

LEK- EN ZWERFSTROMEN

Onderzoek lek- en zwerfstromen door windturbines, zonneparken en batterij-opslagsystemen

Windpark de Plaet B.V.

Rapport nr.: 26-0983, Rev. 0

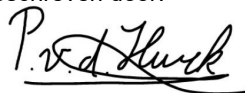
Datum: 15 juni 2026



Projectnaam: Lek- en zwerfstromen Energy Systems
 Rapport titel: Onderzoek lek- en zwerfstromen door windturbines, zon- DNV Netherlands B.V.
 neparken en batterijopslagsystemen Utrechtseweg 310-B50
 Klant: Windpark de Plaet B.V., 6812 AR Arnhem
 Postbus 78, 3240 AB Middelharnis
 Contactpersoon klant: Andries Middelbos en David Mol Tel: 026 356 9111
 Datum uitgave: 15 juni 2026 Handelsregister Arnhem 09006404
 Project nr.: 10590970
 Organisatie unit: Power System Planning
 Rapport nr.: 26-0983, rev. 0

Doelstelling: Onderzoek of lek- en zwerfstromen van windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen invloed kunnen hebben op landbouwdieren en huisdieren.

Geschreven door:



Peter van den Hurk
Senior engineer

Beeoordeeld door:



Leo Lagendijk
Principal consultant

Goedgekeurd door:



Angeliki Papadopoulou
Team lead

Gustav Krüger
Senior engineer

Deeksha Venkatesh
Engineer

Copyright © DNV 2026. All rights reserved. Unless otherwise agreed in writing: (i) This publication or parts thereof may not be copied, reproduced or transmitted in any form, or by any means, whether digitally or otherwise; (ii) The content of this publication shall be kept confidential by the customer; (iii) No third party may rely on its contents; and (iv) DNV undertakes no duty of care toward any third party. Reference to part of this publication which may lead to misinterpretation is prohibited.

DNV Distributie:

- ☒ Open
☐ Restricted
☐ Confidential
☐ Secret

*Specificatie distributie: --

Trefwoorden:

Zwerfstromen, lekstromen, windturbines, zonneparken, batterijopslagsystemen, effect op landbouwdieren en huisdieren

Rev.	Datum	Reden van uitgave	Auteur	Beeoordeeld	Goedgekeurd
0	15-06-2026	Eerste uitgave	P. van den Hurk	L. Lagendijk	A. Papadopoulou



DISCLAIMER

Independence, impartiality, and advisory limitations

This document contains content provided by DNV. Please note the following:

Ethical safeguards

To maintain integrity and impartiality essential to its third-party roles, DNV performs initial conflict-of-interest assessments before engaging in advisory services.

Priority of roles

This report is generated by DNV in its advisory capacity, subsequent to conflict-of-interest assessments. It is separate from DNV's responsibilities as a third-party assurance provider. Where overlap exists, assurance activities conducted by DNV will be independent and take precedence over the advisory services rendered.

Future assurance limitation

The content in this document will not obligate or influence DNV's independent and impartial judgment in any future third party assurance activities with DNV.

Compliance review

DNV's compliance with ethical and industry standards in the separation of DNV's roles is subject to periodic external reviews.

Inhoudsopgave

PUBLIC SUMMARY	1
PUBLIEKSSAMENVATTING	1
SUMMARY	2
SAMENVATTING	3
1 INLEIDING	4
1.1 Vraagstelling	4
1.2 Wat komt er in dit rapport aan bod?	4
2 ELEKTRISCHE ZWERFSTROMEN	6
2.1 Inleiding	6
2.2 Bekende risico's van lekstromen	6
2.3 Zwerfstromen door windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen	7
2.4 Lekstroom van een industriële omvormer	8
2.5 Het gedrag van lekstromen in de grond	9
2.6 EMC-normen over zwerfstromen in industriële apparatuur	9
3 ZWERFSPANNING EN VEE	12
3.1 Verkort literatuuronderzoek	12
3.2 Meetmethoden en diagnostisch kader	14
3.3 Bliksem, transiënten en bescherming van windturbines	15
3.4 Aardingsfilosofie van Nederlandse windparken op land	15
3.5 Aardingsnormen en veiligheidscriteria	16
3.6 Korte samenvatting	16
4 RESULTATEN PARAMETERSTUDIE	17
4.1 Inleiding	17
4.2 Beschrijving van het model	17
4.3 Resultaten van de simulaties	18
4.4 Conclusies parameterstudie	23
5 CONCLUSIES	24
Appendix A Wind farms and stray currents	

PUBLIC SUMMARY

Stray currents and leakage currents are electrical currents that dissipate into the ground.

Wind turbines, solar parks, and battery energy storage systems do not produce detectable stray currents for livestock at distances of a few meters. Problems with stray currents on agricultural farms are almost always the result of issues within the farm's own electrical installation.

Simulations and theoretical analysis show that the effects of stray currents decrease very rapidly with increasing distance from the source. Even under unfavourable soil conditions, the effects of stray currents are no longer noticeable for livestock within a few meters of the system.

Taking into account the variation in soil conditions in the Netherlands, as well as the design and safety requirements of wind turbines, solar parks, and battery energy storage systems, and considering possible fault scenarios, it can be concluded that these types of systems do not generate stray currents of any significance.

PUBLIEKSSAMENVATTING

Zwerfstromen en lekstromen zijn elektrische stromen die via de bodem wegvloeien.

Windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen veroorzaken op enkele meters afstand geen waarneembare zwerfstromen voor landbouwdieren. Problemen met zwerfstromen op agrarische bedrijven zijn vrijwel altijd het gevolg van tekortkomingen in de elektrische installatie van het bedrijf zelf.

Uit simulaties en theoretische beschouwingen blijkt dat de effecten van zwerfstromen zeer snel afnemen naarmate de afstand tot de bron groter wordt. Zelfs onder ongunstige bodemcondities zijn de effecten binnen enkele meters van het systeem niet meer merkbaar voor landbouwdieren.

Rekening houdend met de variatie in bodemgesteldheid in Nederland, het ontwerp en de veiligheidseisen van windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen, evenals mogelijke foutscenario's, kan worden geconcludeerd dat deze systemen geen zwerfstromen van betekenis opwekken.

SUMMARY

Based on an analysis of Dutch soil conditions, the design and safety requirements for wind turbines, solar parks, and battery energy storage systems, typical fault scenarios, and electrical protection systems, it can be concluded that these installations do not generate stray currents that can be detected by livestock at a distance.

1. Causes of stray currents

Stray currents that may affect livestock arise only when 50 Hz grid current follows unintended paths. Relevant causes include:

- persistent earth faults that are not disconnected by protection systems
- incorrect or defective grounding or equipotential bonding on the agricultural site
- unintended metallic connections that couple undesired current paths to farm infrastructure.

These causes are local in nature and unrelated to the presence of wind turbines, solar parks or battery energy storage systems.

2. Characteristics of wind turbines, solar parks, battery energy storage systems and cable systems

By design, wind turbines, solar parks, and battery energy storage systems do not produce 50 Hz stray currents in the public electricity network. In collection systems with long cable routes, circulating sheath currents of several tens of amperes may theoretically occur if cables are poorly installed. However, these currents remain entirely within the metallic cable system, because the cable sheaths are electrically insulated from the soil. As a result, such currents cannot lead to stray currents in the ground.

Wind turbines, solar parks, and battery energy storage systems can generate high-frequency leakage currents, but these

- are not injected into the soil,
- do not propagate over long distances, and
- return via cable sheaths and the equipotential grounding system.

These high-frequency components are electrically irrelevant to stray voltage issues affecting livestock.

3. Relevant mechanisms on agricultural sites

Mechanisms that may lead to perceptible stray voltages for livestock are exclusively those that cause persistent 50 Hz current in unintended paths. Typical examples are:

- ongoing earth faults on the farm
- damaged or incorrectly installed equipotential bonding
- unintended metallic couplings between farm infrastructure and cable systems.

These mechanisms are installation-specific and not related to the energy generation source (wind turbines, solar parks, battery energy storage systems or other facilities).

4. Simulation results

Simulations show that:

- Step voltages resulting from the maximum allowable stray currents in Dutch soils decrease to levels not detectable by livestock within a few meters, even under unfavorable soil conditions.
- At distances of 50 meters or more, a wind turbine, solar park or battery energy storage system has no practically measurable influence on livestock, even in the event of a fault.

5. Conclusion

Wind turbines, solar parks, and battery energy storage systems do not constitute a general source of stray currents. Any stray voltage issues affecting livestock are almost always the result of local installation problems, such as earth faults, inadequate bonding, or defects within the agricultural operation itself. The influence of wind turbines, solar parks and battery energy storage systems on livestock at a distance of more than a few meters can, both theoretically and practically, be ruled out.

SAMENVATTING

Op basis van analyse van bodemgesteldheid in Nederland, ontwerp- en veiligheidseisen van windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen, typische foutscenario's en elektrische beveiligingssystemen, kan worden geconcludeerd dat windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen geen zwervstromen opwekken die op afstand waarneembaar zijn voor landbouwdieren.

1. Oorzaken van zwervstromen

Zwervstromen die effect kunnen hebben op vee ontstaan uitsluitend wanneer 50 Hz-netstroom ongewenste paden volgt. Relevante oorzaken kunnen zijn:

- blijvende aardfouten die niet worden afgeschakeld door beveiligingen
- onjuiste of defecte aarding of potentiaalvereffening op het agrarische bedrijf
- onbedoelde metalen verbindingen die ongewenste stroompaden koppelen aan bedrijfsinfrastructuur.

Deze oorzaken zijn lokaal en staan los van de aanwezigheid van windturbines, zonneparken of batterijopslagsystemen.

2. Eigenschappen van windturbines, zonneparken, batterijopslagsystemen en kabelsystemen

Windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen veroorzaken op basis van hun ontwerp geen 50 Hz-zwervstromen in het openbare elektriciteitsnet. In verzamelsystemen met lange kabeltrajecten kunnen theoretisch circulerende mantelstromen van tientallen ampères ontstaan bij slecht geïnstalleerde kabels. Deze stromen blijven echter volledig binnen het metalen kabelsysteem, omdat kabelmantels elektrisch geïsoleerd zijn van de bodem. Daardoor kunnen deze stromen niet leiden tot zwervstromen in de grond.

Windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen kunnen wel hoogfrequente lekstromen genereren, maar deze:

- worden niet in de bodem geïnjecteerd,
- verspreiden zich niet over grote afstanden, en
- lopen terug via kabelmantels en het equipotentiaal-aardingssysteem.

Deze hoogfrequente componenten zijn elektrotechnisch irrelevant voor zwervspanningsproblematiek bij vee.

3. Relevante mechanismen op agrarische bedrijven

De mechanismen die wel kunnen leiden tot waarneembare zwervspanningen bij vee, zijn uitsluitend die welke aanhoudende 50 Hz-stromen veroorzaken in ongewenste paden. Typisch zijn dit:

- blijvende aardfouten op het bedrijf
- beschadigde of foutief aangelegde vereffening
- ongewenste metalen koppelingen tussen bedrijfsinfrastructuur en kabelsystemen.

Deze zijn installatie-specifiek en niet gerelateerd aan de opwekbron (windturbines, zonneparken, batterijopslagsystemen of andere voorzieningen).

4. Resultaten van simulaties

Simulaties laten zien dat:

- Stapspanningen die voortkomen uit de maximaal toelaatbare zwervstromen in Nederlandse bodems binnen enkele meters afnemen tot een niveau dat niet waarneembaar is voor landbouwdieren, zelfs onder ongunstige bodemcondities.
- Op afstanden van 50 meter of meer een windturbine geen praktisch meetbare invloed kan hebben op vee, ook niet in geval van een defect.

5. Conclusie

Windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen vormen geen algemene bron van zwervstromen. Eventuele zwervspanningsproblemen bij vee zijn vrijwel altijd het gevolg van lokale installatieproblemen, zoals aardfouten, inadequate vereffening of defecten in het agrarische bedrijf zelf. De invloed van windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen op landbouwdieren op afstanden van meer dan enkele meters is, zowel theoretisch als praktisch, uitgesloten.

1 INLEIDING

1.1 Vraagstelling

Windpark De Plaet B.V. (hierna: *De Plaet*) is een windpark met batterijcolocatie op Goeree-Overflakkee, nabij Ooltgensplaat. Het windpark is eigendom van Coöperatie Deltawind U.A. en Promill B.V. De Plaet heeft, net als andere coöperaties voor duurzame energie, het afgelopen jaar negatieve media-aandacht gekregen naar aanleiding van een claim van twee veehouders uit Ooltgensplaat. Zij stellen dat hun koeien en geiten hinder ondervinden door zwerfstromen afkomstig van nabijgelegen windturbines en een batterijopslagsysteem. Deze claim is weliswaar door DNV weerlegd in een onderzoek dat in opdracht van de Provincie Zuid-Holland is opgesteld.¹ Desondanks wordt het begrip *zwerfstromen* regelmatig in verband gebracht met de energietransitie.²

Zwerfstromen, ook wel *lekstromen* genoemd, kunnen in theorie gevolgen hebben voor het welzijn van landbouwdieren (en huisdieren). Door diverse oorzaken kunnen kleine spanningsverschillen ontstaan tussen metalen objecten, zoals hekwerken en drinkbakken, en de aarde. Zwerfstromen in stallen kunnen verschillende oorzaken hebben, zoals:

- *aardingsproblemen*: slechte of gebrekkige aarding van elektrische apparatuur kan ertoe leiden dat elektrische stroom ongecontroleerd door de metalen delen van de stal vloeit;
- *spanningsverschillen*: spanningsverschillen tussen metalen oppervlakken in de stal en de aarde kunnen zwerfstromen veroorzaken, met name wanneer er meerdere aardpunten zijn, die niet correct met elkaar zijn verbonden;
- *defecte apparatuur*: beschadigde isolatie van elektriciteitskabels, defecte onderdelen of losse verbindingen in apparatuur kunnen zorgen voor ongewenste spanningen en ongecontroleerde elektrische velden;
- *inductieve beïnvloeding*: via inductie door nabijgelegen hoogspanningslijnen kunnen in langwerpige metalen voorwerpen zwerfspanningen worden veroorzaakt.

Als dieren in aanraking komen met deze zwakke spanningen, gaat er door hun lichaam een stroom lopen, waardoor ze ongemak, stress of pijn kunnen ervaren. Dieren kunnen hierdoor terughoudend worden in het gebruik van drinkbakken, voerplaatsen of melkinstallaties. Dit kan leiden tot gedragsveranderingen en een afname in hun melkproductie.

Er is in Nederland en internationaal weinig kennis beschikbaar over de mate waarin zwerfstromen van windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen invloed kunnen hebben op landbouwdieren en huisdieren. In normale omstandigheden produceren windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen of andere elektrische installaties geen of slechts zeer geringe zwerfstromen. Echter, in bepaalde foutscenarië's kunnen zwerfstromen een niveau bereiken waarvan onbekend is of landbouwdieren of huisdieren hier gevoelig voor zijn.

De Plaet heeft DNV daarom gevraagd te onderzoeken in hoeverre landbouwdieren zwerfstromen kunnen waarnemen en vanaf welk niveau deze mogelijk schadelijk zijn.

1.2 Wat komt er in dit rapport aan bod?

In dit rapport komen de volgende onderwerpen aan bod:

- **Hoofdstuk 2** gaat in op het begrip *zwerfstromen*: wat ze zijn, waar ze kunnen ontstaan en welke risico's ermee verbonden zijn. Het hoofdstuk beschrijft de verschillende typen zwerfstromen, geeft voorbeelden uit onder andere elektrische installaties, infrastructuur en landbouw, gaat in op de rol van windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen, en legt uit hoe lekstromen zich gedragen in de grond en wanneer ze mogelijk een risico vormen.
- **Hoofdstuk 3** gaat in op de wetenschappelijke kennis over zwerfspanningen en de mogelijke effecten ervan op vee. Het hoofdstuk bespreekt hoe zwerfstromen in agrarische omgevingen ontstaan, welke biologische reacties bij dieren zijn onderzocht, en welke drempelwaarden daarbij relevant zijn. Ook wordt ingegaan op diagnostische methoden voor het meten van aanraakspanningen en lichaamsstromen, en op de technische oorzaken die in de praktijk

¹ Zie: <https://www.zuid-holland.nl/publish/besluitenattachments/conclusie-onderzoek-naar-zwerfstroom-ooltgensplaat/bijlage-b-memo-dnv-aan-prov-zuid-holland-31-1-2025.pdf>

² *Aanhangsel Handelingen II* 2025/26, nr. 1041. Zie: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/ah-tk-20252026-1041.pdf>.

het vaakst aan problemen ten grondslag liggen. Tot slot behandelt het hoofdstuk waarom windparken en bliksemverschijnselen technisch fundamenteel verschillen van aanhoudende 50 Hz-zwervstromen, en hoe moderne aardingssystemen zijn ontworpen om ongecontroleerde stroomspreiding te voorkomen.

- **Hoofdstuk 4** bespreekt de uitkomsten van een door DNV uitgevoerde parameterstudie naar het gedrag van stapspanningen en zwervstromen rond windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen wanneer ongewenste stroompaden ontstaan. De studie geeft inzicht in de factoren die deze verschijnselen versterken en in de mogelijke risico's die hieruit voortkomen. Op basis van de parameterstudie kan worden bepaald wat de invloed van een windturbine, zonnepark of batterijsysteem is en op welke afstand eventuele spanningen nog merkbaar zijn voor landbouwdieren (en in hoeverre deze onder de drempelwaarden blijven).
- **Hoofdstuk 5** geeft een korte conclusie van het onderzoek.

2 ELEKTRISCHE ZWERFSTROMEN

2.1 Inleiding

Elektrische zwerfstromen zijn elektrische stromen die optreden in de omgeving of in voorwerpen die daar niet voor bedoeld zijn. Er zijn twee hoofdtypen elektrische zwerfstromen te onderscheiden:

- *natuurlijke zwerfstromen*, veroorzaakt door natuurverschijnselen;
- *kunstmatige zwerfstromen*, afkomstig van elektrische installaties.

Natuurlijke zwerfstromen ontstaan bijvoorbeeld tijdens onweer en zonnewinden. Een blikseminslag geeft een sterke zwerfstroom rondom het object dat getroffen wordt. Als een mens of dier zich dicht bij het inslagpunt bevindt, kan een deel van deze stroom door het lichaam lopen, wat in het ergste geval elektrocutie tot gevolg kan hebben. Sterke zonnewinden kunnen verstoringen in het aardmagnetisch veld veroorzaken, waardoor elektrische stromen worden geïnduceerd in de aardkorst en in lange geleiders zoals elektriciteitsnetten. Deze stromen worden ook zwerfstromen genoemd. Deze hebben een zeer laag niveau en vormen daarom geen risico voor mensen of dieren.

Er zijn ook *kunstmatige zwerfstromen*, deze worden ook wel *lekstromen* genoemd. Lekstromen zijn elektrische stromen die buiten de normale kabels of leidingen lopen. Ze vinden hun weg via de grond, metalen structuren of andere onverwachte routes. Vaak zijn de lekstromen zo klein dat ze geen gevaar opleveren, maar in sommige gevallen kunnen ze storingen veroorzaken of apparaten laten uitschakelen via een aardlekschakelaar. Dit kan ook gebeuren als elektriciteit ergens 'weglekt' uit het systeem, bijvoorbeeld door beschadigde isolatie, slechte verbindingen of een systeem van slechte kwaliteit.

Bij bedrijven met een zware driefasenaansluiting, soms ook 'draaistroomaansluiting' genoemd, kunnen laagfrequente lekstromen (50 hertz) ontstaan wanneer er verbindingen zijn tussen nulgeleiders en het aardsysteem. Deze stromen lopen dan door het aardsysteem en kunnen bij onderbrekingen in dit aardsysteem leiden tot spanningsverschillen.

Daarnaast kunnen hogere frequenties optreden door het gebruik van omvormers, zoals die in batterijopslagsystemen en zonneparken worden gebruikt. Als een omvormer defect is, verkeerd is aangesloten of van slechte kwaliteit is, kunnen hierdoor ook lekstromen ontstaan met hogere frequenties dan 50 hertz. Wanneer meerdere omvormers samen op een netwerk achter een middenspanningstransformator zijn aangesloten, kunnen ze elkaar in een uitzonderlijk geval beïnvloeden en ongewenste lekstromen veroorzaken.

2.2 Bekende risico's van lekstromen

Lek- of zwerfstromen kunnen gevaarlijk worden wanneer de aarding niet goed functioneert. Zo zijn er incidenten geweest met lantaarnpalen waarbij de aardverbinding defect was, waardoor de paal onder spanning kon komen te staan. In 2003 is in Amsterdam een hond geëlektrocuteerd nadat een lantaarnpaal onder spanning was komen te staan. Het dier plaste tegen de paal, waardoor een stroompad via de hond naar de grond ontstond. In 2017 vond in Kerkrade een vergelijkbaar, maar niet-dodelijk incident plaats met een hond en een lantaarnpaal. Voor zover bekend is in Nederland nooit een mens geëlektrocuteerd door een defecte aarding van een lantaarnpaal.

Zwerfstromen komen voor in de bodem, in metalen constructies rond elektrische installaties, bij het spoor, bij pijpleidingen, in agrarische bedrijven, nabij bovengrondse hoogspanningslijnen en bij defecte apparatuur. Hierna volgt een kort overzicht met voorbeelden.

In de bodem:

- Bij een defecte aarding kan een lek- of zwerfstroom door de bodem lopen. De reikwijdte van deze stromen is beperkt tot enkele meters.
- Bij blikseminslag kunnen grote zwerfstromen zich verspreiden door de grond. Deze stromen kunnen gevaarlijk zijn in een straal van tientallen meters rond het inslagpunt.

In metalen constructies rond elektrische installaties:

- Binnen (industriële) elektrische installaties met driefasenaansluitingen en verbindingen tussen de nulgeleider en de veiligheidsaarde. Deze lekstromen zijn ongevaarlijk als aardverbindingen in goede staat zijn.
- Bij defecten in windturbines, zonneparken of batterijopslagsystemen kunnen door de omvormers lek- of storingsstromen ontstaan. Bij goede aarding zijn deze lekstromen niet gevaarlijk en zullen aardlekschakelaars de apparatuur afschakelen.
- In metalen buizen tussen de woningen met een verbinding tussen de nulgeleider (blauwe draad) en de veiligheidsaarde in de meterkast (TN-C-S stelsel). Deze zwervstromen zijn ongevaarlijk.

Bij het spoor en bij pijpleidingen:

- Bij spoorwegen kunnen retourstromen via de rails of (deels) door de grond lopen. Deze stromen zijn niet gevaarlijk.
- Bij pijpleidingen kunnen lek- of zwervstromen corrosie veroorzaken, vooral als ze in de buurt van hoogspanningslijnen of spoorwegen liggen. Om dit effect te voorkomen, wordt kathodische bescherming op de pijpleiding toegepast. Bij kathodische bescherming wordt een pijpleiding bewust onder een kleine elektrische spanning gezet zodat de omgekeerde lekstroom beschermt tegen corrosie. Deze elektrische stromen zijn niet gevaarlijk.

In boerderijen en veestallen:

- Binnen elektrische installaties met driefasen en bij verbindingen tussen de nulgeleider en de veiligheidsaarde kunnen lekstromen voorkomen. Landbouwdieren kunnen bij een slechte aardverbinding spanningsverschillen ten gevolge van zwervstromen voelen bij drinkbakken en melkmachines, wat stress of gezondheidsproblemen kan veroorzaken.

In de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen:

- Door de magnetische velden rond hoogspanningslijnen kunnen elektrische stromen in systemen en via de aarde gaan lopen. Deze stromen kunnen zich verspreiden via vochtige grond, metalen leidingen, betonnen vloeren en funderingen. Bij een goede aarding zullen mens en dier deze stromen niet waarnemen.

Bij defecte apparatuur:

- Indien door een defect van het apparaat een lekstroom ontstaat, zou dit bij aanraking tot elektrocutie kunnen leiden. Een aardlekschakelaar schakelt een apparaat af voordat deze lekstroom gevaarlijk kan worden.

2.3 Zwervstromen door windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen

Zware industriële apparatuur en grootschalige energieopwekkers, zoals windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen, worden vanwege hun hoge vermogens altijd aangesloten op het middenspanningsnet. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een transformator die de spanning verhoogt naar 10-33 kV, zodat de benodigde stroom lager blijft en transportverliezen beperkt worden.

Een middenspanningstransformator dempt doorgaans onbalansstromen en hogere harmonischen in het net. Wanneer er een stroomonbalans ontstaat tussen de fasen, wordt deze gecompenseerd via de nulgeleider of via de mantel van de middenspanningskabel, die met de aardingsinstallatie van de transformator is verbonden. Hierdoor kan de installatie veilig blijven functioneren zonder dat er ongewenste lek- of zwervstromen ontstaan.

Zwervstromen kunnen alleen optreden wanneer er géén galvanische verbinding bestaat tussen de metalen mantel van de middenspanningskabel en het lokale aardingssysteem van bijvoorbeeld de windturbine. In dat geval kan een foutstroom of potentiaalverschil niet worden afgevoerd via de normale aardverbinding en zoekt de stroom een alternatieve weg door de bodem of via metalen objecten in de omgeving. Dat kan leiden tot corrosie, spanningsopbouw of storingen in nabijgelegen infrastructuur.

2.4 Lekstroom van een industriële omvormer

In de specificaties van industriële omvormers met een vermogen tot 30 kVA wordt vaak een maximale lekstroom van 300 mA vermeld. Voor omvormers met hogere vermogens wordt meestal gerekend met een lekstroom van 10 mA per kVA. Daarom adviseren fabrikanten om een laagspannings-aardlekbeveiliging (Residual Current Device, RCD) toe te passen met een uitschakelstroom van 300 mA.

Deze vereisten sluiten aan op de bepalingen uit de norm NEN-EN-IEC 62109-1 en 62109-2 ("Veiligheid van vermogensomzetters gebruikt in foto-elektrische vermogenssystemen"; Deel 1: Algemene eisen, Deel 2: Bijzondere eisen voor omzetters). Deze norm geeft eisen ten aanzien van bijvoorbeeld aardfoutdetectie, DC-residustromen en aardlekbewaking (RCMU).

Bij de netkoppeling van grote industriële omvormers wordt in technische documentatie vaak een maximale lekstroom *van circa 1 A* genoemd, vooral voor installaties binnen het spanningsbereik 10-36 kV. Dit heeft betrekking op de interfacing met het middenspanningsnet en de daar geldende veiligheidsprincipes.

Voor midden- en hoogspanningsinstallaties gelden echter volledig andere normen dan voor laagspannings-RCD's. In deze netten worden géén RCD's toegepast, maar:

- aardfoutrelais (EFI, 51N/67N)
- differentiaalbeveiligingen
- overstroombeveiligingen.

Deze zijn voorgeschreven in onder andere de volgende normen:

- NEN-EN-IEC 61936-1 ("Sterkstroominstallaties voor meer dan 1 kV wisselspanning en 1,5 kV gelijkspanning")
- NEN-EN 50522 ("Aarding van hoogspanningsinstallaties van meer dan 1 kV wisselspanning"), met eisen over onder meer foutstromen, aardingssystemen en aanraakspanningen.
- NEN-EN-IEC 50110 ("Bedrijfsvoering van elektrische installaties") en NEN 3840 ("Bedrijfsvoering van elektrische installaties – hoogspanning") met eisen over onder meer beveiligingsgedrag, uitschakeltijden en bediening.

Deze normen beschrijven dat midden- en hoogspanningsnetten moeten worden beveiligd met aardfoutdetectie, die afhankelijk van het netstelsel (gecompenseerd, ongecompenseerd, of vast geaard) binnen een bepaalde tijd het schakelveld, de kabel of de transformator moet afschakelen. Dat verklaart waarom lekstromen in de orde van ampères aan de MS-zijde worden gedetecteerd, maar niet via een RCD worden behandeld.

Bij welke foutscenario's kan een lekstroom groter dan 1 A optreden?

Een defect in de omvormer kan leiden tot een lekstroom die hoger is dan 1 A. In dergelijke situaties adviseert de fabrikant om een aardlekschakelaar (RCD) toe te passen die de omvormer automatisch afschakelt. Wanneer de omvormer wordt uitgeschakeld, moeten echter aanvullende veiligheidsmaatregelen worden geactiveerd, zoals het uitvoeren van een noodstop van de windturbine. Tijdens een noodstop worden de remmen op de rotor in werking gesteld en worden de rotorbladen gepitcht om de turbine snel tot stilstand te brengen. Daarnaast wordt de turbine elektrisch ontkoppeld van het middenspanningsnet (grid disconnect). Hierdoor worden de omvormer en generator ontlast, terwijl de resterende energie gecontroleerd wordt afgevoerd via daarvoor bestemde remprocedures.

Een lekstroom van meer dan 1 A kan in de praktijk niet langer dan vijf seconden blijven bestaan. Dit komt doordat laagspanningsinstallaties volgens NEN 1010 verplicht zijn om binnen vijf seconden af te schakelen bij een foutscenario. De normen NEN-EN-IEC 61936 en NEN 3840 hanteren principe-eisen voor snelle afschakeling, maar noemen niet expliciet een 5-secondenwaarde, waardoor verdere schade aan apparatuur en infrastructuur wordt voorkomen en wordt de veiligheid gewaarborgd.

2.5 Het gedrag van lekstromen in de grond

Bij windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen worden twee typen elektrische stroom gebruikt: gelijkstroom (DC – direct current) en wisselstroom (AC – alternating current). Gelijkstroom vloeit continu in één richting, terwijl wisselstroom – zoals in Europa gebruikelijk – een frequentie heeft van 50 Hz en daardoor voortdurend van richting verandert. Tussen de energieopwekker (generator of zonnepaneel) en de omvormer wordt gelijkstroom gebruikt. Na de omvormer wordt deze omgezet in wisselstroom, die geschikt is om aan het middenspanningsnet te leveren. Het middenspanningsnet werkt immers altijd met wisselstroom.

De aard en het gedrag van lekstromen verschillen wezenlijk tussen gelijkspannings- (DC) en wisselspanningssystemen (AC):

- Bij een aardlek in het gelijkspanningscircuit (DC) loopt de retourstroom altijd via het interne aardingssysteem, omdat de stroom slechts één mogelijke retourweg heeft. Het interne DC-circuit is altijd voorzien van een lekstroomdetectie om schade aan de apparatuur te voorkomen.
- Bij een aardlek in een wisselspanningscircuit (AC) hoeft er niet noodzakelijk een directe galvanische retourstroom te lopen. Een AC-lekstroom kan namelijk (deels) worden gevoed door de capacitieve koppeling tussen kabels, systemen en de omgeving.

De sterkte van wisselstroomlekstromen in de grond neemt af door twee belangrijke factoren:

1. Verspreiding over een groter volume – De stroom verdeelt zich radiaal door de bodem, waardoor de stroomdichtheid snel afneemt met de afstand tot de foutplaats.
2. Opname door de bodem – De elektrische weerstand van de bodem zorgt ervoor dat een deel van de energie wordt omgezet in warmte. Hoe hoger de bodemweerstand, hoe sneller de lekstroom in sterkte afneemt.

Invloed van de bodem

De geleidbaarheid van de bodem bepaalt hoe ver een lekstroom of zwervstroom zich kan verspreiden. Factoren zoals vochtgehalte, soort grond (klei, zand, veen), temperatuur en ionengehalte spelen hierbij een grote rol:

- Natte, kleiige bodem → hogere geleidbaarheid → lekstromen kunnen verder reiken maar de stapspanningen zijn kleiner.
- Droge, zanderige bodem → lagere geleidbaarheid → lekstromen doven sneller uit maar is er sprake van een hogere stapspanning.

Risico's van zwervstromen in de grond

Een zwervstroom in de grond wordt pas een risico als een deel van de stroom door het menselijk of dierlijk lichaam kan stromen. Uitgaande dat een dier een apparaat niet aanraakt, kan de lekstroom alleen via de bek (bij het eten van gras) en via de poten lopen. Om deze stroom te laten lopen moet er dan een spanningsverschil zijn tussen de bek en de voorpoten van het dier. Dit spanningsverschil in de grond wordt ook wel stapspanning genoemd.

In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op foutsценario's die aanleiding geven tot zwervstromen.

2.6 EMC-normen over zwervstromen in industriële apparatuur

In EMC-normen wordt een limiet gesteld aan common mode-stromen. Een common mode-stroom kan gezien worden als een vorm van een lek- of zwervstroom.

Voor industriële elektrische en elektronische apparatuur bestaan specifieke EMC-normen die limieten en meetmethoden vastleggen voor geleide (conducted) lek- of zwervstromen. Deze normen zorgen ervoor dat apparatuur geen overmatige elektromagnetische storingen terugvoert op het lichtnet of op andere geleidingsgebonden verbindingen. De belangrijkste normen die betrekking hebben op geleide emissie binnen industriële omgevingen zijn EN 55011 en EN/IEC 61000-6-4.

EN 55011 is de primaire productfamilienorm voor industriële, wetenschappelijke en medische (ISM) apparatuur. De norm specificeert limieten én meetprocedures voor zowel geleide als uitgestraalde emissies in het frequentiegebied van 150 kHz tot 1 GHz. EN 55011 is van toepassing op alle ISM-apparaten die hoogfrequente energie genereren of gebruiken voor industriële processen. Buiten Europa wordt deze norm ook wel CISPR 11 genoemd. CISPR 11 is opgesteld door de International Electrotechnical Commission (IEC), de wereldwijde organisatie die internationale normen opstelt voor elektrische en elektronische technologie. EN 55011 is de vrijwel identieke Europese implementatie van CISPR 11.

EN 61000-6-4 is de generieke emissienorm voor industriële omgevingen: Wanneer geen specifieke productnorm beschikbaar is, geldt deze norm als vangnetnorm voor apparatuur in industriële omgevingen, voor zowel binnen- als buitengebruik. De norm dekt emissies in het bereik van 150 kHz tot 1 GHz..

De EN 55011 en de EN 61000-6-4 geven geen rechtstreekse limieten voor een common-mode stroom die vertaald kan worden naar een lekstroom, maar worden de emissielimieten uitgedrukt in spanningen (in dB μ V), gemeten over een gestandaardiseerde impedantie van bijvoorbeeld 50 Ω , die eventueel omgerekend kan worden naar een stroomlimiet. In Tabel 2 van de EN 55011 worden de limieten gegeven voor zwaar industriële apparaten, zoals van toepassing op windturbines, grote batterijopslagsystemen en zonneparken (zie Figuur 1).

In Tabel 2 van EN 55011 staat dat de maximale stoorspanning van zware industriële apparatuur (>75 kVA) boven 150 kHz 120 dB μ V (=1 V) mag zijn aan de laagspanningszijde van de inverter. Dit komt overeen met een maximale stoorstroom van ongeveer 0,02 A over een 50 Ω -impedantie. Dit is de maximale stoorspanning en -stroom die door de middenspanningstransformator wordt gevoed. Zoals vermeld in note b, derde bullet, moet deze industriële apparatuur aangesloten zijn op een transformator. Het is niet aannemelijk dat een dergelijke transformator frequenties boven 150 kHz effectief doorlaat.

Table 2 – Disturbance voltage limits for class A group 1 equipment measured on a test site (a.c. mains power port)

Frequency range MHz	Rated power of ≤ 20 kVA ^c		Rated power of > 20 kVA and ≤ 75 kVA ^{a, c}		High power electronic systems and equipment, Rated power of > 75 kVA ^{b, c}	
	Quasi-peak dB(μ V)	Average dB(μ V)	Quasi-peak dB(μ V)	Average dB(μ V)	Quasi-peak dB(μ V)	Average dB(μ V)
0,15 – 0,50	79	66	100	90	130	120
0,50 – 5	73	60	86	76	125	115
5 – 30	73	60	90 decreasing linearly with logarithm of frequency to 73	80 60	115	105
At the transition frequency, the more stringent limit shall apply. For class A equipment intended to be connected solely to isolated neutral or high impedance earthed (IT) industrial power distribution networks (see IEC 60364-1) the limits for equipment with a rated power > 75 kVA may be applied, regardless of its actual rated power. NOTE A rated input or output power of 20 kVA corresponds for example to a current of approximately 29 A per phase in case of 400 V three-phase power supply networks, and to a current of approximately 58 A per phase in case of 200 V three phase power supply networks. ^a These limits apply to equipment with a rated power > 20 kVA and intended to be connected to a dedicated power transformer or generator, and which is not connected to low voltage (LV) overhead power lines. For equipment not intended to be connected to a user specific power transformer the limits for ≤ 20 kVA apply. The manufacturer, and/or supplier shall provide information on installation measures that can be used to reduce emissions from the installed equipment. In particular it shall be indicated that this equipment is intended to be connected to a dedicated power transformer or generator and not to LV overhead power lines. ^b These limits apply only to high power electronic systems and equipment with a rated power greater than 75 kVA when intended to be installed as follows: – installation is supplied from a dedicated power transformer or generator, and which is not connected to Low Voltage (LV) overhead power lines, – installation is physically separated from residential environments by distance greater than 30 m or by a structure which acts as a barrier to radiated phenomena, – the manufacturer and/or supplier shall indicate that this equipment meets the disturbance voltage limits for high power electronic systems and equipment of rated input power > 75 kVA and provide information on installation measures to be applied by the installer. In particular, it shall be indicated that this equipment is intended to be used in an installation which is powered by a dedicated power transformer or generator and not by LV overhead power lines. ^c Selection of the appropriate set of limits shall be based on the rated a.c. power stated by the manufacturer.						

Figuur 1 Tabel 2 uit EN 55011 met stoorlimieten voor Klasse A-apparatuur.

3 ZWERFSPANNING EN VEE

3.1 Verkort literatuuronderzoek

Het onderwerp *zwerfspanningen* (of *zwerfstromen*) in agrarische omgevingen is in de technisch-wetenschappelijke literatuur uitgebreid beschreven. Op biologisch vlak zijn er echter aanzienlijk minder studies beschikbaar. Het begrip 'zwerfspanning' verwijst naar een meetbaar potentiaalverschil tussen twee punten die een dier gelijktijdig kan aanraken, zoals de hoeven op een vochtige vloer en de snuit tegen een metalen drinkbak. In stallen kunnen in ongunstige situaties dergelijke zwerfspanningen op metalen constructiedelen voorkomen, bijvoorbeeld in melkstallen.

Onderzoek naar zwerfstromen bij melkvee kreeg in Noord-Amerika brede aandacht in de jaren zeventig, nadat eerder werk hierover al in Nieuw-Zeeland in de jaren zestig was uitgevoerd. In de jaren tachtig werd het onderwerp in de VS verder opgepakt met systematische studies en meetprogramma's op melkveebedrijven, waardoor het fenomeen meer erkenning kreeg binnen de melkveesector.³

Vroeg onderzoek omvatte enquêtes onder melkveehouders om hun perceptie van de effecten van zwerfspanning op melkkoeien in kaart te brengen. Tot de verschijnselen die aan zwerfspanning werden toegeschreven, behoorden een verhoogde incidentie van mastitis (uierontsteking), een hoger somatisch celgetal (wat meestal duidt op een lagere melk-kwaliteit), een lagere melkproductie, veranderingen in het melkproces en veranderingen in het gedrag van de dieren. Oorzaken hiervoor kunnen binnen en buiten het melkveebedrijf te vinden zijn. Buiten het bedrijf gaat het vooral om stromen en spanningsverschillen die ontstaan in de nulgeleider van het elektriciteitsnet en via de transformator het erf binnenkomen. Binnen het bedrijf liggen de oorzaken in onbalansstromen op de secundaire nul, foutstromen, verkeerde koppeling van nul en aarde en lokale lek- of inductiespanningen op metalen delen.⁴

Polk onderzocht in 2001 of heel lage zwerfspanning in stallen invloed kan hebben op melkkoeien. Hiertoe werden metingen gedaan op 19 melkveebedrijven in Minnesota in de zomer van 1997. Op bedrijven met lagere melkproductie werden gemiddeld hogere stapspanningen gemeten, maar ook andere factoren (zoals ontbrekende vaccinaties) kunnen dit verklaren. Polk concludeert dat mogelijk effecten optreden, maar dat meer onderzoek nodig is om dit overtuigend aan te tonen.⁵

Onderzoek door Roussel en anderen uit 2011 laat zien dat lammeren zwerfspanning boven ongeveer 4,5 V vermijden, maar vooral wanneer ze een keuze hebben tussen een wel of niet onder spanning staande voerbak. Zonder keuze blijven ze meestal eten, al wel met tekenen van stress. De onderzoekers testten dit door lammeren uit metalen voerbakken te laten eten terwijl ze tijdens korte sessies oplopend hogere spanningen (0-8 V) op één bak zetten, in situaties met en zonder keuzemogelijkheid.⁶

Een studie door Hillman en anderen uit 2013 toont een afwijkend perspectief. Hillman stelt dat transiënten, harmonischen en andere vervormingen in de elektrische stroomvoorziening op melkveebedrijven samenhangen met gedrag en melkproductie van koeien. Hij baseert zich op literatuur die niet overal wordt erkend en hanteert veel lagere drempelwaarden, terwijl andere experts (zoals Reinemann) vinden dat zulke lage signalen doorgaans te zwak zijn om biologisch effect te hebben. Hillman toont wel velddata van 12 bedrijven. Uit metingen op deze bedrijven blijkt volgens Hillman dat zelfs heel kleine spanningsverschillen (vanaf ~10 mV peak-to-peak) al meetbare effecten hebben op melkproductie en

³ D. Reinemann, "Stray voltage and milk quality – a review", *Veterinary clinics of North America: food animal practice*, vol. 28, nr. 2, pp. 321-345, juli 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2012.03.008>.

⁴ R. Appleman en R. Gustafson, "Source of stray voltage and effect on cow health and performance", *Journal of Dairy Science*, vol. 68, nr. 6, juni 1985, pp. 1554-1567. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(85\)80994-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(85)80994-2).

⁵ C. Polk, "Cows, ground surface potentials and earth resistivity", *Bioelectromagnetics*, vol. 22, nr. 1, januari 2001, pp. 7-18. DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-186X\(200101\)22:1%3C7::AID-BEM2%3E3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1521-186X(200101)22:1%3C7::AID-BEM2%3E3.0.CO;2-I).

⁶ S. Roussel e.a., "Stray voltage threshold is better determined under choice test conditions in sheep", *Animal*, vol. 5, nr. 6, pp. 918-926, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731110002570>.

onrustig gedrag van koeien. De auteurs concluderen dat bestaande normen te hoog zijn en dat laagfrequente én hoogfrequente vervormingen ('dirty electricity') waarschijnlijk worden onderschat als risico voor melkvee.⁷

Buesink en anderen beschrijven een casus waarin koeien na de installatie van zonnepanelen plots afwijkend gedrag vertoonden en hun voederplek meden. Hoewel het elektromagnetisch veld in de stal qua sterkte laag bleek, was de vorm van het signaal veranderd: in plaats van een zuivere 50 Hz-sinus verschenen een 150 Hz-component én hoogfrequente transiënten, vermoedelijk afkomstig van de omvormer. De onderzoekers vermoeden dat juist deze korte, scherpe spanningspieken het gedrag veroorzaakten, mogelijk versterkt door geluid dat mensen niet horen maar koeien mogelijk wel. Het gaat om een enkelvoudige observatie op één bedrijf, zonder experimentele opzet, dus er is geen bewijs voor causaliteit. Wel biedt de casus een aanwijzing dat dieren in sommige situaties laag-niveau EM-velden met hoogfrequente pieken kunnen waarnemen. De auteurs benadrukken dat meer onderzoek nodig is en dat technische maatregelen om hoogfrequent transiënten te beperken denkbaar zijn.⁸

Volgens onderzoek door Reinemann in 2012 is er geen bewijs dat zwervspanning tot 8 V leidt tot gezondheidsproblemen, zoals mastitis of verhoogde somatische celgetallen bij koeien. Lichte gedragsreacties bij koeien ontstaan pas bij stroomsterktes van ongeveer 2,5-8,5 mA (afhankelijk van de gevoeligheid van het dier), en vermijdingsgedrag treedt pas op bij stromen van een factor twee tot drie hoger. Omgerekend via de wet van Ohm betekent dit dat zulke reacties pas optreden bij spanningen van enkele volts (afhankelijk van de lichaamsweerstand van de koe, meestal 500-1000 Ω).⁹

In 2016 publiceerde de Zwitserse Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation (FSM) – een onafhankelijk instituut dat onder andere risico's van elektromagnetische velden onderzoekt – een uitgebreid literatuuroverzicht, waarin de wetenschappelijke consensus tot op dat moment is vastgelegd.¹⁰ In dit literatuuroverzicht worden de belangrijkste inzichten uit onderzoeken naar zwervstromen samengevat.

In deze literatuur komt steeds een consistent en technisch belangrijk onderscheid naar voren: het is de stroom die door het dier heen loopt – en niet simpelweg een meetbare spanning – die de biologische relevantie bepaalt. Die stroom is enerzijds afhankelijk van de spanning waaraan het dier wordt blootgesteld (bijvoorbeeld wanneer een koe met de snuit een onder spanning staand metalen onderdeel, zoals een drinkbak, aanraakt en zo via het lichaam en de hoeven een stroompad naar aarde vormt). Anderzijds hangt de stroom af van de elektrische weerstand van het dier. Deze weerstand is lager dan die van de mens, waardoor koeien gevoeliger kunnen reageren op zwervspanningen.

De onderste waarnemingsdrempel voor lichaamsstromen wordt geschat op ongeveer 1 mA. Vanaf circa 3 mA vertonen dieren duidelijke gedragsreacties, en vanaf ongeveer 5 mA treedt actief uitwijkgedrag op. Na een aanpassingsperiode van enkele dagen wennen de meeste dieren aan stromen van enkele milliampère en vertonen zij geen opvallend gedrag meer. Experimenten laten echter zien dat de verschillen in gevoeligheid tussen dieren zeer groot zijn, tot wel een factor 10. Voor wisselstroom van 50-60 Hz vindt ventrikelfibrillatie (levensbedreigende hartritmestoornissen) meestal pas plaats bij stroomsterktes van ongeveer 100 mA en hoger.¹¹

Wanneer de spanningen (en daarmee de stromen) groot genoeg worden, kunnen zij het welzijn en de melkproductie negatief beïnvloeden. Het overgrote deel van de beschikbare studies vond tot aan ongeveer 4-5 V aanraakspanning of 4-5 mA lichaamsstroom geen afwijkingen in productiviteit, melkqualiteit (zoals het somatische celgetal) of in de incidentie van mastitis (uierontsteking). Bij individuele dieren werden echter soms afwijkende bevindingen gerapporteerd. Productieverliezen zijn daarbij niet het gevolg van directe schadelijke effecten van de stroom zelf, maar van

⁷ D. Hillman e.a., "Relationship of electric power quality to milk production of dairy herds – Field study with literature review", *Science of the total environment*, vol. 447, pp. 500-514, 1 maart 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.089>.

⁸ F. Buesink, R. Vogt-Ardatjew en F. Leferink, *Observation of abnormal behavior of cows exposed to electromagnetic fields*, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Amsterdam, 2018, pp. 1-4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485158>.

⁹ Zie voetnoot 3.

¹⁰ G. Dürrenberger, *Kriechströme – Stand des Wissens, Literaturbericht*, Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation, Zürich, maart 2016. Zie: https://www.emf.ethz.ch/fileadmin/redaktion/public/downloads/3_angebot/wissensvermittlung/studien_fachartikel/Kriechstrom.pdf.

¹¹ EN 50479-1, *Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects*. Zie Annex H.

gedragsveranderingen: dieren kunnen onder spanning staande drink- of voederbakken vermijden, waardoor hun water- en/of voedselopname afneemt.

De weerstandswaarden variëren afhankelijk van de contactcondities. Uit het literatuuroverzicht van de FSM volgt dat deze voor koeien tussen 500 en 1000 Ω liggen:

- van hoef naar hoef op een vochtige, schone vloer: $\approx 500 \Omega$ (wordt beschouwd als de worst-case situatie)
- van hoef naar hoef op droge ondergrond of stro: $\approx 1000 \Omega$
- van bek naar hoeven: $\approx 500 \Omega$ (nauwer contact, dus lagere weerstand).

Deze waarden liggen in dezelfde orde van grootte als vermeld in Annex H van de al genoemde internationale norm EN 50479. Door deze lage weerstandswaarden kunnen al bij lage spanningen merkbare stromen door het dier lopen. Bij 1 V en 500 Ω is de stroom immers 2 mA, wat binnen het bereik ligt waar koeien al duidelijke gedragsreacties kunnen vertonen.

Bevestigde gevallen van problemen met zwervspanningen zijn doorgaans terug te voeren op lokale problemen in de elektrische installatie. Dit wordt goed beschreven in diverse 'gidsen', zoals de Minnesota Stray Voltage Guide.¹² Voorbeelden van dergelijke problemen zijn:

- spanning tussen nul en aarde veroorzaakt door belastingsonbalans
- onvoldoende vereffening
- corrosie of onderbrekingen in aardgeleiders
- de configuratie van de nulgeleider in het distributienet op het aansluitpunt.

Recent onderzoek bevestigt dat klachten over zwervstromen in essentie elektrotechnische diagnosevraagstukken zijn, die gestructureerde metingen vereisen van vereffening, lekstromen en aanraakspanningen onder belasting.¹³ De literatuur identificeert verre windparken *niet* als een gevestigde primaire bron van aanhoudende 50 Hz-zwervstroom in agrarische gebouwen of weilanden.

3.2 Meetmethoden en diagnostisch kader

Richtlijnen die zijn ontwikkeld voor onderzoek in de agrarische sector beschrijven een gestructureerde en reproduceerbare methodologie (zie bijvoorbeeld weer de Minnesota Stray Voltage Guide):

1. inspectie van vereffenings- en aardingssystemen
2. verificatie van de continuïteit van de nulgeleider en de scheiding van nul- en beschermingsgeleiders
3. meting van aanraakspanningen met behulp van een gedefinieerde shuntimpedantie
4. belastingsafhankelijke metingen
5. testen door het isoleren van elektrische circuits.

Digitale voltmeters met een hoge ingangsimpedantie detecteren vaak capacitieve of geïnduceerde spanningen die niet in staat zijn een biologisch relevante stroom te leveren. Daarom richten correct uitgevoerde onderzoeken zich op de stroom die daadwerkelijk kan vloeien onder representatieve impedantiecondities. Een correcte meting vereist dat de impedantie van het dierenlichaam wordt nagebootst door gebruik te maken van een gedefinieerde shuntweerstand.

Dit geheel aan onderzoek laat consequent zien dat, wanneer effecten bij vee daadwerkelijk worden vastgesteld, de oorzaak meestal ligt binnen de elektrische installatie van het bedrijf of het directe voedingsnet. De oorzaak ligt zeer zeker niet bij verafgelegen opwekkingsinstallaties.

¹² Minnesota Stray Voltage Guide – A Guide Addressing Stray Voltage Concerns, september 2015. Te vinden op: https://www.minnesota-strayvoltageguide.com/wp-content/uploads/2015/10/MN_StrayVoltageGuide_HR.pdf.

¹³ Q. Lagarde et al., "Stray currents in livestock farming: electrical diagnosis in farms", *Agriculture*, vol. 13, nr. 10, artikelnummer 2010, oktober 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13102010>.

3.3 Bliksem, transiënten en bescherming van windturbines

Windturbines zijn ontworpen als hoge, aan blikseminslag blootgestelde constructies en moeten voldoen aan IEC 61400-24. Deze norm specificeert onder meer:¹⁴

- parameters van bliksemstromen en beschermingsniveaus
- equipotentiale vereffening binnen turbines
- aardingsconfiguraties
- eisen voor persoonlijke veiligheid (artikelen 6, 8, 9 en 10).

IEC 62305-1 beschrijft de grootte, golfvormen en statistische verdeling van bliksemstromen.¹⁵ Bliksemstromen hebben een hoge amplitude, maar zijn extreem kortdurende transiënten (van microseconden tot milliseconden).

Dit onderscheid is technisch van groot belang, immers:

- zwerfspanningsproblemen bij vee hebben betrekking op aanhoudende 50 Hz-contactstromen
- bliksem betreft een transiënte impulsgebeurtenis
- transiënte gebeurtenissen veroorzaken geen blijvende aardstromen in stationaire toestand, tenzij er een permanent defect aanwezig is.

Daarom zijn blootstelling aan bliksem en zwerfspanningsverschijnselen categorisch verschillende mechanismen.

3.4 Aardingsfilosofie van Nederlandse windparken op land

Onshore-windparken in Nederland werken doorgaans met een middenspannings-verzamelnets (MV-collectorgrid), meestal op 20 kV of 33 kV, met één gedefinieerd aardpunt van de nulgeleider in het windparkstation. Het beschreven systeem maakt gebruik van een nulaardings-transformator met een nulaardingsweerstand die is ontworpen voor een stroom van ongeveer 800 A tot 1200 A.

Deze impedantie-aarding is de standaardpraktijk voor Europese middenspanningsnetten. Het MV-net is niet direct geaard. De aardfoutstroom wordt opzettelijk beperkt tot ongeveer 1200 A. Aardstromen treden uitsluitend op bij storingen of transiënte verschijnselen.

Tijdens normale bedrijfsomstandigheden is er geen continue aardfoutstroom. Aardstromen komen alleen voor bij enkel-fasige aardfouten, transiënte schakelverschijnselen en blikseminvloeden. Beveiligingssysteem zijn ontworpen om aardfouten binnen vastgestelde tijdlimieten te detecteren en af te schakelen, meestal korter dan 10 seconden.

Moderne Type-3-windturbines, gebaseerd op 'doubly fed induction generator'-technologie (DFIG) ondersteunen deze gecontroleerde aardingsfilosofie. In gangbare commerciële configuraties geldt dat:

- de generatorstator delta-geschakeld is of ster-geschakeld zonder direct geaarde nul
- de turbine-stap-up-transformator vaak een delta-geschakelde laagspanningszijde heeft
- het laagspanningssysteem van de generator daardoor zwevend of impedantie-gereferenceerd opereert
- de middenspanningszijde wordt aangesloten op het impedantie-geaarde verzamelnets.

Dit betekent dat er geen vast verbonden laagspanningsnul is die tijdens normaal bedrijf continue stroom naar aarde injecteert.

Alle blootliggende geleidende delen – waaronder toren, gondel, wapening en kabelmantels – worden vereffend en verbonden met speciale aardelektroden in overeenstemming met artikel 9 van IEC 61400-24. Het aardingssysteem van het windparkstation is ontworpen volgens IEC 61936-1, dat in artikel 10 vereist dat aanraak- en stapspanning-veiligheidscriteria worden gewaarborgd onder fout- en bliksemcondities.¹⁶

¹⁴ NEN-EN-IEC 61400-24:2019, Windturbines - Deel 24: Bliksembeveiliging. Te vinden op www.nen.nl.

¹⁵ NEN-EN-IEC 62305-1:2024, Bliksembeveiliging - Deel 1: Algemene principes. Te vinden op www.nen.nl.

¹⁶ IEC 61936-1:2021, Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC - Part 1: AC. Te vinden op www.nen.nl.

Het gecombineerde effect van impedantie-beperkte MV-aarding, zwevende of delta-gereferende LV-generatorsystemen, onderling verbonden maar gecontroleerde aardingsnetten en gelijkmatig gedefinieerde foutafschakeltijden, is een systeem dat inherent géén aanhoudende 50 Hz-lekstromen in de omringende bodem injecteert tijdens normaal bedrijf. Wil er toch sprake zijn van continue stroom in aangrenzende landbouwgrond of weilanden, dan zou men moeten uitgaan van een blijvende aardfout die niet door de beveiliging wordt afgeschakeld, een ongewenste directe metalen verbinding of een fundamenteel ontwerpgebrek in het aardingssysteem. Dergelijke situaties vallen niet binnen normaal, conform bedrijfsbeheer.

3.5 Aardingsnormen en veiligheidscriteria

IEC 61936-1 legt de fundamentele eisen vast voor hoogspanningsinstallaties. Deze norm bevat veiligheidscriteria voor bescherming tegen elektrische schokken, het ontwerp van aardingssystemen onder fout- en bliksemcondities, en de vereisten voor verificatie en metingen.

Aardingssystemen moeten de grondpotentiaalverhoging (GPR) beheersen en equipotentialiteit waarborgen binnen toegankelijke zones. Goed ontworpen systemen beperken gevaarlijke overgedragen potentialen buiten de grenzen van de installatie.

IEC 62305-1 beschrijft aanvullend de parameters van bliksemstromen en het gedrag van overspanningsverschijnselen, terwijl IEC 61400-24 turbinespecifieke eisen stelt voor bliksembeveiliging en aarding.

Gezamenlijk hebben deze normen tot doel te waarborgen dat foutstromen beheerst en tijdsbegrensd zijn, bliksemstromen veilig worden afgevoerd en toegankelijke geleidende delen binnen toelaatbare potentiaalverschillen blijven.

3.6 Korte samenvatting

Op basis van de vastgestelde literatuur en de toepasselijke IEC-normen geldt het volgende:

- De gevoeligheid van vee heeft betrekking op contactstroom, niet op enkel een meetbare spanning.
- Een juiste diagnosemethodiek is essentieel en moet de impedantie van het dier simuleren.
- Bevestigde gevallen van zwerfspanning zijn doorgaans gekoppeld aan lokale vereffening- of nulproblemen.
- Bliksemgebeurtenissen zijn transiënt en niet gelijkwaardig aan stationaire lekstromen.
- Nederlandse middenspanningssystemen van windparken zijn impedantie-geaard, waardoor aardfoutstromen worden beperkt.
- Type-3-turbines werken typisch zonder direct geaarde laagspanningsnul.
- Hoogspanningsaardingssystemen moeten voldoen aan de gedefinieerde veiligheidscriteria uit IEC 61936-1.

Er bestaat geen inherent mechanisme binnen de beschreven aardingsfilosofie van windparken dat tijdens normaal bedrijf aanhoudende 50 Hz-lekstromen in aangrenzende landbouwgrond zou veroorzaken.

Elke bevestigde elektrische verschijningsvorm bij vee zou daarom onderzoek vereisen naar:

- de vereffening en nulconfiguratie van de installatie op het bedrijf,
- de distributienetconfiguratie op het aansluitpunt,
- abnormale foutcondities,
- ongewenste geleidende verbindingen.

Het technische ontwerp-principe van moderne windparken is juist specifiek gericht op het voorkomen van ongecontroleerde aardstroomspreiding en het handhaven van gedefinieerde, begrensde retourpaden. De beveiligingssysteem van windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen schakelen de installatie automatisch uit zodra de lek- of zwerfstroom 1 A overschrijdt.

In Bijlage A wordt ingegaan op waar meetbare 'zwerfstromen' die samenhangen met windparken kunnen ontstaan, en welke bedrijfs- of foutcondities deze kunnen vergroten.

4 RESULTATEN PARAMETERSTUDIE

4.1 Inleiding

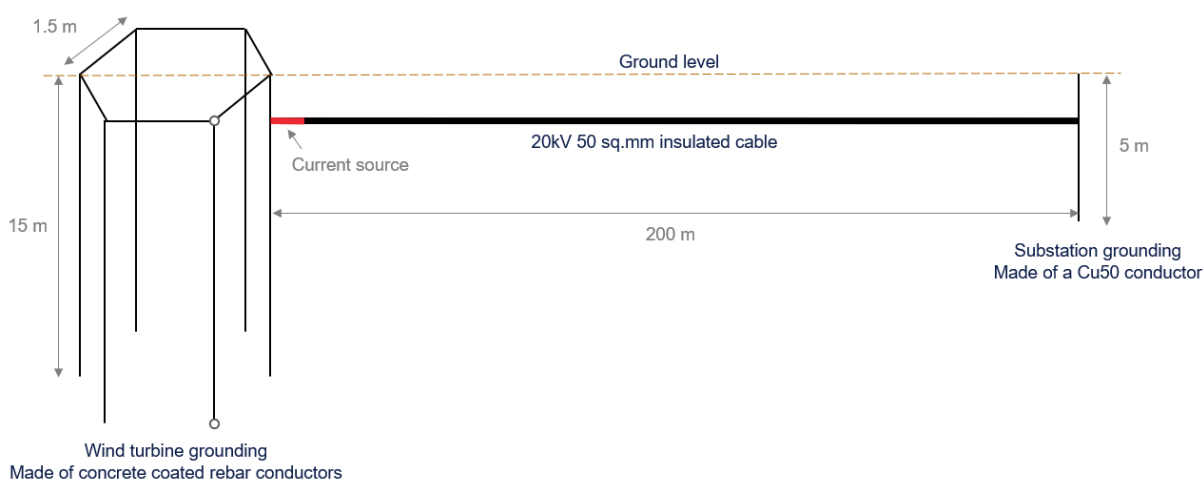
Dit rapport heeft in de eerste hoofdstukken de focus gelegd op onderzoek en normen naar hoe stapspanningen en zwerfstromen effect kunnen hebben op vee. Om een beter begrip te krijgen hoe stapspanningen en zwerfstromen zich gedragen in de praktijk is een parameterstudie uitgevoerd.

Deze parameterstudie is uitgevoerd om beter te kunnen begrijpen hoe stapspanningen en zwerfstromen zich gedragen rondom windturbines wanneer er ongewenste stroompaden ontstaan. Deze verschijnselen kunnen in de praktijk leiden tot risico's voor vee, vooral wanneer spanningen en stromen boven de in de vorige hoofdstukken genoemde gedragsdrempels uitkomen. Door verschillende parameters systematisch te variëren, wordt inzicht verkregen in welke factoren daadwerkelijk invloed hebben op de hoogte en verspreiding van zwerfstromen. Dit helpt om theoretische aannames te toetsen aan realistische situaties. Deze parameterstudie maakt het mogelijk om beter onderbouwde veiligheidsmaatregelen te definiëren en potentiële problemen in het veld tijdig te identificeren en te voorkomen.

Het gebruikte model simuleert een situatie waarbij de neutraalgeleider defect is, waardoor stromen ongewenst via de grond lopen. In dit model worden stapspanningen berekend op basis van een stapgrootte van 1,5 meter (typisch voor een koe). De grenswaarde waarbij koeien gedragsverandering vertonen wordt gesteld op 1,1 V. Bij de simulaties is uitgegaan van de maximaal toelaatbare lekstroom van 1 A. Bij een grotere stroom zullen beveiligingssystemen ingrijpen en het systeem afschakelen.

4.2 Beschrijving van het model

Het gebruikte model bestaat uit een cluster van zes verticale elektroden die samen een aardingssysteem van een windturbine voorstellen. Deze is via een kabel verbonden met een onderstation, weergegeven door een enkele aardelektrode. Deze situatie is equivalent aan de situatie waarin de neutraalgeleider defect is en deze stromen niet kan afvoeren. In Figuur 2 is een schematische tekening van het model weergegeven.



Figuur 2 **Overzicht van het gebruikte model.**

In het opgestelde model zijn vervolgens de relevante parameters gevarieerd. Het gaat om de volgende parameters:

1. de soortelijke bodemweerstand (zie par. 4.3.1)
2. de stroomsterkte (zie par. 4.3.2)
3. de elektrodelengte bij de turbine (zie par. 4.3.3)
4. de afstand tussen het injectie- en extractiepunt (zie par. 4.3.4)
5. de frequentie van de geïnjecteerde stroom (zie par. 4.3.5).

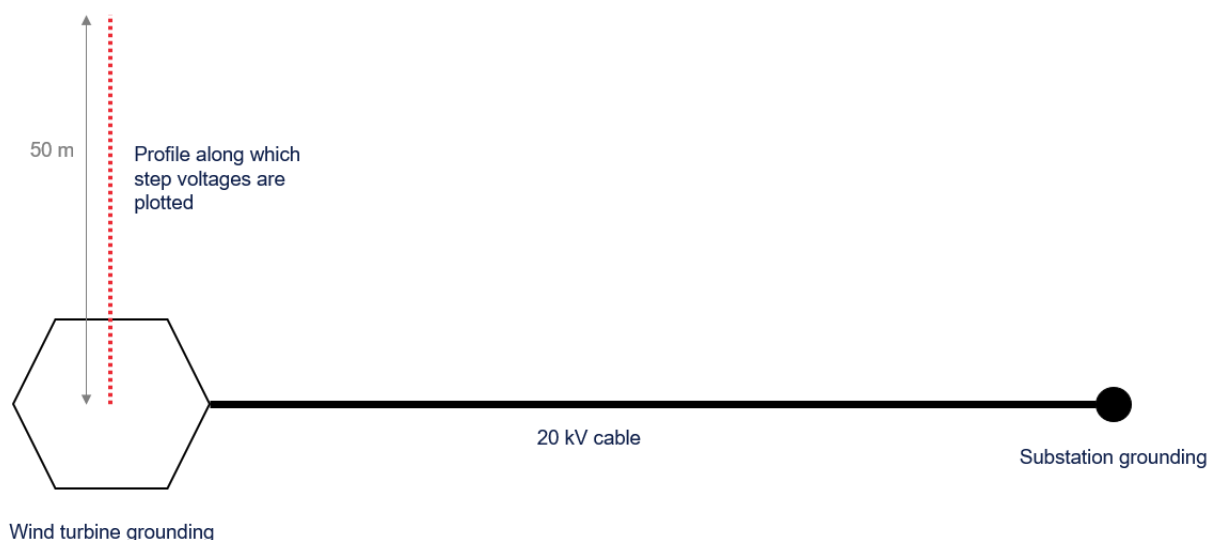
Voor elke simulatie zijn de andere parameters gelijk gehouden om het effect van de parameter te kunnen isoleren. De gebruikte standaardparameters zijn de volgende:

- soortelijke bodemweerstand: homogeen grondmodel van $100 \Omega m$
- afstand tussen injectie- en extractiepunt: $200 m$
- elektrodelengte: $15 m$
- frequentie van de geïnjecteerde stroom: $50 Hz$
- amplitude van de geïnjecteerde stroom: $1 A$.

In de simulaties worden vervolgens de stapspanningen berekend die gelden voor een stapgrootte van $1,5 m$. Deze stapgrootte komt overeen met de stapgrootte van een koe. In overeenstemming met de gegevens uit Hoofdstuk 3 wordt aangenomen dat de maximale stapspanning waar koeien gedragsveranderingen gaan vertonen op $1,1 V$ ligt.

4.3 Resultaten van de simulaties

De resultaten worden op twee manieren weergegeven: als heatmap en als lijnplot. Bij de heatmap wordt de hoogte van de stapspanningen in de ruimte weergegeven. Bij de lijnplot wordt er een doorsnede gemaakt van de stapspanningen. Langs welke as dit is gedaan, wordt weergegeven in Figuur 3.



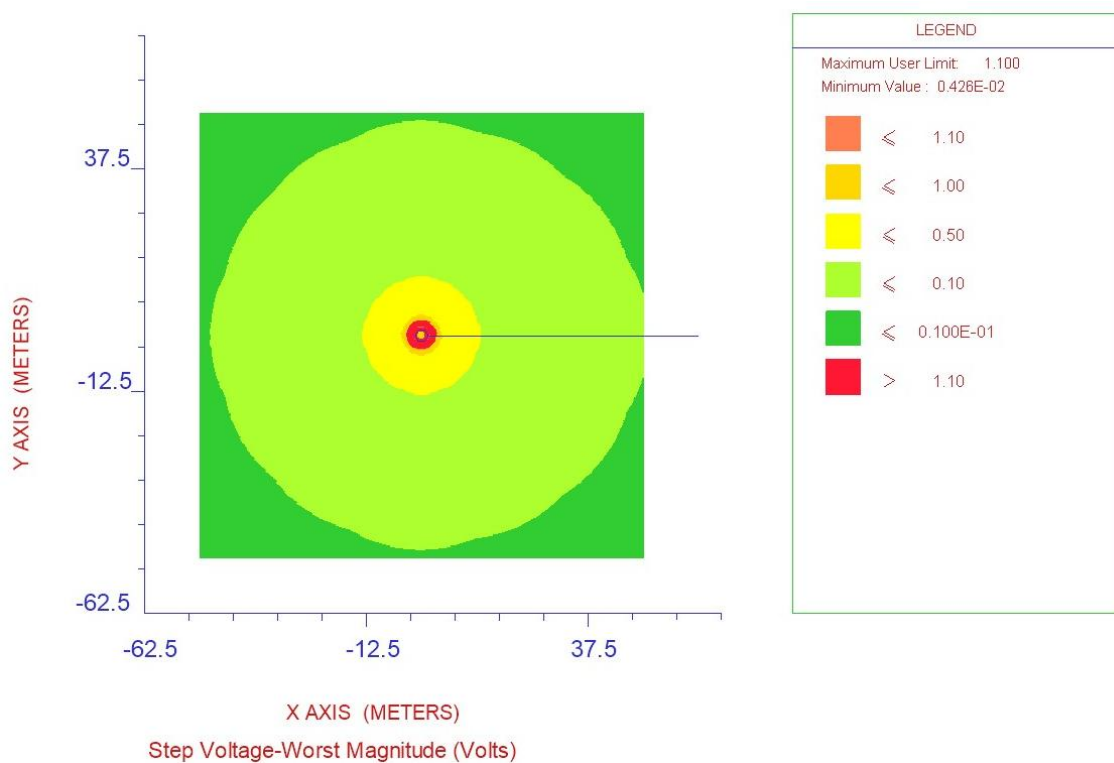
Figuur 3 **Overzicht van weergaverichting voor lijnplots.**

4.3.1 Invloed van de bodemweerstand

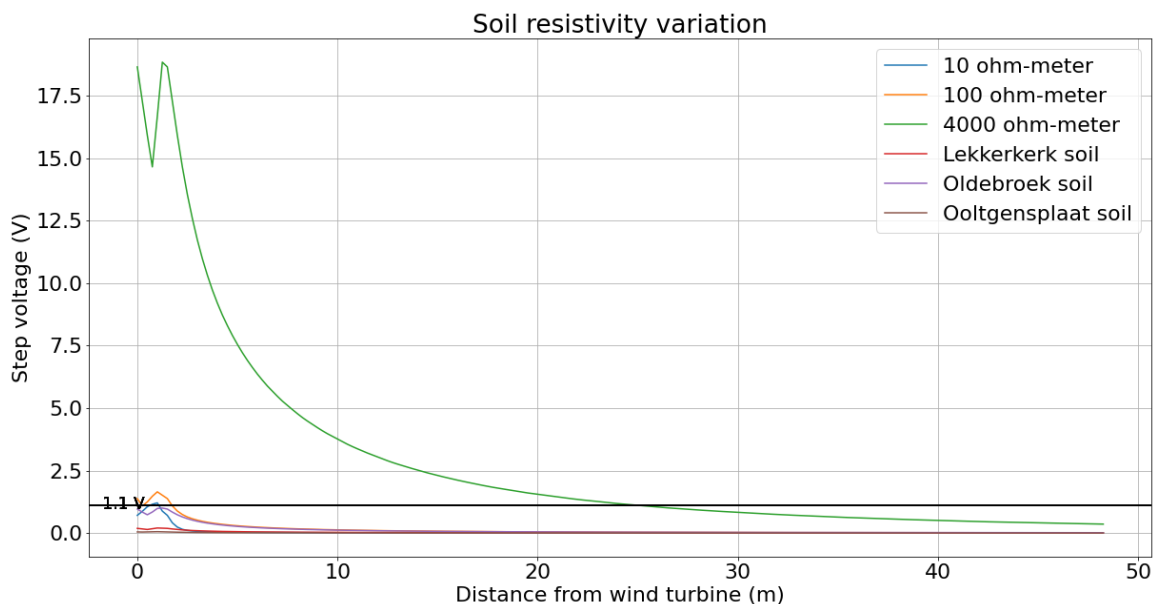
Voor de bodemweerstand zijn zes situaties bekeken. Drie hiervan zijn homogene grondmodellen met bodemweerstand van $10 \Omega m$, $100 \Omega m$ en $4000 \Omega m$. Deze modellen zijn geselecteerd als waarden om te laten zien wat het effect is op de stapspanning.

Aanvullend zijn er drie modellen geselecteerd die een situatie in Nederland laten zien. Deze modellen zijn overgenomen van het zogenoemde Dinoloket, een openbare databron met Nederlandse ondergrondmodellen.¹⁷ Deze bodemprofielen worden gebruikt om realistische variaties in soortelijke bodemweerstand mee te nemen in de simulaties. De geselecteerde modellen zijn voor Lekkerkerk (W38C0006), Oldebroek (W27B0026) en Ooltgensplaat (W43G0033). Lekkerkerk en Ooltgensplaat zijn typische grondmodellen voor lager liggende regio's in Nederland. Oldebroek heeft een relatief hoge weerstand door de ligging op de Veluwe. De resultaten van deze simulaties zijn te vinden in Figuren 4-6.

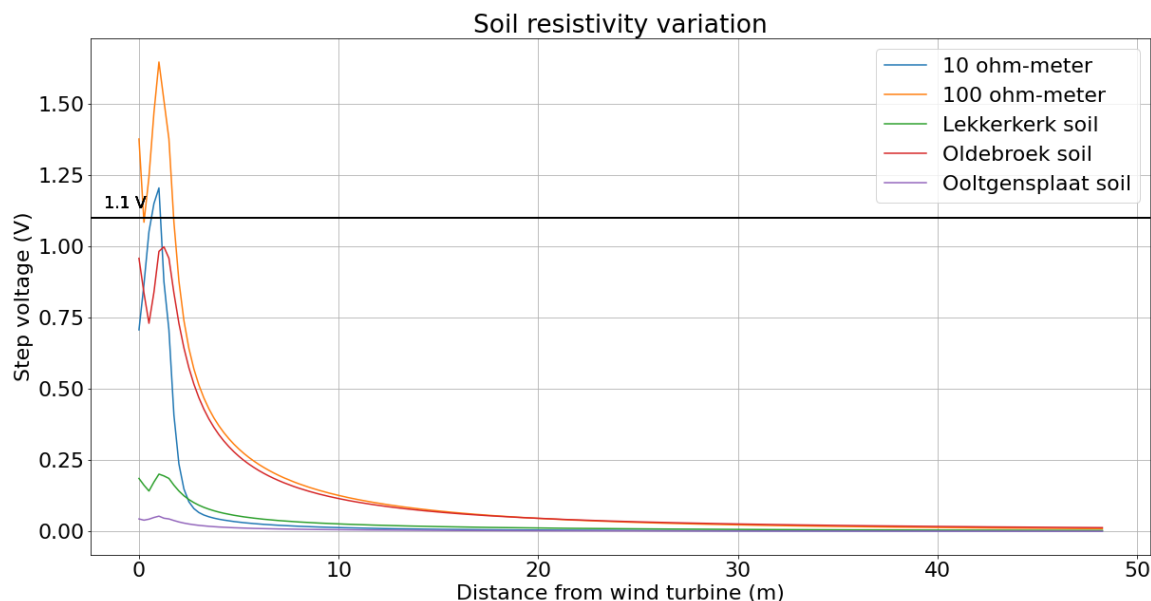
¹⁷ Zie: <https://www.dinoloket.nl/>.



Figuur 4 Stapspanning (stapgrootte 1,5 meter) rondom de windturbine (aardmodel homogeen 100 Ωm).



Figuur 5 Stapspanning voor stapgrootte van 1,5 meter uitgezet tegen afstand van de windturbine voor verschillende grondweerstandsmoellen.



Figuur 6 Stapspanning voor stapgrootte van 1,5 meter uitgezet tegen afstand van de windturbine voor verschillende grondweerstandsmodellen (exclusief 4000 Ohm-meter).

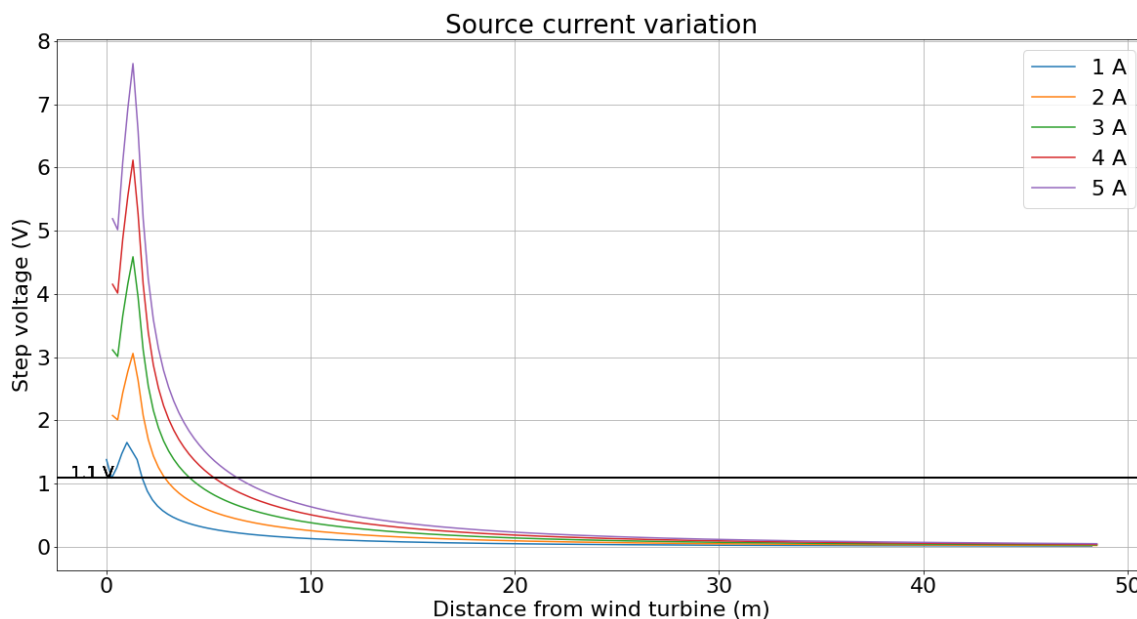
Figuur 4 laat zien hoe stapspanningen zich verspreiden rondom een injectiepunt. Er is duidelijk te zien dat dit voor een homogene grond een cirkel is, waarbij de spanning met toenemende radius afneemt. Figuur 5 geeft vervolgens de maximale waarde van de stapspanning in de cirkel, uitgezet tegen de radius rondom het injectiepunt. Duidelijk te zien is dat de stapspanning snel afneemt naarmate de afstand tot de windturbine toeneemt, waarbij Figuur 5 ook een extreme situatie laat zien met een soortelijke weerstand van 4000 Ωm . Deze waarden van de soortelijke bodemweerstand komen voor bij droge grond en rotsbodems. Waarden van 10 tot 100 Ωm zijn typisch voor vochtige en organische bodemsubstanties.¹⁸

In Figuur 6 is de extreme situatie van 4000 Ωm weggelaten. Te zien is dat de stapspanning rondom het injectiepunt zeer snel afvalt voor de situaties die meer normaal zijn in Nederland.

4.3.2 Invloed van de stroomsterkte

De invloed van de stroomsterkte is bepaald door de stroomsterkte te variëren tussen 1 en 5A. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 7.

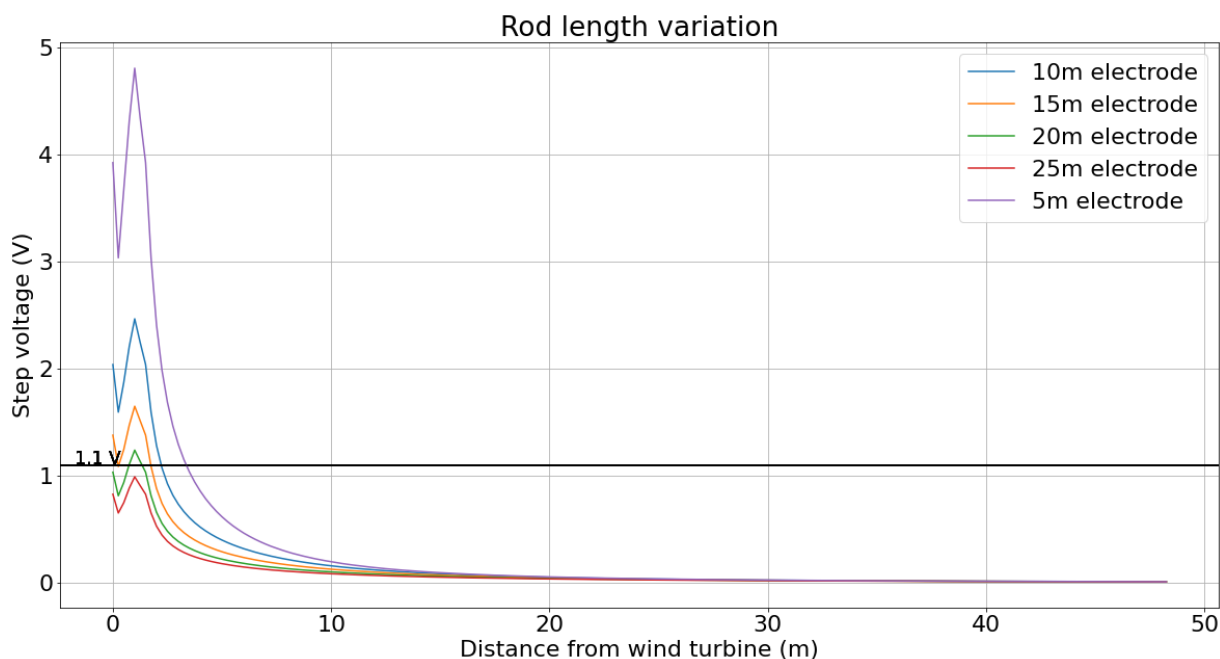
¹⁸ IEEE Std. 80-2015, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, DOI: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078.



Figuur 7 Stapspanning voor stapgrootte van 1,5 meter uitgezet tegen afstand van de windturbine voor verschillende geïnjecteerde stroomsterktes.

4.3.3 Invloed van de elektrodelengte

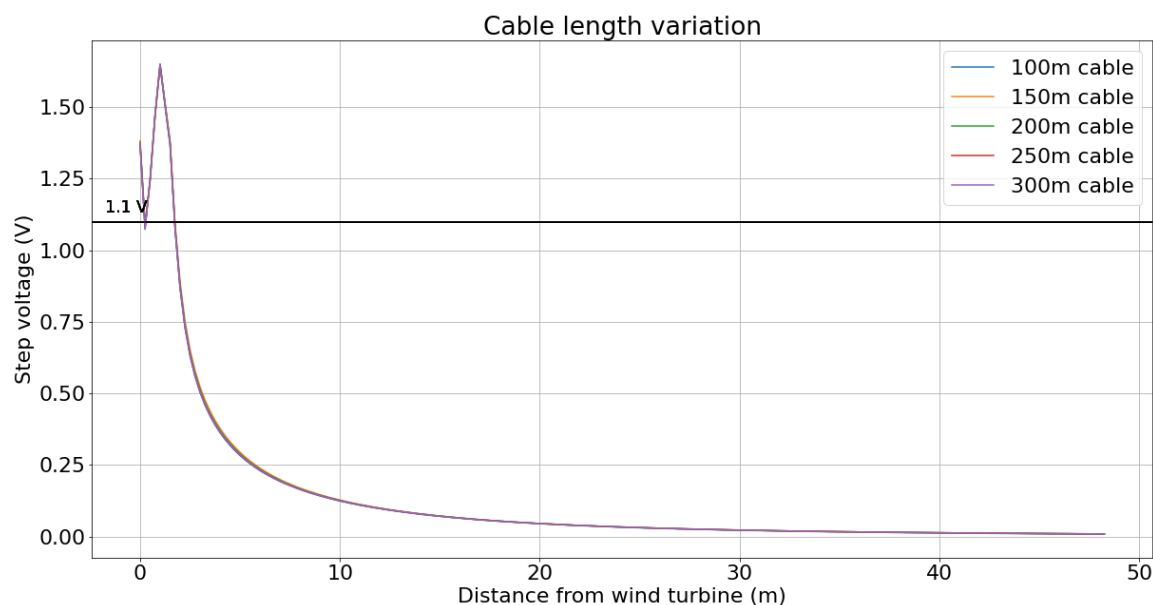
De elektrodelengte van de zes verticale elektroden bij de windturbine is gevarieerd. In Figuur 8 is het effect voor de standaardwaarde (15 meter) weergegeven, samen met twee situaties met kortere (5 en 10 meter) en twee situaties met langere aardelektroden (20 en 25 meter). Te zien is dat de stapspanning varieert met de lengte van de aardelektroden. Aangezien de lengte van de elektroden bepaalt hoe goed de stroom afgevoerd kan worden naar de bodem, is dit conform verwachting.



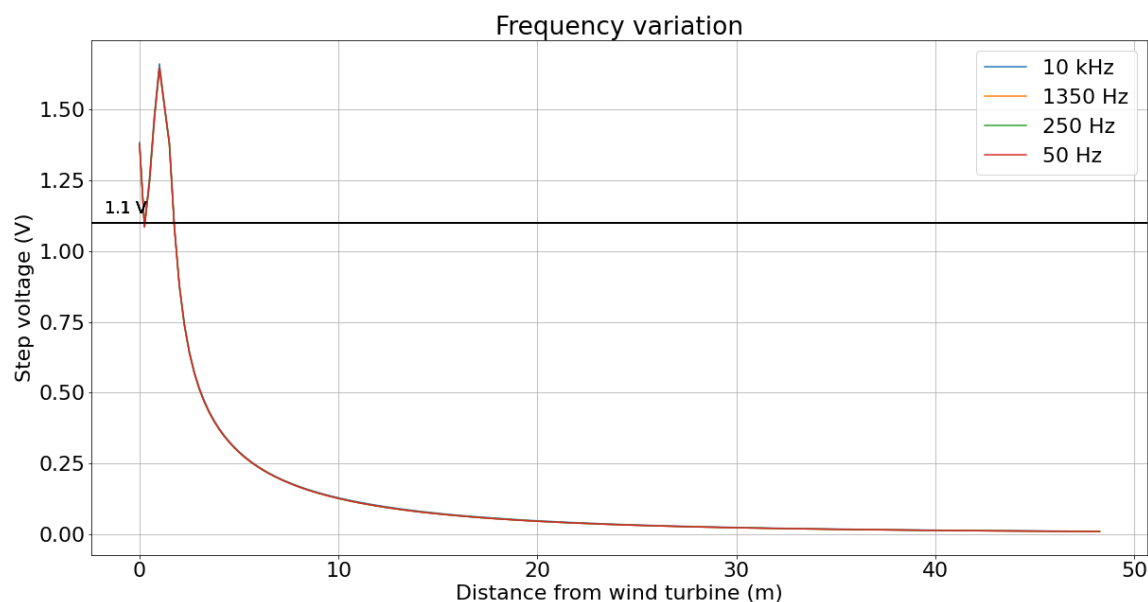
Figuur 8 Stapspanning voor stapgrootte van 1,5 meter uitgezet tegen afstand van de windturbine voor verschillende lengtes van de aardelektroden bij de windturbine.

4.3.4 Invloed van de afstand tussen injectie- en extractiepunt

Ook de afstand tussen injectie- en extractiepunt is gevarieerd. In Figuur 9 is het effect voor de standaardwaarde (200 meter) weergegeven, samen met twee situaties met kortere (100 en 150 meter) en twee situaties met langere afstanden (250 en 300 meter). De grafieken voor alle waarden liggen alle over elkaar heen. De afstand tussen het injectie- en extractiepunt heeft dus geen invloed op de stapspanningen.



Figuur 9 Stapspanning voor stapgrootte van 1,5 meter uitgezet tegen afstand van de windturbine voor verschillende afstanden tussen het injectie- en extractiepunt



Figuur 10 Stapspanning voor stapgrootte van 1,5 meter uitgezet tegen afstand van de windturbine voor verschillende geïnjekteerde stroomfrequenties.

4.3.5 Invloed van de frequentie

Om de invloed van de frequentie te bepalen, is gekeken naar vier verschillende situaties:

1. de netfrequentie (50 Hz)
2. de 5^e harmonische (250 Hz)
3. de 27^e harmonische (1350 Hz)
4. 10 kHz.

De harmonische frequenties zijn gekozen omdat deze regelmatig voorkomen bij omvormers. De 10 kHz is gekozen als een hoge frequentie. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 10. De grafieken voor alle waarden liggen alle over elkaar heen. Te zien is dat voor een homogeen grondmodel de stapspanning niet beïnvloed wordt door de frequentie van de stroom.

4.4 Conclusies parameterstudie

De parameterstudie heeft laten zien dat stapspanningen in beginsel zich als een cirkel verdelen rondom het injectiepunt. Hiervoor is gekeken naar de invloed van de volgende parameters:

- samenstelling van de bodem
- geïnjecteerde stroom
- lengte van de aardelektroden
- afstand tussen injectie en extractiepunten
- frequentie van de geïnjecteerde stroom.

In de resultaten is te zien dat alleen de samenstelling van de bodem en de geïnjecteerde stroom invloed hebben. Dit komt ook overeen met de theorie. De stapspanning voor een homogene bodem zonder elektrode kan namelijk worden uitgerekend met de formule:

$$V_{stap} = \frac{I \rho L_{stap}}{2\pi r (r + L_{stap})},$$

waarin

- V_{stap} : de stapspanning voor een gegeven stapgrootte
- I : de geïnjecteerde stroom
- ρ : de soortelijke weerstand van de bodem
- r : de afstand vanaf het injectiepunt
- L_{stap} : de stapgrootte.

Vanuit deze formule en de simulaties kan worden afgeleid dat:

1. de stapspanning afneemt met $1/r^2$
2. de stapspanning ongeveer lineair is met de geïnjecteerde stroom
3. bij verdubbeling van de stroom de afstand tot het punt met dezelfde spanning met een factor $\sqrt{2}$ toeneemt.

Uit de simulaties blijkt dat stapspanningen door maximaal toelaatbare zwervstromen in Nederlandse bodemsoorten al binnen enkele meters van een turbine terugvallen tot een niveau dat voor landbouwdieren niet merkbaar is. Op grotere afstanden, vanaf ongeveer 50 meter, is de invloed van een windturbine op landbouwdieren – zelfs bij een defect – praktisch verwaarloosbaar.

5 CONCLUSIES

Gezien de bodemgesteldheid in Nederland, de normen en eisen voor windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen, de theoretische foutscenario's en de vereiste beveiligingen, is het uitgesloten dat zwerfstromen een voor landbouwdieren waarneembaar niveau bereiken. Windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen veroorzaken door hun ontwerp geen zwerfstromen op het openbare elektriciteitsnet.

De belangrijkste situaties waarin zwerfstromen bij vee kunnen ontstaan, zijn gevallen waarin netstroom (50 Hz) op plekken terechtkomt waar dat niet hoort, bijvoorbeeld:

- een aardfout in een bedrijf die niet wordt afgeschakeld door een aardlekschakelaar, of
- een slecht aangelegde of defecte aarding/vereffening bij een agrarisch bedrijf.

Berekeningen laten zien dat in slecht aangelegde kabelsystemen aanzienlijke stromen via metalen kabelmantels kunnen ontstaan. Omdat deze kabelmantels echter geïsoleerd zijn ten opzichte van de bodem, kunnen ze geen zwerfstromen in de grond veroorzaken.

Windturbines, zonneparken en batterijopslagsystemen kunnen kleine hoogfrequente lekstromen produceren, maar die verspreiden zich niet over grote afstanden in de grond. Ze blijven binnen het metalen systeem en lopen terug via de kabelmantels en het aardingssysteem.

Simulaties tonen aan dat stapspanningen door maximaal toelaatbare zwerfstromen in Nederlandse bodems al binnen enkele meters terugvallen tot een voor landbouwdieren niet merkbaar niveau, zelfs onder ongunstige bodemomstandigheden. Op grotere afstanden, bijvoorbeeld 50 meter, is de invloed van een windturbine, zonneparken en batterijopslagsystemen op landbouwdieren – ook bij een defect – praktisch verwaarloosbaar.

APPENDIX A

Wind farms and stray currents

This appendix focuses on where measurable ‘stray currents’ associated with wind farms can originate, and which operating or failure conditions can increase them. Throughout, it is useful to distinguish:

- nominal frequency (50 Hz) currents that can create neutral-to-earth or contact-voltage conditions, versus
- high-frequency common-mode currents (kHz range) driven by power electronics and cable capacitances, which mainly circulate in metallic return paths and typically attenuate rapidly with distance.

Wind turbines are designed with earthing and equipotential bonding concepts for lightning and safety per IEC 61400-24 and the general HV installation earthing framework in IEC 61936-1.

A.1 Stray Current Sources

A.1.1 Wind turbine sources

Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) wind turbines use a partial-scale converter, consisting of rotor-side and grid-side converter, that switches in the kHz range. These converters and their EMC filters create a common-mode voltage with respect to the turbine structure and earth. The return path is typically through:

- converter “Y” capacitors / filter capacitors to PE
- parasitic capacitances of generator windings to frame
- transformer inter-winding capacitances
- the bonded tower/foundation reinforcement and the local earthing electrode system.

This implies that the turbine can be a source of high-frequency earth/PE currents that circulate locally, within the turbine, foundation earthing and cable screens, rather than exporting a continuous 50 Hz leakage current into surrounding soil.

A conservative way to contextualize magnitude is to treat the dominant mechanism as capacitive:

$$I_{CM} \approx \omega C_{eq} V_{CM}$$

where C_{eq} is the effective capacitance from the switching network to earth and V_{CM} is the common-mode voltage component.

Because V_{CM} is switching-frequency rich and C_{eq} is highly design-specific, the resulting currents can range from milliamps to amps at high frequency, depending on turbine platform, filter design, and bonding. These currents are not “injected into the soil” as a long-distance phenomenon as they return via metallic paths including the cable screens and the equipotential bonding network.

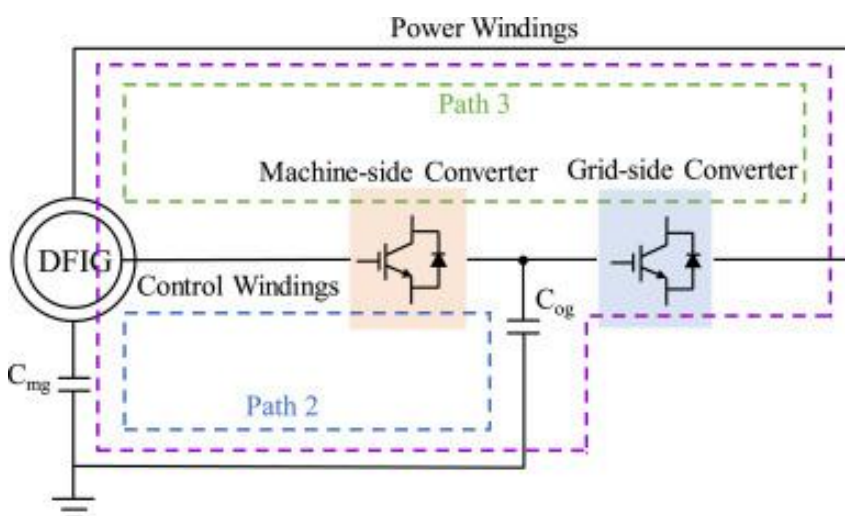


Figure A-1 Stray current paths of I_{CM} in DFIG wind turbines

A.1.2 Transformer capacitive coupling and screen/PE return

Most onshore turbines include a step-up transformer. Even where the LV side is delta or floating/impedance-referenced, as is typical for DFIG platforms, transformer capacitances can couple switching-frequency components onto the LV frame, MV cable screens, and the tower earthing system. This again tends to appear as circulating screen/PE current within the system of the wind turbine, and not as a 50 Hz leakage current into remote terrain.

A.1.3 Lightning transient earthing

Turbines are intentionally designed to conduct lightning currents to earth according to IEC 61400-24 and IEC 62305-1.

Lightning is of a very short transient nature, and therefore distinctly different from nominal 50 Hz stray-currents. However, a lightning event can expose weaknesses in bonding/screen connections that later manifest as abnormal steady-state behaviour, such as damaged screen bonds.

A.1.4 MV collector-grid cable sources

Even with perfect turbines, MV collector cables can produce measurable currents in screens and bonded metallic parts due to fundamental electromagnetic principles. All MV XLPE cables have phase-to-screen capacitance. Each phase draws a capacitive charging current:

$$I_C = \omega C_{ph} V_{ph}$$

For long cable routes, I_C becomes non-trivial and must flow somewhere. In most practical collector systems, a significant portion returns via the cable screens and substation earthing arrangements, depending on bonding design.

Typical 33 kV single-core cable specification shows capacitance values on the order of 0,4-0,8 $\mu\text{F}/\text{km}$ depending on conductor size. Assuming a representative case:

- system voltage: 33 kV, 50 Hz $\rightarrow V_{ph} = 33/\sqrt{3} \approx 19,05$ kV
- cable capacitance: $C = 0,74$ $\mu\text{F}/\text{km}$
- feeder length: $L = 20$ km
- total phase capacitance: $C_{ph} = C \cdot L = 0,74 \times 20 = 14,8$ μF
- $\omega = 2\pi f = 314$ rad/s.

Then:

$$I_C \approx 314 \cdot 14,8 \times 10^{-6} \cdot 19,050 \approx 89 \text{ A per phase.}$$

That is an order-of-magnitude indication of 50 Hz reactive charging current associated with a long MV cable route. This displacement current returns via the network's intended bonding/earthing paths.

Screen/sheath circulating currents due to magnetic induction

Single-core cables carrying large phase currents induce voltages in metallic screens/sheaths. The resulting screen currents depend on:

- bonding method: both-end bonding vs single-point bonding vs cross-bonding
- formation: trefoil vs flat
- whether phases are transposed, and
- the presence/absence of cross-bonding.

Flat formation and lack of transposition typically increase unbalance of induced effects between phases and can increase circulating currents in screens when bonded at both ends. This is widely treated in technical literature on sheath induced currents and losses. The circulating currents in both-side bonded circuits are illustrated in Figure A-2.

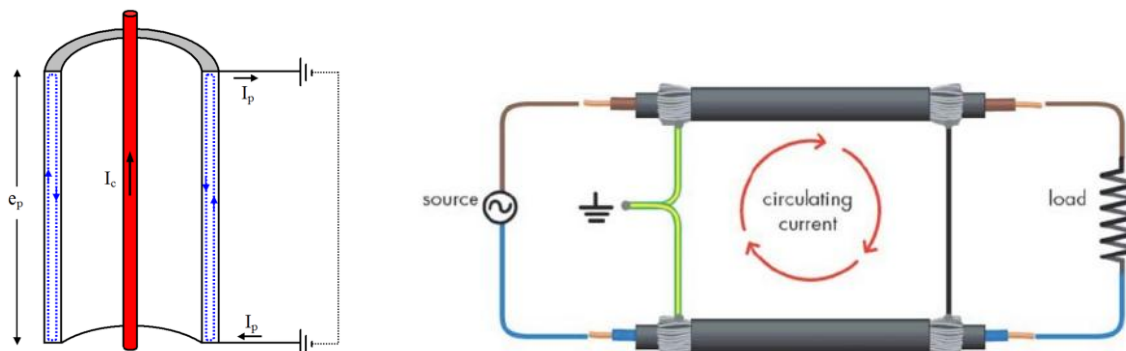


Figure A-2 Cable system circulating current depiction

Screen currents are a normal electromagnetic by-product of MV cable systems, and their magnitude can be significant in high-current segments of a wind farm collector grid if bonding, formation and installation choices are not well considered.

A.2 Operational or failure modes that can increase stray currents

The following conditions can produce sustained 50 Hz earth-return current that is more relevant to stray-voltage concerns.

A.2.1 Operating conditions

The closer a cable segment is to the substation, the more turbines it aggregates. As current increases, induced screen currents scale accordingly. For example: assuming the largest commercially available 6,1 MW onshore wind turbine platform as using a doubly fed induction generator (DFIG). For a single 6,1 MW turbine at 33 kV:

$$I \approx \frac{P}{\sqrt{3}V} = \frac{6,1 \times 10^6}{1,732 \times 33 \times 10^3} \approx 107 \text{ A}$$

If an upstream collector cable carries ten such turbines, for example, the line current is roughly:

$$I \approx 10 \times 107 \approx 1070 \text{ A}$$

At these current levels, any both-end bonded, flat-formation, non-transposed cable section has the potential to develop material screen currents and associated losses and heating. The exact fraction is design specific. Even without failures, real installations have spacing irregularities, joint bays, route deviations, and parallel metallic infrastructure. These factors can all create unequal induced effects, increasing circulating currents and local potential differences along metallic parts.

There are some published illustrative examples that indicate a 33 kV cable circuit carrying 100 A per phase, having sheath currents on the order of 65 A, with a 0.2m conductor spacing. If sheath current scales approximately linearly with phase current for a given geometry, then the 65 A sheath current at 100 A phase current implies an estimated sheath circulating current per phase screen at 1,070 A:

$$I_{sheath} \approx k I_{phase} \approx 0,65 \times 1070 \approx 696 \text{ A}$$

This example is considered extremely onerous to illustrate what is possible, however, in all real installations, the value will be materially lower due to different spacing, cable construction, use of 3-core cables, different bonding, and because the loop impedance is not purely resistive.

It is also crucial to separate circulating currents in the metallic screen loop along the cable, versus net currents injected into the soil. In a classic both-end bonded arrangement, the sheath current primarily circulates in the metallic sheath and screen loop. Earthing systems participate at the bonding points, such as the turbine earthing, joint bays and substation earth grid, because the screen is connected to earth there.

A simple conservative way to give context to the earth return portion is that the screen current must enter and leave the earthing network to complete the loop. This implies that if the loop is roughly symmetric, the magnitude of earth-electrode current at each end can be on the order of $\sim 1/2$ of the circulating sheath current.

$$I_{earth,end} \sim \frac{I_{sheath}}{2}$$

So, using the illustrative $I_{sheath} \approx 696$ A:

$$I_{earth,end} \sim 350 \text{ A}$$

That does not mean 350 A is flowing through the soil in the pasture or ground at every location. It means that hundreds of amps could, in an extreme bonding scenario, be exchanged between the cable screen circuit and the wind farm earthing network at the screen, near bonding points. How far those currents spread in the ground, and whether they create any meaningful contact voltages, depends mainly on the earthing network topology, soil resistivity layering, and the presence of other low-impedance metallic return paths like pipes, fences, telecom earths, etc.

This example shows that screen/sheath circulating currents in flat formation can be a substantial fraction of phase current and therefore can reach tens to hundreds of amps in principle. Whether any of this can translate into measurable stray voltage requires a separate, site-specific pathway analysis

A.2.2 Negative-Sequence / Unbalance Control

Negative-sequence current (I_2) represents phase unbalance due to unequal phase currents. Zero-sequence current (I_0) is the component that produces net return through neutral/earth. For a 3-wire system, $I_0 = (I_a + I_b + I_c)/3$.

Modern inverter-based resources (IBRs), including wind turbine generator, PV, and battery systems, often implement negative-sequence control to:

- comply with grid codes during unbalanced faults
- limit generator heating (for DFIG)
- control torque oscillations
- inject controlled current components for fault ride-through.

This is common practice in transmission-connected wind and solar parks and is typically mandated by TSO grid codes in Europe. However, negative sequence current does not, by itself, require earth return. Earth/neutral current is associated with zero sequence. Even under controlled negative-sequence injection:

$$I_a + I_b + I_c \approx 0 \Rightarrow I_0 \approx 0$$

Therefore, intentional negative-sequence control does not inherently create sustained earth current. Zero-sequence current implies:

$$I_a + I_b + I_c \neq 0$$

That means there must be a return path for current outside the three phase conductors, typically:

- neutral conductor and cable screens
- earth
- metallic structures

In onshore wind farms, the MV collector grid is a 3-wire topology. The only defined earth connection is at the substation via NER. Turbine step-up transformers often have delta on one side and there is no distributed neutral. In a 3-wire MV system, zero-sequence current cannot circulate unless a ground fault exists.

Even if the converter instructs a zero-sequence current, the network physically blocks it. The delta winding blocks zero-sequence transfer, and the 3-wire topology prevents sustained zero-sequence circulation.

A.2.3 Faults and abnormal conditions

Phase-Ground fault

In a wind farm with a neutral earthing resistor (NER) at the substation, an earth fault creates a defined earth-fault current limited by the resistor, which may be 800 A or 1200 A, for example. Under correct protection, an earth fault is cleared promptly. If such an earth fault is not cleared, due to protection failure or incorrect settings, a significant 50 Hz earth current can persist and cause elevated ground potential rise (GPR) within and near the wind farm earthing system.

This is one of the few mechanisms that can plausibly create sustained 50 Hz earth current at scale. The IEC 61936-1 earthing and verification principles are designed specifically to manage safety under such events.

Cable screen insulation damage

If a cable screen is unintentionally connected to another metallic system, like fences, pipelines, communications earths or agricultural metallic networks, and bonding is not controlled, normal screen currents can be diverted into unintended paths. This can create localized voltage differences on metallic structures, current flowing through building steel or plumbing, all resulting in a measurable neutral-to-earth voltage.

This is again considered an abnormal condition and is not specifically a cause of a normally operating windfarm. Defective insulation systems normally exhibit very small leakage. If a device is degraded, it can conduct more strongly, but this is usually detectable by the protection system and not considered a wide area phenomenon.

Converter/control abnormal operation increasing common-mode currents

While converter-related currents are usually high-frequency, abnormal grounding of EMC filter components, damaged cable terminations, or incorrect PE bonding can significantly increase circulating PE/screen currents. These are typically seen near the turbines and cables, and do not register as long-range soil currents.

Wind farms can exhibit measurable currents in screens, PE/bonding networks, and earthing grids even during normal operation, primarily due to cable capacitance. Converter common-mode effects, which are very high frequency in nature are possible.



About DNV

DNV is the independent expert in risk management and assurance, operating in more than 100 countries. Through its broad experience and deep expertise DNV advances safety and sustainable performance, sets industry benchmarks, and inspires and invents solutions.

Whether assessing a new ship design, optimizing the performance of a wind farm, analyzing sensor data from a gas pipeline or certifying a food company's supply chain, DNV enables its customers and their stakeholders to make critical decisions with confidence.

Driven by its purpose, to safeguard life, property, and the environment, DNV helps tackle the challenges and global transformations facing its customers and the world today and is a trusted voice for many of the world's most successful and forward-thinking companies.