

Rapport: Onderzoek Spanningskwaliteit Elektriciteitsnetwerken

Ons kenmerk : LBE3-973173434-4092
Zaaknummer : Laborelec NV – BE0400.902.582
Datum : 29 juni 2023
Auteur : Anne Dabin, Stijn Uytterhoeven, Ralf Bosch
Versie : Definitief
Aantal pagina's : 87



Samenvatting

Een goede spanningskwaliteit is van essentieel belang voor het goed functioneren van de installaties van afnemers (verbruikers en producenten) aangesloten op de netten van de netbeheerders. De aanleiding voor dit onderzoek van de Directie Energie van de Autoriteit Consument en Markt (ACM) is een proactieve aanpak van de problematiek ten aanzien van de ontwikkeling van de spanningskwaliteit in Nederland. Op dit moment ziet de ACM een aantal ontwikkelingen die mogelijk van noemenswaardige invloed kunnen zijn op de ontwikkeling van de spanningskwaliteit op korte en lange termijn:

- Een significante afname van het draaiend vermogen door het sluiten van conventionele elektriciteitscentrales
- Diverse aspecten gerelateerd aan de energietransitie, met name de toename van decentrale opwekking van elektriciteit, de grotere mate van onvoorspelbaarheid van de vraag en aanbod en de introductie van andere soorten productie en verbruik
- Waarneembare trends in de ontwikkeling van de spanningskwaliteit, met name de toename van klachten van aangeslotenen op het LS en MS net, de toename van asymmetrie op het HS en EHS net, en een aantal mogelijke incidentele problemen met harmonischen.

Verschillende stakeholders werden geïnterviewd om de standpunten van diverse sectoren te verzamelen over de spanningskwaliteit:

- Grote industriële afnemers en producent aangesloten op HS/EHS netten;
- Residentiële afnemers, via Vereniging Eigen Huis;
- Netbeheerders (TenneT, Coteq, Enexis, Alliander, Stedin);
- Spanningskwaliteit experts (in Nederland en in het buitenland).

De norm EN 50160 blijft het basis instrument voor PQ beoordeling. 39 Europese landen passen deze norm toe voor spanningskwaliteit beoordeling. Dit zorgt voor een geharmoniseerd begrip van spanningskwaliteitsfenomenen in Europa. Slechts een klein aantal landen, waaronder Nederland, stelt PQ-gegevens openbaar beschikbaar. De eisen in de Nederlandse Netcode elektriciteit zijn op een aantal aspecten strenger dan in andere landen alsook dan de EU regelgeving, namelijk voor asymmetrie (strenger limietwaarde en percentiel) en snelle spanningsvariatie (strengere waarde). Wat duidelijk wordt uit de jaarrapportage is dat de spanningskwaliteit in Nederland ver onder de toelaatbare grenzen is die gedefinieerd zijn in de normen, in het bijzonder de Netcode elektriciteit en de Europese norm EN 50160.

Volgens het merendeel van de geïnterviewde personen, is de spanningskwaliteit in het algemeen aanvaardbaar in Nederland. Dit wordt ook bevestigd via de jaarlijkse PQM rapportage en meetgegevens. Als men kijkt naar de evolutie van de spanningskwaliteit in Nederland over de 10 laatste jaren, is er geen toename van overschrijdingen van de Netcode waar te nemen. De impact van de decentrale opwekking is niet zichtbaar op het aantal overschrijding van de PQM meetresultaten, op alle spanningsniveaus. Voor de toekomst verwacht TenneT wel veranderingen in kortsluitvermogen op het (E)HS-net. Dit heeft verschillende oorzaken met zowel een positief als negatief effect.

De RNB heeft in 2022 veel meer klachten ontvangen van consumenten met zonnepanelen waarbij door spanningsklachten de omvormer uitvalt. Consumenten met afschakelende omvormers kunnen een melding doen bij de RNB als er door een installateur is vastgesteld dat in de huisinstallatie geen problemen aanwezig zijn. Ten gevolge van de klachten rond uitschakeling van zonnepanelen, hebben de RNB's in 2021 een projectgroep opgericht om de problematiek van overspanning grondig te bekijken en om met de verschillende stakeholders gesprekken te voeren. De RNB voegt toe dat het probleem van uitschakeling van zonnepanelen te wijten is aan lokale congestie op het LS-net. Uiteindelijk blijven de RMS-10 minuten waarden van de spanning binnen de limieten van de Netcode dus is het voor de netbeheerder op vlak van normering in orde maar maatschappelijk is dit niet wenselijk.

De spanningskwaliteit in het toekomstige energiesysteem zal naar verwachting aanzienlijk worden beïnvloed door de verschuiving naar een koolstofvrij elektrisch energiesysteem. De energietransitie is meer dan een verschuiving van centrale naar decentrale gedistribueerde productie. De energietransitie heeft als gevolg dat de energie stromen op verschillende spanningsniveaus minder voorspelbaar zijn en veranderlijk van richting, waardoor overbelasting waarschijnlijker wordt op sommige punten. De netten dienen te worden versterkt en de uitbating zal moeten worden aangepast om hiermee rekening te houden. Momenteel worden massaal netversterkingen uitgevoerd, zowel op Europees vlak door het verhogen van de interconnectie capaciteit, als op landelijk vlak door het versterken van de transport- en distributie netten.

De systeemsterkte, en met name het kortsluitvermogen dat wordt geleverd door de synchrone generatie-eenheden (SGU¹), heeft het elektriciteitssysteem in staat gesteld om de spanning van het net binnen gespecificeerde limieten te houden, zelfs tijdens extreme events. Er treedt een generatieverschuiving op als gevolg van de energietransitie. Op inverters gebaseerde hernieuwbare energiebronnen (IBR²) zullen in de toekomst een aanzienlijk deel van de elektrische energie leveren. In vergelijking met SGU's is de kortsluitbijdrage van IBR's lager en hun aansluitingspunten bevinden zich vaak in gebieden met een zwakker net. Verminderde systeemsterkte kan bij spanningsdips resulteren in verminderde restspanningen en een groter verspreidingsgebied tijdens kortsluitingen. De energietransitie is meer dan een verschuiving naar decentrale productie. Naast veranderingen in de aansturing van opwekking, verandert de energietransitie de energiestromen in (E)HS-netten. De netten zullen worden versterkt door upgrades van bestaande, door extra verbindingen en de installatie van nieuwe onderstations, wat een positieve invloed moet geven. Ook moeten er aanpassingen in het net gerealiseerd worden om de veranderende vermogensstromen op een juiste wijze te controleren. De huidige HS-netten werden in het verleden vermaasd uitgelegd, met tal van aansluitingen op het EHS-net. Energiestromen in de EHS zullen stijgen, met overbelastingen tot gevolg via de parallelle route van het HS-net. Daarnaast zorgt het uitfasen van SGU's op het net voor een vermindering van de inertie van het netwerk. Draaiende machines zorgen door de inertie van de rotoren voor bijkomende stabiliteit gedurende snelle storingen op het netwerk, waardoor de frequentie stabiliteit beter behouden blijft. Dit moet in de toekomst worden opgevangen door de vermogenelektronische convertorenvormers. Door aanpassen van het dynamisch gedrag van de convertoren omvormers kan hierbij gedeeltelijk aan worden beantwoord. Vanuit de Europese en regionale netcodes worden er richtlijnen uitgevaardigd naar fabrikanten van omvormers om de garantie van productie gedurende frequentieschommelingen te blijven waarborgen. Anderzijds worden er voor grote HVDC verbindingen reeds mechanismen ingebouwd in de regellussen van het actiefvermogen om beter bestand te zijn tegen frequentie schommelingen aan de AC-netzijde.

Het aantal en de verscheidenheid aan apparaten met elektronische voedingen neemt snel toe onder consumenten. Steeds meer apparaten met verschillende elektrische parameters zijn aangesloten op elektrische energiesystemen, en dit maakt het moeilijker om de kenmerken van elektrische energiesystemen te voorspellen. Bijgevolg veroorzaken veel van deze apparaten verschillende soorten problemen te wijten aan de harmonische vervuiling op het net (meestal overbelasting van elementen in het net), wat de betrouwbaarheid van de stroomvoorziening aan consumenten negatief beïnvloedt. In combinatie met de aanstaande integratie van elektrische wagen (EV 's) zullen de distributienetten enorm worden beïnvloed, veel meer dan tegenwoordig door PV-omvormers. De belangrijkste uitdaging is deze nieuwe technologieën binnen de bandbreedte van de spanningskwaliteit toe te passen en de bestaande situatie niet te verslechteren, en daarbij de kosten voor zowel aangeslotenen als netbeheerders minimaal te houden.

De impact van de energietransitie kan vervolgens bekeken worden per verschijnsel met betrekking op de spanningskwaliteit.

Er kunnen grotere en frequentere spanningsvariaties worden verwacht als gevolg van de toenemende penetratie van intermitterende opwekkingsbronnen zoals wind en zon. De impact is het sterkst in delen van het energiesysteem met een lage systeemsterkte. Metingen van **spanningsdips** gedurende drie jaar in het (E)HS en MS netten in Nederland zijn geanalyseerd om de invloed van toekomstige netontwikkelingen te bepalen. De

¹ Synchronous Generation Unit

² Inverter Based Renewable source

impact van het kortsluitvermogen wordt voor enkele typische gevallen bekeken (door middel van regionale 'heatmaps' van de kortsluitniveaus). Door het openen van schakelaars in het net, en het omzetten van vermaasde HV-netten in meerdere radiaal verbindingen (via "load pockets") zal over het algemeen het verspreidingsgebied van de spanningsdips beperkt worden, wat kan beschouwd worden als een positieve impact (minder aangesloten afnemers zouden moeten getroffen worden door een spanningsdip). Maar ze kunnen echter lagere restspanningen veroorzaken voor de afnemers aangesloten op de grenzen van de "load pockets". Het wordt dus geadviseerd dat openen van schakelaars in het netwerk in de buurt van kritieke knooppunten wordt vermeden. Gezien het kortsluitvermogen wordt beschouwd als een lokale parameter, is een studie vereist om de verandering van het kortsluitvermogen in te schatten tussen de bestaande toestand en toekomstige verwacht scenario's. Geen enkel land behalve Nederland past een limiet toe voor het aantal spanningsdips. De limieten zijn gebaseerd op historische gegevens die kenmerkend zijn voor de bestaande situatie.

Flicker wordt gedefinieerd als "een repetitieve en snelle verandering in de amplitude van de belastingstroom, resulterend in een gelijkaardige verandering van de spanning". Deze kan veroorzaakt worden door elektrische voertuigen (EV's). De waarschijnlijkheid van lichtflikkering veroorzaakt door spanningsval is gebaseerd op het aantal EV's dat aangesloten is door gelijktijdig opladen (aantal spanningsstappen). Flicker-conformiteit is een gebied van actief onderzoek, bijzonder vanwege de snel veranderende verlichtingstechnologieën (introductie van de LED lamp). Dit roept vervolgens de vraag op of flikkeringsconformiteitsniveaus geschikt zijn en of flikkeringsbewakingstechnologie relevante resultaten oplevert. Met andere woorden, kan de lichtflikkering geproduceerd door moderne lamptechnologieën nog steeds niet worden beoordeeld door de IEC flikkeringsmeter? De RNB's in Nederland bevestigen dat de PLT / PST waarden soms hoog zijn maar ze krijgen geen klacht van flicker. Er is geen limiet vastgelegd in de norm EN50160, alleen maar indicatieve waarden.

Op laagspanningsniveau genereert de toenemende penetratie van elektrische voertuigen ook **asymmetrie**. De hoge mate van gelijktijdigheid van het opladen van meerdere voertuigen, meestal 's avonds, kan ongebruikelijke situaties met een hoge vraag creëren, vooral vanwege het feit dat veel EV's enkelfasig zijn aangesloten. Als gevolg hiervan wordt een toenemende spanningsasymmetrie in het netwerk waargenomen en ook excessieve stromen in de nulgeleider. Andere technologieën die een negatieve impact zullen hebben, zijn warmtepompen. Energiebeheersystemen gebaseerd op een systeemtechnologie met meerdere agenten, kunnen echter effectief zijn bij het oplossen van netwerkbeheerproblemen. Nieuwe tools die het opladen van EV kunnen coördineren met de andere flexibiliteitsmiddelen die beschikbaar zijn op regionale netten, kunnen in de toekomst nog voordeliger zijn, met de openstelling van de markt voor ondersteunende diensten voor aggregatoren. Op HS-niveau, zijn grootschalige wind- en zonneparken vaak met het net verbonden op afgelegen locaties die worden gevoed door relatief lange niet-getransponeerde lijnen. Hierdoor kan spanningsasymmetrie ontstaan als gevolg van de lijnen, hoewel de wind- of zonneparken gebalanceerde stromen injecteren. Bij TenneT komt het probleem ook door de combiverbinding (combimast) waarin delen van het 110 kV net met het 380 kV net gecombineerd worden. Om de spanningsasymmetrie te verlagen heeft TenneT in 2022 zijn beleid aangepast in een Asset Strategy Document wat nu wordt uitgerold. Nederland hanteert de op één na strengste eisen in Europa voor asymmetrie op het (E)HS-net.

Het optreden van **overspanningen tijdens langzame spanningsvariaties (LSV)**, is het belangrijkste probleem met betrekking tot de spanningskwaliteit bij het aansluiten van duurzame elektriciteitsproductie op het distributienet. Wanneer de LS-netspanning hoger wordt, schakelen PV-installaties uit om de Netcode te respecteren maar maatschappelijk is dit niet gewenst. Thuis-batterijen en bi-directioneel laden kunnen in de toekomst het probleem nog verergeren als hier geen duidelijke afspraken rond gemaakt worden. Naast een gecoördineerde aansluiting van enkelfasige PV op laagspanningsdistributienetten, die bij het verminderen van zowel onbalans als overspanningen helpt, zijn er andere oplossingen om de uitschakeling te vermijden (17), zoals gecoördineerde actieve vermogensregeling (met actieve reactieve vermogen regeling) of gecoördineerde beperking van injectie (evenredige vermindering van het geproduceerde vermogen bij alle aangesloten installaties). Netproblemen zijn niet alleen aanwezig in Nederland, Europees zou hier ook sterker over moeten worden nagedacht en samengewerkt.

Historisch gezien is het beheren van **harmonischen** op alle niveaus een belangrijke kwestie waarvoor systeemstudies, toepassing van normen en implementatie van beperkende maatregelen nodig waren. Door deze

gecoördineerde aanpak zijn de schadelijke effecten van harmonischen onder controle gehouden. Het delen van verantwoordelijkheid is door de CEER geïdentificeerd als een belangrijk principe voor PQ-regulering. Dit betreft onder meer het stellen van maximale niveaus van spanningsverstoringen op het leveringspunt tussen de netbeheerder en zijn afnemers en emissiegrenswaarden voor installaties. Over het algemeen wordt verwacht dat energiesystemen over de hele wereld een toename van harmonische vervorming zullen ervaren naarmate de duurzame transitie vordert. De nadruk op beperking van harmonische emissies krijgt echter meer aandacht en leidt tot een trend in de tegenovergestelde richting, namelijk dat de harmonische emissie van nieuwe industriële aansluitingen in de industrie als geheel op uitrustingsniveau wordt verminderd door de implementatie van meer geavanceerde schakel- en besturingstechnologieën en de strengere handhaving van de Netcode-eisen. Er is inderdaad een trend naar een meer diepgaande focus om gedetailleerde analyses uit te voeren in de planningsfasen. Moderne vermogenselektronica, zoals omvormers, kan zo worden ontworpen en bestuurd dat het net niet wordt belast door harmonischen, maar dit resulteert in iets hogere kosten voor de exploitant van de installatie, daarom wordt deze functie momenteel over het algemeen niet gebruikt. De impact van vermogenselektronica apparaten op de harmonischen en de spanningskwaliteit van primaire netten is momenteel onzeker. Naarmate meer en meer duurzame technologieën worden verbonden met omvormers die vermogenselektronica bezitten, worden de effecten op het netwerk steeds onduidelijker. In sommige situaties kan de interactie van apparaten constructief zijn en problemen met harmonischen/spanningskwaliteit verminderen. In andere situaties kunnen de apparaten op een meer destructieve manier op elkaar inwerken. Er bestaat ook onzekerheid over de lokalisatie van problemen met harmonischen en of deze problemen meer wijdverbreid zullen worden. Aan de gebruikerszijde is er duidelijk nood in Nederland aan eerlijke en gerechtvaardigde methoden om emissiegrenswaarden voor storende installaties in de planningsfase vast te stellen, evenals de beoordeling van de "echte" bijdrage van operationele installaties aan het totaal storingsniveau in het netwerk. Binnen Nederland bestaat momenteel het boekje 'Richtlijnen voor toelaatbare harmonische stromen' waarnaar de Netcode elektriciteit nog steeds verwijst (herziene versie, uitgegeven door EnergieNed in 1997). Dit boekje is achterhaald en de netbeheerders overwegen om een werkgroep in te stellen die het gaat herzien. Doel zou zijn om verbeterde aansluitvoorwaarden en methodieken vast te leggen voor de limieten van harmonische stromen op het aansluitpunt. Dit zoveel mogelijk gebaseerd op praktijkcasussen die nu al voorkomen. Binnen CIGRE is ook een werkgroep gestart (WG C4.63) die nader onderzoek doet naar internationale en nationale harmonische standaarden, regulering en praktijken. De bedoeling zou zijn op basis hiervan 'best practices' te selecteren die als uitgangspunt voor nieuwe internationale normering zijn.

De **hoogfrequente schakelvervorming (supraharmonischen)** die gepaard gaat met het schakelen van de omvormers heeft recent veel academische aandacht gekregen. Het aantal papers over frequenties 2- 150 kHz is fors gestegen tijdens de CIGRE conferentie in 2021 in vergelijking met deze van 2019. Maar hoewel de nieuwste editie van IEC 61000-4-30 enig inzicht bevat in meettechnieken voor deze hoge (2 kHz – 150 kHz) frequentievervorming, staat de meting, analyse, classificatie en limieten van dit PQ-fenomeen nog in de kinderschoenen. Bovendien zijn er maar weinig instrumenten die zelfs maar metingen kunnen uitvoeren bij de vereiste frequenties. Daarbij komt nog het feit dat er weinig begrip is van de praktische impact van golfvormvervorming bij deze frequenties, zelfs als deze aanwezig is op elektriciteitsnetten. Op het regionale net, worden superharmonischen al waargenomen bij E-laden maar (voorlopig) nog zonder problemen. Er lopen studies met E-laad/TU Eindhoven/netbeheerders om het effect van superharmonischen beter in kaart te krijgen (bv. versnelde veroudering van netwerk elementen).

Het huidige power quality meetprogramma (PQM) in Nederland maakt het mogelijk om de algemene trends en evolutie van de spanningskwaliteit in Nederland in kaart te brengen. Op HS en EHS wordt op elke klantaansluiting continu gemeten, terwijl op MS en LS een gedeeltelijkselectie aantal metingen wordt uitgevoerd van de aansluitingen bemeten wordt, vanwege het hoge aantal mogelijke meetpuntenaansluitingen. Voor MS en LS metingen, worden de locaties steekproefsgewijs geselecteerd uit het centraal aansluitingenregister. Het aantal meetpunten is in het algemeen fors gestegen over de afgelopen 10 jaar, waardoor een betrouwbaarheid van 95% kan worden gesteld voor alle continue spanningsverschijnselen. Het huidige meetprogramma geeft een goede weergave van spanningskwaliteit op het net (zowel in gebieden met als zonder decentrale productie), maar geeft onvoldoende informatie over sommige problematieken (bv. uitschakeling van zonnepanelen). De meetdata wordt verzameld op basis van de PQ-normering (Netcode Nederland) en wordt geïnterpreteerd volgens de

limieten van de norm. Op HS en EHS niveau zijn er sinds 2014-2015 maatregelen getroffen om meer specifieke meetpunten te introduceren op plaatsen waar decentrale productie ontwikkeld is. Zo zijn er meetpunten toegevoegd op de aansluitingen voor windparken op zee, en is eveneens het aantal metingen op 50-66 kV fors uitgebreid in 2019. De beschikbaarheid van de meettoestellen in HS is een aandachtspunt. Daarnaast kan verwacht worden dat de niet-beschikbaarheid verder zal oplopen door de ombouw van de telecommunicatie netten. De niet-beschikbaarheid van meetdata loopt op tot circa 20%. Mits er sprake is van een goede opvolging is het mogelijk om de data niet-beschikbaarheid onder de 5% te houden. In LS-netten, zijn er meer en meer klachten te wijten aan uitschakeling van PV. Deze problematiek is niet zichtbaar via PQM gezien de metingen gebaseerd zijn op 10 minuten waarden om de conformiteit met de EN 50160 te kunnen doen. In het algemeen wordt aangeraden om een minimum aantal weekmetingen in de LS en MS-netten te realiseren om een voldoende betrouwbaar zicht te verkrijgen op de PQ. Volgens de aanbevelingen van de CEER, om een betrouwbaarheid van 95% te kunnen garanderen zonder significant verlies van nauwkeurigheid, is een minimum aantal van 200 weekmetingen aangeraden. Om beter in te spelen op de actuele problematiek rond de decentralisatie van de productie zou een verhoging van het aantal weekmetingen op specifieke locaties (wijken met veel PV, warmtepompen, EV's) kunnen worden overwogen. Op specifieke locaties in MS en LS kan men ook overwegen om de momentopname van één week te verlengen als blijkt dat de gekozen meetperiode onvoldoende de normale situatie vertegenwoordigt (bv. door middel van het evalueren van de aanwezigheid van productie van lokale hernieuwbare energie). Een realistische schatting dient te worden gemaakt op basis van een kosten- – baten analyse en dan door de RNB te worden ontwikkeld. In het MS-net worden spanningsdips sinds 2015 geregistreerd met een continu meetsysteem op 200 stationslocaties. Het is aanbevolen om met dit meetsysteem de analyse en de rapportage uit te breiden naar een volledige PQ rapportage.

Voor de publicatie van geaggregeerde PQ-gegevens, die openbaar beschikbaar zouden moeten zijn, raadt de CEER aan om minstens één keer per jaar een rapport te publiceren op het internet. Het rapport moet de naleving van PQ regelgeving en ook een analyse van de waargenomen trends bevatten. De gegevens moeten, indien nodig, beschikbaar worden gesteld aan alle betrokken partijen volgens beveiligingsmechanismen die gericht zijn op de bescherming van de kwaliteit zonder de belangen van netwerkexploitanten en van individuele afnemers te schaden. Voor extra hoogspanning (EHV) en hoogspanning (HV) netten beschouwen CEER (1) het meten van de PQ op alle EHS/HS-, EHS/MS- en HS/MS-onderstations en op de aansluitingspunten van alle EHS- en HS-afnemers, producenten (centrales) en consumenten (industriële afnemers) als een goede praktijk. Monitoring in de EHS- en HS-netten dient op alle meetlocaties permanent plaats te vinden. Permanente meting betekent dat het meetinstrument op dezelfde plaats blijft voor het hele jaar. Gezien de huidige kosten en staat van technologie, wordt permanent monitoren (gedurende 52 weken per jaar) op alle locaties in de MS netwerk niet aanbevolen. Het exacte aantal meetlocaties in MS-netten zal variëren tussen verschillende landen vanwege de specifieke netwerkstructuur en andere lokale omstandigheden. Vergelijkbaar met monitoring in de EHS- en HS-netten, adviseren de CEER dat permanent PQM gedurende een heel jaar (52 weken op elke locatie) moet worden uitgevoerd in de MS netten. De redenen waarom permanente monitoring wordt aanbevolen, zijn dezelfde: om een duidelijk beeld te krijgen van het aantal spanningsevents, zoals spanningsdips, en het maakt de observatie mogelijk van seizoensinvloeden op de PQ in MS netten. In LS-netten moet PQM worden uitgevoerd op de aansluitingspunten van een selectie van LS afnemers. Voor een nationaal monitoringsprogramma dat gericht is op het verkrijgen van een statistisch relevant beeld van de PQ voor alle LS-afnemers, dient een willekeurige steekproef van LS-afnemers in het hele land te worden geselecteerd. Deze willekeurige steekproef van LS-afnemers zal meestal een klein fractie zijn van het totale aantal LS-afnemers in een bepaald land. De PQ bij deze aansluitingspunten kunnen permanent of voor een minimale periode van één week worden bewaakt.

De huidige strategie rond netontwikkeling is momenteel gebaseerd op capaciteitsuitbreiding gedreven door de energie transitie: o.a. de verschuiving van centrale productie richting decentrale productie, de versterking van interconnectie-capaciteit met andere landen, alsook de versterking van lokale netten (MS en LS) ten behoeve van het groeiend aandeel van elektrische verbruik, en ook om de injectie van lokaal geproduceerde energie te kunnen mogelijk te kunnen maken. Vanwege de omvang en de maatschappelijke impact wordt hier prioriteit gegeven aan de meest dringende gevallen. Gerichtere metingen voor deze gevallen, met meer granulariteit, kunnen een beter beeld scheppen van de spanningskwaliteit om deze prioriteiten te bepalen, en de beslissingen die worden genomen in verschillende beleidswerkgroepen beter te sturen. Een belangrijk aandachtspunt is de problematiek

rond overspanning op het net, waarbij de PV-omvormers afschakelen, maar ook de verwachte congestie door massale introductie van warmtepompen en elektrische voertuigen. De RNB's hebben hiervoor in 2021 een specifieke projectgroep "Spanningshuishouding en capaciteit van LS-netten" aangesteld om de ontwikkeling van deze knelpunten in kaart te brengen, alsook wat er regionaal kan gebeuren om deze problemen te voorkomen of op te lossen. Verscheidene partijen nemen deel aan het debat en verdedigen hun standpunten. Spanningskwaliteitsnormen scheppen hier eveneens een objectief kader om de discussies te beheersen. PQM met minder tijdelijke weekmetingen maar met meer vaste toestellen op goed gekozen meetpunten zou een belangrijke indicator kunnen zijn om het evalueren van genomen maatregelen te vergemakkelijken. De RNB's dienen evenwel een duidelijk actieplan op te stellen, dat voldoende technisch en maatschappelijk onderbouwd is.

De monitoring van Power Quality in het distributiesysteem wordt steeds belangrijker. De slimme meters aanwezig in LS en MS (nog geen klasse A meettoestel) geven een steeds beter beeld en deze informatie kan in de toekomst helpen voor het opvolgen van spanningskwaliteit. De spanningsmetingen in de slimme meters worden steeds meer ingezet om het gebrek aan mankracht te compenseren en een beter beeld te krijgen van de spanningskwaliteit in geval van een spanningsklacht. Aangezien de hoeveelheid Power Quality-informatie continu toeneemt met de slimme meters, is er nood aan efficiënte monitoringsystemen, het verzamelen van Power Quality-gegevens en het voorspellen van trends met behulp van geschikte KPI's van strategisch belang voor distributienetbeheerders om de planning en werking van het net te optimaliseren en het behoud van de leveringskwaliteit te garanderen. Wat toekomstige intelligente distributienetten betreft, zal de beschikbaarheid van betrouwbare real-time data en snelle communicatiesystemen van cruciaal belang zijn voor een betrouwbare en kostenefficiënte werking van het net. Big data-analyse is nodig om grote hoeveelheden data te analyseren en te structureren en om patronen, correlaties en trends te herkennen. Vanwege de enorme hoeveelheid meetgegevens blijft handmatige inspectie meestal beperkt tot eenvoudige analyse. Hierdoor blijft het merendeel van de bruikbare informatie in de data onbenut en zijn automatische methodes nodig om de grote hoeveelheid meetdata effectief te verwerken en diepgaand te analyseren. Het toepassen van 'machine learning' en visualisatietechnieken is dus nodig om deze grote hoeveelheden data te analyseren en veranderingen waar te nemen. Doordat de Autoriteit Persoonsgegevens vorig jaar de Gedragscode Slim Netbeheer definitief goedgekeurde, zijn netbeheerders in staat om de spanning op het laagspanningsnet met behulp van de slimme meters te monitoren. Dankzij slimme meters, kunnen dus de RNB's proactief zijn en acties ondernemen. Op korte termijn is dit het meest haalbare alternatief voor de RNB om op LS een acceptabele meetoplossing te ontwikkelen verantwoordbaar vanuit maatschappelijk standpunt.

Op HS en EHS wordt hedendaags op dit moment de spanningskwaliteit aangewend om optimalisaties uit te voeren in de uitrol van nieuwe projecten (bv. ten gevolge van vastgestelde asymmetrie op de spanning het al of niet uitvoeren van fase transposities). Eveneens worden verschillende spanningskwaliteitsparameters gebruikt bij het dimensioneren van nieuwe projecten, om specifiek rekening te houden met de evolutie van intrinsieke netkarakteristieken (bv. Evolutie van kortsluitvermogen in het netwerk), en het vermijden van operationele problemen (ongewenste spanningsvariaties t.g.v. resonantie-effecten). TenneT bekijkt hoe de PQM data beter kan worden gebruikt kan leiden tot meer gefundeerde investeringsbeslissingen en duidelijkere aantoning van de wettelijke naleving van de spanningskwaliteit aan toezichthouders en afnemers. Hulpmiddelen worden ontwikkeld binnen TenneT om de analyses van de PQM gegevens beter te kunnen uitvoeren. Daarmee kunnen de oorzaken van overschrijdingen sneller worden geanalyseerd en helpt dit om gebruikte modellen voor het voorspellen van de evolutie van de PQM te evalueren. Momenteel, zijn de bronnen manueel geïmporteerd, wat zeer tijdrovend is waardoor het onderzoek lang duurt alvorens resultaten bekend zijn. Vanwege de tijdrovende gegevensoverdracht, wordt er beperkt onderzoek gedaan en potentiële problemen worden niet gevonden. De bedoeling is om het correleren van de verschillende bronnen te automatiseren.

De aanbevelingen in dit rapport kunnen als volgt samengevat worden:

1. In het algemeen is er nood aan meer geautomatiseerde data verwerkingssystemen en hulpmiddelen die de analyse van de data intelligenter en minder mankracht behoevend maakt. Big data-analyse is nodig om grote hoeveelheden data te analyseren en te structureren en om patronen, correlaties en trends te herkennen. Momenteel, zijn de bronnen manueel geïmporteerd, wat zeer tijdrovend is waardoor het onderzoek lang duurt alvorens resultaten bekend zijn.

-
2. De netbeheerders dienen meer prioriteit te geven aan de opvolging van de staat van dienst van de (vaste) PQM meetapparatuur, om het gewenste betrouwbaarheidsniveau op peil te houden. De beschikbaarheid van de meettoestellen in HS is een aandachtspunt.
 3. Momenteel dienen afnemers 10 dagen wachttijd in rekening te brengen om informatie via de website van TenneT te verkrijgen over hinderlijke spanningsdips. Aangezien het technisch mogelijk is om dit direct via de meettoestellen te melden, zou een oplossing kunnen zijn om een dipmelding dienst te ontwikkelen waarbij een afnemer direct na het meten van een spanningsdip op zijn aansluiting hierover wordt geïnformeerd (bijvoorbeeld via sms of email).
 4. Gezien supraharmonischen belangrijker worden qua netimpact, wordt het meetbereik in recente meetapparatuur eveneens uitgebreid. Het merendeel van het meetpark is uitgerust met inductieve spanningsmeettransformatoren, die ontworpen zijn om een hoge meetnauwkeurigheid bij de netfrequentie te garanderen en kunnen hoge afwijkingen vertonen voor hogere harmonischen of supraharmonischen. Het is aanbevolen om deze gebreken mee te nemen in de analyse van meetgegevens en de ontwikkeling van specificaties voor nieuwe meetinstallaties.
 5. Gezien het groeiende aantal elektronische omvormers gedreven door de energietransitie, ook op (E)HS niveau, en de evolutie van de interactie tussen de verschillende actoren op het net (met impact op de netimpedantie), is een monitoring en rapportage van de harmonische meetdata en hun evolutie aan te raden, om de impact van individuele harmonischen op het net beter te analyseren. De THD geeft onvoldoende details over de individuele harmonische en hun evolutie. Gezien hiervoor de netcode wordt gevolgd zou hiervoor dienen te worden aangepast door een vermelding te maken rond de rapportage van de individuele harmonischen, zonder hierbij expliciet limieten te vermelden. Dit zou kunnen worden geïmplementeerd tijdens de herziening van het boekje 'Richtlijnen voor toelaatbare harmonische stromen'.
 6. Om beter in te spelen op de actuele problematiek rond de decentralisatie van de productie zouden enkele aanpassingen aan het PQM-systeem in MS en LS kunnen worden overwogen. In het MS-net worden spanningsdips sinds 2015 geregistreerd met een continu meetsysteem op 200 stationslocaties. Het is aanbevolen om met dit meetsysteem de analyse en de rapportage uit te breiden naar een volledige PQ rapportage. Op specifieke locaties in MS en LS kan men ook overwegen om de momentopname van één week te verlengen als blijkt dat de gekozen meetperiode onvoldoende de normale situatie vertegenwoordigd.
 7. Gezien het groeiende aantal klachten te wijten aan uitschakeling van zonnepanelen en de grote evolutie van het net te wijten aan de energietransitie, is er een duidelijke nood aan een aangepast meetprogramma gekoppeld aan klachten/nieuwe technologie om hun impact op het net te kunnen volgen. Deze nood vereist andere aanpak voor locatie en kleinere tijdsintervalmetingen. De slimme meters kunnen ook gebruikt worden om spanningsproblemen op LS netten te anticiperen en eveneens gegevens te verzamelen met een hogere tijdsgranulariteit (waarden met een tijdsinterval kleiner dan 10 minuten) op kritieke momenten.
 8. Als bijkomende info over de evolutie van het net en de impact van de energietransitie op spanningskwaliteit, zou het ook nuttig zijn om het jaarlijkse aantal niet-hinderlijk dips en de overspanningen (swells) weer te geven in de jaarrapportage en op de website www.uwspanningskwaliteit.nl (voor LS/MS-netten).
 9. Voor snelle spanningsvariaties en spanningsasymmetrie zijn de limieten in de Nederlandse Netcode strenger dan in andere landen en de EU regelgeving, zowel voor netbeheerders als aangeslotenen. De huidige relatief strenge eis is niet consistent met de Europese praktijk en leidt tot incidentele overschrijdingen en soms kostbare maatregelen (meer fasewisselingen dan wellicht strik noodzakelijk). De huidige relatief strenge eis rond snelle spanningsvariaties (die ook bij N-1 en N-2 van toepassing is) leidt soms tot kostbare maatregelen (zoals gesynchroniseerd schakelen van transformatoren). Dit kan nadelig zijn en belemmerend voor de energietransitie. Deze eisen in de Nederlandse Netcode kunnen heroverwogen worden.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Lijst met afkortingen	11
1. Inleiding	12
1.1. Context	12
1.2. Onderzoeksvragen	13
1.3. Aanpak en hoofdstukindeling	14
2. Huidig meetprogramma in Nederland (PQM)	15
2.1. PQM in Nederland	15
2.1.1. Spanningsniveaus	15
2.1.2. Locaties	15
2.1.3. PQ indicatoren en normen	17
2.1.4. Rapportage	20
2.2. Ontwikkelingen van de spanningskwaliteit	21
2.2.1. LS- & MS-net	22
2.2.2. (E)HS-net	25
3. Uitdagingen van de energietransitie	38
3.1. Flicker	40
3.2. Asymmetrie	40
3.3. Spanningsdips	41
3.4. Langzame spanningsvariaties	42
3.5. Harmonischen	43
3.6. Supraharmonische	45
3.7. Mitigatie	46
3.8. Big Data	47
3.9. Power Quality Monitoring & regulering	47
4. Best practices	49
4.1. PQM in het buitenland	49
4.2. Regelgeving in het buitenland	49
4.2.1. Snelle spanningsvariaties	52
4.2.2. Spanningsasymmetrie	55
4.2.3. Spanningsdips	56
4.3. Gemeten parameters & PQM praktijken	58
4.3.1. Drivers voor PQM	58
4.3.2. België	60
4.3.3. Portugal	60
4.3.4. Australia	61
4.3.5. Monitoring in EHS en MS netten	62
4.3.6. Monitoring in MS netten	62
4.3.7. Monitoring in LS netten	63
4.3.8. Statistische aanpak voor het selecteren van monitoring locaties	65
4.3.9. Rapportage	66
4.3.10. Vergoeding	67
4.4. Spanningskwaliteit op niveau van consument	67
4.4.1. Individuele contract voor spanningskwaliteit	67
4.4.1. Emissie limiet	67
4.5. Aanpassing van normen	68
4.5.1. Langzame spanningsvariatie	69
4.5.2. Snelle spanningsvariatie	69
4.5.3. Spanningsasymmetrie	70

4.6.	Aanpassing van de PQ monitoring	72
5.	Beantwoording onderzoeksvragen	74
5.1.	Voldoet het huidige meetprogramma (PQM) aan de behoefte van de netgebruikers en netbeheerders?	74
5.2.	Wat zijn de grootste uitdagingen voor de spanningskwaliteit in relatie tot de energietransitie en hoe kan hiermee worden omgegaan?	77
5.3.	Wat zijn de best practices t.a.v. de regulering en monitoring van de spanningskwaliteit en hoe kunnen de ACM en netbeheerders dit soort voorbeelden implementeren in Nederland?	80
6.	Aanbevelingen	83
7.	Bronnen	85

Lijst met afkortingen

ACM	Autoriteit Consument en Markt
LS	Laagspanning
MS	Middenspanning
HS	Hoogspanning
EHS	Extra Hoogspanning
PQM	Power Quality Monitoring
THD	Total Harmonic Distortion – Totale Harmonische Vervorming
IEC	International Electrotechnic Commission
UPS	Uninterruptible Power Supply – Ononderbreekbare voeding
LSV	Langzame Spanningsvariatie
PLT	Lange Termijn Flicker Perceptie
PST	Korte Termijn Flicker Perceptie
RNB	Regionale Netbeheerder
HVDC	High Voltage Direct Current – Hoogspanning in gelijkstroom
CIGRE	Internationale Raad voor Grote Elektrische Systemen
CIREN	Internationale Conferentie voor Elektriciteit Distributie
LL	Line-to-Line – Fase naar Fase
LE	Line-to-Earth – Fase naar Aarde
CEER	Council for European Energy Regulators – Raad van Europese Energie Regulators
EV	Elektrisch voertuig
SGU	Synchronous Generating Unit - Synchrone Opwek Eenheid
IBR	Inverter-based Renewables - Hernieuwbare Energiebron gebaseerd op omvormers
KPI	Key Performance Indicator
LCT	Low Carbon Technology - Lage Koolstofemissie Technologie
CENELEC	Europees Committee voor Electrotechnische Standardisatie
RVC	Rapid Voltage Variation – Snelle Spanningsvariatie
CFL	Compact Fluorescent Lamp
LED	Light Emitting Diode
DTe	Dienst uitvoering en toezicht Energie
VEMW	Vereniging voor Energie, Milieu en Water
ANSI	American National Standards Institute
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
AMI	Advanced Metering Infrastructure
TNB	Transmissie Net Beheerder

1. Inleiding

1.1. Context

De aanleiding voor dit onderzoek van de Directie Energie van de Autoriteit Consument en Markt (ACM) is een proactieve aanpak van de problematiek ten aanzien van de ontwikkeling van de spanningskwaliteit in Nederland.

Een goede spanningskwaliteit is van essentieel belang voor het goed functioneren van de installaties van afnemers (verbruikers en producenten) aangesloten op de netten van de netbeheerders. Spanningskwaliteit is een kwaliteitsaspect dat vanuit de Elektriciteitswet niet aan één partij als eigendom toe te schrijven is. De netbeheerders hebben hierin een belangrijke, misschien de belangrijkste, rol. Tevens hebben de afnemers ook een rol die meestal ligt in de sfeer van de naleving van de wettelijke voorschriften ten aanzien van het juiste gebruik van de toestellen en installaties.

De ACM heeft circa tien jaar geleden haar verantwoordelijkheid genomen en een uitgebreid onderzoek laten verrichten naar de actualiteiten die te maken hebben met de spanningskwaliteit. Dat onderzoek heeft geleid tot een aantal vervolgvacaties die netbeheerders hebben opgepakt en vervolgens zijn geïmplementeerd.

De Nederlandse afnemers, met uitzondering van een aantal locaties, hebben een goede spanningskwaliteit. Het extra investeren in het verbeteren van de spanningskwaliteit is gemoeid met kosten die mogelijk niet altijd doelmatig zijn.

Op dit moment ziet de ACM een aantal ontwikkelingen die mogelijk van noemenswaardige invloed kunnen zijn op de ontwikkeling van de spanningskwaliteit op korte en lange termijn. Hierbij enkele voorbeelden:

1. Een significante afname van het draaiend vermogen door het sluiten van conventionele elektriciteitscentrales. Het gevolg hiervan zal zichtbaar zijn in een noemenswaardige afname van kortsluitvermogen en daarmee direct leiden tot mogelijk grote effecten voor de spanningskwaliteit, in het bijzonder spanningsdips en snelle spanningsverschijnselen.
2. Diverse andere aspecten van de energietransitie zoals:
 - a. Toename van de decentrale opwekking van elektriciteit,
 - b. Grotere mate van onvoorspelbaarheid van de vraag en aanbod,
 - c. Andere soorten productie en verbruik – steeds meer elektronisch gestuurde regelingen bij productie en steeds meer niet-lineaire belastingen (bv. LED verlichting).
3. Waarneembare trends in de ontwikkeling van de spanningskwaliteit:
 - a. Toename van klachten van de op LS en MS netten aangesloten afnemers ten aanzien van langzame en snelle spanningsvariaties. We zien op dit moment een toename van uitval van de zonnepanelen bij kleinverbruikers als gevolg van een te hoge spanning,
 - b. Toename van de asymmetrie op HS en EHS netten,
 - c. Een aantal mogelijk incidentele problemen met harmonischen.

De veranderingen die de energietransitie met zich meebrengt hebben direct dan wel indirect invloed op de spanningskwaliteit. De vraag is hoever de spanningskwaliteit verder kan degraderen zonder dat dit noemenswaardige gevolgen heeft voor de afnemers. Ook is de vraag welke slimme oplossingen mogelijk zijn tijdens het netontwerp, waardoor een mogelijke verslechtering binnen de acceptabele grenzen blijft. De ACM ziet op dit moment enkele vormen van de verslechtering van de spanningskwaliteit. Mogelijk hebben deze vormen van verslechtering een tijdelijke karakter, maar het kan ook dat deze verslechtering zich voortzet de komende jaren. Afnemers en vertegenwoordigers van de afnemersorganisaties (zoals de Vereniging voor Energie, Milieu en Water (VEMW)) pleiten voor het behoud van de huidige spanningskwaliteit.

De toezichthouder ACM heeft Laborelec opdracht gegeven om onderzoek te doen naar de spanningskwaliteit van de elektriciteitsnetten in Nederland.

1.2. Onderzoeksvragen

De onderzoeksvraag is op te delen in een drietal onderwerpen met betrekking tot de spanningskwaliteit van de elektriciteitsnetten in Nederland:

1. Toetsing huidig meetprogramma aan behoeftes netbeheerders en gebruikers;
2. Energietransitie en hieruit volgende uitdagingen voor de spanningskwaliteit;
3. Aanpassing van regulering en monitoring;

ACM heeft voor dit onderzoek drie hoofdvragen gedefinieerd die ieder onderverdeeld zijn in subvragen:

1. Voldoet het huidige meetprogramma (PQM) aan de behoefte van de netgebruikers en netbeheerders?
 - a. In hoeverre geeft het huidige meetprogramma een goede weergave van de actuele ontwikkelingen t.a.v. de spanningskwaliteit?
 - b. In hoeverre geeft het huidige meetprogramma een goede weergave van de actuele ontwikkelingen t.a.v. de spanningskwaliteit in de gebieden waar decentrale opwekking dominant aanwezig is?
 - c. Zijn er aanpassingen in het meetprogramma noodzakelijk of wenselijk?
 - d. Zou een beter inzicht in de spanningskwaliteitsontwikkelingen de netbeheerders kunnen helpen bij het slimmer ontwerpen van hun netten en het realiseren van kostenverlagingen? Zo ja, op welke manier?
 - e. Zijn er alternatieve methoden waarop de netbeheerders de spanningskwaliteit kunnen meten en in kaart brengen? Bij de beantwoording van deze vragen dient rekening te worden gehouden met de resultaten die het huidige meetprogramma oplevert en in werkelijkheid waargenomen problemen bij de afnemers.
2. Wat zijn de grootste uitdagingen voor de spanningskwaliteit in relatie tot de energietransitie en hoe kan hiermee worden omgegaan?
 - a. Welke ontwikkelingen t.a.v. de energietransitie zijn, naast de problematiek rondom het draaiend vermogen, het meest bepalend voor de spanningskwaliteit?
 - b. Hoe wordt omgegaan met de afname van draaiend vermogen in andere EU landen?
 - c. Hoe wordt in andere EU landen omgegaan met overige spanningskwaliteitsproblemen?
3. Wat zijn de best practices t.a.v. de regulering en monitoring van de spanningskwaliteit en hoe kunnen de ACM en netbeheerders dit soort voorbeelden implementeren in Nederland?
 - a. Op welke onderwerpen liggen de kansen voor een eventuele aanscherping dan wel verruiming van de normen?
 - b. Op welke manier kan het meetprogramma PQM een meer representatieve weergave geven van de spanningskwaliteit?
 - c. Wat zijn de beste practices t.a.v. de monitoring van de spanningskwaliteit?
 - d. Hoe kunnen best practices t.a.v. de regulering en monitoring van de spanningskwaliteit geïmplementeerd worden in Nederland?

1.3. Aanpak en hoofdstukindeling

Ter beantwoording van de onderzoeksvragen is de volgende onderzoek aanpak gehanteerd:

1. Concretisering van de onderzoeksvraag middels het inwinnen van informatie bij diverse betrokken partijen (afnemers, producenten, netbeheerders en experts);
2. Raadpleging van nationale en internationale literatuur;

Het eerste deel (hoofdstuk 2) bevat het toetsen van de bestaande PQM in Nederland met de betrokken partijen.

Het tweede deel (hoofdstuk 3) beschrijft de uitdagingen als gevolg van energietransitie en hun impact op de spanningskwaliteit.

Het laatste deel (hoofdstuk 4) beschrijft hoe de PQM wordt beheerd in andere Europese landen.

2. Huidig meetprogramma in Nederland (PQM)

Dit hoofdstuk beschrijft de in Nederland toegepaste monitoring op het gebied van spanningskwaliteit, ook wel 'Power Quality Monitoring' (PQM) genoemd.

De eerste paragraaf bevat de beschrijving van PQM zoals nu toegepast in Nederland.

Het tweede deel geeft de standpunten van de verschillende betrokken partijen over de huidige PQM weer, alsook een zicht op de evolutie van de spanningskwaliteit in Nederland op basis van de PQM meetdata.

Binnen dit onderzoek zijn enquêtes gehouden onder netgebruikers, regionale netbeheerders (Alliander, Coteq, Enexis & Stedin) en transportnetbeheerder (TenneT) om te toetsen of het huidige meetprogramma (PQM) aan de behoefte van de netgebruikers en netbeheerders nog voldoet.

De volgende partijen zijn door Laborelec geïnterviewd: VEMW, NXP, Tata Steel Europe, HYCC, NWEA, Energie Samen, Energie-Nederland, ENGIE, Vattenfall, Uniper Energy, Vereniging Eigen Huis, NieuweStroom.

Een professor van TU Eindhoven en een van UCLouvain zijn ook geïnterviewd.

2.1. PQM in Nederland

De netbeheerders voeren ieder jaar het project 'Spanningskwaliteit in Nederland' uit via de brancheorganisatie Netbeheer Nederland. De overheid stelt eisen aan de elektriciteitsnetten van Nederland door middel van wetten en regels, waaronder spanningskwaliteitscriteria. Controle op naleving van deze eisen wordt gedaan door de Autoriteit Consument & Markt (ACM). Dit project wordt ook wel het PQM-project genoemd en geeft op basis van metingen inzicht in de spanningskwaliteit van de Nederlandse elektriciteitsnetten.

De selectie, verwerking en toetsing van de metingen wordt door een onafhankelijk advies- en ingenieursbureau uitgevoerd.

De Netcode elektriciteit vloeit voort uit de Elektriciteitswet 1998. In deze code is bepaald dat de spanningskwaliteit moet voldoen aan een aantal kwaliteitscriteria. Over de uitgevoerde metingen wordt jaarlijks gerapporteerd in het rapport 'Spanningskwaliteit in Nederland'.

2.1.1. Spanningsniveaus

Binnen het PQM project wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende netten:

- *Laagspanning* (LS): nominale spanning ≤ 1 kV
- *Middenspanning* (MS): nominale spanning > 1 kV en < 35 kV
- *Hoogspanning* (HS): nominale spanning ≥ 35 kV en ≤ 150 kV
- *Extra Hoogspanning* (EHS): nominale spanning > 150 kV en ≤ 380 kV

2.1.2. Locaties

De meetlocaties ten behoeve van de registratie van de kwaliteit van transport van elektriciteit zijn bepaald in de Netcode artikel 7.4 (versie 18/12/2022), zie Tabel 1 (2). Deze tabel beschrijft ook het type meting, de periode en de bewaakte verschijnselen per net.

Voor LS en MS metingen, worden de locaties steekproefsgewijs geselecteerd uit het centraal aansluitingenregister. Alle gekozen meetlocaties worden aan een postcodegebied gekoppeld. Binnen dit gebied voert de netbeheerder PQM uit. Voor de selectie van de postcodegebieden is rekening gehouden met de aansluitdichtheid door inzet van het centraal aansluitingenregister. Dit wil zeggen dat een postcodegebied met veel klantaansluitingen, een grotere

kans heeft om gekozen te worden dan een postcodegebied met weinig EAN-codes. De geselecteerde meetlocaties worden aselect aan een kalendermaand gekoppeld. De weekmetingen moeten in de aangegeven maand gestart worden om een goede spreiding over het jaar te waarborgen en hiermee eventuele seizoeneffecten te voorkomen.

Voor de HS- en EHS-netten wordt de spanningskwaliteit op elke klantaansluiting bewaakt. Onder de term 'klantaansluiting' wordt verstaan een aansluiting van een verbruiker, producent of gesloten distributiesysteem.

Tabel 1: PQM in Nederland

Net	Begindatum	Type systeem	Locatie	Type meting	Type verschijnselen
LS & MS	2014-2015 ³	250 weekmetingen /jaar/net	Aselecte en representatieve steekproeftrekking (elk jaar wordt een nieuwe steekproef geselecteerd) In het overdrachtspunt: op de MS-rail (ter plaatse van de klant) bij de klant (ter plaatse van de klant: in de meterkast)	Fase-nul spanning voor LS Fase-fase voor MS ⁴	Continue verschijnselen
MS	2014-2015	Continu, meetsysteem op 200 stationslocaties	Steekproefsgewijs getrokken uit een longlist van ongeveer 700 secties; Op de rail van het middenspanningsstation	Fase-nul spanning	Spanningsdips
HS & EHS	2014 ⁵	Continu, meetsysteem op 164 klantaansluitingen	Op elke klantaansluiting	Fase-fase spanning	Continue verschijnselen+ spanningsdips

Het kan worden opgemerkt in het 'Achtergronddocument Spanningskwaliteit in Nederland – Resultaten 2021' (2) dat het afgelopen jaar circa 20% van de meetdata in HS/EHS ontbreekt wegens verschillende redenen. Dit is bij navraag bevestigd door de netbeheerders en de aangeslotenen. De redenen hiervoor zijn onder andere communicatie problemen, storingen in de meters, software problemen en verkeerde aansluitingen (zie Tabel 2, waarvan de data komt uit (3) & (2)). In de komende periode, zal bovendien een bijkomend euvel opduiken namelijk de uitfasering van de 2G en 3G netwerken, waarop de huidige communicatie van de PQM is gebaseerd. Alhoewel de ombouw naar glasvezel lopende is, zal dit niet op tijd gereed zijn om de uitfasering te compenseren. Verder is door het prioriteren van andere projecten wegens het belang van de energietransitie een vertraging op

³ Voorheen, 120 metingen (60 per net);

⁴ Uitgangspunt is dat de metingen worden uitgevoerd conform hetgeen de aangeslotene krijgt aangeboden qua spanning.

⁵ Voorheen, 34 meettoestellen

het verder uitbouwen van het glasvezelnetwerk te verwachten. De prioriteit is dan ook voorlopig om de bestaande meetverplichtingen up-to-date houden in plaats van te denken aan aanpassingen en/of zelfs uitbreiding.

Tabel 2: aantal meettoestellen in 2021 op HS en EHS net

Net	Totaal aantal meettoestellen	Totaal aantal meettoestellen niet operationeel	Totaal aantal weekmetingen	Totaal aantal weekmetingen niet beschikbaar
50-66 kV	20	2	1040	237
66 kV (Net op zee)	8	0	416	104
110-150 kV	96	10	4992	1101
EHS	16	0	832	144
<i>Totaal aantal</i>	<i>140</i>	<i>12 (9%)</i>	<i>7280</i>	<i>1586 (22%)</i>

Gezien het overgrote deel van de meters beschikt over een intern geheugen dat circa 3 maanden aan data kan bevatten, indien de communicatie tijdelijk wegvalt, gaat er dus niet direct data verloren (zie (2)). Dat vereist natuurlijk alsnog een regelmatig toezicht van de goede werking van de toestellen van op afstand en eveneens een check van de relevantie van de meetdata. Met zo'n opvolging is het mogelijk om de data onbeschikbaarheid onder 5% te houden.

2.1.3. PQ indicatoren en normen

Binnen het PQM-project worden vier continue verschijnselen van de kwaliteit van de spanning beschouwd: langzame spanningsvariatie, snelle spanningsvariatie (leidend tot flicker), spanningsasymmetrie en harmonische vervorming.

Daarnaast worden spanningsdips in MS-, HS- en EHS-netten continu geregistreerd.

Op de aansluiting in de meterkast (het zogenaamde aansluitpunt) moet de spanning voldoen aan de Europese norm NEN-EN 50160. Daarnaast gelden in Nederland diverse aanvullende eisen die door het ministerie van Economische Zaken in de Netcode Elektriciteit zijn vastgelegd. De toezichthouder Autoriteit Consument & Markt (ACM) bewaakt naleving van deze eisen.

De huidige Netcode (versie 18/12/2022) bevat in paragraaf 7.2 de kwaliteitseigenschappen waaraan de netspanning minimaal moet voldoen. Voor de niet genoemde eigenschappen in de Netcode wordt verwezen naar de EN50160:2010+A1:2015+A2:2019+A3:2019. Hierbij valt nog te noteren dat in de laatste versie nog geen maximum is gesteld aan het aantal van de verschillende type dips.

2.1.3.1. Continue verschijnselen

De EN50160 standaard geeft kwantitatieve limieten voor de volgende spanningskwaliteitsaspecten:

- Harmonische vervorming (THD⁶)
- Flicker PLT⁷ (snelle spanningsvariaties)
- Langzame spanningsvariaties
- Spanningsasymmetrie

In Nederland verwijst de Netcode op gebied van spanningskwaliteit naar de EN50160, maar zijn enkele aanvullingen opgenomen ten aanzien van langzame spanningsvariaties, flicker, spanningsasymmetrie, harmonische vervorming. De afwijkingen voor de continue verschijnselen staan in de volgende Tabel 3, voor

⁶ Total Harmonic Distortion
⁷ voor Long Term Flicker

waarden binnen een interval van 10 minuten (behalve voor de Plt). Het percentiel wordt berekend over 10 minuten gemiddelde waarden gedurende 1 week. In de kolommen aangeduid met 'Tijd' wordt het minimum percentage weergegeven van de gemeten 10 minuten waarden die moeten voldoen aan de limiet per week. Vetgedrukt is aangegeven wat de 'strengste' limiet is. Voor sommige fenomenen staan in de Netcode extra limieten die niet in de EN50160:2010+2015+2019 staan (in dat geval staat er geen waarde in de kolom van EN50160). Dit geldt met name voor extra limieten voor de maximale tijd of strengere limietwaarde.

Tabel 3: Afwijkingen Nederlandse Netcode (versie december 2022) ten opzichte van de EN50160:2010+2015+2019

criterium	Tijd Netcode	Tijd EN50160 (2019)	Limiet Netcode	Limiet EN50160 (2019)
Langzame spanningsvariaties	95%	95%	$\pm 10\%$ van U_N (LS)	$\pm 10\%$ van U_N (LS)
	95%	99%	$\pm 10\%$ van U_N (MS)	$\pm 10\%$ van U_N (MS)
	99,9%	-	$\pm 10\%$ van U_N (HS,EHS)	-
	100%	100%	$+10\%$ / -15% van U_N (MS)	$\pm 15\%$ van U_N (MS)
	100%	100%	$+10\%$ / -15% van U_N (LS)	$+10\%$ / -15% van U_N (LS)
Flicker	95%	95%	$P_{It} \leq 1$ (LS,MS,HS,EHS)	$P_{It} \leq 1$ (LS,MS,HS)
	100%	-	$P_{It} \leq 5$ (LS,MS,HS,EHS)	-
	100%	-	$\Delta V_{ss} \leq 3\%$ (LS,MS,HS,EHS)	-
	100%	-	$\Delta V_{max} \leq 5\%$ (MS, HS,EHS)	-
Spannings-asymmetrie	100%	-	$V_{un} \leq 3\%$ (LS,MS)	-
	99,9%	95%	$V_{un} \leq 1\%$ (HS,EHS)	$V_{un} \leq 2\%$ (HS)
	95%	95%	$V_{un} \leq 2\%$ (LS,MS)	$V_{un} \leq 2\%$ (LS,MS)
Harmonische vervorming	95%	95%	THD $\leq 8\%$ (LS,MS)	THD $\leq 8\%$ (LS,MS)
	95%	-	THD$\leq 6\%$ (HS)	-
	95%	-	THD$\leq 5\%$ (EHS)	-
	95%	-	Individuele harmonischen < EN50160 2010+2015+2019 ⁸ (LS,MS)	-
	99,9%	-	THD$\leq 12\%$ (LS,MS)	-
	99,9%	-	THD$\leq 7\%$ (HS)	-
	99,9%	-	THD$\leq 6\%$ (EHS)	-
	99,9%	-	Individuele harmonischen < 1.5*EN50160 (LS,MS)	-

2.1.3.2. Spanningsdips

Spanningsdips worden behandeld als cruciale fenomenen vanwege hun impact op de aangeslotenen bij transmissie en distributienetten. Daarvoor specificeert de Nederlandse netcode sinds 2020 ook limieten voor spanningsdips. Daarin worden er verschillende klassen gedefinieerd, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen niet-hinderlijk en hinderlijk dips. Voor het opstellen van deze wetgeving is de norm EN50160 gebruikt. De IEC norm over immunisatie van toestellen tegen spanningsdips (61000-4-11 & 61000-4-34) definieert verschillende klassen volgens hun gevoeligheid. Het is te verwachten dat apparatuur die getest is volgens de relevante productnorm, met deze spanningsdips kan omgaan (zie Tabel 4):

- A1, B1, A2, B2 (klasse 2)
- A1, B1, C1, A2, B2, A3, A4 (klasse 3)

⁸ Voor harmonischen die niet vermeld zijn, geldt de kleinste vermeldde waarde uit de norm

Tabel 4: Classificatie van dips volgens de restspanning en de duur, volgens EN50160

Restvoltage u (%)	10 ≤ t ≤ 200 ms	200 ≤ t ≤ 500 ms	500 ≤ t ≤ 1000 ms	1 ≤ t ≤ 2 s	5 ≤ t ≤ 60 s
90 > u ≥ 80	A1	A2	A3	A4	A5
80 > u ≥ 70	B1	B2	B3	B4	B5
70 > u ≥ 40	C1	C2	C3	C4	C5
40 > u ≥ 5	D1	D2	D3	D4	D5
5 > u	X1	X2	X3	X4	X5

De Nederlandse Netcode beschouwt de klasse 3 als referentie voor het verschil tussen hinderlijk en niet hinderlijk dips. De filosofie erachter is dat spanningsdips in klasse 3 over het algemeen weinig impact hebben op de installatie van de aangeslotene. Indien de aangeslotene toch hinder ondervindt met spanningsdips van klasse 3, dient hij maatregelen te nemen om zijn proces te immuniseren (bij voorbeeld door plaatsen van UPS⁹). Een specifieke immunisatiestudie kan worden uitgevoerd om de optimale oplossing te bepalen. In principe geldt: hoe lager de restspanning en hoe langer de duur, hoe groter de kans op hinder bij de klant. Het is zaak om een compromis te vinden tussen maatschappelijke kosten om minder (ernstige) dips te ondervinden door versterking van het net en immunisatie van de gevoelige klant (de klant moet zelf maatregelen nemen om zijn immunisatie te verbeteren).

Bij de rapportage over spanningsdips wordt gebruik gemaakt van de categorisatie uit Tabel 5. De tabel bevat vier categorieën: A, B1, B2 en C. Categorie A (valt samen met klasse 3 immunisatie) betreft niet-hinderlijke spanningsdips en de categorieën B1, B2 en C vormen tezamen de hinderlijke spanningsdips.

Tabel 5: Categorisatie van diptabel

Restspanning U (%)	Duur t (ms)			
	10 ≤ t ≤ 200	200 < t ≤ 500	500 < t ≤ 1000	1000 < t ≤ 5000
90 > u ≥ 80	Categorie A			
80 > u ≥ 70				
70 > u ≥ 40				
40 > u ≥ 5	Categorie B1	Categorie B2	Categorie C	
5 > u				

Afhankelijk van de grootte en de duur van de spanningsdip wordt een maximum aantal hinderlijk dips gedefinieerd per aansluiting. Deze limieten zijn gedefinieerd op basis van een gemiddeld aantal voor elk net over een periode van 5 jaar (dus gebaseerd op de historiek van de meetgegevens).

Deze limiet is alleen maar geldig voor het aantal "hinderlijke" spanningsdips die elke klant in MS, HS en EHS-net kan ondervinden. Er wordt geen limiet toegepast voor het aantal niet hinderlijke spanningsdips.

Voor spanningsdips geldt dat het gemiddelde van het aantal opgetreden spanningsdips per aansluiting over de voorgaande vijf aaneengesloten kalenderjaren kleiner is dan of gelijk is aan de limieten gegeven in de Tabel 6 hieronder.

Deze limiet is gebaseerd op een voorstel door de netbeheerders opgesteld in nauwe samenwerking met VEMW en Energie-Nederland.

Tabel 6: Netcode limieten voor de spanningsdips in MS, HS en EHS-netten

Klasse	Karakteristieken	Limiet
B1	spanningsdips met een duur ≥ 10 ms en ≤ 200 ms en een restspanning < 40%	3 (MS) 1.2 (HS, EHS)

⁹ Uninterruptible Power Supply

B2	spanningsdips met een duur > 200 ms en ≤ 500 ms en een restspanning < 70%	4 (MS) 1.2 (HS, EHS)
C	spanningsdips met een duur > 500 ms en ≤ 5.000 ms en een restspanning < 80%	4 (MS) 0.4 (HS, EHS)

Artikel 7.5 van de Netcode verklaart hoe de toetsing van het aantal spanningsdips moet gebeuren met de limieten gegeven in artikel 7.3.

De netbeheerder evalueert binnen drie maanden na afloop van elk kalenderjaar per meetlocatie het aantal opgetreden hinderlijke spanningsdips over de voorafgaande periode van vijf aaneengesloten kalenderjaren en de oorzaken van deze spanningsdips en maakt de resultaten van deze evaluatie openbaar op www.uwspanningskwaliteit.nl binnen drie maanden na het begin van de evaluatie.

Bij de rapportage over de spanningsdips maakt de netbeheerder bij hinderlijke spanningsdips onderscheid naar de volgende oorzaken:

1. handeling van een netbeheerder;
2. handeling van een aangeslotene;
3. kortsluiting in het net;
4. kortsluiting in de installatie van een aangeslotene;
5. abnormale omstandigheden genoemd in het zesde lid;
6. overige en onbekende oorzaken.

Indien het vijfjaargemiddelde van het jaarlijks op een meetlocatie gemeten aantal hinderlijke spanningsdips hoger is dan de limieten gegeven in artikel 7.3 doet de netbeheerder binnen drie maanden na de bedoelde evaluatie een onderzoek naar de fysieke oorzaak en duur van deze spanningsdips en maakt de resultaten van dit onderzoek openbaar binnen drie maanden nadat het is gestart. In dit onderzoek wordt in ieder geval aandacht gegeven aan het functioneren van de beveiliging op het moment van optreden van de spanningsdips, en wordt uitgevoerd door:

1. de netbeheerder indien uit de evaluatie blijkt dat de vermoedelijke oorzaak van de opgetreden hinderlijke spanningsdips zich in het net van de netbeheerder bevindt:
2. door de netbeheerder aan te wijzen onafhankelijke deskundige indien:
 - uit de evaluatie blijkt dat de vermoedelijke oorzaak van de opgetreden hinderlijke spanningsdips zich niet in het net van de netbeheerder bevindt;
 - een aangeslotene de uitvoering of resultaten van het door de netbeheerder uitgevoerde onderzoek als bedoeld in onderdeel 1 betwist.

2.1.4. Rapportage

Op basis van de meetresultaten wordt in de jaarlijkse rapportage 'Spanningskwaliteit in Nederland' een uitspraak gedaan aangaande de spanningskwaliteit van de Nederlandse netten. Dit jaarlijkse rapport gaat per net in op de landelijke spanningskwaliteit. Dit rapport wordt via de website van Netbeheer Nederland verspreid (www.uwspanningskwaliteit.nl). Geïnteresseerden vinden hier ook de resultaten van de individuele metingen.

De rapportage geeft het aantal uitgevoerde weekmetingen aan en laat zien bij hoeveel van deze metingen een overschrijding is opgetreden over de continue verschijnselen van de spanningskwaliteit. Het gaat om:

- Langzame Spanning Variatie (LSV)

-
- Spanningsasymmetrie
 - Harmonische vervorming (THD)
 - Snelle spanningsvariatie (leidend tot flikker Plt).

Eventuele overschrijdingen worden door desbetreffende netbeheerder toegelicht. Daarnaast vindt een trendanalyse plaats op basis van de meetresultaten van de afgelopen tien jaar¹⁰. Voor 'Net op Zee 66 kV' wordt dit jaar voor het eerst gerapporteerd.

In tegenstelling tot het LS- en MS-net wordt bij de (E)HS-netten vanuit de Netcode elektriciteit niet naar EN50160:2010+2015+2019 verwezen voor individuele harmonischen. Deze Europese norm bevat wel indicatieve 95% waarden voor individuele harmonischen in het HS-net. Binnen het PQM-project wordt voor het HS-net niet over de individuele harmonischen gerapporteerd. Er vindt geen toetsing op de criteria plaats omdat dit niet door de Netcode wordt voorgeschreven. De EN50160 standaard bevat eveneens geen indicatieve waarden voor individuele harmonischen voor het (E)HS-net.

De snelle spanningsvariatie wordt binnen het PQM-project alleen getoetst op de PLT.

Het verslag geeft ook per net het gemiddeld aantal geregistreerde hinderlijke spanningsdips. Dit is het totaal aantal gemeten hinderlijke dips gedeeld door het aantal meters.

In het LS- en MS-net geldt, hoe groter de steekproef, hoe nauwkeuriger de uitspraak. Met een betrouwbaarheid van 95%, het nauwkeurighedsinterval van de uitgangspunten van de steekproefomvang van het PQM-project zich bevindt tussen 95% en 99% (2).

In het HS- en EHS-net geldt het principe dat alle klantaansluitingen bemeten worden en hoeft er dus geen statistische vertaling van de meetgegevens plaats te vinden.

2.2. Ontwikkelingen van de spanningskwaliteit

Verschillende stakeholders werden geïnterviewd om de standpunten van diverse sectoren te verzamelen over de spanningskwaliteit:

- Grote industriële afnemers en producent aangesloten op HS/EHS netten;
- Residentiële afnemers, via Vereniging Eigen Huis;
- Netbeheerders (TenneT, Coteq, Enexis, Alliander, Stedin)
- Spanningskwaliteit experts (in Nederland en in het buitenland)

Volgens het merendeel geïnterviewde personen, is de spanningskwaliteit in het algemeen aanvaardbaar in Nederland. Dit wordt ook bevestigd via de jaarlijkse PQM rapportage en meetgegevens. Meer details hierover worden gegeven in de volgende paragrafen.

Als men kijkt naar de evolutie van de spanningskwaliteit in Nederland over de 10 laatste jaren, is er geen toename van overschrijdingen van de Netcode waar te nemen. De impact van de decentrale opwekking is niet zichtbaar op het aantal overschrijding van de PQM meetresultaten.

De bekeken kenmerken zijn de harmonische vervorming (THD), de snelle spanningsvariaties (Plt), de langzame spanningsvariaties (LSV) en de asymmetrie van de spanning (Asy).

¹⁰ In het 50-66 kV net wordt sinds alleen maar 2019 op meerdere meetlocaties gemeten. Van voorgaande jaren is slechts een beperkte meterpopulatie beschikbaar. Om deze redenen is alleen voor het 110-150 kV net een trendanalyse uitgevoerd in (E)HS net.

2.2.1. LS- & MS-net

Het huidige PQM programma leent zich niet voor grondig onderzoek, maar enkel voor het in kaart brengen van trends in Nederland. De reden hiervoor is dat het gebaseerd is op steekproeven (die ad random zijn gekozen). Dit is logisch gezien het PQM programma, gestart in 2013, als objectief heeft om een representatief beeld van de spanningskwaliteit in Nederland te geven zodat ACM kan nagaan of de spanningskwaliteit voldoet aan de Europese EN 50160 norm en de Nederlandse Netcode.

Extra metingen zijn er wel in LS en MS-netten voor zwakke plekken, maar deze maken geen deel uit van PQM. Specifieke meetcampagnes worden uitgevoerd in geval van klachten op het aansluitingskoppelpunt of voor een diepere analyse zoals het meten van de belasting patronen van de transformatoren voor de ontwikkeling van het net.

Bij specifieke vragen van industriële afnemers wordt er zoveel mogelijk nuttige data ter beschikking gesteld en in overleg met de RNB gekeken naar de mogelijkheden / oplossingen. Op verzoek data van de eigen aansluiting is gesteld door de RNB, indien beschikbaar.

2.2.1.1. Trendanalyses

Qua trendanalyses over de 10 afgelopen jaren van de continue spanningsverschijnselen, zijn de volgende conclusies getrokken in het PQM jaarverslag van 2021 (3) stelt men het volgende vast:

- Voor langzame spanningsvariatie, voldoen de meetresultaten (U_{max} en U_{min}) ruim aan de norm; de mediaan¹¹ waarde blijft stabiel over de jaren;
- Voor spanningsasymmetrie, voldoen de meetresultaten ruim aan de norm; de mediaan waarde blijft stabiel over de jaren;
- Voor flicker, liggen een aantal extremen boven de norm in verschillende jaren. Er is tussen 2016 en 2019 een licht dalende trend zichtbaar. De meetwaarden zijn redelijk constant;
- Voor de totale harmonische vervorming (THD), voldoen de meetresultaten ruim aan de norm; Er is sprake van een licht stijgende trend maar men behoudt genoeg afstand tot de norm;
- Voor spanningsdips, blijft het gemiddelde aantal dips per jaar per meter per categorie tussen 0.7 en 1.1 (3) voor de afgelopen vijf jaren, en kan beschouwd worden als stabiel.

De netbeheerder volgt altijd overschrijdingen uit de PQM-metpunten op (continue en weekmetingen).

De overschrijding is in het algemeen tijdelijk in het LS-net, te wijten aan werken op het net¹² of versturende belasting met een bepaalde patroon. De klant ondervindt in het algemeen geen hinder van de overschrijding. Maar als de overschrijding ook bij de een 2^e meting wordt waargenomen (een 2^{de} meting wordt uitgevoerd om zeker te zijn dat het probleem gemeten tijdens een week is nog aanwezig) en de klant wel hinder ervan ondervindt, voert de netbeheerder een nader onderzoek uit in desbetreffende deel van het net. Op basis van de uitkomsten van dit onderzoek wordt bepaald welke maatregelen getroffen kunnen worden. Als uit dit onderzoek blijkt dat de verstoring veroorzaakt wordt door een andere klant, bijvoorbeeld als er een sterk verband is tussen stroom profiel van dit klant en de gemeten storingen (bv harmonische spanningen of Plt), dan zal de regionale netbeheerder (RNB) dit met de klant bespreken en samen zoeken naar oplossingen.

2.2.1.2. Netcode overschrijdingen

➤ 2021

¹¹ Ook wel bekend als centrummaat; de mediaan representeert de middelste meetwaarde van de meetpopulatie;

¹² Door werkzaamheden is de netsituatie anders (geschakeld) dan normaal → hermeting uitgevoerd nadat de werkzaamheden zijn afgerond en de netsituatie weer normaal was.

Gezien de metingen in het LS- en MS-net aselekt geselecteerd zijn door middel van een steekproef, worden de resultaten statistisch vertaald naar landelijke proporties. Over 2021 kan met een betrouwbaarheid van 95% voor alle continue spanningsverschijnselen worden gesteld dat in MS en LS -netten:

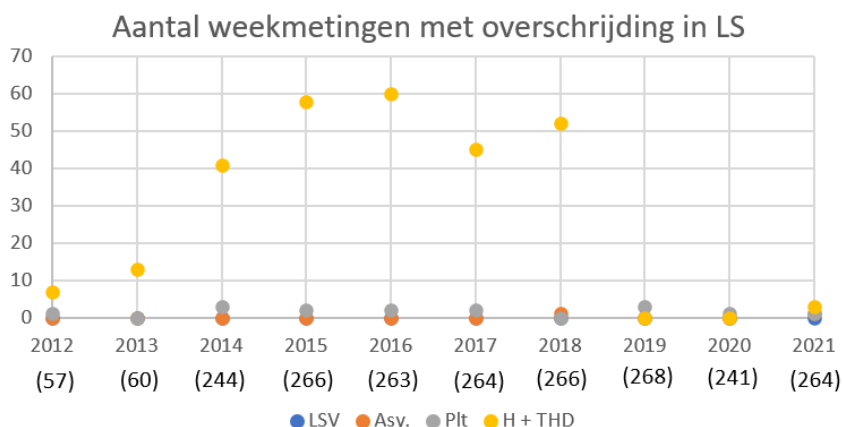
- Tussen de 95% en 99% van de LS-klantaansluitingen voldeed aan de geldende kwaliteitscriteria.
- Tussen de 97% en 100% van de MS-klantaansluitingen voldeed aan de geldende kwaliteitscriteria.

➤ **2012-2021**

Op Figuur 1 (gebaseerd op resultaten van jaarverslag 2021 (3)), is de evolutie van het aantal overschrijdingen inzake de percentielen voor gemeten 10 minuten waarden tijdens een week (weekmetingen) te zien over de voorbije tien jaar voor de PQM op het LS-net (2012-2021). De overschrijdingen vallen samen met de limieten van de percentielwaarden gedefinieerd in Tabel 3.

Men stelt het volgende vast:

- Het aantal bruikbare weekmetingen is fors gestegen vanaf 2014 (zie het aantal tussen haakjes op de grafiek) de hiervoor reden is het toegenomen aantal geplaatste meettoestellen.
- Er is een groot verschil tussen het aantal overschrijdingen vóór en na het jaar 2019 voor de harmonische vervuiling. In 2019 is het addendum¹³ NEN-EN 50160/A3 verschenen. Deze bevat nieuwe limieten voor de 15e en 21e harmonische in het LS-net die minder streng zijn. Hierdoor zijn er sindsdien geen overschrijdingen (meer) waargenomen bij dit verschijnsel.
- Behalve voor de harmonische spanningen, blijven het aantal weekmetingen met overschrijding zeer klein sinds 2012 (≤ 3).



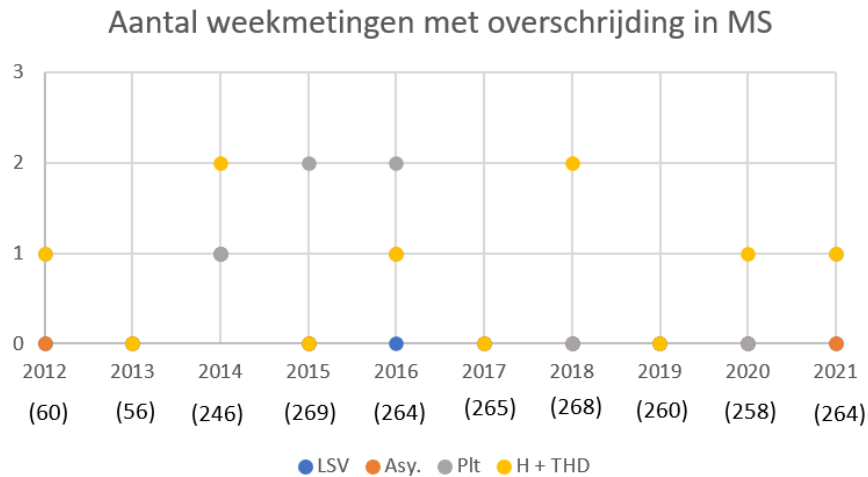
Figuur 1: Aantal weekmetingen met overschrijding in LS-net van 2012 tot en met 2021

Als men dezelfde evolutie grafiek voor het MS-net bekijkt (Figuur 2) (3), stelt men het volgende vast:

- Het aantal bruikbare weekmetingen is fors gestegen vanaf 2014 (zie aantal tussen haakjes op de grafiek). De reden hiervoor is het toegenomen aantal geplaatste meettoestellen.
- Het aantal weekmetingen met overschrijding blijft zeer klein over de jaren (< 3)

¹³

NEN (oktober 2019). NEN-EN 50160/A3 Spanningskarakteristieken in openbare elektriciteitsnetten



Figuur 2: Aantal weekmetingen met overschrijding in MS-net van 2012 tot en met 2021

2.2.1.3. Klachten

De RNB heeft in 2022 veel meer klachten ontvangen van consumenten met zonnepanelen waarbij door spanningsklachten de omvormer uitvalt.

Consumenten met afschakelende omvormers kunnen een melding doen bij de RNB als er door een installateur is vastgesteld dat in de huisinstallatie geen problemen aanwezig zijn. De netbeheerder zal vervolgens onderzoeken hoe het problemen te verhelpen is, bijvoorbeeld door een aanpassing van de tapstand in het lokale transformatorstation. Werkt dat niet, dan moet de netbeheerder elektriciteitskabels verzwaren of vervangen of een geheel nieuw transformatorstation plaatsen.

Ten gevolg van de klachten rond uitschakeling van zonnepanelen, hebben de RNB's in 2021 een projectgroep opgericht om de problematiek van overspanning grondig te bekijken en om met de verschillende stakeholders gesprekken te voeren. De projectgroep "Spanningshuishouding en capaciteit LS-netten" genaamd heeft de opdracht om volgende zaken inzichtelijk te maken:

- Hoe de spannings- en capaciteitsknelpunten in de LS-netten zich zullen ontwikkelen.
- Wat regionale netbeheerders kunnen doen om deze problemen te voorkomen of op te lossen.
- Hoe in samenhang daarmee de communicatiestrategie vorm dient te krijgen richting de verschillende relevante doelgroepen (via reportages, factsheets, best practices, ...). Relevante stakeholders zijn o.a. Techniek NL, Consumentenbond, Vereniging Eigen Huis. Producten zijn o.a. informatiebladen voor afnemers. Ook wordt gewerkt aan bv. een PostCodeChecker.

De focus van de werkgroep heeft zich vervolgens medio 2022 uitgebreid van overspanning (door zonnepanelen opwek) in de LS-netten naar de verwachte onderspanning en capaciteitsproblematiek door afname (met name door de snelle opkomst van warmte pomp en elektrische wagen).

De RNB voegt toe dat het probleem van uitschakeling van zonnepanelen te wijten is aan lokale congestie op het LS-net. Uiteindelijk blijven de RMS-10 minuten waarden van de spanning binnen de limieten van de netcode dus is het voor de netbeheerder op vlak van normering in orde maar maatschappelijk is dit niet wenselijk.

2.2.1.4. Slimme meters als alternatief voor PQM

Als alternatief voor de klassieke spanningskwaliteit meter, gebruiken de NB's nog geen informatie vanuit beveiligingen maar er zijn wel programma's om metingen te plaatsen in zoveel mogelijk LS cabines. De slimme meters (nog geen klasse A meettoestel) geven een steeds beter beeld en deze informatie kan in de toekomst helpen voor het opvolgen van spanningskwaliteit. De spanningsmetingen in de slimme meters worden steeds meer ingezet om het gebrek aan mankracht te compenseren en een beter beeld te krijgen van de

spanningskwaliteit in geval van een spanningsklacht. Dit zal toelaten om netversterkingen uit te voeren waar nodig, gedreven door klachten en op basis van metingen.

Doordat de Autoriteit Persoonsgegevens vorig jaar de Gedragscode Slim Netbeheer definitief goedgekeurde, zijn netbeheerders in staat om de spanning op het laagspanningsnet met behulp van de slimme meters te monitoren. Deze spanning neemt bijvoorbeeld toe bij een groot aantal zonnepanelen in een wijk, waardoor teruglevering aan het stroomnet door consumenten onderbroken kan worden (omvormers worden uitgeschakeld). De data van de slimme meter wordt gebruikt om vast te stellen of de spanning te hoog of te laag is. De netbeheerders kunnen op basis hiervan dan clusters van laagspanningsnetten identificeren – veelal in buitengebieden en dorpen – waar de spanning onaanvaardbaar is. Deze clusters kunnen dan proactief worden aangepakt. Dit houdt in dat de RNB de lokale spanningsproblemen verhelpen zonder dat hier een klantmelding of klacht aan vooraf ging. Wanneer ze andere werkzaamheden in het laagspanningsnet plannen, gebruiken ze steeds vaker de inzichten uit de slimme meter om te controleren of extra netverbeteringen nodig zijn.

Dankzij slimme meters, kunnen dus de RNB's proactief zijn en acties ondernemen. Op korte termijn is dit het meest haalbare alternatief voor de RNB om op LS een acceptabele meetoplossing te ontwikkelen verantwoordbaar vanuit maatschappelijk standpunt. De data gerapporteerd door deze meters kan evenwel niet worden aangewend voor bewijs van conformiteit aangezien deze niet voldoen aan de meetspecificaties van de standaard IEC61000-4-30. De data zijn enkel te gebruiken ter informatie. De slimme meters gebruikt door de RNB's geven de ogenblikkelijke waarden van de fase-spanningen, het aantal tijdelijke overschrijdingen van de drempelwaarden (dit zijn de grenswaarden ingesteld voor swells (253 V) en sags (207 V)). Op MS zijn eveneens vele slimme meters ter beschikking dewelke op gelijkaardige manier kunnen worden aangewend.

2.2.2. (E)HS-net

TenneT gebruikt de PQM meetdata om inzicht te verkrijgen en te houden over spanningskwaliteit verschijnselen en om investeringen in netversterking te rechtvaardigen, concreet voorbeelden daarvan zijn:

1. Het toepassen van fase-transposities op lijnen naar aanleiding van gemeten spanningsasymmetrie.
2. De afweging over het wel of niet plaatsen van een filter bij grote windparken aangesloten op een lange 110kV kabel (2x55km);
3. het gesynchroniseerd schakelen/dan wel toepassen van een voorschakelweerstand om de snelle spanningsvariëaties te beperken (van toepassingen voor lange AC kabels en het schakelen van condensatoren) (metingen worden gebruikt ter bevestiging);
4. het toepassen van blindstroomcompensatie om de limieten van de langzame spanningsvariatie te kunnen respecteren (metingen worden gebruikt ter bevestiging).

Zoals in het LS- en MS-net is er momenteel geen impact van de decentrale productie te zien op de meetresultaten van de PQM op (E)HS. Maar voor de toekomst verwacht TenneT wel veranderingen in kortsluitvermogen. Dat heeft verschillende oorzaken met zowel een positief als negatief effect (zie §3).

Spanningskwaliteitsmetingen die gebruikt worden voor de landelijke spanningskwaliteitsrapportage zijn voor de aansluiting aanwezig en daarna permanent beschikbaar voor analyse doeleinden voor de netbeheerder en op verzoek ter beschikking gesteld aan de aangeslotene. Harmonischen en spanningsasymmetrie zijn moeilijk exact te berekenen. Daar gebruikt TenneT de meetdata voor om een beter inzicht te krijgen. Op een aantal kritische locaties zijn extra PQ meters geplaatst, met als concrete voorbeeld Rilland 380kV naar aanleiding van de asymmetrieoverschrijdingen in Zeeland.

2.2.2.1. Trendanalyse

Qua trendanalyses¹⁴ over de 10 afgelopen jaren van de continue spanningsverschijnselen voor het HS en EHS-net, stelt men vast de volgende:

- Voor langzame spanningsvariatie, een deel van de meetwaarden van 'Umax' in sommige jaren boven de norm uitkomen;

De mediaan van Umax in HS laat een daling zien tussen 2012 en 2015, daarna een constant beeld;

De mediaan van 'Umax' in EHS is de laatste jaren vrij constant, terwijl die van de 'Umin' dalend is;

- Voor spanningsasymmetrie, qua overschrijdingen heeft een onderzoek uitgewezen dat een groot deel van de extremen en uitschieters in de afgelopen jaren afkomstig zijn van één meetlocatie (Waalhaven te Rotterdam). De meter op deze locatie is vervangen en daarmee is het grootste deel van de extremen en uitschieters verdwenen;

In EHS, zijn er ook sommige overschrijdingen maar de mediaan blijft stabiel over de jaren.

- Voor flicker, liggen een aantal extremen boven de norm in verschillende jaren in HS. De extremen van de voorgaande jaren traden voornamelijk op één meetlocatie (Waalhaven). Er is een daling van de mediaan in HS over de jaren.

In EHS voldoen de resultaten aan de norm en de mediaan blijft stabiel.

- Voor de totale harmonische vervorming (THD), voldoen de meetresultaten ruim aan de norm; Er is sprake van een lichte daling sinds 2019 in HS, en een dalende trend van 2013 tot 2017 in EHS gevolgd door stabiele waarden;

Wat betreft spanningsdips schommelt, in tegendeel tot MS-net, het gemiddelde aantal dips per jaar per meter per categorie voor de afgelopen vijf jaren sterk.

2.2.2.2. Netcode overschrijdingen

➤ 2021

In het HS- en EHS-net wordt geen steekproef uitgevoerd. Hier geldt als uitgangspunt dat alle klantaansluitingen gedurende het hele jaar worden bemeten. Om deze reden wordt voor deze netten geen statistische uitspraak gedaan. Op basis van de resultaten voor 2021, wordt gesteld dat afgerond:

- 100% van de 50-66 kV HS-weekmetingen voldeed aan de geldende kwaliteitscriteria.
- 52% van de HS Net op Zee 66 kV weekmetingen voldeed aan de geldende kwaliteitscriteria.
- 100% van de 110-150 kV HS-weekmetingen voldeed aan de geldende kwaliteitscriteria.
- 98% van de 220-380 kV EHS-weekmetingen voldeed aan de geldende kwaliteitscriteria

➤ 2012-2021

Tabel 7 toont het aantal weekmetingen met overschrijding in HS-net van 2012 tot en met 2021 (3). Sinds 2017 is er een onderscheid gemaakt tussen het 50-66 kV en het 110-150 kV net voor de rapportage van de meetresultaten.

In 2021 wordt voor het eerst gerapporteerd over de klantaansluitingen op het Net op Zee 66 kV (8 meters).

Op basis van deze tabel, stelt men vast:

¹⁴ Een trendanalyse is alleen voor het 110-150 kV net uitgevoerd (want van voorgaande jaren is slechts een beperkte meterpopulatie beschikbaar voor het 50-66 kV net).

- Het aantal metingen¹⁵ in 50-66 kV net is uitgebreid in 2019.
- Er is sinds 2018 geen overschrijding van de THD limiet.
- Tussen 2016 en 2020 waren er meerdere weken van overschrijding voor de Plt limiet (tussen 1 week en 19 weken).
- Sinds 2015 zijn er elke jaar weken met overschrijding van de spanningsasymmetrie (zie § 2.2.2.3 voor meer uitleg)
- Diverse PQ meters op het 'Net op Zee platform' van Borssele hebben gedurende het hele jaar overschrijdingen gemeten van de asymmetrie.

Tabel 7: Aantal weekmetingen met overschrijding per verschijnsel in HS-net van 2012 tot en met 2021

Jaar	Spanningsniveau	Aantal bruikbare weekmetingen	LSV	Asy.	Plt	THD
2021	50-66 kV	803	-	-	-	-
	110-150 kV	3891	2	2	-	-
	66 kV (Net op Zee)	312	-	143	4	-
2020	50-66 kV	863	-	-	1	-
	110-150 kV	3655	-	19	9	-
2019	50-66 kV	589	-	-	-	-
	110-150 kV	3707	-	22	16	-
2018	50-66 kV	192	-	-	-	-
	110-150 kV	3423	1	10	19	-
2017	50-66 kV	176	-	-	-	3
	110-150 kV	3567	-	53	4	-
2016	HS	3439	-	53	5	24
2015	HS	1265	-	1	-	-
2014	HS	883	-	-	-	-
2013	HS	964	-	-	-	-
2012	HS	966	-	-	-	-

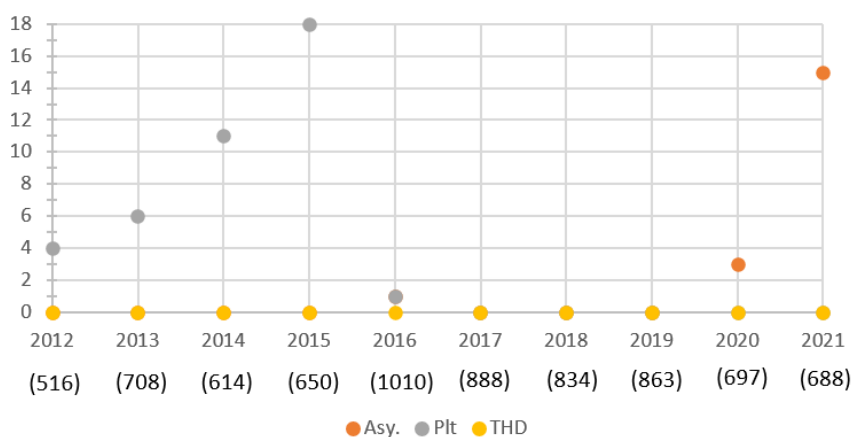
In Figuur 3 is de evolutie van het aantal weekmetingen te zien over de 10 afgelopen jaren voor de PQM op EHS-net (>150 kV) (3).

Men stelt het volgende vast:

- Het aantal bruikbare weekmetingen is zeer verschillend binnen de afgelopen 10 jaren (zie aantal tussen haakjes op de grafiek) de redenen hiervoor zijn de volgende:
 - In 2017: zes meters zonder klantaansluiting zijn uit de rapportagepopulatie verwijderd.
 - In 2020: per aansluiting wordt slechts één meettoestel meegenomen, dubbele meettoestellen worden niet meer meegenomen.
- Er zijn in 2021 15 weken met overschrijding van de spanningsasymmetrie waargenomen (zie § 2.2.2.3 voor meer uitleg).
- Er is sinds 2017 geen overschrijding meer van de Plt limiet.
- Er was nooit overschrijding van de THD.

¹⁵ De netbeheerders streven ernaar om in dit net vanaf 2020 bij alle klantaansluitingen de spanningskwaliteit te bewaken

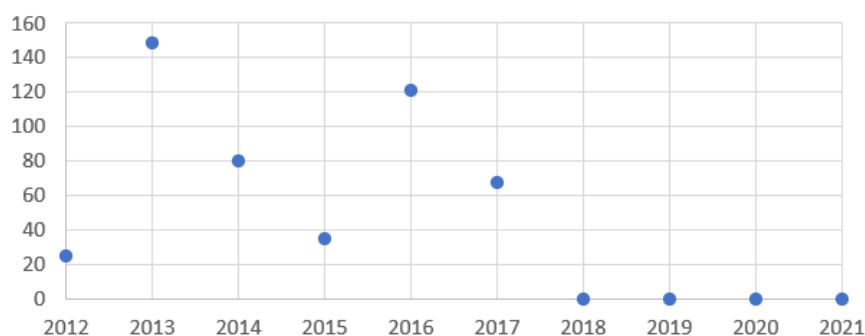
Aantal weekmetingen met overschrijding in EHS



Figuur 3: Aantal weekmetingen met overschrijding in EHS-net van 2012 tot en met 2021

Qua langzame spanningsvariaties is er geen meer overschrijding sinds 2018 (Figuur 4).

Aantal weekmetingen met overschrijding van LSV in EHS



Figuur 4: Aantal weekmetingen met overschrijding in EHS-net van 2012 tot en met 2021 van de langzame spanningsvariatie

TenneT heeft een onderzoek uitgevoerd op de locaties waar de maxima optreden. De belangrijkste bevindingen van deze analyse over de jaren 2015 t/m 2018 zijn hieronder beschreven.

Voor HS:

1. De normwaarden voor langzame spanningsvariaties worden incidenteel overschreden, bijvoorbeeld tijdens een voorziene niet beschikbaarheid (Winsum Ranum);
2. Alle Plt overschrijdingen van de norm zijn gemeten bij Rotterdam Waalhaven. De mediaan ligt op ca. 10% van de normwaarde; De overschrijdingen bleken echter gerelateerd te zijn aan een foutieve aansluiting van de PQ meter.
3. Voor asymmetrie zijn Rotterdam Waalhaven, Helmond Oost en Westermeerdijk locaties die in meerdere jaren tot overschrijdingen hebben geleid; Op de locatie Helmond Oost werd eveneens een fout in het meetsysteem gedetecteerd.
4. Voor geen van de verschijnselen is er een trend waarneembaar in het aantal locaties waar de norm overschreden wordt;
5. Voor geen van de verschijnselen is er een trend waarneembaar in het aantal locaties met extremen.

Voor EHS:

1. De overschrijdingen van de normwaarde voor LSV zijn in het verleden geregistreerd op de locatie Eemshaven. Deze overschrijdingen zijn in 2017 en 2018 onderzocht. Ze bleken veroorzaakt te worden door een fout in de overdrachtsfunctie van het meetsysteem. Sindsdien zijn er geen overschrijdingen voor LSV meer geconstateerd.
2. Voor de overige verschijnselen zijn geen overschrijdingen van de norm geregistreerd;
3. Voor geen van de verschijnselen is er een trend waargenomen in het aantal locaties waar de norm overschreden wordt;
4. Voor geen van de verschijnselen is er een trend waargenomen in het aantal locaties met extremen.

Een aantal overschrijdingen werden gerapporteerd ten tijde van de betreffende jaarrapportage, maar achteraf is gebleken dat er in werkelijkheid geen overschrijding was, zoals hierboven is aangegeven. Foutief gemeten data zijn niet achteraf gecorrigeerd voor de desbetreffende jaren, maar door de aanpassingen zijn deze vervolgens verdwenen in de trends.

2.2.2.3. Spanningsasymmetrie

Op verschillende plaatsen in het TenneT netwerk worden overschrijdingen van de limiet gemeten met verschillende oorzaken, ten gevolge van een eerder TenneT beleid en enkele nieuwe netontwikkelingen (zie jaarverslag (3) en (4)):

1. de niet-transpositie (niet verlust) van het net in Zeeland: Het merendeel van de 380 kV circuits hebben geen fasewisselingen, dat een hogere asymmetrie geeft;
2. de configuratie van de kabels (platte vlak);
3. de verhoogde belasting door offshore wind in Zeeland is zeer waarschijnlijk de oorzaak van de gemeten overschrijdingen in de regio Zeeland. Een hogere belasting van de lijnen kan worden verwacht door het verhoogde vermogen van offshore wind;
4. de combiverbinding (combimast) van 110 kV met het 380kV net en een net opening. Door een overschrijding in 2018 is een studie gestart m.b.t combilijnen: de overschrijding is ontstaan toen een 110kV gedeelte van het gecombineerde circuit, ten behoeve van onderhoud, tijdelijk uit bedrijf is gegaan. Het is aannemelijk dat de asymmetrie ontstaan is door de beïnvloeding van het 380kV circuit.

Vanwege ruimtelijke beperkingen is het de laatste 10 tot 15 jaar gebruikelijk om EHV- en HS-installaties in het dezelfde tracé en op dezelfde masten te combineren. De EHV-circuits veroorzaken spanningsasymmetrie in het HV-circuit door de inductieve en capacitieve koppeling en andersom;

Ten gevolge van deze vastgesteld problemen dankzij PQM, heeft Tenneset in 2022 zijn beleid aangepast in een Asset Strategy Document wat nu wordt uitgerold. Voorheen was het beleid om geen fasewisselingen toe te passen en zijn bestaande transposities soms verwijderd. Het nieuwe beleid leidt er toe dat ze op sommige tracés met combilijnen (EHS en HS in één mast) vele fasewisselingen moeten toepassen. Het beleid betreft ook de toepassing van transposities voor kabels (ligging in driehoek). Door op een aantal posities de onderlinge fasegeleiders te veranderen, wordt de wederzijdse beïnvloeding van het 110kV circuit en het 380kV circuit in normaal bedrijf beperkt.

TenneT is hierover ook in contact met de betreffende offshore-aangeslotenen. De nieuwe offshore parken zijn HVDC installaties, waarbij TenneT bekijkt of het via de vermogenselektronica van deze installatie opgelost kan worden.

Het is de verwachting dat deze overschrijdingen over een langere periode nog kunnen optreden. Het gemeten maximum zal waarschijnlijk niet veel veranderen de komende tijd, of zelfs nog toenemen gezien de systeemsterkte zal afnemen door de uitfasering van synchrone generatoren en de voorziene introductie van load pockets in het HS-net.

2.2.2.4. Harmonische spanning

Volgens de THD meetdata van TenneT, in veel locaties, is er een positieve trend op te merken: gemiddeld gezien is er een lagere THD in 2022 waargenomen ten opzichte van 2021. TenneT vraagt zich af of dit een positieve effect van de power electronics zou kunnen zijn.

➤ **Individuele harmonischen**

Aanvullend aan de THD waardes die getoetst worden op basis van de Netcode, bewaakt TenneT ook de individuele harmonischen wat overschrijding van het planningsniveau betreft. Naar aanleiding daarvan hebben ze voor een netgedeelte in Brabant een aparte studie gedaan. De conclusies van deze studie is hieronder weergegeven.

TenneT gebruikt de planningsniveaus van IEC 61000-3-6 zoals interne objectieven. Het planningsniveau is het niveau dat aan een bijzondere storing in een specifieke omgeving wordt toegewezen. Het wordt als referentie gebruikt bij het bepalen van de emissiegrenzen van belastingen met groot vermogen en van installaties in deze specifieke omgeving. Het is de bedoeling deze grenswaarden te coördineren met alle andere aangenomen grenswaarden voor uitrustingen die op het energiedistributienet moeten worden aangesloten. De netbeheerder bepaalt planningsniveaus voor alle spanningsniveaus van het net. Deze planningsniveaus kunnen worden beschouwd als interne doelstellingen op het gebied van de kwaliteit van de spanning. Ze zijn lager dan of gelijk aan de compatibiliteitsniveaus.

In de afgelopen jaren zijn er verschillende nieuwe ontwikkelingen bijgekomen die een negatieve invloed kunnen hebben op de harmonische niveaus in het net. Bijvoorbeeld het toenemende gebruik van hoogspanning kabels in de grond ter vervanging van de bovengrondse lijnen. Deze bijkomende kabels verlagen de resonantiefrequentie van het systeem en versterken hierdoor de reeds aanwezige achtergrond harmonischen. Daarnaast wordt door het groeiende aantal hernieuwbare energiebronnen en andere vermogenselektronica binnen het net het totale kortsluitvermogen verlaagd, waardoor het vermogen van het net om harmonische tegen te gaan daalt. Het is in deze context dat TenneT de PQM data in het 150 kV net analyseert om de versterking van de achtergrond harmonische van de operationele verandering in het net in te schatten. De analyse was gedaan op bepaalde punten met overschrijding van het planningsniveau. Het onderzoek geeft inzicht in de harmonische spanningsmetingen bij verschillende operationele veranderingen zoals specifieke uitschakeling van verbindingen (voor onderhoud) en de impact van de condensator batterij (5).

Het kan worden opgemerkt dat een onderbreking in het net significante veranderingen in harmonische vervorming veroorzaakt. Voor de 5e en de 7e harmonische duidt deze verandering op een toename en omdat lagere orden nogal dominant zijn, dit betekent ook een merkbare toename van de THD. Voor de 13^e en 23^e harmonische leidt deze verandering tot een afname. De 11^e harmonische orde lijkt vrij onaantast door de onderbreking. Door de verschillen in harmonische impedanties verschillen de versterkingsfactoren per frequentie. De verandering van de harmonische impedantie (te wijten aan een verlaging van het kortsluitvermogen door de onderbreking) kan resulteren in een verhoging voor de ene harmonische orde en een verlaging voor een andere orde.

Andere metingen tonen de impact van in/uitschakeling van condensatorbatterij op de harmonische niveaus. De condensatorbatterij beïnvloedt de harmonische impedantie en kan resonantie creëren op lage harmonische orde (bijvoorbeeld hogere spanning voor H7). Maar als de batterij aangesloten is via een lange bovengrondse lijn, kan de impedantie lager zijn, wat een afname van de harmonische spanning betekent. Dit gedrag is ook zichtbaar op de 23^e harmonische voor 3 onderstations in Brabant in de nabijheid van 3 grote condensator batterij: de piekwaarden van de 23^e komen voor als geen van de condensatorbanken ingeschakeld wordt. Als minstens een ervan is ingeschakeld, nemen de harmonische niveaus onmiddellijk af.

Deze analyse illustreert de complexiteit van harmonischen in een vermaasd net, vooral in het geval van laag orde resonantiefrequenties.

Daarom doet TenneT harmonische impedantieberekeningen voor verschillende doeleinden:

- In het aansluitproces van nieuwe klantaansluitingen worden de harmonische impedanties door TenneT bepaald en gedeeld met de aangeslotenen zodat zij de harmonische emissies kunnen bepalen.
- Voor lange kabels worden ook studies uitgevoerd. In de praktijk zijn er slechts enkelen. Eén studie betrof een kabel die aangelegd is in het net t.b.v. een aansluiting van een groot windpark in Friesland, een andere betrof het omschakelen naar een kabel van een bestaande hoogspanningslijn in Brabant. Concreet starten er binnenkort twee studies waarbij ze ook de ervaring van externe adviseurs willen gebruiken. Het uitvoeren van een dergelijke berekening kan op verschillende manieren en de uitkomst heeft behoorlijk wat onzekerheden. Er zijn twee benaderingen mogelijk om de achtergrondvervorming te bepalen (spanningsbron in combinatie met systeemimpedantie of meerdere stroombronnen verdeeld over het systeem). Voor beide zijn er veel parameters die een rol spelen. Dat maakt het ook lastig om bijvoorbeeld de noodzaak van een filter te onderbouwen;
- In de afgelopen jaren heeft TenneT geen condensatorbanken geplaatst. Voor 380 kV zijn studies uitgevoerd om het effect van deze condensatorbanken te bepalen, dewelke van het C-type zijn, op het wegfilteren van harmonischen.
- Voor spoelen geldt dat deze weinig invloed hebben op de harmonische impedantie. Daarom worden ze niet apart bestudeerd. Ze worden wel meegenomen in de harmonische impedantiestudies.

Op dit moment is er een onderzoek lopende om de harmonischen in het 380 kV net te analyseren want TenneT ziet lagere niveaus en een bevestiging dat de filters van HVDC verbindingen een gunstige invloed hebben op sommige harmonischen in hun net. Daarbij wordt voor 3 locaties geanalyseerd wat er in de afgelopen 2 kalenderjaren gemeten is en waar te nemen valt.

➤ **Individuele emissielimieten**

Het planningsniveau of het totale storingsniveau wordt verdeeld onder de verschillende netgebruikers teneinde de aanvaardbare storingsniveaus of de emissielimieten te bereiken voor de individuele gebruikers.

Het doel is om de emissies afkomstig van de individuele netgebruikers aangesloten op midden- en hoogspanningsnetten te beperken zodat het totale storingsniveau op de spanning het planningsniveau niet overschrijdt. De methodologie voor het bepalen en evalueren van deze aanvaardbare emissieniveaus is beschreven in de technische rapporten IEC/TR 61000-3-6, IEC/TR 61000-3-7 en IEC/TR 61000-3-13.

Elke nieuwe aansluiting op het (E)HS net doorloopt een compliance process waarbij de wijze waarop getoetst moet worden is vastgelegd. De eisen staan in de wet- en regelgeving (Netcode elektriciteit). Conform artikel 2.28 van de Netcode elektriciteit legt TenneT emissie-eisen op:

- De aangeslotene toont aan dat hun installatie op het netaansluitpunt wordt voldaan aan de voorschriften ter zake van elektromagnetische compatibiliteit die door de netbeheerder zijn vastgesteld.
- Voor apparatuur met een vermogen groter dan 11 kVA zijn de "Richtlijnen voor toelaatbare harmonische stromen geproduceerd door apparatuur met een vermogen groter dan 11 kVA" uit juni 1997 uitgegeven door EnergieNed van toepassing. Evenwel past TenneT momenteel de praktijk toe die beschreven staat in IEC61000-3-6, gezien deze beter aansluit bij de huidige praktijk.

Om het compliance proces te doorlopen krijgt de aangeslotene eisen en de netgegevens van het openbare elektriciteitsnet. De aangeslotene moet vervolgens zijn emissies simuleren op basis van zijn installatiegegevens en type testen van de apparatuur zoals beschreven in het proces. Daarna worden de berekeningen geverifieerd door de aangeslotene via metingen op het overdrachtspunt tijdens de inbedrijfstelling en de 'final operation notification'. Dit onder kritisch toezicht van de netbeheerder.

De evaluatie methode en acceptatie criteria zoals beschreven in IEC61000-3-6 werkt met drie verschillende niveau's in functie van de bekomen emissies. Indien de emissies (d.m.v. het evalueren van het totale gewogen 'verstoring' vermogen t.o.v. het kortsluitvermogen op het aansluitpunt) beperkt blijven door de aanwezigheid van een relatief klein aantal verstoringe verbruikers wordt de aansluiting aanvaard zonder gedetailleerde evaluatie (Stage 1). Indien hier niet aan wordt voldaan zal een meer gedetailleerde analyse plaatsvinden. (Stage

2) De toelaatbare emissies per aansluiting dienen in overeenstemming zijn met het deel van de totale capaciteit van het systeem dat wordt toegekend aan de aansluiting, om ervoor te zorgen dat de planning niveaus niet worden overschreden. Er wordt hierbij een analyse gemaakt per harmonische component. Indien voor specifieke harmonischen de planning niveaus worden overschreden dient er bekeken te worden indien compenserende maatregelen de emissies kunnen reduceren. Onder bepaalde omstandigheden kan de netbeheerder storende emissies accepteren die het planningsniveau overschrijden. (Stage 3) Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn wanneer voor bepaalde storende installaties bewezen is dat ze niet gelijktijdig in dienst zijn, of wanneer deze storingen enkel optreden in uitzonderlijke gevallen (bv. wanneer een nabijgelegen centrale niet in dienst is). (6)

Sommige industriële afnemers klagen over de te strenge harmonische emissie limieten die zware en dure maatregelen om hun emissie te verlagen tot gevolg hebben. Als men de emissie limieten van toepassing in HS-net in Nederland met deze van toepassing in België (7) vergelijkt blijkt inderdaad dat de limieten veel strikter zijn in Nederland. Maar dit onderzoek gaat verder niet in op emissielimieten van spanning en stroom. Dit omdat de huidige Netcode en ook de EN50160 geen strikte normen opleggen voor hoe een totale installatie zich mag gedragen ten aanzien van de werking van netten.

Binnen Nederland bestaat momenteel het boekje 'Richtlijnen voor toelaatbare harmonische stromen' waarnaar de Netcode elektriciteit nog steeds verwijst (herziene versie, uitgegeven door EnergieNed in 1997). Dit boekje is achterhaald en de netbeheerders overwegen om een werkgroep in te stellen die het gaat herzien. Doel zou zijn om verbeterde aansluitvoorwaarden en methodieken vast te leggen voor de limieten van harmonische stromen op het aansluitpunt. Dit zoveel mogelijk gebaseerd op praktijkcasussen die nu al voorkomen. Binnen CIGRE is ook een werkgroep gestart (WG C4.63) die nader onderzoek doet naar internationale en nationale harmonische standaarden, regulering en praktijken. De bedoeling zou zijn op basis hiervan 'best practices' te selecteren die als uitgangspunt voor nieuwe internationale normering zijn.

In België zijn de C10/17 voorschriften voor netgebruikers aangesloten op hoogspanningsnetten van toepassing. Het principe is als volgt in het geval dat een netgebruiker storende installaties wenst aan te sluiten:

1. De gebruiker krijgt basis Stadium 1 emissielimieten die alleen maar afhankelijk zijn van zijn onderschreden vermogen;
2. Indien de Stadium 1 limieten worden overschreden, dan dient de netgebruiker (bijkomende) maatregelen te onderzoeken om de emissieniveaus te beperken. Wanneer het voor de netgebruiker niet evident is om te voldoen aan de Stadium 1 limieten, dan dient hij de netbeheerder te vragen om de Stadium 2 of Stadium 3 benadering toe te passen. Voor een Stadium 2 evaluatie zal de netbeheerder aangepaste emissielimieten berekenen
3. Stadium 3 kan toegepast worden bij het aansluiten van nieuwe zeer storende installaties wanneer moeilijk vooraf te bepalen valt of filter of compensatie-installaties vereist zijn om aan de opgelegde limieten te voldoen. De netbeheerder zal in dit geval voor de aansluiting een compatibiliteitsstudie en een risicoanalyse uitvoeren waarin onderzocht wordt of de storende installaties voorlopig zonder compensatie- of filterinstallaties kunnen aangesloten worden op het net, m.a.w. de impact van de storende installaties op het net zal ingeschat worden. Hierin zal onder andere rekening gehouden worden met de plaatselijke netuitbating, de stoorniveaus van omliggende netgebruikers en de nabijheid van gevoelige installaties. Na het in dienst nemen van de installaties worden de stoorniveaus van de installaties bepaald aan de hand van receptieproeven en vergeleken met de opgelegde emissielimieten, teneinde uitsluitel te brengen over bijkomende maatregelen om de stoorniveaus te beperken (zoals compensatie- of filterinstallaties). Storende installaties mogen onder strikte voorwaarden gedurende onbepaalde tijd in Stadium 3 gebruikt worden, zolang dit voor het net aanvaardbaar blijft en er geen nieuwe stoorbronnen bijkomen. De netbeheerder bepaalt de condities gekoppeld aan een Stadium 3 gebruik en vermeldt deze in het aansluitingscontract. De netbeheerder beslist voor Stadium 3 netgebruikers eveneens of een continue monitoring van de kwaliteit van de spanning in het aansluitingspunt vereist is. Volgens het principe 'de vervuiler betaalt' kunnen de kosten gebonden aan deze continue opvolging doorgerekend worden aan de netgebruiker.

Op Europese niveau, hebben twee gezamenlijke CIGRE/CIGRE-werkgroepen WG C4.40 en WG C4.42 een technische brochure geschreven (nog niet gepubliceerd): "Continuous Assessment of Low-Order Harmonic Emissions from Customer Installations" Het gaat over eerlijke en verantwoorde methoden voor het vaststellen van emissiegrenswaarden voor storende installaties in de planningsfase, evenals de beoordeling van de "echte" bijdrage van operationele installaties aan het totaal storingsniveau in het net. Daarin zijn concepten en ideeën ontwikkeld en ze bespraken de ervaringen met de praktische uitvoering vanuit het oogpunt van fabrikanten van PQ-instrumenten en netoperators. Met name de bepaling van grid-side harmonische impedantie en de gevolgen van overschrijding van planningsniveaus zijn geïdentificeerd als uitdagingen.

2.2.2.5. Spanningsdips

Tot op heden zijn er geen overschrijdingen van het aantal hinderlijke spanningsdips.

De hinderlijke spanningsdips (B1, B2, C), m.a.w. de dips onder/op de stippellijn zijn in meer detail geanalyseerd naar oorzaak, over een periode van 3 kalenderjaren (juli 2016- juli 2019):

1. Ongeveer 25% door externe invloeden (weersomstandigheden, voorwerpen in de lijnen).
2. Ongeveer 25% door defecte componenten.
3. Ongeveer 10% door een fout in een aangesloten installatie.
4. Ongeveer 10% door werkzaamheden van de netbeheerder.
5. Ongeveer 30% heeft een onbekende oorzaak.

Het kan worden gesteld dat per jaar een grote spreiding is, zowel in aantal als in oorzaak.

De meest extreme spanningsdips zijn te wijten aan driefasige incidenten.

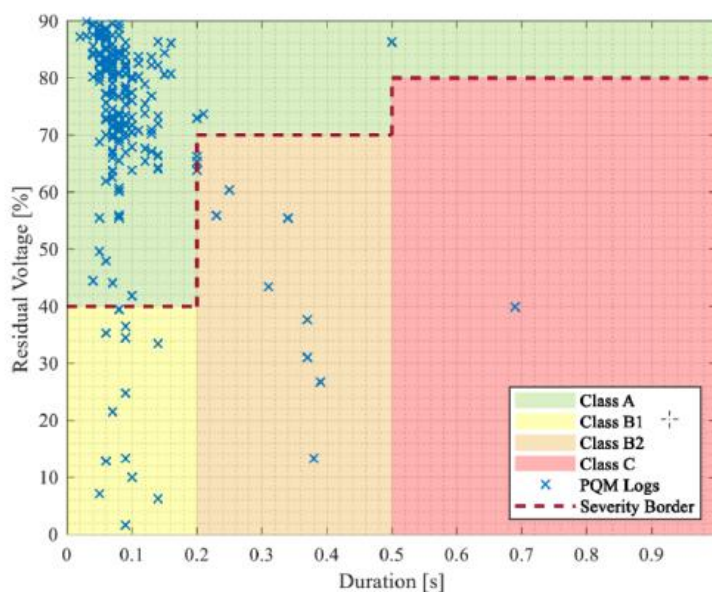


Fig. 3. Logged voltage dip events from 01 to 07-2016 to 01-07-2019.

Figuur 5: Hinderlijke spanningsdips over een periode van 3 kalender jaren (2016-2019) (8).

Over hoe de communicatie m.b.t. spanningsdips dient te gebeuren zijn afspraken gemaakt en deze zijn vastgelegd in de Netcode elektriciteit (artikel 8.7). Voor TenneT betekent dit dat er binnen 10 werkdagen na het optreden van een hinderlijke spanningsdip de rapportage op de website moet staan (<https://www.TenneT.eu/nl/ons-hoogspanningsnet/stroomstoringen>). Aanvullend kan een aangeslotene informatie opvragen.

Maar volgens sommige grote afnemers (verbruikers of producent), is deze periode te lang om info te krijgen over een belangrijk incident met grote schade als gevolg in hun installatie. Bovendien, wensen ze meer details te

krijgen over de oorzaak. Gezien de meettoestellen het toelaat, zou een oplossing kunnen zijn een dipmelding dienst te ontwikkelen waarbij een afnemer direct na het meten van een spanningsdip op zijn aansluiting hierover wordt geïnformeerd (bijvoorbeeld via sms of email).

TenneT beschikt over een Customer care platform waarop afnemers met al hun problemen terecht kunnen, elke afnemers heeft een account. Deze is niet specifiek voor spanningskwaliteit, maar voor algemene communicatie. Ze krijgen heel weinig formele klachten (op basis van CODATA waarin de klachten vastgelegd worden, zijn er al enkele jaren geen spanningskwaliteit gerelateerde klachten gerapporteerd). Tennenet is permanent in gesprek met afnemers die specifieke eisen hebben.

2.2.2.6. Speciale projecten

In 2014 en 2015, zijn er 2 studies uitgevoerd door onder andere TenneT en de Universiteit Eindhoven om de impact van speciale projecten op de spanningskwaliteit in te schatten. (9) (10)

Het eerste onderzoek betreft een statistische analyse op de gemeten spanningskwaliteit van acht speciale projecten. In de uitgevoerde analyse is op een consistente en statistisch verantwoorde manier gekeken naar de tijdreeksen van 8 meetlocaties. Op basis hiervan is voor iedere locatie de impact bepaald van het speciale project op de spanningskwaliteitsaspecten. Het doel van deze analyse is om te onderzoeken of de speciale projecten een aantoonbare invloed hebben op de spanningskwaliteit, door gebruik te maken van verschillende statistische methoden. Deze impacts zijn bepaald aan de hand van gevonden correlaties. Het is op te merken dat het antwoord op de vraag geen uitspraak doet over de feitelijke grootte van het effect. Uitsluitend de kwalitatieve impact van het speciale project op de spanningskwaliteitsaspecten per locatie is weergegeven. Hoewel er dus statistische verbanden zijn, is hiermee niet gezegd dat er ook een causaal verband is of dat een verband nadelig is

Gekeken werd naar de mate waarin de spanningskwaliteit en het schakelen van het speciale project correleren, en of het verband statistisch significant is met een significantieniveau van 0.05. Indien dit het geval is dan spreken we van een "impact".

Impact: de aan- en afkoppeling van het speciale project valt statistisch samen met het spanningskwaliteitsaspect:								
Speciaal Project	Locatie	LSV1	LSV2	LSV3	Asym	THD1	THD2	THD3
HVDC NorNed	EEMS	ja	ja	ja	ja	ja	nee	nee
HVDC BritNed	MVL	nee	nee	nee	nee	ja	ja	ja
380kV-Condensatorbank	DMN	nee	nee	nee	ja	nee	nee	nee
220kV-Condensatorbank	WEW	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee
150kV-Condensatorbank	MZ	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
110kV-Condensatorbank	HCL	nee	nee	nee	nee	ja	ja	ja
380kV-kabel	BWK	ja	ja	ja	nee	ja	ja	ja
380kV-kabel	WTR	ja	ja	ja	nee	ja	nee	nee

Tabel 8: Statistische analyse rond de impact op de spanningskwaliteit van het aan/afkoppelen van speciale projecten (9).

De tweede studie, gedaan op basis van meetgegevens en simulaties, had tot doel om inzicht in de impact van bijzondere projecten op de spanningskwaliteit in de HS/EHV-netten te geven. Individuele harmonischen zijn bij dit onderzoek naar speciale projecten niet meegenomen in verband met de geldende regelgeving.

Wat de HVDC link betreft, tonen de metingen dat het spanningsniveau niet significant veranderd wanneer het vermogen geëxporteerd of geïmporteerd is via de HVDC link.

Gezien HVDC-converteren een bron zijn van harmonische stromen zijn alle grote HVDC-converteren uitgerust met passieve harmonische filters, die hun impact op de spanningsvervorming in het net minimaliseren. De THD-waarden blijven over het hele vermogenspectrum op een laag niveau. De HVDC stations zijn geen dominante bron van harmonische vervorming. Opgemerkt kan worden dat de THD-waarde niet sterk gecorreleerd is met het vermogen van de HVDC-verbinding, wat impliceert dat de THD-waarde meestal afkomstig is van andere bronnen in het net. Qua individuele harmonische, is de vervorming functie van het schijnbare vermogen. Er is een sterke correlatie te zien voor de karakteristieke 11e en 13e harmonische ordes (die karakteristieke harmonische ordes

zijn van de omvormer), waarbij de harmonische vervorming toeneemt naarmate het vermogen toeneemt. Deze relatie is duidelijk voor de waarden van het vermogen van 100 tot ongeveer 500 MVA, terwijl daarna de waarde van de vervorming wordt verlaagd en op een lager niveau wordt gehouden. Hetzelfde geldt voor de 23e en 25e harmonische ordes.

De condensatorbatterijen zijn gerangschikt als filter van het type "C". Het doel van filter is het vermijden van de negatieve invloed op harmonische vervorming. Ze worden dan gebruikt om de vervormingsniveaus in het net te verminderen. De condensatorbanken hebben dus een positieve invloed op de harmonische impedantie met brede demping, terwijl ze de harmonische resonantiefrequenties niet verschuiven.

Om het tijdelijke effect van het in- en uitschakelen van de condensatorbanken te minimaliseren, worden op beide locaties gesynchroniseerde schakeling gebruikt. De resultaten laten zien dat de inschakeling van de condensatorbanken niet leidt tot sterke verhogingen van het spanningsniveau (variaties in de spanning).

In normale toestand leidt de ondergrondse kabel niet tot significante stijging van de net impedantie op frequenties waar er resonantie gebeurt in het net.

Net zoals andere aangeslotenen wordt de spanningskwaliteit voor de HVDC interconnecties continue bewaakt. Zoals boven geschreven, is momenteel een studie lopende om een analyse te maken van de harmonischen op 3 knooppunten in het 380kV net. Het is te zien dat de lage niveaus bevestigen dat de filters van HVDC verbindingen een gunstige invloed hebben op sommige harmonischen in het net.

Samengevat kan geconcludeerd worden voor sommige aspecten voor sommige projecten een statistisch significante impact is aan te tonen. Er is echter nergens sprake van een sterk causaal verband, hooguit correlaties. De feitelijke vraag is of de kwaliteit door de nieuwe projecten per definitie verslechtert. Dit is beslist niet het geval. De veranderingen in versturende emissie en netimpedantie zullen tot een andere spanningskwaliteit leiden, maar dat kan ook een betere zijn.

2.2.2.7. Nieuwe hulpmiddelen gebaseerd op PQM

TenneT bekijkt hoe de PQM data beter kan worden gebruikt kan leiden tot meer gefundeerde investeringsbeslissingen en duidelijkere aantoning van de wettelijke naleving van de spanningskwaliteit aan toezichthouders en afnemers. Dit onderzoek is ook nodig voor het opstellen van het jaarverslag over spanningskwaliteit, het behandelen van klachten en acute stringen, ter goedkeuring van modellen voor root-cause analyse en ter informatie voor planning activiteiten.

Hulpmiddelen worden ontwikkeld binnen TenneT om de analyses van de PQM gegevens beter te kunnen uitvoeren. Daarmee kunnen ze oorzaken van overschrijdingen sneller analyseren en voorspellen en helpen om gebruikte modellen binnen TenneT te evalueren.

Pilots worden door middel van 'statistical learning' methoden uitgevoerd en wachten op een vervolg en prioritering.

Dit nieuwe hulpmiddel is voorzien door TenneT gezien de grote verandering in de spanningskwaliteit context:

1. Toenemende netontwikkelingen met meer risico op spanningskwaliteit problemen (toenemende kabels en resonantieverschuivingen, verandering van kortsluitvermogens en het toepassen van nieuwe types installaties);
2. Vragen van afnemers en toezichthouders over onderzoek en uitleg;
3. De meetpopulatie is fors gestegen;
4. Een nieuwe software die meerdere database kan gebruiken.

Dit onderzoek vereist informatie van meerdere bronnen om het verband te kunnen maken tussen deze bronnen en de aangesloten afnemers. Momenteel, zijn de bronnen manueel geïmporteerd, wat zeer tijdrovend is waardoor het onderzoek lang duurt alvorens resultaten bekend zijn. Vanwege de tijdrovende gegevensoverdracht, wordt

er beperkt onderzoek gedaan en potentiële problemen worden niet gevonden. De bedoeling is om het correleren van de verschillende bronnen te automatiseren.

2.2.2.8. Stroom metingen

Alhoewel voor de jaarlijkse rapportage m.b.t. spanningskwaliteit de gekoppelde (LL) spanning wordt gebruikt, is het sinds 2018 ook gebruikelijk om de fase aarde (LE) spanning en de lijnstroom bij nieuwe aansluitingen te meten. De bedoeling is bij eventuele incidenten meer achtergrondinformatie te hebben. Daarvoor worden de bestaande meetvormers gebruikt. Maar het is niet eenvoudig om in een bestaande installatie een extra stroommeting toe te voegen.

Bij de RNB, worden stroom metingen uitgevoerd om te weten wie de veroorzaker is van de storing. De stroom is alleen maar relevant voor specifieke analyse van spanningskwaliteit (bijvoorbeeld voor het achterhalen van de oorzaak van een overschrijding), maar niet voor trends. Gezien in LS en MS de PQM steekproefsgewijs is uitgevoerd, heeft de stroom geen toegevoegde waarden, tenzij het nuttig is om specifiek op een bepaald punt de link te maken tussen injectie en spanningskwaliteit probleem/evolutie. Dus voor meer analyse naar aanleiding van nieuwe technologie of spanningsklacht gerelateerd kunnen stroom metingen worden gebruikt.

Voor LS en MS, is het niet nuttig om de stroom te meten in de huidige PQM, het objectief zijnde een toets van de kwaliteit van de spanning. In tegenstelling tot het (E)HS, waar het gezien de meetlocatie van de toestellen meer zin heeft om stroom te meten indien een link kan gemaakt worden met de klant en de storingen.

2.2.2.9. Afnemers

➤ Industriële afnemers en producenten

Bij de industriële afnemers, zijn spanningskwaliteit problemen quasi exclusief te wijten aan spanningsdips. Het is dit verschijnsel dat voor hen de grootste schade veroorzaakt vandaar dat ze vinden te weinig info te krijgen over de oorzaak van het incident van de netbeheerder, en zeker te laat na het incident. Bovendien, willen ze ook informatie over niet hinderlijke spanningsdips ontvangen want hun gevoeligheid tot dips is verschillend voor iedereen en dergelijke dips kunnen ook schade voor hen veroorzaken. Tot op heden, is er geen onderzoek naar oorzaak en geen publicatie over niet hinderlijke dips door TenneT. Dit wordt ook niet getoetst in de Netcode. In het verleden is destijds afgesproken om dit niet te doen gezien de omvang van het werk en de toegevoegde waarde. In het recente verleden werd er wel rechtstreeks informatie gedeeld met enkele aangeslotenen op hun verzoek.

Naast de spanningsdips, in geval van nieuwe aansluiting, moet de klant ook een harmonische studie uitvoeren. Maar ze vinden dat ze niet genoeg inlichtingen ontvangen over de bestaande harmonische vervuiling in het net.

De aangesloten vinden dat het PQM programma enkel goed is om een algemeen beeld in Nederland te krijgen, niet meer, het is "high level". Ze gebruiken de landelijke info enkel voor verificatie. Bovendien, meetdata is vaak niet beschikbaar. Als gevolg hebben de meesten zelf een meettoestel in hun eigen installaties geplaatst, om over specifiekere meetgegevens te beschikken want bij een probleem willen ze meetdata hebben om de oorzaak te vinden/uitsluiten. Er wordt beweerd dat de Website www.uwspanningskwaliteit.nl weinig geraadpleegd wordt maar dit is enkel te verifiëren bij de beheerder van de website.

Qua spanningskwaliteit evolutie en impact van decentrale opwekking, merken ze niets special op in hun installaties.

➤ Residentiele afnemers

Informatie over het energielandschap en de kwaliteit wordt aan residuele afnemers gegeven via onder andere twee belangenorganisaties in Nederland, Energie Samen en Vereniging Eigen Huis.

De laatste 3 jaar, neemt het aantal gevallen van uitschakelende omvormers van zonnepanelen toe en de verwachting is dat dit zeker nog fors zal toenemen in de toekomst. In de meeste gevallen zien bewoners niet als de omvormer afschakelt, tenzij ze dit op een 'app' (applicatie) kunnen waarnemen. Vanuit de leden van Energie

Samen, zijn er vooral klachten over spanningsverhoging. Dit voor zowel leden die op laagspanningsniveau aangesloten zijn (afschakeling door omvormers van kleine PV-installaties in woonwijken) als leden die op middenspanningsniveau aangesloten zijn (transportweigeringen vanwege spanningsverhoging voor grotere zonnedaken op het platteland).

Alhoewel de netbeheerders een goede beeld/map hebben van de stroom netcongestie op MS en HS net, is dit niet het geval op LS niveau. Gezien dit spanningsprobleem lokaal is en het feit dat PQM 10 minuten waarde van de spanning levert, is dit ook niet zichtbaar via steekproef LS-PQM.

Vereniging Eigen Huis heeft al samen met netbeheer Nederland brochures uitgegeven om de leden te informeren, bv. regels voor het juist plaatsen en aansluiten van PV.

Hun leden hebben in het algemeen slechte ervaringen met hoe netbeheerders klachten oppakken. Het duurt vaak lang voordat er überhaupt wordt gereageerd. Vaak pas na het neerleggen van meerdere klachten komt er reactie. Het verkregen antwoord is in vele gevallen onvoldoende en zorgt niet voor een oplossing. Elke netbeheerder heeft zijn eigen procedures.

3. Uitdagingen van de energietransitie

De spanningskwaliteit in het toekomstige energiesysteem zal naar verwachting aanzienlijk worden beïnvloed door de verschuiving naar een koolstofvrij elektrisch energiesysteem. Nu zijn elektrische energiesystemen aanzienlijk complexer geworden in vergelijking met de systemen van de vorige eeuw.

Ten eerste is de elektriciteitsproductie niet meer zo gecentraliseerd als vroeger. Veel elektrische energiesystemen bevatten afzonderlijke hernieuwbare energiebronnen die op verschillende niveaus van elektrische energiesystemen te vinden zijn. De energiestroom in het elektriciteitssysteem is dus niet langer eenrichtingsverkeer van de ene gecentraliseerde bron naar de consumenten, en daarom wordt het stroomtoevoersysteem moeilijker te beheren. Bovendien zijn de meeste hernieuwbare energiebronnen (zonne-energie, windenergie, enz.) afhankelijk van het weer en daarom is hun betrouwbaarheid lager dan die van traditionele energiebronnen (bijvoorbeeld thermische centrales die werken op gas, steenkool of kernenergie).

De systeemsterkte, en met name het kortsluitvermogen dat wordt geleverd door de synchrone generatie-eenheden (SGU¹⁶), heeft het elektriciteitssysteem in staat gesteld om de spanning van het net binnen gespecificeerde limieten te houden, zelfs tijdens extreme events. Er treedt een generatieverschuiving op als gevolg van de energietransitie. Op inverters gebaseerde hernieuwbare energiebronnen (IBR¹⁷) zullen in de toekomst een aanzienlijk deel van de elektrische energie leveren. In vergelijking met SGU's is de kortsluitbijdrage van IBR's lager en hun aansluitingspunten bevinden zich vaak in gebieden met een zwakker net. Verminderde systeemsterkte kan bij spanningsdips resulteren in verminderde restspanningen en een groter verspreidingsgebied tijdens kortsluitingen.

De energietransitie is meer dan een verschuiving naar decentrale productie. Naast veranderingen in de aansturing van opwekking, verandert de energietransitie de energiestromen in (E)HS-netten. De netten zullen worden versterkt door upgrades van bestaande, door extra verbindingen en de installatie van nieuwe onderstations, wat een positieve invloed moet geven. Ook moeten er aanpassingen in het net gerealiseerd worden om de veranderende vermogensstromen op een juiste wijze te controleren. De huidige HS-netten werden in het verleden vermaasd uitgelegd, met tal van aansluitingen op het EHS-net. Energiestromen in de EHS zullen stijgen, met overbelastingen tot gevolg via de parallelle route van het HS-net.

In het benchmarking report van 2022 (11), raadt de CEER (Council of European Energy Regulators) aan om verder onderzoek te doen naar de manier waarop spanningskwaliteit wordt beïnvloed door decentrale productie. TenneT werkt daarbij intensief samen met TU/e. Op dit moment is een promovendus de gevolgen van de energietransitie op spanningsdips aan het bestuderen. Er lopen studies met E-laad in samenwerking met TU/e en de regionale netbeheerders om het effect van superharmonischen beter in kaart te krijgen (bv. veroudering). Om de transitie te kunnen "inschatten" worden er op regelmatige basis netstudies uitgevoerd door de RNB om scenario's op langere termijn te bepalen. Dit wordt tegenwoordig ook in overleg met steden en gemeenten gedaan om locatiebepalingen / advies van bv. nieuwe laadpalen te geven.

Ten tweede neemt het aantal en de verscheidenheid aan apparaten met elektrische aandrijving snel toe onder consumenten. Steeds meer apparaten met verschillende elektrische parameters zijn aangesloten op elektrische energiesystemen, en dit maakt het moeilijker om de kenmerken van elektrische energiesystemen te voorspellen. Op LS-niveau bevatten in het verleden de meeste huishoudelijke consumenten elektrische apparaten die passief van aard zijn - dat wil zeggen dat ze alleen passieve elektrische componenten bevatten (bijvoorbeeld een weerstand, condensator en spoel). Vele moderne elektrische apparaten bevatten echter zowel passieve als actieve elektrische componenten (bijvoorbeeld een transistor, een diode). In tegenstelling tot passieve elektrische apparaten (zoals gloeilampen), is hun spanning-stroomverhouding niet noodzakelijkerwijs lineair en repetitief. Bijgevolg veroorzaken veel van deze apparaten verschillende soorten problemen te wijten aan de harmonische

¹⁶ Synchronous Generation Unit
¹⁷ Inverter Based Renewable source

vervuiling op het net (meestal overbelasting van elementen in het net), wat de betrouwbaarheid van de stroomvoorziening aan consumenten negatief beïnvloedt

In combinatie met de aanstaande integratie van elektrische wagen (EV¹⁸'s) zullen de distributienetten enorm worden beïnvloed, veel meer dan tegenwoordig door PV-omvormers. In navolging van de CIRED conferentie van 2021 (12) werd aanbevolen om laadstations van zowel stationaire batterijen als EV's te analyseren en te monitoren om voldoende informatie te verkrijgen voor een betrouwbare beoordeling van hun impact op zowel de hostingcapaciteit als problemen met de spanningskwaliteit.

Met de mogelijkheid om vermogenelektronica te besturen, ontstaan er echter nieuwe mogelijkheden zodat als ze correct worden gebruikt, veel van de geïntroduceerde uitdagingen kunnen worden verzacht door dezelfde componenten die ze creëren. Om dit met succes te doen, moet er veel aandacht besteed worden aan onderzoek naar spanningskwaliteit, zowel op het niveau van individuele aansluitingen als op systeemniveau, aandacht voor de netcodevereisten en de implementatie ervan, en robuuste systeembewaking met een strategische aanpak.

Nu gedistribueerde opwekking in snel tempo groeit, wordt aanbevolen door CEER (11) om verder onderzoek te doen naar de manier waarop spanningskwaliteit wordt beïnvloed door LS gedistribueerde opwekking en prosumers.

De transitie naar het LS - smart grid kan in het kort worden geassocieerd met onder andere de volgende spanningskwaliteit verschijnselen (13):

- Overspanningen, gecreëerd door zonnepanelen aangesloten op de laagspanningsnetten;
- (supra)harmonischen, genereerd door de schakelfrequentie van de omvormers in windturbines;
- (supra)harmonischen, gegenereerd door EV-opladers;
- Lichtflikkering, gegenereerd door het herhaaldelijk starten van warmtepompen.

De verwachte veranderingen in het voedingssysteem kunnen worden onderverdeeld in drie verschillende typen, die elk de kans op schade of storing van apparatuur van eindgebruikers kunnen beïnvloeden:

1. Veranderingen in de productie:

- Verschuiving van grote conventionele productie-eenheden naar kleine eenheden aangesloten op laagspannings- (LS) en middenspannings-(MS) netten;
- Verschuiving naar niet-stuurbare hernieuwbare energie (zonne- en windenergie);
- Verschuiving van synchrone machines naar vermogenelektronische interfaces.

2. Veranderingen in verbruik:

- Vervanging van bestaande apparaten door energiezuinigere alternatieven; introductie van nieuwe soorten apparatuur;
- Proliferatie van kleine apparaten;
- Vrijwel volledige verschuiving naar actief vermogen-elektronische interfaces.

3. Wijzigingen in het net:

- Locatie van decentrale opwek t.o.v de verbruikers, waardoor energie over grotere afstanden getransporteerd moet worden (behoeft niet-standaard oplossingen).
- Toename van ondergrondse kabels;
- Vermogenselektronica apparatuur;

-
- Toegenomen gebruik van power-line communicatie (hoogfrequente signalen waarbij sommige apparatuur gevoelig voor kan zijn);
 - Veranderingen in beveiliging en controle.

De impact van de energietransitie is hieronder bekeken per spanningskwaliteit verschijnsel.

De belangrijkste uitdaging is deze nieuwe technologieën binnen de bandbreedte van de spanningskwaliteit toe te passen en de bestaande situatie niet te verslechteren, en daarbij de kosten voor zowel aangeslotenen als netbeheerders minimaal te houden.

3.1. Flicker

Er kunnen grotere en frequentere spanningsvariaties worden verwacht als gevolg van de toenemende penetratie van intermitterende opwekkingsbronnen zoals wind en zon. De impact is het sterkst in delen van het energiesysteem met een lage systeemsterkte.

Flicker wordt gedefinieerd als "een repetitieve en snelle verandering in de amplitude van de belastingstroom, resulterend in een gelijkaardige verandering van de spanning" (dat is daadwerkelijk herhaalde periodieke modulatie van de spanningsgolfvormomhulling in tegenstelling tot snelle spanningsveranderingen, bijvoorbeeld als gevolg van het starten van asynchrone motoren). Deze kan veroorzaakt worden door elektrische voertuigen (EV). De waarschijnlijkheid van lichtflikkering veroorzaakt door spanningsval is gebaseerd op het aantal EV's dat aangesloten is door gelijktijdig opladen (aantal spanningsstappen) (14), het spanningsstappenpatroon (continu), de ledlampen die door de gebruiker worden gebruikt en de netimpedantie, die geeft het resultaat van door opladen veroorzaakte flikkering van EV.

Flicker kan ook een impact hebben op gevoelige continue productieprocessen (door impact op transportbanden bv.).

Uit de laboratoriumresultaten bleek dat vooral interharmonischen een grote invloed hebben op het optische flikkergedrag van de led (15).

Flicker-conformiteit is een gebied van actief onderzoek, bijzonder vanwege de snel veranderende verlichtingstechnologieën. Een project in Australië (16) (16) heeft aangetoond dat er een aanzienlijk aantal sites is die de plannings- en compatibiliteitslimieten voor flikkering overschrijden. Maar Australische regionale netbeheerder ontvangen echter zeer weinig klachten met betrekking tot wat kan worden beschouwd als echte lampflikkering. Zo'n waarneming kan ook vastgesteld worden wereldwijd. Dit roept vervolgens de vraag op of flikkeringsconformiteitsniveaus geschikt zijn en of flikkeringsbewakingstechnologie relevante resultaten oplevert. Met andere woorden, kan de lichtflikkering geproduceerd door moderne lamptechnologieën nog steeds niet worden beoordeeld door de IEC flikkeringsmeter?

De RNB's in Nederland bevestigen dat de P_{LT} / P_{ST} soms hoog zijn maar ze krijgen geen klacht van flicker.

3.2. Asymmetrie

Op laagspanningsniveau genereert de toenemende penetratie van elektrische voertuigen ook asymmetrie. De hoge mate van gelijktijdigheid van het opladen van meerdere voertuigen, meestal 's avonds, kan ongebruikelijke situaties met een hoge vraag creëren, vooral vanwege het feit dat veel EV's enkelfasig zijn aangesloten. Als gevolg hiervan wordt een toenemende spanningsasymmetrie in het netwerk waargenomen en ook excessieve stromen in de nulgeleider. Andere technologieën die een negatieve impact zullen hebben, zijn warmtepompen (17).

Studies (18) tonen aan dat het toenemen van thuisladen, indien niet goed gecoördineerd, de kwaliteit van de voedingsspanning op laagspanningsnetten aanzienlijk kan beïnvloeden, met een verslechtering van zowel de

spanningsval als de spanningsasymmetrie. Energiebeheersystemen gebaseerd op een systeemtechnologie met meerdere agenten, kunnen echter effectief zijn bij het oplossen van netwerkbeheerproblemen. Nieuwe tools die het opladen van EV kunnen coördineren met de andere flexibiliteitsmiddelen die beschikbaar zijn op regionale netten, kunnen in de toekomst nog voordeliger zijn, met de openstelling van de markt voor ondersteunende diensten voor aggregatoren. In dit scenario zouden transmissie- en regionale systeembeheerders, door gebruik te maken van de regelmogelijkheden van residentiële laadstations, nieuwe regeldiensten kunnen verzamelen, gericht op het verbeteren van de betrouwbaarheid en efficiëntie van het elektriciteitssysteem met beperkte incrementele kosten.

Op HS-niveau, zijn grootschalige wind- en zonneparken vaak verbonden op afgelegen locaties die worden gevoed door relatief lange niet-getransponeerde lijnen, en daarom kan spanningsasymmetrie ontstaan als gevolg van de lijnen, hoewel de wind of de zonneparken gebalanceerde stromen injecteren.

3.3. Spanningsdips

De robuustheid van het systeem, en in het bijzonder het korstluitvermogen opgewekt door Synchronous generation unit (SGU), heeft het elektriciteitssysteem in staat gesteld de spanning langs het net te handhaven binnen gespecificeerde limieten, zelfs tijdens extreme incidenten. Inderdaad, wanneer er een incident optreedt in het net, helpt het kortsluitvermogen van SGU's de impact op de spanning te beperken.

Een Opwekverschuiving vindt plaats als gevolg van de energietransitie. Inverter-gebaseerde hernieuwbare energiebronnen (IBR's) zullen in de toekomst een aanzienlijk deel van de elektrische energie leveren. In vergelijking met SGU's is de kortsluitingsbijdrage van IBR's lager en hun aansluitpunten bevinden zich vaak in gebieden met een zwakker net. De restspanning tijdens spanningsdips zal lager zijn als het kortsluitvermogen wordt verminderd. Met als resultaat een incident dat resulteert in een niet hinderlijk spanningsdip nu kan leiden tot een ernstige spanningsdip na de energietransitie (19).

Een studie uitgevoerd in samenwerking tussen TU Eindhoven en TenneT (20) toont dat de volgende veranderingen in het net zowel een positieve als negatieve impact kan hebben op het kortsluitvermogen (dewelke een indicator is van de robuustheid van het systeem):

1. Versterking van het net en verandering van nettopologie (+/-)
 - 1) Versterking van het net door nieuwe HS stations
 - 2) Versterking van het net door nieuwe verbindingen
 - 3) Herconfiguratie van het netwerk om de energiestromen te controleren en de vorming van parallelle lusstromen te beperken.
2. Generation shift van SGU naar RES (+/-)
 - 1) Minder frequent verbruik van SGU of buiten dienst
 - 2) Extra korstluitvermogen van opkomende decentrale opwekking in MS-netten

Metingen van spanningsdips gedurende drie jaar in het (E)HS en MS netten in Nederland zijn geanalyseerd om de invloed van toekomstige netontwikkelingen te bepalen. De impact van het kortsluitvermogen wordt voor enkele typische gevallen bekeken (door middel van regionale 'heatmaps' van de kortsluitniveaus). De belangrijke bevindingen van de studie zijn:

- De mutuele impact van alle veranderingen op het kortsluitvermogen is tijd- en plaatsafhankelijk;
- Door de verschuiving van opwek en uitfasering of minder frequent gebruik van synchrone opwekking, zal lokaal het kortsluitvermogen verminderen; dus afnemers die zijn aangesloten in de buurt van SGU's die worden uitgefaseerd of minder vaak produceren, zullen een lagere residuele spanning ervaren tijdens spanningsdip;

-
- De kortsluitbijdrage van de RES-opwekking in de MS-netten zal helpen voor de verhoging van het kortsluitvermogen in sommige gebieden waar het elektriciteitsnet momenteel zwak is.
 - Door het openen van schakelaars in het net, en het omzetten van vermaasde HV-netten in meerdere radiaal verbindingen (via "load pockets"¹⁹) zal over het algemeen het verspreidingsgebied van de spanningsdips beperkt worden, wat kan beschouwd worden als een positieve impact (minder aangesloten afnemers zouden moeten getroffen worden door een spanningsdip). Maar ze kunnen echter lagere restspanningen veroorzaken voor de afnemers aangesloten op de grenzen van de "load pockets". Het wordt dus geadviseerd dat openen van schakelaars in het netwerk in de buurt van kritieke knooppunten wordt vermeden.

De berekeningen bevestigen dat de veranderingen zowel positief als negatief kunnen zijn en lokaal zijn van aard. In het bijzonder, de gebieden waar het kortsluitvermogen afneemt verdienen extra aandacht. Gezien het kortsluitvermogen wordt beschouwd als een lokale parameter, is een studie vereist om de verandering van het kortsluitvermogen in te schatten tussen de bestaande toestand en toekomstige verwacht scenario's. Daarnaast kunnen de geïdentificeerde gebieden die een hoger risico vormen ook een indicator zijn waar andere spanningskwaliteit verschijnselen kunnen verslechteren.

3.4. Langzame spanningsvariaties

Het optreden van overspanningen is het belangrijkste probleem met betrekking tot de spanningskwaliteit bij het aansluiten van duurzame elektriciteitsproductie op het distributienet.

Wanneer de LS-netspanning hoger wordt, schakelen PV-installaties uit om de Netcode te respecteren maar maatschappelijk is dit niet gewenst.

Thuis-batterijen en bi-directioneel laden kunnen in de toekomst het probleem nog verergeren als hier geen duidelijke afspraken rond gemaakt worden.

Ook aan de ondergrens zijn er soms problemen door de fluctuatie op het net (tegelijk op-en-af schakelen / start-stop laden);

Om de transitie te kunnen "inschatten" worden er op regelmatige basis netstudies uitgevoerd door RNB's om scenario's op langere termijn te bepalen. Dit wordt tegenwoordig ook in overleg met steden en gemeenten gedaan om locatiebepalingen / advies van bv nieuwe laadpalen te geven. Fase-aansluiting moet in de toekomst meer gebeuren in overleg met verenigingen van installateurs zodat verdeling meer in balans blijft.

Netbeheerders proberen om te communiceren over het probleem door bv het publiceren van brochures (voorbeelden zijn: regels voor het juist plaatsen en aansluiten van PV).

Echter zal het moeilijk blijven om de aansluiting van de verschillende belastingen/productie te optimaliseren over de 3 fases als er geen samenwerking is tussen alle betrokkenen. Dit gaat dan bijvoorbeeld over de installateurs van PV, warmtepomp, laadpalen en de effectieve kennis van het net gekend door de RNB..

Naast een gecoördineerde aansluiting van enkelfasige PV op laagspanningsdistributienetten, die bij het verminderen van zowel onbalans als overspanningen helpt, zijn er andere oplossingen om de uitschakeling te vermijden (21), zoals gecoördineerde actieve vermogensregeling (met actieve reactieve vermogen regeling) of gecoördineerde beperking van injectie (evenredige vermindering van het geproduceerde vermogen bij alle aangesloten installaties).

Netproblemen zijn niet alleen aanwezig in Nederland, Europees zou hier ook sterker over moeten worden nagedacht en samengewerkt.

¹⁹ When the feeding points have no connection (structural or operational) this is called 'pocket' operation around a feeding point. Ze zijn gecreëerd door het introduceren van "normally open points (NOP)" in HS-lijnen die verschillende gebieden verbinden.

3.5. Harmonischen

Historisch gezien is het beheren van harmonischen op alle niveaus een belangrijke kwestie waarvoor systeemstudies, toepassing van normen en implementatie van beperkende maatregelen nodig waren. Door deze geïntegreerde aanpak zijn de schadelijke effecten van harmonischen onder controle gehouden. Momenteel zorgt de wijdverbreide aansluiting van vermogenelektronische spanningsconvertoren op alle spanningsniveaus voor nieuwe zorgen en belangstelling voor het onderwerp harmonischen. Bovendien moeten de plannings- en ontwerpmethoden die in het verleden werden gebruikt worden herbekeken en mogelijk worden bijgewerkt als gevolg van de nieuwe soorten apparatuur die op het elektriciteitssysteem zijn aangesloten.

Over het algemeen wordt verwacht dat energiesystemen over de hele wereld een toename van harmonische vervorming zullen ervaren naarmate de duurzame transitie vordert. Dit is deels te wijten aan het enorme aantal aangesloten apparatuur met vermogenselektronica (die een niet-lineaire stroom-spanningskarakteristiek hebben) en deels aan mogelijke wijziging van bestaande vervormingsniveaus. De nadruk op beperking van harmonische emissies krijgt echter meer aandacht en leidt tot een trend in de tegenovergestelde richting, namelijk dat de harmonische emissie van nieuwe industriële aansluitingen fabrieken als geheel op uitrustingsniveau wordt verminderd door de implementatie van meer geavanceerde schakel- en besturingstechnologieën en de strengere handhaving van de Netcode-eisen. Er is inderdaad een trend naar een meer diepgaande focus om gedetailleerde analyses uit te voeren in de planningsfasen (22). Het gebruik van vermogenselektronica kan dan ook een positieve bijdrage leveren aan het behoud van de spanningskwaliteit (23). Moderne vermogenselektronica, zoals omvormers, kan zo worden ontworpen en bestuurd dat het net niet wordt belast door harmonischen, maar dit resulteert in iets hogere kosten voor de exploitant van de installatie, daarom wordt deze functie momenteel over het algemeen niet gebruikt.

De hoeveelheid lineaire belasting die zorgt voor demping bij resonantiefrequenties (bekend als "resistieve belasting") neemt snel af. Dit kan resulteren in zeer hoge vervorming wanneer resonantiefrequenties in de buurt komen van harmonische frequenties. Dit wordt deels gecompenseerd door een lagere uitstoot van bepaalde typen apparaten, en wordt vooral gedreven door de uitrustings-eisen. Er is een algemene trend van vervanging van niet-elektronische belastingen door elektronische belastingen. Dit neemt een bron van demping bij resonantiefrequenties weg.

Hoge harmonische niveaus kunnen om verschillende redenen optreden, aangezien harmonischen en windenergie-installaties een gecompliceerde kwestie zijn en het nog steeds niet mogelijk is om te voorspellen wanneer en waar hoge niveaus zullen optreden. Wel kan worden geconcludeerd dat harmonischen in de praktijk momenteel geen groot probleem vormen bij windenergie-installaties (12). Het opbouwen van algemene kennis over dit onderwerp en het monitoren van niveaus en trends zijn van groot belang omdat de modellering en simulaties op dit moment geen oplossing bieden voor dit probleem.

Over de impact van de energietransitie op de harmonische vervuiling op het (E)HS-net van Elia (Belgische TNB), werd voorlopig geconcludeerd dat het moeilijk te voorspellen is maar wel potentieel significant in de toekomst (24):

- Er bestaan risico's op harmonische versterkingen en resonanties;
- Er is een gebrek aan referenties over werkelijk gemeten waarden;
- Simulaties op basis van conservatieve hypothesen kunnen soms alarmerende conclusies geven;
- De simulatieresultaten zijn zeer gevoelig aan de genomen hypothesen;
- Er zijn veel onbekende/onzekere parameters.

Elia voegt hier nog aan toe dat er nog veel onbekende zijn over het gedrag van Installaties die grote vermogenelektronische convertoren bevatten en hun evolutie in de toekomst:

- Nog erg nieuwe technologieën
- Onvoorspelbaar gedrag in extreme situatie vanwege black box-overwegingen

-
- Laag aantal extreme gebeurtenissen
 - Weinig tot geen referentiemateriaal over grote incidenten

Ten gevolg, zijn er ook onbekende gegevens over

- De evolutie van de emissieniveaus
- Het gedrag van kritische elementen
- De reactie van het systeem

Tijdens de CIRED conferentie van 2019 (25), werd trouwens gemeld dat één van de grootste uitdagingen voor veel verschillende toepassingen de nauwkeurige inschatting van de harmonische impedantie van het netwerk is. Dit is een vereiste voor realistische simulaties van harmonische niveaus in het netwerk en de bepaling van de bijdrage van een klantinstallatie aan de harmonische spanningen. Een ander aandachtspunt ligt bij het meten van de vervorming. Er moet rekening worden gehouden met de nauwkeurigheid van de hele meetketen, die in de meeste gevallen ook externe sensoren omvat. Vooral "traditionele" spanningsmeettransformatoren zijn ontworpen voor hoge nauwkeurigheid bij alleen de netfrequentie en kunnen hoge meetfouten vertonen voor harmonischen of supraharmonische. Aandacht moet gegeven worden aan de nauwkeurigheid van de spanningstransformator. In het algemeen capacatieve transformatoren hebben een beter gedrag met frequenties dan inductieve transformatoren maar de transformatoren zijn gebruikt niet alleen maar voor PQM, daarvoor is een compromis te vinden. TenneT voorziet reeds nieuwe meetinstallaties met resistieve-capacatieve (RC) spanningsdelers.

De impact van vermogenselektronica apparaten op de harmonischen en de spanningskwaliteit van primaire netten is momenteel onzeker. Naarmate meer en meer duurzame technologieën worden verbonden met omvormers die vermogenselektronica bezitten, worden de effecten op het netwerk steeds onduidelijker. In sommige situaties kan de interactie van apparaten constructief zijn en problemen met harmonischen/spanningskwaliteit verminderen. In andere situaties kunnen de apparaten op een meer destructieve manier op elkaar inwerken. Er bestaat ook onzekerheid over de lokalisatie van problemen met harmonischen en of deze problemen meer wijdverbreid zullen worden (26).

Op het LS-net, neemt LED-technologie enorm toe in moderne elektriciteitsdistributienetten, zowel in residentiële installaties als in openbare verlichting. Vanwege hun technologie zijn omvormers met vermogenselektronica nodig om dit soort lampen te besturen, waardoor verschillende harmonische profielen worden gecreëerd en negatieve effecten worden veroorzaakt op elektrische apparatuur in elektriciteitsdistributienetten, bij voorbeeld door het veroorzaken van licht intensiteit variatie. Dit geeft aan dat de plotselinge veranderingen in harmonischen kunnen leiden tot variatie in de gemiddelde lichtintensiteit. Als deze variatie binnen het bereik ligt van het menselijke zicht, resulteert dit in tijdelijke lichtflikkering. Hierbij dient nog te worden vermeld dat elke lamp een ander harmonisch profiel heeft vanwege niet-lineariteitskenmerken van omvormers met vermogenselektronica. Wanneer lampen met elkaar zijn verbonden, kunnen de harmonischen elkaar verzachten (27). De variëteit en toewijzing van deze lampen kunnen dus willekeurig de totale THD in het elektriciteitsdistributienetwerk ook verlagen. Toekomstige evaluaties van de massale integratie van dit soort belastingen en hun interactie met zowel lineaire als niet-lineaire belastingen en bronnen moeten worden gemonitord en opgevolgd (12).

De Portugese distributie netbeheerder (EDP Distribuição) heeft een studie uitgevoerd over de impact van de vervanging van bestaande gloeilamp door nieuwe LED technologie (28). Voor deze studie heeft men in verschillende MS/LS secundaire substations Power Quality gemeten. Deze campagne is enkele weken vóór de vervanging gestart en is enkele weken na de plaatsing van de nieuwe lampen beëindigd. Er is geen significante verandering in het spectrum van de harmonische spanning na de vervanging dat kan worden toegeschreven aan LED-verlichting. Een duidelijke bevinding is dat de opgenomen stroom, en bijgevolg het actieve vermogen af neemt bij het gebruik van LED-lampen. Aan de andere kant neemt het inductieve blindvermogen (door de aanwezigheid van ballasten) ook af, maar wordt het gedrag meer capacatief.

In combinatie met de aanstaande integratie van EV's zullen de distributienetten enorm worden beïnvloed, veel meer dan tegenwoordig door PV-omvormers. Het wordt aanbevolen om laadstations van zowel stationaire

batterijen als EV's te analyseren en te monitoren om voldoende informatie te verkrijgen voor een betrouwbare beoordeling van hun impact op zowel de hostingcapaciteit als problemen met de spanningskwaliteit (12). Verschillende onderzoeken tonen aan dat totale en individuele harmonische stroom significant zijn voor injectie met laag PV-vermogen, maar deze vervormingen nemen af voor hogere PV-vermogensinjectie (29).

3.6. Supraharmonische

Acculaders voor EV's maken doorgaans gebruik van schakelende vermogenselektronica circuits, die over het algemeen een vervormde stroom afnemen die niet alleen rijk is aan harmonischen, maar - vanwege de snelle schakeling die door dergelijke voedingen wordt gebruikt (meestal meer dan 2 kHz) - ook een bron is van supraharmonischen in het net.

De hoogfrequente schakelvervorming die gepaard gaat met het schakelen van de omvormers heeft recent veel academische aandacht gekregen. Het aantal papers over frequenties 2- 150 kHz is fors gestegen tijdens de CIREC conferentie in 2021 in vergelijking met deze van 2019.

Maar hoewel de nieuwste editie van IEC 61000-4-30 enig inzicht bevat in meettechnieken voor deze hoge (2 kHz – 150 kHz) frequentievervorming, staat de meting, analyse, classificatie en limieten van dit PQ-fenomeen nog in de kinderschoenen. Bovendien zijn er maar weinig instrumenten die zelfs maar metingen kunnen uitvoeren bij de vereiste frequenties. Daarbij komt nog het feit dat er weinig begrip is van de praktische impact van golfvormvervorming bij deze frequenties, zelfs als deze aanwezig is op elektriciteitsnetten.

Op het regionale net, worden superharmonischen al waargenomen bij E-laden maar (voorlopig) nog zonder problemen. Er lopen studies met E-laad/TU Eindhoven/netbeheerders om het effect van superharmonischen beter in kaart te krijgen (bv. versnelde veroudering van netwerk elementen).

De laatste jaren worden steeds meer elektrische voertuigen (EV's) aangesloten op het elektriciteitsnet. Snelladende EV's zijn van cruciaal belang voor een soepele overgang van mobiliteit via conventionele op olie/aardgas gebaseerde infrastructuur naar op elektriciteit gebaseerde infrastructuur. In Nederland zijn enkele pilots gestart over het beter begrijpen van de effecten van het opladen van elektrische voertuigen op het elektriciteitsnetwerk. Een pilootproject heeft plaatsgevonden in Utrecht, waar dagelijks veel elektrische bussen zowel snel alsook langzaam laden volgens eenzelfde in het zelfde verzameldepot dat kan worden beschouwd als een gemeenschappelijk aansluitpunt (30). Aangezien EV-opladers in feite omvormers met vermogenselektronica zijn, zijn ze bronnen van zowel harmonischen als supraharmonische trillingen. Tijdens de studie worden Power Quality-analyses uitgevoerd ter hoogte van het aansluitingskoppelpunt en verschillende PQ-metresultaten worden samengevat en besproken. Wat betreft laagfrequente storingsniveaus zoals harmonischen, spanningsvariëaties en flikkering, vallen alle parameters binnen de limieten van de EN50160. Bovendien hadden supraharmonischen die problemen kunnen veroorzaken bij specifieke frequenties, vooral in het geval van eindgebruikers, geen significante impact.

Een onderzoek naar storingsniveaus in het frequentiebereik 2-150 kHz (supraharmonischen) vond plaats in acht verschillende LV-netten in Europa, Azië en Noord-Amerika gedurende verschillende periodes variërend van 118 tot 246 dagen (31). Op basis van een statistische analyse van de 2-kHz-banden wordt aangetoond dat de 90%-percentielen binnen een bereik tussen 0,09% en 0,56% liggen. Er is een aanzienlijke spreiding tussen de locaties wat betreft de variatiekarakteristiek, de magnitudes en de frequenties van de dominante emissie. Voor verschillende sites zijn duidelijke dagelijkse patronen te herkennen

Emissies worden aanzienlijk beïnvloed door de interactie tussen impedanties aan de belastingszijde en aan de netzijde. Hoge waarden van supraharmonische spanningen worden veroorzaakt door de emissies van de bron (PV en opslagsysteem) en kunnen zelfs worden vergroot door resonantiecondities in bepaalde frequentiebereiken. Aan de andere kant kunnen bij gunstige impedantiecondities bepaalde emissies van de belasting en de bron worden gedempt in verschillende frequentiebereiken.

3.7. Mitigatie

Er wordt overall in Europa onderzocht welke maatregelen er kunnen worden getroffen om spanningskwaliteit problemen veroorzaakt door de energietransitie te voorkomen. Een voorbeeld hiervan is het inzetten van een energie opslagsysteem. In Oostenrijk werd op een landelijk netwerk een energieopslagsysteem voor het opheffen van piekbelasting en de impact ervan op flikkeringsniveau, spanningsonbalans en spanningsniveau bestudeerd (32). Traditioneel worden netverzwaring of nieuwe transformatorstations ingezet om spanningskwaliteit problemen in het distributienet op te lossen. Lokale netopslagsystemen bieden echter ook de mogelijkheid om spanningskwaliteitsproblemen lokaal op te lossen. Er wordt aangetoond dat het lokale, gedecentraliseerde netopslagsysteem het net ondersteunt door gebruik te maken van een gecontroleerd actief stroomuitwisselingsysteem. Dit systeem moet toelaten dat in tijden van hoog verbruik de energieopslag het net ondersteunt door stroom te leveren en in tijden van laag verbruik de netopslag oplaadt. Dit systeem maakt het mogelijk de belasting te beperken en de belasting gradiënten af te vlakken, wat resulteert in een lager flikkeringsniveau en een hoger en stabiel spanningsniveau.

In Nederland, ontbreken op dit moment hiervoor echter passende prikkels, waardoor netbeheerders ruimte op het netwerk moeten vrijhouden voor de volledige capaciteit die nodig is om de batterij op te laden én te ontladen. Om ervoor te zorgen dat grootschalige opslag een bijdrage levert aan het oplossen en voorkomen van transport schaarste stellen de netbeheerders – verenigd in Netbeheer Nederland – een inpassingskader voor met als doel om het sterk toenemend aantal aanvragen van batterij-exploitanten ruimte te bieden op het net (33). Netbeheerders willen bij het aanbieden van contracten voor batterij-initiatieven gaan werken vanuit drie verschillende uitgangssituaties:

- Categorie 1: Gebieden waar netcapaciteit dusdanig ruim beschikbaar is dat batterijen kunnen worden aangesloten zonder dat dit leidt tot schaarste voor andere partijen.

In deze gebieden – aan te wijzen door de netbeheerders – gelden geen aanvullende voorwaarden of beperkingen voor de batterijen en zijn reguliere transporttarieven van toepassing. Het verdelingsmechanisme om rechten te krijgen voor het gebruik van de locatie moet nog nader worden bepaald.

- Categorie 2: Gebieden waar nog beperkt netcapaciteit voorhanden is, maar waar de capaciteitsbehoefte van batterijen dusdanig is dat aansluiten van de batterijen vervolgens zal leiden tot schaarste.
- Categorie 3: Gebieden waar afname- of terugleverschaarste reeds aan de orde is ten gevolge van andere ontwikkelingen die een beslag leggen op netcapaciteit.

In gebieden in categorie 2 en 3 is het van belang dat de batterij netneutraal wordt ingezet, wat inhoudt dat er geen schaarste wordt veroorzaakt of verergerd. Om batterij-initiatieven toegang te geven tot het net op plekken met schaarste, krijgen zij de mogelijkheid met een overeenkomst te werken waarbij de batterij-initiatiefnemer een financiële compensatie ontvangt in ruil voor het op verzoek van de netbeheerder beperken van de batterij zodra transport schaarste dreigt.

Om de inzet van flexibele contracten te formaliseren heeft Netbeheer Nederland in september 2022 een voorstel ingediend bij de ACM voor het wijzigen van de codes elektriciteit: voor een variabel recht op transport van elektriciteit, waarbij de netbeheerder de vrije ruimte op het net kan inzetten door op beschikbare tijden transportcapaciteit toe te kennen.

In het verslag integrale infrastructuurverkenning 2030-2050 (34) van Netbeheer Nederland, geven de netbeheerders inzichten over deze vragen: Volgens welke scenario's kan de energietransitie zich van 2030 naar 2050 in Nederland ontwikkelen? Welke aanpassingen aan de infrastructuur zijn nodig om die scenario's goed te faciliteren? En wat betekenen die broodnodige aanpassingen aan de infrastructuur op hun beurt voor het ruimtegebruik, de planning, de totale kosten en de uitvoerbaarheid van de transitie van het gehele energiesysteem?

In dit verslag, zeggen ze dat de elektriciteitsoverschotten kunnen opgeslagen worden (in batterijen) en omgezet worden (in met name waterstof en warmte) voor gebruik op momenten van schaarste. Elektrolyse – omzetting van elektriciteit in waterstof – zal vooral van belang zijn voor het verwerken van omvangrijke overschotten van elektriciteit uit wind op zee, maar ook op land kan elektrolyse een middel zijn om een tijdelijk overschot te benutten voor een later moment.

3.8. Big Data

De monitoring van Power Quality in het distributiesysteem wordt steeds belangrijker. Enerzijds leidt het toegenomen gebruik van omvormers tot nieuwe spanningskwaliteit fenomenen en problemen, anderzijds worden er steeds meer gevoelige belastingen en processen toegepast door industriële en residentiel afnemers. Aangezien de hoeveelheid Power Quality-informatie continu toeneemt met de slimme meters, is er nood aan efficiënte monitoringsystemen, het verzamelen van Power Quality-gegevens en het voorspellen van trends met behulp van geschikte KPI's van strategisch belang voor distributienetbeheerders om de planning en werking van het net te optimaliseren en het behoud van de leveringskwaliteit te garanderen. Wat toekomstige intelligente distributienetten betreft, zal de beschikbaarheid van betrouwbare real-time data en snelle communicatiesystemen van cruciaal belang zijn voor een betrouwbare en kostenefficiënte werking van het net (25).

Big data-analyse is nodig om grote hoeveelheden data te analyseren en te structureren en om patronen, correlaties en trends te herkennen. De aggregatie van PQ-verschijnselen van een groot aantal nieuwe apparaten en interactie met reeds bestaande apparaten die op het distributienet zijn aangesloten, leiden tot een complexe situatie. In sommige gevallen zal het belangrijk zijn om adequaat te reageren voordat een kantelpunt wordt bereikt. Grootschalige monitoringsystemen of campagnes zijn belangrijk om de situatie in het distributienet te kennen en trends vroegtijdig te herkennen. Vanwege de enorme hoeveelheid meetgegevens blijft handmatige inspectie meestal beperkt tot eenvoudige analyse. Hierdoor blijft het merendeel van de bruikbare informatie in de data onbenut en zijn automatische methodes nodig om de grote hoeveelheid meetdata effectief te verwerken en diepgaand te analyseren. Het toepassen van machine learning en visualisatietechnieken is dus nodig om deze grote hoeveelheden data te analyseren en veranderingen waar te nemen (35) (36).

Het gebruik van flexibiliteit in het netwerk wordt vereist door verschillende spelers met verschillende doelen. Aangezien het elektriciteitsnet echter de ruggengraat vormt van de moderne infrastructuur, zullen regelgevers flexibiliteit moeten toewijzen op een manier die de betrouwbare en kostenefficiënte werking van het net in stand houdt en ondersteunt.

Hulpmiddelen worden ontwikkeld binnen TenneT om de analyses van de PQM gegevens beter te kunnen uitvoeren. Daarmee kunnen ze oorzaken van overschrijdingen sneller analyseren en voorspellen en helpen om gebruikte modellen binnen TenneT te evalueren. Pilots worden door middel van 'statistical learning' methoden uitgevoerd en wachten op een vervolg en prioritering.

3.9. Power Quality Monitoring & regulering

Veranderingen in het distributiesysteem gaan steeds sneller. Met de energie-neutrale doelen en het green deal pact zullen deze ontwikkelingen de komende jaren nog verder toenemen. Dit betekent ook dat spanningskwaliteit, die op veel plaatsen als vanzelfsprekend wordt beschouwd, een hot topic zal worden met gevoelige apparaten en systemen aan de ene kant en een nieuwe mix van emissies aan de andere kant (12).

RNB's moeten daarom de spanningskwaliteit voortdurend monitoren om trends in storingen te identificeren en maatregelen te nemen voordat een knelpunt wordt bereikt waarop grote investeringen moeten worden gedaan. Dit geldt des te meer voor inspanningen op het gebied van standaardisatie en regelgeving, die ook op deze veranderingen moeten anticiperen. Het doel zal altijd zijn om afstemming van emissie- en compatibiliteitsniveaus

mogelijk te maken voor een efficiënte werking van het distributienet tegen maatschappelijk verantwoorde investeringen.

Samen met de evolutie van de energiemarkt die gepaard gaat met de versnelde integratie van hernieuwbare energie door de energietransitie, worden specifieke PQ-metingen nodig om bij te dragen aan verbeteringen in de compatibiliteit tussen de oplossingen van consumenten en netbeheerders. Het idee om meer begrijpelijke indicatoren te gebruiken ligt niet alleen bij energieleveranciers, maar ook bij de eindgebruikers, producenten en consumenten (prosumenten). De EN 50160 vermeldt enkel de limieten maar detailleert niet de verantwoordelijkheden tussen leveranciers en eindgebruikers op het punt van gemeenschappelijke koppeling en de fysieke verbindingen tussen het elektriciteitsnet en de eindgebruiker. Bovendien zijn de huidige normen ontwikkeld wanneer consumenten zonder vermogen-elektronica de distributienetten domineren en zij rekening moeten houden met de invloed van de eindconsument in de SmartGrid-context (37).

De meest gewenste functies bij de monitoring en werking van smart grids zijn een snelle reactie en aanpassing van detectie- en classificatietechnieken met de veranderingen die verband houden met de penetratie van hernieuwbare energie, geluid en belastingen (38).

In het Verenigd Koninkrijk, wordt een onderzoek uitgevoerd op het 33kV-net (26) voor een beter inzicht te krijgen van huidige en toekomstige PQ-problemen in verband met Low carbon Technologies (LCT's). Hiermee wordt vooral de introductie van hernieuwbare energie alsook geëlektrificeerde belastingen zoals EV en warmtepompen. Dit vereist uitgebreide PQ-monitoring terwijl de huidige realiteit echter is dat enkel tijdelijk een PQ-monitor op een enkele locatie binnen een netwerk wordt geïnstalleerd. Dit dan nog slechts voor een korte periode (meestal een week) om inzicht te verkrijgen door middel van handmatige gegevensverzameling en -analyse. Het opschalen van deze aanpak voor continue monitoring op meerdere locaties zou onbetaalbaar zijn en veel tijd en middelen vergen. Het ontwikkelde PQ-monitoring en analysesysteem werd meer dan een jaar uitgetest in twee gebieden van het primaire netwerk die werden geselecteerd op basis van hun contrasterende LCT-penetraties. Uit de analyse bleek dat PQ aanzienlijk kan variëren binnen een netwerkgebied bij de aanwezigheid van LCT's. Er waren bijvoorbeeld gevallen waar de aanwezigheid van LCT's de marges genomen op PQ-parameters op planningsniveau al tot 50% verminderde, en uit de onderzoeken bleek dat deze marges tegen 2030 volledig zouden kunnen gebruikt zijn als de huidige trend wordt gevolgd. De studies wezen echter op een aanzienlijke onzekerheid door het effect van de aggregatie van LCT's die op laagspanning zijn aangesloten. Bovendien wees de data-analyse op een vaak niet-lineaire relatie tussen LCT-gedrag en PQ-impact. PQ bleek aanzienlijk te variëren over een jaar, en momentopnamen van een week bleken niet geschikt voor het vastleggen van representatieve PQ-gegevens op sommige locaties. Over de weken in een jaar zag één locatie bijvoorbeeld een verschil van 50% in de 5e harmonische spanning ten opzichte van het planningsniveau. Naarmate er meer op vermogens-elektronica gebaseerde LCT's van verschillende typen aan het netwerk worden toegevoegd - zoals bij LV, waar er honderden of zelfs duizenden apparaten binnen een enkel LV-netwerk kunnen zijn - zal het belangrijk zijn om te begrijpen hoe de LCT's op elkaar inwerken en aggregeren voor planning en operationele doeleinden. De analyse van gegevens die tijdens het project zijn verzameld, suggereert dat momentopnamen van een week onvoldoende kunnen zijn om PQ-gegevens vast te leggen die representatief zijn voor de heersende PQ-omstandigheden in een netwerk, aangezien er substantiële variaties in PQ-metingen zijn waargenomen voor verschillende periodes van een week tijdens de monitoringperiode.

4. Best practices

Om de PQM in NL te vergelijken met andere Europese landen, is het 7th CEER benchmark verslag van 2022 (11) over de spanningskwaliteit in andere Europese landen als referentie gebruikt. Deze benchmark bedekt 39 Europese landen: Albanië (AL), Oostenrijk (AT), België (BE), Bosnië en Herzegovina (BA), Bulgarije (BG), Kroatië (HR), Cyprus (CY), Tsjechië (CZ), Denemarken (DK), Estland (EE), Finland (FI), Frankrijk (FR), Georgië (GE), Duitsland (DE), Groot-Brittannië (GB), Griekenland (EL), Hongarije (HU), Ierland (IE), Italië (IT), Kosovo*2 (KS*), Letland (LV), Litouwen (LT), Luxemburg (LU), Malta (MT), Moldavië (MD), Montenegro (ME), Nederland (NL), Noord-Macedonië (MK), Noorwegen (NO), Polen (PL), Portugal (PT), Roemenië (RO), Servië (RS), Slowakije (SK), Slovenië (SI), Spanje (ES), Zweden (SE), Zwitserland (CH) en Oekraïne (UA).

De recente IEC norm 63222-2 over power quality management wordt ook gebruikt als referentie (39).

Een PQM project uitgevoerd in Australië is ook bekeken als referentie.

4.1. PQM in het buitenland

Met spanningskwaliteit bedoelt de CEER alle storingen van de voeding, behalve de onderbreking (omschreven door wat ze noemen "customer quality").

Alle 39 landen passen de Europese technische norm CENELEC EN 50160 toe voor spanningskwaliteit, ofwel zijn hun vereisten voor spanningskwaliteit gebaseerd op deze Europese norm. Dit zorgt voor een geharmoniseerd begrip van spanningskwaliteit-fenomenen in heel Europa.

Spanningskwaliteit wordt gemonitord in netten (ofwel transmissie ofwel distributie, maar in de meeste gevallen beide) van 24 reagerende landen, maar de indicatoren die worden gemonitord verschillen onderling. Langzame spanningsvariëaties is de parameter die het meeste wordt bewaakt. In verschillende landen, monitoren de netbeheerders spanningskwaliteit op vrijwillige basis.

De norm voor metingen van de spanningskwaliteit, EN 61000-4-30, heeft geresulteerd in gemeenschappelijke methoden voor PQM.

De frequentievariëaties zijn niet in dit rapport opgenomen, aangezien deze voornamelijk worden beschouwd als een gevolg van systeemwerking op grote schaal.

Slechts een klein aantal landen stelt PQ-gegevens openbaar beschikbaar. Dit betreft België (alleen in Wallonië), Italië, Nederland, Noorwegen en Portugal. De PQ-gegevens worden in 15 landen gepubliceerd, waarvan 14 jaarlijks.

4.2. Regelgeving in het buitenland

Het opstellen van regelgeving rond spanningskwaliteit is een oefening om te komen tot een compromis: iedereen die op het elektriciteitsnet is aangesloten, kan invloed uitoefenen op de kwaliteit van de geleverde spanning op het eigen aansluitpunt of op andere aansluitpunten in het elektriciteitsnet. Bij elke spanningskwaliteit regelgeving moet rekening worden gehouden met zowel de kosten voor specifieke afnemers als gevolg van een storing of schade aan apparatuur als met eventuele directe of indirecte hogere kosten voor het verbeteren van het netwerk, wat zou kunnen leiden tot hogere tarieven voor alle afnemers.

Onder regelgeving wordt verstaan door de CEER het stellen van normen, regels, minimumeisen, het invoeren van beloningen, geldboetes en andere sancties, het publiceren van gegevens (benchmarking of maatstafregulering) en – in bredere zin – het stellen van verplichtingen voor spanningskwaliteit monitoring.

De opgelegde voorwaarden zijn in Nederland niet van toepassing onder abnormale omstandigheden, te weten lijndansen, natuurrampen en overmacht. Dit staat specifiek vermeldt in de Netcode – artikel 7.3.6). De eisen zijn wel van toepassing voor alle overige situaties waarvoor het net ontworpen is (ook N-2 situaties).

Tabel 9 hieronder geeft een overzicht van de regelgeving per land.

De vereisten voor langzame spanningsvariaties worden in 22 landen gehandhaafd en in 17 gemonitord.

De norm EN 50160 blijft het basisinstrument voor PQ-beoordeling in rapporterende landen. In sommige landen zijn echter andere vereisten geïmplementeerd in de nationale wetgeving. De redenen voor het bestaan van dergelijke specifieke regelgeving verschillen van land tot land en houden meestal verband met het feit dat de 2010-versie van de norm nog steeds geen EHV-niveaus dekt. Een bijkomende reden is dat er op nationaal niveau strengere grenswaarden worden gehanteerd dan de norm stelt.

In Zweden en Noorwegen, worden dezelfde definities als in EN 50160 gebruikt maar met dit verschil dat de limieten 100% van de tijd niet mogen worden overschreden. Dit om alles te kunnen volgen, met name situaties die niet aan de eisen voldoen, want de regulator is van mening dat het niet acceptabel is dat de kwaliteit geleverd aan de netwerkafnemers gedurende acht uur (tot 5% van de tijd) elke week voor verschillende belangrijke parameters ontbrekende waarden kunnen bevatten.

Tabel 9: De spanningskwaliteit in Europese landen (11)

	Is de Europese technische standaard EN 50160 toegepast?	Hoe is de standaard toegepast ?
Albanië	Ja	in de regelgeving
België	Ja	in de regelgeving + in de wet
Bosnië en Herzegovina	Ja TSO's en DSO's zijn verplicht om systematisch PQ metingen uit te voeren	in de wet
Cyprus	Ja	in de regelgeving
Estland	Ja	Vrijwillige standaard ²⁰
Finland	Ja Als een consument klaagt dat de PQ niet is wat is overeengekomen in het aansluitingscontract (de RNB/TNB kan het kwaliteitsniveau niet wijzigen naar een lager kwaliteitsniveau dan de normen die in contracten zijn vastgelegd) en de RNB/TNB heeft onvoldoende gedaan om dit recht te zetten of ontkent het contract niet te respecteren, kan de regulator ingrijpen en onderzoeken. Indien nodig kan de regulator de netbeheerder opdragen corrigerende maatregelen te nemen. Bij meerdere overtredingen kan de regulator onderzoeken of een RNB zijn wettelijke verplichting heeft geschonden om het netwerk zo te ontwerpen, aan te leggen en te onderhouden dat PQ acceptabel is	In de wet
Frankrijk	Ja De regering definieert de PQ normen en de regulator geeft advies over deze decreten en technische teksten.	In de regelgeving
Georgië	Ja Regulator keurt netcodes goed die PQ-normen bepalen voor TNB en RNB	In de regelgeving
Hongarije	Ja Langzame spanningsvariaties worden gereguleerd in een besluit in de vorm van een norm, met automatische vergoeding aan afnemers in geval van niet-nakoming. Er is een regelgevend advies over de PQM activiteit van de RNB die de RNB begeleidt over het aantal bewakingsapparatuur, technische vereisten van de apparaten, duur van de metingen en PQ-parameters te bewaken, enz.	Vrijwillige standaard
Italië	Ja	In de regelgeving

²⁰ De limieten voor langzame spanningsvariaties voor de RNB zijn vrijwillig (geen overschrijding van +-10% Unom tijdens normale operating voorwaarden).

	EN 50160 norm is toegepast voor MS en LS, uitgezonderd voor spanningsvariatie in LS waarvoor een Italiaanse norm geldig is.	
Kosovo	Ja	In de regelgeving
Kroatië	Ja Toepassing van een Kroatische versie van de EN 50160; geen boetes, PQM wordt gebruikt als statistiek en een hulpmiddel om te bepalen in welke delen van het netwerk investeringen nodig zijn.	In de wet
Letland	Ja, verplichte norm voor PQ is vastgelegd in regelgeving opgesteld door het kabinet van ministers van de Republiek Letland.	In de regelgeving
Litouwen	Ja PQ wordt gereguleerd door de TNB. De belangrijkste kwaliteitscriteria zijn het handhaven van frequentie- en spanningswaarden binnen specifieke bereiken.	In de regelgeving
Luxemburg	Ja EN 50160 is van toepassing. Luxemburg ziet niet op dit moment behoefte aan verdere regelgeving, aangezien zij nog geen klachten over PQ in de afgelopen jaren heeft gekregen.	In de regelgeving
Malta	Ja	-
Moldavië	Ja Gereguleerd door de oude nationale standaard. De nieuwe norm EN 50160:2010 werd goedgekeurd door de Instituut voor Standaardisatie van Moldavië in 2014, maar nog niet in toepassing zijn gebracht.	-
Montenegro	Ja De netcode definieert voor de RNB PQ-normen. Daarnaast de "Regels Minimumkwaliteit Elektriciteit Levering en aanbod" introduceerde een gegarandeerde indicator gerelateerd aan PQ. Als blijkt dat niet aan de norm is voldaan, de RNB zou het probleem binnen de vooraf bepaalde tijdslimieten moeten oplossen. Als de RNB het probleem niet binnen de gegeven tijd oplost en de spanningsverbetering is geen voorwaarde van voltooiing van de investeringswerkzaamheden, heeft de klant er recht op een vergoeding.	In de wet
Noord-Macedonië	Ja EN 50160 is van toepassing volgens netcode	In de wet
Noorwegen	Ja Regelgeving over PQ (metingen, rapport and procedures in geval van klacht over PQ)	-
Oekraïne	Ja EN 50160 van toepassing volgens netcode	In de wet
Oostenrijk	Ja	in de regelgeving
Polen	Ja Toepassing van EN 50160 via netcode	Vrijwillig
Portugal	Ja Toepassing van EN 50160 via netcode	In de wet
Roemenië	Ja Normen voor distributie en transmissie netten	In de wet
Servië	Ja	-
Slovakije	Ja Regelgeving over PQ	In de wet
Slovenië	Ja Jaarverslagen over de spanningskwaliteit: openbaar gemaakt en inclusief (verplichte) gegevens over continue PQM.	In de wet
Spanje	Ja Regelgeving over langzame spanningsvariëaties, spanningsdips en frequentie.	In de wet
Zweden	Ja De regelgeving is merendeel gebaseerd op de EN 50160, behalve voor swells, spanningsvariëaties en flicker.	In de regelgeving

4.2.1. Snelle spanningsvariaties

Daar TenneT aangaf dat een te strenge limiet voor snelle spanningsvariaties wordt toegepast in Nederland, is gekeken naar de regelgeving in andere landen voor dit specifieke verschijnsel. Er is geen limiet vastgelegd in de norm EN50160, alleen maar indicatieve waarden. In de Europese landen waar regelgeving toegepast is voor spanningsvariaties, is de limiet afhankelijk van de frequentie van het verschijnsel.

Snelle spanningsvariatie (RVC²¹ in het Engels) is een snelle verandering in de RMS-spanning (RMS wordt gemeten gedurende één cyclus die elke halve cyclus wordt ververs in overeenstemming met de methode in EN 61000-4-30) tussen twee stabiele spanningsomstandigheden. RVC's worden over het algemeen veroorzaakt door het opstarten en afsluiten van apparatuur, waaronder:

- motor starten/stoppen;
- transformatoren;
- schakelende condensatoren/inductoren, b.v. condensatorbanken en reactoren;
- in-/uitschakelen van grote elektrische verbruikers;
- transformator tapstand wisselaar onder belasting bediening;
- trippen van belasting/opwekking.

RVC's hebben over het algemeen betrekking op zeldzame of zeer zeldzame gebeurtenissen die willekeurig op het systeem/netwerk kunnen voorkomen of gebeurtenissen die moeten worden gescheiden door tijdsperiodes.

Herhaalde spanningsschommelingen van voldoende frequentie en/of grootte in het voedingsnet kunnen ervoor zorgen dat de luminantie van gloeilampen met de tijd zal fluctueren. Dit wekt de indruk van onvastheid van visuele sensatie bij mensen, die deze fluctuaties waarnemen. Dit effect staat bekend als flikkering. Als de flikkering ernstig genoeg is, kan dit hinderlijk zijn voor waarnemers en kan dit ertoe leiden dat ze een klacht indienen bij de systeem-/netwerkoperator.

Indien RVC van voldoende omvang worden in duur en frequentie, kunnen ze een slechte werking of schade aan apparatuur veroorzaken. Flikkering is ook een mogelijke oorzaak voor diegenen die veranderingen in de luminantie van elektrische verlichting waarnemen.

Het flickermeter-algoritme is gebaseerd op de waargenomen visuele effecten van traditionele gloeilampen, die worden uitgefaseerd en vervangen door lampen met nieuwe technologie, waaronder:

- halogeen;
- compacte fluorescentielampen (CFL);
- lichtgevende diodes (LED)

Hoewel de meeste lampen met nieuwe technologie minder gevoelig zijn voor toegepaste spanningsfluctuaties, zijn sommige gevoeliger bij hogere frequenties van spanningsfluctuaties dan de traditionele gloeilamp van 60 W, de referentielamp voor de flikkercurve.

Internationale normen gebruiken nog steeds de bestaande flikkercurve voor het beoordelen van de storing van de verlichting en alle andere apparatuur aangesloten op openbare elektriciteitsvoorzieningsystemen veroorzaakt door spanningsschommelingen.

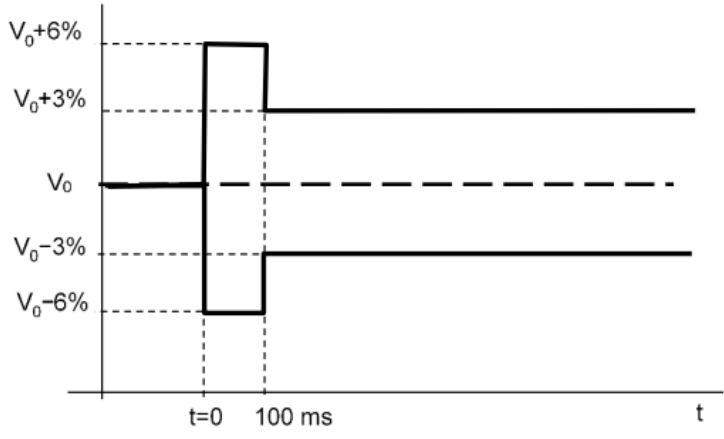
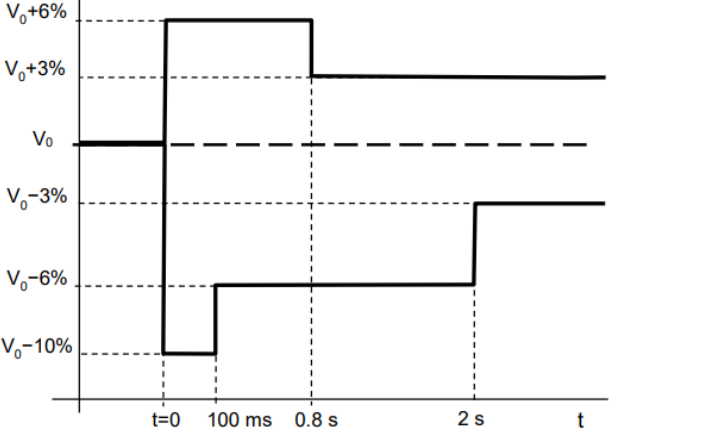
Het kenmerk van flikkering betekent dat storingen van onafhankelijke bronnen niet direct additief zijn. In de praktijk kunnen over het algemeen extra storende apparaten/wisselende installaties op het elektriciteitsnet worden aangesloten, zelfs wanneer het bestaande flikkeringsachtergrondniveau het planningsniveau nadert. De

²¹ Rapid Voltage Change

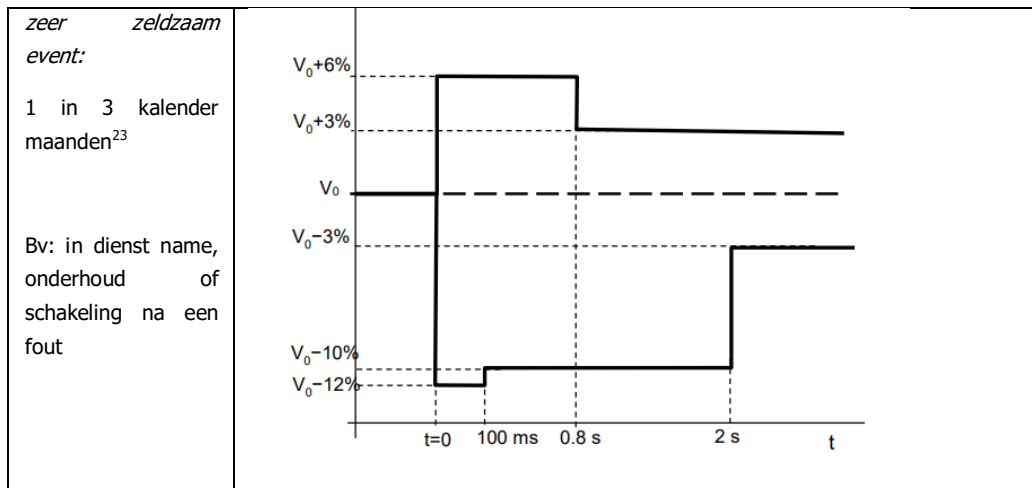
kans dat RVC's uit onafhankelijke bronnen samen optreden wordt beschouwd als laag genoeg om geen rekening te houden met somwetten bij het beoordelen van RVC's.

In Engeland (40), zijn de limieten voor RVC verschillend volgens het maximale aantal voorvallen dat binnen een opgegeven tijdsperiode wordt verwacht. Deze niveaus houden rekening met de noodzaak om storingen veroorzaakt door RVC bij andere afnemers die op het systeem zijn aangesloten tot een minimum te beperken, terwijl wordt erkend dat de visuele storing veroorzaakt door RVC's niet zo ernstig of frequent is als flikkering. De niveaus zijn bepaald om storing van elektrische apparatuur dat op het systeem is aangesloten te voorkomen bij de maximaal toegestane spanningsverandering voor RVC's.

Tabel 10: limieten voor RVC in Engeland (40)

Frequentie	Kenmerk van de spanning tijdens de RVC
<p><i>Frequent event</i></p> <p>Bv: Elke enkele of herhaalde RVC</p>	 <p>The graph shows a voltage waveform starting at a steady state V_0. At $t=0$, the voltage rises sharply to $V_0+6\%$ and remains constant for a short duration. It then falls to $V_0-6\%$ and remains constant for another short duration. Finally, it returns to the steady state V_0. The time axis is marked with $t=0$, 100 ms, and t. The y-axis is marked with $V_0+6\%$, $V_0+3\%$, V_0, $V_0-3\%$, and $V_0-6\%$.</p>
<p><i>Onregelmatig event:</i></p> <p>4 in een kalender maand²²</p> <p>Bv: Onregelmatig starten van de motor of schakelen van transformator</p>	 <p>The graph shows a voltage waveform starting at a steady state V_0. At $t=0$, the voltage rises to $V_0+6\%$ and remains constant for a short duration. It then falls to $V_0-10\%$ and remains constant for a short duration. It then rises to $V_0-6\%$ and remains constant for a short duration. Finally, it rises to $V_0-3\%$ and remains constant for a short duration. The time axis is marked with $t=0$, 100 ms, 0.8 s, 2 s, and t. The y-axis is marked with $V_0+6\%$, $V_0+3\%$, V_0, $V_0-3\%$, $V_0-6\%$, and $V_0-10\%$.</p>

²² Er is niet meer dan 1 evenement per dag toegestaan, bestaande uit maximaal 4 RVC's, elk gescheiden door minimaal 10 minuten met alle omschakeling gedaan binnen een tijdsvenster van twee uur.



Tabel 11 hieronder geeft een overzicht van de limieten voor snelle spanningsvariaties in de landen opgenomen in de CEER benchmarking van 2022.

Tabel 11: Afwijking van snelle spanningsvariaties met de EN 50160 voor Europese landen uit CEER 2022 benchmarking (11)

Land	Spanningsniveau	Frequentie	Limiet
EN 50160	LS	onder normale bedrijfsomstandigheden	≤ 5%
		onder bepaalde omstandigheden, soms per dag	≤ 10%
	MS	onder normale bedrijfsomstandigheden	≤ 4%
		onder bepaalde omstandigheden, soms per dag	≤ 6%
LT	HS	≤4/dag	≤ 5%
		≤2/uur & ≥4/dag	≤ 3%
		≥2/uur & ≤10/uur	≤ 2.5%
NO	0.23 kV ≤ U ≤ 35 kV	ΔU _{ss} ²⁴ ≤ 24/dag	≤ 3%
		ΔU _{max} ²⁵ ≤ 24/dag	≤ 5%
	35 kV < U	ΔU _{ss} ≤ 12/dag	≤ 3%
		ΔU _{max} ≤ 12/dag	≤ 5%
SE	U < 45kV	ΔU _{ss} ≤ 24/dag	≤ 3%
		ΔU _{max} ≤ 24/dag	≤ 5%
	U > 45kV	ΔU _{ss} ≤ 12/dag	≤ 3%
		ΔU _{max} ≤ 12/dag	≤ 5%
BE	U < 30 kV	< 4/dag	≤ 4 %
		≤ 2/uur	≤ 4 %

²³ Er is niet meer dan 1 evenement per dag toegestaan, bestaande uit maximaal 4 RVC's, elk gescheiden door minimaal 10 minuten met alle omschakeling gedaan binnen een tijdsvenster van twee uur.

²⁴ Het verschil tussen de RMS spanning voor en na de verandering;

²⁵ De maximale spanningsvariatie tijdens de event;

		>2/uur & ≤10/uur	≤3.5 %
	U≥30 kV	<4/dag	≤3 %
		≤2/uur	≤3 %
		>2/uur & ≤10/uur	≤2.5 %
NL	LS, MS, HS, EHS	-	ΔU _{ss} ≤ 3%
		-	ΔU _{max} ≤ 5%
MK ²⁶	LS	≥1/10 min	≤3 %
		<1/10 min	≤6 %
	MS	≥1/10 min	≤2 %
		<1/10 min	≤3 %

Volgens de Tabel 10 hierboven zijn er weinig landen die limieten voor snelle spanningsvariaties toepassen, en de limiet in Nederland is de enige die niet rekening houdt met de frequentie van de snelle spanningsvariaties. Zowel netbeheerders als aangeslotenen moeten aan deze relatief strenge eisen voldoen. Hierdoor dienen technische middelen te worden geïnstalleerd, bijvoorbeeld de synchronisatie van het inschakelen van transformatoren of lange kabels met de spanningsgolfvorm. Volgens de huidige regelgeving dienen deze limieten eveneens te worden beschouwd in N-2 situaties, dewelke veel minder voorkomen. Andere landen hanteren minder strenge limieten voor zulke situaties.

4.2.2. Spanningsasymmetrie

Daar TenneT aangaf dat er een te strenge limiet voor asymmetrie toegepast wordt in Nederland, is gekeken naar de regelgeving in andere landen voor dit specifiek verschijnsel.

Tabel 12: Afwijking van de spanningsasymmetrie met de EN 50160 voor Europese landen (11)

Land	Spanningsniveau	Integratie periode	Tijd	Limiet
EN 50160	LS, MS & HS	10 min	95%	≤ 2%
LT	HS (110 kV)	-	-	≤ 1.4%
	HS (330 kV)	-	-	≤ 0.8%
ME	LS, MS	-	-	≤ 3%
MK	LS	10 min	95%	≤ 3%
	MS	10 min	95%	≤ 2%
MT	LS, MS	-	-	≤ 1.3%
NL	LS, MS	10 min	95%	≤ 2%
	LS, MS	10 min	100%	≤ 3%
	HS,EHS	10 min	99.9%	≤ 1%
NO	LS, MS, HS, EHS	10 min	-	≤ 2%
PL	HS	10 min	95%	≤ 1%
SE	LS, MS, HS	10 min	-	≤ 2%

²⁶

Voor een centrale die in "transiente mode of operation" werkt (wanneer de centrale is in/uit-geschakeld)

Er wordt vastgesteld dat enkel 8 van de 39 landen een afwijking van de asymmetrie limiet ten opzichte van de EN 50160 toepassen. Bovendien, op Litouwen na heeft Nederland de strengste eisen voor het (E)HS-net.

Deze strenge eisen hebben als gevolg dat de te nemen maatregelen een impact hebben zowel voor de netbeheerder als voor de eindgebruiker, aangezien deze kosten indirect worden doorgerekend. Hierbij dienen de volgende kanttekeningen te worden gemaakt:

- De afgelopen jaren zijn veel overschrijdingen kortdurend geweest, bijvoorbeeld door een onderhoudssituatie. Door het toetsen op 99.9 % van de tijd was dit een overschrijding die er bij een limiet van 95% niet zou zijn.
- De overschrijdingen die in Zeeland gemeten worden vragen zeker wel aandacht, omdat deze ook bij normaal bedrijf voorkomen. Voor deze situaties is het toepassen van fasewisselingen de beste oplossing. Een deel van de asymmetrie in het HS-net zal ook propageren naar lagere spanningsniveaus. Bij een eventuele aanpassing van de 95 % limiet moet dit meegenomen worden in de beschouwing
- Het toepassen van fasewisselingen in bestaande verbindingen kan kostelijk zijn. Zo zijn met de huidige inzichten in de aanpassingen van de combilijn Zwolle-Meeden tientallen fasewisselingen noodzakelijk: enerzijds door de toegenomen vermogens, anderzijds door de toepassing van loadpockets. Ook het verkrijgen van een periode voor implementatie is lastig en kan gepaard gaan met bijkomende kosten.

4.2.3. Spanningsdips

Geen ander land behalve Nederland past een limiet toe voor het aantal spanningsdips.

In Nederland wordt, afhankelijk van de ernst (diepte en duur), per aansluiting een maximaal aantal dips toegelaten. De limieten zijn gebaseerd op historische gegevens die kenmerkend zijn voor de "as-is". De Nederlandse Netcode definieert limieten voor het aantal spanningsdips dat elke klant in hoogspannings- (HV), extrahoge spannings- (EHV) en middenspanningsnetten (MV) kan ervaren.

In Zweden geven ze enkel aanbeveling op bepaalde dips, om te zorgen dat deze niet mogen voorkomen ofwel dat de RNB actie moet ondernemen om ze te vermijden (zie Tabel 13).

Tabel 13: Regelgeving in Zweden voor spanningsdips

Spannings-niveau	Spanningsdips met bepaalde karakteristieken	Regelgeving Zweden
U < 45kV	1 s < duur < 60 s en restspanning > 40%	Dienen niet te gebeuren
	5 s < duur < 60s en 40% < restspanning < 70%	Dienen niet te gebeuren
	10 ms < duur < 1 s en restspanning < 40%	RNB dient actie te ondernemen om ze te vermijden
	500 ms < duur < 60 s en 50% < restspanning < 70%	RNB dient actie te ondernemen om ze te vermijden
U > 45kV	600 ms < duur < 60 s en restspanning < 80%	Dienen niet te gebeuren
	100 ms < duur < 600 ms en restspanning < 70%	RNB dient actie te ondernemen om ze te vermijden

150 ms < duur < 600 ms en 70% < restspanning < 90%	RNB dient actie te ondernemen om ze te vermijden
600 ms < duur < 60 s en 80% < restspanning < 90%	RNB dient actie te ondernemen om ze te vermijden

CEER geeft in zijn "best practice" richtlijnen voor PQM (1) aan dat een bepaald aantal dips, zelfs ernstige dips, moet worden geaccepteerd om excessieve (maatschappelijke) kosten te voorkomen. PQM kan bestaande niveaus aannemen, die kunnen worden gebruikt om te voorkomen dat limieten te hoog of te laag worden ingesteld. Opgemerkt moet worden dat dit niet zal resulteren in het optimale net, met minimale totale kosten, maar het zal een afweging van de veranderingen in kosten en baten voor de verschillende stakeholders mogelijk maken.

In de Europese landen die al een robuust PQM-systeem hebben geïnstalleerd dat betrouwbare en complete sets PQ-gegevens bevat, moeten deze gebruiken om duidelijke, begrijpelijke en functionele prestatienormen te definiëren.

Zowel netbeheerders als afnemers hebben plichten. PQM-programma's helpen om beide partijen bewust te maken van hun verantwoordelijkheid. CEER geeft aan dat de classificatie van de dips voorgesteld in de EN50160, gecombineerd met de immuniteit klasse 3 van de IEC norm 61000-4-11 (41) een handig hulpmiddel biedt voor het delen van verantwoordelijkheden tussen netbeheerders en eindgebruiker. De immuniteitscurve van klasse 3 is weergegeven in Figuur 6. De netwerkgebruikers moeten hun installaties uitrusten met apparaten die immuun zijn voor dips boven de lijn. Aan de andere kant zouden netbeheerders dips onder de immuniteitscurve moeten voorkomen. In dit opzicht spelen PQM-programma's een belangrijke rol, aangezien het meten spanningsdips het voor zowel de netwerkbeheerder als ook de netwerkgebruikers mogelijk maken om zich bewust te worden van het probleem en de omvang ervan.

Deze methodiek wordt al toegepast in Nederland op het vlak van HS en MS spanningsdips limiet voor het verschil tussen hinderlijk en niet hinderlijke dips te definiëren.

Residual voltage u [%]	Duration [ms]				
	10 – 200	200 – 500	500 – 1000	1000 – 5000	5000 – 60000
$90 > u \geq 80$	CELL A1	CELL A2	CELL A3	CELL A4	CELL A5
$80 > u \geq 70$	CELL B1	CELL B2	CELL B3	CELL B4	CELL B5
$70 > u \geq 40$	CELL C1	CELL C2	CELL C3	CELL C4	CELL C5
$40 > u \geq 5$	CELL D1	CELL D2	CELL D3	CELL D4	CELL D5
$5 > u$	CELL X1	CELL X2	CELL X3	CELL X4	CELL X5

Figuur 6: Classificatie van spanningsdips volgens de norm EN 50160, met verschillen tussen grote en kleine dips volgens IEC 61000-4-11 klasse 3

Deze methode laat de toezichthouder toe initiatieven te promoten die erop gericht zijn gevoelige gebruikers (kwetsbaar voor ernstige spanningsdips) ervan bewust te maken dat ze deel uitmaken van een uniek proces dat vereist dat ze goed zijn uitgerust met geschikte apparaten. Daarnaast zet het netbeheerders aan om het niveau van storingen te verminderen waar eindgebruikers niet immuun voor kunnen worden gemaakt, alleen via hun apparaten.

Het rapporteren van en het leren uit spanningsdips blijft een continue verbeteringsproces en is het onderwerp van lopend onderzoek. Hoewel er tal van commissies en werkgroepen zijn geweest die zich met deze kwestie reeds bezighouden, heeft geen enkele een definitieve methode ontwikkeld voor het rapporteren van dips en geen enkele heeft een reeks limieten voor dips kunnen opstellen.

4.3. Gemeten parameters & PQM praktijken

Volgens de CEER benchmarking, moeten bij het opzetten van een PQM-programma alle storingen zoals vermeld in EN 50160 worden gemonitord.

De indicatoren – langzame spanningsvariaties, spanningsasymmetrie, flikkering, harmonische spanning, spanningsdips en overspanningen – worden op nationaal niveau gebruikt voor PQM-doeleinden en campagnes in veel landen. Men kan per land besluiten om extra indicatoren zoals voor overspanningen, interharmonische spanningen en snelle spanningsveranderingen etc. toe te voegen echter dit gebeurt slechts in een aantal landen:

1. Overspanningen: BE, IT, MK, NL, SK
2. Interharmonische spanningen: BE, LV, SI, SK
3. Snelle spanningsvariaties: BE, NL, NO, SI

De indicatoren – langzame spanningsvariaties, flikkering, spanningsasymmetrie, harmonische spanning, spanningsdips en overspanningen – worden in veel landen op nationaal niveau gebruikt voor statistische en regelgevende doeleinden.

4.3.1. Drivers voor PQM

Het toekomstig energielandschap vereist een het leveren van elektrische energie op een efficiëntere, effectievere, economische en ecologisch duurzamere manier en bevordert het gebruik van smart grid technologieën. Er zijn veel kritische belastingen in het moderne voedingssysteem, die systeemcondities vereisen die voldoen aan adequate Power Quality (PQ)-normen voor een goede werking. Zo wordt spanningskwaliteit een van de grootste problemen waarmee moderne energiesystemen worden geconfronteerd. PQ-monitoring is de basis van de onderzoeken naar de PQ-problematiek. Hoe de monitoringgegevens te gebruiken en om te zetten in bruikbare informatie is een grote uitdaging voor de systeembeheerders (42).

De belangrijkste stap in het ontwerp van een PQ-monitoringsysteem is een duidelijke identificatie van het doel van PQ-monitoring, wat cruciaal is voor de selectie van monitoringsites, de selectie van monitoringparameters, de structuur van het monitoringsysteem en de vereisten van functionele modules. De CEER en de nieuwe norm IEC 63222-2 geeft richtlijnen over de PQM drivers (39) (1):

1. Compliance analyse: Conformiteitsbewaking als regelgevende toepassing betreft het vergelijken van de spanningskwaliteitsindices voor individuele sites met bestaande wettelijke, regelgevende en vergunningsverplichtingen. Het controleren of de emissie van individuele netgebruikers voldoet aan emissienormen of lokale regels wordt niet gezien als een regelgevende toepassing, maar als een onderdeel van netwerkactiviteit. Men acht het niet nodig om volledige naleving te verifiëren (omdat continue monitoring nodig is voor alle aansluitpunten), want met de huidige stand van techniek en kosten is dit geen praktische oplossing en dit zal naar verwachting voorlopig zo blijven.
2. Performance analyse: Monitoring van systeemprestaties bestaat uit het monitoren van de prestaties van het systeem als geheel. Voor performance analyse van een systeem met een groot aantal locaties is het over het algemeen vereist om alleen spanningsstoringen te monitoren. Over het algemeen zijn 10 minutenwaarden voldoende om een nauwkeurig beeld te krijgen over de performantie van een net.

Deze analyse omvat ook het verwerven van kennis van de gemiddelde prestaties van het netwerk. Dit houdt ook het krijgen van inzicht in significante trends in het totale netwerk, specifieke regio's, spanningsniveaus, soorten netten en een specifieke set locaties, zoals het monitoren van de impact van gedistribueerde opwekking en nieuwe soorten afnemers (bv. elektrische auto's) op spanningskwaliteit. Hoe onvoldoende spanningskwaliteit of een trend naar onvoldoende spanningskwaliteit op een bepaalde locatie een drijfveer zou kunnen zijn voor verdere ontwikkeling van het netwerk. Een voldoende PQM-programma geeft de netbeheerder informatie over wat nodig is voor netwerkontwikkeling. Deze resultaten kunnen gebruikt worden voor netwerkontwikkelingsplanning door netwerkoperator.

Performance analyse laat toe het vinden van de impact van de PQ-problemen op de werking van het energiesysteem door middel van correlatieanalyse. Correlatieanalyse is een zeer effectieve data-analysemethode om de relaties te vinden voor het vertalen van de data naar informatie. De PQ-bewakingsgegevens kunnen helpen bij het beantwoorden van de vraag of er relaties zijn tussen problemen met de spanningskwaliteit en storingen van apparaten.

3. Troubleshooting: spanning en stroom moeten worden bewaakt, aangezien de combinatie van spanning en stroom kan helpen om te bepalen of de storingen stroomopwaarts of stroomafwaarts komen.
4. Specifieke site monitoring: geeft informatie over spanningskwaliteit op een specifieke locatie in het netwerk. Dit soort monitoring is van groot belang bij klachten van netgebruikers, nieuwe afnemers die de spanningskwaliteit willen weten voordat ze op het net worden aangesloten of bij spanningskwaliteitscontracten.

Naar aanleiding van klachten van netgebruikers over spanningskwaliteit worden er metingen op deze locatie uitgevoerd. Wanneer er een PQM-programma aanwezig is, kunnen gegevens uit dat programma worden gebruikt zonder dat aanvullende metingen nodig zijn. Dit zorgt voor een snellere reactie, een betere correlatie tussen het klacht- en storingsniveau en een vergelijking over een veel langere periode dan bij tijdelijke monitoring praktisch zou zijn geweest. Het zal ook de studie van de spanningskwaliteit mogelijk maken op het exacte moment van bijvoorbeeld onjuiste bediening of schakeling van apparatuur.

PQM-programma's kunnen nuttige informatie geven over te verwachten spanningskwaliteit-niveaus voor individuele afnemers en voor het totale afnemersbestand (pre-aansluiting). Nieuwe afnemers moeten het recht hebben om de spanningskwaliteit-niveaus te kennen voordat ze de meest geschikte locatie (en spanningsniveau) kiezen om hun installaties op het net aan te sluiten, om potentiële schade vooraf te kwantificeren, tegenmaatregelen te plannen om ze te voorkomen, juiste apparatuur te gebruiken en processen te ontwerpen met voldoende mate van immuniteit.

5. Geavanceerde toepassingen en onderzoeken: zijn relevant voor verschillende aspecten van zowel de kant van de systeembeheerder als de kant van de eindgebruiker, bv. hoe de efficiëntie van de werking van het systeem kan worden verbeterd, hoe de immuniteit van de eindgebruiker kan worden bevorderd, enz., het omvat meer specifieke metingen en diepgaande analyses die vaak geen deel uitmaken van de dagelijkse werkzaamheden. Typische toepassingen en onderzoeken zijn onder meer, signatuuranalyse en onderzoeken naar de voortplanting van verschijnselen van netvoedingskwaliteit. Voor geavanceerde toepassingen en onderzoeken: PQ-bewakingssites moeten worden opgezet volgens de specifieke taken van geavanceerde toepassingen en onderzoeken. Voor signatuuranalyse van specifieke apparatuur moeten de meetlocaties bijvoorbeeld zo dicht mogelijk bij de betreffende apparatuur liggen, zoals een transformator of condensatorbank.

Als geavanceerde toepassing, is bijvoorbeeld de PQ monitoring data te gebruiken om de ernst van de spanningsdips in het lokale net te begrijpen. PQ monitoring data geven de restspanning en duur van de dips op elke fase weer. De verhoudingen van spanningsdips van verschillende typen bieden zeer nuttige informatie voor de beoordeling van de ernst van spanningsdalingen in het lokale net. Het biedt ook nuttige informatie voor de beoordeling van de immuniteit tegen spanningsdips van apparatuur en installaties.

PQM-programma's spelen ook een belangrijke rol in de transitie naar smart grids. Vanwege de belangrijke veranderingen die worden verwacht op laagspannings- (LS) en middenspanningsnetten (MS), de toenemende hoeveelheid gedistribueerde opwekking en nieuwe soorten belastingen, wordt de spanningskwaliteit beïnvloed. Zowel verbeteringen als verslechtingen zijn te verwachten, maar deze effecten zijn moeilijk te anticiperen en PQM blijft de meest nauwkeurige en betrouwbare manier om ze bij te houden.

Onderzoek is een belangrijke drijfveer en een belangrijke toepassing van PQM. De inzichten die hiermee worden bekomen zijn ook nodig om eventuele investeringen in het netwerk te rechtvaardigen. Verschillende onderwerpen waarvoor uitgebreide datasets over PQ nodig zijn, moeten verder worden bestudeerd, waaronder:

- correlatie tussen gemeten gegevens en de structuur en karakteristiek van het netwerk, belastingkarakteristieken, gedistribueerde opwekking;
- beoordeling van de impact op PQ van toekomstige mogelijke netevoluties (steeds meer vermaasde distributienetten, eilanddistributienetten die alleen worden gevoed met gedistribueerde opwekking ...);
- kosten van slechte PQ en impact op de levensduur van elektrische apparatuur/installaties (installaties van afnemers, productie-eenheden, componenten van elektrische netten). Naast PQM vereist dit ook verdere diepgaande lange termijn studies, klantvragen, veldtesten, enz.

Dergelijke studies kunnen steunen op gerichte PQM-programma's in beperkte testgebieden of op uitgebreide monitoringprogramma's op lange termijn.

De monitoringperiode is een directe functie van de monitoringdoelstelling. Gewoonlijk probeert de bewakingsperiode een volledige "vermogen periode" vast te leggen, d.w.z. een interval waarin het stroomverbruik patroon zich begint te herhalen. Voor seizoensgebonden problemen kan de monitoringperiode echter maanden duren (43). De juiste tijd om te bewaken is de tijd die overeenkomt met het Power Quality-symptoom dat wordt onderzocht, hoewel het verzamelen van basisinformatie tijdens niet-symptomatische tijden ook nuttig kan zijn.

De PQM bij verschillende Europese landen wordt dieper bekeken in de paragrafen hieronder. Daarna is gekeken naar de richtlijnen voor goede praktijken voor de implementatie en het gebruik van spanningskwaliteitsbewakingssystemen voor regelgevende doeleinden van de CEER (1).

4.3.2. België

Elia heeft bijna 400 vaste PQ meettoestellen over hun hele net (van 36 kV tot en met 380 kV), op aansluitingspunten met verstorende afnemers (HVDC kabels, industriële afnemers, producenten en interconnectie met andere landen).

De EN 50160 norm is gebruikt voor compliancy. Op het Belgische (E)HS-net (24), zijn er weinig PQ problemen vastgesteld. De spanningskwaliteit is onder controle en wordt nauwlettend gevolgd. Maatregelen die zijn getroffen om de risico's te beperken, zijn gericht op het verzamelen van informatie:

- Nauwere opvolging van de evolutie van de emissieniveaus en van nieuwe installaties;
- Ontwikkeling van simulatiemodellen voor installaties van afnemers en methoden om hun gedrag te simuleren;
- Leer zoveel mogelijk uit werkelijk waargenomen fenomenen;
- Samenwerken met alle betrokken partijen om continue interoperabiliteit te waarborgen;

Er dienen nog concrete risico analyses worden uitgevoerd om onnodige dure investeringen te vermijden (filter, ...).

Bij de RNB's, is er een permanente PQM uitgevoerd op alle transitie posten HS/MS om de conformiteit met de EN 50160 na te gaan voor jaarlijkse rapportage naar de toezichthouder.

4.3.3. Portugal

In Portugal bepaalt de lokale code voor de kwaliteit van de elektriciteitsvoorziening dat netbeheerders onder normale bedrijfsomstandigheden de kenmerken van de voedingsspanning moeten bewaken. Sommige van deze kenmerken moeten in overeenstemming met de limieten gedefinieerd in de internationale norm EN 50160 worden gehandhaafd.

De code stelt ook het minimum aantal netwerkpunten vast dat moet worden gedekt door het monitoringprogramma voor de spanningskwaliteit in elk spanningsniveau (44).

Voor het jaar 2017 moest het programma een permanente monitoring bevatten op 100% van de 80 leveringspunten van het transportnet (gemeten op de HS-rails van de EHS/HS-stations) en een combinatie van

permanente monitoring en periodieke campagnes van 1 jaar tegen 20% van de 400 afleverpunten van de HS- en MS-distributienetten (gemeten op de MS-bussen van de HS/MS-stations).

Voor de laagspanningsnetten geldt dat elke 4 jaar per gemeente minimaal 1% van de 60.000 verschillende middenspannings transformatoren moeten worden gemonitord. De meting wordt uitgevoerd op de LS-rails voor een periode van 3 maanden. Wanneer een klant een klacht indient, moeten netbeheerders een meting van de spanningskarakteristieken uitvoeren. Bovendien is het de bedoeling dat tussen 2017 en 2023 de in totaal 6 miljoen LS-afnemers zullen uitgerust zijn met slimme meters die de meest continue verschijnselen kunnen meten.

4.3.4. Australia

Om de betrouwbaarheid en kwaliteit van de voeding in Australia te waarborgen, zetten RNB's zich in op proactieve PQM monitoring en rapportage (16). Sinds de start in 2002 is het project uitgegroeid tot het verzamelen van gegevens uit meer dan 12.000 sites geleverd door 12 van de 16 Australische RNB's. Deze sites bevatten een mix van laagspanning (230 V) en locaties met midden-/hoogspanning (6,6 kV – 132 kV).

Het primaire doel van proactieve PQ-monitoring is niet om individuele slecht presterende sites te identificeren. Het is meer gericht op het identificeren van de prestaties en trends van het hele netwerk om te bepalen of planningsprocessen effectief zijn. Maar de gegevens worden ook gebruikt om de sites met slechte prestaties te kunnen identificeren.

Op HS of zelfs MS niveau, waarbij het aantal locaties relatief klein is in vergelijking met het aantal LS-locaties, zou het mogelijk moeten zijn om op elke locatie een PQ-meter te installeren. Deze methodologie is echter niet mogelijk bij laagspanning, waar het aantal sites onbetaalbaar zou zijn. De vraag wordt dan welke verhouding van de sites op LS nodig is om voldoende te monitoren om de conformiteit van het hele netwerk te verifiëren. Dit is de fundamentele vraag voor het lopende onderzoek met betrekking tot het PQM project in Australia. Aangezien er slechts beperkte literatuur beschikbaar is, die richtlijnen geeft voor de steekproefomvang die nodig is om netwerkconformiteit op LS-locaties aan te tonen, werden de aanbevelingen van de Council of European Energy Regulators (CEER) Guidelines of Good Practice on the Implementation and Use of Voltage Quality Monitoring Systems for Regulatory Purposes (1) gebruikt. Het volgende aantal sites voor verschillende statistische indicatoren van het gehele netwerk werd beschouwd als minimum:

- 20 locaties als gemiddelde over alle locaties worden gerapporteerd
- 200 locaties als 95ste percentielwaarde over alle locaties worden gerapporteerd
- 1000 locaties als 99ste percentielwaarde over alle locaties worden gerapporteerd

De PQM rapportage in Australië moet de volgende info leveren:

1. Compliancy van het hele netwerk aantonen (via betrouwbaarheidsinterval voor LS);
2. Percentage sites dat de limieten overschrijdt (er worden eenvoudige staafdiagrammen geproduceerd die het percentage sites illustreren dat de limieten voor elke PQ-parameter overschrijdt.);
3. PQ-parameter trends op lange termijn: trends geven een zeer belangrijke indicatie van de prestaties van het netwerk. Ten eerste zullen trends laten zien of de niveaus stijgen of dalen en op welk tempo. Dit geeft aan of er PQ-parameters zijn die in de nabije toekomst van belang kunnen zijn met betrekking tot limieten. Ten tweede zullen trends ook laten zien of PQ-managementstrategieën effectief zijn.
4. Prestaties per site classificatie is een methode om de impact van verschillende netwerkkenmerken op de algehele PQ-parameter niveaus te onderzoeken om te bepalen of er bepaalde combinaties van netwerkkenmerken zijn die een significante invloed hebben op de PQ-prestaties. Sites worden geclassificeerd op basis van de netwerkconstructie (stedelijk of korte ondergrondse kabels, of landelijk met lange bovenleidingen), belasting (industriële, residentiële, commerciële of gemengd) en sterktekenmerken (locatie dicht bij het aanbod) van de aangeboden locaties.

Het verzamelen van een grote hoeveelheid gegevens over een lange periode heeft de identificatie van de meest zorgwekkende PQ-parameters mogelijk gemaakt, met betrekking tot naleving of trending in Australische distributienetten. Het PQM project heeft het ook mogelijk gemaakt om de PQ-capaciteit van distributienetten te identificeren met betrekking tot PQ-parameterlimieten die kunnen worden getolereerd voordat apparatuur defect raakt of klachten van afnemers ontstaan. De verkregen inzichten kunnen ook worden gebruikt om gefundeerde voorstellen te doen aan regelgevende instanties. Inzicht in de capaciteiten en hostingcapaciteiten van netten zorgt ervoor dat er geen PQ-parameterlimieten worden ingevoerd waaraan netten niet kunnen voldoen of waarvoor naleving ervan te kostbaar zou zijn.

Door de lange duur van het project (van 2002 tot 2015) konden lange termijn trends worden ontwikkeld. De meest interessante trend die is waargenomen, is dat harmonische spanningsniveaus op zowel LS- als MS-locaties met een relatief kleine maar consistente snelheid afnemen. Aangenomen wordt dat dit te wijten is aan een aantal factoren, waaronder betere prestaties van apparatuur met betrekking tot harmonische stroomemissie en effectievere toewijzingsstrategieën voor harmonische stroomemissie die worden toegepast door RNB's.

4.3.5. Monitoring in EHS en MS netten

Voor extra hoogspanning (EHV) en hoogspanning (HV) netten beschouwen CEER (1) het meten van de PQ op alle EHS/HS-, EHS/MS- en HS/MS-onderstations en op de aansluitingspunten van alle EHS- en HS-afnemers, producenten (centrales) en consumenten (industriële afnemers) als een goede praktijk. Het aantal onderstations en het aantal afnemers in de EHS en HS netten is relatief klein, waardoor de kosten van PQ-monitoring op deze locaties beperkt zullen zijn en de voordelen groot:

Als eerste: monitoring bij de aansluitingspunten van EHS en HS afnemers geeft informatie over de PQ waar deze afnemers zijn blootgesteld, waarbij spanningsdips over het algemeen het belangrijkste zijn.

Ten tweede: monitoring met EHS en HS-afnemers geeft informatie over eventuele nadelige bijdragen van deze afnemers aan de PQ ervaren door andere afnemers (ook wel "emissies" genoemd)

Met betrekking tot de plaatsing van meetinstrumenten in de HS/MS-stations raadt de CEER aan om ze aan de MS-zijde van de transformatoren te plaatsen. Deze locatie zorgt ervoor dat de gemeten PQ lijkt op de PQ zoals deze door de netgebruikers wordt ervaren.

Monitoring in de EHS- en HS-netten dient op alle meetlocaties permanent plaats te vinden. Permanente meting betekent dat het meetinstrument op dezelfde plaats blijft voor het hele jaar.

4.3.6. Monitoring in MS netten

Gezien de huidige kosten en staat van technologie, wordt permanent monitoren (gedurende 52 weken per jaar) op alle locaties in de MS netwerk niet aanbevolen.

Het exacte aantal meetlocaties in MS-netten zal variëren tussen verschillende landen vanwege de specifieke netwerkstructuur en andere lokale omstandigheden.

Er zijn verschillende benaderingen mogelijk:

1. een willekeurige selectie van locaties op landelijk niveau of per netbeheerder, of in een andere gebied dat van bijzonder belang is voor benchmarking;
2. een klein aantal monitoren (minder dan 10) in elk MS-netwerk bij representatieve locaties (d.w.z. achter elke HS/MS-transformator);
3. een groot aantal monitoren (meer dan 10) in een geselecteerd aantal MS-netten typisch voor dat land of gebied. Typisch met betrekking tot bijvoorbeeld klant dichtheid, klimaat, percentage ondergrondse kabels, type netwerk gebruikers. Ook kan gekozen worden voor een aantal "typische stedelijke netten" of "typische landelijke netten".

Elk van de bovengenoemde benaderingen heeft zijn voor- en nadelen. De keuze hangt sterk af van lokale omstandigheden en van de toepassingen van de resultaten uit het PQM-programma.

Vergelijkbaar met monitoring in de EHS- en HS-netten, adviseren de CEER dat permanent PQM gedurende een heel jaar (52 weken op elke locatie) moet worden uitgevoerd in de MS netten. De redenen waarom permanente monitoring wordt aanbevolen, zijn dezelfde: om een duidelijk beeld te krijgen van het aantal spanningsevents, zoals spanningsdips, en het maakt de observatie mogelijk van seizoensinvloeden op de PQ in MS netten.

4.3.7. Monitoring in LS netten

In LS-netten moet PQM worden uitgevoerd op de aansluitingspunten van een selectie van LS afnemers. Voor een nationaal monitoringsprogramma dat gericht is op het verkrijgen van een statistisch relevante beeld van de PQ voor alle LS-afnemers, dient een willekeurige steekproef van LS-afnemers in het hele land te worden geselecteerd. Deze willekeurige steekproef van LS-afnemers zal meestal een klein fractie zijn van het totale aantal LS-afnemers in een bepaald land. De PQ bij deze aansluitingspunten kunnen permanent of voor een minimale periode van één week worden bewaakt.

Langzame spanningsvariaties worden beschouwd als de belangrijkste PQ-parameter te monitoren in de laagspanningsnetten omdat problemen met de voedingsspanning vaak zeer lokaal zijn en vooral invloed heeft op LS-klant.

Volgens een CEER benchmarking van 2022 (11) mogen de slimme meters geïntegreerd worden in het PQM programma. De penetratiegraad van slimme meters varieert sterk tussen de deelnemende landen. Aan de ene kant zijn er landen met bijna nul procent geïnstalleerde slimme meters (Cyprus, Georgië, Duitsland, Griekenland, Moldavië en de Brusselse regio van België) en aan de andere kant zijn er landen die de 100% naderen (Estland, Finland, Italië, Noorwegen en Spanje), zie Tabel 7.

Tabel 14: penetratiegraad van slimme meter per land volgens de CEER benchmarking van 2022 (11).

Land	PQ functie van slimme meter	Penetratiegraad van slimme meter in het LS-netwerk
België	PQ monitoring toegelaten	3% in Vlaanderen (2019) 0.2% in Wallonië (2018) 0% in Brussel (2019)
Bosnië en Herzegovina	PQ monitoring toegelaten	15.34% (2018)
Cyprus	PQ monitoring toegelaten	0% (2019)
Duitsland	PQ monitoring toegelaten	nihil
Estland	-	99.6% (2017)
Finland	PQ monitoring toegelaten	99.86% (2018)
Frankrijk	PQ monitoring toegelaten	50% (2018)
Georgië	-	< 0.01% (2018)
Griekenland	-	De uitrol van de slimme meter is nog niet gestart
Ierland	PQ monitoring toegelaten	1% (2019)
Italië	Langzame spanningsvariaties en onderbreking	Bijna 100%
Kosovo	PQ monitoring toegelaten	8.76% (2019)
Kroatië	PQ monitoring toegelaten	4% (2018)
Letland	Spanningsdips en onderbreking	48% (2018)
Montenegro	Langzame spanningsvariaties en onderbreking	74.2% (2018)
Nederland	-	54% (2019), >90% (2023)
Noorwegen	-	98% (2019)
Oekraïne	geen officiële eisen voor slimme meters behalve voor registratie van spanning	6.8% (2017)
Oostenrijk	PQ monitoring toegelaten	15% (2018, uitrol lopende)
Roemenië	Langzame spanningsvariaties en onderbreking	9.6% (2018)
Slovakije	monitoring of PQ toegelaten	20% (2020)
Slovenië	Langzame spanningsvariaties, spanningsdips, overspanning, onderbreking en spanningsasymmetrie	66% (2018)
Spanje	-	98% (2019)

Zweden	PQ monitoring toegelaten	RNB is verplicht om ten 1 januari 2025 alle meters te hebben vervangen door slimme meters
--------	--------------------------	---

Nu gedistribueerde opwekking en de penetratie van slimme meters in snel tempo groeien, wordt aanbevolen door CEER (11) om meer onderzoek te doen naar het gebruik van slimme meters voor spanningskwaliteit monitoring.

Gezien slimme meters niet de mogelijkheid hebben om ook harmonische en flicker te kunnen meten zoals IEC 61000-4-30 klasse A²⁷, zal PQM met slimme meters waarschijnlijk nog voor een tijd gepaard moeten gaan met PQM door meer geavanceerde monitoring toestellen in de LS netten om een volledig beeld van de PQ aan de zijde van de aangesloten afnemers te krijgen.

IEC 61000-4-30 definieert 3 prestatieklassen, als volgt:

1. Klasse A - moet voldoen aan de hoogste prestaties en nauwkeurigheid niveaus om reproduceerbare, vergelijkbare resultaten te verkrijgen.
2. Klasse S - de nauwkeurighedsniveaus zijn minder streng. Klasse S meettoestellen kunnen worden gebruikt voor statistische studies en contractuele toepassingen waarvoor vergelijkbare metingen niet vereist zijn.
3. Klasse B - deze klasse werd geïntroduceerd in de 1^e en 2^e edities van de standaard om te voorkomen dat instrumenten overbodig worden. In editie 3 van de norm verwijst men in de bijlage naar deze prestatieklasse.

Niettemin, kunnen het merendeel van bestaande slimme meters gegevens beschikbaar maken voor de assessment van de spanningskwaliteit. Digitale meting wordt dan een real-time spanningsregeling die vereist is voor moderne actieve distributienetten. De flexibiliteit van deze aanpak maakt het mogelijk om veranderende markten aan te pakken, kan helpen bij het identificeren van harmonische patronen, spanningsvariaties die verband houden met prosumentenprofielen in zwakke netten, enz. Ze ondersteunen zo nieuwe regelgevingsinitiatieven. Dit helpt bij het inzetten van actieve netwerkcontrole, bijvoorbeeld het behouden van de spanningskwaliteit op eindgebruikersniveau (45).

De slimme meters gebruikt door de RNB's in Nederland zijn niet conform met IEC 61000-4-30 en ze meten geen PQ data. Alleen maar de actuele 10-minutengemiddelde spanningen voor de 3 fasen zijn beschikbaar, met een nauwkeurigheid van 3%²⁸, evenwel een tellers van "events". Een event is een tijdelijke overschrijding van een drempelwaarde (dips of overspanning).

De CEER raadt niet aan om alle PQ-storingen bij alle afnemers, permanent te meten via slimme meters. Dit zou resulteren in een excessieve prijsverhoging van de meter en enorme hoeveelheden gegevens. Problemen als gevolg van zeer grote hoeveelheden gegevens kunnen op ten minste twee manieren worden vermeden:

1. De PQ op de aansluitingspunten van sommige LS-afnemers moet permanent worden gecontroleerd voor statistische doeleinden. De selectie van gecontroleerde LS-afnemers zou jaarlijks kunnen wisselend volgens een rotatie systeem.
2. Alle LS-afnemers kunnen worden gecontroleerd op basis van waarschuwings- en alarmniveaus bijvoorbeeld waarschuwing als 90% van het niveau bereikt is en alarmeren als de niveaus overschreden zijn.

Lange termijn PQM-programma's in de LS-netten kunnen op twee verschillende manieren worden opgezet:

1. een beperkt aantal draagbare toestellen om op elke site te monitoren, bijvoorbeeld op weekbasis verplaatsen naar een andere locatie; of
2. een groter aantal toestellen te gebruiken om permanent te monitoren gedurende periode van jaren.

²⁷ De norm IEC 61000-4-30 definieert de meetmethoden, tijdsaggregatie, nauwkeurigheid en evaluatie voor elke parameter voor spanningskwaliteit.

²⁸ Tegen 0.1% voor klasse A meettoestellen volgen IEC 61000-4-30 en 0.5% voor klasse S;

PQM-programma's op basis van draagbare toestellen zijn goedkoper in kapitaalkosten, maar zullen waarschijnlijk duurder zijn in operationele kosten. Ze zullen toelaten om meer locaties met een hoog niveau van PQ storingen te detecteren. Ongeveer 20 locaties kan gemonitord worden in één jaar per meettoestel (in ten minste 14 volle dagen van monitoring per locatie en één werkdag zonder monitoring tussen twee locaties). Over een periode van vijf jaar is het aantal gemonitorde locaties 100 keer zoveel als bij gebruik van vaste monitoringlocaties.

PQM-programma's op basis van vaste toestellen hebben de volgende voordelen:

- ze geven een beter totaalbeeld van de PQ op elke locatie;
- ze kunnen informatie geven over seizoen variaties;
- ze geven informatie over spanningsdips, overspanningen en andere relatief zeldzame spanning evenementen.

Door het enorme aantal mogelijke meetpunten in het laagspanningsnet is een compromis in kosten en volledigheid van informatie noodzakelijk. Daarom voor het bewaken van harmonischen, spanningsvariaties, asymmetrie, flikkering en individuele snelle spanningsvariaties, wordt het gebruik van draagbare toestellen acceptabel geacht, zolang ze worden gecombineerd met een aantal locaties met vaste toestellen om informatie te geven over seizoensvariaties. Voor het verkrijgen van informatie over spanningsdips en overspanningen worden vaste toestellen noodzakelijk geacht.

4.3.8. Statistische aanpak voor het selecteren van monitoring locaties

Voor flikkering, spanningsasymmetrie, harmonische spanning, interharmonische spanning en voedingsspanning variaties wordt de karakteristiek volgens EN 61000-4-30 (46) berekend over een periode van 10 minuten interval met behulp van specifieke tijdaggregatieregels. De meeste Europese landen gebruiken waarden van 10 minuten, wat ook de standaardwaarde is voor de meeste PQ-toestellen.

Het wordt ook aanbevolen om karakteristieken over kortere intervallen te berekenen. Het merendeel van de PQ-toestellen geeft de hoogste en laagste (1 cyclus of 10 cycli) RMS-spanning voor elk interval van 10 minuten. Vooral voor langzame spanningsvariaties, is dergelijke informatie belangrijk voor het begrijpen van de oorzaken van limietoverschrijdingen, voor het verklaren van bepaalde apparatuur problemen en voor de vaststelling van toekomstige limieten.

Als de resultaten van een PQM-programma gebruikt moeten worden voor statistische doeleinden (bv. 95% waarden van storingsniveaus), is het belangrijk dat de selectie statistisch relevant is en dat de steekproef (d.w.z. het aantal meetlocaties) voldoende groot is. Voor de selectie van meetlocaties wordt de volgende aanpak aanbevolen door CEER richtlijnen:

1. Kies een groep van gelijkwaardige locaties voor monitoring, bijvoorbeeld de LS-afnemers in het buitenland gebied van een bepaalde netbeheerder²⁹.
2. Selecteer willekeurig een aantal locaties die gemonitord zullen worden uit de set van alle mogelijke locaties (bv. alle LS-afnemers op het platteland). Het minimum aantal locaties hangt af van de toepassing en van de te bereiken nauwkeurigheid. De volgende minimaal aantallen zijn voorgesteld voor elke set van locaties:
 - 20 als alleen gemiddelden over alle locaties worden gerapporteerd;
 - 200 als 95%-waarden over alle locaties³⁰ worden gerapporteerd;
 - 1000 als 99%-waarden over alle locaties worden gerapporteerd.

Op te merken is dat alle locaties geselecteerd dienen te worden op basis van statistische relevantie (bijvoorbeeld alle EHV- en HV-afnemers). Verder dient het aantal geselecteerde locaties onafhankelijk te zijn van het totaal

²⁹ Voor elke verschillende groep van gelijkwaardige locaties voor monitoring moet een nieuwe selectie van monitoringlocaties gemaakt worden om een statistisch relevante steekproef te verkrijgen.

³⁰ De 95%-waarde is de waarde die slechts door 5% van een populatie wordt overschreden (in het geval van PQ-monitoring bij 5% van de meetlocaties)

aantal locaties. Bijvoorbeeld 20 van de 100 EHS en HS-onderstations is een even geldige selectie als 20 van de 5 miljoen LS-afnemers.

Hoe groter het aantal toestellen, hoe nauwkeuriger de schatting van die statistische parameters zijn. Onzekerheid bij het schatten van een gemiddelde waarde hangt af van het aantal monitoren ("aantal samples") en de spreiding van de index onder de verschillende locaties ("standard deviation").

De advieswaarde, minimaal 20 meetpunten, is gebaseerd op een compromis tussen het bereiken van een aanvaardbare nauwkeurigheid en het beperken van het aantal toestellen.

Als basis in de aanbevelingen in de CEER richtlijnen wordt gesteld dat er minimaal 10 meetlocaties beschikbaar moeten zijn boven de 95% waarde. Dit vereist een totale steekproefomvang (aantal toestellen) van 200, aangezien 5% van de populatie boven de 95%-waarde ligt. Volgens dezelfde redenering, zijn er 1000 monitorlocaties nodig om een acceptabele schatting te krijgen voor de 99%-waarde.

Voor continue fenomenen is het gemiddelde zelden een goede indicator voor PQ. Het gebruik van hoge percentielwaarden zoals 95% of 99% zou geschikter zijn. De reden hiervoor is dat de impact op eindgebruikers vooral wordt bepaald door de hogere waarden. Daarentegen is een wijdverspreide mening echter ook dat extreme waarden niet indicatief zijn. Een andere reden om de hoogste waarden niet in aanmerking te nemen, is dat ze het gevolg kunnen zijn van meetfouten die het eliminatie proces hebben doorstaan.

4.3.9. Rapportage

Er zijn verschillende partijen die geïnteresseerd zijn in de spanningskwaliteit van netten:

- de regulator: om de algemeen netwerk performance te kennen;
- de netbeheerder: om de trends te identificeren en om actie te nemen in geval van degradatie van spanningskwaliteit;
- de individuele eind gebruikers: om de installatie correct te ontwerpen.

Voor de publicatie van PQ-gegevens op landelijk of regionaal niveau (bijvoorbeeld per TNB of RNB), raadt de CEER aan om de geregistreerde PQ-gegevens van verschillende monitoringsites te aggregeren en te analyseren per criteria. De gemeten PQ-storingen kunnen dan worden gecorreleerd met deze specifieke netwerkparameters:

- Type netwerk (kabel / lijnen / gemengd);
- Lengte netwerkkabels;
- Type systeemaarding;
- Spanningsniveau (EHS / HS / MS / LS);
- Type klant (residentieel / klein bedrijf / industrieel);
- Decentrale opwek (aanwezig / hoog / laag / afwezig);
- Mate van afnemers met zelfopwekking (ja/nee);
- Type regio (stedelijk / voorstedelijk / landelijk);
- DSO (klein, middelgroot, groot).

Voor de publicatie van geaggregeerde PQ-gegevens, die openbaar beschikbaar zouden moeten zijn, raadt de CEER aan om minstens één keer per jaar een rapport te publiceren op het internet. Het rapport moet de naleving van PQ regelgeving en ook een analyse van de waargenomen trends bevatten.

De gegevens moeten, indien nodig, beschikbaar worden gesteld aan alle betrokken partijen volgens beveiligingsmechanismen die gericht zijn op de bescherming van de belangen van netwerkexploitanten en van individuele afnemers.

4.3.10. Vergoeding

In sommige landen krijgen eindgebruikers een vergoeding of een lager tarief als niet aan de norm voor PQ wordt voldaan (11). In sommige landen zijn er geldboetes en/of andere soorten sancties wanneer de wetgeving, voorschriften of normen niet worden nageleefd:

- België: elke rechtstreekse schade, lichamelijk of materieel, geleden door een op het distributienet aangesloten eindgebruiker wegens een onderbreking, non-conformiteit of onregelmatigheid van de levering van elektrische energie, wordt vergoed door de verantwoordelijke RNB of TNB;
- Hongarije: er wordt automatisch een vergoeding betaald aan de klant als de gegarandeerde norm voor voedingsspanning niet wordt gehaald; Bij overschrijding van de norm wordt op verzoek van de klant een vergoeding betaald voor het aantal korte onderbrekingen;
- Italië: de individuele regeling van onderbrekingen en spanningsdips voor HS-afnemers die zich bij het PQM-systeem hebben aangesloten, voorziet erin dat deze afnemers worden gecompenseerd als de PQ lager is dan bepaalde drempels;
- Als in Letland niet aan de PQ-kenmerken wordt voldaan, moet de RNB een verlaagd tarief toepassen voor diensten van het elektriciteitssysteem. Het verlaagde tarief wordt berekend door de coëfficiënt 0,5 toe te passen op de transmissiecomponent elektriciteit van het betreffende tarief;
- Consumenten in Polen hebben recht op kortingen gespecificeerd in de tarieven van energiebedrijven (TSO, DSO) in geval van niet-naleving van de toegestane niveaus van spanningsafwijkingen van de nominale spanning.

4.4. Spanningskwaliteit op niveau van consument

4.4.1. Individuele contract voor spanningskwaliteit

Alle Europese landen hebben regelgeving over PQ die van toepassing is op alle afnemers, RNB en TNB. In Bosnië en Herzegovina, Kroatië, Italië, Litouwen, Montenegro, Noorwegen en Polen is het ook mogelijk om individuele contracten af te sluiten met betrekking tot PQ. Netbeheerder en klant kunnen hogere eisen aan de kwaliteit van levering afspreken dan de landelijk gehanteerde normen. Dit gebeurt meestal na betaling door de klant, maar de netbeheerder zou moeten betalen in het geval van ondermaatse prestaties.

4.4.1. Emissie limiet

Met betrekking tot de aanhoudende en snelle veranderingen in voedingssystemen op alle spanningsniveaus, zoals de toename van vermogenselektronica bij opwekking en niet-lineaire belastingen, moeten Power Quality-normen evolueren om deze veranderingen te weerspiegelen en gelijke tred te houden met de behoeften van iedere spelers in het distributienet. Een onderwerp van groot belang is de toewijzing van een adequaat deel van het compatibiliteitsniveau voor spanningsvervorming aan de afnemers in de planningsfase. Aangezien vermogenselektronica in opmars is in opwekking en opslag, moeten deze installaties deel uitmaken van het allocatieproces. Het al in de planningsfase vaststellen van eerlijke en gerechtvaardigde limieten voor emissies is een van de uitdagingen op het gebied van Power Quality (25).

Het delen van verantwoordelijkheid is door de CEER geïdentificeerd als een belangrijk principe voor PQ-regulering. Dit betreft onder meer het stellen van maximale niveaus van spanningsverstoringen op het leveringspunt tussen de netbeheerder en zijn afnemers en emissiegrenswaarden voor installaties.

Emissies van individuele afnemers moeten worden beperkt om de spanningsverstoringniveaus binnen de gestelde eisen te houden. Om de impact die afnemers hebben op de PQ van de netten te reguleren, heeft een aantal landen wetgeving ingevoerd met betrekking tot de emissie door individuele afnemers. Ongeveer 58% van de landen hebben nationale regelgeving die direct of indirect maximale storingsniveaus met betrekking tot PQ opleggen, zoals emissielimieten voor installaties.

In het "special report" van CIRED 2021 (12), worden er nieuwe richtlijnen voorgesteld om de harmonische emissie van een werkende klantinstallatie te bepalen op basis van veldmetingen. Het voorgestelde proces bestaat uit twee fasen, de eerste analyseert de huidige harmonischen, terwijl de tweede de harmonische bijdrage van de spanning analyseert. Hieruit blijkt dat de beoordeling van alleen harmonische stromen in een aantal gevallen kan leiden tot een niet-nalevingsbesluit, wat niet gerechtvaardigd is als de harmonische spanningsbijdrage wordt geëvalueerd.

Het principe van EMC-coördinatie wijst een toegestane harmonische emissie toe aan elke klantinstallatie. Als afnemers hun toegewezen harmonische emissie niet op grotere schaal benutten, kan de bestaande hostingcapaciteit van het netwerk met betrekking tot harmonische emissies onderbenut worden. Dit kan leiden tot vermijdbare kosten voor zowel de klant als de netbeheerder als er onnodige mitigatiemiddelen nodig is. Een studie wordt uitgevoerd in Zwitserland om het gebruiksniveau van harmonische emissielimieten in laag- en middenspanningsnetten te kenmerken (47). Hiervoor wordt een representatieve set van klantinstallaties in Zwitserland geselecteerd, waaronder ook duurzame opwekking, opslagsystemen en laders voor elektrische voertuigen. De studie analyseert door middel van veldmetingen het gebruik van harmonische stroom en spanningsemissie bij klantinstallaties die zijn aangesloten op LS- en MS-netten in Zwitserland. Harmonische emissielimieten worden dominant onderbenut met betrekking tot de bedrijfstoestand van de installaties van de klant tijdens de meetperiode. De studie toont aan dat het monitoren van harmonische emissieniveaus een waardevol hulpmiddel kan zijn voor netwerkbeheerders om harmonische storingsniveaus in een netwerk te beheersen, b.v. door flexibiliteit te introduceren bij het toewijzen van harmonische emissie.

4.5. Aanpassing van normen

De eisen in de Nederlandse Netcode elektriciteit zijn op een aantal aspecten strenger dan in andere landen alsook dan de EU regelgeving, namelijk voor asymmetrie (strenger limietwaarde en percentiel) en snelle spanningsvariatie (strengere waarde).

Wat duidelijk wordt uit de jaarrapportage is dat de spanningskwaliteit in Nederland ver onder de toelaatbare grenzen is die gedefinieerd zijn in de normen, in het bijzonder de Netcode elektriciteit en de Europese norm EN 50160.

Een zorg van de netbeheerders is dat de limieten verplaatst worden naar de huidig waargenomen niveaus. De huidige niveaus zijn het gevolg van een bedrijfsvoering met overwegend synchroon gekoppeld productievermogen en een beperkt gebruik van vermogenselektronica. De aankomende energietransitie zal leiden tot een toenemende variabiliteit in het net, een toenemend gebruik van vermogenselektronica (ook op de hogere netvlakken) en mogelijk een afnemend kortsluitvermogen. Deze ontwikkelingen zouden kunnen leiden tot een slechtere (maar niet persé problematische) spanningskwaliteit dan de huidige niveaus. Als tegelijk ook de limieten verlaagd worden, zou dit kunnen leiden tot nog grotere investeringen dan nu al nodig zullen zijn.

TenneT is van mening dat de grenzen die zijn gedefinieerd in een aantal normen te streng zijn (48). De grenzen zoals vastgesteld in EN 50160 zijn tot stand gekomen door de inzet van een deskundig gremium op basis van onderzoek en jarenlange ervaring. TenneT vindt dat het studiegremium TC8X van CENELEC daarvoor de aangewezen plaats is voor discussie over grenzen. Daarnaast zijn ook de werkgroepen van het CIGRE belangrijk.

TenneT vraagt zich af of het zinvol is te investeren in een betere spanningskwaliteit terwijl die nu al beter is dan vastgelegd in de huidige normen. Gegeven dat de compatibiliteitsniveaus in de huidige normen afgestemd zijn op de immuniteitsniveaus van apparatuur, kan het antwoord niet zijn dat daarmee grote voordelen behaald gaan worden in het voorkomen van uitval van apparatuur. De economische motivatie die door bijvoorbeeld de producenten wordt aangevoerd is dat een niet-ideale spanningskwaliteit leidt tot extra netverliezen en een hogere uitstoot van CO₂ (milieuschade). Hoe groot de economische voordelen van een hogere spanningskwaliteitsverbetering zijn, is moeilijk te kwantificeren. De kosten voor het verbeteren van de spanningskwaliteit komen overigens ten laste van de transporttarieven en daarmee alleen van de verbruikers en niet van de producenten.

4.5.1. Langzame spanningsvariatie

De problemen met omvormers in LS-netten ontstaan in de piek van de productie van de zonnepanelen, dit zijn ook de momenten dat er congestie kan optreden. Door de piek te reduceren zijn meerdere problemen opgelost. De normeringen zou iets moeten doen aan een spanningsregeling voor (grote) omvormers, bv. terugregelen in vermogen bij een bepaalde spanning. Zouden alle omvormers deze regeling benutten, hetgeen reeds technisch mogelijk is, dan schakelen de omvormers niet uit bij 253 V.

De RNB zou graag een aanpassing van de wetgeving naar spanningsregeling voor smart grids zien. De ACM heeft recent (15/02/2023) een codewijziging bij LS voorgesteld waarin de beveiliging van productie-eenheden, zoals de omvormers van zonnepanelen anders wordt ingericht. Deze eisen bepalen bij welke maximale waarden van de netspanning elektriciteitsproductie-eenheden van het net mogen afschakelen. Door het wijzigen van de overspanningsbeveiligingseisen hoeven zonnepanelen in laagspanningsnetten minder vaak afgeschakeld te worden. De overspanningsbeveiligingseisen zijn al vastgelegd in het normblad NEN-EN 50549-1:2019. Door deze wijziging worden de eisen in de Netcode elektriciteit in overeenstemming gebracht met deze NEN-EN 50549-1:2019. Als deze wijziging in de Netcode elektriciteit is doorgevoerd moeten nieuwe omvormers aan deze norm voldoen.

De wijziging betreft 2 parameters, de aanspreeksnelheid van de overspanningsbeveiliging van de elektriciteitsproductie-eenheid en de drempel voor de uitschakeling (zie Tabel 15).

Tabel 15: voorstel tot wijziging van de voorwaarden als bedoeld in de Elektriciteitswet 1998 betreffende de overspanningsbeveiliging

Criteria voor de overspanningsbeveiliging	Huidige versie Elektriciteitswet 1998	Voorstel 15/02/2023
Aanspreeksnelheid	2s	zonder tijdsvertraging
Drempel	110% van de nominale spanning	Tienminutengemiddelde waarde van 110% van de nominale spanning

Tevens wordt een extra onderdeel ingevoegd met een overspanningsbeveiliging die zonder tijdsvertraging aanspreekt bij 115% van de nominale spanning. De ACM heeft nog geen definitief besluit genomen aangezien ze meer duidelijkheid verlangt over mogelijke gevolgen van de voorgestelde wijzigingen.

In België is de limiet voor ont koppeling van de productie op LS-net bepaald in het technisch voorschrift C10/11 van Synergrid. De beveiligingsinstellingen zijn de volgende voor een automatisch scheidingsstelsel van de elektriciteitsproductie-eenheden met een maximaal vermogen van ≤ 30 kVA:

- Overspanning gemiddeld 10 min, met drempel van 230 V + 10%, afschakeling zonder tijdsvertraging
- Overspanning: met drempel van 230 V + 15%, afschakeling zonder tijdsvertraging

4.5.2. Snelle spanningsvariatie

Voor snelle spanningsvariaties, zijn de limieten in de Nederlandse Netcode elektriciteit strenger dan in andere landen / de EU regelgeving zowel voor netbeheerders als aangeslotenen, wat nadelig kan zijn.

TenneT vraagt zich af of de methode zoals toegepast in het Verenigd Koninkrijk ook toegepast zou kunnen worden in Nederland. Belangrijk verschil is dat in het Verenigd Koninkrijk ruimere limieten gelden voor componenten die incidenteel geschakeld worden, zoals transformatoren (40), zie §4.2. De EN 50160 voorziet ook een limiet die verschillend is volgens de frequentie van de event.

TenneT ziet in praktijk een groot aantal overschrijdingen met de Netcode maar ontvangen vrijwel geen klachten van de afzonderlijke snelle spanningsvariatie. Om hier meer inzicht in te krijgen zal binnenkort een afstudeerder beginnen aan de TU/e. Daarbij zal ook gekeken worden wat de invloed is van het toetsen op de wijze zoals het in Engeland wordt geregeld.

4.5.3. Spanningsasymmetrie

De eisen in de Nederlandse Netcode elektriciteit zijn ook strenger dan in andere landen/ de EU regelgeving qua spanningsasymmetrie.

Voor spanningsasymmetrie geldt voor TenneT een limiet van 1% voor 99,9% van de tijd. In andere landen en in de EN 50160, wordt gebruik gemaakt van een limiet van 2% voor 95% van de tijd.

Deze limiet in de Nederlandse Netcode heeft een ontstaansgeschiedenis en zijn destijds door de rechter vastgesteld. Hieronder puntsgewijs de historie van de asymmetrie-eis in de Netcode elektriciteit:

- **05-07-1999:** Eerste voorstel voor Netcode met voor spanningskwaliteit alleen een verwijzing naar de EN 50160 (die op dat moment alleen geldt voor LS en MS, dus t/m 35 kV). Voor HS geen eisen aan door de netbeheerder te leveren kwaliteit. Verder een harde verwijzing naar het EnergieNed-boekje voor 25 kV tractie-aansluitingen, waarin verondersteld wordt dat de norm voor asymmetrie 2% is, waarvan de tractie-aansluitingen standaard 1% en onder voorwaarden 1,5% mogen gebruiken.
- **06-10-1999:** Wijzigingsopdracht van DTe (rechtsvoorganger van ACM): huidige NL netspanningskwaliteit is beter dan EN 50160, dus neem die betere kwaliteit op in de Netcode.
- **02-11-1999:** Gewijzigd voorstel met tabel in de Netcode. Alleen voor netten t/m 50 kV. Voor asymmetrie: tussen 0 en 2%.
- **12-04-2000:** Besluit met tabel uit gewijzigd voorstel, maar ook van toepassing verklaard op netten > 35 kV zonder bovengrens. Dus voor asymmetrie nog steeds: tussen 0 en 2%.
- **11-04-2001:** Beslissing op bezwaren van onder meer netbeheerders (norm had niet zomaar op (E)HS van toepassing verklaard mogen worden) en elektriciteitsproducenten (norm geeft veel lagere kwaliteit weer dan de werkelijke kwaliteit). DTe besluit beide bezwaren niet te honoreren, maar geeft netbeheerders opdracht om in 2002 een nieuwe voorstel in te dienen dat tegemoet komt aan de bezwaren van de elektriciteitsproducenten.
- **14-02-2003:** Nieuwe beslissing op bezwaren op basis van CBb-uitspraak (dit is de bestuursrechter) in beroep van elektriciteitsproducenten en VEMW. De eis aan asymmetrie wordt aangescherpt naar: tussen 0 tot 1%. De daardoor ontstane inconsistentie met de nog steeds in de Netcode opgenomen harde verwijzing naar het EnergieNed-boekje voor 25 kV tractie-aansluitingen wordt door DTe niet (h)erkend. In feite weegt DTe hier het belang van de elektriciteitsproducenten zwaarder dan het belang van de relatie tussen de netbeheerders en de spoorwegen met hun 25 kV tractie-aansluitingen. Maar tegelijkertijd hebben de netbeheerders naar aanleiding van dit besluit geen vervolgstappen ondernomen. Noch richting aanscherping van de ruimte die de 25 kV tractie-aansluitingen hebben, noch richting verruiming van de 1% eis in de tabel in toenmalig artikel 3.2.1 van de Netcode.

Bij alle latere aanpassingen van artikel 3.2.1 van de Netcode elektriciteit (nu dus artikel 7.3, eerste t/m derde lid) is de eis voor asymmetrie niet meer gewijzigd.

Deze strenge limieten hebben behoorlijk wat gevolgen voor TenneT want ze moeten de bestaande netwerk aanpassen. Terwijl het een gedragen mening is dat extreme waarden niet indicatief zijn. Een andere reden om de hoogste waarden niet in aanmerking te nemen, is dat ze het gevolg kunnen zijn van meetartefacten die het flaggingproces hebben doorstaan.

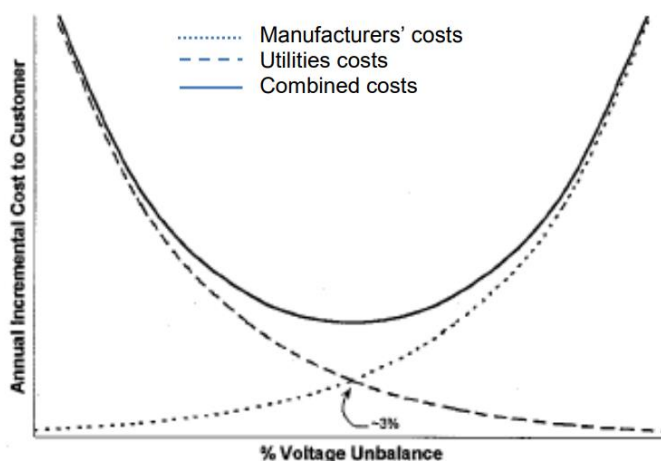
Bovendien, zijn de limieten en tijdspercentile opgenomen in de EN50160 gebaseerd op gevolgen voor toestellen aangesloten op het net. Deze materie was bestudeerd door internationale experts. Strengere limieten toepassen betekent mogelijk zwaarder investering voor de netbeheerder, zonder grote voordeel voor de aangeslotenen.

In 2014, bestudeerde de Engelse TNB (National Grid) de impact om een hogere asymmetrie limiet toe te passen (49). Verschil tussen de limiet voor spanningsasymmetrie in de Engelse Grid Code voor Schotland en Engeland en Wales wordt weergegeven. Volgens hun netcode is de limiet voor spanningsasymmetrie voor alle spanningsniveaus in Schotland 2%, terwijl die in Engeland en Wales 1% is voor EHV-systemen. Verder wordt aangevoerd dat de Netcode op de grens van 1% voor spanningsasymmetrie op 132 kV spanningsniveau legt terwijl die voor netbeheerders 2% is. Daarom wordt voorgesteld om een uniforme aanpak op basis van aanbevelingen van internationale normen en publicaties toe te passen op het gehele elektriciteitsnetwerk in Scotland, Engeland en Wales om de limiet op EHV-niveau vast te stellen op 1,5% en lagere spanningen op 2%. EHS wordt gedefinieerd als 400 kV en 275 kV. Wijzigingen in de netcodetext met betrekking tot de limiet voor spanningsasymmetrie worden voorgesteld. Bij de uitwerking van bovenstaande herziene limiet is gebleken dat de verhoging van de netcodelimiet van 1% naar 1,5% niet meer gevolgen zou hebben voor apparatuur die op het elektriciteitsnet is aangesloten dan de bestaande limiet. Er wordt in het bijzonder verwezen naar roterende machines, namelijk inductiemotoren en synchrone machines, waarvan bekend is dat ze het meest gevoelig zijn voor spanningsasymmetrie. Er werd een modelleringsoefening uitgevoerd met behulp van het Engelse-netwerkmodel om de overdrachtscoëfficiënten voor de spanningsasymmetrie van het EHS-niveau naar lagere spanningen te brengen. Deze zijn vervolgens gebruikt om de compatibiliteitsgrens van 2% bij 132 kV te verdelen tussen de overgedragen spanningsasymmetrie van het EHS-net en de bijdrage van de RNB-netten. Dit is in lijn met de aanbevelingen van IEC en CIGRE Working Group. De belangrijkste oorzaken van de spanningsasymmetrie in normale bedrijfscondities in het EHS-systeem worden besproken en de aanbevelingen van internationale normen om rekening te houden met inherente netwerkasymmetrie worden gebruikt om het nieuwe voorstel voor de onbalansspanningslimiet te ontwikkelen. De norm C84.1 (50) van het American National Standards Institute (ANSI) is ontwikkeld door de National Electrical Manufacturers Association (NEMA), die aanbeveelt elektrische voedingssystemen zo te ontwerpen en te gebruiken dat de maximale spanningsasymmetrie wordt beperkt tot 3% gemeten bij de meter van het elektriciteitsbedrijf in onbelaste toestand. De IEC beveelt aan dat de maximale spanningsasymmetrie van elektrische voedingssystemen bij HS, MS en LS wordt beperkt tot 2% (EN50160 en IEC TR 61000-3-13 (51)).

Bij het ontwikkelen van de ANSI C84.1-aanbeveling voor spanningsasymmetrie zijn economische studies uitgevoerd die het volgende aangaven (50) (52):

1. uiteindelijk betaalt de klant voor de nutsvoorzieningen die nodig zijn om de spanningsasymmetrie te verminderen, en de productie gerelateerde kosten die nodig zijn om het werkingsgebied bij onbalans van een motor uit te breiden.
2. De incrementele verbeteringskosten van nutsbedrijven zijn maximaal naarmate de spanningsasymmetrie nul nadert en afneemt indien de asymmetrie mag toenemen,
3. De incrementele motor gerelateerde kosten van de fabrikant zijn het laagst bij nulspanningsasymmetrie en nemen snel toe naarmate de asymmetrie toeneemt.

Wanneer deze kosten, exclusief motor gerelateerde energiekosten, worden gecombineerd, kunnen curven worden ontwikkeld zoals getoond in Figuur 7, die de jaarlijkse incrementele kosten voor de klant aangeven voor verschillende percentages spanningsasymmetrielimieten.



Figuur 7: jaarlijkse incrementele kost voor de klant voor verschillende spanningsasymmetrielimieten

Het optimaal bereik van spanningsasymmetrie treedt op wanneer de kosten voor de klant worden geminimaliseerd, wat in ANSI C84.1 ongeveer 3% bedraagt, zoals weergegeven in Figuur 7. Daarom moeten de kosten van mitigatie door nutsbedrijven om de spanningsasymmetrie in het netwerk te verlagen, worden afgewogen tegen het gevoeligheidsniveau dat wordt overwogen bij het ontwerp van apparatuur. Deze benadering heeft geleid tot een universeel geaccepteerd maximumniveau van 2% voor spanningsasymmetrie in het voedingssysteem, hoewel in bepaalde netten zoals die met lange enkelfasige transportlijnen tot 3% is toegestaan [4, 5]. Volgens de ANSI C84.1-aanbeveling zouden de kosten van het ontwerpen van het netwerk voor lagere spanningsasymmetrie -niveaus hoger zijn dan de kosten van het verbeteren van het tolerantieniveau van apparatuur.

Ter vergelijking met andere Europese landen dichtbij Engeland, in Frankrijk (53), België (54) en Duitsland (55), is het toegelaten spanningsasymmetrieniveau 2%.

Zoals eerder in dit rapport vermeld, heeft een lage limiet kostenimplicaties en moet er een balans worden gevonden tussen de immuniteit van apparatuur en mitigatie in het voedingssysteem. Daarvoor stelt National Grid voor om een limiet toe te staan die meer in overeenstemming is met internationale standaardaanbevelingen en wereldwijde praktijken, en ook rekening te houden met de praktische en kostenimplicaties ervan.

4.6. Aanpassing van de PQ monitoring

In navolging van het PQM project, gelanceerd in 2013 door ACM naar alle netwerkbeheerders in Nederland, zijn er bij TenneT vaste toestellen geïnstalleerd op alle klantaansluiting. Bij de verdere regionale netten (LS/MS-netten), zijn er door de RNB's een mix van vaste toestellen om de spanningsdips te meten (in MS) en mobiele meettoestellen om de andere kenmerken van de spanningskwaliteit te meten geïnstalleerd.

Dit PQM project had tot doel een representatieve beeld van de spanningskwaliteit in Nederland te geven en de naleving van de Europese norm EN50160 en de Nederlandse Netcode na te gaan, via een jaarlijkse analyse en reporting. Na bijna 10 jaar van metingen, kan geconcludeerd worden dat de spanningskwaliteit in Nederland goed is. De 10 minuten waarden van de parameters van de spanningskwaliteit respecteren de limieten op percentiel basis. De huidige PQM laat dus toe de spanningskwaliteit volgens de normalisatie in te schatten en de algemene trends te volgen over de jaren.

Om de PQ normen te respecteren en de spanning te houden onder een bepaalde limiet, zijn er meer een meer uitschakelingen van zonnepanelen, zo blijft de waarde van de spanning binnen de norm (RMS 10 minuten

waarden). De huidige PQM metingen zijn dus niet geschikt om naar correlaties te zoeken voor uitschakeling van de zonnepanelen, gezien ze zijn gebaseerd op 10 minuten waarden, conform de PQ normen.

Gezien het groeiende aantal klachten te wijten aan uitschakeling van zonnepanelen en de grote evolutie van het net te wijten aan de energietransitie, is er een duidelijke nood aan een aangepast meetprogramma gekoppeld aan klachten/nieuwe technologie om hun impact op het net te kunnen volgen. Deze nood vereist andere aanpak voor locatie en kleinere tijdsintervalmetingen. Bij voorbeeld, meettoestellen plaatsen in wijken met veel PV, warmtepompen, EV of zonneparken. Deze andere PQM methodiek voor LS overspanningen zou kunnen plaats vinden naast het huidige PQM project dat toelaat om een controle te houden over de naleving en de trends van de spanningskwaliteit in Nederland gezien de grote evolutie van het net. De slimme meters kunnen ook zeker gebruikt worden om dit spanningsproblemen op LS netten te anticiperen.

De netbeheerders zijn van mening dat de huidige grote steekproef in MS en LS voor het algemeen beeld zou gelijk kunnen blijven of zelfs worden verminderd daar de historiek heeft geleerd dat de spanningskwaliteit hoog is en dat random steekproeven geen extra inzicht verschaft. Zo zou er meer ruimte kunnen ontstaan voor steekproeven gekoppeld aan andere aspecten (klachten & nieuwe technologie). Met andere woorden een optimalisatie in aantal PQM metingen maar uiteraard nog steeds voldoende om de trends te kunnen volgen. Vanuit de feedback van de interviews werden dergelijke signalen waargenomen van de RNB's.

In toekomstige systemen moet een balans worden gevonden tussen monitoring van de spanningskwaliteit met traditionele PQ-meters en met niet-traditionele apparaten. We denken hier aan toestellen zoals relais en controllers, die worden gebruikt voor de dagelijkse werking van het netwerk, en Advanced Metering Infrastructure (AMI)³¹ inclusief meters met mogelijkheden voor het meten van de spanningskwaliteit. Hierdoor kunnen PQ-gerelateerde investeringen en kosten op een aanvaardbaar niveau worden gehouden.

Als bijkomende info over de evolutie van het net en de impact van de energietransitie op spanningskwaliteit, zou het ook nuttig zijn om het jaarlijkse aantal niet hinderlijk dips en de overspanningen weer te geven in het jaar verslag en op de website www.uwspanningskwaliteit.nl. Dit zou aan de afnemers de mogelijkheid bieden om toekomstige investeringen naar immuniserende maatregelen economisch te evalueren ten opzichte van de frequentie en de ernst van de dips. Een andere ontbrekende informatie over spanningsdips is het aantal fases getroffen door de dips.

Zelfs als er geen limiet van toepassing is op individuele harmonische voor (E)HS netten, zou het zeker relevant zijn om deze op te nemen in de jaarlijkse rapportage. De THD geeft niet genoeg details over de individuele harmonische en hun evolutie. Gezien het groeiende aantal elektronica met de energietransitie en de evolutie van de interactie tussen de verschillende actors op het net (impact op de netimpedantie), is een monitoring van de harmonische meetdata en hun evolutie zeker aangeraden.

³¹ AMI is een geïntegreerde systeem van slimme meters, communicatienetwerken en gegevensbeheersystemen die een communicatie tweerichtingsverkeer mogelijk maken tussen netbeheerders en afnemers.

5. Beantwoording onderzoeksvragen

In dit hoofdstuk staat de beantwoording van de onderzoeksvragen en subvragen op basis van de geanalyseerde informatie in de voorgaande hoofdstukken.

5.1. Voldoet het huidige meetprogramma (PQM) aan de behoefte van de netgebruikers en netbeheerders?

- a. *In hoeverre geeft het huidige meetprogramma een goede weergave van de actuele ontwikkelingen t.a.v. spanningskwaliteit?*

Het huidige power quality meetprogramma (PQM) in Nederland maakt het mogelijk om de algemene trends en evolutie van de spanningskwaliteit in Nederland in kaart te brengen.

Op HS en EHS wordt op elke klantaansluiting continu gemeten, terwijl op MS en LS selectie van de aansluitingen bemeten wordt, vanwege het hoge aantal aansluitingen.

Voor MS en LS metingen, worden de locaties steekproefsgewijs geselecteerd uit het centraal aansluitingenregister. Het aantal meetpunten is in het algemeen fors gestegen over de afgelopen 10 jaar, waardoor een betrouwbaarheid van 95% kan worden gesteld voor alle continue spanningsverschijnselen.

De jaarlijkse rapportage 'Spanningskwaliteit in Nederland' doet een uitspraak over het al dan niet respecteren van de limieten gesteld in de Netcode, en geeft de landelijke trends weer inzake langzame spanningsvariatie, spanningsasymmetrie, harmonische vervorming en snelle spanningsvariaties (leidend tot flicker).

Vanwege deze steekproef in LS/MS-netten is het niet mogelijk om de meting te gebruiken voor specifieke analyse van één aansluiting. De netbeheerder voert gedetailleerder onderzoek uit, door middel van tijdelijke en specifieke metingen, indien overschrijdingen op een meetlocatie worden vastgesteld, of naar aanleiding van specifieke klachten.

Het huidige meetprogramma is conform de richtlijnen afkomstig uit de verschillende internationale werkgroepen en komt overeen met een zeer goede weergave van de "klassieke" spanningskwaliteit, m.a.w. zonder decentrale opwekking.

- b. *In hoeverre geeft het huidige meetprogramma een goede weergave van de actuele ontwikkelingen t.a.v. spanningskwaliteit in de gebieden waar decentrale opwekking dominant aanwezig is?*

Het huidige meetprogramma geeft een goede weergave van spanningskwaliteit op het net (zowel in gebieden met als zonder decentrale productie), maar geeft onvoldoende informatie over sommige problematieken (bv. uitschakeling van zonnepanelen). De meetdata wordt verzameld op basis van de PQ-normering (Netcode Nederland) en wordt geïnterpreteerd volgens de limieten van de norm. LS aangesloten kunnen echter ook al klachten ondervinden wanneer de norm nog niet overschreden is. Hierdoor kunnen klachten van afnemers niet één op één worden gerelateerd met de meetgegevens. Deze problematiek is het meest uitgesproken op LS. Op (E)HS en MS is dit probleem momenteel minder aanwezig, maar de meetapparatuur is hier ook uitgebreider waardoor de analyse nauwkeuriger kan gebeuren.

Op HS en EHS niveau zijn er sinds 2014-2015 maatregelen getroffen om meer specifieke meetpunten te introduceren op plaatsen waar decentrale productie ontwikkeld is. Zo zijn er meetpunten toegevoegd op de aansluitingen voor windparken op zee, en is eveneens het aantal metingen op 50-66 kV fors uitgebreid in 2019. Eveneens werden specifieke inter-connectie punten toegevoegd aan het meetpark (HVDC-verbindingen). Reeds gerealiseerde projecten als NorNed en BritNed werden voorzien van vaste meetapparatuur. Op HS worden

specifieke decentrale productie parken behandeld op dezelfde manier als een klantaansluiting en dus direct bemeten.

In de rapportage wordt er eveneens sinds enkele jaren een beter onderscheid gemaakt tussen de verschillende spanningsniveaus in het HS-net (50-66 kV, 110-150 kV en het Net op Zee 66 kV). Op MS en LS wordt er geen specifiek onderscheid gemaakt ten voordele van het beter bemeten van regio's met specifiek een meer dominante aanwezigheid van decentrale productie gezien de locaties steekproefsgewijs geselecteerd worden.

In LS-netten, zijn er meer en meer klachten te wijten aan uitschakeling van PV. Deze problematiek is niet zichtbaar via PQM gezien de metingen gebaseerd zijn op 10 minuten waarden om de conformiteit met de EN 50160 te kunnen doen.

c. Zijn er aanpassingen in het meetprogramma noodzakelijk of wenselijk?

De netbeheerders in Nederland voeren al een zeer goede spanningskwaliteit monitoring uit met de metingen, de analyses, het ter beschikking stellen van de gegevens op het internet voor het publiek en de jaarlijkse rapportage. Nederland zit duidelijk bij de beste leerlingen van de klas voor PQM ten opzichte van andere Europese landen.

Sommige punten kunnen toch verbeterd worden:

- de beschikbaarheid van de meettoestellen in HS: een aandachtspunt is de niet-beschikbaarheid van meetdata, bevestigd door netbeheerders en aangeslotenen, dat oploopt tot circa 20% in HS en EHS. Daarnaast kan verwacht worden dat de niet-beschikbaarheid verder zal oplopen door de ombouw van de telecommunicatie netten. De netbeheerders dienen meer prioriteit te geven aan de opvolging van de staat van dienst van deze meetapparatuur om het gewenste betrouwbaarheidsniveau op peil te houden. Mits er sprake is van goede opvolging is het mogelijk om de data niet-beschikbaarheid onder de 5% te houden. In MS en LS betreft dit enkel tijdelijke metingen, met uitzondering van de registratie van spanningsdips, en doet dit probleem zich minder voor.
- Om een gerichtere identificatie te doen van verwachte probleemgebieden in LS is het wenselijk om via de huidige tijdelijke metingen een grotere granulariteit (metingen sneller dan 10 minuten-waarden) van de spanningsevolutie te bekomen, alsook een synchrone meting op meerdere plaatsen in het net. Dit is nuttige informatie om in de analyse een gericht beleid uit te stippelen om het net te versterken op de meest kritieke punten.
- het in rekening brengen van niet-hinderlijke spanningsdips en overspanningen (voor LS/MS-netten) op de website en in de jaarrapportage; deze info kan nuttig zijn voor de aangesloten om hun immunitet beter in te schatten en eventueel maatregelen te nemen.
- Het in rekening brengen van individuele harmonischen in de jaarrapportage (niet alleen de totale harmonische vervorming (THD)), om de impact van de energietransitie beter in te schatten, ondanks dat dit geen vereiste is van de Netcode.

d. Zou een beter inzicht in de spanningskwaliteitsontwikkelingen de netbeheerders kunnen helpen bij het slimmer ontwerpen van hun netten en het realiseren van kostenverlagingen? Zo ja, op welke manier?

Ja, de huidige strategie rond netontwikkeling is momenteel gebaseerd op capaciteitsuitbreiding gedreven door de energietransitie: o.a. de verschuiving van centrale productie richting decentrale productie, de versterking van interconnectie-capaciteit met andere landen, alsook de versterking van lokale netten (MS en LS) ten behoeve van het groeiend aandeel elektrisch verbruik, en ook om de injectie van lokaal geproduceerde energie mogelijk te kunnen maken. Vanwege de omvang en de maatschappelijke impact wordt hier prioriteit gegeven aan de meest dringende gevallen. Gerichtere metingen, met meer granulariteit, kunnen een beter beeld scheppen van de spanningskwaliteit om deze prioriteiten te bepalen, en de beslissingen die worden genomen in verschillende beleidswerkgroepen beter te sturen.

Op HS en EHS wordt op dit moment de spanningskwaliteit aangewend om optimalisaties uit te voeren in de uitrol van nieuwe projecten (bv. ten gevolge van vastgestelde asymmetrie op de spanning het al of niet uitvoeren van fase transposities). Eveneens worden verschillende spanningskwaliteitsparameters gebruikt bij het dimensioneren van nieuwe projecten, om specifiek rekening te houden met de evolutie van intrinsieke netkarakteristieken (bv. Evolutie van kortsluitvermogen in het netwerk), en het vermijden van operationele problemen (ongewenste spanningsvariëaties t.g.v. resonantie-effecten).

Tenslotte worden meetgegevens en spanningskwaliteit analyses gebruikt in publieke onderzoeksprojecten (bv. TenneT werkt hier samen met TU Eindhoven) om de impact op het netwerk van verscheidene ontwikkelingen in te schatten (bv. door middel van correlaties te zoeken).

Op MS en LS niveau is PQM een indirecte manier om klachten van consumenten te relateren met het gebruik van het net en het beleid inzake netontwikkeling. Aangezien PQM op basis van steekproef eerder een algemeen beeld schept, is specifieke analyse alleen mogelijk wanneer overschrijdingen worden vastgesteld, of ten gevolge van feedback vanuit de consument. Specifiek op MS-niveau schept spanningskwaliteit een objectief kader om de standpunten van alle partijen te vergelijken met wat maatschappelijk aanvaardbaar is rond kwaliteitsniveau en de kosten, die ten laste van de gemeenschap zijn.

Een belangrijk aandachtspunt is de problematiek rond overspanning op het net, waarbij de PV-omvormers afschakelen, maar ook de verwachte congestie door massale introductie van warmtepompen en elektrische voertuigen. De RNB's hebben hiervoor in 2021 een specifieke projectgroep "Spanningshuishouding en capaciteit van LS-netten" aangesteld om de ontwikkeling van deze knelpunten in kaart te brengen, alsook wat er regionaal kan gebeuren om deze problemen te voorkomen of op te lossen. Verscheidene partijen nemen deel aan het debat en verdedigen hun standpunten. Spanningskwaliteitsnormen scheppen hier eveneens een objectief kader om de discussies te beheersen. PQM met minder tijdelijke weekmetingen maar met meer vaste toestellen op goed gekozen meetpunten zou een belangrijke indicator kunnen zijn om het evalueren van genomen maatregelen te vergemakkelijken. De RNB's dienen evenwel een duidelijk actieplan op te stellen, dat voldoende technisch en maatschappelijk onderbouwd is.

e. Zijn er alternatieve methoden waarop de netbeheerders de spanningskwaliteit kunnen meten en in kaart brengen? Bij de beantwoording van deze vragen dient rekening te worden gehouden met de resultaten die het huidige meetprogramma oplevert en in werkelijkheid waargenomen problemen bij de afnemers.

De digitale transformatie biedt mogelijkheden voor de netbeheerders om spanningskwaliteit in kaart te brengen via alternatieve meetmogelijkheden bovenop het huidige meetpark. Zowel op HS en MS bieden digitale beveiligingsrelais opties voor het registreren van spanningskwaliteit parameters.

Op LS is de slimme meter eveneens een potentiële kandidaat voor het registreren van spanningsmetingen. Op deze manier kan er specifiek worden ingezet om lokale problemen beter in kaart te brengen. Een aantal struikelblokken zijn de kwaliteitsnormen (meetklasse van het toestel), technische aspecten rond integratie van deze toestellen in data-stromen en ook de privacy wetgeving.

Recentelijk zijn er stappen ondernomen waardoor sommige struikelblokken opgelost worden, o.a. door de Autoriteit Persoonsgegevens. LS spanningsmetingen kunnen inzicht bieden op de evolutie van de spanning verder in het LS-net (t.o.v. de laagspanningskast) en de effectiviteit van genomen maatregelen. Hiermee kan het beleid rond capaciteitsuitbreiding en renovatie van LS-netten bijgestuurd worden. Er kan eveneens effectiever worden ingespeeld op klachten. Tenslotte kan dit ook oplossingen bieden om het gebrek aan mankracht te compenseren.

5.2. Wat zijn de grootste uitdagingen voor de spanningskwaliteit in relatie tot de energietransitie en hoe kan hiermee worden omgegaan?

- a. *Welke ontwikkelingen t.a.v. de energietransitie zijn, naast de problematiek rondom het draaiend vermogen, het meest bepalend voor de spanningskwaliteit?*

Harmonische vervorming

Over het algemeen wordt verwacht dat energiesystemen over de hele wereld een toename van harmonische vervorming zullen ervaren naarmate de duurzame transitie vordert. Enerzijds wordt aangenomen dat de afbouw van draaiende machines voor minder sterke netten zorgt, wat deels wordt gecompenseerd door de maatregelen die worden getroffen om het net te versterken. Anderzijds wordt zowel aan de kant van de productie van hernieuwbare energie, als aan de kant van het verbruik (apparaten) meer en meer vermogenselektronica geïntroduceerd in het net. Het effect hiervan is een stijging van (supra) harmonische stromen en spanningen in het net.

De impact van vermogenselektronica apparaten op de harmonischen en de spanningskwaliteit van primaire netten is momenteel onzeker. Naarmate meer en meer duurzame technologieën worden verbonden met omvormers die vermogenselektronica bezitten, worden de effecten op het netwerk steeds onduidelijker. In sommige situaties kan de interactie van apparaten constructief zijn en problemen met harmonischen/spanningskwaliteit verminderen. In andere situaties kunnen de apparaten op een meer destructieve manier op elkaar inwerken.

De hoogfrequente schakelvervorming die gepaard gaat met het schakelen van de omvormers heeft recent veel academische aandacht gekregen. Het aantal papers over frequenties 2-150 kHz is fors gestegen tijdens de CIRED conferentie in 2021 in vergelijking met deze van 2019.

Bij de Nederlandse RNB's, worden superharmonischen al waargenomen bij E-laden maar (voorlopig) nog zonder significante problemen. Er lopen studies met E-laad/TU Eindhoven/netbeheerders om effect van superharmonische beter in kaart te krijgen (bv. door veroudering).

Flicker

Er kunnen grotere en frequentere spanningsvariaties worden verwacht als gevolg van de toenemende penetratie van intermitterende opwekkingsbronnen zoals wind en zon, maar ook door de introductie van zwaardere en meer dynamische belastingen in het net (bv. elektrische voertuigen). Hierdoor kunnen repetitieve en snelle veranderingen in de amplitude van de spanning optreden, ten gevolge van snelle verandering van de belastingstroom. De impact is het sterkst in delen van het energiesysteem met een lage systeemsterkte. Dit resulteert in storende variaties in de lichtbronnen bij de gebruikers (flicker), maar kan eveneens een impact hebben op gevoelige industriële continue productie processen. Vanwege de snelle verandering van de verlichtingstechnologieën wordt hierop actief onderzoek verricht naar de conformiteitslimieten die aanvaardbaar zijn, gezien de effecten veranderlijk zijn voor de gebruiker.

Spanningsasymmetrie

De introductie van grotere en minder gecoördineerde verbruikers in steeds zwakkere netten werkt ook spanningsasymmetrie in de hand. Spanningsasymmetrie is funest voor de levensduur van apparaten, en kan leiden tot overbelasting van het net (verhoging van stromen in de nulgeleider).

Op laagspanningsniveau genereert de toenemende penetratie van elektrische voertuigen ook asymmetrie. De hoge mate van gelijktijdigheid van het opladen van meerdere voertuigen, meestal 's avonds, kan ongebruikelijke situaties met een hoge vraag creëren, vooral vanwege het feit dat veel elektrische voertuigen enkelfasig worden opgeladen. Als gevolg hiervan wordt een toenemende spanningsasymmetrie in het netwerk waargenomen. Andere technologieën die een negatieve impact zullen hebben, zijn warmtepompen.

Op HS-niveau, zijn grootschalige wind- en zonneparken vaak met het net verbonden op afgelegen locaties die worden gevoed door relatief lange niet-getransponeerde lijnen. Hierdoor kan spanningsasymmetrie ontstaan als gevolg van de lijnen, hoewel de wind- of zonneparken gebalanceerde stromen injecteren. Bij TenneT komt het

probleem ook door de combiverbinding (combimast) waarin delen van het 110 kV net met het 380 kV net gecombineerd worden. Om de spanningsasymmetrie te verlagen heeft TenneT in 2022 zijn beleid aangepast in een Asset Strategy Document wat nu wordt uitgerold. Voorheen was het beleid om geen fasewisselingen toe te passen en zijn bestaande transposities soms verwijderd. Het nieuwe beleid leidt er toe dat ze op sommige tracés met combilijnen (EHS en HS in één mast) vele fasewisselingen gaan toepassen. Het beleid betreft ook de toepassing van transposities voor kabels (ligging in driehoek). Door op een aantal posities de onderlinge positie van de fasegeleiders te veranderen, wordt de wederzijdse beïnvloeding van het 110kV circuit en het 380kV circuit in normaal bedrijf beperkt. TenneT is ook in contact met de betreffende offshore-aangeslotenen om te bekijken of vermogenselektronische omvormers van deze installaties een oplossing kunnen bieden door middel van actieve spanningsregeling.

Spanningsdips

Decentrale opwekking gebaseerd op vermogenselektronische omvormers zal eveneens tijdens netincidenten (kortsluitingen) een lagere kortsluitstroombijdrage leveren dan synchrone generatoren. Dit resulteert in meer uitgesproken spanningsdips. M.a.w. een incident dat nu leidt tot een niet-hinderlijke spanningsdip kan in de toekomst leiden tot een ernstigere spanningsdip.

Metingen van spanningsdips gedurende drie jaar in de (E)HS en MS netten in Nederland zijn geanalyseerd om de invloed van toekomstige netontwikkelingen te bepalen. De impact van het kortsluitvermogen wordt voor enkele typische gevallen bekeken (door middel van regionale 'heatmaps' van de kortsluitniveaus). De berekeningen bevestigen dat de veranderingen zowel positief als negatief kunnen zijn en lokaal van aard zijn. In het bijzonder, de gebieden waar het kortsluitvermogen afneemt verdienen extra aandacht. Gezien het kortsluitvermogen wordt beschouwd als een lokale parameter, is een studie vereist om de verandering van het kortsluitvermogen in te schatten tussen de bestaande toestand en toekomstige verwacht scenario's.

Langzame spanningsvariaties

Het optreden van overspanningen is het belangrijkste probleem met betrekking tot de spanningskwaliteit bij het aansluiten van duurzame elektriciteitsproductie op het distributienet.

Wanneer de LS-netspanning hoger wordt, schakelen PV-installaties uit om de Netcode te respecteren maar maatschappelijk is dit niet gewenst. Thuis-batterijen en bi-directioneel laden kunnen in de toekomst het probleem nog verergeren als hier geen duidelijke afspraken rond gemaakt worden. Ook aan de ondergrens zijn er soms problemen door de fluctuatie op het net (tegelijk op-en-af schakelen / start-stop laden).

Om de transitie te kunnen "inschatten" worden er op regelmatige basis netstudies uitgevoerd door RNB's om scenario's op langere termijn te bepalen. Dit wordt tegenwoordig ook in overleg met steden en gemeenten gedaan om locatiebepalingen / advies van bv. nieuwe laadpalen te geven. Fase-aansluiting moet in de toekomst meer gebeuren in overleg met verenigingen van installateurs zodat verdeling meer in balans blijft.

Digitalisatie en big data

Vanwege de enorme hoeveelheid meetgegevens afkomstig van de PQM en de slimme meters, blijft handmatige inspectie meestal beperkt tot eenvoudige analyse. Hierdoor blijft het merendeel van de bruikbare informatie in de data onbenut en zijn automatische methodes nodig om de grote hoeveelheid meetdata effectief te verwerken en diepgaand te analyseren. Het toepassen van artificiële intelligentie en visualisatietechnieken is dus nodig om deze grote hoeveelheden data te analyseren en veranderingen waar te nemen.

Hulpmiddelen worden ontwikkeld binnen TenneT om de analyses van de PQM gegevens beter te kunnen uitvoeren. Daarmee kunnen ze oorzaken van overschrijdingen sneller analyseren en voorspellen en helpen om gebruikt modellen binnen TenneT te evalueren. Pilotprojecten door middel van 'statistical learning' methoden zijn in uitvoering en wachten op een vervolg en prioritering.

b. Hoe wordt omgegaan met de afname van draaiend vermogen in andere EU landen?

De energietransitie is meer dan een verschuiving van centrale naar decentrale gedistribueerde productie. De energietransitie heeft als gevolg dat de energie stromen op verschillende spanningsniveaus minder voorspelbaar zijn en veranderlijk van richting, waardoor overbelasting waarschijnlijker wordt op sommige punten. De netten dienen te worden versterkt en de uitbating zal moeten worden aangepast om hiermee rekening te houden. Momenteel worden massaal netversterkingen uitgevoerd, zowel op Europees vlak door het verhogen van de interconnectie capaciteit, als op landelijk vlak door het versterken van de transport- en distributie netten.

Alle Europese landen staan voor gelijkaardige uitdagingen gebracht door de energietransitie, maar door de verschillen in de netstructuur, de mix van opwekking en de aanwezigheid van (lokale) specifieke verbruikers is er geen éénduidig beleid uitgestippeld in Europa. De integratie van het type decentrale opwekking is verschillend per land, en gedreven door aanbevelingen vanuit het landelijk beleid. Dit leidt tot het nemen van specifieke beslissingen rond netversterking, afhankelijk van de situatie. Wel kan algemeen gesteld worden dat er massaal wordt geïnvesteerd in netversterking op alle spanningsniveaus en het versterken van de interconnectie capaciteit over de landsgrenzen heen om de uitfasering van lokale (klassieke) productie te compenseren.

Daarnaast zorgt het uitfaseren van SGU's op het net voor een vermindering van de inertie van het netwerk. Draaiende machines zorgen door de inertie van de rotoren voor bijkomende stabiliteit gedurende snelle storingen op het netwerk, waardoor de frequentie stabiliteit beter behouden blijft. Dit moet in de toekomst worden opgevangen door de vermogenelektronische omvormers. Door aanpassen van het dynamisch gedrag van de omvormers kan hierbij gedeeltelijk aan worden beantwoordt. Vanuit de Europese en regionale netcodes worden er richtlijnen uitgevaardigd naar fabrikanten van omvormers om de garantie van productie gedurende frequentieschommelingen te blijven waarborgen. Anderzijds worden er voor grote HVDC verbindingen reeds mechanismen ingebouwd in de regellussen van het actiefvermogen om beter bestand te zijn tegen frequentie schommelingen aan de AC-netzijde.

Er bestaan echter nog veel onzekerheden over de interactie en de gevolgen voor het net en de gebruikers. PQM is hiervoor van cruciaal belang. Lopend onderzoek dient dit verder in kaart te brengen (o.a. onder impuls van CIGRE, CIRED en verschillende universiteiten).

c. Hoe wordt in andere EU landen omgegaan met overige spanningskwaliteitsproblemen?

In de verschillende Europese landen zijn verschillende beleidsmaatregelen uitgerold teneinde de impact op het netwerk en de impact op de gebruiker te beperken. Enerzijds zijn er algemene praktijken van toepassing op transmissie en distributie niveau om de impact van spanningskwaliteitsproblemen te beperken door middel van een gerichte netconfiguratie (bv. vervuilende industrieën op geïsoleerde railsystemen schakelen, specifieke netversterkingen aanbrengen voor het aansluiten van bepaalde afnemers, algemene verhoging van het kortsluitvermogen door de netconfiguratie te veranderen of door middel van investeringen (het aanbrengen van filters of reactieve energie compensaties op gerichte plaatsen in het netwerk). De netbeheerders nemen ook actieve maatregelen om de spanningsasymmetrie te beperken door onder andere fase-transposities voor HS-lijnen en het gericht uitbalanceren van belasting op de verschillende fasen (vooral in distributie), dat een praktijk is die algemeen aanwezig is bij de Europese netbeheerders. Anderzijds worden er via de lokale netcodes emissielimieten opgelegd aan de afnemers rond harmonische vervuiling en flicker, waardoor deze maatregelen moet treffen om de emissies te beperken. In dit rapport wordt dit gedeeltelijk toegelicht voor enkele landen in Europa.

5.3. Wat zijn de best practices t.a.v. de regulering en monitoring van de spanningskwaliteit en hoe kunnen de ACM en netbeheerders dit soort voorbeelden implementeren in Nederland?

- a. *Op welke onderwerpen liggen de kansen voor een eventuele aanscherping dan wel verruiming van de normen?*

Het opstellen van regelgeving rond spanningskwaliteit is een oefening om te komen tot een compromis: iedereen die op het elektriciteitsnet is aangesloten, kan invloed uitoefenen op de kwaliteit van de geleverde spanning op het eigen aansluitpunt of op andere aansluitpunten in het elektriciteitsnet. Bij elke spanningskwaliteit regelgeving moet rekening worden gehouden met zowel de kosten voor specifieke afnemers als gevolg van een storing of schade aan apparatuur als met eventuele directe of indirecte hogere kosten voor het verbeteren van het netwerk, wat zou kunnen leiden tot hogere tarieven voor alle afnemers. In dit rapport wordt onderling vergeleken hoe dit gebeurt voor de meeste Europese landen.

De norm EN 50160 blijft het basisinstrument voor PQ-beoordeling in rapporterende landen. In sommige landen zijn echter andere vereisten geïmplementeerd in de nationale wetgeving. De redenen voor het bestaan van dergelijke specifieke regelgeving verschillen van land tot land en houden meestal verband met het feit dat de 2010-versie van de norm nog steeds geen EHV-niveaus dekt. Een bijkomende reden is dat er op nationaal niveau strengere grenswaarden worden gehanteerd dan de norm stelt.

Aangezien de opkomst van gedistribueerde energiebronnen een aanzienlijke invloed heeft op de spanningskwaliteit in zowel LS- als HS-netten, werd tijdens een ronde tafel bij CIRED sessie van 2021 de noodzaak besproken om zowel de impact als de oplossingen te evalueren. Er wordt geconcludeerd dat de vervolgstappen moeten worden gezet naar de E-DSO-federatie, vooral wat betreft zowel technische als juridische knelpunten, die voor alle EU-lidstaten verschillend zijn.

Momenteel, wordt er gewerkt in de normalisatie aan het aanpassen van de bepaling van de Pst-waarde in het algoritme van de flikkermeter. Ondanks ingrijpende veranderingen op het gebied van lichttechniek (LED-systemen) is de 60 W gloeilamp wel nog steeds als referentie gebruikt voor het beoordelen van de storing van de verlichting en alle andere apparatuur aangesloten op openbare elektriciteitsvoorzieningssystemen veroorzaakt door spanningsschommelingen.

Voor snelle spanningsvariaties, zijn de limieten in de Nederlandse Netcode elektriciteit strenger dan in andere landen / de EU regelgeving zowel voor netbeheerders als aangeslotenen, wat nadelig kan zijn. TenneT vraagt zich af of de methode zoals toegepast in het Verenigd Koninkrijk ook toegepast zou kunnen worden in Nederland. Belangrijk verschil is dat in het Verenigd Koninkrijk ruimere limieten gelden voor componenten die incidenteel geschakeld worden, zoals transformatoren (40), zie §4.2. De EN 50160 voorziet ook een limiet die verschillend is volgens de frequentie van de event.

De eisen in de Nederlandse Netcode elektriciteit zijn ook strenger dan in andere landen/ de EU regelgeving qua spanningsasymmetrie. Voor spanningsasymmetrie geldt voor TenneT een limiet van 1% voor 99,9% van de tijd. In andere landen en in de EN 50160, wordt gebruik gemaakt van een limiet van 2% voor 95% van de tijd.

- b. *Op welke manier kan het meetprogramma PQM een meer representatieve weergave geven van de spanningskwaliteit?*

Gezien het groeiende aantal klachten te wijten aan uitschakeling van zonnepanelen en de grote evolutie van het net te wijten aan de energietransitie, is er een duidelijke nood aan een aangepast meetprogramma gekoppeld aan klachten/nieuwe technologie om hun impact op het net te kunnen volgen. Deze nood vereist andere aanpak voor locatie en kleinere tijdsintervallmetingen. Bijvoorbeeld, meettoestellen plaatsen in wijken met veel PV, warmtepompen, EV of zonneparken.

Het aanwenden van de power quality meetdata voor gerichte analyse op verschillende plaatsen kan oplossingen bieden om de problematiek zoals hierboven beschreven beter te onderzoeken. Deze andere PQM methodiek voor LS overspanningen zou kunnen plaats vinden naast het huidige PQM project dat toelaat om controle te houden over de naleving en de trends van de spanningskwaliteit in Nederland gezien de grote evolutie van het net.

De slimme meters kunnen ook zeker gebruikt worden om te anticiperen op LS spanningsproblemen, wat mogelijk is gezien de slimme meter gebruikt door de RNB's de actuele waarden van de spanning per fase meten. De CEER raadt niet aan om alle PQ-storingen bij alle afnemers, permanent te meten via slimme meters. Dit zou resulteren in een excessieve prijsverhoging van de meter en enorme hoeveelheden gegevens.

c. Wat zijn de best practices t.a.v. de monitoring van de spanningskwaliteit?

In dit rapport is een analyse gemaakt van de praktijken rond PQ monitoring in andere landen. Alle 39 landen passen de Europese technische norm CENELEC EN 50160 toe voor spanningskwaliteit, ofwel zijn hun vereisten voor spanningskwaliteit gebaseerd op deze Europese norm. Dit zorgt voor een geharmoniseerd begrip van spanningskwaliteit-fenomenen in heel Europa. Door verschillen in regelgeving en regionale technische aspecten zijn er echter verschillen in limieten en rapportage, alsook in de uitrol van het aantal meetsystemen op de verschillende spanningsniveaus. De adviezen geformuleerd door de CEER worden hierbij vertaald naar de verschillende spanningsniveaus:

In (E)HS is het sterk aanbevolen om alle meetlocaties uit te rusten met permanente monitoring. Het aantal onderstations en het aantal afnemers op (E)HS is immers relatief klein, waardoor de kosten van PQ-monitoring op deze locaties beperkt zal blijven. De reden om permanente monitoring uit te rollen is om een duidelijk beeld te krijgen van het aantal spanningsevents, zoals spanningsdips.

In MS-netten wordt het monitoren van alle meetlocaties niet aanbevolen. Dit is eveneens ook niet het geval in de praktijk in de verschillende landen in Europa. Om het benodigde aantal meetpunten te bepalen zijn er verschillende benaderingen mogelijk, die zowel voor- als nadelen hebben. De keuze hangt sterk af van lokale omstandigheden en van de toepassingen van de resultaten uit het PQM-programma.

De netbeheerder dient een correcte kosten-baten analyse op te stellen teneinde het aantal geselecteerde meetpunten te rechtvaardigen. Het is wel aangeraden om op de gekozen meetpunten permanente monitoring uit te rollen. De reden hiervoor is gelijkaardig aan die bij (E)HS-netten, met inbegrip dat seizoensinvloeden op de PQ eveneens beter in kaart kunnen worden gebracht.

In LS netten is het aanbevolen om PQM uit te voeren op de aansluitpunten van een selectie van LS afnemers. Voor een nationaal monitoringsprogramma dat gericht is op het verkrijgen van een statistisch relevante beeld van de PQ voor alle LS-afnemers, dient een willekeurige steekproef van LS-afnemers in het hele land te worden geselecteerd. Langzame spanningsvariaties worden beschouwd als de belangrijkste PQ-parameter te monitoren in de laagspanningsnetten. Slimme meters kunnen geïntegreerd worden in het PQM programma van LS-netten.

Voor de publicatie van geaggregeerde PQ-gegevens, die openbaar beschikbaar zouden moeten zijn, raadt de CEER aan om minstens één keer per jaar een rapport te publiceren op het internet. Het rapport moet de naleving van PQ regelgeving en ook een analyse van de waargenomen trends bevatten. De gegevens moeten, indien nodig, beschikbaar worden gesteld aan alle betrokken partijen zonder de belangen van netwerkexploitanten en van individuele afnemers te schaden

d. Hoe kunnen best practices t.a.v. de regulering en monitoring van de spanningskwaliteit geïmplementeerd worden in Nederland?

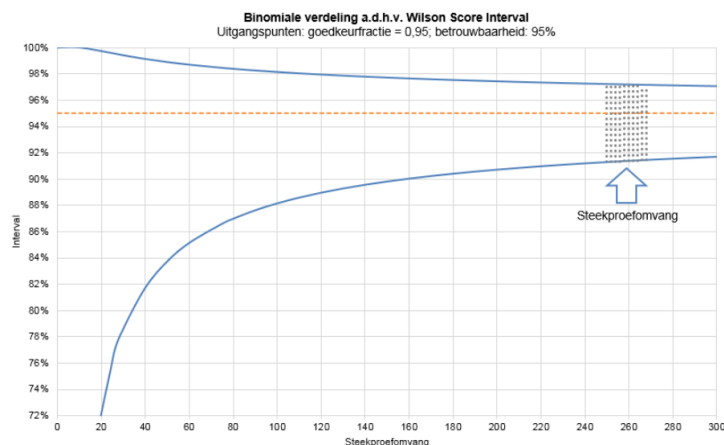
Als bijkomende info over de evolutie van het net en de impact van de energietransitie op spanningskwaliteit, zou het ook nuttig zijn om het jaarlijkse aantal niet-hinderlijk dips en de overspanningen (swells) weer te geven in de jaarrapportage en op de website www.uwspanningskwaliteit.nl. Dit zou de afnemers de mogelijkheid bieden om toekomstige investeringen naar immuniserende maatregelen economisch te evalueren ten opzichte van de

frequentie en de ernst van de dips. Een andere ontbrekende informatie over spanningsdips is het aantal fases getroffen door de dips.

Zelfs als er geen limiet van toepassing is op individuele harmonische voor (E)HS netten, zou het zeker relevant zijn om deze op te nemen in de jaarlijkse rapportage. De THD geeft niet genoeg details over de individuele harmonische en hun evolutie. Gezien het groeiende aantal elektronica met de energietransitie en de evolutie van de interactie tussen de verschillende acteurs op het net (impact op de netimpedantie), is een monitoring van de harmonische meetdata en hun evolutie zeker aangeraden.

Aan de gebruikerszijde is er duidelijk nood in Nederland aan eerlijke en gerechtvaardigde methoden om emissiegrenswaarden voor storende installaties in de planningsfase vast te stellen, evenals de beoordeling van de "echte" bijdrage van operationele installaties aan het totaal storingsniveau in het netwerk. Binnen Nederland bestaat momenteel het boekje 'Richtlijnen voor toelaatbare harmonische stromen' waarnaar de Netcode elektriciteit nog steeds verwijst (herziene versie, uitgegeven door EnergieNed in 1997). Dit boekje is achterhaald en de netbeheerders overwegen om een werkgroep in te stellen die het gaat herzien. Doel zou zijn om verbeterde aansluitvoorwaarden en methodieken vast te leggen voor de limieten van harmonische stromen op het aansluitpunt. Dit zoveel mogelijk gebaseerd op praktijkcasussen die nu al voorkomen. Binnen CIGRE is ook een werkgroep gestart (WG C4.63) die nader onderzoek doet naar internationale en nationale harmonische standaarden, regulering en praktijken. De bedoeling zou zijn op basis hiervan 'best practices' te selecteren die als uitgangspunt voor nieuwe internationale normering zijn.

In het algemeen wordt aangeraden om een minimum aantal weekmetingen in de LS en MS-netten te realiseren om een voldoende betrouwbaar zicht te verkrijgen op de PQ. Volgens de aanbevelingen van de CEER, om een betrouwbaarheid van 95% te kunnen garanderen zonder significant verlies van nauwkeurigheid, is een minimum aantal van 200 weekmetingen aangeraden. Dit is in lijn met de huidige 250 weekmetingen die momenteel worden toegepast (zie ook Figuur 8 uit het achtergrond document (2)).



Figuur 8: Betrouwbaarheidsinterval bij verschillende steekproefgrootten. (2)

Om beter in te spelen op de actuele problematiek rond de decentralisatie van de productie zou een verhoging van het aantal weekmetingen op specifieke locaties (wijken met veel PV, warmtepompen, EV's) kunnen worden overwogen. Op specifieke locaties in MS en LS kan men ook overwegen om de momentopname van één week te verlengen als blijkt dat de gekozen meetperiode onvoldoende de normale situatie vertegenwoordigd (bv. door middel van het evalueren van de aanwezigheid van productie van lokale hernieuwbare energie). Een realistische schatting dient te worden gemaakt op basis van een kosten-baten analyse door de RNB te worden ontwikkeld.

In het MS-net worden spanningsdips sinds 2015 geregistreerd met een continu meetsysteem op 200 stationslocaties. Het is aanbevolen om met dit meetsysteem de analyse en de rapportage uit te breiden naar een volledige PQ rapportage. Dit is eveneens geadviseerd door de CEER en een bestaande praktijk in België.

6. Aanbevelingen

1. In het algemeen is er nood aan meer geautomatiseerde data verwerkingssystemen en hulpmiddelen die de analyse van de data intelligenter en minder mankracht behoevend maakt. Big data-analyse is nodig om grote hoeveelheden data te analyseren en te structureren en om patronen, correlaties en trends te herkennen. Momenteel, zijn de bronnen manueel geïmporteerd, wat zeer tijdrovend is waardoor het onderzoek lang duurt alvorens resultaten bekend zijn. Vanwege de tijdrovende gegevensoverdracht, wordt er beperkt onderzoek gedaan en potentiële problemen worden niet gevonden. De bedoeling is om het correleren van de verschillende bronnen te automatiseren. Betere exploitatie van de PQM-data kan leiden tot meer gefundeerde investeringsbeslissingen en het duidelijker aantonen van de wettelijke naleving van de spanningskwaliteit. De slimme meters aanwezig in LS en MS (nog geen klasse A meettoestel) geven een steeds beter beeld en deze informatie kan in de toekomst helpen voor het opvolgen van spanningskwaliteit. Aangezien de hoeveelheid Power Quality-informatie continu toeneemt met de slimme meters, is er nood aan efficiënte monitoringsystemen, het verzamelen van Power Quality-gegevens en het voorspellen van trends met behulp van geschikte KPI's van strategisch belang voor distributienetbeheerders om de planning en werking van het net te optimaliseren en het behoud van de leveringskwaliteit te garanderen.
2. De netbeheerders dienen meer prioriteit te geven aan de opvolging van de staat van dienst van de (vaste) PQM meetapparatuur, om het gewenste betrouwbaarheidsniveau op peil te houden. De beschikbaarheid van de meettoestellen in HS is een aandachtspunt. Daarnaast kan verwacht worden de niet-beschikbaarheid verder zal oplopen door de ombouw van de telecommunicatie netten. De niet-beschikbaarheid van meetdata loopt op tot circa 20%. Mits er sprake is van een goede opvolging is het mogelijk om de data niet-beschikbaarheid onder de 5 % te houden.
3. Momenteel dienen afnemers 10 dagen wachttijd in rekening te brengen om informatie via de website van TenneT te verkrijgen over hinderlijke spanningsdips. Volgens sommige grote afnemers (verbruikers en/of producenten), is deze periode te lang om informatie te ontvangen over een belangrijk incident met risico op grote schade als gevolg in hun installatie. Aangezien het technisch mogelijk is om dit direct via de meettoestellen te melden, zou een oplossing kunnen zijn om een dipmelding dienst te ontwikkelen waarbij een afnemer direct na het meten van een spanningsdip op zijn aansluiting hierover wordt geïnformeerd (bijvoorbeeld via sms of email).
4. Gezien supraharmonischen belangrijker worden qua netimpact, wordt het meetbereik in recente meetapparatuur eveneens uitgebreid. Deze meetapparatuur wordt in vele gevallen aangesloten op de bestaande meetpunten in het net (bv. MS meetcel). Het merendeel van het meetpark is uitgerust met inductieve spanningsmeettransformatoren, die ontworpen zijn om een hoge meetnauwkeurigheid bij de netfrequentie te garanderen en kunnen hoge afwijkingen vertonen voor hogere harmonischen of supraharmonischen. Eveneens verschijnen er nieuwe meetsensoren op de markt, maar worden deze nog niet toegepast in het veld omwille van technische en administratieve redenen. Het is aanbevolen om deze gebreken mee te nemen in de analyse van meetgegevens. Daarnaast dient hier ook rekening mee te worden gehouden bij de ontwikkeling van specificaties voor nieuwe meetinstallaties.
5. Gezien het groeiende aantal elektronische omvormers gedreven door de energietransitie, ook op (E)HS niveau, en de evolutie van de interactie tussen de verschillende actoren op het net (met impact op de netimpedantie), is een monitoring en rapportage van de harmonische meetdata en hun evolutie aan te raden, om de impact van individuele harmonischen op het net beter te analyseren. Zelfs als er vanuit de Netcode geen limiet van toepassing is op individuele harmonischen voor (E)HS netten, is het relevant om dit op te nemen in de jaarlijkse rapportage. De THD geeft onvoldoende details over de individuele harmonische en hun evolutie. Gezien hiervoor de netcode wordt gevolgd zou hiervoor dienen te worden aangepast door een vermelding te maken rond de rapportage van de individuele harmonischen, zonder hierbij expliciet limieten te vermelden. Dit zou kunnen worden geïmplementeerd tijdens de herziening van het boekje 'Richtlijnen voor toelaatbare harmonische stromen'.

-
6. Om beter in te spelen op de actuele problematiek rond de decentralisatie van de productie zouden enkele aanpassingen aan het PQM-systeem in MS en LS kunnen worden overwogen.

In het MS-net worden spanningsdips sinds 2015 geregistreerd met een continu meetsysteem op 200 stationslocaties. Het is aanbevolen om met dit meetsysteem de analyse en de rapportage uit te breiden naar een volledige PQ rapportage. Dit is eveneens geadviseerd door de CEER en een bestaande praktijk in België.

Op specifieke locaties in MS en LS kan men ook overwegen om de momentopname van één week te verlengen als blijkt dat de gekozen meetperiode onvoldoende de normale situatie vertegenwoordigt (bv. door middel van het evalueren van de aanwezigheid van productie van lokale hernieuwbare energie). Een realistische schatting dient te worden gemaakt op basis van een kosten-baten analyse door de RNB te worden ontwikkeld.

7. Gezien het groeiende aantal klachten te wijten aan uitschakeling van zonnepanelen en de grote evolutie van het net te wijten aan de energietransitie, is er een duidelijke nood aan een aangepast meetprogramma gekoppeld aan klachten/nieuwe technologie om hun impact op het net te kunnen volgen. Deze nood vereist andere aanpak voor locatie en kleinere tijdsintervalmetingen. Bijvoorbeeld, meettoestellen plaatsen in wijken met veel PV, warmtepompen, EV of zonneparken. Deze andere PQM methodiek voor LS overspanningen zou kunnen plaats vinden naast het huidige PQM project dat toelaat om een controle te houden over de naleving en de trends van de spanningskwaliteit in Nederland gezien de grote evolutie van het net. De slimme meters kunnen ook gebruikt worden om spanningsproblemen op LS netten te anticiperen en eveneens gegevens te verzamelen met een hogere tijdsgranulariteit (waarden met een tijdsinterval kleiner dan 10 minuten) op kritieke momenten.
8. Als bijkomende info over de evolutie van het net en de impact van de energietransitie op spanningskwaliteit, zou het ook nuttig zijn om het jaarlijkse aantal niet-hinderlijk dips en de overspanningen (swells) weer te geven in de jaarrapportage en op de website www.uwspanningskwaliteit.nl (voor LS/MS-netten).
9. Voor snelle spanningsvariëaties en spanningsasymmetrie zijn de limieten in de Nederlandse Netcode strenger dan in andere landen en de EU regelgeving, zowel voor netbeheerders als aangeslotenen. De huidige relatief strenge eis is niet consistent met de Europese praktijk en leidt tot incidentele overschrijdingen en soms kostbare maatregelen (meer fasewisselingen dan wellicht strik noodzakelijk). De huidige relatief strenge eis rond snelle spanningsvariëaties (die ook bij N-1 en N-2 van toepassing is) leidt soms tot kostbare maatregelen (zoals gesynchroniseerd schakelen van transformatoren). Dit kan nadelig zijn en belemmerend voor de energietransitie. Deze eisen in de Nederlandse Netcode kunnen heroverwogen worden.

7. Bronnen

1. **CEER.** *Guidelines of Good Practice on the Implementation and Use of Voltage Quality Monitoring Systems for Regulatory Purposes.* 2012.
2. **Netbeheer Nederland, -.** *Achtergronddocument spanningskwaliteit in Nederland - Resultaten 2021.* 2021.
3. **Nederland, Netbeheer.** *Spanningskwaliteit in Nederland - Resultaten 2021.* [Online] 2022. www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Spanningskwaliteit_in_Nederland_2021_250.pdf.
4. **TenneT.** *Voltage unbalance reduction in The Netherlands.* s.l. : Intern document, 03-02-2022.
5. *Harmonic analysis PQM data in 150 kV grid of TSO TenneT in Brabant, The Netherlands.* **Broekman, W. L., et al.** Almeria : 19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ), 2021.
6. **IEC.** *IEC-TR-61000 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems.* Geneva, Switzerland : IEC, 2008.
7. **Synergriid.** *C10/17 - Power Quality voorschriften voor netgebruikers aangesloten op hoogspanningsnetten.*
8. *Model validation for voltage dip assessment in future networks.* **Torkzadeh, Roozbeh, et al.** s.l. : Elsevier B.V., 2023, Vol. Electric Power Systems Research 217.
9. **Veldhoven, Mischa and Tang, Jok.** *Statistische Impactanalyse van Speciale Projecten bij TenneT.* 2015.
10. **Vladimir Ćuk, Konstantinos Tzanakakis.** *Insights in the impact of special projects on voltage quality in the HV/EHV networks.* s.l. : Technische Universiteit Eindhoven University of Technology, 2014.
11. **CEER.** *7TH CEER-ECRB Benchmarking report on the quality of electricity and gas supply.* 2022.
12. *Special Report CIRED 2021 Conference.* s.l. : **CIRED 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2021.**
13. *Power quality and EMC issues with future electricity networks.* C4/24/CIRED, JWG. 2018.
14. *Power Quality Indicators of Electric Vehicles in.* Naples : International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2022.
15. *Interharmonics and LED flicker: an assessment by CFD.* Knockaert, Jos. Madrid : CIRED 2019 Conference, 2019.
16. *Large Scale Proactive Power-Quality Monitoring: An Example from Australia .* Elphick Sean T, Phil Ciufu, Gerrard M. Drury, Victor W. Smith, Sarath Perera. s.l. : IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, Vol. 32.
17. *Power quality trends in the transition to carbon-free electrical energy systems .* CIGRE. s.l. : Science & Engineering Journal, 2020, Vol. 17.
18. *Impact of Electrical Vehicle Residential Charging Stations on the Quality of the Low Voltage Network Supply.* Fabrizio Pilo, Giuditta Pisano, Simona Ruggeri. Naples : International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2022.
19. **Torkzadeh, R., et al.** *An Estimation for Short-Circuit Power Changes in the Dutch Grid to Analyze the Impacts of Energy Transition on Voltage Dips.* [Study Committee C4 - PS1] s.l. : Cigré, 2022.
20. *A case study on the future changes in short circuit power to analyze the impact on voltage dips.* Joris HOEKSEMA, Roozbeh TORKZADEH, Jeroen VAN WAES, Sjef COBBEN, Vladimir ĆUK. Rome : CIRED 2023, 2023.
21. **Mulenga, Enock.** *Overvoltage due to single-phase and three-phase connected PV and what to do about it.* CIRED 2019 Conference : Madrid, 2019.
22. *Power quality trends in the transition to carbon-free electrical energy systems.* Flytkjaer, C.F. and Emin, Z. s.l. : Cigre Electra, 2020, Vol. 308.
23. *Transition of energy system by regulations of Power Quality for efficiency improvements.* Jacobsen, Benjamin. s.l. : Science Direct, 2022.
24. *Power Quality challenges on the Belgian transmission grid in the energy transition.* Vanvilthoven, Julien. Naples : International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2022.

-
25. *Special Report Cired 2019*. Madrid : CIRED 2019 - The 25th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2019.
 26. Distribution, Western Power. *Primary Networks Power quality Analysis*. 2021.
 27. *Passive Mitigation Technique for the Harmonics Caused by LED Lamps*. Abdelrahman, Akila. Madrid : CIRED 2019 Conference, 2019.
 28. *LED technology in Public Lighting – Analysis of the impact in power quality*. Veloso, Pedro. Madrid : CIRED 2019 Conference, 2019.
 29. García-Rodríguez, María. Study of the impact of grid connected PV system on PQ through a comparative analysis by scenarios. IEEE, 2019.
 30. *Determining the impacts of fast-charging of electric buses on the power quality based on field measurement*. Slangen, T. and Bhattacharyya, S. Madrid : CIRED 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2021.
 31. *Variations of supraharmonic emissions in low voltage networks*. Sarah, Rönnerberg. Madrid : CIRED 2019 Conference, 2019.
 32. *Power Quality improvement in a rural grid by grid storage system*. Johannes, Ferstl. Madrid : CIRED 2019 Conference, 2019.
 33. Nederland, Netbeheer. <https://www.netbeheernederland.nl/nieuws/nieuw-inpassingskader-voor-grote-batterijen-moet-netcongestie-verminderen-1596>. [Online] december 15, 2022.
 34. Nederland, Netbeheerder. *Het Energiesysteem van de toekomst - Integrale infrastructuurverkenning 2030-2050*. 2021.
 35. *Application of Machine Learning Methods for recognition of daily patterns in Power Quality Time Series*. Naples : International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2022.
 36. *Automatic Identification of Correlations in large Amounts of Power Quality*. Domagk, Max. Madrid : CIRED 2021 Conference, 2021.
 37. *Site Characterization Index for Continuous Power Quality Monitoring*. Florencias-Oliveros, Olivia. s.l. : JOURNAL OF MODERN POWER SYSTEMS AND CLEAN ENERGY, 2022, Vol. 10.
 38. *Comprehensive Review on Detection and Classification of Power Quality Disturbances in Utility grid with Renewable Energy peneration*. CHAWDA, GAJENDRA SINGH. s.l. : IEEE, 2020, Vol. 8.
 39. Ed1, IEC TS 63222-2. *Power quality management – Part 2: Power Quality Monitoring System*. 2022.
 40. P28, ena - Engineering Recommendation. *Voltage fluctuations and the connection of disturbing equipment to transmission systems and distribution networks in the United Kingdom*. 2019.
 41. 61000-4-11:2020, IEC. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-11: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests*.
 42. *Data Analysis and Applications of the Power Quality Monitoring*. Zhong, Qing. Guangzhou : IEEE, 2018.
 43. 1159-2019, IEEE Std. *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*.
 44. *Guidelines for Publication of Voltage Quality Monitoring Results in Portugal*. Faias, S. Madrid : International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2016.
 45. Abu, Mihaela M. Syncretic Use of Smart Meters for Power Quality Monitoring in Emerging Networks. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*. 2017, Vol. 8.
 46. 61000-4-30, IEC. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*.
 47. *Utilization of Harmonic Emission Limits by customer installations in low and medium voltage networks*. Pourarab, Morteza. Naples : International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2022.
 48. Janssen, Johan and Waes, Jeroen van. *Afronding onderdeel "speciale projecten" uit Plan van Aanpak Spanningskwaliteit*. s.l. : https://netztransparenz.tennet.eu/fileadmin/user_upload/The_Electricity_Market/Dutch_M

-
- arket/REC-N_17-037_Afronding_speciale_projecten_uit_PvA_PQM_DEF__20180209_.pdf, 2018.
49. F Ghassemi, M Perry. *Review of Voltage Unbalance Limit in the GB Grid Code CC.6.1.5*. s.l. : National Grid, 2014.
50. C84.1, ANSI. *Electric Power Systems and Equipment—Voltage Ratings (60 Hertz)*. 1995.
51. 61000-3-13, IEC/TR. *Electromagnetic compatibility (EMC): Limits - Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems*. 2008.
52. 241-1990, ANSI/IEEE Std. "*IEEE Recommended Practice for Electric Power Systems in Commercial Buildings*" (*Gray Book*).
53. RTE. *Conditions Générales du Contrat d'Accès au RPT pour les Consommateurs*. s.l. : Documentation technique de référence Chapitre 8, 2018.
54. *rrêté royal établissant un règlement technique pour la gestion du réseau de transport de l'électricité et l'accès à celui-ci*. 2019.
55. GmbH, 50 Hertz Transmission. *Netzanschluss Und Netzzugangsregeln*. s.l. : Minimum technical and organisational requirement, 2008.