

2016•2017
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterproef

Nieuwe energietechnologieën op gepaste manier integreren in het laagspanningsnet

Promotor :
ir. Aniceta DEXTERS

Copromotor :
ir. Brecht BAETEN

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

Noheli Akamba , Jelle Smits

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: energie

2016•2017
Faculteit Industriële
ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterproef

Nieuwe energietechnologieën op gepaste manier integreren
in het laagspanningsnet

Promotor :
ir. Aniceta DEXTERS

Copromotor :
ir. Brecht BAETEN

Noheli Akamba , Jelle Smits

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële
wetenschappen: energie*

Woord vooraf

Beste lezer, voor u ligt het resultaat van ontelbare uren zwoegen van twee studenten energie-elektrotechniek, Noheli Akamba en Jelle Smits, van de gezamenlijke opleiding industriële wetenschappen van de KU Leuven en de UHasselt. In deze masterproef ontwierpen wij een simulatiemodel, een eerder uitzonderlijk onderwerp voor industrieel ingenieurs.

De meeste technisch geïnteresseerde industrieel ingenieurs tonen weinig animo om te werken aan een simulatiemodel. Voor technici zijn laboproeven namelijk veel interessanter. Een simulatiemodel ontwerpen is iets dat weinigen kunnen en weinigen willen doen. Ook wij dachten daar aanvankelijk zo over. Toch zijn we ingegaan op het voorstel van ir. Annick Dexters. Haar voorstel betrof het opstellen van een simulatiemodel, voor gebruik in de lessen over spanningsproblematiek, een onderdeel van het vak *Power Systems*. Na deze masterproef echter, weten wij dat complexe elektrische situaties kunnen simuleren een bijzonder nuttige vaardigheid is voor een ingenieur. Ook al heeft het ons ontelbare uren zwoegen gekost.

Een goed opgesteld simulatiemodel is een zeer krachtig instrument om op een snelle en goedkope manier problemen te analyseren en met mogelijke oplossingen te experimenteren. Handige instrumenten, die goedkoop en snel zijn in gebruik, zijn echter vaak tijdrovend en complex om te ontwerpen en te maken. Deze thesis was niet anders. Het model gemaakt in deze masterproef is het resultaat van talloze foutmeldingen, enorme frustraties, uren en uren van zoeken om een tekenfout te ontdekken... Anderzijds is het vaak ook zo dat een proces dat langzaam en moeilijk gaat, wel aanleiding geeft om veel te leren. En achteraf ook veel voldoening geeft. Dit is ook waar in ons geval. We hebben veel bijgeleerd over elektriciteit, verdeling van elektrische energie, regelsystemen, simulatiemethoden en compilers.

Tot slot willen we graag onze promotoren ir. Annick Dexters en ir. Brecht Baeten danken voor het onderwerp, de goede raad en de ondersteuning. Vervolgens willen we graag onze ouders danken voor hun aanmoedigingen, alsook R. Pareyns. Als laatste, maar zeker niet de minste, willen we graag onze vriendinnen danken voor de mentale ondersteuning tijdens het schijnbaar eindeloze werk.

Diepenbeek
31 mei 2017

Noheli Akamba
Smits Jelle

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Inhoudsopgave	3
Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Verklarende woordenlijst	9
Abstract	11
Abstract (Engels)	13
1 Inleiding	15
1.1 Situering	15
1.2 Onderzoeksvraag	15
1.3 Doelstellingen	16
1.4 Methode	16
2 Ontwerp van het model	17
2.1 Eisen gesteld aan het model	17
2.2 Programmeeromgeving	18
2.2.1 MatLab.....	18
2.2.2 Simulink	18
2.2.3 Simscape	18
2.2.4 Power systems.....	19
2.2.5 Fasevector modus.....	19
2.3 Opbouw van het basissimulatiemodel	20
2.3.1 Nettopologie.....	20
2.3.2 Referentiemodel.....	21
2.4 Bibliotheek	22
2.4.1 Algemene eigenschappen van blokken	23
2.4.2 Residentiële last.....	24
2.4.3 PV-installatie.....	24
2.4.4 Warmtepomp	24
2.4.5 Batterijsysteem.....	25
2.4.6 Tijdsprofielen	25
3 Implementatie van de visualisatiemethode	27
3.1 STAV-methode	27
3.2 EN50160	27
3.3 Normalisatie en kwalificatie	28
3.3.1 Normalisatie	28
3.3.2 Classificatie	29

3.3.3	Resultaten verwerking.....	30
3.4	Koppeling visualisatie aan het model	30
3.5	Interpretatie van de gevisualiseerde simulatieresultaten	31
4	Spanningsproblemen	33
4.1	Oorzaken van spanningsproblemen	33
4.1.1	Over- en onderspanning.....	33
4.1.2	Asymmetrie in het laagspanningsnet	35
4.2	Oplossingen voor spanningsproblemen.....	36
4.2.1	Overspanningsproblemen oplossen	37
4.2.2	Onderspanningsproblemen oplossen.....	40
5	Cases	43
5.1	Selectie van cases	43
5.1.1	CASE 1: Spanningsproblemen door PV in lintbebouwing	44
5.1.2	CASE 2: Spanningsproblemen door WP in lintbebouwing.....	46
5.2	Oplossingen voor case 1.....	47
5.2.1	P-U regelsysteem op de PV-omvormer	47
5.2.2	PF(P) regelsysteem PV-omvormer.....	48
5.2.3	WP-U toevoegen aan de huizen met PV-installatie.....	49
5.2.4	Residentiële 0-batterij toevoegen in de wijk.....	49
5.2.5	Netbatterij toevoegen aan de wijk	51
5.3	Oplossingen voor case 2.....	52
5.3.1	WP-U regelsysteem toevoegen aan bestaande WP's.....	52
5.3.2	Batterijsystemen als oplossing voor case 2	53
6	Toepassing van het model en mogelijke uitbreidingen.....	55
6.1	Gebruik van het model.....	55
6.2	Uitbreidingen.....	55
7	Besluit	57
	Referentielijst.....	59

Lijst van tabellen

Tabel 1: SLP-profielen Synergrid (Synergrid, 2016)	26
Tabel 2: Conclusies MetaPV-project	38

Lijst van figuren

Figuur 1: Simulatie modi in Simulink	20
Figuur 2: voorbeeldschema radiaal LS-net (Leemput, et al., 2015)	21
Figuur 3: TT-aardingsstelsel (3F-belasting)	21
Figuur 4: Typische belgische LS-feeder (Capelle, et al., 2011)	22
Figuur 5: Weergave bibliotheek van netgebruikers	23
Figuur 6: S. uitgang via busselector naar scope.....	24
Figuur 7: Zonne-instraling 24 – 31 juli 2016 Limburg (Elia, 2016).....	26
Figuur 8: Twee datasets, net op de grens van de norm (Cobben, 2006).....	28
Figuur 9: A-F klassificatie m.b.v. STAV-methode (Cobben, 2006).....	30
Figuur 10 Asymmetrie op STAV.....	31
Figuur 11 Spanningsval over kabelweerstand in het net (neyens, 2012).....	34
Figuur 12 Verschil tussen productie PV en residentieel verbruik	35
Figuur 13: P-U droop controller	37
Figuur 14 PF(P)-regeling	39
Figuur 15: STAV van standaardsituatie.....	43
Figuur 16 Positie van de meetpunten op de feeder	44
Figuur 17 Inplanting case 1.....	45
Figuur 18: STAV van PV-spanningsprobleem in lintbebouwing.....	45
Figuur 19 Inplanting case 2.....	46
Figuur 20: STAV van wijk met spanningsproblemen door WP	47
Figuur 21: Case 1 verbeterd met P(U)-regelaar	48
Figuur 22: Case 1 opgelost met PF(P)-regelaar op omvormer	48
Figuur 23: Case 1 opgelost met WP(U).....	49
Figuur 24: Case 1 verbeterd met 0-batterij	50
Figuur 25: Case 1 opgelost met 0-batterij.....	50
Figuur 26: Case 1 verbeterd met netbatterij.....	51
Figuur 27: Invloed plaatsing batterijsysteem.....	52
Figuur 28: Case 2 oplossen met WP(U)	53
Figuur 29: Case 2 oplossen met netbatterij.....	53

Verklarende woordenlijst

LS	Laagspanning
MS	Middenspanning
Transfo	Transformator
Δ -Y-trans	Driehoek-ster-transformator (E: <i>Delta-wye transformer</i>)
SLP	Synthetic load profile
U_{Nom}	Nominale spanning
ΔU	Spanningsval, spanningsverschil
PQ	Power quality
STAV	Standaard afwijking en gemiddelde waarde (E: <i>standard deviation and average value</i>)
PV	Zonnepanelen (PhotoVoltaïsche panelen)
WP	Warmtepomp
EV	Elektrisch voertuig
COP	(E: <i>coëfficiënt of performance</i>)
OLTC	<i>On Load Tap Changer</i> : transformator die zonder onderbreking van wikkelverhouding kan veranderen
R_L	Lijnweerstand, weerstand in de kabel
X_L	Lijnreactantie, inductieve reactantie in de kabel
PF	<i>Power Factor</i> in deze context equivalent aan $\cos(\varphi)$
L_1	Lijndraad nummer 1, geleider voor de eerste fase
L_2	Lijndraad nummer 2, geleider voor de tweede fase
L_3	Lijndraad nummer 3, geleider voor de derde fase
N	Neutrale geleider
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> , regelsysteem voor PV-omvormer
Droop	Type regeling, proportionele regeling met dode zone
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> , centraal controlesysteem

Abstract

De vraag naar elektrische energie in een woonwijk is aan het veranderen door de opkomst van nieuwe energietechnologieën zoals zonnepanelen en warmtepompen. Hierdoor stelt zich de vraag of het huidige distributienet nog voldoet om stromen en spanningen binnen de gebruiksgrenzen van de netcomponenten te houden en de vereiste spanningskwaliteit (EN 50160) te garanderen. Om te anticiperen op deze problemen, is een simulatiemodel nuttig. Het doel van deze masterthesis is dan ook het ontwikkelen van een eenvoudig simulatiemodel. Hiermee kunnen netbeheerders en studenten deze problematiek analyseren en oplossingen testen om een optimale integratie van deze technologieën in de huidige netten mogelijk te maken.

Het model is ontwikkeld in Simulink en bestaat uit een bibliotheek van standaardnetcomponenten en een aantal voorbeeldsituaties van woonwijken waarin spanningsproblemen geanalyseerd en oplossingen getest kunnen worden. Een visualisatiehulpmiddel vergemakkelijkt de interpretatie van de simulatieresultaten.

De bekomen resultaten tonen aan dat PV-installaties in een woonwijk een te hoge spanning kunnen veroorzaken bij felle zonneschijn. Een regeling op de PV-omvormer die reactief vermogen injecteert kan dit probleem al drastisch verminderen, in combinatie met batterijen zelfs volledig oplossen. Integratie van veel warmtepompen veroorzaken analoge problemen en oplossingen. Een spanningsgevoelige regeling van de warmtepompen biedt voor onderspanningen veroorzaakt door WP's een goede oplossing.

Abstract (Engels)

The demand for electrical energy in the low voltage grids is changing due to the integration of new technologies such as photovoltaic panels and heat pumps. The question rises if the infrastructure is still capable of keeping the currents and voltages within the limits. An easy tool to anticipate on these problems is necessary. The goal of this master's thesis is the development of a simulation model that allows analysis on the integration of new technologies in the low voltage grids. In this way, DSO's and students can analyse and understand the problems and develop solutions to integrate new technologies in an adequate manner.

The model is made in Simulink and consists of a library with standard grid components and example situations of residential areas where problems and solutions are demonstrated. A visualisation method is added to aid the interpretation of the results.

Results of the model indicate that with the application of a lot of PV-systems in the low voltage grid, the voltage level at the end of the feeder is rising above the limit. The best solutions for this problem are battery systems in all households with PV. This solution is not possible in the near future due to the high cost of battery systems. A valid alternative is a controller on the inverter that injects reactive power. The problem that rises when a lot of heat pumps are implemented is a too low voltage at the end of the feeder when the temperatures are cold. The best solution for this problem a voltage sensitive control algorithm on all heat pumps.

1 Inleiding

1.1 Situering

Duurzame energietechnologieën worden alsmear belangrijker, mede omwille van de Europese klimaatdoelstellingen. Steeds meer mensen kiezen voor zonnepanelen, warmtepompen en elektrische voertuigen. De toepassing van deze technologieën op grote schaal heeft invloed op de bestaande distributienetinfrastructuur. Ook het profiel van het elektriciteitsverbruik van de huishoudens zal in de nabije toekomst sterk veranderen. Deze masterproef situeert zich binnen het onderzoek dat momenteel loopt naar de impact van deze veranderingen op het beheer van het elektriciteitsnet alsook manieren om deze nieuwe energietechnologieën op een optimale manier te implementeren.

1.2 Onderzoeksvraag

Door de stijgende populariteit van hernieuwbare energiebronnen, komt er een verschuiving van centrale energieproductie naar decentrale productie door de toepassing van PV. Hierdoor komt er een verandering in het productie- en verbruiksprofiel voor elektrische energie. De unidirectionele energiestromen, zoals die tot voor kort bekend waren, evolueren naar bidirectionele stromen. De toepassing van warmtepompen en batterijsystemen in de woonhuizen hebben een verdere impact op het verbruiksprofiel. Hierbij is het mogelijk dat de gebruiksgrenzen van de bestaande elektrische infrastructuur overschreden wordt, omdat ze voor dit soort gebruik destijds niet gedimensioneerd werd door de distributienetbeheerder.

De verandering in het vraag- en aanbodprofiel van de elektriciteit kunnen ervoor zorgen dat de kabels en/of transformatoren niet langer voldoen om de gevraagde stroom te kunnen leveren op bepaalde momenten van de dag. Dit zou vervolgens kunnen resulteren in een stroomuitval omwille van overbelasting van de infrastructuur. Daarnaast is het mogelijk dat het spanningsniveau buiten vastgelegde normen gaat fluctueren, met eventuele schade aan elektrische apparatuur tot gevolg.

Om op de bovengenoemde problemen te kunnen anticiperen is het nuttig om over een aangepast middel te beschikken, waarmee de effecten van nieuwe technologieën in woonwijken onderzocht kunnen worden. Op deze manier kunnen studenten energie inzicht verwerven in deze problematiek.

De onderzoeksvraag is bijgevolg:

“Wat zijn de effecten van nieuwe technologieën (zonnepanelen, warmtepompen, batterijen) op het spanningsniveau en de belasting in het laagspanningsnet? En hoe kan men deze nieuwe technologieën op een optimale wijze integreren in het elektriciteitsnet van een wijk.”

1.3 Doelstellingen

Het doel van deze masterproef is het dynamisch gedrag van het elektriciteitsnet in een woonwijk te onderzoeken op basis van kwartierwaarden van productie en verbruik. Voor dit onderzoek wordt een simulatiemodel opgesteld. Dit simulatiemodel moet in staat zijn om de spanningen en stromen in elk punt in het laagspanningsnet tot aan de voedingstransformator te bepalen. Verder moeten de effecten van warmtepompen, zonnepanelen en batterijsystemen gesimuleerd kunnen worden, zodat gepaste oplossingen voor mogelijke problemen gezocht en onderling vergeleken kunnen worden.

Het simulatiemodel moet zodanig gebouwd worden dat het gebruikt kan worden als een basissimulatiemodel. Maar ook dat het modulair uitbreidbaar is, zodat nieuwe, bijkomende configuraties makkelijk geïntegreerd kunnen worden. Bijkomend dient dit simulatiemodel zich ook te lenen voor didactische doeleinden.

1.4 Methode

Ten eerste wordt er voor de meest gangbare componenten in het elektriciteitsnet een apart model opgesteld. Vervolgens wordt met deze componenten een basissimulatiemodel opgesteld. Dit basissimulatiemodel stelt een fictieve wijk voor, met weinig nieuwe technologieën, waarin de spanning de grenzen van de norm EN50160 benaderd. Dit dient als referentietoestand voor verder onderzoek.

Vervolgens wordt er per technologie en combinatie van technologieën gekeken wat de effecten zijn door de veranderingen in verbruiksprofiel en maximale en minimale waarden voor de spanning te vergelijken met de basissituatie.

Ten slotte wordt voor de optredende problemen bij enkele variaties op de basissituatie gezocht naar mogelijkheden om deze te verminderen.

2 Ontwerp van het model

De eerste stap in deze thesis is het opstellen van modellen voor netelementen en deze combineren in een basissimulatiemodel. Bij het ontwerpen van deze modellen moeten een aantal vereisten in het achterhoofd gehouden worden. Dit hoofdstuk behandelt de eisen waaraan het model moet voldoen ten einde de doelstellingen te kunnen vervullen en welke keuzes gemaakt zijn om hieraan te voldoen.

2.1 Eisen gesteld aan het model

De eisen waaraan het basissimulatiemodel moet voldoen zijn:

1. Het basissimulatiemodel moet vlot aanpasbaar zijn. Er moet dus een bibliotheek gemaakt worden waar standaard netelementen en componenten in te vinden zijn, zodat door knippen en plakken extra elementen aan het model toegevoegd kunnen worden. De standaardcomponenten zijn: kabels, transformatoren, residentiële gebruikers, hernieuwbare energietechnologieën, meettoestellen en uitleescomponenten.
2. Het model moet zo opgesteld zijn, dat men op visuele wijze de rol van de afzonderlijke componenten in het netwerk kan herkennen en interpreteren. De componenten moeten dus grafisch gelijken op de werkelijke topologie van een laagspanningsnet in een woonwijk.
3. Het model moet de integratie van enkele hernieuwbare energietechnologieën (warmtepomp, PV-installatie en batterijsysteem) in de woonwijk kunnen simuleren. Hiervoor moeten deze componenten beschikbaar zijn in een bibliotheek. Deze componenten moeten op basis van tijdsprofielen vermogen injecteren of afnemen van het net. Voor zonnepanelen is dit tijdsprofiel de zonne-instraling of het vermogen opgewekt per vierkante meter paneel. In het geval van een warmtepomp is dit een profiel van de warmtevraag. Bijkomend moet de gebruiker in staat zijn het model te voorzien van verbruikersprofielen en andere tijdsafhankelijke verlopen naar keuze. Op deze manier kan een specifiek scenario met scenario-specifieke waarden (bijvoorbeeld afkomstig van slimme meters) gesimuleerd worden.
4. Op alle posities in het LS-net moeten bepaalde grootheden gemeten kunnen worden. Deze grootheden zijn: spanning, stroom, het actieve en reactieve vermogen en de $\cos(\varphi)$.
5. Het model moet de mogelijkheid bieden om componenten te integreren om spanningsproblemen te verminderen. Deze componenten bestaan uit controlesystemen voor zonnepanelen of warmtepompen, maar ook uit batterijsystemen en systemen voor thermische opslag. Op deze manier moet het model ook toestaan te onderzoeken wat de invloed is van regelalgoritmes en enkele systeemp parameters op het spanningsverloop.

6. De gesimuleerde tijd moet aanpasbaar zijn van een aantal uren tot een jaar met een simulatiestap van enkele seconden tot minuten.

2.2 Programmeeromgeving

Om een model op te stellen, moet er eerst en vooral gekozen worden voor een programmeeromgeving. Op het gebied van programmeeromgevingen zijn er een aantal opties beschikbaar. De opties overwogen voorafgaandelijk aan deze masterproef zijn: Open Modelica, MatLab/Simulink en Python.

De keuze is gevallen op MatLab/Simulink. Dit omwille van de beschikbaarheid aan documentatie en voorbeelden. Bovendien verdient een visuele programmeeromgeving de voorkeur, omdat hierbij geen userinterface gemaakt moet worden.

2.2.1 MatLab

Het model werd opgesteld in MatLab, een rekenplatform van Mathworks. MatLab beschikt over een eigen syntax, ontworpen om wiskundige bewerkingen uit te voeren, visualisaties te maken en tools te ontwerpen. Bovendien kan het platform uitgebreid worden met verschillende toolboxes. Deze toolboxes gaan van reken- en simulatietools tot controlesystemen en signaalverwerking. MatLab kan wiskundige berekeningen uitvoeren met matrices en vectoren, wat de rekensnelheid voor multidimensionale problemen aanzienlijk vergroot. Wereldwijd wordt MatLab gebruikt door wetenschappers en ingenieurs voor onderzoek.

2.2.2 Simulink

Simulink is één van de *toolboxes* voor MatLab. Het is een visuele programmeeromgeving waarin een simulatiemodel opgebouwd wordt als een blokdiagram. Simulink heeft verschillende basisblokken ter beschikking, maar biedt ook de mogelijkheid blokken te ontwerpen.

Een blok ontwerpen kan door het combineren van basisblokken of door manueel de code te schrijven en deze te compileren tot een blok. Verder biedt Simulink de mogelijkheid, naast zuiver virtuele simulatie, ook de optie de simulatie te linken aan een *real-time* systeem in de fysische wereld door middel van *interfaces* - HIL-systemen, hardware in loop -.

Simulink is ontworpen voor model gebaseerd ontwerp, om het gedrag van fysieke componenten en regelsystemen in een model te simuleren.

2.2.3 Simscape

Simscape is een *toolbox* van Simulink. Deze *toolbox* bevat modellen voor componenten uit verschillende fysische domeinen. Deze fysische domeinen kunnen naast elkaar gebruikt worden, alsook geïntegreerd worden tot één totaal systeem. Simscape bevat modellen voor de volgende fysische domeinen:

- mechanisch,

- elektrisch,
- hydraulisch,
- thermisch,
- fluidodynamica van gassen en tweefasige toestanden.

2.2.4 Power systems

Voor het elektrische domein is er “*Simscape Power Systems*”. *Simscape Power Systems* bevat analyse tools en een bibliotheek voor elektromechanische toepassingen. Deze bibliotheek bevat componenten zoals transformatoren, windmolens, spannings- en stroombronnen en verschillende meet-blokken.

2.2.5 Fasevector modus

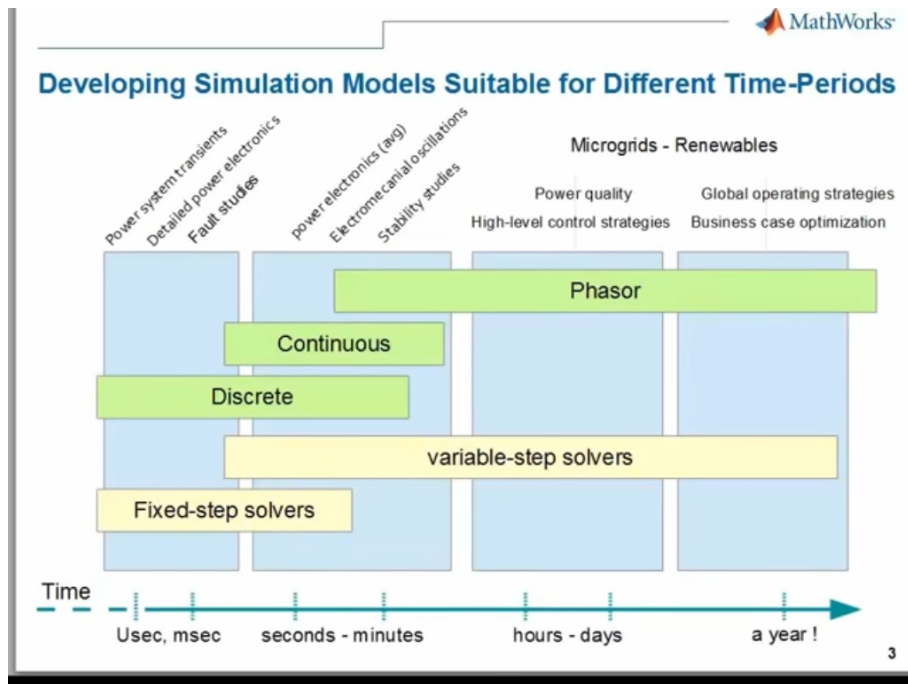
Simscape Powersystems laat simulaties op drie verschillende manieren toe (Figuur 1). Deze manieren zijn:

- Discreet
- Continu
- Fasevector

Elk van deze manieren van simuleren heeft zijn eigen specifieke doel. Simulaties met discrete tijdsstap maken berekeningen met een vaste tijdsstap. Dit is de meest ideale manier van simuleren wanneer het gaat om transiënten (snelle overgangsverschijnselen zoals het sluiten van een schakelaar), effecten van vermogen elektronica (zoals frequentieomvormers) en het onderzoeken van elektrische fouten.

Continue simulaties zijn dan weer ideaal voor simulaties waarbij momentele waardes belangrijk zijn, bijvoorbeeld; vermogen-elektronica, elektromechanische oscillaties en stabiliteit van het net. Deze maken gebruik van differentiaalvergelijkingen waardoor de simulatietijden langer zijn. Door de continue aard wordt hier vaak met een variabele tijdstap gewerkt.

Ten slotte zijn fasevectorsimulaties het meest geschikt als het gaat over algemene regelstrategieën en werkingsstrategieën, het onderzoeken van businesscases en simulaties die over een lange tijdsspanne lopen. De fasevector simulatiemethode rekent bovendien niet met differentiaalvergelijkingen maar met eenvoudigere algebraïsche vergelijkingen. Dit zorgt voor een snellere berekening.



Figuur 1: Simulatie modi in Simulink

Aangezien het één van de doelstellingen is om de amplitude en de RMS-waarde te bepalen op minuten tot jaarbasis, en er geen nood is aan het analyseren van transiënten en andere snelle overgangsverschijnselen, is er gekozen voor de fasevectormodus.

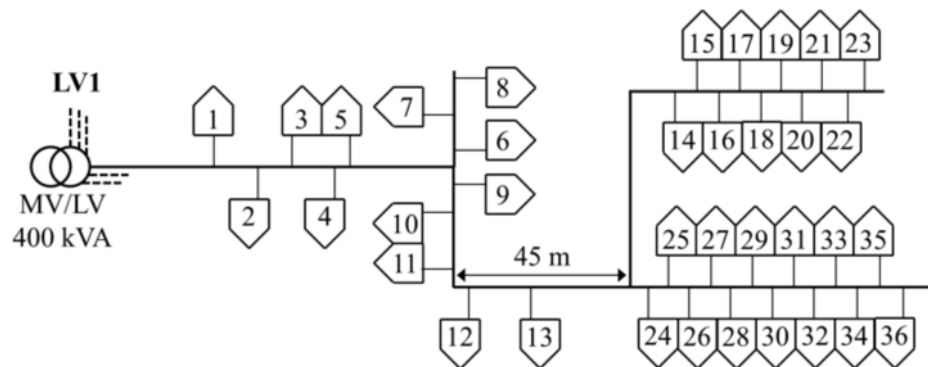
2.3 Opbouw van het basissimulatiemodel

Het basissimulatiemodel wordt opgebouwd zoals het elektriciteitsnet er anno 2017 uit ziet. Dit betekent dat er op een minderheid van de huizen een PV-installatie moet liggen, er bijna geen huizen zijn met een warmtepomp en geen huizen met een batterijsysteem. Ook batterijsystemen op wijkniveau worden nog niet geïmplementeerd.

2.3.1 Nettopologie

Elektrische energie, geproduceerd in de grote centrales, wordt getransporteerd over het hoogspanningsnet en middenspanningsnet en vervolgens verdeeld over het laagspanningsnet. Vermits deze masterproef zich enkel toespitst op spanningseffecten in de woonwijken, beperkt het model zich ook hiertoe. De invloeden van het hoog- en middenspanningsnet worden verwaarloosd, er wordt uitgegaan van een perfecte middenspanningsbron van 10 kV die via een kabel aangesloten is op de transformator.

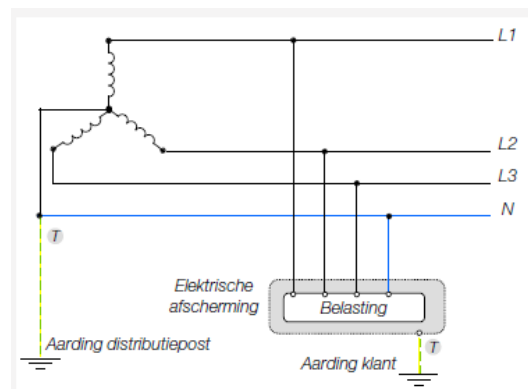
Het laagspanningsnet in een woonwijk vertrekt bij een middenspanning naar laagspannings-transformator. Hier wordt de spanning (in Vlaanderen typisch 10 kV) getransformeerd naar de 230-400V die in de huizen wordt gebruikt. Vanuit de transformator vertrekken verschillende “feeders” naar de huizen (Figuur 2).



Figuur 2: voorbeeldschema radiaal LS-net (Leemput, et al., 2015)

Een feeder is een driefasige kabel waarop de verbruikers aangesloten zijn. Feeders lopen vanuit de transformator radiaal naar buiten. Eén feeder is enkele honderden meters tot een kilometer lang en voorziet gemiddeld 20-40 huizen van elektriciteit. De huizen in de huidige woonwijken zijn voornamelijk éénfasig aangesloten en verdeeld over de drie fasen.

Residentiele gebruikers in het laagspanningsnet zijn aangesloten volgens het TT-aardingsnetstelsel (Figuur 3). Dit betekent dat het sterpunt van de transformator geaard is en gebruikers lokaal geaard zijn. Verder wordt ook de neutrale geleider van de feeder om de 400m geaard. Dit om een grote nulpuntsverschuiving, ten gevolge van een asymmetrische belasting, te beperken.



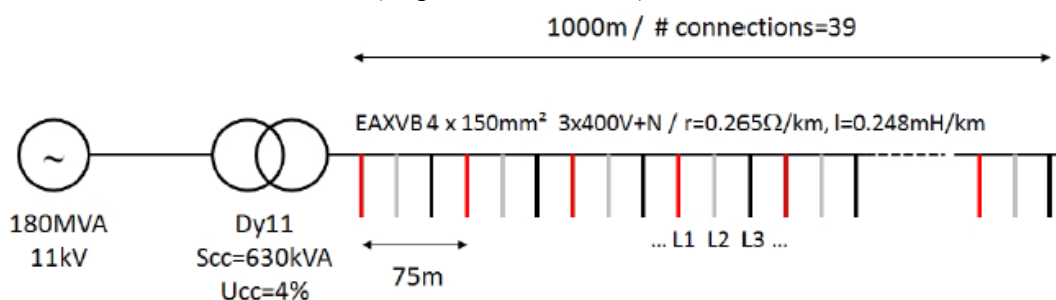
Figuur 3: TT-aardingsstelsel (3F-belasting)

2.3.2 Referentiemodel

Zoals reeds vermeld wordt in het model het elektriciteitsnet vanaf de middenspannings-laagspanningstransformator gesimuleerd. Effecten vanuit het midden- of hoogspanningsnet worden verwaarloosd. Waar in de realiteit er verschillende transformatoren, spanningsniveaus en kabels tussen een centrale bron en de woonwijk liggen, wordt dit in het model voorgesteld als een zuivere (midden)spanningsbron die via één kabel (R-L-seriekring) aangesloten is op de primaire zijde van de transformator. Verder wordt er in het model slechts 1 feeder gebruikt om de simulatietijd te beperken en binnen de limieten van de studenten proefversie van de software te blijven. Vermits er in het model geen sprake kan zijn van “foutstromen” of aardlekken worden de gebruikers niet geaard.

De feeder in het model kan twee verschillende straten voorstellen. De eerste mogelijkheid stelt een straat in stedelijk gebied voor. De huizen liggen hier dicht bij elkaar, waardoor de kabellengten beperkt blijven. De tweede mogelijkheid stelt een straat met lintbebouwing voor. Deze feeder is bijgevolg langer omdat de huizen verder uit elkaar liggen. Op het vlak van netgebruikers en energietechnologieën verschillen de feeders niet.

In het referentiemodel wordt de feeder gevoed door een 10kV/400V transformator van 250 kVA. Deze transformator is een driehoek-stertransformator waarbij het sterpunt van de secundaire winding geaard is. Vanaf de distributiecabine vertrekt een 4x150 mm²-kabel (Figuur 4) die in het model voorgesteld wordt als een weerstand van 0,265 Ω/km en een inductantie van 0,248 * 10⁻³ H/km (Capelle, et al., 2011).



Figuur 4: Typische belgische LS-feeder (Capelle, et al., 2011)

2.4 Bibliotheek

Eén van de vereisten voor het model is het beschikken over een bibliotheek waaruit de blokken gebruikt kunnen worden om snel een nieuw model te maken of een aanpassing te doen aan een bestaand model. Daarom is er een bibliotheek gemaakt met de belangrijkste basisblokken. In dit hoofdstuk worden de verschillende blokken uit de bibliotheek besproken op gebied van toepassing, werking en gekozen regeling. Deze blokken zijn te verdelen in drie categorieën: bestaande *Simscape*-blokken, meetinstrumenten en zelfgebouwde blokken.

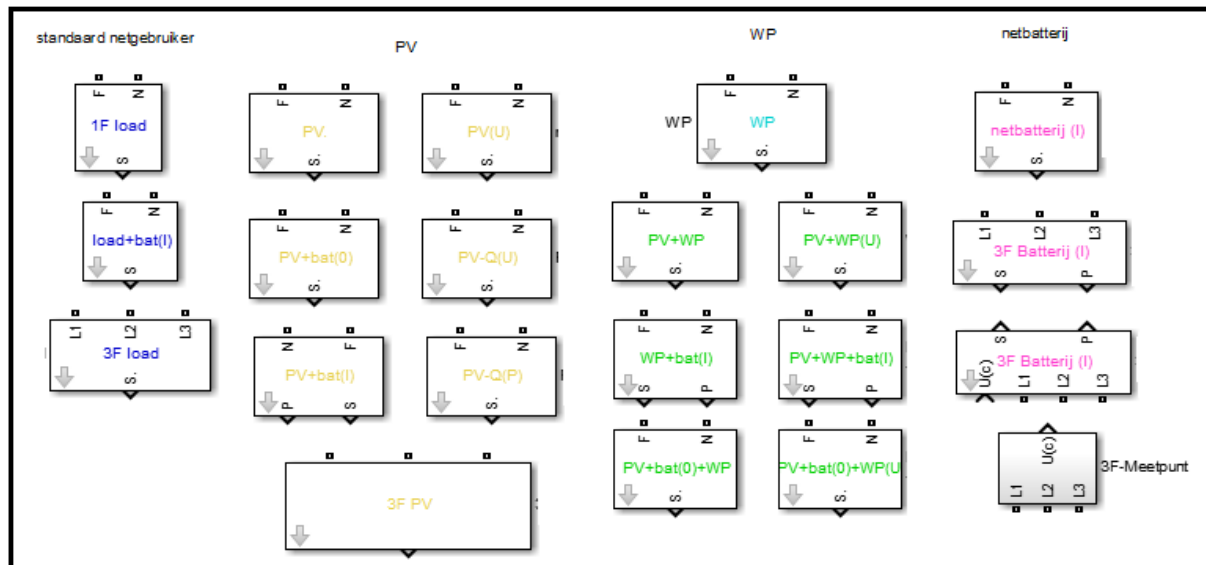
De eerste soort blokken waar het model uit opgebouwd is, zijn de standaard *Simscape*-blokken. Dit zijn blokken uit de bibliotheek van *Simscape Power Systems* die voldoen aan de eisen en dus voldoende gedocumenteerd en voldoende aanpasbaar zijn. Het betreft een 250 kVA en een 630 kVA transformator, verschillende soorten kabels en een aardingsblok.

De tweede categorie van blokken zijn de meetinstrumenten. Het gaat in deze categorie over zowel volt- als ampèremeters, gecombineerde volt- en ampèremeters en conversieblokken van spanning en stroom naar actief en reactief vermogen. Deze blokken komen grotendeels ook uit de standaardbibliotheek van *Simscape Power Systems*. Verder bevat deze categorie ook displays en scopes, manieren om meetresultaten weer te geven, respectievelijk momentaan of in functie van de tijd.

De derde en laatste categorie van bibliotheekblokken zijn de blokken die speciaal voor dit model ontworpen zijn. Het betreft hier blokken waarvoor geen standaardblok beschikbaar was, de standaardblok te eenvoudig is, niet de juiste in- en/of uitgangen heeft, niet voldoende aanpasbaar is of gewoonweg onvoldoende gedocumenteerd is. Om deze problemen aan te

passen zijn er, door gebruik te maken van elementaire standaardblokken, nieuwe blokken ontworpen. Het betreft hier alle lasten en bronnen die in de tijd een veranderlijk vermogen opnemen of injecteren, alsook alle netgebruikers waar een aanpasbaar regelsysteem voor vereist is. Het merendeel van deze blokken is zowel éénfasig als driefasig uitgevoerd. De ontworpen blokken komen voor in combinaties van de volgende componenten;

1. residentiële last,
2. PV-installatie,
3. warmtepomp,
4. batterijsysteem.



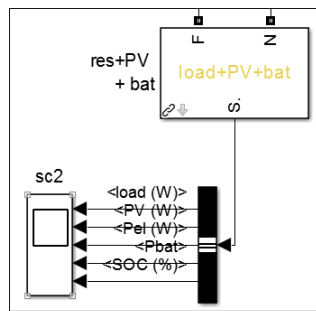
Figuur 5: Weergave bibliotheek van netgebruikers

2.4.1 Algemene eigenschappen van blokken

Al deze blokken zijn ontworpen op basis van een spanningsvolger. Dit betekent dat het blok de spanning gaat meten als een fasor en afhankelijk hiervan een stroom trekken of injecteren. De grootte van deze stroom wordt bepaald door de grootte van de spanning en het vermogen dat er gevraagd of geïnjecteerd wordt. De $\cos(\varphi)$ staat standaard op 1,0 maar kan tot 0,9 inductief of capacitef ingesteld worden zodat de stroomfasor de overeenkomstige hoek gaat voor- of na-ijlen op de spanningsfasor.

Elke blok is voorzien van een stuk kabel, waarmee de component aangesloten is. Het betreft hier de kabel van de straat tot de netgebruiker. De eigenschappen van deze kabel (weerstand en lengte) kunnen, zoals alle eigenschappen van het blok, aangepast worden door te dubbelklikken op het blok en de parameters “kabel lengte” en “weerstand per 100m” aan te passen.

Elk blok heeft naast de aansluitklemmen (F en N of L1, L2, L3 en N) ook een “S.” uitgang. Deze uitgang dient om een scope aan te hangen zodat alle grootheden van de blok uitgelezen kunnen worden. Dit gebeurt door in de *bus selector* aan te duiden welke signalen gewenst zijn en deze vervolgens aan één of meerdere scope(s) te hangen (Figuur 6).



Figuur 6: S. uitgang via busselector naar scope

2.4.2 Residentiële last

De residentiële last is een blok die een constant of variabel vermogen vraagt. Er kan tussen deze functies gekozen worden bij de eigenschappen van de blok. Wanneer een vast vermogen geselecteerd is, vraagt de last, onafhankelijk van de spanning het opgegeven vermogen. Wanneer variabel vermogen geselecteerd is, vraagt de last, onafhankelijk van de spanning het vermogen dat overeenstemt met het vermogen uit de SLP (*Synthetic Load Profile*) voor dat moment. Op deze manier kan het verbruiksprofiel van een huishouden als Excel bestand ingeladen worden.

2.4.3 PV-installatie

Het blok van de PV-installatie stelt een huishouden met zonnepanelen voor. Deze component bevat dus een residentiële last zoals hierboven beschreven, aangevuld met een PV-installatie. Deze PV-installatie gaat, afhankelijk van het profiel van zonne-instraling, een bepaald vermogen, rekening houdend met het rendement van de panelen en de omvormer, injecteren in het net. Deze component bestaat met 3 soorten regelingen: een klassieke regeling zoals die geïmplementeerd is in alle commercieel verkrijgbare omvormers, een regeling die de invloed op het net kan ontlasten doormiddel van een P-U droop en een regeling vanuit het MetaPV-project (PF(P)-regeling) die geïmplementeerd zal worden in de nieuwe omvormers.

Ten slotte is er ook nog een driefasige PV-blok. Dit is een blok die overeenkomt met een PV-veld. Er is hier geen verbruik, enkel injectie van vermogen. Het vermogen is weer afkomstig uit de instraling van de zon en wordt gelijk verdeeld over de drie fasen.

2.4.4 Warmtepomp

De warmtepomp is een blok die op basis van een thermisch verbruiksprofiel een vermogen vraagt. Deze component bestaat uit een warmtepomp en een buffervat. De temperatuur in het buffervat neemt af aan de hand van het thermisch verbruik (verwarming en sanitair warm water) en neemt toe wanneer de warmtepomp actief is. Het verbruik voor verwarming is gebaseerd op het profiel van de buitentemperatuur, de gewenste binnentemperatuur en de isolatiewaarde van het huis (UA). Het verbruik van sanitair warm water is gebaseerd op het aantal personen in het huis en een constante per persoon. Deze component bestaat weer in twee versies: de versie met een klassieke aan-uit-regelkring en de versie met een regeling die het net probeert te ontlasten.

2.4.5 Batterijsysteem

Een batterijsysteem bestaat uit een oplader-omvormer combinatie, een regelsysteem en een batterij. De oplader-omvormer wordt gestuurd door de regelaar die een vermogen oplegt dat dan gevraagd (batterij opladen) of geïnjecteerd (batterij ontladen) wordt. Bij zowel op- als ontladen wordt er rekening gehouden met een rendement van 80%. De bepaling van het vermogen kan op verschillende manieren gebeuren. Deze blok heeft weer twee varianten: de netbatterij en de huisbatterij.

De netbatterij is een één- of driefasig batterijsysteem dat geplaatst wordt op netniveau. Deze batterij is in beheer van de distributienetbeheerder en heeft in de context van deze masterproef de functie om spanningsproblemen te verminderen.

De huisbatterij is een éénfasig batterijsysteem geplaatst in een huis. Deze batterij kan verschillende regelsystemen hebben. Wanneer de huisbatterij gecombineerd wordt met een PV-installatie, wordt de 0-regeling toegepast. Wanneer een huisbatterij wordt geplaatst in een huis zonder PV-installatie, zijn er verschillende mogelijkheden op gebied van regelsystemen. Zo kan de batterij bijvoorbeeld 's nachts opladen met nachttarief om overdag goedkopere energie te gebruiken, het vraagprofiel zo veel mogelijk afvlakken of het net ontlasten door op te laden wanneer er veel PV-injectie is of ... Vermits in deze masterproef het hoofddoel is om de spanning binnen de norm te houden, is er gekozen om het regelsysteem op de huisbatterij zonder PV de spanning te laten regelen, de I-regeling.

2.4.6 Tijdsprofielen

De residentiële last, PV-installatie en warmtepomp maken alle drie gebruik van een tijdsafhankelijk profiel. Deze profielen staan toe het verbruik van een huis of een warmtepomp of de injectie van een PV-installatie variabel in de tijd te implementeren. Hiervoor is gebruik gemaakt van historische data.

2.4.6.1 Verbruikprofiel van de residentiële lasten

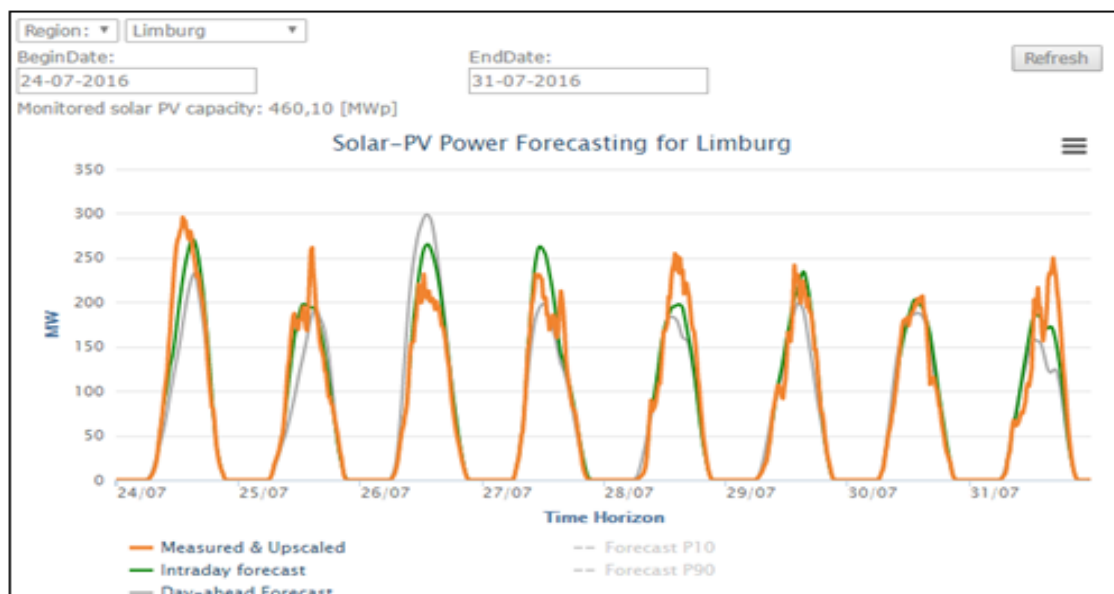
Het gebruiksprofiel van de last is afkomstig van Synergrid. Dit profiel geeft per kwartier het gemiddelde verbruik van een Belgisch huis als percentage van het jaarverbruik. Een dergelijk profiel noemt een SLP: *Synthetic Load Profile*. Er zijn een aantal profielen beschikbaar maar er is gekozen voor het profiel "S21", dit is een residentieel profiel waarbij de verhouding tussen nacht- en dagverbruik kleiner is dan 1,3 (Tabel 1). Vermits deze profielen een weergave zijn van het gemiddelde in een land, zijn ze meer afgevlakt. In werkelijkheid kunnen individuele verbruikspieken in hoger zijn.

Tabel 1: SLP-profielen Synergrid (Synergrid, 2016)

SLP - PROFIELEN	
Code	Criteria
S11	Elektriciteit - Niet huishoudelijk met Aansluitingsvermogen < 56 kVA
S12	Elektriciteit - Niet huishoudelijk met Aansluitingsvermogen ≥ 56 kVA
S21	Elektriciteit - Huishoudelijk met verhouding Nachtverbruik/dagverbruik < 1,3 (of Netgebruiker zonder exclusief nachttarief indien geen verbruikshistoriek)
S22	Elektriciteit - Huishoudelijk met verhouding Nachtverbruik/dagverbruik ≥ 1,3 (of Netgebruiker met exclusief nachttarief indien geen verbruikshistoriek)

2.4.6.2 Productieprofiel van de PV-installaties

Voor de zonne-instraling is gebruik gemaakt van historische gegevens, verzameld door Elia, de transmissie netbeheerder. Op de website van Elia zijn Excelsheets met de totale instraling en het totale net-gekoppelde vermogen op kwartierbasis in een bepaalde regio ter beschikking. Er is gekozen voor het profiel van Limburg (Figuur 7). Uit het profiel bekomt men het vermogen, dat een PV-installatie opbrengt per kwartier per kilowatt piekvermogen van de omvormer. Ook hier weer is dit profiel een uitmiddeling van een regio. Daardoor is het snel veranderende patroon van zonne-instraling meer afgevlakt. Lokaal in een wijk zullen de flanken steiler zijn en de pieken groter. Desondanks is dit een goede manier van werken zonder de nood aan specifieke gegevens van de verschillende installaties een hele wijk afzonderlijk.



Figuur 7: Zonne-instraling 24 – 31 juli 2016 Limburg (Elia, 2016)

3 Implementatie van de visualisatiemethode

Bij het onderzoek van de *power quality* op een welbepaalde plaats, worden gedurende een week verschillende periodieke metingen gedaan. Dit levert een grote set data op die vervolgens geïnterpreteerd moeten worden, waarbij het moeilijk kan zijn om het overzicht te houden.

De door Dr. Ir. Sjef Cobben ontwikkelde visualisatietool presenteert die informatie op een gemakkelijk te interpreteren manier. Dit vereenvoudigt het destilleren van informatie uit de data voor diegenen die geen specialist *power quality* zijn, en ondersteunt presentaties waar de complexiteit niet mag afleiden van de boodschap.

3.1 STAV-methode

Eén van de interpretatiemethodes van Dr. Ir. Sjef Cobben is de STAV-methode, zoals beschreven in (Cobben, 2006). De afkorting “STAV” staat voor “*standard deviation, average value*”, ofwel de standaardafwijking en gemiddelde waarde. Deze techniek dient om een dataset van één grootte (bijvoorbeeld de spanning) om te zetten tot één enkel punt op een 2D-grafiek. Deze grafiek geeft op de x-as de gemiddelde waarde en op de y-as de standaardafwijking van de dataset. De standaardafwijking geeft aan hoezeer de waarden uit de dataset verspreid liggen rond het gemiddelde.

3.2 EN50160

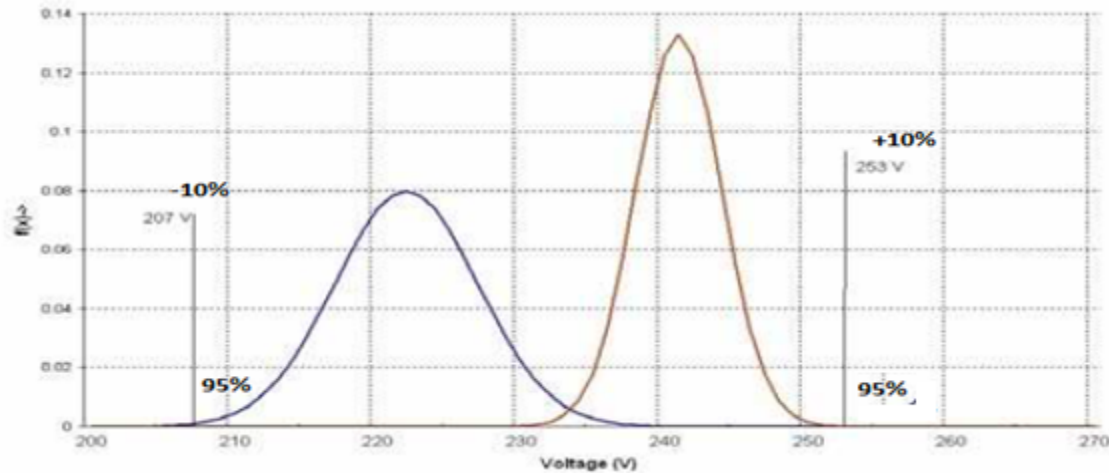
In de Europese norm EN50160, waar alle distributienetbeheerders zich aan moeten houden, staan de *power quality* normen beschreven. *Power quality* beslaat verschillende aspecten van de kwaliteit van elektrische energielevering. De ogenblikkelijke amplitude van de spanning, spanningsvariatie, harmonische vervuiling, onbalans in een driefasig systeem en frequentieafwijking zijn enkele hiervan. Vermits het model in deze masterproef zich enkel toespitst op de gemiddelde waarde van de spanning, wordt de visualisatie ook beperkt tot deze grootte.

Voor de effectieve waarde van laagspanning legt de EN50160 de volgende grenzen vast:

- de nominale fasespanning U_{Nom} is 230V;
- de gemiddelde spanning van alle 10 minuut-intervallen gedurende een meettijd van 1 week moet voor 95% van de tijd binnen het interval -10% en +10% van de nominale waarde liggen;
- de gemiddelde fasespanning in alle 10 minuut-intervallen mag nergens meer dan -15% en +10% afwijken van U_{Nom} .

De grenzen op de visualisatie lijken hier licht van af te wijken. Dit is echter niet het geval omdat bij een gemiddelde gelijk aan U_{Nom} de standaardafwijking groter mag zijn dan bij een gemiddelde dat afwijkt van U_{Nom} . In het eerste geval is het risico kleiner dat de absolute limieten overschreden worden, dan bij de situaties met verschoven gemiddeldes en kleinere standaardafwijkingen. In Figuur 8 zijn twee gausscurves te zien die deze verschoven grenzen illustreren. De spanning mag voor maximaal 5% van alle metingen onder de ondergrens van

230 V – 10% vallen, en voor 0,1 % van de metingen onder de ondergrens van 230-15%. De bovenste grens van 230 V +10 % mag niet overschreden worden. Dus nemen we aan dat 99,9% van de meetpunten onder de maximale spanning vallen.



Figuur 8: Twee datasets, net op de grens van de norm (Cobben, 2006)

3.3 Normalisatie en kwalificatie

Om metingen van verschillende grootheden kwalitatief met elkaar te vergelijken moeten ze omgezet worden naar een situatie met dezelfde regels. De eerste stap is het normaliseren van de gemeten grootheid.

3.3.1 Normalisatie

Om de meetpunten voor elke grootheid op een soortgelijke manier te kunnen behandelen, wordt er voor elk meetpunt een genormaliseerde waarde berekend. Deze waarde wordt als volgt bepaald:

$$r_{v,q,p} = 1 - \frac{m_{v,q,p}}{l_q} \quad (1)$$

met:

- $m_{v,q,p}$ afwijking van de grootheid q op plaats v in fase p t.o.v. de nominale waarde;
- l_q maximale afwijking van de grootheid vastgelegd in de norm;
- $r_{v,q,p}$ genormaliseerde waarde van het *power quality* aspect.

Wanneer er geen afwijking is ($m=0$), zal de genormaliseerde waarde 1 zijn. Wanneer de afwijking even groot is als de maximaal toelaatbare afwijking, zal de genormaliseerde waarde 0 zijn. Wanneer de afwijking groter is dan de maximaal toelaatbare afwijking, wordt de genormaliseerde waarde negatief. (Cobben, 2006, p111)

3.3.2 Classificatie

De volgende stap bestaat erin het genormaliseerde bereik onder te verdelen in klassen. De onderverdeling in klassen helpt bij de interpretatie. Cobben stelt 6 klassen voor. Het aantal klassen is echter arbitrair. Door het interval van r te nemen van -1 tot $+1$, en dit onder te verdelen met stappen van $1/3$ bekomt men 6 klassen, en dus 7 klassegrenzen. De belangrijkste klassegrens is deze die is voorgeschreven door de norm. Dit is de compatibiliteitsgrens, waarvoor de genormaliseerde waarde 0 is.

De klassen worden weergegeven als een gebied op de 2D-grafiek. De klassegrenzen worden als volgt bepaald:

3.3.2.1 Bepalen Snijpunten van de klassegrenzen met de x-as

De klassegrenzen op de x-as zijn de waarden voor de spanning met een standaardafwijking van nul. Dit betekent dat in het meetinterval van 1 week alle punten dezelfde waarde hebben. De snijpunten met de x-as worden bepaald met behulp van de formule voor normalisering. De 10 in de noemer staat voor de +/-10% van U_{Nom} . Met de teller wordt de afwijking weergegeven als percentage van U_{Nom} . Dit geeft de maximale en minimale spanningsgrenzen voor klasse A.

Voorbeeld: klassegrens A-B: $r = 1/3$

$$r = \frac{1}{3} = 1 - \frac{\left| \frac{253 - U_{max,A-B}}{230} \right| * 100}{10} \rightarrow U_{max,A-B} = 237,66 V \quad (2)$$

$$r = \frac{1}{3} = 1 - \frac{\left| \frac{U_{min,A-B} - 207}{230} \right| * 100}{10} \rightarrow U_{min,A-B} = 222,33 V \quad (3)$$

Bij de onder grens (linker grens) mag maximaal 5% onder de minimale spanning vallen en bij de boven grens (rechtergrens) moet 99,9% van de meetpunten onder de maximale spanning vallen. Dit betekent dat voor een bepaald gemiddelde er een maximale standaardafwijking is waarvoor de voorwaarden voldaan zijn (uitgaande van een normaalverdeling). Met behulp van de tabel voor standaardnormaalverdeling vinden we een z-waarde van $-1,65$ voor de ondergrens en $3,1$ voor de bovengrens. Hieruit bepalen we nu de vergelijking van de rechte.

De stijgende rechte van de A-B klassegrens

$$P \left\{ Y \leq \frac{x - U_{gem}}{\sigma} \right\} = 5 \% \quad \rightarrow \quad z = \frac{(222,3 - U_{gem})}{\sigma} = -1,65 \quad (4)$$

$$\rightarrow \quad \sigma = \frac{-(222,3 - U_{gem})}{1,65} \quad (5)$$

De dalende rechte van de A-B klassegrens

$$P \left\{ Y \leq \frac{x - U_{gem}}{\sigma} \right\} = 99,9 \% \quad \rightarrow \quad z = \frac{(237,66 - U_{gem})}{\sigma} = 3,1 \quad (6)$$

$$\rightarrow \sigma = \frac{(237.6 - U_{gem})}{3,1} \quad (7)$$

Het snijpunt van die 2 rechten: (5) = (7)

$$\frac{-(222.3 - U_{gem})}{1,65} = \frac{(237.6 - U_{gem})}{3,1} \quad (8)$$

$$\rightarrow U_{gem,A-B} = 227 \text{ V}$$

Deze gemiddelde spanning geeft de x-waarde weer voor de maximale standaardafwijking.

3.3.2.2 Bepalen maximale standaardafwijking van een klasse

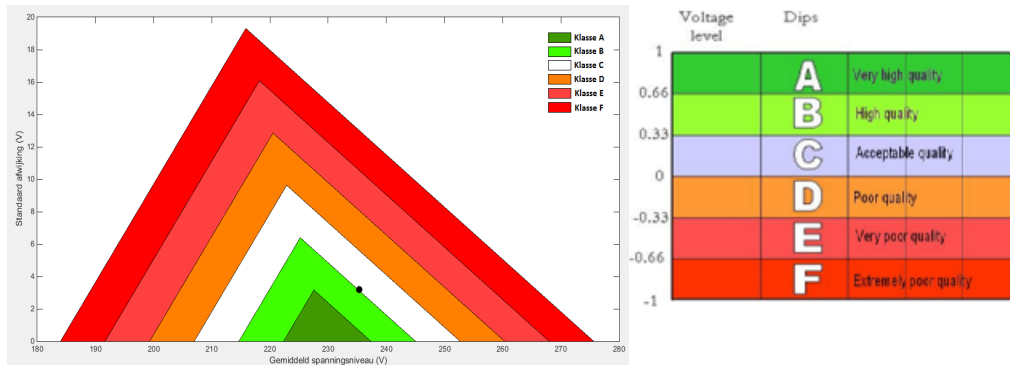
Vervolgens wordt de maximale standaardafwijking van de klasse bepaald. Dit is de grootste standaardafwijking die een normaalverdeling met een gemiddelde van 227 V (in het eerste geval) mag hebben om nog binnen die klasse te vallen. Deze standaardafwijking wordt berekend als volgt:

$$\sigma_{max,A-B} \frac{U_{max} - u_{gem}}{3,1} = \frac{237.6 - 227.58}{3,1} = 3.25 \quad (9)$$

Nu is voor de A-klasse het gebied bepaald, voor alle andere klassen is de berekening analoog.

3.3.3 Resultaten verwerking

Nu voor alle klassen de grenzen bepaald zijn, kan een dataset makkelijk gevisualiseerd worden. Voor elke dataset kan het gemiddelde en de standaardafwijking berekend worden. Deze worden dan uitgezet op de grafiek. Dit levert het volgende resultaat Figuur 9:



Figuur 9: A-F klassificatie m.b.v. STAV-methode (Cobben, 2006)

3.4 Koppeling visualisatie aan het model

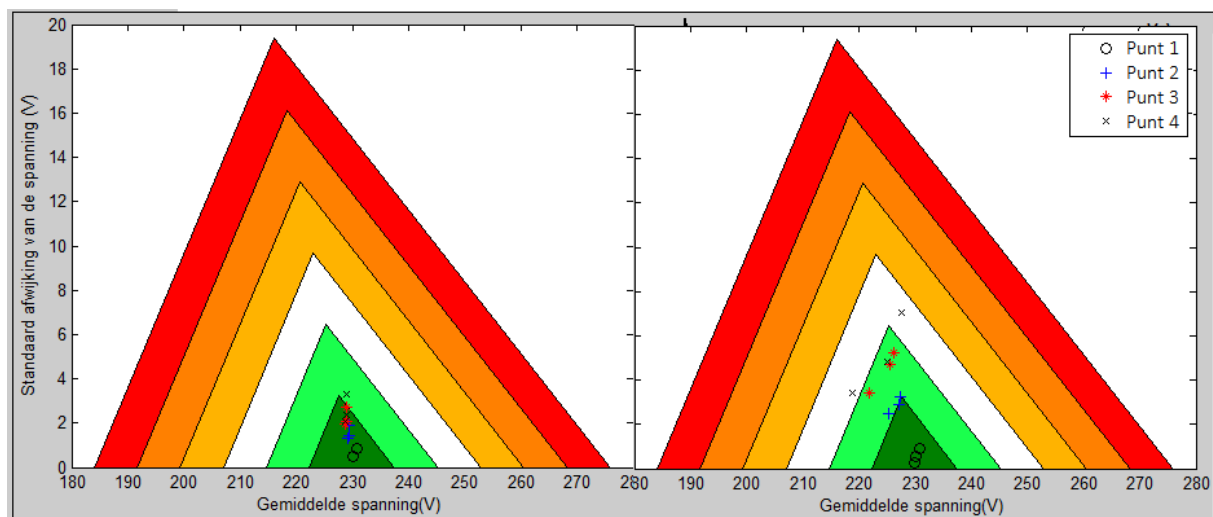
Deze visualisatiemethode is op een eenvoudige manier gekoppeld aan het model. Om op een bepaald punt de dataset te verzamelen, moet er op dat punt een speciaal meetblok geplaatst worden. Dit blok slaat alle gesimuleerde waarden op dat punt op in de *workspace*. Vervolgens kan het geautomatiseerde MatLab script gebruikt worden om, op basis van de gegevens in de *workspace* de tekeningen te genereren.

3.5 Interpretatie van de gevisualiseerde simulatieresultaten

De interpretatie van het resultaat van de gevisualiseerde resultaten is zeer simpel. Elk punt stelt een meetpunt in het net voor. De plaats van het punt op de grafiek beschrijft de toestand van de spanning in dat punt. Wanneer een punt binnen de witte driehoek ligt, is het spanningsverloop acceptabel, net binnen de norm. Hoe meer een punt naar het midden, de groene driehoek, ligt, hoe beter de kwaliteit van de spanning. Hoe verder het punt naar buiten, de rode driehoeken, ligt, hoe slechter de spanningskwaliteit. Op deze eenvoudige manier kan een leek toch informatie over *power quality* begrijpen.

Wanneer men de resultaten meer in detail bekijkt, kunnen de volgende conclusies ook uit de grafiek getrokken worden. De coördinaat van het gemeten punt op de x-as geeft de gemiddelde spanning in het punt weer. Wanneer dit punt te ver naar links of rechts ligt, is de gemiddelde spanning te hoog of te laag. Hoe dit ontstaat en opgelost kan worden wordt besproken in de volgende hoofdstukken. De coördinaat van het gemeten punt op de y-as geeft de spreiding van de spanning weer. Wanneer het punt hoog ligt, is er een grote fluctuatie in de spanning. Wanneer het punt laag ligt, liggen de waarden voor de spanning allemaal dicht bij elkaar.

Een derde eigenschap van spanningskwaliteit waar een kwantitatief beeld van gevormd kan worden m.b.v. de STAV-figuren is de asymmetrie. Van elk meetpunt op de feeder worden namelijk de drie fasen weergegeven als drie punten op de grafiek. Wanneer de drie punten van de drie fasen op elkaar liggen, is er weinig tot geen asymmetrie. Hoe verder de drie fasepunten op één meetpunt uit elkaar liggen, hoe groter de asymmetrie (Figuur 10). De beperking van de STAV-methode op dit gebied is dat er enkel een ruwe indicatie van asymmetrie kan gegeven worden. Een exacte bepaling van het percentage asymmetrie is niet mogelijk met deze methode.



Figuur 10 Asymmetrie op STAV

Bovenstaande figuur toont twee situaties in dezelfde wijk. Elk punt op de STAV-grafiek staat voor een meting op één fase op één meetpunt (fysieke locatie in de wijk). Bij de linkse situatie

zijn de fases gebalanceerd, de punten per meetpunt liggen nagenoeg op elkaar. Bij de rechtse situaties liggen de punten, van éézelfde meetpunt, verder uit elkaar. Dit betekent dat de asymmetrie in de linkse wijk veel kleiner is dan in de rechtse wijk.

4 Spanningsproblemen

4.1 Oorzaken van spanningsproblemen

Het simulatiemodel is opgesteld met als doel op een eenvoudige manier de invloeden van hernieuwbare energietechnologieën in het laagspanningsnet te onderzoeken in een klaslokaal. Hoewel de mogelijkheden van het model niet beperkt zijn tot het onderzoeken van spanningsproblemen alleen, hebben onderstaande voorbeelden deze focus. De voorbeelden behandelen telkens een spanningsprobleem veroorzaakt door één hernieuwbare energietechnologie.

Spanningsamplitudeproblemen komen voor in 2 vormen: overspanning en onderspanning. De maximaal toelaatbare overspanning en onderspanning staan beschreven in de norm EN50160, waarop de STAV-methode gebaseerd is. In deze thesis worden de problemen dus telkens bekeken m.b.v. de STAV-methode.

4.1.1 Over- en onderspanning

De oorzaak van over- en onderspanningsproblemen is gemakkelijk te begrijpen. In het laagspanningsnet wordt de spanning aan het begin van de feeder bepaald door de voedingstransformator. Op deze feeder zijn verschillende verbruikers aangekoppeld. Deze feeders of kabels hebben een weerstand (R_L) en een inductantie (X_L). Wanneer er stroom loopt door een impedantie zal er, volgens de wet van Ohm, een spanningsval zijn over deze impedantie, in de tegengestelde richting van de stroom volgens:

$$\Delta U = Z * I \quad (10)$$

$$\Delta U = \frac{P * R_L + Q * X_L}{U_2} \quad (11)$$

Waarbij:

$$0 < \frac{R_L}{X_L} < 10 \quad (12)$$

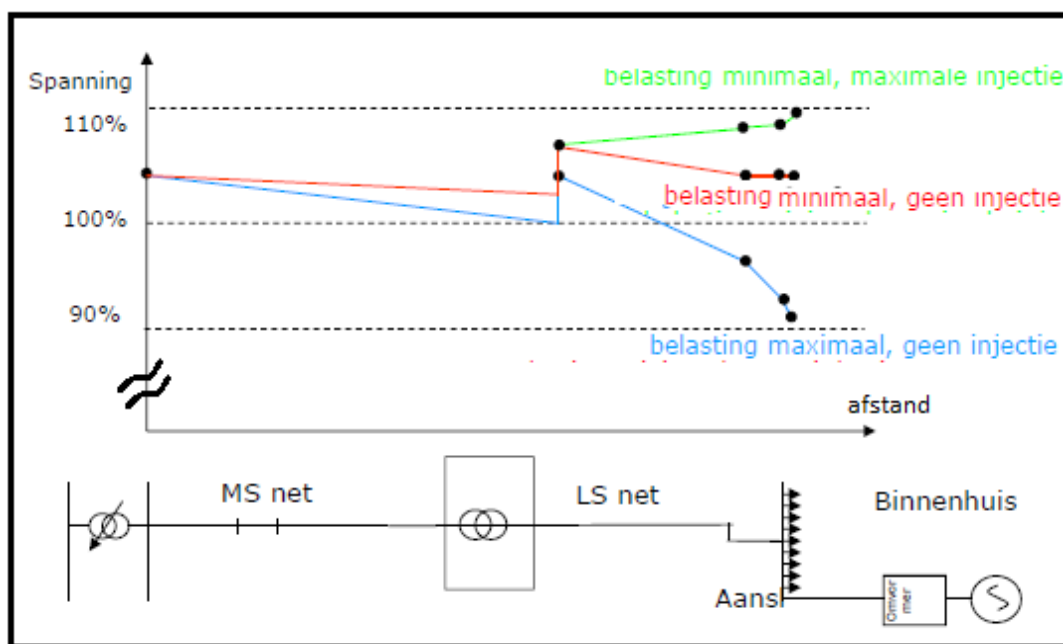
De verhouding R_L/X_L is in de woonwijk, met een kabel van $4 \times 150 \text{ mm}^2$ gelijk aan 3,4. In de midden- en hoogspanningsnetten is deze verhouding typisch kleiner, wat betekent dat daar de inductantie een grotere invloed heeft.

Wanneer de stroom vanaf de transformator in de feeder stroomt, zal de spanning meer en meer dalen hoe verder men van de transformator verwijderd is. Daarom werd vroeger de spanning aan de secundaire wikkeling van de transformator altijd iets hoger ingesteld dan de nominale spanning, zo had het einde van de lijn, waar de invloed van de kabelweerstand het grootste is, steeds een spanning die hoog genoeg was.

Wanneer echter de stroom niet meer vanuit de transformator de feeder in vloeit, maar vanuit de feeder naar de transformator, ontstaat er een ander probleem. Er treedt een spanningsval op

over de weerstand omwille van de stroom, maar in dit geval is de richting van de stroom omgekeerd en dus ook de richting van de spanningsval. Dit zorgt voor een spanningsstijging in plaats van een spanningsdaling t.o.v. de transformatorspanning. Dit wordt weergegeven in Figuur 11.

De grootte van de spanningsverandering is recht evenredig met de kabelweerstand. En treedt dus het sterkst op waar de totale kabelweerstand het grootste is. Dit is aan het einde van de feeder, het verste verwijderd van de transformator. In stedelijk gebied zijn de kabellengtes doorgaans beperkt, hierdoor zijn er ook minder problemen met de spanning. In lintbebouwing of landelijk gebied echter, zijn de kabellengtes veel groter. Hier ontstaan de meeste problemen met de spanning.



Figuur 11 Spanningsval over kabelweerstand in het net (neyens, 2012)

Bij de implementatie van hernieuwbare energietechnologieën bestaat zowel het risico voor over- als onderspanning. Wanneer er in een wijk veel PV-installaties aanwezig zijn, wordt er veel energie opgewekt rond de middag, wanneer de zon schijnt. Deze energie wordt doorgaans niet opgeslagen en moet dus onmiddellijk verbruikt worden. Het verbruiksprofiel van een woonhuis loopt echter niet gelijk met het productieprofiel van de PV-installaties (Figuur 12). Het verschil tussen productie en gebruik wordt gecompenseerd door het net. Dit zorgt voor een grote stroom vanuit de wijk naar de transformator. Deze stroom geeft aanleiding tot overspanningen op het eind van de feeder. Dit probleem wordt verergerd wanneer er verschillende PV-installaties dicht bij elkaar liggen, omdat de instraling voor al deze installaties ongeveer hetzelfde is en er dus tegelijkertijd vermogen wordt geproduceerd.

Onderspanningsproblemen door hernieuwbare energietechnologieën ontstaan door de doorgedreven elektrificatie. Door warmtepompen en elektrische voertuigen in grote hoeveelheid toe te voegen in de wijk, verandert het vraagprofiel voor elektrische energie. Om dit te verduidelijken volgt een eenvoudige indicatieve berekening:

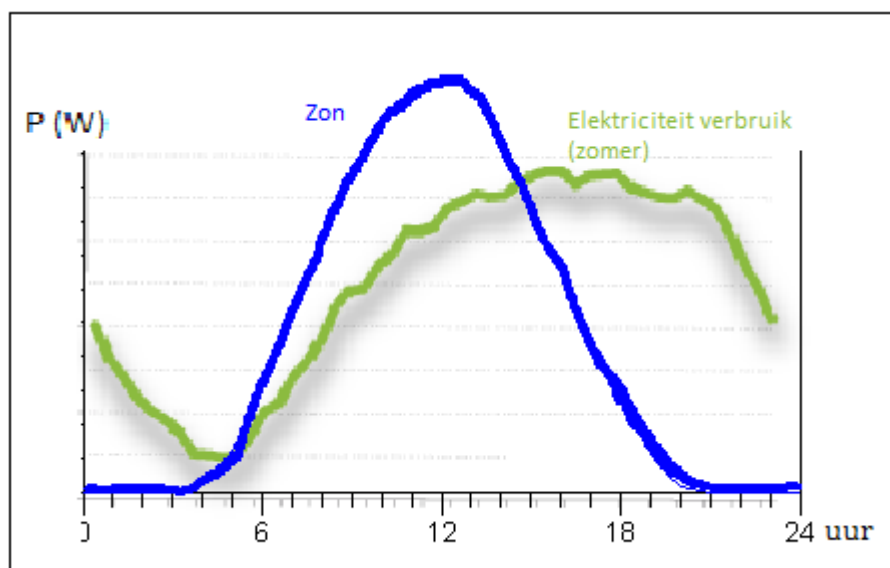
- Een modaal gezin heeft een elektrisch jaarverbruik van 3500 kWh
- EV dat 15.000 km rijdt op jaarbasis verbruikt ongeveer:

$$\frac{15.000\text{km}}{5 \text{ km/kWh}} = 3000 \text{ kWh}$$

- Een WP met een COP 3, en een modale woning met een warmtebehoefte van 24.000 kWh vereist 8000 kWh elektrische energie voor verwarming.

Opgesomd komt dit neer op 14500 kWh elektrisch verbruik op jaarbasis. In vergelijking met het huidige gemiddeld jaarverbruik is dit een factor 3 à 4 meer.

Vermits ook dit verbruik niet samenvalt met de productie van PV ('s avonds en 's nachts, niet 's middags) wordt er een grote stroom gevraagd uit het distributienet. Deze stroom zorgt voor een onderspanning aan het einde van de feeder.



Figuur 12 Verschil tussen productie PV en residentieel verbruik

4.1.2 Asymmetrie in het laagspanningsnet

Het elektrisch net in België is volledig driefasig opgebouwd, het hoog-, midden- en laagspanningsnet zijn allemaal driefasig. De meeste residentiële verbruikers echter, worden éénfasig aangesloten. Wanneer deze éénfasige lasten niet gelijkmatig verdeeld zijn over de drie fasen, ontstaat er onbalans of asymmetrie. De drie lijnstromen en lijnspanningen zijn niet meer gelijk en/of liggen niet meer 120° uit elkaar.

Volgens de norm (EN50160) mag de asymmetrie tussen de spanningen niet meer dan 2% bedragen. Om dit te garanderen, moeten de éénfasige lasten zo goed mogelijk verdeeld

worden over de fasen. De DNB probeert de lasten te verdelen door elk huis maar op één fase aan te sluiten en vervolgens de huizen zo gelijkmatig mogelijk te verdelen over de fasen. Deze verdeling gebeurt op basis van huisnummer. Het huisnummer van het huis wordt gedeeld door 3. De rest van deze deling is 0, 1 of 2. Dit geeft aan met welke fase (L1, L2 of L3) het huis geconnecteerd wordt.

Wanneer er een PV-installatie op een huis wordt geïnstalleerd, verandert de fase niet. Vermits er niet op elk huis een PV-installatie aanwezig is en niet elk geïnstalleerd vermogen hetzelfde is, ontstaat er een onbalans door productie. Voor zuivere belasting is de verdeling op huisnummer over de fasen voldoende. Wanneer er echter PV-installaties toegevoegd worden op sommige huizen, is de verdeling niet langer adequaat.

4.2 Oplossingen voor spanningsproblemen

Voor de hiervoor beschreven over- en onderspanningsproblemen zijn verschillende oplossingen mogelijk. De problemen worden veroorzaakt door stromen en kunnen dus opgelost worden door deze stromen aan te pakken. De stromen kunnen veranderd worden door het gebruik van aangepaste regelingen op PV-omvormers of warmtepompen of door het gebruik van batterijsystemen. Oplossingen voor de verschillende problemen met behulp van deze regelingen worden apart behandeld.

Verder kan een spanningsprobleem opgelost worden door de kabelweerstand te verminderen en dus dikkere kabels te steken. Dit is echter een dure oplossing vermits de bestaande infrastructuur hiervoor moet worden aangepast. De kosten voor het graven van de sleuven en het leggen van de kabels is meerdere keren duurder dan de kost van de kabel zelf. Deze kostprijs weegt meestal niet op tegen een oplossing waarbij de huiseigenaars de prijs betalen zoals andere regelsystemen op PV en WP.

Een derde optie voor het oplossen van spanningsproblemen is het veranderen van de instellingen van de transformator. Door aan het begin van de feeders de spanning te laten dalen of stijgen, kan het spanningsprobleem aan het einde van de feeders beperkt worden. Om dit in de woonwijken te implementeren moet een speciale transformator gebruikt worden die de wikkelverhouding kan aanpassen, zonder daarbij de stroom te onderbreken. Dit soort transformator is een OLTC (*On Load Tap Changer*). Het nadeel van deze oplossingsstrategie voor spanningsproblemen is dat door het aanpassen van de windingverhouding van de transformator alle feeders op de transfo beïnvloed worden. Dit is dus enkel een goede oplossing wanneer er gelijkaardige problemen zijn in alle feeders aan de OLTC. Een laatste nadeel aan de OLTC is de prijs, een OLTC van midden- naar laagspanning kost tussen de €20 000 en €30 000, een prijs die gemiddeld een factor 2 boven de prijs van een normale midden-laagspanningstransfo van gelijk vermogen ligt.

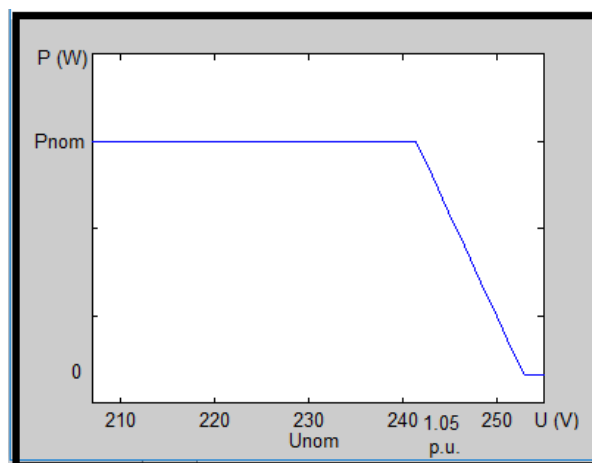
4.2.1 Overspanningsproblemen oplossen

Overspanningsproblemen worden voornamelijk veroorzaakt door PV-installaties. Deze problemen kunnen o.a. verminderd worden door het regelsysteem van de PV-omvormer aan te passen of door het toevoegen van een batterijsysteem.

4.2.1.1 Overspanningsprobleem oplossen met een regelsysteem op de PV-omvormer

Het klassieke regelsysteem op de PV-omvormer maakt gebruik van het MPPT-systeem (Maximum Power Point Tracker). Dit algoritme bepaalt steeds wat het maximale vermogen is dat beschikbaar is uit de panelen. Dit vermogen wordt vervolgens onder de vorm van stroominjectie op het net gezet. Dit algoritme is ideaal om zoveel mogelijk energie uit de instraling te halen, maar biedt geen oplossing voor netproblemen. Wanneer de spanning aan de klemmen van de omvormer te hoog of te laag wordt, valt de omvormer na bepaalde tijd gewoon uit. Na 10 minuten controleert de regelaar of de spanning terug binnen de grenzen valt en gaat, wanneer dit zo is, terug vermogen leveren. Deze regeling is in het model geïmplementeerd als de standaardregeling in de blok "PV".

Een tweede, sterk gerelateerde mogelijkheid is een regeling die door middel van het actieve vermogen te beperken de spanningsproblemen onder controle probeert te houden. Wanneer de spanning aan de klemmen van de omvormer begint te stijgen, laat de omvormer het maximale vermogen zakken. Dit is geen echte oplossing, eerder een methode om de schade te beperken. De energie die wordt opgewekt wordt beperkt. Dit heeft invloed op de terugverdiëntijd en het rendement van de installatie. Dit vormt vooral een probleem voor de installaties op het einde van de feeder omdat deze installaties fel beperkt worden in vermogen. Deze regeling is in het model geïmplementeerd als de P-U-droop in de blok "PV(U)" (Figuur 13).



Figuur 13: P-U droop controller

Een derde mogelijke regelstrategie is afgeleid uit het MetaPV-project. De effecten van verschillende regelsystemen op de PV-omvormer om spanningsproblemen op te lossen zijn namelijk reeds onderzocht in dit project. In het MetaPV-project lag de focus voornamelijk op de invloeden van regelingen voor reactieve energie injectie van de PV-omvormers getest. Door een deel van het geïnjecteerde vermogen van een PV-omvormer als reactieve stroom te

injecteren kan de spanningsval over de impedantie van de feeder verminderd worden. De invloed van reactief vermogen op de spanning is echter kleiner dan de invloed van het actieve vermogen. Dit komt omdat de inductantie van een laagspanningskabel veel kleiner is dan de weerstand zoals besproken in formule (11) en (12).

Een dergelijke sturing kan uitgevoerd worden op verschillende manieren, een goede methode volgens het MetaPV-project is de methode PF(P) die de powerfactor aanpast in functie van het vermogen (Tabel 2). Deze regeling geeft de mogelijkheid om tot 50% meer PV-vermogen in het net te injecteren zonder extra spanningsproblemen te genereren.

Tabel 2: Conclusions MetaPV-project

	Effectiveness	Efficiency	Fairness	Simplicity
Q(V) with small/no deadband	++	-	-	++
Q(V) with medium deadband	+	+	-	++
Q(V) with large deadband	-	++	-	++
Q(V) with location-based deadband	+	++	+	+
PF(P) without deadband	+	+	++	++
PF(P) with deadband	+	++	++	++
Coordinated control with uniform Q	++	+	+	-
Coordinated control with uniform PF	++	+	++	-
Coordinated control (hierarchical)	++	++	-	-
Constant Q / Constant PF	++	-	++	++

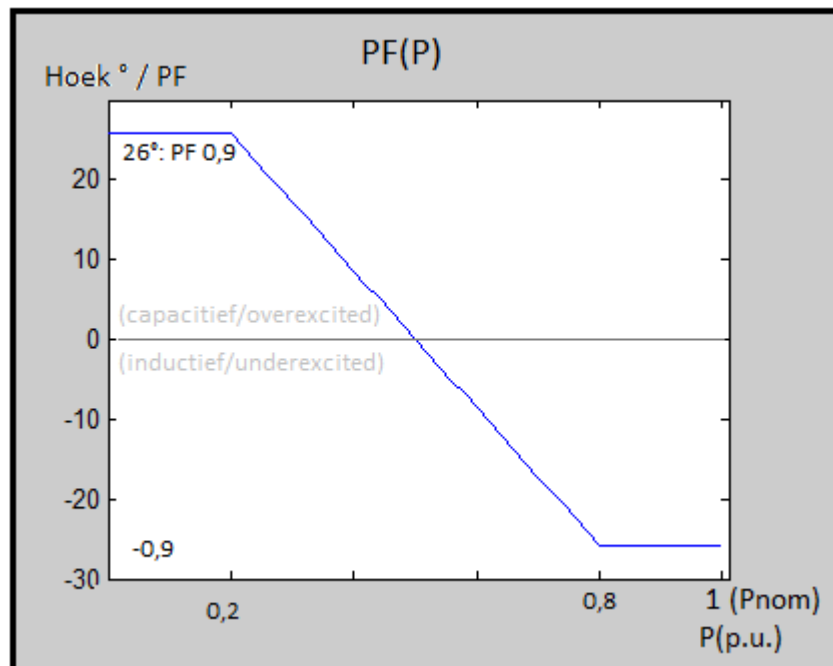


The results show that different local control functions offer a different trade-off between effectiveness, efficiency, fairness and simplicity (Table 2). The best solution depends on the particular network and the local voltage conditions. For a simple and efficient solution, PF(P) and Q(V) with an appropriate deadband are the first choices. For a fair solution, PF(P) or coordinated controls can be used.

Uit deze tabel blijkt dat de beste regeling, op alle gebieden samen, om spanningsproblemen te verminderen met de PV-omvormers de regeling is waarbij de *powerfactor* (PF) wordt veranderd in functie van het actief vermogen met een dode zone. Deze regeling heeft een

redelijk sterk effect in vergelijking met de andere opties. Verder scoort deze regeling heel goed op efficiëntie, eerlijkheid en simpelheid.

Om deze regeling te kunnen implementeren in het model zijn er twee aanpassingen gemaakt. De eerste aanpassing is dat de regeling in het model niet werkt met een PF in functie van het actief vermogen maar met een hoek (φ) in functie van het vermogen. Ten tweede is er voor het model gekozen voor de variant zonder dode. De grafiek van deze regeling is te vinden in Figuur 14 PF(P)-regeling



Figuur 14 PF(P)-regeling

Op deze figuur is te zien dat de hoek van de stroom ten opzichte van de spanning veranderd wordt in functie van het vermogen dat de omvormer uit MPPT bepaald. De maximale hoek is vastgelegd op $\pm 26^\circ$. Dit komt overeen met een $\cos(\varphi)$ (of PF) van 0,9. Vervolgens wordt vastgelegd dat deze maximale PF wordt bereikt op 20% (capacitieve maximum) en 80% (inductieve maximum) van het nominaal vermogen van de omvormer. Dit vertaalt zich in de knikpunten op 0,2 p.u. en 0,8 p.u. op de grafiek. Ten slotte is hier geen dode zone in de grafiek vanwege stabiliteit in de simulatie. De minimale en maximale hoek worden verbonden met een rechte. Deze regeling is in het model geïmplementeerd als de PF(P)-regeling in de blok "PV-PF(P)".

4.2.1.2 Overspanningsprobleem oplossen met een batterijsysteem

Een batterijsysteem bestaat uit een bi-directionele omvormer, een regelsysteem en een opslagmiddel in de vorm van batterijen. De bi-directionele omvormer kan de batterij opladen en ontladen, Het maximale vermogen dat het batterijsysteem kan gebruiken of injecteren wordt beperkt door de omvormer. Een batterij kan één- of driefasig aangesloten worden in een huis of driefasig aangesloten op het net. De werking van het systeem wordt bepaald door het regelsysteem en de plaatsing in het net.

De eerste optie als regelsysteem voor een batterijsysteem is de I-regelaar. Dit is een vermogen-droopcontroller op de spanning. Deze regelaar zal een stroom onttrekken of injecteren proportioneel met de afwijking van de setpoint. Er wordt een stroom getrokken wanneer de spanning lokaal te hoog is en geïnjecteerd als de spanning te laag is. De batterij laadt bv. op gedurende een zonnige dag wanneer de spanning te hoog is en ontlad 's nachts of wanneer de spanning te laag is. Deze regeling is in het model geïmplementeerd als de I-regeling in de blok "Bat(I)" en kan voorkomen op netbatterij en residentiële batterijen.

Verder kan een batterijsysteem, gecombineerd met een PV-installatie, uitgerust worden met een regelsysteem dat het netverbruik van het huis naar nul tracht te brengen. Wanneer het verbruik groter is dan de productie, zal de batterij energie leveren. Wanneer de productie groter is dan de vraag, zal de batterij energie opslaan. Wanneer dit systeem goed gedimensioneerd is, heeft het net geen invloed van de PV-installatie op het huis. Dit regelsysteem heeft als bijkomend effect dat het huis in grote mate onafhankelijk wordt van het net. Voor een particulier kan dit interessant worden wanneer de energiemarkt evolueert naar een systeem waarin zowel voor injectie als voor afname betaald moet worden. Deze regeling is in het model geïmplementeerd als de 0-regeling in de blok "Bat(0)".

Ook is het mogelijk om de PV-productiepiek gedeeltelijk af te vlakken. Door een batterijsysteem te combineren met de PV-installatie kan de productiepiek opgeslagen en later weer vrijgegeven worden. Hiervoor is een kleinere batterijcapaciteit vereist en dus is deze optie goedkoop. Volgens (Ehara, 2009) is een batterijsysteem met een capaciteit van 34% van de PV-opbrengst van 1 dag met grote instraling voldoende om de spanningsproblemen te voorkomen.

Ten slotte kan er op de bi-directionele omvormer van het batterijsysteem ook weer met gedeeltelijk reactieve energie gewerkt worden om de overspanning te verminderen. Ook kunnen er verschillende regelsystemen gecombineerd worden, al dan niet uitgebreid met predictiesoftware of input vanuit een SCADA.

4.2.2 Onderspanningsproblemen oplossen

Onderspanningen in het net worden veroorzaakt door de hoeveelheid aan verbruikers. Sommige verbruikers hebben de mogelijkheid het verbruiksprofiel aan te passen om onderspanningen te vermijden. Zo kan bijvoorbeeld een elektrisch voertuig opladen aan een verminderd vermogen of een warmtepomp verwarmen aan een verminderd vermogen. In deze gevallen moet altijd rekening gehouden worden met de comfortgrenzen. Zo moet de elektrische wagen opgeladen zijn in de ochtend en mag bij de warmtepomp de temperatuur van het buffervat niet onder 40°C of boven 60°C gaan. Een tweede optie om onderspanningsproblemen te verminderen is het gebruik van een batterijsysteem om vermogen te injecteren in het net wanneer de spanning te laag is.

4.2.2.1 Onderspanningsproblemen oplossen met regelsysteem op verbruiker of WP

Een klassieke regeling op een warmtepomp werkt volgens de niet-lineaire regeltechniek. De temperatuur van het buffervat wordt zo tussen de twee comfortgrenzen gehouden (40°C-60°C). Wanneer de temperatuur de onderste grens bereikt springt de warmtepomp aan met het volle vermogen tot de bovenste grens bereikt wordt. Zo wordt er een heel groot vermogen vereist wanneer de warmtepomp aan het verwarmen is. Dit groot vermogen draagt bij aan het onderspanningsprobleem. Deze regeling wordt in het model gebruikt als standaardregeling in de blok “WP”.

Door een regeling toe te passen op de warmtepomp zodat deze, wanneer de spanning aan de lage kant is, aan een proportioneel verminderd vermogen werkt, kan de impact van een warmtepomp op het net verminderd worden. Wanneer de onderste grens bereikt wordt, moet de warmtepomp met vol vermogen verwarmen om te vermijden dat de temperatuur onder de onderste comfortgrens komt. Maar eenmaal de temperatuur boven de onderste grens is, kan het vermogen waarmee de warmtepomp verwarmt proportioneel aan de spanningsafwijking geregeld worden. Zo zal de warmtepomp, wanneer deze aan het verwarmen is, met een kleiner vermogen verwarmen als de spanning te laag is en aan het volle vermogen verwarmen wanneer de spanning voldoende hoog is. Deze regeling is in het model geïmplementeerd als de spanningsgevoelige warmtepomp in de blok “WP(U)”.

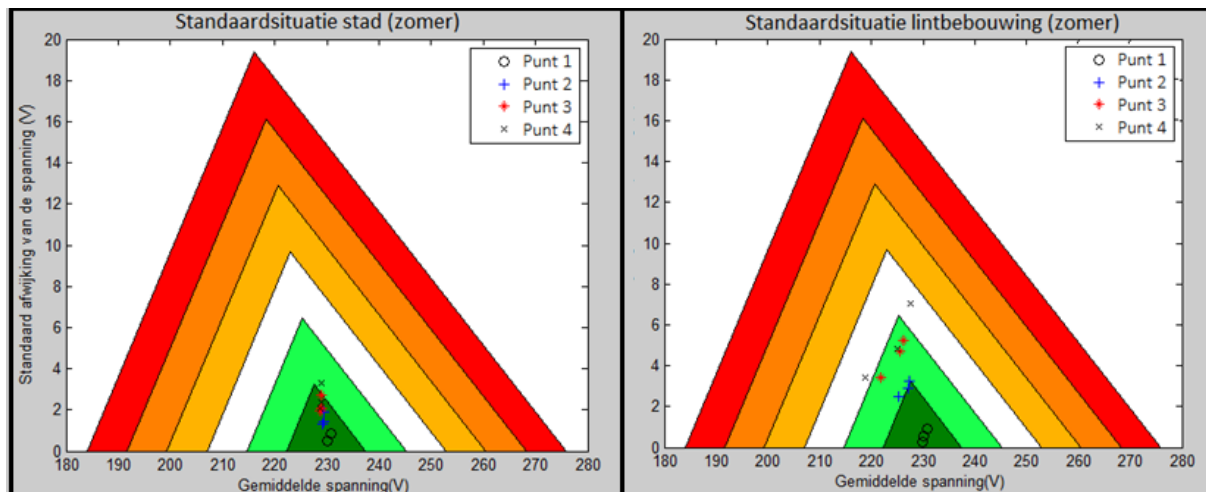
4.2.2.2 Onderspanningsproblemen oplossen met batterijsysteem

Ook een onderspanningsprobleem kan opgelost worden met een batterijsysteem. Deze batterij moet dan opladen doorheen de dag, wanneer er geen te lage spanning is en ontladen wanneer de spanning wel laag is. Zo wordt een deel van het verbruik en dus de spanningsval in het net gecompenseerd door het batterijsysteem. Voor deze werking bestaan weer een aantal varianten, analoog aan die beschreven in 4.2.1.2.

5 Cases

5.1 Selectie van cases

Om de voorgenoemde spanningsproblemen en mogelijke oplossingen te analyseren, zijn er een aantal voorbeeldsituaties met spanningsproblemen uitgewerkt. Er is uitgegaan van twee wijken: een stadswijk met veel huizen dicht bij elkaar en een wijk in lintbebouwing, met dezelfde hoeveelheid huizen en verbruik, maar dichter bij elkaar. Deze wijken bevatten weinig PV en geen warmtepompen en vormen dus de basissituatie. Er is in de basissituatie geen sprake van een spanningsprobleem, zoals te zien in Figuur 15.

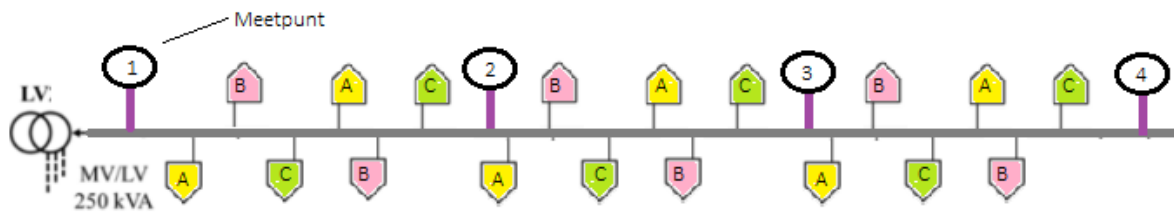


Figuur 15: STAV van standaardsituatie

Op de STAV-figuur van de lintbebouwing (rechts) is te zien dat aan het begin van de feeder de gemiddelde spanning op 230 V ligt en de fluctuaties hier klein zijn. Verder is te zien dat aan het einde van de feeder voor één van de drie fasen de gemiddelde spanning nog perfect 230 V is, terwijl de andere fasen in punt vier een lagere gemiddelde spanning hebben. De fluctuaties alsook de gemiddelde spanning aan het einde van de feeder verschillen meer dan aan het begin van de feeder. Desondanks zijn er in deze wijk geen problemen. Alle punten vallen in of onder het oppervlak van de witte driehoek, en voldoen aan de norm.

Op de STAV-figuur van de stedelijke wijk (links) is de gemiddelde spanning van alle punten bijna perfect 230 V. Dit is te verklaren door de veel kortere kabellengten waarover de spanningsval ontstaat. Verder is ook te zien dat de fluctuaties in spanning zeer beperkt zijn vermits alle punten binnen het oppervlak van de tweede groene driehoek vallen.

De STAV-figuren zijn opgesteld met de meetgegevens uit 4 verschillende meetpunten, zoals aangegeven in Figuur 16. Het eerste punt bevindt zich vlak achter de transfo. Het vierde punt bevindt zich op het einde van de feeder. Punt twee en drie zijn verdeeld zodat er drie even lange stukken zijn tussen de meetpunten. Er bevinden zich telkens zes huizen tussen twee meetpunten.



Figuur 16 Positie van de meetpunten op de feeder

Vervolgens zijn er acht cases gecreëerd vertrekkend van deze standaardsituaties. Deze acht cases zijn gevallen waarin spanningsproblemen ontstaan veroorzaakt door PV of WP:

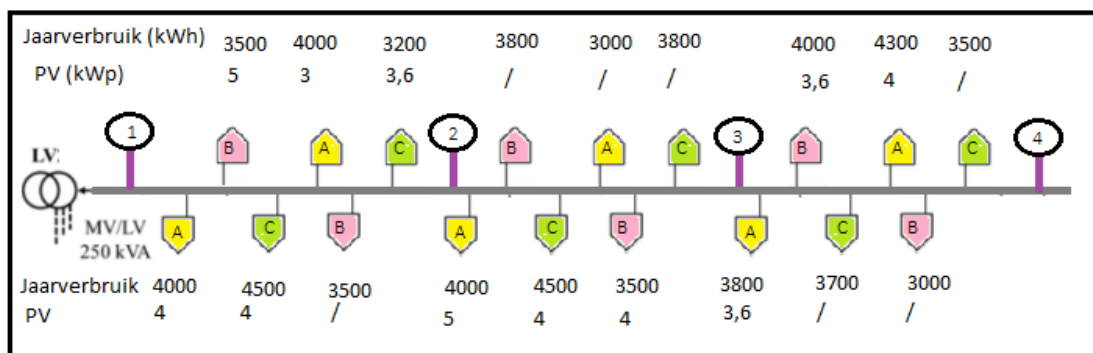
1. PV in stedelijk gebied;
2. PV in lintbebouwing;
3. WP in stedelijk gebied;
4. WP in lintbebouwing;
5. PV en WP in stedelijk gebied gedurende de winter;
6. PV en WP in stedelijk gebied gedurende de zomer;
7. PV en WP in stedelijk gebied gedurende de lente;
8. PV en WP in lintbebouwing gedurende de winter;
9. PV en WP in lintbebouwing gedurende de zomer;
10. PV en WP in lintbebouwing gedurende de lente.

Uit deze acht cases zijn twee situaties gekozen om oplossingsstrategieën op te testen. Deze keuze is gemaakt op basis van de grootte van het probleem en de waarschijnlijkheid van voorvallen in de nabije toekomst. De gekozen cases zijn: PV in lintbebouwing en WP in lintbebouwing.

5.1.1 CASE 1: Spanningsproblemen door PV in lintbebouwing

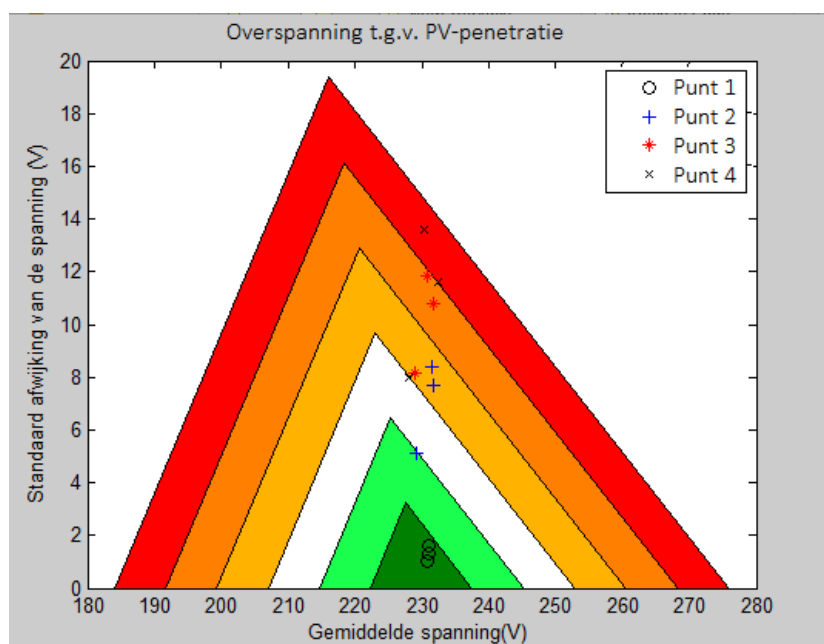
De eerste probleemsituatie is de wijk in lintbebouwing waar veel PV-installaties aan toegevoegd zijn. De keuze voor deze situatie boven de stedelijke wijk met veel PV is gemaakt op basis van de waarschijnlijkheid van voorvallen. De hoeveelheid PV die in de stad toegevoegd moet worden om een spanningsprobleem te veroorzaken is veel groter dan in lintbebouwing, vanwege de kortere kabels in stedelijk gebied. Verder is er in stedelijk gebied doorgaans minder geschikt dakoppervlak voor PV ter beschikking vanwege de hogere gebouwen, minder dakoppervlak per aantal gezinnen en schaduw van andere gebouwen. Uit deze gegevens volgt dat spanningsproblemen in lintbebouwing realistischer is dan in de stad.

Deze case is opgesteld door aan de standaardwijk in lintbebouwing PV-installaties toe te voegen. De plaatsing en vermogens van deze installaties is te zien op Figuur 17.



Figuur 17 Inplanting case 1

Om deze case realistisch in te delen zijn aan de standaard situatie van lintbebouwing op 75% van de huizen PV-installaties toegevoegd. Dit komt overeen met de situatie waarin iedereen die er voldoende inkomen voor heeft een PV-installatie installeert. Deze installaties zijn verspreid over de feeder met een iets hogere concentratie op het einde. De vermogens van de PV-installaties zijn gekozen op basis van het jaarverbruik. Huizen met een eerder beperkt jaarverbruik hebben een PV-vermogen van 3,5 kW. Dit vermogen gaat in de beschikbare stappen omhoog tot een groot verbruik met een omvormer van 5 kW. Voor deze probleemsituatie is een week in de zomer gekozen, wanneer de zon het felst schijnt, met de volgende STAV als resultaat (Figuur 18).



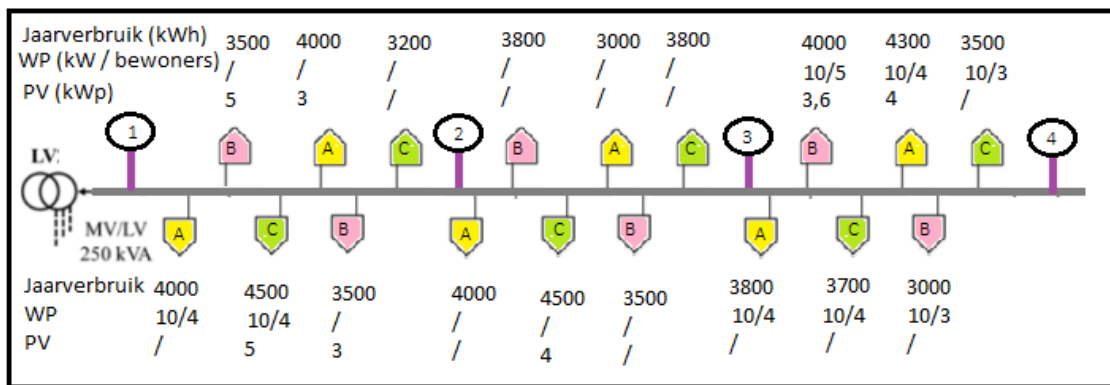
Figuur 18: STAV van PV-spanningsprobleem in lintbebouwing

Uit bovenstaande figuur is duidelijk dat er op het einde van de lijn, hoewel de gemiddelde spanning maar een paar volt te hoog is, een heel grote spanningsfluctuatie is. Er treden in deze wijk al spanningsproblemen op vanaf het tweede meetpunt. Deze wijk heeft een ernstig probleem door PV-installaties. De spanning in deze wijk ligt erg ver buiten de norm, verder dan in de nabije toekomst verwacht kan worden.

5.1.2 CASE 2: Spanningsproblemen door WP in lintbebouwing

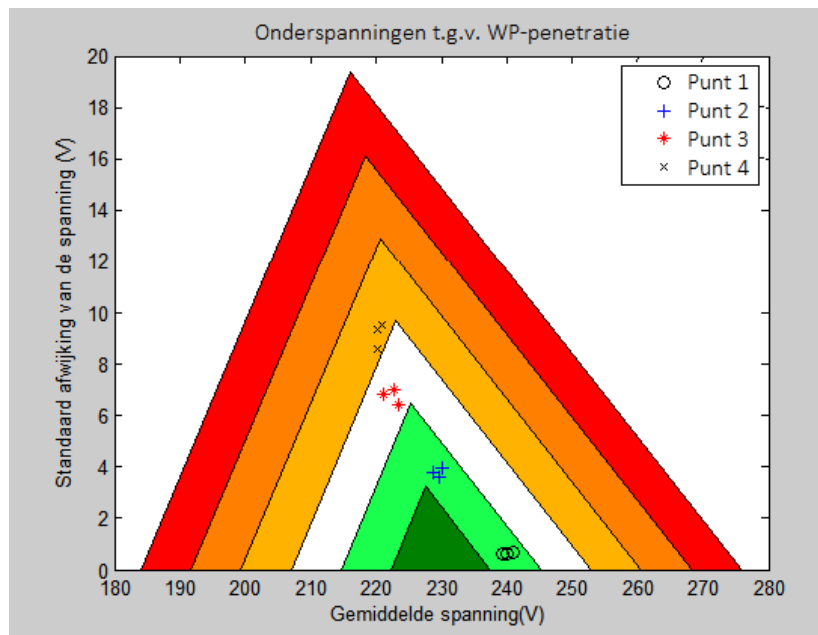
De tweede probleemsituatie is een probleem veroorzaakt door warmtepompen. Ook hier is gekozen voor de wijk in lintbebouwing omdat in stedelijk gebied, door de kortere kabels, onrealistisch veel warmtepompen geplaatst moeten worden alvorens een voldoende groot probleem ontstaat. Verder zijn in lintbebouwing, door de open aard van de bebouwing, de warmteverliezen door de buitenschil van de huizen groter waardoor de warmtepompen meer vermogen vragen.

Om deze probleemsituatie te maken, zijn aan de standaardsituatie in lintbebouwing in de helft van de huizen warmtepompen toegevoegd. Deze warmtepompen staan voornamelijk achteraan op de feeder met een paar helemaal vooraan zoals te zien op Figuur 19.



Figuur 19 Inplanting case 2

Elk van de warmtepompen heeft een vermogen van 10kW thermisch en een buffervat van 200 liter. Ze staat in voor ruimteverwarming en sanitair warm water. Variatie in warmte-afname wordt geïntroduceerd door te variëren met aantal bewoners en de isolatiewaarde van de woonhuizen. Om het grootste effect te hebben is gekozen voor een week in de winter. Meer specifiek een week in februari, omdat dit de koudste maand is en er geen feestdagen of vakanties in deze week vallen die een vertekend beeld van verbruik zouden kunnen geven. Het resultaat van deze probleemsituatie is te zien in Figuur 20.



Figuur 20: STAV van wijk met spanningsproblemen door WP

In bovenstaande figuur (Figuur 20) is ten eerste op te merken dat de spanning aan de transformator (punt 1) manueel verhoogd is, zoals dit in woonwijken gebeurt aan het begin van de winter, om de verhoogde spanningsval door extra verbruik te compenseren. Vervolgens is te zien dat de spanning aan het einde van de feeder niet meer binnen de norm valt. De punten van meetpunt 4 vallen niet langer binnen de witte driehoek. Dit komt door een te lage gemiddelde spanning en een te grote fluctuatie in deze spanning. Deze fluctuatie wordt veroorzaakt door het aan- en uitschakelen van de warmtepompen in functie van het warmteverbruik.

5.2 Oplossingen voor case 1

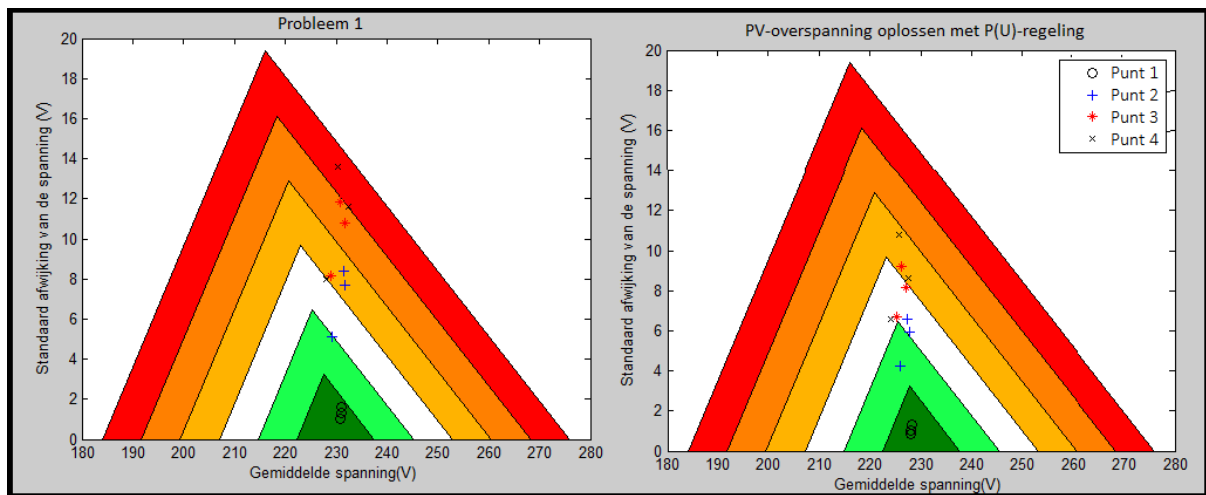
Case 1 handelt over een overspanningsprobleem veroorzaakt door PV-installaties. Dit probleem kan op verschillende manieren verminderd of opgelost worden. In deze thesis worden de volgende oplossingsstrategieën voor een overspanning veroorzaakt door PV telkens apart bekeken:

- veranderen van het regelsysteem op de PV-omvormer;
- toevoegen van spanningsgevoelige regeling op de warmtepomp WP-U;
- toevoegen van batterijsysteem.

Deze oplossingsstrategieën worden verder in detail besproken.

5.2.1 P-U regelsysteem op de PV-omvormer

De eerste mogelijke oplossing voor een overspanning is de klassieke regeling op de PV-omvormer vervangen door de P-U-regeling. Het effect van deze regeling, toegepast op alle PV-installaties in case 1, is te zien in Figuur 21.



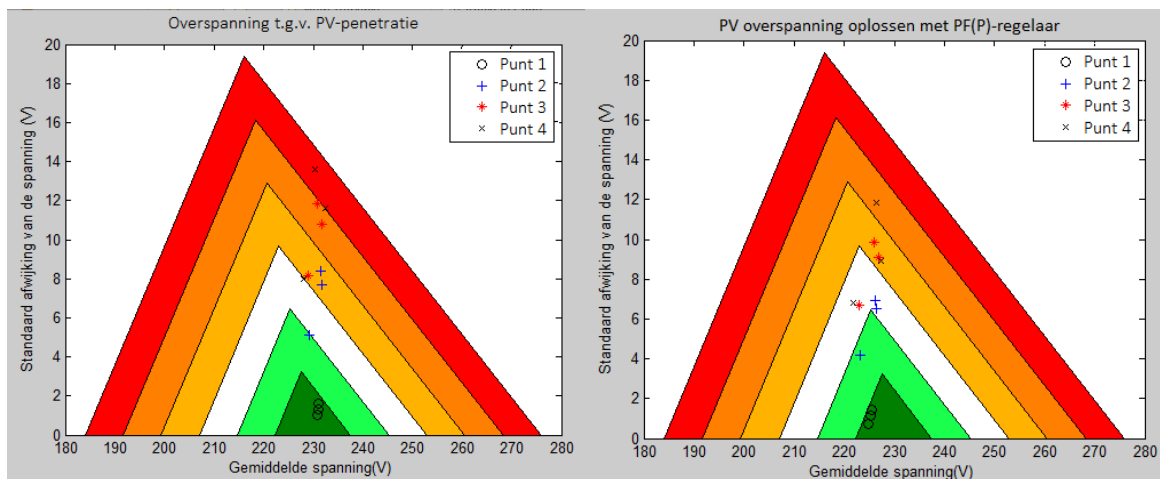
Figuur 21: Case 1 verbeterd met P(U)-regelaar

Hieruit blijkt dat deze regeling een vermindering aan fluctuaties kan realiseren. Door het overdreven grote spanningsprobleem in deze case is deze oplossing niet voldoende om de spanning binnen de norm te houden. In een wijk met een minder groot probleem, heeft deze regeling een beter resultaat.

Deze regeling blijkt in een wijk met een hoge concentratie PV-installaties aanleiding te geven tot oscillaties. Dit komt omdat de overspanning een cumulatief probleem is. De omvormers beïnvloeden elkaar door hun vermogen aan te passen. Dit kan verbeterd worden door een soort hysteresis toe te voegen aan deze regeling.

5.2.2 PF(P) regelsysteem PV-omvormer

De tweede mogelijke oplossing voor een overspanning veroorzaakt door de PV-injectie is de klassieke regeling vervangen door de PF(P)-regeling. Volgens het MetaPV-project geeft dit aanleiding tot een vermindering van het spanningsprobleem. Dit kan bevestigd worden met behulp van het simulatiemodel. Door op elke locatie in het net waar een PV-installatie staat de regeling van de omvormer te veranderen naar de PF(P)-regeling wordt het volgende resultaat verkregen (Figuur 22):

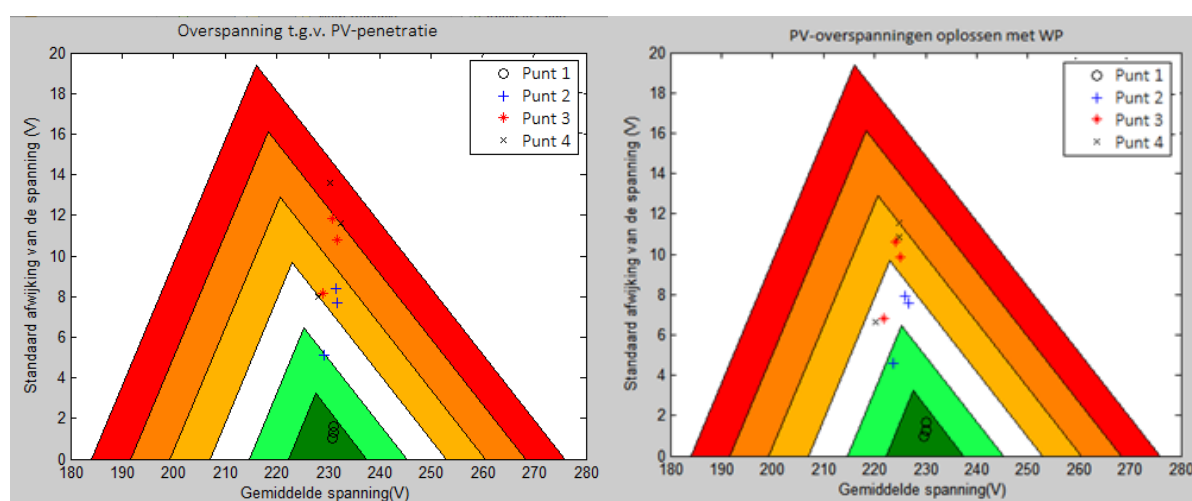


Figuur 22: Case 1 opgelost met PF(P)-regelaar op omvormer

Op deze figuur is te zien dat het spanningsprobleem verminderd wordt. Deze vermindering is in deze fictieve, zwaar overdreven situatie echter niet voldoende om de spanning terug binnen de norm te brengen.

5.2.3 WP-U toevoegen aan de huizen met PV-installatie

De volgende mogelijke oplossing voor het overspanningsprobleem is het toevoegen van spanningsgevoelige warmtepompen aan alle huizen met een PV-installatie. Deze strategie heeft een klein positief effect op de spanning (Figuur 23). Deze oplossingsstrategie voor overspanning is vooral interessant in nieuwbouw of wanneer er besloten wordt van verwarmingssysteem te veranderen. Op deze manier kost het de particulier niets extra om zijn WP te gebruiken om het spanningsprobleem te verkleinen.

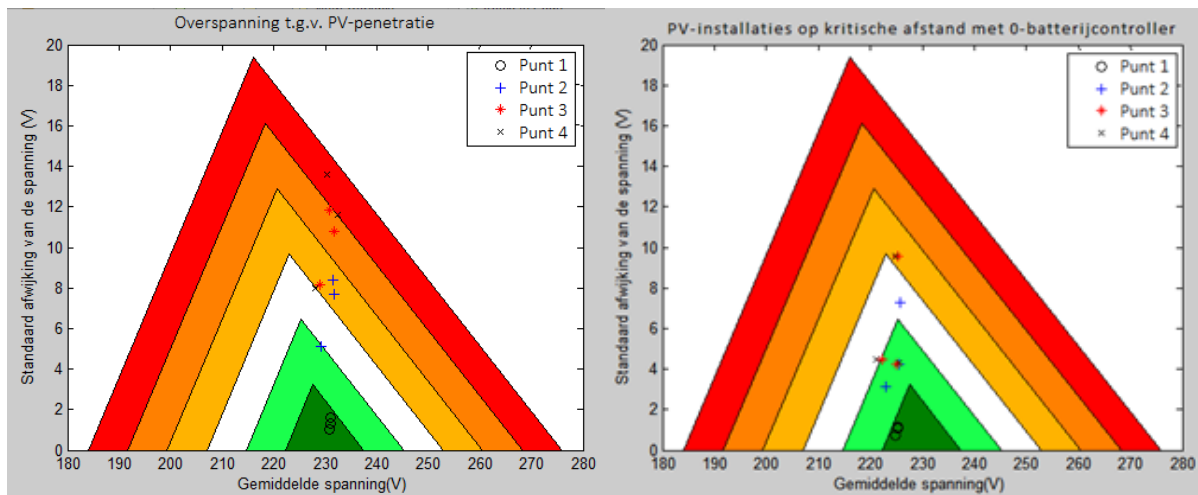


Figuur 23: Case 1 opgelost met WP(U)

Op bovenstaande figuur is te zien dat door het toevoegen van een spanningsgevoelige warmtepomp (WP(U)) met een thermisch vermogen van 10 kWp aan elk huis dat een PV-installatie heeft in case 1 het probleem beperkt wordt. Er is een afvlakking van de grote fluctuaties zichtbaar door de warmtepompen die een vermogen gaan trekken in een poging de spanning onder controle te houden. Hierbij moet in rekening gehouden worden dat de vraag naar warm water gedurende de zomer klein is, waardoor de warmtepompen minder aanspringen en dus minder kunnen regelen.

5.2.4 Residentiële 0-batterij toevoegen in de wijk

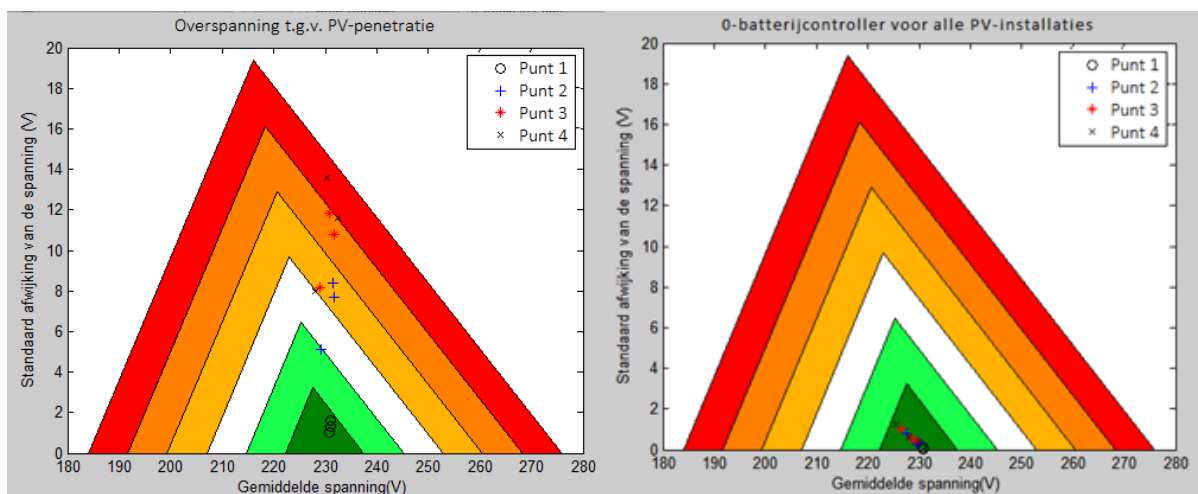
De vierde mogelijkheid om het overspanningsprobleem van case 1 op te lossen, is het toevoegen van residentiële batterijsystemen in de wijk. Uit de simulaties blijkt dat het effect van bij alle huizen met een PV-installatie vanaf 500 meter van de transfo (Capelle, et al., 2011) een 0-batterij toe te voegen al zeer groot is. Deze verbetering is zichtbaar in Figuur 24.



Figuur 24: Case 1 verbeterd met 0-batterij

In deze figuur is te zien dat de spanningsproblemen, hoewel niet volledig opgelost, drastisch verminderen wanneer er een residentiële batterij van 14 kWh (vergelijkbaar met de Tesla Powerwall) met een 0-regeling wordt toegevoegd aan de huizen met een PV-installatie die verder dan 500 meter verwijderd zijn van de transfo.

Een volledige oplossing van deze zwaar overdreven case wordt bekomen door in ieder huis met een PV-installatie een 0-batterij toe te voegen. De spanningsproblemen verdwijnen volledig (Figuur 25), sterker nog, de spanning in de wijk wordt nog beter dan de beginsituatie met weinig PV. Dit komt omdat alle PV-eigenaren bijna onafhankelijk worden van het net. En ze dus weinig tot geen invloed uitoefenen op het net.



Figuur 25: Case 1 opgelost met 0-batterij

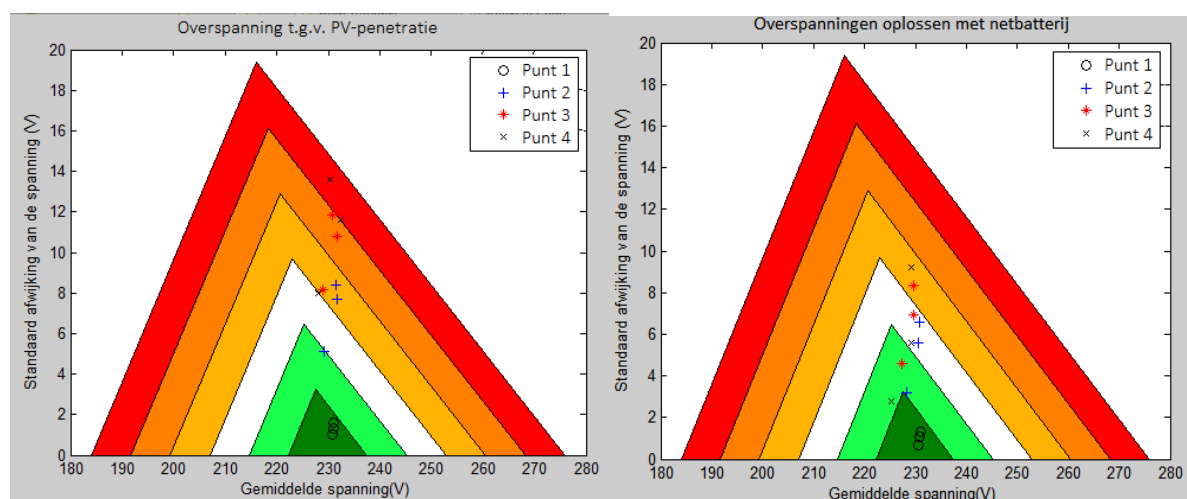
Op deze figuur is te zien dat de overspanningsproblemen in case 1 volledig verdwijnen wanneer iedere PV-eigenaar een 0-batterij van 34% van de maximale PV-dagopbrengst plaatst. Verder is op te merken dat de huizen van PV-eigenaars in de zomer praktisch zelfvoorzienend zijn. Hierin zit, zodra batterijsystemen voldoende zakken in prijs, een goede *business case* voor particulieren die tevens het spanningsprobleem oplost.

Op dit moment echter, is een dergelijk batterijsysteem te duur voor de particulier. Een *Tesla Powerwall* met een capaciteit van 14 kWh kost ongeveer €7000. Vermits de implementatie

van dit systeem voorlopig nog geen verdienmodel voor de PV-eigenaar met zich meebrengt, is dit geen oplossing die in de nabije toekomst aantrekkelijk wordt, ondanks het grote effect.

5.2.5 Netbatterij toevoegen aan de wijk

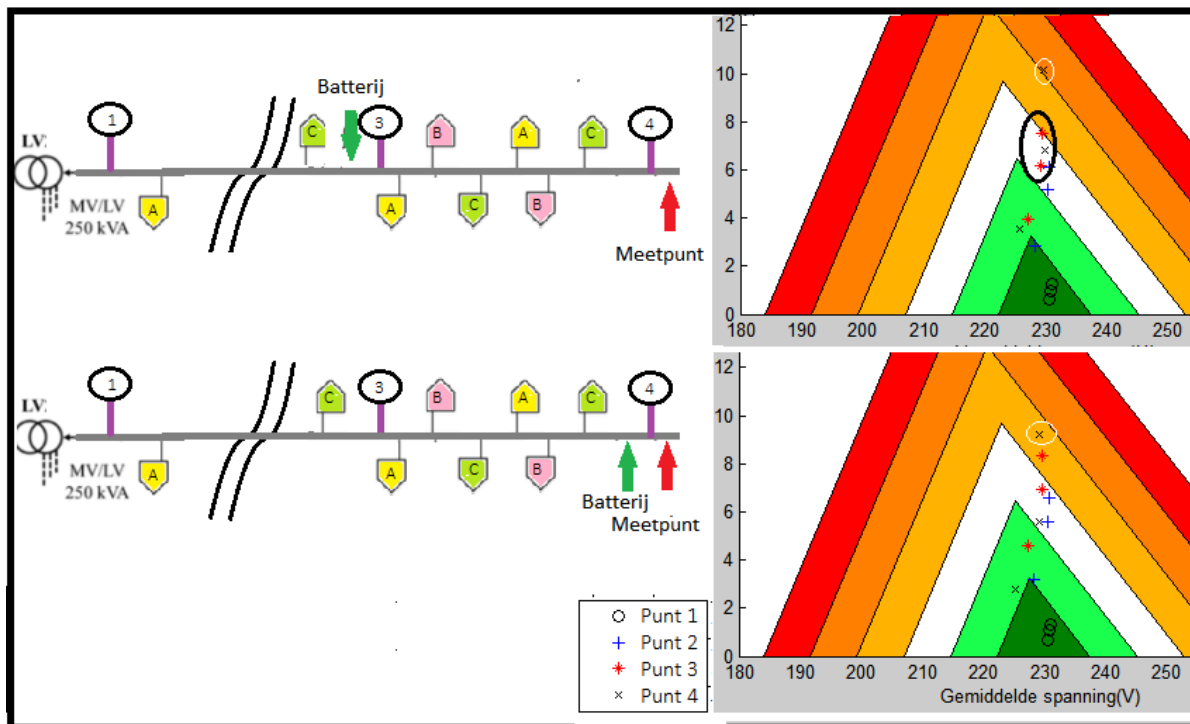
De laatste geteste oplossingsstrategie is het toevoegen van een netbatterij met een droopcontroller op de spanning in de wijk. Om een netbatterij te plaatsen moeten positie van de batterij, capaciteit, vermogen, setpoint van de regelaar, positie van de meetklemmen, ... zorgvuldig overwogen worden. Uit de simulaties met een batterijsysteem van 60kWh blijkt dat een netbatterij slechts effect heeft in de onmiddellijke omgeving. Verder is gebleken dat omwille van stabiliteit het meetpunt voor de regelaar best niet op de klemmen van de batterij zit maar iets verder, op de feeder. Dit kan in de toekomst gedaan worden door de meetwaarden van de slimme meter in de huizen te gebruiken voor het aansturen van de batterijsystemen.



Figuur 26: Case 1 verbeterd met netbatterij

Op bovenstaande figuur is te zien dat de netbatterij aanleiding geeft tot een verbetering van de spanningskwaliteit. Bijkomend is een netbatterij is dan de verantwoordelijkheid van de distributienetbeheerder (of onder-gecontracteerde), die de verantwoordelijkheid draagt voor de spanningskwaliteit tot aan de aansluitingen.

Zoals reeds vermeld is de plaatsing van de batterij en het meetpunt een belangrijke parameter voor optimale werking. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 27.



Figuur 27: Invloed plaatsing batterijsysteem

Op deze figuur is te zien dat wanneer een batterijsysteem meer upstream op de feeder geplaatst wordt (boven op de figuur), de spanning lokaal verbetert. Dit punt (3) was om te beginnen al niet het meest kritische punt. Wanneer het batterijsysteem echter achteraan op de feeder geplaatst wordt (onder op de figuur), wordt de spanning voor het meest kritische punt het meest verbeterd.

Vermits de invloed van een batterijsysteem beperkt is tot de onmiddellijke omgeving, moet het batterijsysteem zo dicht mogelijk bij de oorzaak en het meest kritische punt van het spanningsprobleem geplaatst worden. Dit is zeer afhankelijk van de situatie, daarom worden batterijsystemen door de distributienetbeheerder vaak mobiel opgesteld zodat er op een veranderde situatie gereageerd kan worden, bijvoorbeeld door middel van een verplaatsbare container.

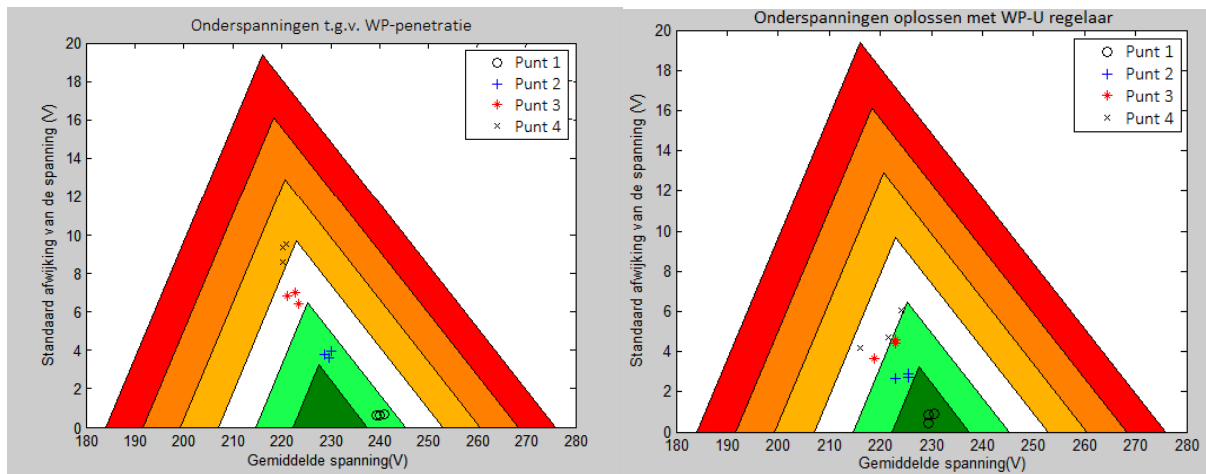
5.3 Oplossingen voor case 2

Case 2 handelt over een onderspanningsprobleem veroorzaakt door WP's. Dit probleem kan op verschillende manieren verminderd of opgelost worden. In deze thesis worden de volgende oplossingsstrategieën voor een overspanning veroorzaakt door WP's telkens apart bekeken:

- toevoegen van spanningsgevoelige WP-U;
- toevoegen van batterijsysteem.

5.3.1 WP-U regelsysteem toevoegen aan bestaande WP's

De eerste geteste oplossingsstrategie voor case 1 is het vervangen van het klassieke regelsysteem van de warmtepomp door de spanningsgevoelige variant. Op elke plaats in case 2 waar een warmtepomp staat, wordt het regelsysteem vervangen door de WP(U)-variant. Dit geeft het volgende resultaat (Figuur 28):



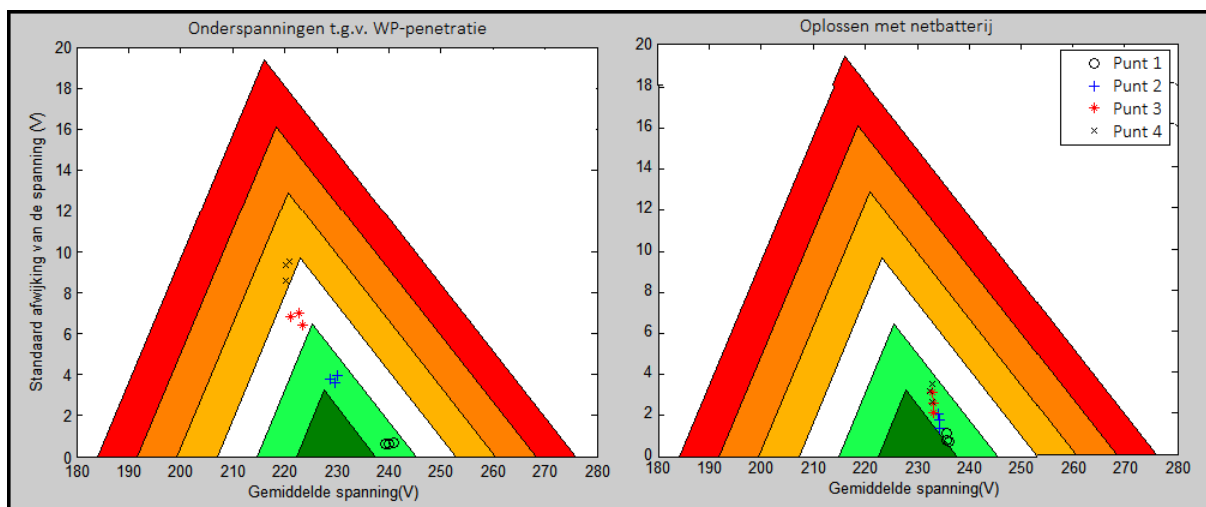
Figuur 28: Case 2 oplossen met WP(U)

Op bovenstaande figuur is te zien dat de spanningsgevoelige regeling het onderspanningsprobleem volledig kan oplossen vermits alle punten binnen het oppervlak van de witte driehoek vallen.

Door bij een verhoogde spanning continue aan verlaagd vermogen te verwarmen, valt de temperatuur minder vaak tot de onderste comfortgrens. Hierdoor zijn er minder intervallen waarbij verwarmd wordt aan het nominaal vermogen. Verder dient hier opgemerkt te worden dat bij deze oplossingsstrategie de spanning van de transfo niet sterk verhoogd dient te worden.

5.3.2 Batterijsystemen als oplossing voor case 2

De toepassing van een batterijsysteem om onderspanningen door WP's te verhelpen werkt. Door een netbatterij te plaatsen bij de grootste concentratie aan warmtepompen aan het einde van de lijn, kan de spanning ook terug binnen de grenzen gebracht worden. Dit is te zien op Figuur 29.



Figuur 29: Case 2 oplossen met netbatterij

Op deze figuur is te zien dat de spanningsproblemen veroorzaakt door de warmtepompen kan opgelost worden door de toepassing van een netbatterij. Alle punten vallen terug binnen de

norm. Deze oplossing is echter veel te prijzig, zeker wanneer het probleem net zo goed opgelost kan worden door het regelsysteem van de WP's aan te passen.

6 Toepassing van het model en mogelijke uitbreidingen

Dit simulatiemodel is operationeel maar heeft de mogelijkheid op verschillende vlakken uitgebreid te worden, afhankelijk van de toepassing. Dit hoofdstuk beschrijft een aantal toepassingen van het model alsook hoe het model gebruikt moet worden. Ten slotte worden ook mogelijke uitbreidingen aangegeven.

6.1 Gebruik van het model

Dit model is ontwikkeld voor toepassing in het klaslokaal. Het primaire doel van het model is het verwerven van inzicht over de implementatie van nieuwe energietechnologieën en de effecten hiervan. Ook een distributienetbeheerder kan eventueel gebruik maken van dit model om situaties waar zich een probleem voordoet na te bouwen en mogelijke oplossingen uit te proberen.

In een didactische context kan dit model gebruikt worden om op een visuele manier de problematiek rond integratie van hernieuwbare energietechnologieën in de wijk te doceren. Spanningsproblemen, te grote stromen, effecten van asymmetrie, ... kunnen op een eenvoudige manier getoond worden. Ook mogelijke oplossingen voor voorgenoemde problemen kunnen op een eenvoudige manier onderzocht worden op hun effect. Verder kan er in een labocontext door de student zelf geëxperimenteerd worden met mogelijke oplossingen voor een gegeven probleem. Op die manier kan een student inzicht en buikgevoel krijgen in de materie. Ten slotte kan het model ook gebruikt worden om labo- of onderzoeksresultaten te valideren.

6.2 Uitbreidingen

Zoals elk model, is dit model niet af. Er zijn nog verschillende uitbreidingen mogelijk. De meest voor de hand liggende uitbreidingen zijn te verdelen in twee categorieën: nieuwe componenten en nieuwe regelsystemen voor bestaande componenten.

Hoewel de basis netelementen reeds aanwezig zijn in de bibliotheek, is de verzameling allesbehalve compleet. Er is nog een groot aantal componenten waarvoor nog geen werkend model ter beschikking is. Ten eerste is er de OLTC (*On Load Tap Changer*). Dit is een transformator die in belaste toestand de wikkilverhouding kan aanpassen. Deze wordt gebruikt om aan spanningsregeling te doen aan het begin van de feeders.

Vervolgens is een model voor een elektrisch voertuig interessant. Dit kan dan gebruikt worden om de principes van *vehicle to grid* te verduidelijken. Een model voor een elektrisch voertuig kan ontworpen worden op basis van een batterij.

Een derde component die in uitbreiding mogelijk is, is een windmolen. Zowel een grote windmolen als een kleine, voor thuisgebruik worden toegepast in de netten dus kunnen nuttig zijn in de simulatie.

Verder is kan het interessant zijn om *standalone* blokken te maken zoals dieselgroepen of omvormers die het net kunnen vormen. Op die manier kan het simulatiemodel opengetrokken worden naar *microgrid*-toepassingen. Maar ook de richting *smartgrid* en *demand-respons* zijn ideeën om verder uit te werken in de componenten.

Op het gebied van regelsystemen zijn er nog erg veel uitbreidingen mogelijk. Voor batterijsystemen bestaan er verschillende regelsystemen, voor PV-installaties zijn verschillende opties, zelfs voor warmtepompen zijn er een aantal mogelijkheden. Een mogelijk vervolg op deze masterthesis is het onderzoeken wat de beste regeling is voor een batterijsysteem afhankelijk van het probleem.

Ten slotte kan het model nog verbeterd worden door een aanpassing van de lasten. Op dit moment zijn de lasten in het model opgesteld als een spanningsvolger die, onafhankelijk van de spanning, een bepaald vermogen gebruiken door de overeenkomstige stroom te trekken. Wanneer de spanning dus stijgt, daalt de stroom van deze verbruikers. In een huishouden zijn de meeste lasten echter van de aard dat ze bij een spanningsstijging meer stroom gaan trekken. Dit komt overeen met een last met constante impedantie in plaats van constant vermogen. De verbetering zit in het maken van lastblokken die gebruik maken van een impedantie op basis van een vaste waarde of SLP in plaats van een stroombron.

7 Besluit

De vooropgestelde doelstelling van deze masterproef, meer bepaald het opstellen van een simulatiemodel dat de invloeden van hernieuwbare energietechnologieën in het laagspanningsnet kan simuleren, is bereikt. Er is een operationeel simulatiemodel opgesteld dat toelaat de veranderingen veroorzaakt door PV-installaties en warmtepompen te onderzoeken en oplossingen voor mogelijke problemen te testen. Dit model is geschikt voor didactische doeleinden, alsook voor gebruik door de distributienetbeheerder na eventuele uitbreidingen.

De eerste conclusie uit de geteste cases is dat als oplossing voor een overspanningsprobleem, veroorzaakt door PV's, de toepassing van een 0-batterij bij alle PV-installaties het beste werkt. Deze oplossing is voorlopig wel nog te duur. Een goede optie is het installeren van een regelsysteem met reactieve energie op de PV-omvormers in de wijk in combinatie met batterijen.

De tweede conclusie is dat de beste oplossing voor een onderspanningsprobleem veroorzaakt door de WP's is het regelsysteem van de WP spanningsgevoelig te maken. Dit brengt voor de eigenaar van de WP geen vermindering in comfort met zich mee EN verhelpt het spanningsprobleem.

Referentielijst

- Adriaensen, T. (2015). *Visualiseren van Power Quality fenomenen*. Geel: KULeuven.
- Capelle, J., Vanalme, J., Vispoel, S., Van Maerhem, T., Verhelst, B., Debruyne, C., & Desmet, J. (2011). *Introducing small storage capacity at residential PV installations to prevent overvoltages*. Kortrijk: KaHo Sint-lieven university College.
- CENELEC. (2009). *EN50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*. Brussel.
- Cobben, S. (2006). Power Quality Monitoring and Classification. *Technische hogeschool Eindhoven*.
- Ehara, T. (2009). *Overcoming PV grid issues in the urban areas*. Japan: Mizuho information & Research.
- Elia. (2016, november). *Solar power generation*. Opgehaald van Elia:
<http://www.elia.be/nl/grid-data/productie/Solar-power-generation-data/Graph>
- Leemput, N., Geth, F., Van Roy, J., Driesen, J., Olivella-Rosell, P., & Sumper, A. (2015). LV-grid topologies. *MV and LV Residential Grid Impact of Combined Slow and Fast Charging of Electric Vehicles*.
- Marra, F., Y Tarek, F., Thorsten, B., & Bostjan, B. (2012). *Energy Storage Options for Voltage Support in Low-voltage grids with high penetration of photovoltaic*. Berlin.
- neyens, J. (2012). Spanningsverloop in LS net met PV. *Presentatie: congestie in distributienetten*. Infrac.
- Synergrid. (2016, november). *Synthetic Load Profiles (SLP)*. Opgehaald van Synergrid:
http://www.synergrid.be/index.cfm?PageID=16896&language_code=NED
- (sd). TT-aardingsstelsel. *Vademecum van de elektriciteit in een woning*. Eandis.
- Waterinfo. (2016). *historische gegevens*. Opgehaald van waterinfo.be:
<http://www.waterinfo.be/default.aspx?path=NL/Rapporten/Downloaden&KL=nl>
- Woyte, A., Dierckxsens, C., Bletterie, B., Zegers, A., Dexters, A., Van Roey, K., . . . Kolenc, M. (2015). MetaPV.

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Nieuwe energietechnologieën op gepaste manier integreren in het laagspanningsnet

Richting: **master in de industriële wetenschappen: energie-elektrotechniek**

Jaar: **2017**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Akamba, Noheli

Smits, Jelle

Datum: **6/06/2017**