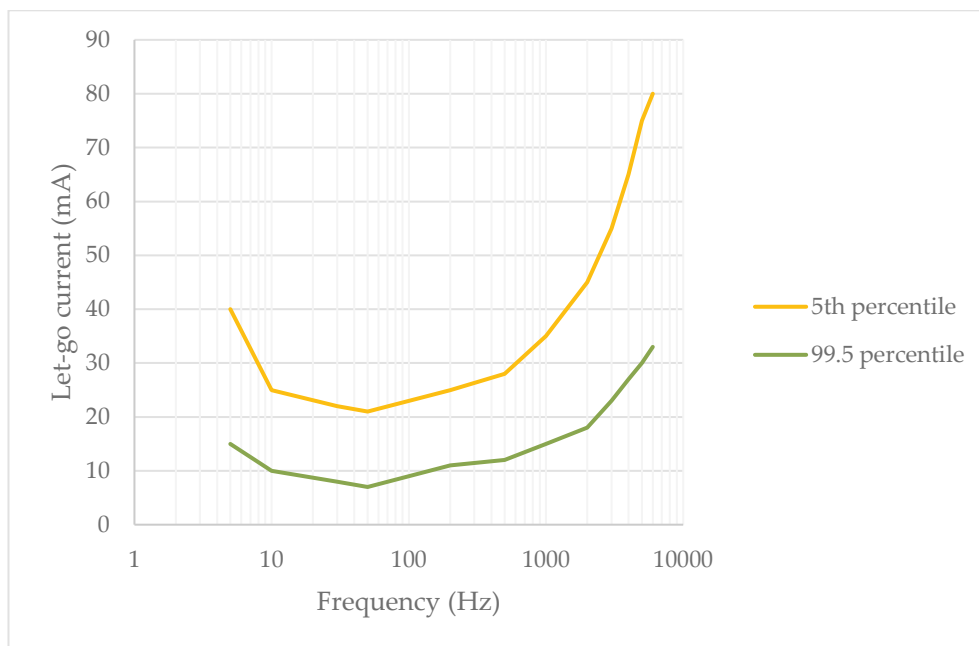
Resultaten visar att när summaströmmen innehåller en 4 Hz komponent så påverkas tre av jordfelsbrytarna (en typ B, två typ AC) och utlösningstiden varierar kraftigt (mellan 10 ms och 200 ms i ett fall). Anledningen till denna stora variation skulle kunna vara det faktum att toppvärdet på den resulterande summaströmmen kommer att variera med 4 Hz och utlösningstiden blir kortare ju närmare summaströmmens toppvärde tillslaget sker. De signifikant snabbare svängningarna hos 11,5 kHz komponenten får inte samma påverkan. Detta resultat indikerar att vissa jordfelsbrytare är känsliga för summaströmmens toppvärde och kurvformen blir en bidragande faktor.



Figur 16 Resultat för tester av utlösningstid, uppkomst av jordfel (vänster) och förmåga att lösa ut under pågående fel (höger).

7 Påverkan på människan

Tröskelvärde för om en människa förnimmer ström (50 Hz) ligger vid ca. 0,7 mA (då det finns ett beroende på kroppsstorlek så är denna nivå generellt något högre för män). Obehag eller smärtförnimmelse inträffar för en strömstyrka på ca. 4,5 mA och vid en magnitud strax över 6 mA börjar man få svårt att själv släppa taget om det strömförande föremålet då musklerna krampar. Hur farlig en ström är har också ett frekvensberoende, där de farligaste frekvenserna ligger mellan ca. 30 Hz och 150 Hz. När frekvensen ökar så krävs en högre magnitud för att påverka människan. Två studier presenterar en serie kurvor baserade på frisläppningsströmmen vid olika frekvenser [24, 25]. I Figur 17 redovisas femte och 99,5 percentilen, dvs. den övre kurvan visar nivån där endast 5 % av testgruppen kunde släppa det strömförande föremålet. Denna studie utfördes endast på män varför det verkliga värdet får anses något lägre. Om denna kurva extrapoleras till 11,5 kHz så fås en frisläppningsström vid cirka 100 mA vilket är något lägre än den summaström som testades och inte detekterades av jordfelsbrytare typ A (Test 6). Dalziel et. al [24] beskriver att för frekvenser på 10 kHz och högre är smärtan på grund av muskelsammandragningar mindre; i stället rapporteras obehagliga känslor av intern uppvärmning vilket gör musklernas aktivitet mer trög. En liknande effekt på människokroppen ses också för frisläppningsström vid likström



Figur 17 Experimentellt framtagen frisläppningsström [25]

8 Slutsatser

Utbredningen av likström som härrör från solcellsinstallationer i lågspänningsnät har studerades i detta arbete. Likströmmar som uppstår under normal drift har mycket låg magnitud och att denna likström ska spridas till andra anläggningar i samma lågspänningsnät får anses osannolikt då transformatorn kommer att erbjuda den lägsta resistansen i kretsen. Likströmmar som uppstår vid ett fel på likströmssidan av växelriktaren kan sprida sig till andra kunder under tillslagsögonblicket. Denna tid är mycket kort (ca 1 ms) men det är teoretiskt möjligt att en angränsande jordfelsbrytare påverkas under denna tid. För att en potentiellt farlig situation ska uppstå krävs att ett fel uppstår exakt samtidigt i två angränsande anläggningar och att den likströmskomponent som flyter till angränsande anläggning är av tillräcklig magnitud för att blockera jordfelsbrytaren. Sannolikheten att detta ska inträffa måste bedömas som låg.

Att läckströmmar uppstår vid högre frekvenser är mycket sannolikt och dessa strömmar propagerar till angränsande anläggningar i högre utsträckning genom de kapacitiva kopplingar som finns mot jord. Magnituden av dessa läckströmmar är i de flesta fall låg (tio-tals mA) men det kan inte uteslutas att situationer kan uppstå då den blir signifikant. Resultaten visar att inga falskutlösningar uppstår då summaströmmen består av endast supratoner vilket också betyder att de inte detekterar dem även om de skulle uppnå nivåer som potentiellt kan påverka en människa som rör i strömförande utrustning.

Kurvformen ses ha en betydelse för jordfelsbrytarens funktionalitet. Detta visas genom att en på summaströmmen överlagrad 150 Hz komponent med fasvinkel 180° ger ett annat resultat jämfört med fasvinkel 0° även om magnituden hålls konstant.

Jordfelsbrytare vanligt förekommande på marknaden har testats och en påverkan ses när summaströmmen innehåller likström, kvasi-likström, övertoner och supratoner. Viktigt att notera är att även om en påverkan ses så är denna påverkan inte av den grad att funktionaliteten av jordfelsbrytarna äventyras. Det har noterats fall då jordfelsbrytaren inte löser ut (summaström bestående av 4 Hz eller 150 Hz), dessa jordfelsbrytare är dock endast specificerade för 50/60 Hz och glättad likström.

9 Referenser

- [1] Kumar, K. Ajith, and Jim Eichner. "Guidance on proper residual current device selection for solar inverters." Available at: <http://www.technosun.com/es/descargas/SCHNEIDER-CONEXT-notacorriente-residual-EN.pdf> (accessed 29 November 2016) (2013).
- [2] University of Strathclyde: "DC Injection into Low Voltage AC Networks," DTI, UK, 2005.
- [3] M. Calais et al., "Transformerless PV inverters – Recent Test Results and a Discussion of DC Current Injection and Safety Issues," Solar2010, the 48th AuSES Annual Conference, Canberra, , Australia, 2010
- [4] V. Salasa et al., "DC current injection into the network from PV inverters of <5 kW for lowvoltage small grid-connected PV systems," Solar Energy Materials & Solar Cells 91 (2007), Elsevier
- [5] J. P. Karunadasa and H. M. A. I. Herath, "Load Injected DC Current in Distribution Transformers: Investigation and Elimination," Eng. J. Inst. Eng. Sri Lanka, vol. 51, no. 4, p. 15, Dec. 2018, doi: 10.4038/engineer.v51i4.7310.
- [6] A. Abdelhakim, P. Mattavelli, D. Yang, and F. Blaabjerg, "Coupled-Inductor-Based DC Current Measurement Technique for Transformerless Grid-Tied Inverters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no. 1, pp. 18–23, Jan. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2712197.
- [7] Q. Yan, X. Wu, X. Yuan, Y. Geng, and Q. Zhang, "Minimization of the DC component in transformerless three-phase grid-connected photovoltaic inverters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 7, pp. 3984–3997, Jul. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2350485.
- [8] M. Chen, D. Xu, T. Zhang, K. Shi, G. He, and K. Rajashekara, "A Novel DC Current Injection Suppression Method for Three-Phase Grid-Connected Inverter Without the Isolation Transformer," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 11, pp. 8656–8666, Nov. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2808916
- [9] D. E. Collier and T. S. Key, "Electrical fault protection for a large photovoltaic power plant inverter," in Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1988, vol. 2, pp. 1035–1042, doi: 10.1109/pvsc.1988.105863.
- [10] G. Ball et al., "Inverter Ground-Fault Detection " 'Blind Spot' and Mitigation Methods Solar America Board for Codes and Standards," 2013. Accessed: Feb. 08, 2021. [Online]. Available: www.solarabcs.org.
- [11] Flicker, J. D., Johnson, J., & Armijo, K. M. (2014). Recommendations for rcd ground fault detector trip thresholds (No. SAND2014-17754C). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- [12] J. Meyer, R. Stiegler, P. Schegner, I. Röder, and A. Belger, "Harmonic resonances in residential low-voltage networks caused by consumer

- electronics,” in CIREN - Open Access Proceedings Journal, Oct. 2017, vol. 2017, no. 1, pp. 672–676, doi: 10.1049/oap-cired.2017.0460
- [13] S. K. Rönnberg, et al, (2017). "On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz–150 kHz—Review and research challenges." *Electric Power Systems Research*, 150, 1-10
 - [14] A. Testa and R. Langella, "Power system subharmonics," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005, 2005, pp. 2237-2242 Vol. 3, doi: 10.1109/PES.2005.1489461.
 - [15] V. Ravindran, T. Busatto, S. Rönnberg, J. Meyer, and M. Bollen, 'Time-varying interharmonics in different types of grid-tied PV inverter systems', *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019.
 - [16] J. Sutaria, S. Rönnberg, "High frequency interaction of power electronic converters in AC and DC powered data centers" 26th international conference on electricity distribution Cired, 2021
 - [17] S. Sakar, S. Rönnberg, & M. Bollen, (2020). Interharmonic Emission in AC-DC Converters Exposed to non-synchronized High Frequency Voltage above 2 kHz. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
 - [18] Blanco A. M., Möller F., Meyer J., and Schegner P.: 'Characterization of the leakage currents produced by household electronic devices,' *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, July 2020, pp 1-6.
 - [19] Sutaria J., Main Uddin Ahmed, K., Rönnberg, S., and Bollen, M. H. J.: 'Propagation of Supraharmonics through EMI Filters with Varying Loads,' *IEEE Cigré Conf. proceedings, NORPIE*, 2019
 - [20] S. A. Solar Technology, "Technical Information - Leading Leakage Currents, Version 2.6. Accessed: Aug. 12, 2021. [Online]. Available: <https://files.sma.de/downloads/Ableitstrom-TI-en-26.pdf>
 - [21] A. Espin-Delgado, J. Sutaria, S. Rönnberg, N. Nakhodchi, M. Bollen, Impact of Supraharmonics and quasi-dc on the operation of residual current devices. *Proc. 26th international conference on electricity distribution Cired*, 2021
 - [22] IEC 61008-1: 'Residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection for household and similar uses (RCCBs) - Part 1: General rules,' 2010.
 - [23] IEC 62423: 'Type F and type B residual current operated circuit-breakers with and without integral overcurrent protection for household and similar uses,' 2009.
 - [24] Dalziel, C. F., Lagen, J. B., and Thurston, J. L.: 'Electric shock,' *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, 1941, 60, (12), pp. 1073–1079.
 - [25] Dalziel, C. F., Ogden, E., and Abbott, C. E.: 'Effect of Frequency on Let-Go Currents,' *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, 1943, 62, (12), pp. 745–750

Sökord

Falskutlösningar

Jordfelsbrytare

Kvasi-likström

Likström

Läckströmmar

Supratoner

Vågformsdistorsion

Växelriktare

Övertoner

JORDFELSBRYTARE OCH KOMPONENTER FRÅN DC TILL 150 KHZ – EN RISKBEDÖMNING

Det är osannolikt att likströmmar från solcellsinstallationer i lågspänningsnät sprids till andra anläggningar tack vare transformatorns funktion i kretsen. Likströmmar som uppstår vid fel på likströmssidan av växelriktaren kan spridas till andra under tillslagsögonblicket. En farlig situation kan uppstå om ett fel uppstår exakt samtidigt i två angränsande anläggningar och att den likströmskomponent som flyter till angränsande anläggning är av tillräcklig magnitud för att blockera jordfelsbrytaren. Sannolikheten för detta bedöms som låg.

Det är sannolikt att läckströmmar uppstår vid högre frekvenser och att de kan spridas till angränsande anläggningar. Resultaten visar att inga falskutlösningar uppstår då summaströmmen består av endast supratoner. En påverkan på jordfelsbrytare ses när summaströmmen innehåller likström, kvasilikström, övertoner och supratoner. Den påverkan är dock inte av den grad att funktionaliteten av jordfelsbrytarna äventyras. Det har noterats fall då jordfelsbrytaren inte löser ut, de jordfelsbrytarna är dock endast specificerade för 50/60 Hz och glättad likström.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk