

Elektrotechnische optimalisatie van een grondgebonden PV-installatie

Een onderzoek naar de technische optimalisatie en ontwikkeling van zonneparken in de provincie Noord-Holland

Versie 1.0
27-Mei-2020



Auteur:	Roy Kamper
Studentnummer:	16099524
Hogeschool:	De Haagse Hogeschool
Opleiding:	Elektrotechniek
Afstudeerbegeleiders:	G. Hoogendorp J.B. Woudstra
Afstudeerbedrijf:	ENGIE Services West B.V.
Bedrijfsbegeleider:	B. Bolman
Datum:	27 mei 2020

VOORWOORD

Voor U ligt mijn afstudeerscriptie '*Elektrotechnische optimalisatie van een grondgebonden PV-installatie*'. Deze afstudeerscriptie is geschreven naar aanleiding van het afstudeerproject van de opleiding elektrotechniek aan de Haagse Hogeschool te Delft. Het afstudeerproject is uitgevoerd bij ENGIE Services West B.V. te Zaandam.

Samen met mijn bedrijfsbegeleider, Benjamin Bolman, heb ik de onderzoeksvragen voor dit rapport bedacht. Het ontwerp dat ik heb uitgevoerd was complex en met kwantitatief en kwalitatief onderzoek heb ik de onderzoeksvraag kunnen beantwoorden. Tijdens het maken van het ontwerp stond Benjamin Bolman voor me klaar om vragen te beantwoorden waardoor ik verder kon met mijn ontwerp.

Hierbij wil ik dan ook Benjamin bedanken voor de fijne begeleiding en zijn ondersteuning tijdens dit traject. Ook wil ik mijn collega's bij ENGIE Service West B.V. bedanken voor de fijne en prettige samenwerking. Door met elkaar te sparren kon de beste oplossing gevonden worden voor dit onderzoek.

Roy Kamper

Bovenkarspel, 27 mei 2020

SAMENVATTING

Het klimaat op aarde verandert voortdurend. Door de wetenschap is vastgesteld dat de klimaatveranderingen sinds het pre-industriële (rond 1850) tijdperk met overgrote deel door de mens is veroorzaakt. Om de klimaatveranderingen van de aarde te verminderen is onder andere het zogenaamde klimaatakkoord opgesteld. Hierin staan doelstelling genoemd om de CO₂-uitstoot te verminderen; voor Nederland is het doel om in 2050 een zo duurzaam en CO₂ neutraal elektriciteitssysteem te realiseren. Om dit te bereiken zal het aandeel hernieuwbare energiebronnen, zoals wind en zon, in 2030 moeten toenemen tot ruim 70 procent van de totale elektriciteitsproductie. Om gezamenlijk deze doelstelling te kunnen behalen zal ENGIE voor zijn of haar klanten kleinschalige of grootschalige zonneweide realiseren om duurzame energie uit de zon op te wekken. Om de productie van zonne-energie te maximaliseren zal een zo optimaal systeem gerealiseerd moeten worden waarin zoveel mogelijk zonne-energie opgewekt kan worden met een zo min mogelijk systeemverlies, hierom staat de volgende vraag centraal in dit rapport: *“Hoe kan een zo elektrotechnisch optimaal grond gebonden PV-installatie ontworpen worden om de productie van duurzame elektriciteit te maximaliseren rekening houdend met enkele economische interessante voorwaarden?”* waarin het doel van het onderzoek is om het meest geschikte ontwerp oplossingen te vinden rekening houdend met onder andere technische randvoorwaarden en wet- en regelgeving. De gevonden ontwerp oplossingen zullen uitgebreid uitgelegd worden en toegepast worden op een 5,5 hectare stuk grond in het dorp Niedorp.

Om tot een geschikt systeem te kunnen komen zal de afbakening van het project belangrijk zijn, dus welke randvoorwaarden worden er gesteld door belanghebbende partijen, wat zijn de perceel kaders en dus bruikbare grond. Tot slot welke technologieën van zonnepanelen en omvormers zijn er beschikbaar. Met behulp van deze set informatie kan een eerste stap gezet worden naar het optimalisatie proces, hierin zullen verschillende parameters zoals: hellinghoek, oriëntatie, plaatsing, bekabeling en omvormers bepalend worden. Om tot een optimaal zonnepaneel systeem te komen zijn wiskundige formules in combinatie met een simulatie uitgevoerd waaruit een ontwerp oplossing vloeit zoals: het bepalen van het aantal panelen op een omvormer, of welke type kabel geschikt zijn afhankelijk van de lengte of vermogen. Met alle vergaarde oplossingen is een multi-criteria analyse op technisch niveau uitgevoerd om tot een geschikt systeem te komen waarin de energieproductie het hoogst ligt, systeem verliezen het laagst zijn en het materiaal benodigd minimaal is.

Een zonnepark met alleen zonnepanelen en omvormers zal geen energie opwekken hiervoor zal een elektrische installatie benodigd zijn van omvormer tot en met de netaansluiting van de lokale netbeheerder. Hiervoor geldt hoe groter het zonnepark wordt hoe complexer deze installatie zal worden. Afhankelijk van de schaal van het project zal een laagspanning/middenspanningsnet gerealiseerd moeten worden die aan de laatste technische randvoorwaarden voldoet. Om de elektrische installatie op een juiste manier te realiseren zijn er voor verschillende onderdelen zoals: kabelgoten, bekabeling, energie verdelers en kabelaanleg op zowel laagspanning als middenspannings niveau verschillende gedetailleerde uitwerkingen gemaakt inclusief wiskundige formules die toegepast kunnen worden voor elke scenario. Al deze ontwerp oplossingen zijn toegepast op het stuk grond in het dorp Niedorp om een duidelijk beeld te krijgen over het systeem.

Hierom kan geadviseerd worden dat wanneer deze ontwerp oplossingen toegepast worden een systeem gerealiseerd worden waarin de productie van zonne-energie gemaximaliseerd wordt die zowel technisch verantwoord is als economisch competitief voor de concurrentie markt. Zo kan voor het stuk land in Niedorp een 10° oostwest opstelling gerealiseerd met een jaarlijkse energieproductie (na verliezen) van 6,41GWh per jaar. Door de optimalisatie zijn de verliezen voor het gelijkspanningsnet slechts 4,5% zijn en voor het wisselspanningsnet 1,6%. Door de ligging van het zonnepark en de stand van zon zullen enkele verliezen ontstaan door vervuiling en reflecties waardoor de totale performance ratio van het systeem uitkomt op 88,4%. Gemiddeld zal de performance ratio van een grondgebonden zonnepark rond de ~84% liggen, dus door het optimalisatie proces zal per jaar een winst van 4,4% aan extra energiewinst voor dit zonnepark behaald kunnen worden.

SUMMARY

The Earth's climate is constantly changing. It has been established by science that most of the climate changes have been caused by man since the pre-industrial (around 1850) era. The so-called climate agreement has been drawn up to reduce the Earth's climate changes. This contains the objective to reduce CO₂ emissions; The aim for the Netherlands is to achieve a sustainable and CO₂ neutral electricity system by 2050. To achieve this, the share of renewable energy sources, such as wind and sun, will have to increase to over 70 percent of total electricity production by 2030. To achieve this objective jointly, ENGIE will realize small-scale or large-scale solar farms for its customers to generate sustainable energy from the sun. In order to maximize the production of solar energy, an optimal system will have to be realized in which as much solar energy can be generated with the least possible system loss, so the following question is central to this report: *“How can such an electrotechnical optimal ground-bound PV installation be designed to maximize the production of sustainable electricity, considering some economically interesting conditions?”* in which the aim of the research is to find the most suitable design solutions, taking into account technical preconditions and laws and regulations. The design solutions found will be explained in detail and applied to a 5.5-hectare piece of land in the village of Niedorp.

To arrive at a suitable system, the demarcation of the project will be important, so what preconditions are set by interested parties, what are the plot frameworks and therefore usable land. Finally, which technologies of solar panels and inverters are available. With this set of information, a first step can be taken to the optimization process, in which various parameters such as: slope angle, orientation, placement, cabling and inverters will be decisive. In order to achieve an optimal solar panel system, mathematical formulas have been carried out in combination with a simulation from which a design solution flows, such as: determining the number of panels on an inverter, or which type of cable is suitable depending on the length or power. With all the solutions collected, a multi-criteria analysis at technical level has been carried out to arrive at a suitable system in which the energy production is highest, system losses are lowest, and the material required is minimal.

A solar park with only solar panels and inverters will not generate any energy. This will require an electrical installation from inverter to grid connection of the local grid operator. The larger the solar park becomes, the more complex this installation will become. Depending on the scale of the project, a low-voltage / medium-voltage network must be realized that meets the latest technical preconditions. To realize the electrical installation in the right way, various detailed elaborations have been made for various components such as: cable trays, cabling, energy distributors and cable laying at both low and medium voltage levels, including mathematical formulas that can be applied for each scenario. All these design solutions have been applied to the plot of land in the village of Niedorp to get a clear picture of the system.

It can therefore be recommended that when these design solutions are applied, a system is realized in which the production of solar energy is maximized, which is both technically and economically competitive for the competition market. For example, for the piece of land in Niedorp a 10° east-west setup can be realized with an annual energy production (after losses) of 6,41GWh per year. Due to the optimization, the losses for the DC grid are only 4,5% and for the AC grid are 1,6%. Due to the location of the solar park and the position of the sun, some losses will be caused by pollution and reflections, bringing the total performance ratio of the system to 88,4%. On average, the performance ratio of a ground-based solar park will be around ~ 84%, so the optimization process will yield 4,4% extra energy per year for this solar park.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	i
Samenvatting.....	ii
Lijst van figuren	v
Lijst van tabellen.....	vi
Inleiding	1
1 Systeem voorwaarden	2
1.1 Perceel	2
1.2 Analyse beleidskader	3
1.2.1 Provinciale beperkingen.....	3
1.2.2 Gemeentelijke beperkingen	4
1.2.3 Netbeheerder beperkingen	4
1.3 Selectie PV-componenten.....	5
1.3.1 Zonnepanelen.....	5
1.3.2 Omvormers	7
2 PV Optimalisatie.....	9
2.1 Algemeen PV-ontwerp	9
2.2 PV-Scenario's.....	12
2.3 Omvormer optimalisatie	15
2.4 Kabel optimalisatie	22
2.5 Multi-criteria anaylse.....	25
3 Systeem ontwerp.....	26
3.1 Laagspanningsinstallatie.....	26
3.1.1 Gelijkspanningsontwerp	27
3.1.2 Wisselspanningsontwerp.....	29
3.2 Middenspanningsinstallatie	33
3.3 Systeemverliezen	37
4 Kosten analyse	39
5 Opslagsystemen	41
5.1 Batterijopslag.....	42
5.2 Power 2 Gas.....	44
5.3 Conclusie	44
Conclusie en aanbevelingen.....	45
Conclusie	45
Aanbevelingen	46
Bibliografie	47
6 Bijlagen.....	49
6.1 Jaarlijkse productierapport optimaal systeem	49
6.2 Kabelberekening omvormer laagspanningszijde	51
6.3 Concept tekening PV-systeem.....	54

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1 Perceel inclusief hoogteprofielen	2
Figuur 2 Voorbeeld behoud openheid landschap met paneelopstelling [4]	3
Figuur 3 Voorbeeld afstand tussen rijen voor toelating zonlicht [4]	4
Figuur 4 Verschillende type zonnepanelen	5
Figuur 5 Bedrading volle cel paneel(links) en half-cut paneel (rechts) [6]	6
Figuur 6 Blokschema omvormer [7]	8
Figuur 7 Profiel zonstand	9
Figuur 8 Traject zon rond perceel	9
Figuur 9 Weergave minimale afstand tussen panelen	11
Figuur 10 DC-vermogen ten opzichte van standaard testomstandigheden [13]	12
Figuur 11 Verhouding DC/AC ratio versus clippingverliezen [13]	13
Figuur 12 Indeling voorbeeld perceel Zuid(links) en Oost-West(rechts) opstelling	14
Figuur 13 I-V curve Jinko JKM330M-60-V	15
Figuur 14 Flowchart optimalisatie proces string lengte	18
Figuur 15 string langs de panelen(links) en omhoog en omlaag de panelen(rechts).....	21
Figuur 16 Spanningsverlies DC-Kabels.....	23
Figuur 17 Kosten AC-bekabeling versus DC-bekabeling	24
Figuur 18 Aanleg PV-string om inductielussen minimaal te houden [18]	28
Figuur 19 Veilige versus onveilige PV-kabel aanleg	28
Figuur 20 Voorbeeld Hager laagspanningsverdeler in compactstation [21]	29
Figuur 21 Installatieschema laagspanningsverdeler	32
Figuur 22 t(i) curve laagspanningsverdeler.....	32
Figuur 23 MS aansluiting 3 – 10 MVA [24]	33
Figuur 24 Netstructuur radiaal (links) ringvorming (rechts).....	33
Figuur 25 Schematische weergave middenspanningsnet	34
Figuur 26 Eaton Xiria oplossing [28].....	36
Figuur 27 t(i) curve LS-MS beveiliging.....	36
Figuur 28 Performance ratio	37
Figuur 29 Kosten verdeling PV-Systeem	40
Figuur 30 Systeemverliezen wisselspanningsdeel.....	40
Figuur 31 Liander Transportcapaciteit Noord-Holland [29]	41
Figuur 32 Technologieën energieopslag [31].....	42
Figuur 33 Batterijsysteem aan PV-systeem.....	42
Figuur 34 Proces power 2 gas [33].....	44
Figuur 35 Samenvatting van gekozen oplossing	46

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1 Voor- en nadelen verschillende type zonnepanelen	6
Tabel 2 Minimale en maximale afstand bij hoek α	10
Tabel 3 Minimale afstand object bij hoek β	11
Tabel 4 Gekozen panelen van drie verschillende fabrikanten.....	12
Tabel 5 Energieopbrengst per scenario	14
Tabel 6 Elektrische en thermische eigenschappen Jinko JKM-330M-60-V [9].....	15
Tabel 7 Technische gegevens Huawei SUN2000-100KTL-M1 [7].....	16
Tabel 8 Optimale string lengte voor zuid georiënteerde opstelling met omvormer x	19
Tabel 9 Optimale string lengte voor oost-west opstelling met omvormer x	20
Tabel 10 Maximale belastbaarheid paneel kabel.....	22
Tabel 11 Multi-criteria beoordeling	25
Tabel 12 Afzekerwaarde omvormers	30
Tabel 13 Benodigde kabel voor omvormer	30
Tabel 14 Kortsluitwaarde systeem	31
Tabel 15 Faalfrequentie middenspanningsnet.....	34
Tabel 16 Eigenschappen droge versus olie gevulde transformator	35
Tabel 17 Ontwerp samenvatting	45

INLEIDING

Het klimaat op aarde verandert voortdurend. Door de wetenschap is vastgesteld dat de klimaatveranderingen sinds het pre-industriële (rond 1850) tijdperk grotendeels door de mens is veroorzaakt. Voornamelijk door de grote toename van uitstoot van broeikasgassen als CO₂, methaan en lachgas en door de grootschalig ontbossing. Hierdoor wordt de hoeveelheid uitgaande warmtestraling vermindert en komt er meer stralingsenergie van de zon binnen dan dat er uitgaat. Om de klimaatveranderingen van de aarde te verminderen is onder andere het zogenaamde klimaatakkoord opgesteld. Hierin staan doelstelling genoemd om de CO₂-uitstoot te verminderen; voor Nederland is het doel om in 2050 een zo duurzaam en CO₂ neutraal mogelijk elektriciteitssysteem te realiseren. Om dit te bereiken zal het aandeel hernieuwbare energiebronnen, zoals wind en zon, in 2030 moeten toenemen tot ruim 70 procent van de totale elektriciteitsproductie. [1]

Met dit als achtergrond neemt ENGIE als technisch dienstverlener en energieproducent de leiding in de energietransitie. Onder andere door op verschillende plekken, zoals daken, ongebruikt/braakliggend terrein en terrein met dubbele functies, haar klanten te helpen met het verduurzamen van hun bedrijf door het plaatsen van een PV-installatie of realisatie van andere duurzame oplossingen.

Vanuit deze rol heeft ENGIE de vraag van een klant gekregen om te onderzoeken wat de elektrotechnische mogelijkheden voor gebiedsontwikkeling van zonne-energie op een ongeveer 5 hectare braakliggend terrein in de gemeente Hollands Kroon zijn.

Om de zonnestroominstallatie op dit stuk land te ontwikkelen zal in dit rapport de volgende vraag beantwoord worden:

“Hoe kan een elektrotechnisch optimaal grond gebonden PV-installatie ontworpen worden om de productie van duurzame elektriciteit te maximaliseren rekening houdend met economische voorwaarden?”

Hierin zijn de volgende zes deelvragen opgesteld:

- Welke PV-technieken zijn er en wat is de globale werking hiervan?
- Welke provinciale en gemeentelijke regelgeving is er in Noord-Holland ten aanzien van de realisatie van een PV-Park?
- Welke PV-componenten en configuratie zijn nodig om de productie van zonne-energie te maximaliseren?
- Hoe moet het functioneel ontwerp van het PV-park eruitzien van PV-paneel tot netaansluiting?
- In welke installatie-onderdelen zullen systeemverliezen ontstaan en hoe kan hier op een technisch economisch manier verantwoord mee worden omgegaan?
- Hoe kan het meest optimale PV-park gerealiseerd worden rekening houdend met alle kosten en verliesfactoren in de PV-systemen en benodigde installatie-onderdelen?

Aan de hand van literatuuronderzoek is gekeken naar de best mogelijke ontwerp oplossingen voor de grond gebonden PV-installatie en wat hier allemaal bij komt kijken. Het onderzoek is gericht op de volgende onderdelen: PV-component selectie, PV-configuratie, gelijkspanningsinstallatie, laagspanningsinstallatie, middenspannings aansluiting en optionele opslagmedia.

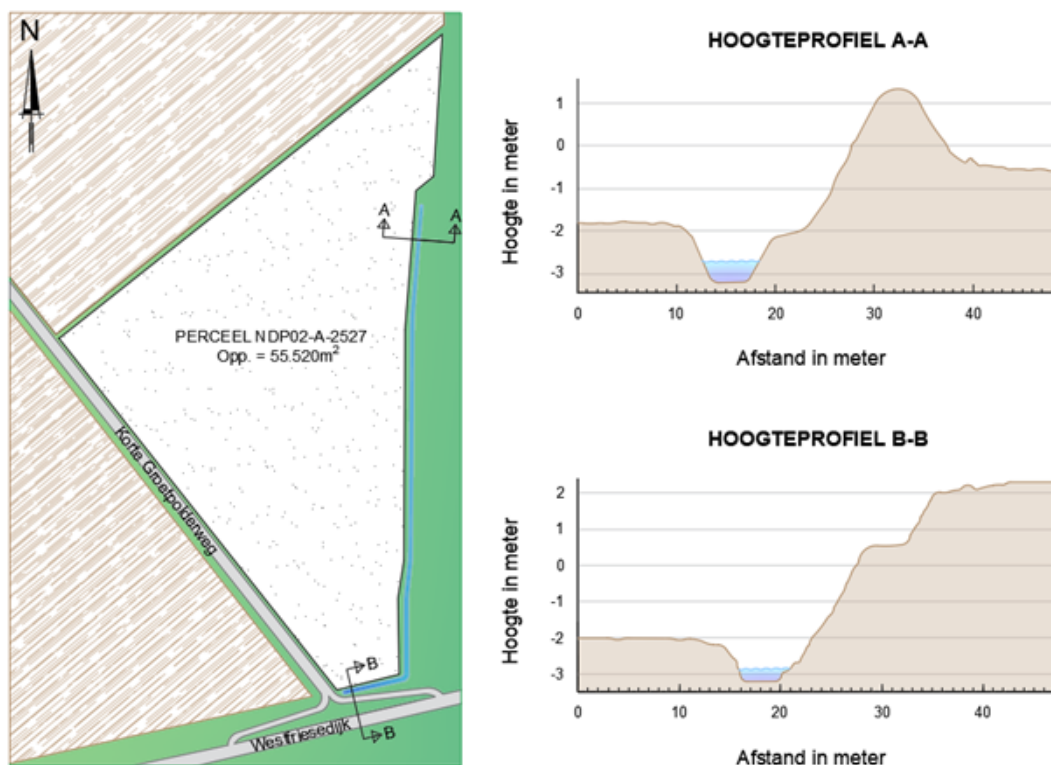
De opbouw van dit rapport is als volgt. Hoofdstuk 1 beschrijft de globale werking van de PV-technieken zoals de panelen en de omvormers, aan de hand van deze gegevens zal dit verder uitgewerkt worden naar de voorwaarden van het systeem. Vervolgens geven hoofdstuk 2 en 3 een gedetailleerde uitwerkingen van alle installatie-onderdelen die benodigd zijn voor de grond gebonden PV-installatie. In hoofdstuk 4 zal gekeken worden welke economische voorwaarden de financieel meest interessante ontwerp oplossing geeft. In hoofdstuk 5 zal er globaal gekeken worden naar verschillende opslagmedia en hun toepassing. Tot slot volgt de Conclusie en aanbevelingen over het gehele systeem. In de Bijlagen zijn de tekeningen en berekeningen opgenomen.

1 SYSTEEM VOORWAARDEN

In dit hoofdstuk worden verschillende voorwaarden en uitgangspunten besproken die van toepassing zijn op de elektrotechnische optimalisatie van het perceel zoals de perceelkaders, provinciale beleidskader(s), ENGIE solar business case guidelines en de gekozen PV-componenten. Binnen het hoofdstuk van de PV-selectie is een globale studie gedaan naar de werking van deze componenten om zo de meeste geschikte componenten te kunnen selecteren.

1.1 PERCEEL

Voor de start van het elektrotechnische optimalisatie proces is eerst gekeken naar de perceelkaders en naar wat de bruikbare grond is van het perceel voor de plaatsing van het PV-systeem. Het perceel NDP02-A-2527 ligt in de plaats Niedorp en valt onder de gemeente Hollands Kroon. Het perceel is te zien in Figuur 1 en ligt aan de Korte groetpolderweg 3. Het perceel heeft een totaal grondoppervlak van 55.530 m² en een omtrek van 1.140 m. [2] Het perceel is in noordelijke en westelijke richting omringt door landbouwgrond, de oostelijke en zuidelijke richting is omringt door een dijk waarvan het maaiveld ongeveer 3 á 4 meter hoger is dan het maaiveld van het perceel. Het hoogte verschil van het veld is variërend; er is maximaal een verschil van 10 cm tussen het hoogste en het laagste punt. [3]



Figuur 1 Perceel inclusief hoogteprofielen

1.2 ANALYSE BELEIDSKADER

Een reeks externe beperkingen beperkt het ontwerp voor het PV-systeem, hier zal rekening mee gehouden moeten worden tijdens de ontwerpfase. De volledige set beperkingen kan worden onderverdeeld in drie categorieën: provinciale, gemeentelijke en de lokale netbeheerder. Deze zijn in de volgende paragrafen uitgewerkt.

1.2.1 Provinciale beperkingen

Om zonneparken in de provincie Noord-Holland toe te passen heeft de provincie de 'Uitvoeringsregelingen opstellingen voor zonne-energie in landelijke gebied' opgesteld. Deze regeling is erop gericht dat zonneparken een zo hoog mogelijke bijdrage leveren aan de fysieke leefomgeving. Zo kent het beleid enkele praktische spelregels om de zonneparken in het Noord-Hollandse landschap te integreren. Deze spelregels kunnen opgedeeld worden in vijf categorieën: locatie, inpassing, inrichting, rand en bodem. [4]

Locatie

Voor het ontwikkelen van zonneparken is de locatie een belangrijke stap in het planproces, aangezien het per landschap verschilt welke technieken passend zijn. Zo kan een zonnepark binnen een stedelijke omgeving prima ingepast worden zonder verlies aan ruimtelijke kwaliteit, terwijl zonneparken in een kwetsbaarder gebied zorgvuldig moeten worden ingebed in het landschap. Zo stellen de spelregels ten aanzien van de locatie twee gebieden op namelijk: stedelijk en landelijk. Deze gebieden zijn verder gespecificeerd in hun toepassingsgebied. Voor stedelijk zijn de toepassingsgebieden: op daken en in openbare ruimte, combineren met recreatie, in wachtlandschappen en langs infrastructuur. Voor landelijke gebieden is dit: in veenweidegebied, combineren met agrarisch gebruik, op water en langs bestaand stedelijk gebied. Het perceel NDP02-A-2527 is gevestigd in landelijke gebied en zal daarom moeten voldoen aan het criterium "combineren met agrarisch gebruik".

Inpassing

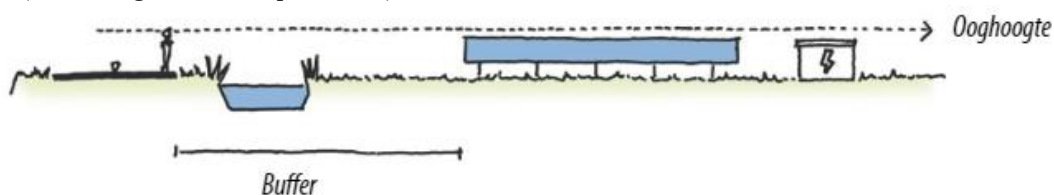
Voor de inpassing van een zonnepark wordt de relatie van het zonnepark tot de omgeving beschouwd. Uiteindelijk zijn zonneparken landschap vreemde elementen en zouden deze zorgvuldig moeten invoegen naar de lokale omgeving en context. Hiervoor zijn de volgende aandachtspunten van toepassing voor perceel NDP02-A-2527:

- Stem de omvang van het zonnepark af op de schaal van het landschap.
- Zorg dat landschappelijke structuren zoals: sloten, hoogteverschillen of begroeiingstructuren zichtbaar blijven door afstand te bewaren.

Inrichting

Naast de zonnepanelen die op een zonnepark geplaatst worden zal er ook rekening gehouden moeten worden met de plaatsing van andere objecten binnen de kavel: de zogenaamde inrichting. Het is voor de inrichting van het zonnepark van belang dat alle onderdelen meegenomen worden in het ontwerp. Dit betreft bijvoorbeeld de transformatorhuisjes, entreezone, tussenpaden en bewakingsmaatregelen. Deze inrichtingsobjecten zijn net zo beeldbepalend als de zonnepanelen zelf en verdienen daarom net zoveel aandacht. De volgende aandachtspunten zijn van toepassing voor perceel NDP02-A-2527:

- Volg met de opstelling de vorm van de kavel en plaats de rijen in de lijn van het landschap.
- Maximale hoogte punt van de opstelling en andere bijkomende elementen niet hoger dan 1,5 m om zo openheid van het landschap te behouden.
- Plaats omvormers, transformatoren en bewakingsmaatregelen op een logische en ordelijke wijze (voorkeur gecentreerd op de kavel)



Figuur 2 Voorbeeld behoud openheid landschap met paneelopstelling [4]

Rand

Naast dat de rand een middel is om mensen van de kavel af te houden is deze ook het meest beeldbepalende element van het zonnepark. De randzone kan vooral gezien worden als de overgang tussen het zonnepark en de omgeving. Hiervoor zijn 6 verschillende gebied specifieke begrenzings opgesteld. Voor polderlandschappen zou dit een sloot kunnen zijn als begrenzing.

Bodem

Door de plaatsing van zonnepanelen kan de inval van licht en regenwater op de bodem afnemen met negatieve gevolgen voor de bodemkwaliteit en ecologie. Er dient bij plaatsing van de zonnepanelen daarom rekening met voldoende ruimte voor inval van licht en regenwater.



Figuur 3 Voorbeeld afstand tussen rijen voor toelating zonlicht [4]

1.2.2 Gemeentelijke beperkingen

Aanvullend op de provinciale ‘Uitvoeringsregelingen opstellingen voor zonne-energie in landelijke gebied’ heeft gemeente Hollands Kroon kaders opgesteld over de toepasbaarheid van zonneparken binnen de gemeente. Zo bieden zij diverse mogelijkheden om zonneparken te plaatsen op onrendabele stukken grond en ontwikkelingen waarbij ruimte dubbel gebruikt kan worden. Ook toetsen zij, naast de landschappelijk inpasbaarheid, de volgende drie criteria: maatschappelijk draagvlak, energieafzet en tijdelijkheid.

1.2.3 Netbeheerder beperkingen

De lokale netbeheerder voor de gemeente Hollands Kroon is Liander. Liander is verantwoordelijk voor het transport, distributie, netaansluiting en dienstverlening van de elektriciteitsvoorziening binnen dit gebied. De aanleg van een nieuw aansluitpunt voor het PV-park is de verantwoordelijkheid van de netbeheerder en de beslissingen over de grootte van de aansluiting en de bijbehorende kosten. Binnen deze aansluiting kan de netbeheerder enkele beperkingen opleggen zowel op het financiële vlak als op het technisch vlak. De volgende beperkingen kunnen van toepassing zijn of opgesteld worden door de netbeheerder:

- Door grootschalige penetratie van zonne-energie kan het spanningsniveau van het distributienet te hoog worden en boven de gestelde netcode komen. Hierdoor bestaat de kans dat volledige terug levering niet altijd mogelijk zal kunnen zijn.
- Bij grootverbruik van 1MVA t/m 2MVA aansluitingen bestaat de kans dat de ringleiding in de weg niet toereikend is om het volledige vermogen te kunnen transporteren.
- Bij grootverbruik van 2MVA t/m 5MVA aansluitingen bestaat de kans dat het onderstation vol is en niet meer uitbreidbaar is met extra velden of dat de maximaal capaciteit van de trafo's zijn bereikt.

De keuze van de aansluiting zal een grote rol spelen bij het bepalen van de optimale plaatsing van het PV-park om de kabelkosten tot een minimum te beperken, zodat de energieproductie niet wordt getroffen door onnodige kabelverliezen. Hierdoor zal met de netbeheerder overlegd moeten worden over de mogelijkheden van deze voorzieningen binnen dit gebied.

1.3 SELECTIE PV-COMPONENTEN

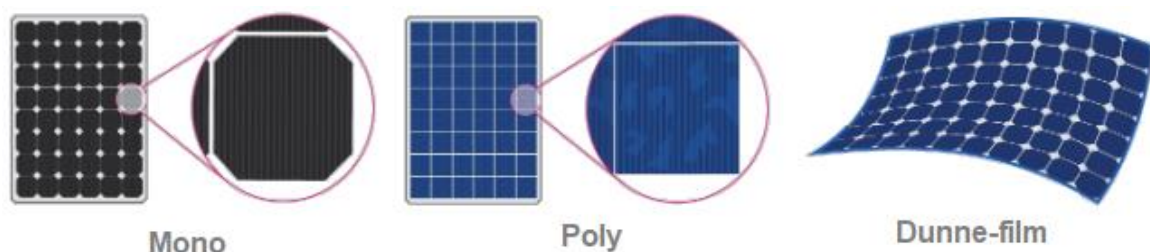
Om de juiste PV-componenten te selecteren heeft de ENGIE group een selectie van “goedgekeurde leveranciers” samengesteld voor de belangrijkste apparatuur in PV-installaties, voornamelijk gericht op zonnepanelen en omvormers. Volgens de ENGIE solar business case guidelines is een “goedgekeurde leveranciers” een leverancier voor wie recentelijk een technische pre-kwalificatie en financiële beoordeling is uitgevoerd waardoor deze kan worden beschouwd als een geschikte en concurrerende leverancier. Deze lijsten kunnen geraadpleegd worden om een shortlist te geven voor de meest belovende leveranciers in van zowel zonnepanelen als omvormers.

1.3.1 Zonnepanelen

Zonnepanelen worden gebruikt om energie uit zonlicht om te zetten in elektrische energie. De werking van zonnepanelen is gebaseerd op het fotonvoltaïsche effect; licht fotonen vallen op het zonnepaneel waardoor in het paneel een spanningsverschil gecreëerd wordt waarmee elektriciteit kan worden gegenereerd. Om dit spanningsverschil te creëren zijn zogenoemde halfgeleiders benodigd. Dit soort materiaal geleidt normaal gesproken van zichzelf niet of weinig elektriciteit, maar door de toevoeging van een andere soort energie (bijvoorbeeld licht of warmte) kunnen vrije elektronen ontstaan. Door twee verschillende zelf gecreëerde type halfgeleiders op elkaar te leggen (p-type en n-type silicium halfgeleider) zal bij licht inval vrije elektronen van het p-type naar de n-type halfgeleider getrokken worden. Hierdoor ontstaan er zogeheten holes in het p-type halfgeleider waardoor een spanningsverschil ontstaat tussen het n en p-type materiaal. Door op het p-type een plus pool te zetten en op het n-type een min pool te zetten ontstaat een elektrisch circuit waarbij de elektronen van min naar plus stromen. [5]

Met deze op silicium gebaseerde techniek bestaan er tegenwoordig drie type zonnepanelen namelijk: monokristallijne, polykristallijne en dunne-film panelen. Zowel monokristallijne als polykristallijne zonnepanelen hebben cellen gemaakt van silicium plakjes. Hoewel beide soorten zonnepanelen cellen hebben van silicium, variëren monokristallijne en polykristallijne panelen in de samenstelling van het silicium zelf. Monokristallijne zonnecellen zijn gesneden uit een enkel, puur kristal van silicium. Als alternatief zijn polykristallijne zonnecellen samengesteld uit fragmenten van siliciumkristallen die in een mal aan elkaar zijn gesmolten voordat ze in een plakje worden gesneden.

In tegenstelling tot monokristallijne en polykristallijne zonnepanelen, zijn dunne-filmpanelen gemaakt van verschillende materialen. Het meest voorkomende type dunne film-zonnepaneel is gemaakt van cadmiumtelluride (CdTe). Daarnaast kunnen dunne film ook gemaakt worden van amorf silicium (a-Si) en Copper Indium Gallium Selenide (CIGS). [6]



Figuur 4 Verschillende type zonnepanelen

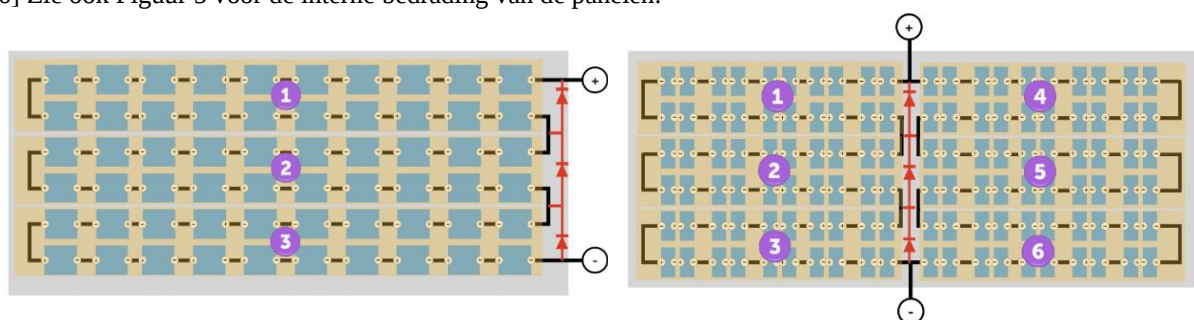
Om te bepalen wat het beste zonnepaneel is voor een zonnepark zal er gekeken moeten worden naar de voor- en nadelen van de verschillende typen. Tabel 1 geeft een overzicht van de technische en economische voor- en nadelen van de drie verschillende typen zonnepanelen.

Type zonnepaneel	Voordeel	Nadeel
Monokristallijne	Hoge efficiency/performance,	Hoge kosten Lagere performance op hogere temperatuur
	Goede esthetiek	
	Hoge garantie van fabrikant	
Polykristallijne	Lagere kosten dan monokristallijne,	Lagere efficiency/performance
	Minder invloed van hoge temperatuur	Minder esthetiek dan mono panelen
Dunne-film	Flexibel, Licht en esthetiek	Laagste efficiency/performance Degraderen sneller
	Hoge temperatuur en schaduw heeft	
	minder impact op performance	
	Massa productie is simpel	

Tabel 1 Voor- en nadelen verschillende type zonnepanelen

De beste keuze voor het zonnepark in dit rapport zal dus een monokristallijn paneel zijn. Dit paneel biedt hoge efficiency en performance en ook nog een goede esthetiek. Voorheen waren deze panelen in aanschaf duurder dan polykristallijn panelen, de productie van zonnepanelen richt zich tegenwoordig echter volledig op monokristallijn waardoor de kosten flink gedaald zijn. De esthetiek van een monokristallijn paneel zal ook belangrijk zijn voor dit park doordat het in een landelijk gebied geplaatst zal worden zullen monokristallijn zonnepanelen een veel rustiger beeld geven ten opzichte van de polykristallijn panelen. Polykristallijn panelen kennen veel variaties in kleur vanwege de samenstelling van kristallen, dit geeft een onrustiger beeld.

Ook is gekeken wat de beste indeling en opwekking biedt met zonnepanelen. Zo zijn er verschillende afmetingen zonnepanelen met 60, 72 of 96 zonnecellen. Ook zijn verschillende fabrikanten bezig met zonnepanelen met half-cut cell technologieën. Bij dit type panelen worden halve cellen toegepast waardoor bijvoorbeeld een 60 cellen paneel wordt voorzien van 120 cellen. Een voordeel hiervan is dat het paneel een hogere efficiency kent, hiernaast zou het paneel ook minder last hebben van schaduwverliezen omdat er bij schaduw maar 1/6 minder energie wordt opwekt in plaats van 1/3 van het paneel. Dit komt doordat de bedrading voor half-cut cell technologie anders gerealiseerd wordt dan voor volle cellen. Bijvoorbeeld met een paneel van 60 cellen en voltage van 0,5V per cel aangesloten in serie zal de totale spanning van het paneel 30V zijn. Wanneer deze cellen door de helft worden gesneden zal een cel nog steeds 0,5V opwekken alleen half de stroom dus als op dezelfde manier het paneel gebouwd wordt zal het paneel een uitgangsspanning hebben van 60V en de helft van de stroom. Om de panelen identiek te houden zullen dus twee parallelle rijen van in serie aangesloten cellen de 30V bereiken dus wanneer een cel in de schaduw valt zal slechts 1/6 van het paneel minder vermogen opwekken [6] Zie ook Figuur 5 voor de interne bedrading van de panelen.



Figuur 5 Bedrading volle cel paneel(links) en half-cut paneel (rechts) [6]

Alternatief kunnen deze soorten zonnepanelen als bi-facial uitgevoerd worden. Bi-facial panelen zullen dan wel uitgevoerd moeten worden met een speciale cel die aan beide zijde van het paneel energie kan opwekken dit houdt in dat de achterkant van het paneel voorzien is van een speciale aluminium raster waardoor het paneel deels transparant wordt. Hierdoor valt licht op de cellen aan beide kanten (door reflectie van de grond) van het paneel en kan er meer energie worden opgewekt. Om verschillende zonnepaneelopties te onderzoeken zal vanuit de ENGIE-lijst van goedgekeurde fabrikanten gekeken worden naar de volgende zonnepaneel fabrikanten: JA Solar, LONGi Solar en Jinko Solar. De keuze voor deze fabrikanten is op basis van praktische ervaring van andere gerealiseerde zonneparken bij ENGIE, audits en duurtesten van ENGIE Laborelec.

1.3.2 Omvormers

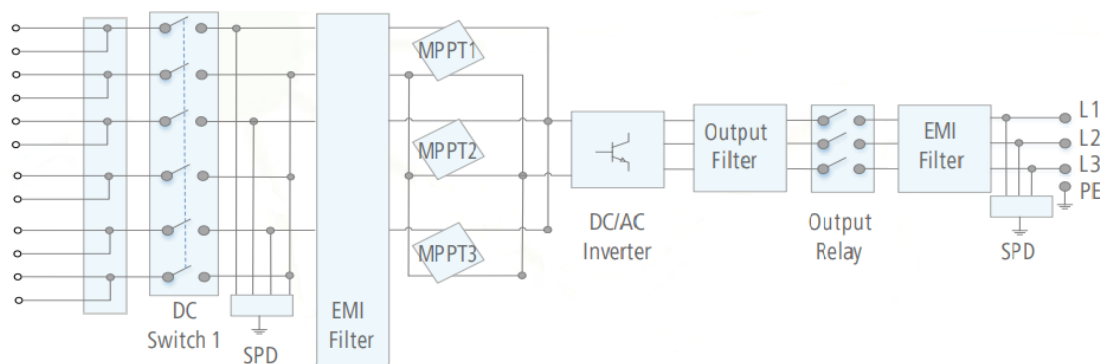
Zonnepanelen leveren gelijkspanning. Om de opgewekte zonne-energie van een zonnepaneel op het distributienet te krijgen is conversie nodig van gelijkspanning naar wisselspanning. Dit wordt gedaan door middel van een PV-omvormer. Er zijn verschillen typen omvormers welke binnen PV-installaties ingezet kunnen worden: centrale omvormers, stringomvormers, Multi-string omvormer en micro-omvormers. Van al deze configuraties worden de centrale en stringomvormers het meest toegepast in grootschalige zonneparken. Om de PV-panelen op een omvormer aan te sluiten is een string nodig. De string grootte is afhankelijk van de omvormer specificaties en kan bestaan uit 1 paneel tot en met x panelen, een string wordt gecreëerd door meerdere zonnepanelen in serie met elkaar aan te sluiten en met één plus en min kabel op de omvormer ingang aan te sluiten

Het doel van een centrale omvormer is om alle strings van zonnepanelen parallel te combineren en met een centrale aansluiting naar de omvormer te gaan. Een nadeel van deze configuratie is dat als er verschillen zijn tussen de diverse strings door bijvoorbeeld schaduwverliezen of verschillende stringconfiguraties van de zonnepanelen dat het maximale vermogenspunt niet ten alle tijden identiek is van alle modules. Hierdoor treedt vermogensverlies op. Met de huidige weersomstandigheden in Nederland waarin zonnige dagen, licht bewolkte en bewolkte dagen zijn zal een centrale omvormer dus mogelijk meer verliezen kunnen ondergaan door schaduweffecten. Een voordeel van centrale omvormers is dat de investeringskosten lager zullen zijn dan stringomvormers omdat er minder van nodig zijn en met een andere architectuur opgebouwd wordt waardoor het ontwerp en implementatie beter is dan die van stringomvormers. Een centrale omvormer vereist echter ook hoge technische expertises van zijn onderhoudsmedewerkers en zeker wanneer een centrale omvormer uitvalt kan het lang duren om het probleem op te lossen of zelfs de omvormer te laten vervangen. Dit kan enkele dagen duren omdat centrale omvormers niet standaard leverbaar zijn waardoor het park meerdere dagen stil kan liggen en geen energie opwekt.

Een betere manier om verliezen door schaduw of downtime van je systeem te verminderen is door gebruik te maken van stringomvormers. Wanneer een string omvormer stuk gaat kan snel en eenvoudig een nieuwe string omvormer geplaatst worden omdat deze ten opzichte van de centrale omvormer op de plank liggen bij de groothandel of distributeur. Ook zal maar een kleiner deel van het systeem wegvallen. Ten opzichte van de centrale omvormer staan string omvormers lokaal opgesteld in het veld en zal enkele strings verbinden en het vermogen omvormer naar wisselspanning. Net zoals een centrale omvormer zal ook deze omvormer uitgevoerd zijn met een enkele of vaak meervoudige MPPT-systeem(en) (maximum power point tracking). MPPT is in feite een algoritme en wordt geïmplementeerd door een combinatie van software en elektronische hardware in elke omvormer. Het helpt ervoor te zorgen dat de output van het zonnepaneel of string op zijn hoogtepunt/ maximum is. Dit wordt gedaan door middel van een continue methodologie voor het volgen van het vermogen om zich op het meest optimale vermogenspunt van de zonnepanelen te vestigen. Het maximale vermogen van een zonnemodule varieert met zonnestraling, omgevingstemperatuur en cel temperatuur. Zonnecellen hebben een complexe relatie tussen temperatuur en totale weerstand die een niet-lineaire output-efficiëntie produceert op basis van de I-V-curve. Het doel van het MPPT-systeem is om de output van de PV-modules te bemonsteren en de juiste weerstand toe te passen om maximaal vermogen te verkrijgen voor elke gegeven zonnestraling en algemene omgevingsomstandigheden.

Deze stringomvormer kent twee nadelen. Het eerste nadeel van deze omvormer is dat een groot laagspanningsnet benodigd is om alle het opgewekte vermogen op een centraalpunt op het distributienet terug te leveren, het tweede nadeel van deze omvormers zal afhankelijk van de omvormer output vermogen zijn. Een hoog vermogen omvormer kan een afwijkende uitgangsspanning hebben ten opzichte van de standaard gehanteerde laagspanningsniveau van 400V 3-fase systemen. Dit betekent dat bij toepassing van een ander spanningsniveaus er een extra risico is bij het onderhoudsplan omdat alle producten niet-standaard zijn en niet direct leverbaar kunnen zijn bij uitval van een omvormer, vermogensschakelaar of step up trafo. Een voordeel van omvormers met bijvoorbeeld 690V of 800VAC uitgangsspanning is dat de bekabeling dunner uitgevoerd kan worden ten opzichte van omvormers met een uitgangsspanning van 400V. Dit keerpunt van uitgangsspanning is per fabrikant verschillend zijn.

Om de omvormer te kunnen dimensioneren zal eerst gekeken moeten worden naar zijn globale werking. In Figuur 6 is een blokschema weergegeven van de globale blokken die benodigd zijn om een omvormer te laten werken. Aan de linkerkant van Figuur 6 komen alle strings van de zonnepanelen binnen afhankelijk van de gekozen omvormer kunnen deze stringsspanningen variëren, zo kunnen deze strings uitgelegd worden op 750V, 1000V of 1500V gelijkspanning. De standaard die hiervoor wordt gebruikt is dat systemen met een spanning van 750V voor residentiële toepassingen zijn bestemd en de 1000V of 1500V voor commerciële systemen. Deze strings kunnen vervolgens door een enkele of meerdere MPPT geoptimaliseerd worden om het maximale vermogen uit deze strings te halen. Hierna worden alle ingangen gecombineerd in een combiner box om met één aansluiting naar de DC/AC omvormer te gaan. De DC/AC omvormer zal in zijn simpelste vorm bestaan uit drie IGBT halve bruggen met vrijlooptdiodes. De IGBT zullen aangestuurd worden door een PWM signaal, zo kan van gelijkspanning een 3-fasen wisselspanning gemaakt worden waarna deze op het lokale net aangesloten kan worden. Het uitgangsrelais zal bescherming moeten geven zodat de twee netten niet met elkaar gekoppeld kunnen worden wanneer de fasehoeken verschillend zijn. Ook zal dit relais het circuit openen wanneer de het net wegvalt en dus voorkomt dat de omvormer op eilandbedrijf gaat draaien wat niet gewenst is. Daarnaast zijn zowel aan de primaire zijde als aan de secundaire zijde lastschakelaars aanwezig, een EMI filter en overspanningsbeveiligingen. De schakelaars zijn bedoeld om de omvormer uit te schakelen voor bijvoorbeeld onderhoud aan de omvormer of afgaande strings. De EMI filters zijn bedoeld om elektromagnetische velden die opgewekt worden door elektronica te verminderen en de overspanningsbeveiligingen (SPD) zijn geplaatst om overspanning te voorkomen wat mogelijk de elektronica stuk kan maken door een te hoge spanning. Een overspanning kan bijvoorbeeld gegenereerd worden door een blikseminslag.



Figuur 6 Blokschema omvormer [7]

De strings voor de omvormer zullen dus gedimensioneerd worden aan de hand van de maximale ingangsspanning van de omvormer en de parameters van de gekozen zonnepanelen. Zo zal elke string gedimensioneerd moeten worden naar de bijna de maximale DC-ingangsspanning en stroom van een string. Het aantal zonnepanelen per string zal dus afhankelijk zijn van de gekozen zonnepaneel en de waarde van de V_{oc} , I_{sc} en de temperatuur coëfficiënt van V_{oc} , I_{sc} .

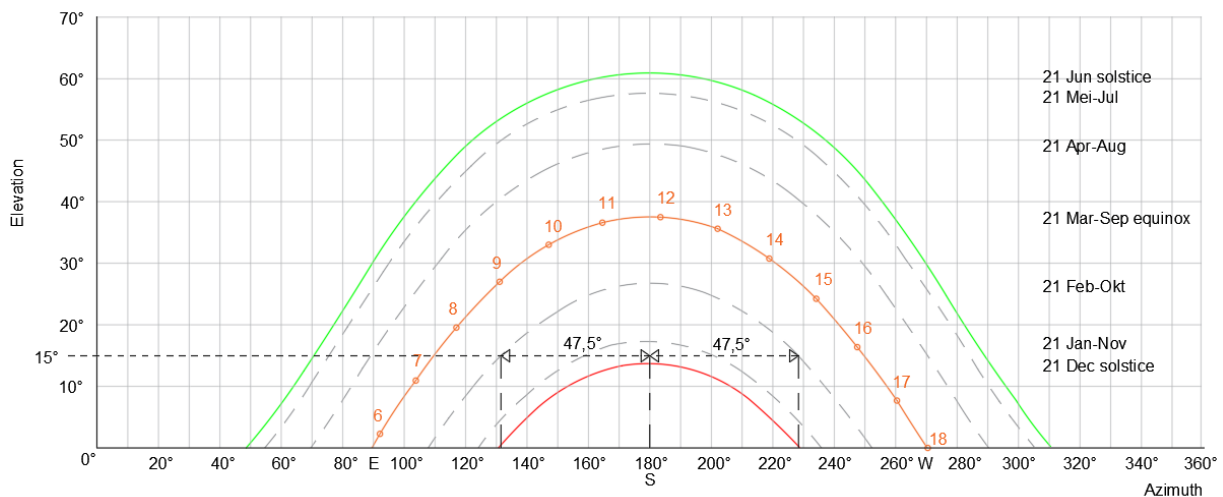
Om verschillende omvormersopties te onderzoeken zal vanuit de ENGIE-lijst van goedgekeurde fabrikanten gekeken worden naar de volgende omvormer fabrikanten: Huawei Solar, SMA Solar Technology, Delta Energy Systems en SUNGROW. De keuze voor deze fabrikanten is op basis van praktische ervaring van andere gerealiseerde zonne-parken bij ENGIE, audits en duurtesten van ENGIE Laborelec.

2 PV OPTIMALISATIE

Binnen dit hoofdstuk zal gezocht worden naar geoptimaliseerde uitgangspunten voor het detail ontwerp. Om dit verder uit te werken zullen in de eerste paragraaf de algemene onderdelen besproken worden zoals de standen van de zon en hoe de indeling van het perceel kan ingericht worden om schaduwverliezen zo min mogelijk te krijgen. Hierna zal dit verder uitgewerkt worden over hoe beste string en kabelindeling gerealiseerd kan worden waarna met het simulatieprogramma HelioScope actuele berekening worden uitgevoerd om de energieopbrengst van verschillende opstellingen van panelen en omvormers te krijgen. Tot slot zal met behulp van een Multi-criteria analyse gekeken worden welke opstelling met welk type kabels en omvormers optimaal ingezet kunnen worden om de totaal systeem verliezen te reduceren en de energieopbrengst te maximaliseren.

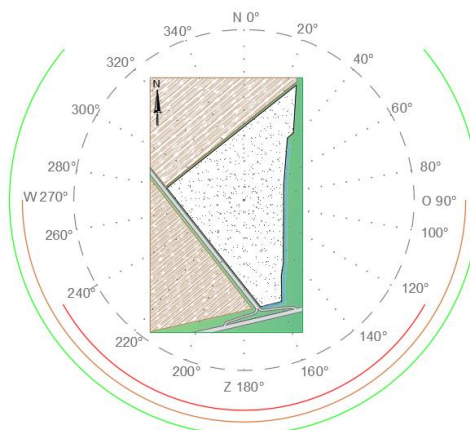
2.1 ALGEMEEN PV-ONTWERP

Binnen dit hoofdstuk zal er gekeken worden naar de algemene indeling van het PV-ontwerp. De indeling van de zonnepanelen bepaalt veel over de algemene haalbaarheid en opwekking van een zonnepark, hierbij speelt de zon een grote rol aangezien dit soort van de brandstof is voor een zonnepaneel. Om een goede indeling te realiseren is de stand van de zon belangrijk mede omdat deze in de winter maanden een lagere stand heeft, minder zonne-instraling en een lagere intensiteit heeft dan in de zomer maanden. Met behulp van de SunEarth tool is er een zonprofiel geschetst van de zonstanden voor het perceel. [8]



Figuur 7 Profiel zonstand

Aan de hand van het zonprofiel in Figuur 7 is in Figuur 8 het traject uitgetekend ten opzichte van het perceel. Dit traject is belangrijk om verschillende afstanden mee te berekenen om zo rekening te houden met schaduweffecten door bomen, de dijk, hekwerken en zonnepanelen.



Figuur 8 Traject zon rond perceel

Om de maximale afstand tussen objecten te kunnen uitrekenen is gekozen om het zonneprofiel van de maand 21Feb-Okt te gebruiken. De keuze voor dit profiel in plaats van het profiel van 21 Dec is omdat in periode van 21Dec weinig zon uren zullen zijn. Ook zal het hoek verschil van 5° een significante grotere afstand geven tussen zonnepanelen wat resulteert in minder panelen op het perceel en dus minder energie opwekking. Het optimaliseren van 21/12 weegt voor deze locatie niet op tegen de meer opbrengst van meer panelen en minimale schaduwverliezen in de winter maanden.

Met behulp van formule 2.1 zijn voor verschillende hoeken de minimale tussenafstanden berekend om geen schaduweffecten op de panelen te krijgen. Voor het paneel is gekozen voor een standaard afmeting van een 60 cel paneel wat ongeveer een afmeting heeft van 1755mm bij 1038mm. De uitkomsten zijn genoteerd in Tabel 2.

$$A = \frac{L_p \cdot \sin (180^\circ - (\alpha + \beta))}{\sin \beta} \quad (2.1)$$

$$X_{max} = A - (L_p \cdot \cos \alpha) \quad (2.2)$$

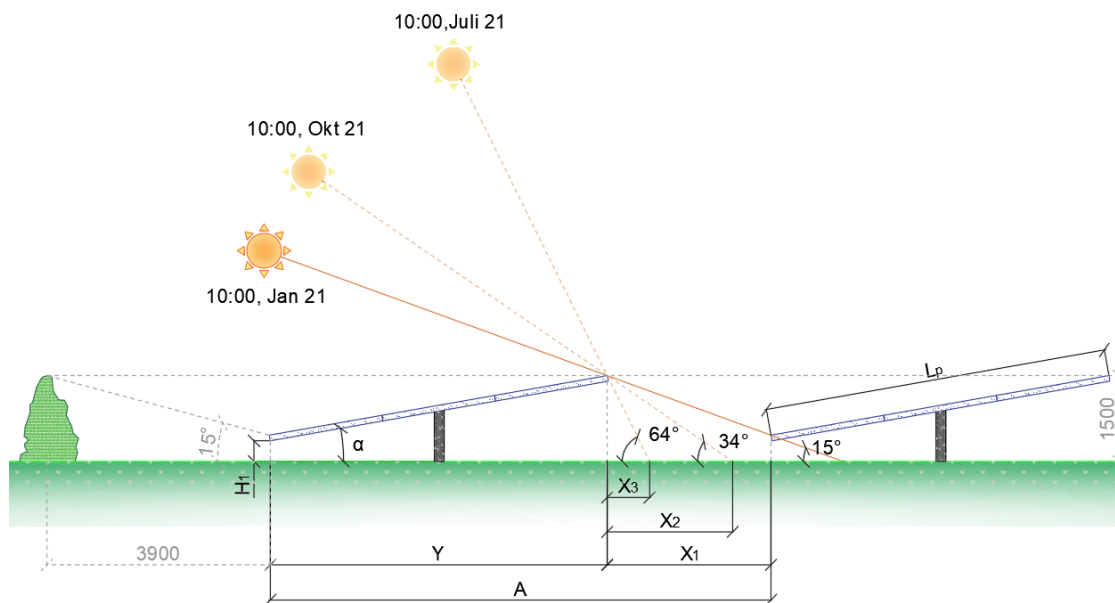
Hierin is L_p is de totale lengte van de panelen, α de hellingshoek van de panelen en β de hellingshoek van de zon. Met behulp van de maximale afstand kan de minimale afstand berekend worden. In Figuur 7 zijn twee verticale lijnen getrokken die het hoekverschil geeft ten opzichte van het zuiden. Deze twee punten worden ook wel het azimuth correctiefactor genoemd omdat de stand van zon niet nog loodrecht op de panelen is waardoor de afstand geminimaliseerd kan worden. Zie ook Figuur 9

$$X_{min} = X_{max} \cdot \cos \alpha_{\text{azimuth correctie}} \quad (2.3)$$

Hoek (°)	Afstand L_p (mm)	Afstand A (mm)	Afstand X_{max} (mm)	Afstand X_{min} (mm)
10	4152	6780	2691	1903
12,5	4152	7407	3354	2372
15	3114	6016	3008	2127
17,5	2076	4310	2330	1647
20	2076	4601	2650	1874
22,5	2076	4883	2965	2097
25	2076	5156	3274	2315
27,5	1038	2709	1789	1265
30	1038	2836	1937	1370

Tabel 2 Minimale en maximale afstand bij hoek α

De afstanden in Tabel 2 gelden alleen voor een zuid opstelling. Wanneer er gekozen zal worden voor een oostwest opstelling zou de minimale afstand praktisch nul kunnen zijn maar dit zou niet wenselijk zijn omdat er bijna geen lichtinval en regenwater de grond raakt wat volgens de provinciale beleidskaders niet gewenst is. Ook is onderhoud niet uitvoerbaar door de panelen zo dicht op elkaar te plaatsen. Voor zuid opstellingen zou alternatief de minimale afstanden nog verminderd kunnen worden hierdoor zal tijdens de periode van Feb-Okt enkele schaduwverliezen ontstaan maar door de extra ruimte die hierdoor ontstaat kunnen mogelijk extra panelen geplaatst worden wat de totale energieopwekking zou kunnen verhogen.



Figuur 9 Weergave minimale afstand tussen panelen

Naast de minimale afstand tussen de panelen dient er ook rekening gehouden te worden met de minimale afstand tussen objecten zoals hekwerken of hagen, de dijk en trafohuisjes. Met behulp van formule 2.4 kan de minimale afstanden berekend worden. Hierin is de maximale hoogte 1500mm. De uitkomsten zijn genoteerd in Tabel 3.

$$Afstand\ objecten = \frac{Hoogte\ object}{\tan \beta} \quad (2.4)$$

Object	Hoogte (mm)	Afstand (mm)
Hekwerk/haag	1500	5598
Dijk oostzijde	3000	11196
Dijk zuidzijde	4000	14928
Trafohuisje	1500	5598

Tabel 3 Minimale afstand object bij hoek β

Op basis van de gemaakte analyse worden de volgende twee installatie voorgesteld: zuid georiënteerde opstelling met een minimale afstand van 2372mm¹ tussen de panelen, en voor een oostwest opstelling een minimale afstand van 1500mm tussen de panelen en een piekafstand van 500mm. Voor de randzone van het perceel zou met een hoogte van 1500mm de afstand minimaal 3900mm zijn en maximaal 5600mm

¹ Minimale afstand voor een zuid opstelling is afhankelijk van de gekozen hellingshoek zie Tabel 2

2.2 PV-SCENARIO'S

Om te onderzoeken wat de meeste optimale indeling en opwekking geeft van de zonnepanelen is er met behulp van softwareprogramma HelioScope een simulatie en energieopbrengst berekening uitgevoerd. Gezien de ligging van het perceel zijn er veel verschillende scenario's mogelijk. Om de perceelkaders inzichtelijk te houden moet de paneelopstelling de vorm van de kavel volgen, hiervoor hebben de volgende oriëntaties de voorkeur: zuid (180°), zuidwest (232°), zuidoost (142°) en oostwest (90/270°) opstelling. De hellingshoek van de panelen is variërend en zal tussen de 10 en 20 graden liggen.

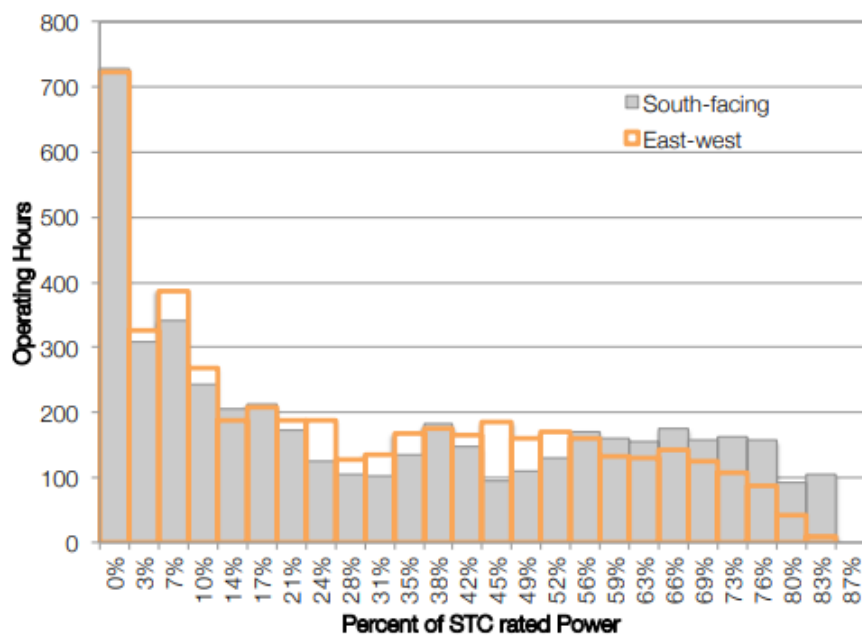
Voor dit project is van elke fabrikant één half-cut paneel gekozen met elk een verschillende afmeting en vermogen. Hierin zijn de verhouding van opwek vermogen, aanschaf en transportkosten van deze drie panelen ongeveer gelijk aan elkaar.

Fabrikant	Type	Wattpiek (W_p)	Afmeting (mm)	Datasheet
Jinko Solar	JKM330M-60-V	330	1665x1002	[9]
LONGi solar	LR4-60-HPH-370M	370	1755x1038	[10]
JA Solar	JAM60S09-320/PR	320	1657x996	[11]

Tabel 4 Gekozen panelen van drie verschillende fabrikanten

Om op een juiste manier te kunnen dimensioneren zal er eerst gekeken moeten worden naar hoe een zonnepaneel aan zijn maximale vermogen komt. Een zonnepaneel van bijvoorbeeld 320Wp zal 320W produceren onder de zogenoemde standaard test omstandigheden (STC). De STC test onder de volgende omstandigheden: een zonneinstralingsintensiteit van $1000W/m^2$ en een cel temperatuur van $25^{\circ}C$. Deze omstandigheden zullen in de echte wereld maar zeer zelden voorkomen waardoor het zonnepaneel niet in staat is om de volledige capaciteit te leveren, waarbij de meeste dagen veel lager uitvallen. [12]

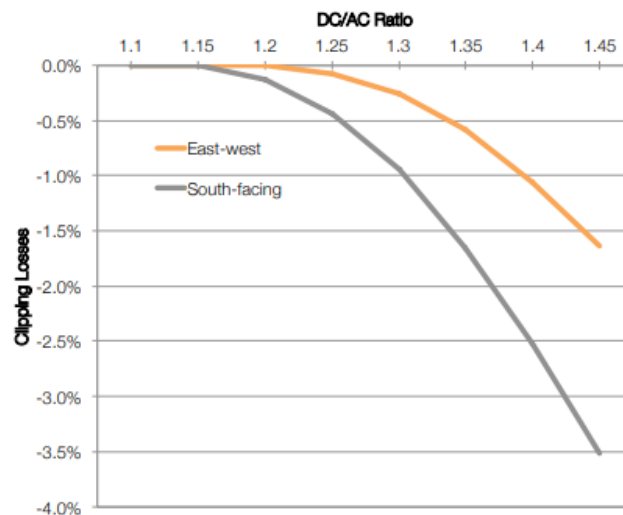
Om dit te controleren heeft Folsom labs onderzoek gedaan naar het DC vermogen voor een zuid en oost-west opstelling ten opzichte van de standaard test omstandigheden. Hun uitkomsten zijn genoteerd in de onderstaande Figuur 10 waarin ongeveer 4500 bedrijfsuren aan energie productie van een standaard zonnepaneel zijn weergegeven als een verticaal segment. Hierin valt op dat het paneel maar zelden meer dan 80% of 90% van het nominale DC-vermogen produceert.



Figuur 10 DC-vermogen ten opzichte van standaard testomstandigheden [13]

Omdat het zonnepaneel dus maar zelden zijn vermogen levert tot zijn STC-capaciteit, is het gebruikelijk en vaak economisch voordeliger om de omvormer te onder dimensioneren ten opzichte van het totaal geïnstalleerde DC vermogen.

Deze verhouding van PV tot omvormervermogen wordt de DC/AC-verhouding genoemd. Als deze verhouding te agressief wordt gedimensioneerd bestaat de kans dat het PV-systeem meer vermogen levert dan dat de omvormer aankan, wanneer dit voorkomt zal de omvormer de spanning en uitgangsvermogen verlagen. Dit verlies staat beter bekend als "clipping". Het clipping verlies is niet zo groot als bijvoorbeeld schaduwverliezen, maar kan nog steeds een merkbaar effect geven op het gehele systeem. [13]



Figuur 11 Verhouding DC/AC ratio versus clippingverliezen [13]

In Figuur 11 is de verhouding weergegeven tussen de DC/AC-verhouding versus de clippingverliezen. Hierin valt op dat voor zuid georiënteerde opstelling een snellere clipping ontstaat, dit komt mede doordat energie intensiteit op het zonnepaneel hoger ligt dan voor oost-west opstelling. De volgende twee DC/AC-verhoudingen worden voorgesteld om de scenario's uit te werken; namelijk voor een zuid georiënteerde opstelling ongeveer 1,25 en voor een oost-west opstelling ongeveer 1,45.

Met behulp van de volgende set condities is de energieopbrengst berekend voor de verschillende scenario's:

Weer gegevens	: TMY, 10km grid, meteonorm			
Hoek zon	: Meteo Lat/Lng			
Omzetting model	: Perez model			
Temperatuur model	: Scandia model	Parameters:	a	b
			-3,56	-0,075
				Temperatuur Δ
				3°C
Paneel vervuiling	: 2,2%			
Bestralingsvariantie	: 1%			
Cel temperatuur spreiding	: 4°C			
Module afwijking	: 0% tot 1,5%			
AC system verlies	: 1%			

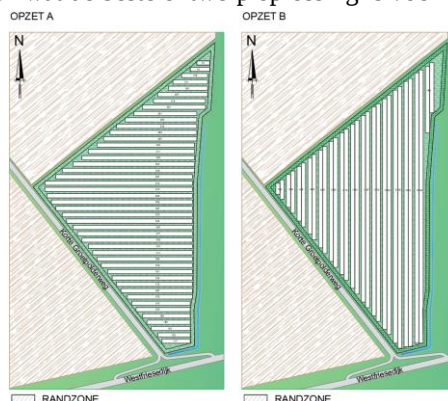
De uitkomsten van alle verschillende scenario's zijn weergegeven in Tabel 5. Hierin wordt het maximaal aantal panelen op het perceel, maximale DC aansluitwaarde en energieopbrengst over een jaar weergegeven.

Hoek	Opstelling	Jinko Solar			LONGi Solar			JA Solar		
		JKM330M-60-V			LR4-60-HPH-370M			JAM60S09-320/PR		
		Panelen	MWp	GWh/jaar	Panelen	MWp	GWh/jaar	Panelen	MWp	GWh/jaar
10	Oost-West	21792	7,3	6,695	20796	7,69	7,024	22272	7,13	6,535
12,5	Oost-West	22752	7,5	6,843	20980	7,76	7,040	22860	7,31	6,664
15	Oost-West	21423	7,07	6,418	20007	7,4	6,680	21582	6,9	6,276
17,5	Oost-West	19268	6,32	5,738	17970	6,65	6,012	19270	6,16	5,606
20	Oost-West	19315	6,29	5,770	17792	6,58	6,016	19196	6,14	5,640
10	Zuid	19432	6,42	6,405	17804	6,59	6,553	19604	6,27	6,269
12,5	Zuid	18136	6	6,075	16624	6,15	6,206	18308	5,85	5,939
15	Zuid	17076	5,64	5,786	15654	5,79	5,917	17244	5,51	5,623
17,5	Zuid	16228	5,36	5,557	14876	5,5	5,675	16362	5,23	5,422
20	Zuid	15368	4,96	4,991	14084	5,21	5,414	15130	4,84	4,870
10	Zuidoost	19556	6,47	6,321	17920	6,63	6,462	19752	6,32	6,195
12,5	Zuidoost	18292	6,05	5,996	16796	6,21	6,127	18488	5,91	5,859
15	Zuidoost	17199	5,7	5,686	15762	5,83	5,795	17397	5,56	5,552
17,5	Zuidoost	16280	5,38	5,411	14932	5,52	5,528	16462	5,26	5,297
20	Zuidoost	15430	4,98	4,902	14122	5,22	5,259	15204	4,86	4,796
10	Zuidwest	19480	6,47	6,245	17920	6,63	6,371	19664	6,29	6,078
12,5	Zuidwest	18040	6,04	5,875	16748	6,2	6,008	18292	6,03	5,859
15	Zuidwest	17175	5,69	5,562	15771	5,84	5,688	17271	5,52	5,402
17,5	Zuidwest	16216	5,39	5,296	14936	5,53	5,413	16384	5,24	5,158
20	Zuidwest	15380	4,98	4,853	14164	5,24	5,147	15138	4,84	4,717

Tabel 5 Energieopbrengst per scenario

Op basis van de gemaakte analyse zal een opstelling met een hellingshoek van 10 graden de beste energieopwekking geven. Een opstelling van 20 graden of hoger zal een hogere kWh/kWp ratio geven omdat de invalshoek van de zon optimaler is dan voor 10 graden. Bij de 10 graden opstelling kan er meer DC-vermogen geïnstalleerd worden maar dat resulteert in een lagere kWh/kWp ratio, doordat deze twee opstellingen dicht op elkaar geplaatst kunnen worden met weinig tot geen schaduwverliezen van rij-tot-rij afstand is hierdoor de bedekkingsgraad van het perceel hoger dan bijvoorbeeld voor een 20 graden opstelling, dit resulteert dan weer in een hogere energieopbrengst dan een opstelling met een hoge kWh/kWp ratio.

Aan de hand van de 10 graden zuid, 10 en 12,5 graden oost-west opstelling zal er verder worden uitgewerkt in hoofdstuk 2.3, voor de indeling en omvormers en in hoofdstuk 2.4 voor de DC-bekabeling waarna een multi-criteria analyse volgt om te bekijken wat de beste ontwerp oplossing is voor het perceel.

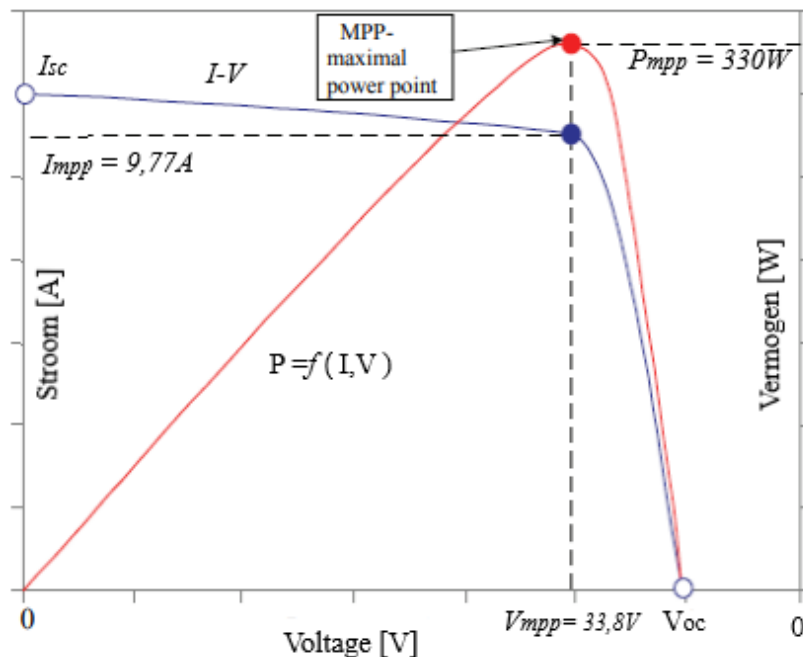


Figuur 12 Indeling voorbeeld perceel Zuid(links) en Oost-West(rechts) opstelling

2.3 OMVORMER OPTIMALISATIE

De omvormer heeft uitsluitend het doel om de geproduceerde elektriciteit om te zetten van gelijkspanning naar wisselspanning, zodat de elektriciteit terug geleverd kan worden aan het openbare elektriciteitsnet. Aan deze omvormers zullen strings met zonnepanelen aangesloten worden. De bepaling van het optimale aantal zonnepanelen in een string zal sterk af hangen van de technische gegevens van het gekozen zonnepaneel en omvormer. Met behulp van een set theoretische berekeningen kunnen deze getallen gevonden worden en zal binnen dit hoofdstuk uitgevoerd zijn als praktisch voorbeeld van de JINKO solar JKM330M-60-V.

In het geval van de standaard test condities zal zonnepaneel JKM330M-60-V de I-V en $P=f(I,V)$ curve hebben die getoond wordt in Figuur 13. De functie $P=f(I,V)$ laat zien hoe het uitgangsvermogen verloopt aan de hand van de spanning en stroom van het paneel. De maximale spanning V_{oc} kan gevonden worden door het paneel te testen onder de standaard test condities met open klemmen. De maximale stroom I_{sc} wordt verkregen door de klemmen kort te sluiten.



Figuur 13 I-V curve Jinko JKM330M-60-V

Het doel van de dimensionering is dus om het optimale aantal zonnepanelen in een string te krijgen om zo het maximale actief vermogen te krijgen van een string, hiervoor zijn verschillende parameters van belang. Met behulp van een berekening zal een stringspanning verkregen moeten worden die binnen het bereik zal liggen van de omvormers maximum power point tracker (MPPT). Alle elektrische en thermische eigenschappen van paneel JKM330M-60-V zijn weergegeven in Tabel 6.

PV module type	JKM330M-60-V
Power output	330 W _p
V_{mpp}	33,8 V
V_{oc}	41,3 V
I_{mpp}	9,77 A
I_{sc}	10,31 A
Temperatuur coëfficiënt ΔV_{oc}	-0,28 %/°C
Temperatuur coëfficiënt ΔI_{sc}	0,048 %/°C
Temperatuur coëfficiënt ΔP_{mpp}	-0,37 %/°C

Tabel 6 Elektrische en thermische eigenschappen Jinko JKM-330M-60-V [9]

Alle technische data die van de omvormer benodigd zijn voor het bepalen van de optimale aantal panelen in een string zijn weergegeven in Tabel 7. Voor de omvormer is gekozen voor de SUN2000-100KTL-M1 van fabrikant Huawei Solar.

Omvormer type	SUN2000-100KTL-M1
Maximaal AC Power	110000 W
Maximaal DC Voltage	1100 V
Bereik MPP voltage	200-1000 V
DC nominaal voltage	600 V
Minimum DC voltage/ start voltage	200 V
Maximale kortsluitstroom per MPPT	40 A
Aantal MPPT/ strings per MPPT	10/2 nr.

Tabel 7 Technische gegevens Huawei SUN2000-100KTL-M1 [7]

Wanneer een bepaalde zonnestraling het paneel bereikt zal de string het maximale DC-vermogen leveren als de MPPT van de omvormer geactiveerd is. Volgens de technische gegevens van SUN2000-100KTL-M1 zal de MPPT actief zijn wanneer U_{PV} ligt tussen:

$$U_{MPPT,min} = 200V \leq U_{PV} \leq 1000V = U_{MPPT,max} \quad (2.5)$$

Gedurende de werkingsperiode van het paneel zal de stringspanning binnen het MPPT-bereik moeten liggen om het maximaal actief vermogen te kunnen krijgen hiervoor is het belangrijk om te kijken welk voltage het paneel heeft wanneer de cel temperatuur ligt tussen de 15°C en 45°C. De V_{MPP} voor een enkel paneel kan berekend worden met formule 2.6 [14]:

$$V_{MPP,T} = V_{MPP,STC} \left[1 + \frac{\Delta V_{MPP}}{100} (T - T_{STC}) \right] \quad (2.6)$$

Hierin is ΔV_{mpp} de temperatuur coëfficiënt voor voltage verandering door de temperatuur tijdens MPP, $V_{MPP,STC}$ het paneel MPP voltage tijdens de standaard test condities. Voor JKM330M-60-V zijn dat: $\Delta V_{mpp} = -0,37\%/^{\circ}C$ en $V_{MPP,STC} = 33,8V$. Voor het gekozen paneel zal bij een cel temperatuur van $T=15^{\circ}C$ de MPP spanning $V_{MPP,15} = 35,3V$ en bij $T=45^{\circ}C$ zal de MPP spanning $V_{MPP,45} = 31,3V$ zijn. Aan de hand van deze twee waarden en het bereik van de MPP kan een minimum en maximum aantal panelen per string berekend worden met formule 2.7 en 2.8 [14]:

$$n_{s,min} = \frac{U_{MPPT,min}}{V_{MPP,45}} = \frac{200}{35,3} = 5,66 \Rightarrow 6 \text{ modules/string} \quad (2.7)$$

$$n_{s,max} = \frac{U_{MPPT,max}}{V_{MPP,15}} = \frac{1000}{31,3} = 31,94 \Rightarrow 31 \text{ modules/string} \quad (2.8)$$

Naast dat $n_{s,max}$ verkregen kan worden door te kijken naar de maximale power point spanning zal er ook gekeken moeten worden of in het slechte scenario de maximale DC ingangsspanning van de omvormer niet wordt overschreden. Het slechte scenario voor een string is wanneer deze in open circuit is. De maximale ingangsspanning zal dus gecheckt moeten worden wanneer de string voltage het hoogst is. De string voltage zal het hoogst zijn wanneer de cel temperatuur het laag is. Voor deze check zal voor de temperatuur $T=-10^{\circ}C$ gebruikt worden in formule 2.9 [14]:

$$V_{OC,T} = V_{OC,STC} \left[1 + \frac{\Delta V_{OC}}{100} (T_{min} - T_{STC}) \right] \quad (2.9)$$

Hierin is ΔV_{oc} de temperatuur coëfficiënt voor voltage verandering door de temperatuur tijdens open circuit, $V_{oc,STC}$ het paneel open klemspanning tijdens de standaard test condities. Voor JKM330M-60-V zijn dat: $\Delta V_{oc} = -0,28\%/^{\circ}C$ en $V_{oc,STC} = 41,3V$. Voor het gekozen paneel zal bij een cel temperatuur van $T = -10^{\circ}C$ de openklemming spanning $V_{oc,-10} = 44,7V$ zijn. Met behulp van formule 2.10 zal er een tweede check gedaan moeten worden of het maximaal aantal per panelen string van formule 2.8 voldoet of dat er minder panelen in een string aangesloten kunnen worden.

$$n_{s,max2} = \frac{V_{DC,ingang}}{V_{oc,T}} = \frac{1100}{44,77} = 24,57 \Rightarrow 24 \text{ modules/string} \quad (2.10)$$

Met $V_{DC,ingang} = 1100V$ en $V_{oc,T} = 44,7V$ kunnen er maar maximaal 24 panelen in een string aangesloten worden in plaats van 31 panelen zoals gezien in formule 2.8. Wanneer de openklem spanning de maximale ingangsspanning van omvormer overschrijdt kan permante beschadiging aan de elektronica ontstaan door de overspanning.

Naast de check op spanning zal ook gecontroleerd moeten worden of de maximale stroom niet overschreden wordt. Volgens de technische data van de SUN2000-100KTL-M1 omvormer zal er een maximale kortsluitstroom van $I_{PV,max} = 40A$ per MPPT mogen lopen zonder schade op te leveren aan de elektronica. Bij het bereiken van de maximale kortsluitstroom per string moet rekening gehouden worden dat wanneer de cel temperatuur stijgt ook de stroom van het paneel zal stijgen. Voor deze check zal voor de temperatuur $T = 55^{\circ}C$ gebruikt worden in formule 2.11 [14]:

$$I_{sc,T} = I_{sc,STC} \left[1 + \frac{\Delta I_{sc}}{100} (T_{max} - T_{STC}) \right] \quad (2.11)$$

Hierin is ΔI_{sc} de temperatuur coëfficiënt voor stroom verandering door de temperatuur tijdens kortsluiting, $I_{sc,STC}$ is het paneel kortsluitstroom tijdens de standaard test condities. Voor JKM330M-60-V zijn dat: $\Delta I_{sc} = 0,048\%/^{\circ}C$ en $I_{sc,STC} = 10,31A$. Voor het gekozen paneel zal bij een cel temperatuur van $T = 55^{\circ}C$ de kortsluitstroom $I_{sc,55} = 11,69A$ zijn. De omvormer SUN2000-100KTL-M1 is voorzien van twee aansluitingen per MPPT. De maximaal op te treden kortsluitstroom per MPPT zal $2 \times 11,69 = 23,37A$ zijn. De maximale kortsluitstroom van 40A per MPPT zal niet overschreden worden.

Nu weten we dat wanneer zonnepaneel JKM330M-60-V aangesloten wordt op een SUN2000-100KTL-M1 omvormer een minimale string lengte van 6 panelen en een maximale string lengte van 24 panelen aangesloten kunnen worden om binnen de specificaties van de omvormer te blijven. Maar de optimale stringlengte is niet alleen afhankelijk van hoeveel panelen er in een string aan een omvormer aangesloten kunnen worden. Hiervoor zal ook gekeken moeten worden naar de vermogensverhouding tussen de DC ingang en de AC uitgang en naar de maakbaarheid van een string voor een veldopstelling. Met behulp van formule 2.12 kan gecheckt worden hoeveel panelen er in een string aangesloten kunnen worden voor een gewenste DC-AC ratio; voor zuid georiënteerd zal dit ongeveer 1,25 zijn en voor een oostwest opstelling ongeveer 1,45.

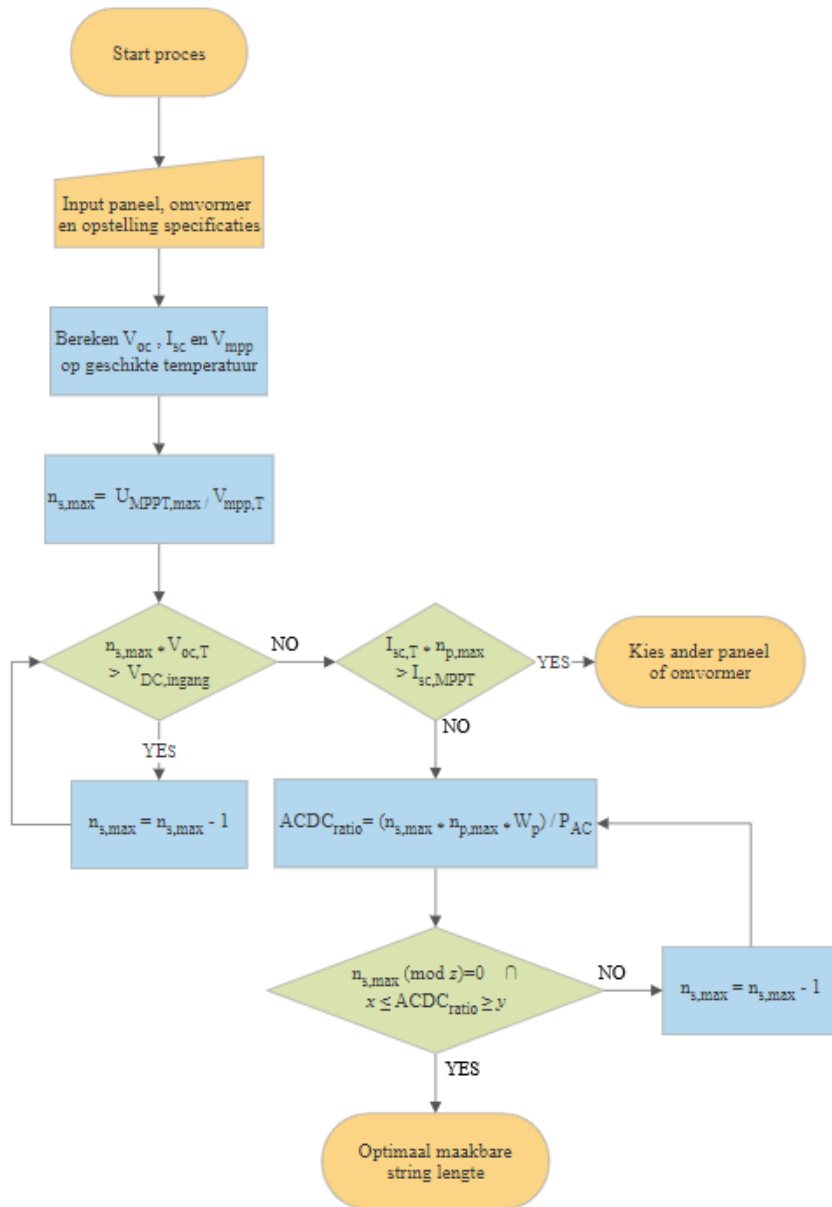
$$n_{s,ACDC} = \frac{DCAC_{ratio} \cdot P_{AC}}{n_{p,max} \cdot W_p} \quad (2.12)$$

Hierin is P_{AC} het maximale AC uitgangsvermogen, $n_{p,max}$ het maximaal aangesloten strings parallel en W_p het maximaal uitgangsvermogen van het zonnepaneel. Voor de SUN2000-100KTL-M1 is $P_{AC} = 110000W$ en $n_{p,max} = 20$. Met zonnepaneel JKM330M-60-V en een DC-AC ratio van ongeveer 1,25 zal er dus maar 21 panelen per string aangesloten mogen worden.

Vanuit hoofdstuk 2.2 hebben we gezien dat een opstelling van 10 en 12,5 graden de beste energie opwekking kunnen bieden hiervoor zullen er wel 4 panelen in landscape oriëntatie geplaatst moeten worden dus 21 panelen per string zal niet de beste oplossing bieden omdat het een oneven getal is waar geen goede matrix aan panelen mee gerealiseerd kan worden. Hiervoor zullen de volgende twee criteria gesteld moeten worden om het optimaal aantal panelen per string te kunnen realiseren:

$$n_{s,max}(\text{mod } 4) = 0 \quad \cap \quad ACDC_{ratio} \geq 1,2 \quad (2.13)$$

Door de modulo van te gebruiken van het aantal panelen in landscape mode kunnen we een maakbare tafel creëren. De AC/DC ratio zal er voor moeten zorgen dat we geen te lage ratio krijgen. Aan de hand van twee bovenstaande criteria en formules kan een oplossingsproces ontworpen worden om voor elk paneel en omvormer de beste mogelijke oplossing te vinden. De flowchart is te zien in Figuur 14.



Figuur 14 Flowchart optimalisatie proces string lengte

Met behulp van de flowchart in Figuur 14 zal er gekeken moeten worden welke omvormer mogelijk de beste oplossing zou kunnen bieden. Om verschillende omvormersopties te onderzoeken zal vanuit de ENGIE-lijst van goedgekeurde fabrikanten gekeken worden naar de volgende type omvormers:

- Huawei Solar
 - SUN2000-100KTL-M1
 - SUN2000-100KTL-H1
 - SUN2000-185KTL-H1
- SMA Solar Technology
 - STP50-40
- Delta Energy Systems
 - M88H 400V
 - M88H 480V
 - M125HV
- Sungrow
 - SG110CX
 - SG250HX

De bovenstaande type omvormers zijn de grootst vermogen string omvormer die nu op de markt beschikbaar zijn van deze vier fabrikanten. Er is gekozen voor een omvormer met zowel een systeem voltage van 1000VDC en 1500VDC en met een variërende uitgangspanning van 400V, 480V, 800VAC. De uitkomsten voor de optimale string lengte voor een zuid georiënteerde opstelling zijn genoteerd in Tabel 8 en voor een oost-west opstelling in Tabel 9.

		Jinko Solar		LONGi Solar		JA Solar		
		JKM330M-60-V		LR4-60-HPH-370M		JAM60S09-320/PR		
Systeem	Type omvormer	String lengte	DC/AC ratio	String lengte	DC/AC ratio	String lengte	DC/AC ratio	
String Up & down racking	1000VDC	Huawei SUN2000-100KTL-M1	20	1,20	-	-	20	1,2
		SMA STP50-40	16	1,27	-	-	16	1,27
		Delta M88H 400V	-	-	-	-	-	-
		Sungrow SG110CX	24	1,30	20	1,21	24	1,3
		Delta M88H 480V	-	-	16	1,21	-	-
	1500VDC	Huawei SUN2000-100KTL-H1	32	1,21	-	-	32	1,21
		Huawei SUN2000-185KTL-H1	32	1,19	32	1,22	32	1,19
		Delta M125HV	-	-	-	-	-	-
		Sungrow SG250HX	-	-	-	-	-	-
String Along racking	1000VDC	Huawei SUN2000-100KTL-M1	20	1,20	-	-	20	1,2
		SMA STP50-40	16	1,27	-	-	16	1,27
		Delta M88H 400V	-	-	-	-	-	-
		Sungrow SG110CX	22	1,19	20	1,21	22	1,19
		Delta M88H 480V	18	1,22	16	1,21	18	1,22
	1500VDC	Huawei SUN2000-100KTL-H1	32	1,21	-	-	32	1,21
		Huawei SUN2000-185KTL-H1	32	1,19	32	1,22	32	1,19
		Delta M125HV	-	-	-	-	-	-
		Sungrow SG250HX	-	-	-	-	-	-

Noot: Als een cel leeg is zal er geen geschikte oplossing zijn.

Tabel 8 Optimale string lengte voor zuid georiënteerde opstelling met omvormer x

		Jinko Solar		LONGi Solar		JA Solar		
		JKM330M-60-V		LR4-60-HPH-370M		JAM60S09-320/PR		
Systeem	Type omvormer	String lengte	DC/AC ratio	String lengte	DC/AC ratio	String lengte	DC/AC ratio	
String Up & down racking	1000VDC	Huawei SUN2000-100KTL-M1	24	1,44	24	1,61	24	1,44
		SMA STP50-40	20	1,58	16	1,42	20	1,58
		Delta M88H 400V	20	1,70	16	1,52	20	1,70
		Sungrow SG110CX	-	-	24	1,45	-	-
		Delta M88H 480V	-	-	20	1,51	-	-
	1500VDC	Huawei SUN2000-100KTL-H1	-	-	-	-	-	-
		Huawei SUN2000-185KTL-H1	-	-	-	-	-	-
		Delta M125HV	28	1,48	28	1,66	28	1,48
		Sungrow SG250HX	-	-	-	-	-	-
	String Along racking	1000VDC	Huawei SUN2000-100KTL-M1	24	1,44	22	1,48	24
SMA STP50-40			18	1,43	16	1,42	18	1,43
Delta M88H 400V			18	1,53	16	1,52	18	1,53
Sungrow SG110CX			-	-	24	1,45	-	-
Delta M88H 480V			22	1,49	-	-	-	-
1500VDC		Huawei SUN2000-100KTL-H1	-	-	-	-	-	-
		Huawei SUN2000-185KTL-H1	-	-	-	-	-	-
		Delta M125HV	28	1,48	26	1,54	28	1,48
		Sungrow SG250HX	-	-	-	-	-	-

Noot: Als een cel leeg is zal er geen geschikte oplossing zijn.

Tabel 9 Optimale string lengte voor oost-west opstelling met omvormer x

Na de berekening van de optimale string lengte en het bepalen van de hoeveelheid panelen op het perceel is het mogelijk om het aantal benodigde omvormers voor het systeem te berekenen aan de hand van formule 2.14.

$$n_i = \left\lceil \frac{n_{pv}}{n_{s,max} \cdot n_{p,max}} \right\rceil \quad (2.14)$$

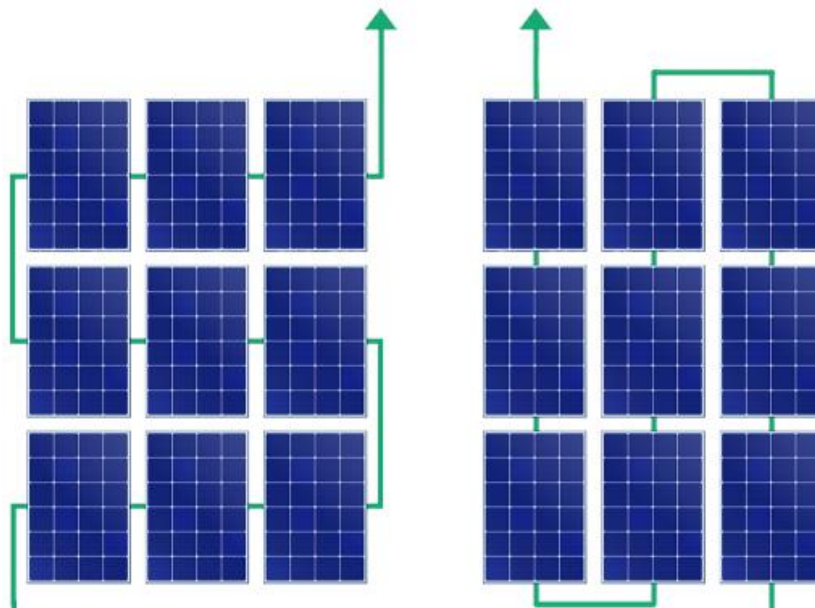
Hierin is n_{pv} het aantal panelen vanuit Tabel 5, $n_{p,max}$ het maximaal aangesloten strings parallel en $n_{s,max}$ het maximaal aangesloten panelen in serie. Binnen formule 2.14 wordt er uitgegaan van een optimale plaatsing van de panelen op het perceel. Helaas zal de maakbaarheid niet helemaal optimaal zijn hierdoor bestaat de kans dat er minder panelen geïnstalleerd kunnen worden dan de eerder verwachte aantal panelen. Dit komt mede doordat bij de eerste opzet van het maximaal aantal panelen de paneel configuratie een matrix was van 4 panelen bij 1. Om te voorkomen dat de strings tussen verschillende rijen komen zal een matrix (ook wel tafel genoemd) opgesteld moeten waarin een matrix een string is. Bij bijvoorbeeld de SUN2000-100KTL-M1 omvormer en paneel JKM330M-60-V zuid georiënteerd kunnen er 20 panelen in een matrix hiervoor kunnen we de string op twee manieren opzetten namelijk: langs de panelen en omhoog en omlaag de panelen. Dit houdt in dat voor een string langs de panelen de matrix 2 bij 10 zal zijn en voor een omhoog en omlaag configuratie een matrix van 4 bij 5. Zie ook Figuur 15.

Ook zou er rekening gehouden moeten worden met een centraal pad in het midden van het perceel waar kabels, laagspanningsverdelers en compact station geplaatst kunnen worden die met een gemotoriseerd voertuig bereikbaar moeten zijn voor wanneer er onderhoud of vervanging van materiaal moet plaats vinden. Door deze matrix als een tafel te zien en het tussen pad waar kabels, laagspanningsverdelers en omvormers geplaatst kunnen worden zal het niet altijd mogelijk zijn volledig gebruik te maken van de beschikbare grond; vanwege de driehoekige vorm van het perceel is het niet altijd mogelijk om een volledige tafel te plaatsen en zou toepassing van eventuele kleinere omvormers naast de grote omvormer een geschikte oplossing kunnen bieden om beter gebruikt te maken van het perceel.

Voor de volgende fabrikanten kunnen de volgende kleinere omvormer toegepast worden naast de grotere string omvormers van Tabel 9:

- Huawei Solar
 - SUN2000-60KTL-M0
 - SUN2000-36KTL
- Delta Energy Systems
 - M50A
- Sungrow
 - SG33CX
 - SG40CX
 - SG50CX

Het tussen pad zal minimaal 4 meter breed zijn en dient voor een zuid opstelling verticaal te zijn en voor een oostwest opstelling horizontaal om de bekabeling op een nette manier te kunnen plaatsen.



Figuur 15 string langs de panelen(links) en omhoog en omlaag de panelen(rechts)

2.4 KABEL OPTIMALISATIE

Om de energie van het zonnepaneel naar de omvormer/laagspanningsverdeler te brengen zullen verschillende kabels benodigd zijn om deze punten met elkaar te verbinden. Om tot een optimaal kabel systeem te komen zijn verschillende technische en economische overwegingen van toepassing. Voor de technische overweging is dit de kabeldiameter en het spanningsverlies over het traject, voor de economische overweging is dit de locatie van de omvormers.

Om tot een geschikte kabel te komen zal het systeem moeten voldoen aan de laatste normen van NEN1010. Aanvullend hierop heeft ENGIE Generation Europe voor de Nederlandse zonne-parken een aanvullende eis opgesteld namelijk dat het spanningsverlies van de laagspanningszijde van het park niet boven de 2,5% komt. [15] Hiermee zal dus rekening gehouden moeten worden bij het kiezen van de juiste kabeldiameter. Doordat de meeste zonnepanelen zijn uitgevoerd met een MC4 connector kan de kabel diameter niet kleiner dan 4 mm² zijn en niet groter dan 6 mm². Om tot de juiste kabeldiameter te komen zal er gekeken moeten worden naar de aanleg van de kabel en welke correctiefactoren van toepassing zijn om te bepalen wat de maximale belastbaarheid is van deze configuratie. Voor dit park kunnen twee configuratie van toepassing zijn namelijk: een mantelbuis in de grond en in een ladderbaan. Hierin zal de meeste negatieve uitkomst de kabeldiameter bepalend zijn. Met behulp van de tabellen van de NEN1010 en tabel A.3 EN50618 is voor de worst case scenario de kabeldiameter bepaald en genoteerd in Tabel 10.

$$I_b \leq I_z \cdot \text{correctiefactoren} \quad (2.15)$$

Correctiefactoren installatiemethoden

	IM	BM	Ketens	Temp	S.W.W
Kabel in draadgoot	32	E of F	0,31	0,92	n.v.t.
Kabel in de grond	70	D1	0,37	1	1,2

Maximale kabel belastbaarheid					
I_z kabel in grond			I_z kabel in goot		
4 mm ²	24,42	A	4 mm ²	15,68	A
6 mm ²	31,08	A	6 mm ²	19,96	A

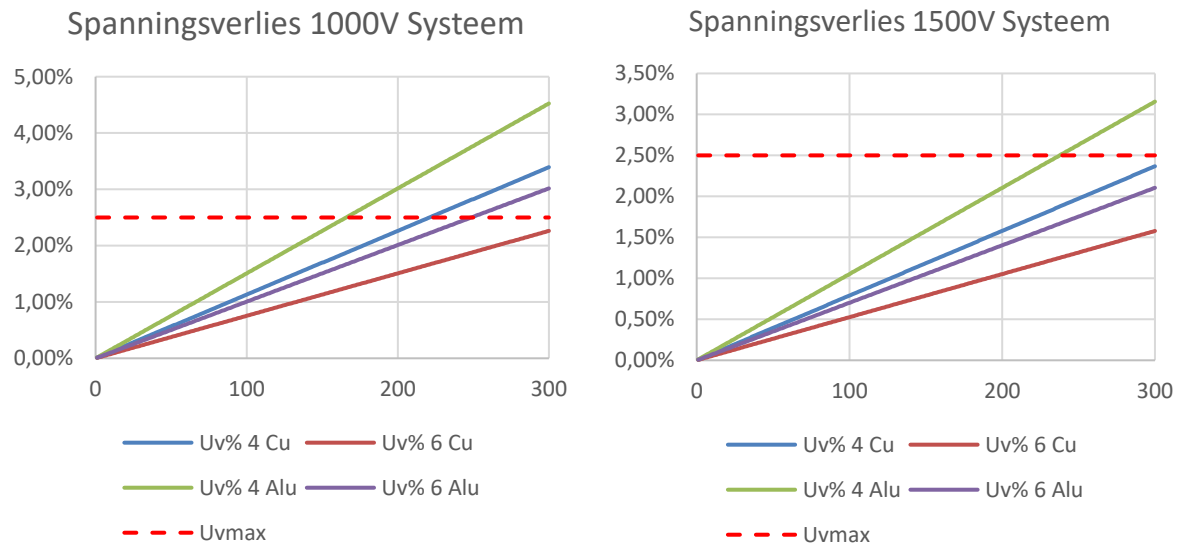
Noot: Exacte keten waarde niet bekend en extrapoleert uit tabel! Meting is vereist om dit te verifiëren!

Tabel 10 Maximale belastbaarheid paneel kabel

Wanneer de maximale belastbaarheid wordt vergeleken met de maximale op te treden stroom van een string zijn zowel een 4 mm² als 6 mm² kabel geschikt. Om tot de definitieve kabeldiameter te komen zal de spanningsval in percentage over het traject bepaald moeten worden. Met behulp van formule 2.16 kan het spanningsval in percentage berekend worden [16]:

$$U_v \% = \frac{\left(\frac{2 \cdot l \cdot I \cdot R_c}{1000} \right)}{V_{bron}} \cdot 100\% \quad (2.16)$$

Hierin is $U_v\%$ het spanningsverlies in percentage, l de kabel lengte en R_c de kabelweerstand in Ω/km . De R_c kan per kabel fabrikant verschillend zijn door het gebruik van verschillende isolaties of kern configuratie. Gemiddeld zal de R_c waarde voor 4 mm² en 6 mm² koper: 4,95 Ω/km en 3,3 Ω/km zijn en voor aluminium 4 mm² en 6 mm²: 6,6 Ω/km en 4,4 Ω/km . Om te kijken hoelang een string kan zijn is een grafiek $f(l)$ geplot in Figuur 16 van een string lengte van 1 meter tot en met 300 meter. Voor V_{bron} is de spanningswaarde gebruikt wanneer het paneel net in geleiding komt vanuit open klemspanning.



Figuur 16 Spanningsverlies DC-Kabels

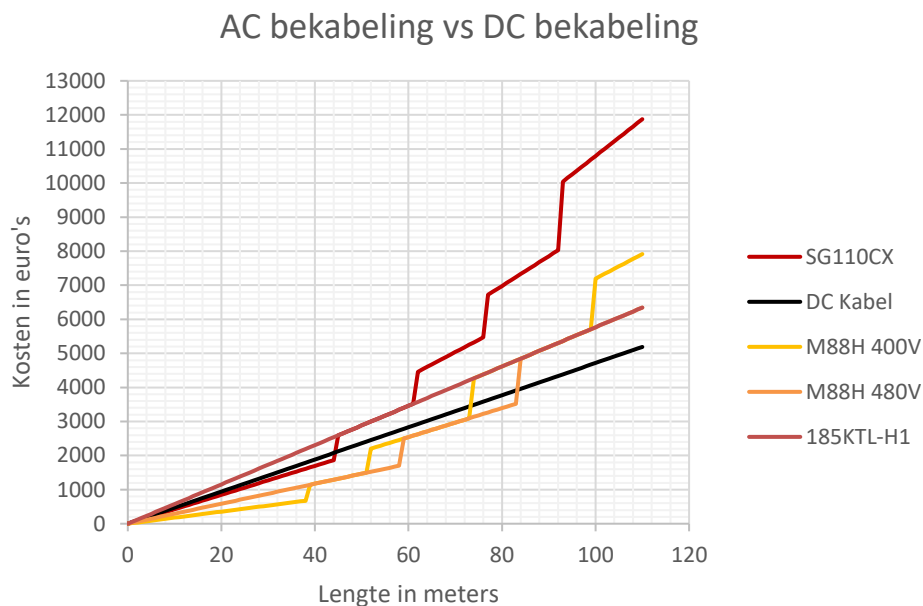
Vanuit Figuur 16 is te zien dat de maximale lengte voor 1000V systemen met 4 mm² aluminium 166 meter is, voor 4 mm² koper 221 meter, 6 mm² aluminium is 249 meter en voor 6 mm² koper >300 meter. Voor 1500V systemen met 4 mm² aluminium 236 meter is, voor de overige drie kabel groter dan 300 meter. Afhankelijk van de omvormer locatie en de lengte van de kabel kan bepaald worden welke kabel diameter geschikt is voor het gelijkspanningsdeel. Hierin heeft 6 mm² koper wel de voorkeur omdat deze onder de geëiste spanningsverlies grens blijft.

De omvormer kan op verschillende manieren geplaatst worden zo kunnen de omvormers centraal op één plek geplaatst worden of decentraal aan de onderconstructie van de zonnepanelen. Om de optimale plaatsing van de omvormers te kunnen bepalen zal zowel technisch als economisch gekeken moeten worden naar de beste oplossing van zowel de gelijkspanningsbekabeling als de wisselspanningsbekabeling. Voor het technische aspect zal dit de full-load I^2R verliezen zijn en voor het economische aspect de aanschaf waarde van de bekabeling.

Vanuit een eerste analyse zouden de minste I^2R verliezen ontstaan voor omvormers op een centrale locatie. Door de hoge DC-spanning en relatief lage stroom per string kunnen lange afstanden afgelegd worden met minimale I^2R verliezen hierin zal in een normale situatie de maximale stroom I bereikt worden bij de standaard test condities wanneer het paneel op zijn maximale vermogen werkt. Wanneer het paneel minder energie opwekt dan de standaard test condities zal de stroom van het paneel minder zijn zoals gezien in de I-V curve in Figuur 13. De lagere stroom resulteert in lagere I^2R verliezen tijdens lagere zonne-instraling. Voor een omvormer zal de uitgangsstroom veel hoger liggen dan voor een aantal strings zo zou bijvoorbeeld voor de SUNGROW SG110CX omvormer de maximale wisselspanning uitgangsstroom 158,8A zijn. Doordat het DC ingangsvermogen groter is dan AC uitgangsvermogen zou de omvormer veel vaker op zijn maximale vermogen werken ten opzichte van de panelen die maar zeer zelden per jaar het maximale vermogen opwekken volgens de standaard test condities.

Ook kan dit aangetoond worden met een rekenvoorbeeld met de omvormer SUNGROW SG110CX. De maximale AC uitgangsstroom is 158,8A en heeft 18 DC-stringingangen. Om 110 meter af te leggen met AC-kabel is een 4x185 mm² kabel berekend met een I^2R verlies van 1051W tijdens maximaal vermogen. Voor een 110 meter 6mm² koper DC-kabel zal de I^2R verlies 42W zijn tijdens maximaal vermogen hierin zal nog wel rekening gehouden moeten met de 18 verschillende ingangen wat uitkomt op een totale I^2R verlies van 756W tijdens maximaal vermogen van het paneel. Wanneer het paneel minder energie opwerkt zal het verlies lager liggen.

Een tweede analyse kan gemaakt worden door de kosten van de bekabeling in een grafiek te plotten. Wanneer de functie van de AC-bekabeling de functie van de DC-bekabeling snijdt krijg je het maximaal aantal meters waarin de AC-bekabeling een financiële geschiktere oplossing zou kunnen bieden dan het traject uit te leggen met DC-bekabeling. Wanneer de omvormers aan de onderconstructie van de panelen geplaatst wordt met vier centrale laagspanningsverdelers zou de maximale lengte van verdeler tot omvormer ongeveer 110 meter zijn. In Figuur 17 is de grafiek weergegeven. Voor elke sprong in de AC-bekabeling geldt dat er een dikkere kabeldiameter benodigd is voor de afstand dit kan mede komen doordat het spanningsverlies in de kabel te hoog wordt of dat de maximale kortsluitlengte bereikt is. De AC-kabels zijn berekend aan de hand van de tabellen van de NEN1010.



Figuur 17 Kosten AC-bekabeling versus DC-bekabeling

Vanuit Figuur 17 is te zien dat de kosten voor AC-bekabeling snel oplopen naarmate er grotere afstanden afgelegd moet worden, hieruit kan geconcludeerd worden dat voor dit perceel de optimale plaatsing van de omvormers centraal zal moeten geschieden. Wanneer de omvormers op centrale plekken geplaatst worden zou de DC-bekabeling dus extra afstand moeten afleggen om bij de panelen te kunnen komen. Nu zal de langste afstand met vier centrale plekken voor omvormers om bij de panelen te komen 275 meter zijn en zal de enige oplossing voor de DC kabeldiameter 6 mm² koper zijn om onder het geëiste spanningsverlies te blijven.

2.5 MULTI-CRITERIA ANALYSE

Met de gekozen ontwerpen vanuit hoofdstuk 2.2 is een beoordeling gemaakt van meerdere criteria. Zo is voor elk ontwerp de optimale paneel afstand, optimaal aantal panelen in een string, omvormer locatie, kabeldiameter en een tussen pad voor onderhoud doeleinden gesimuleerd in HelioScope om zo de energieopbrengst over een jaar te krijgen. Aan de hand van het aantal omvormers, kabellengte en opbrengst kan een score van het systeem benaderd worden. De score is gebaseerd op de technische aspecten van het systeem. Wanneer relevante economische zaken zoals gedetailleerde aanlegkosten en prijs van een kWh (SDE+ subsidies) zou worden meegenomen zou dit een ander beeld kunnen geven op het meest geschikte ontwerp.

Fabrikant	Opstelling & omvormer	GWh/jaar (70%)	Aantal omvormers (15%)	Kabel meter (15%)	Score [/10]
JA SOLAR	10-OW-100KTL-M1	5,86	43	173652	6,96
	10-OW-M125HV	5,92	37	159408	7,22
	10-OW-M88H 480V	5,8	63	208268	6,29
	10-Z M88H 480V	5,71	57	177252	6,51
	10-Z 100KTL-H1	5,39	49	97655	6,82
	10-Z 100KTL-M1	5,89	43	174730	6,98
	10-Z 185KTL-H1	5,55	32	98126	7,32
	10-Z SG110CX	5,81	44	135315	7,12
JINKO SOLAR	10-OW M125HV	6,12	37	156786	7,44
	10-OW 100KTL-M1	6,05	43	174730	7,14
	10-Z 100KTL-H1	5,79	48	95582	7,26
	10-Z 100KTL-M1	5,87	47	158881	6,98
	10-Z 185KTL-H1	5,64	32	101841	7,39
	10-Z SG110CX	5,71	43	131864	7,06
LONGi SOLAR	10-OW M125HV	5,97	35	141675	7,42
	10-OW M88H 400V	6,32	66	219157	6,72
	10-OW 100KTL-M1	6,38	43	162297	7,60
	10-OW M88H 480V	6,14	58	195957	6,80
	10-OW SG110CX	6,42	45	149143	7,71
	10-Z SG110CX	6,12	45	139599	7,38
	10-Z M88H 480V	3,74	60	192777	4,38
	10-Z 185KTL-H1	5,86	29	115678	7,59

Tabel 11 Multi-criteria beoordeling

Vanuit Tabel 11 is te zien dat een opstelling van 10 graden oostwest met het paneel van LONGi solar en de omvormer van SUNGROW de beste ontwerp oplossing zou bieden. Dit komt mede door de goede efficiency van het LONGi paneel waardoor een hoger vermogen uit het paneel gehaald kan worden. Hierdoor kan de SUNGROW omvormer optimaal gebruikt worden omdat het aangesloten DC-vermogen op de optimale DC/AC verhouding komt waardoor minimale clippingverliezen ontstaan. Bij de andere omvormers is de DC/AC verhouding hoger en wordt er dus extra energie verloren door clippingverliezen wanneer de zoninstraling en intensiteit hoog is. Een andere criteria was de maakbaarheid en dus de stringlengte. Met het LONGi paneel kunnen er 24 panelen in een string aangesloten worden op één DC-ingang wat het maximum is voor deze omvormer. Bij andere omvormer zal het aantal 20 panelen zijn om binnen de specificaties te blijven en wat maakbaar is als een tafel waardoor extra omvormers en kabel benodigd zijn. Het volledige jaarlijkse productierapport van het optimale systeem is te vinden in bijlage 6.1 op pagina 49

3 SYSTEEM ONTWERP

Een grondgebonden PV-installatie bestaat niet alleen uit zonnepanelen en omvormers, er zijn veel meer zaken benodigd zoals een laagspanningsnet en soms zelf een middenspannings net om een compleet systeem te krijgen. Binnen dit hoofdstuk zal het beste ontwerp vanuit hoofdstuk 2.5 verder uitgewerkt worden naar zijn detail ontwerp van omvormers tot het overdrachtpunt van de netbeheerder. Om dit verder uit te werken zal in de eerste paragraaf het laagspanningsnet besproken worden over hoe er gedimensioneerd kan worden voor de laagspanningsverdelers, voedingskabel en de wijze van aanleg. Wanneer een groot vermogen getransporteerd moet worden zou dit op laagspanningsniveau tot 6300A kunnen geschieden echter het materiaal dat benodigd is om deze systemen te realiseren is zeer complex en komt met hoge prijs door het groot gebruik van koper railsystemen. Hierdoor kan het afhankelijk van de grootte van een systeem beter zijn om een klein laagspanningsnet te creëren met een middenspannings net dat op het spanningsniveau werkt van de lokale netbeheerder. In de tweede paragraaf van dit hoofdstuk zal besproken worden hoe er gedimensioneerd kan worden voor het middenspannings net en het overdrachtpunt van de lokale netbeheerder. Tot slot zal er naar alle systeemverliezen gekeken worden en wat de performance ratio van het gehele systeem is.

3.1 LAAGSPANNINGSINSTALLATIE

Voor de dimensionering en het ontwerp van het laagspanningsdeel van het park zijn enkele relevante normeringen van toepassing. Nederlandse wetgeving eist in een aantal situaties het toepassen van de stand der techniek, vooral gerelateerd aan veiligheid en duurzaamheid. Zo wordt in de Nederlandse bouwregelgeving verwezen naar NEN 1010 als voorschrift voor de uitrusting van elektrische laagspanningsinstallaties. Ook kan het een onderdeel zijn bij het toekennen van vergunningen (bijvoorbeeld gebruiks- of exploitatievergunningen) dat het object voldoet aan de laatste eisen uit de NEN1010. Tot slot kunnen in private contracten voor bijvoorbeeld verzekeringen voorwaardes zijn opgenomen dat de elektrische installatie voldoet aan de NEN1010 met als doel het risico op calamiteiten door brand tot een minimum te beperken. Binnen deze documenten zijn dus normen opgesteld waarin de bedrijfsvoering van de elektrische installatie op een goede manier kan worden gewaarborgd. Binnen deze paragraaf wordt veelvuldig informatie uit deze normen gehaald de bron kan gevonden worden in onderstaande opsomming.

Normering:	Bron:
NEN1010:2015 + C2:2016 Elektrische installaties voor laagspanning	[17]
NPR5310:2017 Nederlandse praktijkrichtlijn bij NEN 1010	[18]
NEN3140:2018 Bedrijfsvoering van elektrische installaties – Laagspanning	[19]
NEN8012:2015 Keuze van het leidingtype met als doel het beperken van schade als gevolg van brand van en via elektrische leidingen	[20]

Aanvullend op deze normeringen is door ENGIE Generation Europe voor de Nederlandse zonne-parken het document: *Electrical requirements for solar farms to be constructed in the Netherlands* opgesteld. Hierin wordt onder andere beschreven waaraan het laagspanningsdeel aan moet voldoen. [15]

Onder de term laagspanning vallen systemen lager dan 1500VDC en 1000VAC. Voor het bepalen van het laagspanningsnet zijn de verkregen gegevens van het optimale PV-systeem vanuit hoofdstuk 2.5 benodigd. Het optimale ontwerp bestaat uit 18.432 LONGi LR4-60PHP-370M panelen met 41 SUNGROW SG110CX, 4 SG50CX en 2 SG33CX omvormers met een DC/AC verhouding van 1,43. Dit zal neer komen op een totale AC aansluitwaarde van 4,78MW. Ook hebben we gezien dat voor de SUNGROW omvormers een centrale plaatsing gewenst is vanwege de kabeldiameter en kosten die hierbij komen. Uiteindelijk zal van de omvormers met 6 mm² koper kabel uitbedraad worden naar de panelen. Voor het ontwerp zal er top down gekeken worden vanaf het DC deel van het paneel tot omvormer en het AC deel van omvormer tot verdeelinrichting.

3.1.1 Gelijkspanningsontwerp

Binnen het gelijkspanningsdeel van de laagspanningsinstallatie valt alleen de bekabeling tussen de panelen en omvormers. In hoofdstuk 2.4 hebben we aangetoond dat 6mm² koper kabel de beste oplossing biedt voor het ontwerp, nu zal besproken worden welke voorwaarde voor de aanleg en beveiliging vereist zijn om een veilig DC-netwerk te kunnen realiseren. Om te beginnen zal een string beveiligd moeten worden tegen overstroom, kortsluiting en overspanning. Om op een juiste manier te beveiligen tegen overstroom, overbelasting en kortsluitstroom kan gebruik gemaakt worden van gPV-smeltzekeringen volgens NEN-EN-IEC 60268 of installatieautomaten volgens NEN-EN-IEC 60947-2/3 met de volgende voorwaarde dat de nominale spanning groter is dan de PV-opwekeenheden, dat de verbreekstroom gelijk is aan de PV-opwek en dat de beveiligingstoestellen bi directioneel werken. Wanneer stringomvormers toegepast worden zullen veel van deze beveiligingen al in omvormer ingebouwd zijn en voldoen aan de eisen van IEC62019. Maar wanneer bijvoorbeeld een centrale omvormers met combinerboxes wordt toegepast zullen deze beveiliging opties toegepast moeten worden! Tot slot zal er ook nog beveiligd moeten worden tegen overspanning. Overspanning kan veroorzaakt worden door atmosferische oorsprong of als gevolg van schakelhandelingen. Aanvullende toestellen voor overspanningsbeveiliging kunnen nodig zijn om beveiliging tegen transiënte overspanningen te bieden met betrekking tot gevaren die vanuit andere bronnen kunnen komen, zoals overspanningen op inkomende telefoon- of internetverbindingen. Wanneer een overspanningsbeveiliging toegepast moet worden zal dit een type II overspanningsbeveiliging zijn volgens de NEN-EN 50539-11. Om te bepalen of een overspanningsbeveiliging benodigd is kan een risicobeoordeling uitgevoerd met de volgende drie formules ([17] Bepaling 712.443.6):

$$L \geq L_{crit} \quad (3.1)$$

Hierin is L de lengte van de langste string tussen de omvormer en paneel in meter. En L_{crit} de lengte in meter voor wanneer een overspanningsbeveiliging benodigd is.

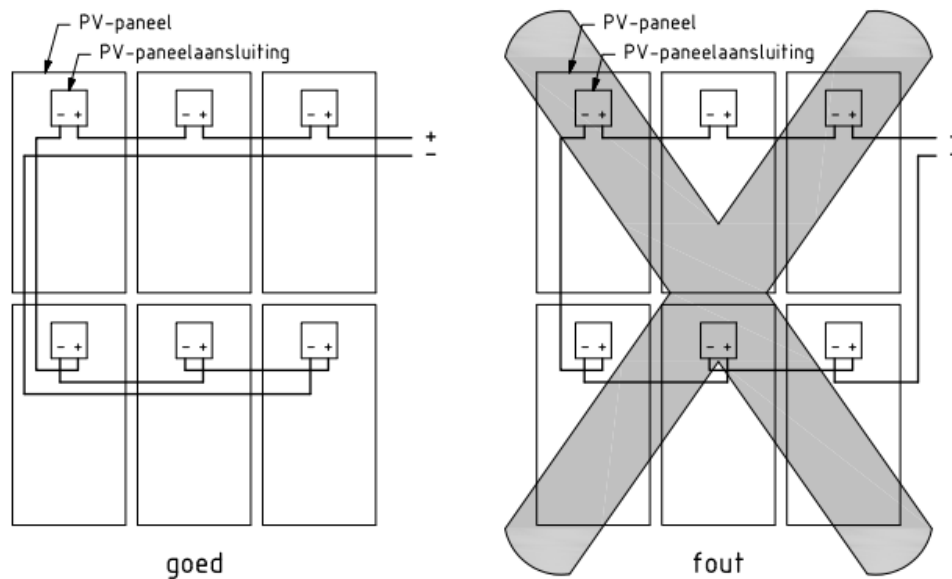
$$L_{crit} = \frac{x}{N_g} \quad (3.2)$$

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \quad (3.3)$$

Om L_{crit} te berekenen is N_g nodig. N_g is het aantal bliksemontladingen naar aarde (bliksemontladingen/km²/jaar). Deze waarde kan bijvoorbeeld verkregen worden van meetstation voor de plaatbepaling van blikseminslagen. Ook kan N_g berekend worden door het gemiddeld aantal onweersdagen (T_d) per jaar op keraunisch niveau. De hoeveelheid onweersdagen per jaar kan verkregen worden bij het KNMI. De waarde x is afhankelijk van de PV-opstelling. Voor een installatie in het vrije veld is dit 200, voor bewoning bestemd 115 en voor niet tot bewoning bestemd 450. De langste lengte voor ons systeem is ongeveer 275 meter. Wanneer we deze formules toepassen met een T_d van 26 onweersdagen per jaar zal de maximale lengte 85 meters bedragen. Onze stringlengte is groter dan de kritische lengte dus een overspanningsbeveiliging type II is vereist om de apparatuur te beschermen.

Nu het gehele DC-systeem beveiligd is zal er alleen nog maar gekeken moeten worden naar de aanleg van DC-bekabeling en wijze van aansluiten tussen de omvormer en de panelen. Om een juiste kabel te kiezen zal de DC-PV kabel moeten voldoen aan de NEN-EN 50618 en bestaan uit een eenaderige kabel met een niet metalen mantel. Zo zou een kabel voor een grondgebonden systeem resistent moeten zijn tegen elke omgevingstemperatuur, uitwendige warmtebronnen, water, mechanische belastingen, zonnestraling, Ultraviolette-straling en dieren.

Om een PV-string te bekabelen zal uitgekeken moeten worden dat er geen grote inductielus gecreëerd wordt. Een geïnduceerde spanning ten gevolge van een blikseminslag kan negatieve effecten hebben hiervoor is het vereist dat de plus- en minkabel zo dicht mogelijk bij elkaar worden gelegd om inductielussen klein te houden. Zie ook Figuur 18 Aanleg PV-string om inductielussen minimaal te houden. Ook de PE-leiding van het draagframe zal parallel aan de DC-bekabeling naar de omvormer moeten worden gelegd.



Figuur 18 Aanleg PV-string om inductielussen minimaal te houden [18]

Naast dat de plus en min kabel zo dicht mogelijk bij elkaar geplaatst moeten worden om inductielussen zo klein mogelijk te houden is het wenselijk om de plus en min kabel minimaal van elkaar te scheiden in bijvoorbeeld een kabelgoot met een scheidingsshot om voortplanting van parallelle vlambogen te voorkomen. Wanneer bijvoorbeeld door een isolatiefout een vlamboog ontstaat tussen de plus en min kabel van de string kan door de vonkoverslag de isolatie van alle kabels aangetast worden! Zeker wanneer de stringkabels gebundeld zijn en de zonnepanelen op vol vermogen werken kan dit grote schade veroorzaken. Hierdoor wordt het aangeraden om de plus en min pool te scheiden met bijvoorbeeld een kabelgoot met een scheidingsshot of twee aparte kabelgoten of alternatief een andere installatiemethode om de voortplanting van vlambogen tegen te gaan. [18]



Figuur 19 Veilige versus onveilige PV-kabel aanleg

Om dus een goede kabelaanleg te kunnen realiseren zal de lus oppervlakte zo klein mogelijk moeten zijn en zal een minimale afstand moeten zijn tussen de min en plus kabel om vlamboog voortplanting te voorkomen. Voor grondgebonden PV-systemen zijn er twee veel voorkomende manieren van kabelaanleg dit zijn: door kabelgoot of draadgoot onder de draagframes en door de grond van de omvormer tot het draagframe. Door onder het draagframe een kabelgoot of draadgoot toe te passen kunnen de strings op een gemakkelijke manier worden aangelegd en afgetakt worden naar de panelen. Met een goot kan het systeem op een eenvoudige, snelle manier gerealiseerd worden maar zou helaas niet een geschikte en veilige oplossing kunnen bieden voor tussen de rijen zeker wanneer het park gecombineerd wordt bijvoorbeeld agrarisch gebruik of voor onderhoud van het veld. Om deze reden wordt bekabeling in de grond toegepast. Doordat de DC-bekabeling niet voorzien is van armering zou de bekabeling beschermd moeten zijn tegen mechanische beschadiging of op een zodanige diepte ingegraven

worden dat het risico van beschadiging door graafwerkzaamheden minimaal is. Meerdere manieren zijn mogelijk zo kan een buissysteem gebruikt worden waar de kabels ingetrokken kunnen worden of afgeschermd met een afdekplaat. Voor beide situaties is een markeerlint nodig. Alternatief kan volgens bepaling 522.8.10.1 NEN1010 helemaal geen afscherming geplaatst worden mits er wordt voldaan aan voorwaarden zoals: de kabels liggen in een afzonderlijk tracé, geen andere leidingen in de naaste omgeving, alle bekabeling moet duidelijk en betrouwbaar op tekening aanwezig zijn en de graafwerkzaamheden mogen uitsluitend beginnen naar schriftelijke toestemming van het bedrijf. De bekabeling zal op een minimale afstand van 60cm in grond moeten liggen.

Om de benodigde goot te berekenen kan onderstaande formule 3.4 gebruikt worden:

$$D = V \cdot \frac{100 + R}{100} \cdot S \quad (3.4)$$

Hierin D de benodigde gootoppervlakte, V de vulfactor (1,4 voor sterkstroom en 1,2 voor zwakstroom), R de gewenste reserve ruimte in % en S de doorsneden in cm² van alle kabels die in de goot komen.

3.1.2 Wisselspanningsontwerp

Voor het wisselspanningsdeel van de laagspanningsinstallatie valt de bekabeling tussen de omvormers en de laagspanningsverdeler en de laagspanningsverdeler zelf. In hoofdstuk 2.4 hebben we aangetoond dat de omvormers op een centrale locatie de voorkeur heeft voor zowel de kabeldiameter als de kosten die hierbij komen. Het optimale ontwerp bestaat uit 18.432 LONGi LR4-60PHP-370M panelen met 41 SUNGROW SG110CX, 4 SG50CX en 2 SG33CX omvormers met een DC/AC verhouding van 1,43. Dit zal neer komen op een totale AC aansluitwaarde van 4,78MW wat neer komt op ongeveer 6.900A. Door de hoogte restrictie van 1,5 meter kan er geen gebouw geplaatst worden waar een grote laagspanningsverdeler gebouwd kan worden hiervoor zullen compactstations benodigd zijn. Een compactstation is een klein gebouw van ongeveer 6m² wat ongeveer 1,5meter hoog is en voorzien is van drie compartimenten; de eerste is voor de laagspanningsverdeler de tweede voor de 0,4kV/10kV transformator en de derde voor de middenspannings verdeler.

Compactstation worden veel gebruikt door netbeheerders en zijn beschikbaar in alle soorten en maten tot en met 2.500kVA. Door het groot vermogen van 4,78MW zullen er dus minimaal twee 2.500kVA compactstation benodigd zijn echter zullen deze compactstation zijn technische limitaties bereiken. In totaal zijn er 47 omvormers benodigd om al het DC-vermogen om te zetten naar AC-vermogen dit betekent dat elke omvormer zijn eigen eindgroep moet hebben wat neer zal komen op 24 eindgroepen per compactstation. Technisch gezien zal het niet mogelijk zijn om zoveel groepen in een compactstation te plaatsen door de gelimiteerde ruimte. Ook zal de omgevingstemperatuur stijgen door het vermogen dat geleverd wordt wanneer de panelen in geleiding zijn. Door de stijging van temperatuur zal de nominale automaat stroom lager zijn dan waarvoor hij getest is hierdoor kan hij dus onnodig uitschakelen. Dit wordt ook wel het derate effect genoemd. Om deze twee redenen kiezen we voor vier 1.250kVA compactstations waarvan drie met 11 eindgroepen en 1 met 14 eindgroepen. Een ander voordeel van het toepassen van meerdere compactstations is dat bij uitval of onderhoud 1/4 van het park wegvalt in plaats van 1/2.



Figuur 20 Voorbeeld Hager laagspanningsverdeler in compactstation [21]

Om een geschikte laagspanningsverdeler te maken zal deze moeten voldoen aan de NEN-EN-IEC 61439-1/2. De laagspanningsverdelers worden vaak al als een totaal systeem geleverd vanuit de compactstation leverancier toch zijn hiervoor nog de nodige ontwerp parameters voor nodig zoals: welk type beveiliging er toegepast moet worden, wat de maximale kortsluitstroom is en de hoofdschakelaar. De meest toegepaste beveiliging in compactstation zijn zekering lastscheiders. Een zekering lastscheider is een beveiliging die de leiding beveiligd doormiddel van een mespatroon en in een handeling kan worden geschakeld en gescheiden. Een zekering lastscheider is volgens de *Electrical requirements for solar farms to be constructed in the Netherlands* niet toegestaan en een alternatief is nodig, dit kan bijvoorbeeld een vermogensschakelaar zijn of een mespatroon houder in serie met een lastscheider.

Om de juiste beveiligingswaarde te selecteren zal het maximaal vermogen van de omvormers bekend moeten zijn voor de SUNGROW SG110CX, SG50CX, SG33CX is dit:

Omvormer	SG110CX	SG50CX	SG33CX
P_{nom}	110kVA	55kVA	36kVA
I_B	158,8A	83,6A	55,2A
Aanbevolen I_n [22]	200A	100A	63A

Tabel 12 Afzekerwaarde omvormers

Hierin is I_B de maximale AC-uitgangstroom en I_n de aanbevolen afzekerwaarde door de fabrikant. Met behulp van softwareprogramma Intelec kan een volledige netwerk analyse volgens de NEN1010 uitgevoerd worden op laagspanningsniveau. Hiervoor zijn enkele uitgangspunten benodigd om op een juiste manier de kabels te berekenen en het juiste materiaal te kiezen.

Transformator	LeGrand Cast resin 1250kVA, $U_k=6\%$, $U_{prim}=10kV$, $U_{sec}=0,4kV$ $P_o=1620W$, $P_k=11000W$, $I_o=0,7\%$, Dy5
Kabeltype	YMvK-as. Kabels door grond in verband met onder uitvoer compactstation
Ketens	6 ketens. Rail opgesplitst in twee segment om temperatuur invloeden te minimaliseren.
Warmteweerstandscoefficiënt	0,8Km/W
Kabelafstand	Minimale afstand van 1x DE om temperatuur afgifte te verbeteren waardoor kabels dunner kunnen.
Spanningsverlies	Afhankelijk van de DC-lengte. Langste DC-lengte is 275meter wat ongeveer 2% spanningsverlies is.

Met behulp van softwareprogramma Intelec zijn voor de drie omvormers twee verschillende kabelberekeningen uitgevoerd een met een vermogensautomaat en een met mespatronen. De uitkomsten zijn genoteerd in Tabel 13. De programma berekening is te vinden in bijlage 6.2 op pagina 51

Omvormer	SG110CX	SG50CX	SG33CX
Vermogensschakelaar	YMvK-as 4x120mm ²	YMvK-as 4x35mm ²	YMvK-as 4x16mm ²
Mespatroon	YMvK-as 4x150mm ²	YMvK-as 4x35mm ²	YMvK-as 4x16mm ²

Tabel 13 Benodigde kabel voor omvormer

Voor zowel de SG50CX als de SG33CX omvormer zullen de kabeldiameters hetzelfde zijn. Voor de SG110CX zal de kabeldiameter een slag dikker moeten worden uitgevoerd wanneer mespatronen worden gebruikt in plaats van een vermogensschakelaar dit omdat een vermogensschakelaar de stroom thermisch afbreekt op zijn I_n waarde (in dit geval 200A) voor mespatronen die volgens de NEN-EN-IEC 60269-3 zijn gemaakt kan een patroon met een I_n van 200A enkele tijd meer stroom aan volgens tabel 53.H.1 NEN1010 zal dit 221A zijn. Dus de kabel zal hiertegen beschermd moeten zijn en zal de kabeldiameter een slag dikker zijn.

Nu de leidingen en transformator bekend zijn kan de maximale kortsluitstroom berekend worden. De hoogste maximale op te treden kortsluitstroom is een 3-fasen kortsluiting en kan berekend worden aan de hand van volgende set formules [22]:

$$I_{k''} = \frac{c \cdot U_l}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_{trafo} + \sum R_{leiding})^2 + (X_{trafo} + \sum X_{leiding})^2}} \quad (3.5)$$

Netconstante c is gebaseerd op de norm IEC60909. $I_{k''}$ is de effectieve/ thermische kortsluitstroom en dient lager te zijn dan de maximale kA-waarde van de toegepaste beveiligingen. Doordat het net uit een wisselspanningscomponent en gelijkspanningscomponent bestaat zal bij kortsluiting een piek ontstaan door de gelijkspanningscomponent die exponentieel uit dempt. De hoogte van deze piek hangt af van de locatie van kortsluiting en kan berekend worden door onderstaande formule:

$$I_s = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k''} \quad \text{met} \quad k = 1,02 + 0,98e^{-\left(\frac{3R}{X}\right)} \quad (3.6)$$

I_s is de dynamische/ stoot kortsluitstroom en dient lager te zijn dan de maximale kA-waarde van de toegepaste geleiders. Met deze waarden zou op een juiste manier de schakelcomponenten gekozen kunnen worden. Met behulp van onderstaande formule kan de kortsluitvastheid van de kabel berekend worden tot tijd is t_{max} :

$$t_{max} = \left(\frac{\sqrt{\frac{Q_c(\theta + 20)}{p_{20}} \cdot \ln\left(\frac{\theta + \theta_{final}}{\theta + \theta_{initial}}\right)}}{I_{k''}} \cdot S \right)^2 \quad (3.7)$$

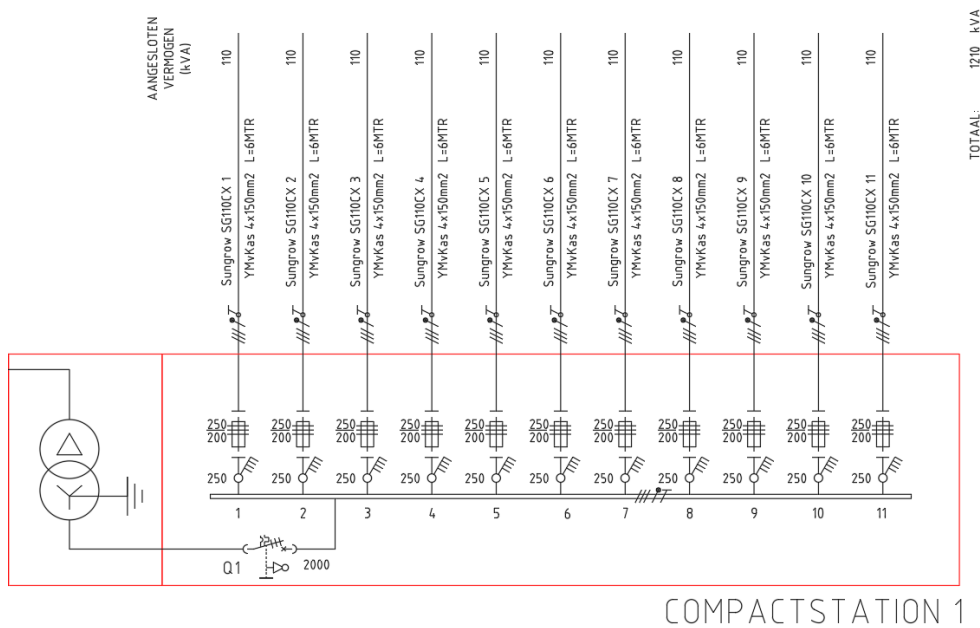
Hierin is Q_c warmtecapaciteit van het kernmateriaal bij 20 °C, in J/°C mm³, p_{20} soortelijke weerstand van het kernmateriaal bij 20 °C, in Ωmm, θ constante (228 voor aluminium en 234,5 voor koperen geleider), θ_{final} is de maximale toelaatbare kortsluittemperatuur (XLPE = 250°C) en $\theta_{initial}$ is geleider temperatuur voor aanvang van de kortsluiting (XLPE = 90°C). Alle kortsluitwaarde waaraan het systeem moet voldoen zijn genoteerd in Tabel 14. Hierin is de waarde op het eindpunt van de leiding en gerekend met een lengte van ongeveer 20 meter.

	$I_{k''}$	I_s	T_{max}
Rail	26113A	61804A	
200A (4x150mm ²)	21895A	41248A	0,95s
100A (4x35mm ²)	14516A	21652A	0,11s
63A (4x16mm ²)	8537A	12347A	0,07s

Tabel 14 Kortsluitwaarde systeem

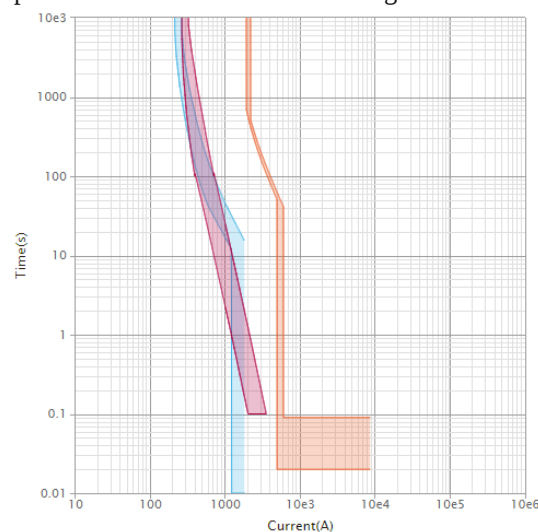
T_{max} waarde is slechts tot hoelang de kabel deze kortsluiting aan kan. Normaal gesproken zou de automaat of zekering ongeveer binnen ≤0,01s aanspreken en het circuit scheiden. Mocht de dichtstbijzijnde beveiliging niet aanspreken zal de upstream beveiliging aanspreken hier tussen zal een kleine tijdsvertraging zitten afhankelijk van de beveiliging of instelling hierom is het goed om te weten tot hoelang de kabel kortsluit vast is en dus niet door brand bij het falen van een beveiliging. Mocht een kortsluiting toch langer staan dan de beveiliging tijdswaarden kan de levensduur van een kabel significant verminderd worden.

Nu alle waarden en kabels bekend zijn kan een laagspanningsverdeler ontworpen worden. Voor de verdeler hebben we toch gekozen om met mespatronen af te zekeren ondanks dat de kabeldiameter dikker zal worden biedt mespatronen ook zo ze voordelen. Wanneer een kortsluiting I_k of I_s loopt zal door de opbouw van een mespatroon de smeltband doorbranden maar omdat deze stromen enkele kA's zijn zal de smeltband zo snel doorbranden dat de maximale kortsluitstroom niet bereikt kan worden, dit wordt kapstroom genoemd. Bijvoorbeeld wanneer in een circuit met een 200A mespatroon een kortsluiting ontstaat van zeg 25kA zal door het kapstroom effect dit gelimiteerd worden tot 15kA. Ook zal de uitschakeltijd van een smeltpatroon afhankelijk zijn van de stroomgrootte, hierdoor kan een smeltpatroon ook snel de leiding en achterliggende componenten beveiligen. Om de hoofdrail van de laagspanningsverdeler te beveiligen zal wel een vermogensschakelaar benodigd zijn puur om het feit dat mespatronen leverbaar zijn tot 1.000A en het maximale vermogen van een 1.250kVA trafo ongeveer 1.800A is. Hiervoor is gekozen voor een Schneider Electric NS2000N met trip-unit micrologic 2.0.



Figuur 21 Installatieschema laagspanningsverdeler

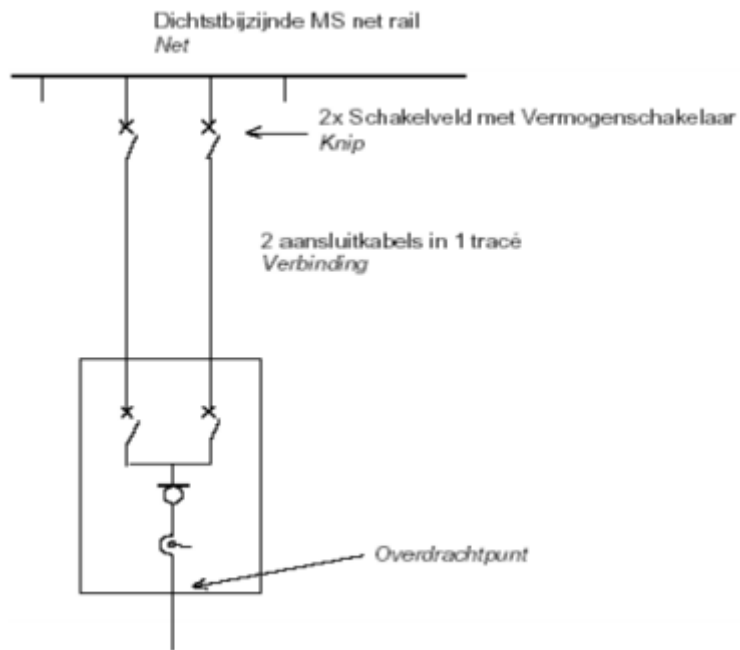
Wanneer twee beveiligingen in serie worden geplaatst, zoals de hoofdbeveiliging en afgaande groepen, dan is het de bedoeling dat bij een fout in een eindgroep de beveiliging die het dichtst bij de fout uitschakelt en niet de hoofdbeveiliging of middenspannings beveiliging. Om dit te realiseren zullen de beveiligingen selectief moeten zijn. In Figuur 22 zijn de $t(i)$ curves van de beveiligingen te zien. Hierin is oranje de hoofdbeveiliging (NS2000N $I_{th}=1800A$), rood een 200A mespatroon en blauw een 200A vermogensschakelaar (NS250F TM-D $I_{th}=200A$).



Figuur 22 $t(i)$ curve laagspanningsverdeler

3.2 MIDDENSANNINGSINSTALLATIE

Vanuit het laagspanningsdeel weten we dat we vier 10kV/0,4kV 1.250kVA compactstation willen toepassen. Dat betekent dat we vier middenspannings aansluitingen nodig hebben. Helaas zal het niet mogelijk om van de netbeheerder vier netaansluitingen te krijgen op één WOZ-object, hiervoor zal dus een middenspanningsinstallatie benodigd zijn. Om te beginnen zal eerst gekeken moeten worden welke aansluiting de netbeheerder zal leveren. De juiste aansluiting kan gevonden worden op netbeheer Nerdland en volgt de tariefstructuur als bedoeld in artikel 27, eerste lid, van de Elektriciteitswet 1998. De maximale aansluitwaarde van het park zal neer komen op 4,78MVA hiervoor zal een aansluiting gerealiseerd worden volgens artikel A.6 (3 – 10 MVA) [24]



Figuur 23 MS aansluiting 3 – 10 MVA [24]

Deze standaard aansluiting is geschikt vanaf 3MVA tot en met 10MVA en zal op de midden spanningsrail van de netbeheerder aangesloten worden op het HS/MS-, TS/MS-, MS/MS-station. De aansluiting bestaat uit een redundante (N-1) aansluiting bestaand uit twee vermogensschakelaars, twee kabels in een tracé, twee lastscheiders en een meetveld waarna het overdrachtpunt plaatst vindt. Vanaf het overdrachtpunt zal de middenspannings installatie voor het park gerealiseerd moeten worden hiervoor kunnen er twee structureren gebruikt worden namelijk: radiaal en ringvorming.



Figuur 24 Netstructuur radiaal (links) ringvorming (rechts)

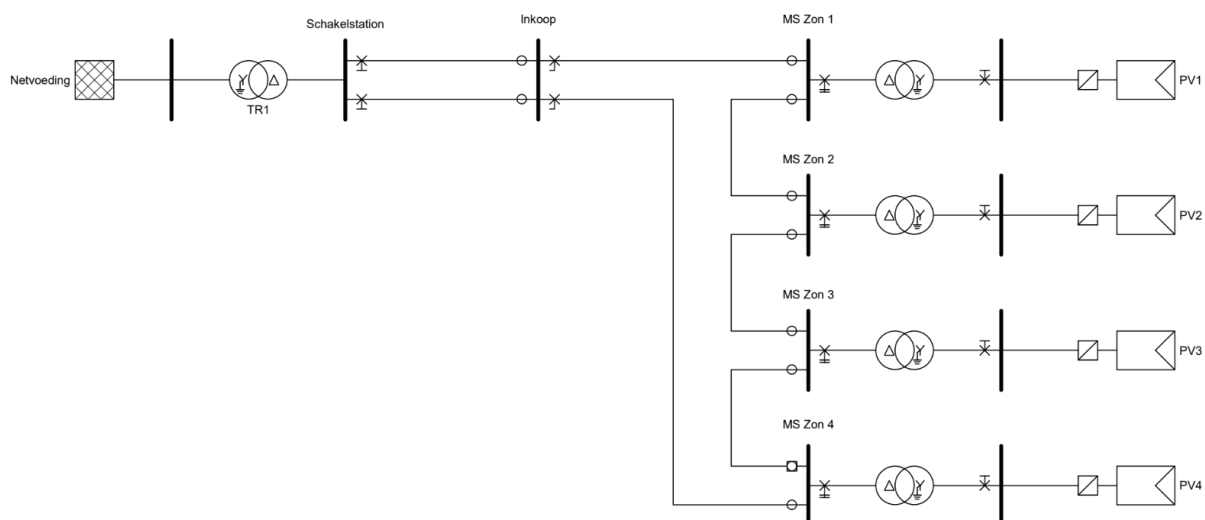
De voorkeur gaat voor een ringvorming netstructuur. Binnen een ringvormig netstructuur zou bij een fout in het systeem de bedrijfsvoering snel terug gebracht kunnen worden door de redundante verbindingen. Ook zullen er minder vermogensschakelaar benodigd zijn om het systeem te realiseren. Voor een ringvormig systeem zullen dit er twee zijn en voor een radiaal net vier. Een nadeel van de ringvormig is dat de bekabeling het vol vermogen aan moet kunnen en bij een radiaal net zal dit maar 1/4 zijn. Maar daarentegen is deze investering het waard

omdat bij ringvormig het net binnen 2 uur weer volledig operationeel kan zijn. Waar dit bij een radiaal net meerdere uren of zelfs dagen kan duren om het probleem op te lossen. Ook zal bij het toenemen van meer en langere kabels en componenten de faalfrequentie verhoogd worden. Dit zal zo laag mogelijk gehouden moeten worden om de bedrijfsvoering zo hoog mogelijk te houden. Met behulp van de tabellen van betrouwbaarheid elektriciteitsnetten in Nederland van netbeheer Nederland kan berekend worden wanneer een storing kan ontstaan. [25]

Component	Radiaal net			Ringvorming net		
	Aantal	Faalfrequentie		Aantal	Faalfrequentie	
Vermogensschakelaar	10	0,0015	stks	8	0,0015	stks
Lastscheider	6	0,0002	stks	6	0,0002	stks
Eindsluiting kunststof	8	0,0002	stks	10	0,0002	stks
Kabel kunststof	15,54	0,0074	km	15,36	0,0074	km
Rail	5	0,0003	stks	5	0,0003	stks
Trafo MS/LS	4	0,0007	stks	4	0,0007	stks
Totale faalfrequentie		0,137096		0,133164		
Onderbreking eens in de ... jaar:		7,29 jaar		7,51 jaar		
Tijd omschakelen storing kabel of VS		Niet mogelijk min		122 min		

Tabel 15 Faalfrequentie middenspanningsnet

Uit Tabel 15 kan geconcludeerd worden dat een ringvorm de voorkeur heeft. De kans op storing is iets minder en de mogelijkheid bestaat om voedingen om te schakelen als bijvoorbeeld een kabel of vermogensschakelaar faalt of onderhoud gepleegd moet worden. De omschakeltijd is gebaseerd op normtijden en kunnen voor het park in werkelijkheid mogelijk lager zijn in verband met dat de stations ongeveer 100 meter uit elkaar staan. Hierom zal er een minimale afstand tussen de stations afgelegd moet worden om het probleem te herstellen of om te schakelen. In Figuur 25 is de schematische weergave gegeven van het ringvormige systeem. Bij compactstation MS zon 3 zal één lastscheider geopend zijn om parallelle voeding bij kortsluiting te voorkomen.



Figuur 25 Schematische weergave middenspanningsnet

Met behulp van softwareprogramma Vision network analysis kan een uitgebreide netwerkanalyse uitgevoerd worden voor het middenspanningsnet. Om een juiste en nauwkeurige berekening te kunnen realiseren is het volledige net van de netbeheerder nodig om te bepalen hoe de kortsluitstromen, belastingen lopen en hoe het spanningsniveau zich gedraagt. Wel kan de kabeldiameter berekend worden.

Om de kabeldiameter te kunnen berekenen is de nominale stroom van elk station benodigd. Hiervoor gaan we uit van het maximaal vermogen per compactstation dit is 72A op 10kV niveau. Totaal zal één kabel dus $4 \times 72A = 288A$ (I_b) aan moeten kunnen. Om tot een juiste kabel te kunnen komen zullen enkele correctiefactoren moeten worden meegenomen in de berekening en zijn bekend bij de kabelfabrikant. De correctiefactor voor grondtemperatuur is: 1 (15 °C), Thermische grondweerstand 1 (0,8Km/W), aantal ketens 0,83 (2 kabels afstand 250mm bij 0,8 Km/W) Dus:

$$I_b \leq I_z \cdot \text{correctiefactoren} \quad (3.8)$$

Voor dit systeem kan een 3x240AL ($I_z = 360 \times 0,83 = 299A$) of 3x185Cu ($I_z = 380 \times 0,83 = 315A$) kabel gebruikt worden. [26] Afhankelijk van de energieprijzen kan een berekening uitgevoerd worden welke kabel het beste is en de minste kabelverlies oplevert. (hierin is geen rekening gehouden met de kostprijs van de kabel) [27]

$$B_{\text{kabelverlies}} = 3 \cdot I_{\text{nom}}^2 \cdot R_{\text{kabel}} \cdot (T_v \cdot p + q) \quad (3.9)$$

Hierin is $B_{\text{kabelverlies}}$ het resultaat in euro, I_{nom} de nominale stroom op de kabel, R_{kabel} de kabelweerstand, T_v de bedrijfsuren, p de kWh-prijs en q de kW-kosten.

Nu de structuur en bekabeling bekend is zal een geschikte trafo gekozen moeten worden waarna de middenspanningsverdeler ontworpen kan worden. Vanuit eerdere hoofdstukken hebben we gekozen voor vier compactstation van elk 1.250kVA dus het maximaal vermogen van één trafo zal dan ook 1.250kVA zijn. Binnen de middenspannings installaties zijn er twee type transformator namelijk: olie gevuld of droog. Om een juiste keuze te kunnen maken zal een eigenschap analyse uitgevoerd moeten worden hiervoor is gekozen voor een droge transformator van Legrand type Green Tier 1 en voor een olie gevulde transformator van ABB type Ecodesign.

Transformator	Droog	Olie gevuld
Brandbaar	Nee	Ja
Zelf dovend	Ja	Nee
Milieu vervuילend	Nee	Ja
Regelmatig onderhoud	Nee	Ja
Bouwkundige vuurpreventie nodig	Nee	Ja
Gevoelig voor vochtige omgeving	Nee	Nee
Bestand tegen korte overbelasting	Ja	Ja
P_{load} verlies	11000W	11000W
P_{nullast} verlies	1800W	950W

Tabel 16 Eigenschappen droge versus olie gevulde transformator

Vanuit de eigenschappen zal een droge transformator veel voordelen kunnen bieden. Zo is hij milieuvriendelijke omdat er geen schadelijke olie wordt gebruikt. Ook zijn er geen bouwkundige aanpassingen nodig zoals een lekbak of brandwerende muren om vuur voortplanting tegen te gaan. Een nadeel van droge transformatoren is dat de nul last verlies hoger zal zijn dan een olie gevulde transformator. Afhankelijk van de kWh prijs kan er ook een financiële analyse uitgevoerd worden met formules 3.10 en 3.11 [27]:

$$B_{\text{nullast}} = P_{\text{nullast}} \cdot (T_i \cdot p + q) \quad (3.10)$$

Hierin is B_{nullast} het resultaat in euro, P_{nullast} de trafo nul last verliezen, T_i de jaarlijkse inschakelduur van de transformator (uren), p de kWh-prijs en q de kW-kosten.

$$B_{\text{load}} = a^2 \cdot P_{\text{load}} \cdot (T_v \cdot p + q) \quad (3.11)$$

Hierin is B_{load} het resultaat in euro, P_{load} de trafo vollast verliezen, a belastinggraad van de trafo, T_v de bedrijfsuren, p de kWh-prijs en q de kW-kosten.

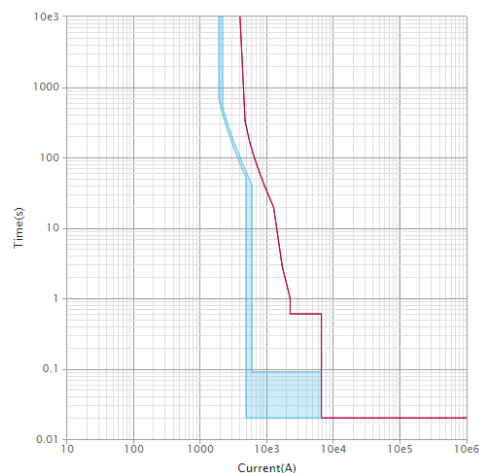
Tot slot zal het net beveiligd moeten worden. Hiervoor zal in elk compactstation en inkoopstation een middenspannings verdeler gerealiseerd moeten worden. Een transformator of kabel kan zowel met een smeltveiligheid als vermogensschakelaar beveiligd worden. Voor de beveiliging van dit systeem kiezen we voor vermogensschakelaars dit komt mede doordat smeltveiligheden beschikbaar zijn tot 80A wat dus niet overal toegepast kan worden. Bij transformatoren groter dan 1.000kVA problemen kunnen ontstaan door de warmte ontwikkeling. Vooral in de afgesloten ruimte kan de temperatuur hoog oplopen en zal de zekering derate door de temperatuur ook zal isolatie kunnen beschadigen door de hoge temperatuur. Daarnaast zal een zekering voor transformatoren groter dan 630kVA geen selectiviteit meer bieden aan de middenspannings zijde. [23] Hiervoor zullen we dan een vermogensschakelaar met een stroomtijd relais toepassen.

Voor de middenspannings verdeler kiezen we voor de modulaire oplossing van Eaton. Er is gekozen voor de Eaton type Xiria, deze verdeler kan aan de hand van modules uitgebreid worden. Zo is er één module voor compactstations die bestaat uit 2 lastschakelaars en 1 transformator veld, één module als meetveld, en uitbreidbare modules met vermogensschakelaars. Figuur 26 toont de Eaton Xiria oplossingen. Deze verdeler zijn bestand tot tegen een kortsluiting van 20kA/1s wat in theorie voldoende zal moeten zijn voor het park (nauwkeurige berekening met de net beheerder zijn vereist om dit verifiëren!) Daarnaast zijn de vermogensschakelaar voorzien van vacuümtechnologie in plaats van SF₆ gas wat milieu onvriendelijk is en niet is toegestaan volgens de *Electrical requirements for solar farms to be constructed in the Netherlands*.



Figuur 26 Eaton Xiria oplossing [28]

Tot slot zullen de middenspannings beveiligingen ook selectief moeten zijn zodat de dichtstbijzijnde beveiliging bij een fout aanspreekt. Dit zal vaak in samenspraak gebeuren met de netbeheerder om zo selectief te zijn voor het gehele net van schakelstation tot compactstation. Daarentegen kunnen we wel transformator beveiliging bepalen, deze dient selectief zijn ten opzichte van de laagspanningsautomaat. Hierin is de rode lijn de middenspannings beveiliging en de blauwe lijn de laagspanningsbeveiliging.



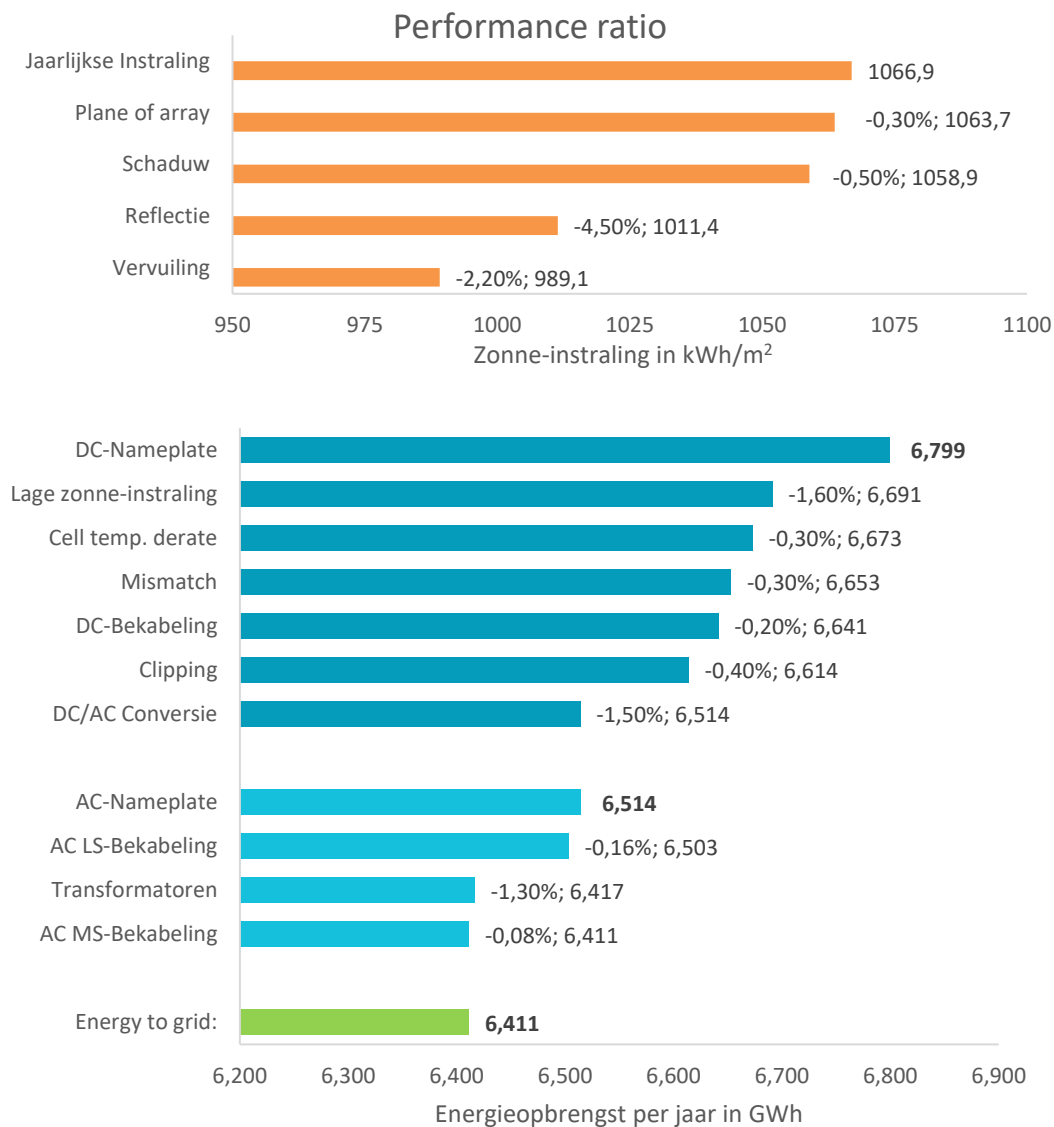
Figuur 27 t(i) curve LS-MS beveiliging

3.3 SYSTEEMVERLIEZEN

Wanneer alle systemen en componenten bekend zijn kan de Performance Ratio (PR) van het systeem bepaald worden. De PR is een van de belangrijkste criteria bij het beoordelen van de prestaties van een PV-installatie door te verwijzen naar de verhouding tussen de gemeten en theoretische opbrengst van een PV-installatie. Om de performance ratio te kunnen bepalen zijn er voor PV-systemen twee soorten verliezen namelijk: verlies door zonne-instraling en energieverlies in componenten en configuraties. De performance ratio kan berekend worden aan de hand van formule 3.12.

$$PR = \frac{E_{grid}}{GlobInc \cdot P_{nom}} \quad (3.12)$$

Hierin is E_{grid} de energie geleverd aan het net in kWh (6.411.080 kWh), $GlobInc$ is de straling in het plane of array (1063,7 kWh/m²) en P_{nom} array nominale DC vermogen bij STC (6.820 kWp). Figuur 28 toont alle verliezen en procenten van het gepresenteerde systeem binnen dit rapport. De totale performance ratio van dit systeem komt uit op 88,4%. Door de juiste optimalisatie van paneel, omvormer en configuratie zal de performance ratio 4,4% hoger zijn dan het gemiddelde van ~84%. [29]



Figuur 28 Performance ratio

Zoals te zien is in Figuur 28, wordt de performance ratio bepaald door een aantal verliesmechanisme. Deze in de figuur aangegeven belangrijke verliezen worden staan hieronder weergegeven:

Plane of array: De plane of array verliezen zijn afhankelijk van de hellingshoek en oriëntatie. Dit getal is positief als de panelen naar de evenaar wijzen en negatief als ze van de evenaar zijn gericht.

Schaduwverlies: Schaduwverliezen zijn afhankelijk van drie verschillende type: rij-tot-rij, objecten en de horizon stand.

IAM factor (reflectie): De IAM (Incidence Angle Modifier) factor komt overeen met de straling die het oppervlak van de PV-cellen bereikt. Dit verlies is voornamelijk een gevolg van reflecties op de glazen afdekplaat die toenemen met de invalshoek en de afstand van de evenaar.

Vervuiling: Door de ophoping van stof en vuil op de oppervlakte van het PV-paneel zal straling lichtelijke geblokkeerd worden. Vervuiling is afhankelijk van de omgeving en regen.

Lage instraling: Bij een lage instraling van bijvoorbeeld 500W/m^2 zal het paneel niet precies de helft van het nominale vermogen leveren hierdoor zal er kleine afwijking ontstaan ten opzichte van de ideale omstandigheden bij lage instraling.

PV temperatuur verlies: Door het toenemen van de temperatuur van de zon zal door de temperatuurcoëfficiënt verliezen ontstaan wanneer deze hoger zijn dan de STC waarden.

Mismatch verlies: Een array mismatch is het verschil tussen de som van de modules P_{mpp} en de P_{mpp} van de volledige array. Een mismatch kan ontstaan door niet-identieke modules, ongelijke paneelvervuiling of gedeeltelijke schaduw.

Ohmse verliezen: De I^2R verliezen ontstaan door de Ohmse weerstand in de bekabeling. Deze verliezen zullen afhankelijk zijn van de lengte, aderdiameter en adermateriaal.

Clippingverlies: Wanneer het PV-systeem meer vermogen levert dan dat de omvormer aankan zal de omvormer de spanning en uitgangsvermogen verlagen.

Conversie verliezen: Door conversie van DC naar AC of AC naar AC zal energie verloren gaan door de conversie en is afhankelijk van de load versus efficiency curve van de omvormer of transformator.

4 KOSTEN ANALYSE

Binnen hoofdstuk 2 en 3 zijn de ontwerp randvoorwaarden besproken waarbij steeds een voorbeeld van het optimale systeem is gebruikt om kabeldiameter, schakelmateriaal, aanleg etc. te bepalen. Binnen hoofdstuk 4 zal het totaal systeem gepresenteerd worden waarna een globale kosten analyse volgt van middenspannings aansluiting tot en met zonnepaneel.

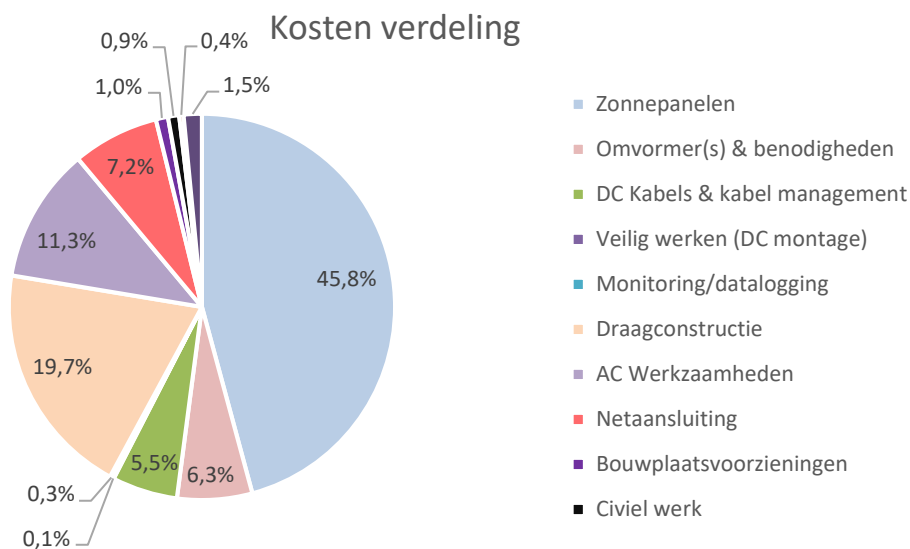
In bijlage 6.3 pagina 54 is de volledige detailtekening te zien van zonnepaneel plaatsing, detailaanzichten voor constructies en bekabelingen en tot slot een single-line diagram van de middenspannings aansluiting tot en met de omvormer aansluiting. Hiervan is dan ook de globale kosten analyse gemaakt. Voor de projectontwikkeling zijn drie soorten uitgaven verbonden namelijk: investeringsuitgaven (CAPEX), operationele uitgaven (OPEX) en ontmantelingskosten. Voor nu zal er alleen gekeken worden naar de investeringsuitgaven.

Om de investeringsuitgaven te bepalen zijn alle materialen opgesplitst per installatie onderdeel. Onder deze kosten vallen geen montage uren. De volgende punten zijn meegenomen:

- Zonnepanelen [LONGi SOLAR LR4-60HPH-370M]
- Paneel draagconstructie
- Omvormer(s) inclusief draagconstructie en afdak [SUNGROW SG110CX, SG50CX & SG33CX]
- Gelijkspanningsbekabeling inclusief kabelmanagement en toebehoren [6 mm² kabels plus draadgoten]
- Wisselspanningsbekabeling en verdelers [Midden en laagspanningsbekabeling, Inkoop/ compactstations inclusief schakelcomponenten en aardingsbekabeling]
- Monitoring/ datalogging [Energimeters]
- Liander aansluitingen [5MVA overdrachtpunt en 3x25A bouwaansluiting]
- Bouwplaats voorzieningen [Afval containers, kantine en toilet etc.]
- Civiele benodigdheden [sleuven graven en opvullen inclusief laagje zand]
- Keuring en inbedrijfstelling
- Overige [Klein materiaal, Reserve zonnepanelen]

De volgende punten zijn **niet** meegenomen:

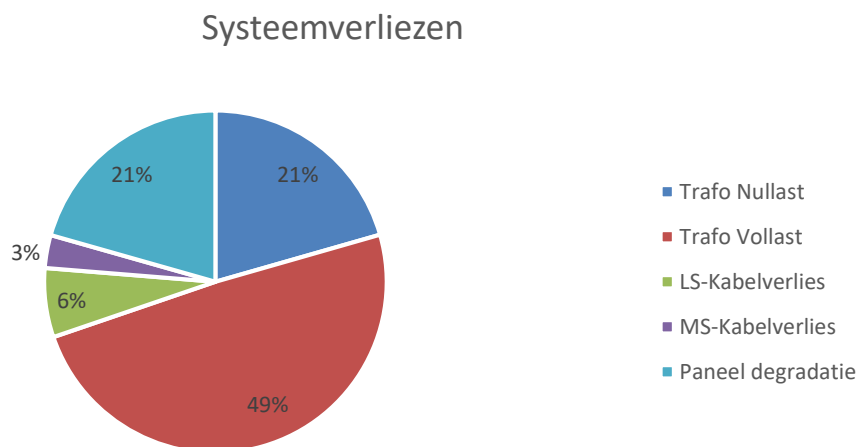
- Montage uren [Installatie van bekabeling, draadgoten en afmontage]
- Projectmanagement
- Garanties en verzekeringen [Opslag, afhandeling en transport]
- Transportmiddelen [heftruck of verreiker inclusief toebehoren]
- Hekwerken en beveiliging.



Figuur 29 Kosten verdeling PV-Systeem

Figuur 29 toont de kosten verdeling van het PV-systeem voor het perceel. Zonder de boven genoemde punten. Hieruit kan geconcludeerd worden dat wanneer een competitieve prijs gerealiseerd moet worden de grootste marge te halen valt binnen de prijs van de zonnepanelen en zijn onderconstructie.

Tot slot zal er naar de systeemverliezen gekeken worden. Naast de verliezen die ontstaan in het gelijkspanningsgedeelte zullen er ook systeemverliezen ontstaan in het wisselspanningsgedeelte. Alle verliezen voor het gelijkspanningsdeel zijn te vinden in hoofdstuk 3.3. Voor het wisselspanningsgedeelte bestaan de verliezen uit een paar verschillende factoren zoals: paneel degradatie, middenspannings en laagspanningskabelverliezen en transformatoren verliezen (nullast en vollast). De verliezen gelden alleen voor het systeem dat gerealiseerd wordt op het perceel en niet voor de bekabeling van de netaansluiting!



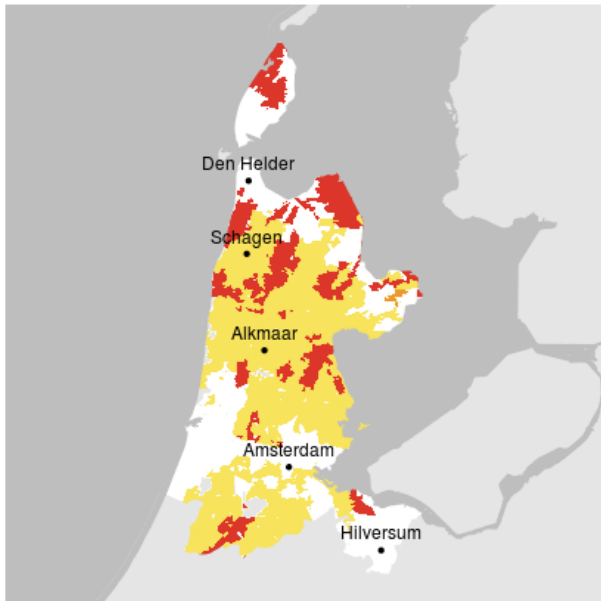
Figuur 30 Systeemverliezen wisselspanningsdeel

Figuur 30 toont alle wisselspanningssysteemverliezen (totaal 1,6%) en hoeveel procent elk factor hierin deel maakt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat wanneer een juiste transformator gekozen wordt met zo min mogelijk nullast en vollast vermogen de meeste verliezen gereduceerd kunnen worden.

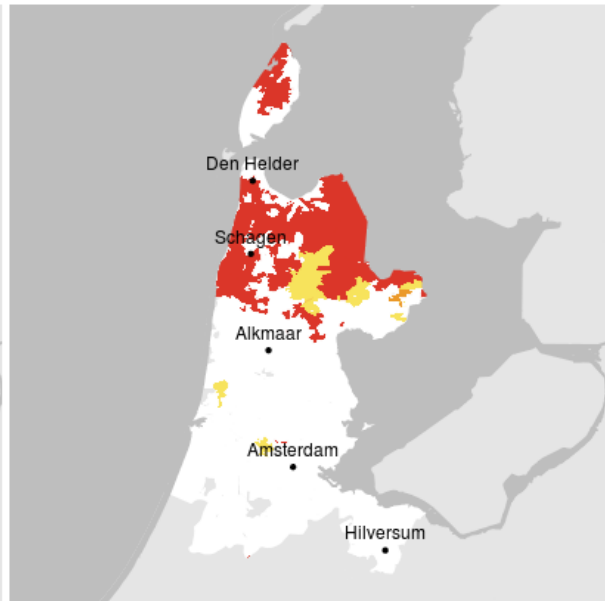
5 OPSLAGSYSTEMEN

Binnen dit hoofdstuk zal tot slot globaal gekeken worden naar mogelijkheden van energie opslagmedia. Door het continue toenemen van elektrische voertuigen, warmtepompen, groot en kleinschalige zonneparken en windmolen parken zal het transportnet steeds zwaarder belast worden. Zeker in de kop van Noord-Holland waar het transportnet verouderd is en de vraag en aanbod niet meer aankan. Figuur 31 toont de beschikbare capaciteit voor het afnemen en terug leveren van energie in Noord-Holland. Het perceel wat binnen dit rapport besproken is zal voor nu in de gele sector vallen dit houdt in dat terug levering tot beperkte maten kan gebeuren.

Beschikbare capaciteit afnemen



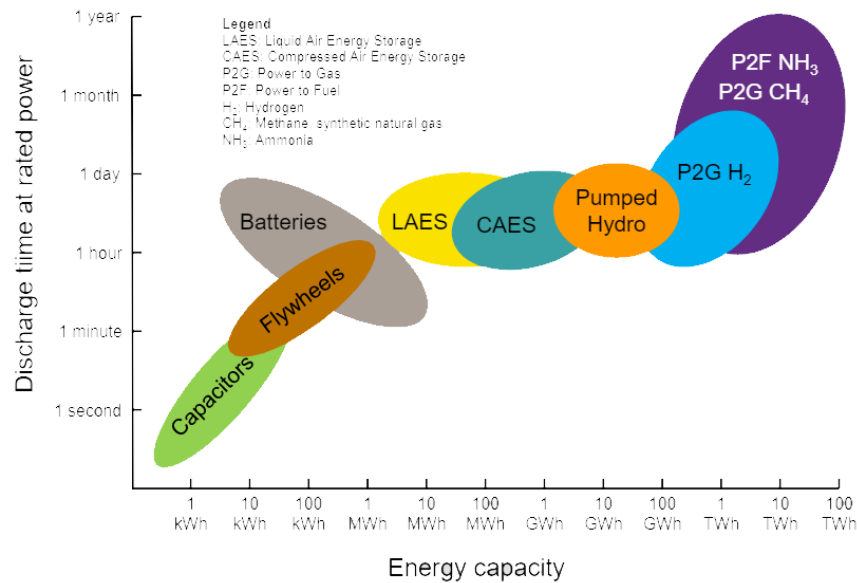
Beschikbare capaciteit terugleveren



Figuur 31 Liander Transportcapaciteit Noord-Holland [30]

Liander is in deze regio druk bezig om het transportnet uit te breiden om meer vermogen te kunnen afnemen en terug leveren maar dit heeft zijn tijd nodig. Door de langdurige vergunningstrajecten en bouw verwacht Liander in 2023-2024 het net versterkt te hebben in de kop van Noord-Holland. [30] Tot die tijd zal beperkte levering opgesteld kunnen worden door de netbeheerder om het net stabiel te houden. Stel binnen bepaalde uren op een zonnige dag wordt een terug lever restrictie opgelegd dan zal het zonde zijn om de overtollige energie weg te gooien en zou je het liefst de overtollige energie opslaan om op een later moment te kunnen terug leveren wanneer dit wel mogelijk is.

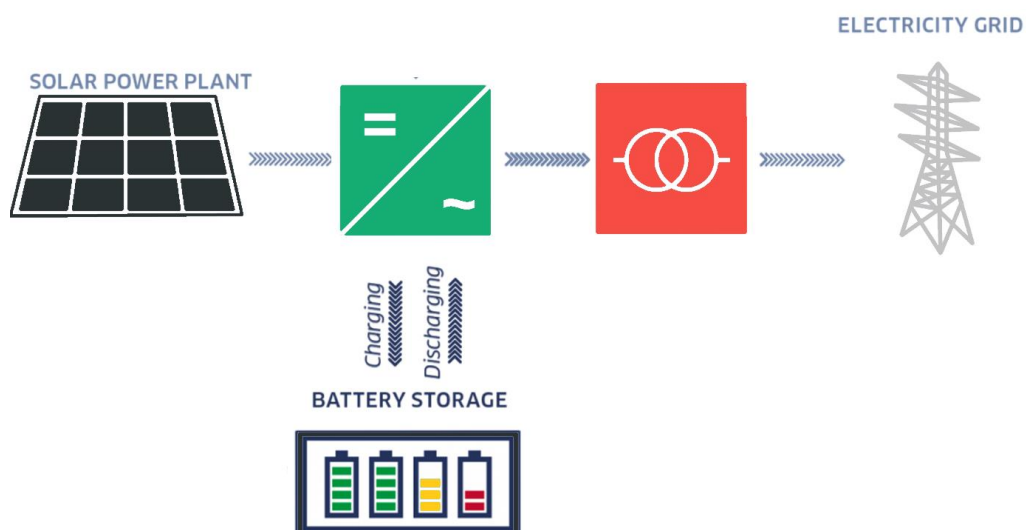
Om energie op te slaan zijn er verschillende mogelijkheden zoals de energie opslaan in een batterijbank, omzetten naar andere energiedragers zoals gas (Power 2 Gas) of gebruik maken van hydro-elektriciteit waarbij water bij energie overvloed naar een hogere watertank wordt gepompt om in een later stadium door zwaartekracht terug te laten stromen door een turbine. De laatste oplossing is niet geschikt voor Nederland omdat het hoogte verschil praktisch nul is waardoor het water niet genoeg momentum krijgt om efficiënt te werken. We zullen dus verder kijken naar de oplossingen in vorm van batterijen en power 2 gas. Figuur 32 toont verschillende technologieën van energieopslag.



Figuur 32 Technologieën energieopslag [31]

5.1 BATTERIJOPSLAG

Om te beginnen zullen we eerst naar de batterij opslag kijken. We kunnen een batterijbank op twee manieren opstellen namelijk voor kleinschalige opslag zal deze direct aan de pv-omvormer aangesloten kunnen worden mits deze daar voor geschikt is en voor grootschalige systemen zullen deze aan het middenspanningsnet aangesloten worden door middel van een compactstation. Een batterijbank is er in alle soorten en maten beschikbaar zo kunnen er bijvoorbeeld loodzuur, VLRA of lithium ion accu's in zitten. Hierin zal een lithium ion batterij wel de hoogste energiedichtheid hebben van alle batterijen maar ook de hoogste aanschafkosten van alle batterijen daarentegen zal een lithium ion batterij minder onderhoud nodig hebben en meer laad-ontlaad cycli kunnen doorgaan ten opzichte van loodzuur accu's voordat deze batterij vervangen moet worden. [32] Naast de batterijen zelf is er ook nog een batterijmanagementsysteem, omvormer(s) en koeling benodigd (afhankelijk van systeem grote) om het systeem draaiend te houden.



Figuur 33 Batterijsysteem aan PV-systeem

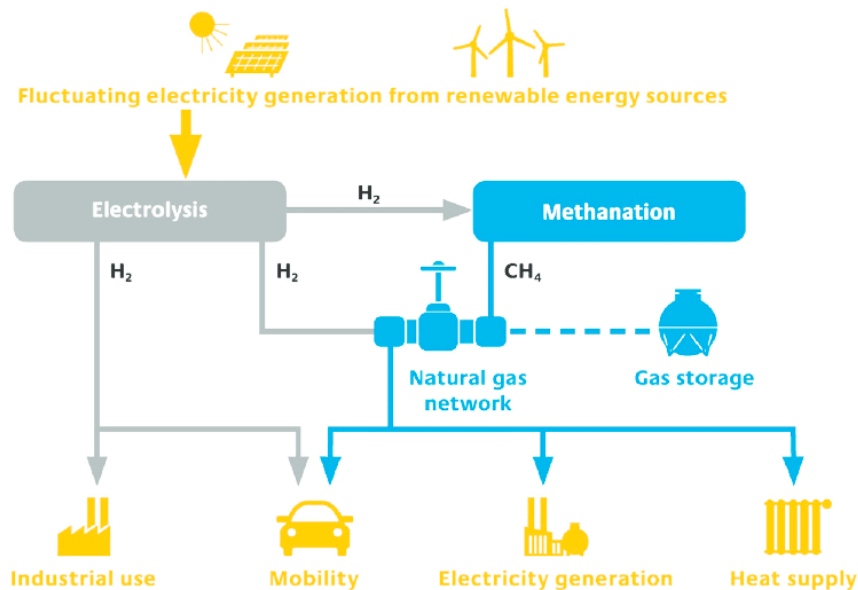
Bij verschillende fabrikanten zoals Bredenoord of Alfen kunnen complete systemen in zeecontainers gekocht worden om energie in op te slaan. De TheBattery van Alfen zijn beschikbaar vanaf 130kWh tot en met 1952kWh bruikbare batterijcapaciteit en kan afhankelijk van het project op maat gemaakt worden, geleverd en geïnstalleerd worden. Dus afhankelijk van de transport restricties kan een juiste oplossing gevonden worden hierin zal wel rekening gehouden moeten worden dat dit soort systemen niet klein en compact zijn. Zo is het kleinste systeem van Alfen geplaatst in een 10ft container en de grootste in een 40ft container [33]. Dit betekent dat voor ons systeem van 4,78MW minimaal twee 40ft container nodig zijn van 1.952kWh en één 40ft container van 846kWh om de energie op te slaan voor een 1 uur werkend PV-systeem op de standaard test condities. Dus alleen om die drie containers te kunnen plaatsen heb je al 84,6m² nodig om 1 uur aan energieproductie op te slaan. Hierin is nog niet eens rekening gehouden met container afstand en de nodige installaties om het systemen te kunnen aansluiten op het net.

Naast dat je energie van je eigen PV-systeem kan opslaan kun je met een batterijsysteem ook de energiemarkt op gaan zeker wanneer er geen Zonne opwek is en het systeem ontladen is tot zijn minimum state of charge. Door energie tegen een lage prijs in te kopen wanneer het energie aanbod hoog is en tegen een normale prijs te verkopen wanneer de energievraag hoog is. Hiermee kan je dus continue handelen op de energiemarkt. Ook kan het batterijsysteem ingezet worden op de onbalansmarkt om, op afroep van de landelijk netbeheerder Tennet, bij te dragen aan de balans van het elektriciteitsnet.

In theorie klinkt een batterijsysteem mooi; je kan energie opslaan voor een later moment en vervolgens terug leveren aan net. Je kan er mee op de energiemarkt handelen. Maar door de hoge aanschafkosten van dit soort systemen, onderhoudskosten en systeemverliezen door conversie en koeling en de lage winst door het verkopen van energie is het maar de vraag of het financieel rendabel is om deze systemen draaiend te houden. Daarentegen zal je met je opgeslagen energie wel de CO₂ uitstoot verminderen puur om het feit dat wanneer er vraag is naar energie er is geen kolen of gas centrale moet opstarten om aan de vraag te kunnen voldoen. Uiteraard zal dan wel voldaan moeten worden aan dat de CO₂ uitstoot van maken, recyclen en opstarten centrale kleiner is dan de CO₂ vermeden door energie terug levering.

5.2 POWER 2 GAS

Een tweede manier van elektrische energie opslaan is om het om te zetten naar een andere energiedrager. In dit geval naar een gas. Door de overtollige elektrische energie en water in een elektrolyzer te stoppen zal een chemische reactie ontstaan waardoor de wateratomen worden gescheiden in groene waterstof (H_2) en zuurstof (O_2). De waterstof kan langdurig opgeslagen worden in waterstof tanks en later in combinatie met brandstofcellen weer omgezet worden van waterstof naar elektriciteit ook kan het gebruikt worden voor vervoer en warmte. Een andere manier is om bij de waterstof koolstofdioxide (CO_2) toe te voegen met behulp van het Sabatier proces. Door de hoge temperatuur en druk in dit proces ontstaat synthetische gas methaan (CH_4) wat ook gebruikt kan worden voor opslag en later om te zetten voor elektriciteit, warmte, vervoer etc. [34]



Figuur 34 Proces power 2 gas [34]

Net zoals de batterijsystemen klinkt het power 2 gas systeem mooi; je kan je overtollige elektrische energie omzetten naar een gas, grootschalig opslaan en later de gassen verkopen of met behulp van een brandstofcel omzetten naar elektrische energie. Toch kent het proces veel verliezen van power 2 gas 2 power. Afhankelijk van je systeem grootte zijn er verschillende elektrolyzers beschikbaar. Zo verkoopt fabrikant Hydrogenics elektrolyzers vanaf 80kW tot en met 500kW met alkaline elektrolyzers en vanaf 1MW tot en met 25MW met Proton Exchange Membraan (PEM) elektrolyzers [35]. Volgens Shell hydrogen study zullen alkaline elektrolyzer een efficiency hebben van 65 – 82% en PEM elektrolyzers 65 – 78% [34]. Daarnaast kent het terug transformeren van gas naar elektriciteit ook verliezen. Hiervoor kan een Solid oxide brandstofcel (SOFC) gebruikt worden en is beschikbaar van enkele kW tot en met meerdere MW en kent een efficiency van 50 – 70% [33]. Dit betekent dus voor elke MW die in systeem gestopt wordt er een output is tussen de 0,32 – 0,55MW. Ook zal de voetprint van een Power 2 Gas 2 Power systeem niet klein zijn, zo heeft een 1MW elektrolyzer met 300kW brandstofcel en een 10 uur waterstof opslagsysteem van Hydrogenics een voetprint van 360m². [35]

5.3 CONCLUSIE

In conclusie zullen opslagmedia zeer interessant zijn vanuit een energieoptimalisatie standpunt waarmee geholpen kan worden op de onbalans markt om zo het energienet stabiel te houden en energie terug te leveren wanneer er geen opwek is van zonne of wind energie waardoor geen centrales hoeven worden opgestart, maar door de hoge kosten van deze systemen zullen deze nog niet rendabel genoeg zijn om toegepast te worden.

CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

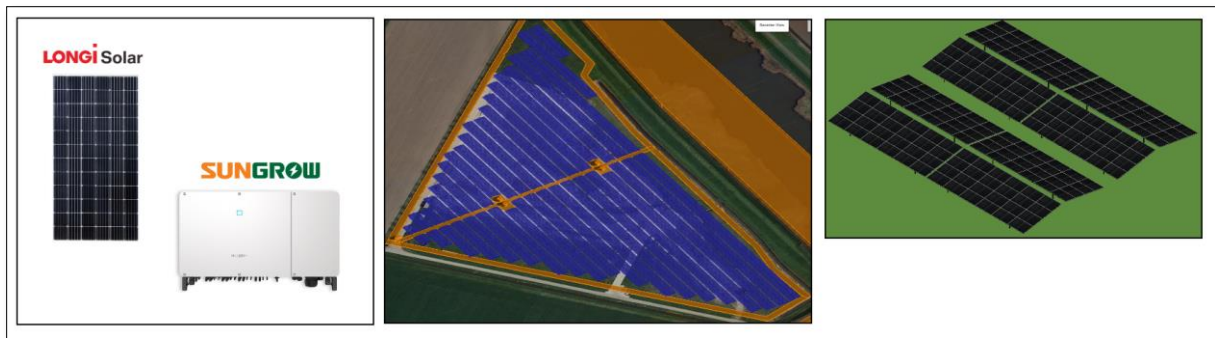
CONCLUSIE

In dit onderzoek is gezocht naar een antwoord op de vraag: “Hoe kan een zo elektrotechnisch optimaal grond gebonden PV-installatie ontworpen worden om de productie van duurzame elektriciteit te maximaliseren rekening houdend met enkele economische interessante voorwaarden?” Hiervoor is een literatuur onderzoek in combinatie met praktische ervaringen uitgevoerd om tot geschikte ontwerp oplossingen te komen voor een grond gebonden PV-installatie.

Daartoe is een eerste beoordeling uitgevoerd om de optimale hellingshoek en oriëntatie van de module vast te stellen, rekening houdend met de bestralingsgegevens voor de gegeven locatie is die helling 10° in een oostwest opstelling. Door het toepassen van realistische beperkingen van maximale hoogte van de opstelling, vorm van de kavel, netaansluiting, esthetiek en paden voor onderhoud is met behulp van een optimalisatie proces en simulatieprogramma's, enkele voorlopige ontwerpen voorbereid. Met integratie van verschillende modules en omvormers modellen uit de lijst van ENGIE goedgekeurde leveranciers zijn de ontwerpen verder uitgewerkt en geoptimaliseerd naar de minste systeemverliezen. Door meerdere criteria tegen elkaar te toetsen is gebleken dat het zonnepaneel van LONGi solar in combinatie met SUNGROW omvormers het meest geschikte systeem is gebleken. Om de energie van de omvormers op het elektriciteitsnet te krijgen is gekozen om de omvormers op centrale plekken te plaatsen, dit is zowel technisch als economisch voordeliger omdat hoe grotere de afstand afgelegd hoe dikker de kabel zal worden. De meeste verliezen in het systeem zullen ontstaan door Ohmse weestand in het wisselspanning laagspanningsgedeelte hierom is er gekozen om de spanning direct te transformeren naar het spanningsniveau van de netbeheerder. Er is een beoordeling uitgevoerd wat de beste netstructuur zal zijn voor deze locatie hieruit is gekomen dat wanneer het middenspanningsnet ringvormig bedreven wordt eens in de 7,51 jaar een storing of uitval kan plaatsvinden daarnaast is er de mogelijkheid om binnen 122 minuten voedingen om te schakelen voor onderhoud of storingen.

DC Parameters			
Aantal panelen	Geïnstalleerd vermogen	Kabel lengte	Kabel diameter
18.432	6,83MWp	148.257m	6 mm ²
AC Laagspanningsparameters			
Aantal omvormers	DC:AC Ratio	Kabel lengte	Kabel diameter
47	1.43	240m	150 mm ²
AC Middenspanningsparameters			
Compactstations	Transformator	Kabel lengte	Kabel diameter
4	1.250kVA	420m	240 mm ² alu
Performance indicatie			
DC-verlies	AC-verlies	Instalingsverlies	PR
4,5%	1,5%	7,1%	88,4%
Opwek: 6,41GWh per jaar			

Tabel 17 Ontwerp samenvatting



Figuur 35 Samenvatting van gekozen oplossing

Tot slot is er met behulp van een kosten analyse gekeken of dit ontwerp competitief is voor de markt. De kosten zullen in de algemene zin iets hoger uitvallen dan een gemiddeld systeem dit komt mede door het toepassen van vier compactstation wat grote impact heeft op de kostprijs. Ondanks dat de kostprijs hoger zal zijn dan het gemiddelde systeem zal door deze optimalisatie de performance ratio 4,4% hoger liggen. Dit betekent dat er per jaar 4,4% extra energie opgewekt kan worden. Het systeem zal zeker kunnen concurreren met andere PV-systemen. Zeker wanneer hoge performance ratio geëist wordt vanuit een eventueel programma van eisen.

AANBEVELINGEN

Door de continue groei van decentrale opwekking zal congestiemanagement toegepast moeten worden door de netbeheerder(s) omdat ze de energie flow niet meer op hen net aankunnen. Hiervoor kunnen de volgende twee punten worden aanbevolen: het eerste punt zal cable pooling zijn, met zonnepark en windpark op één netaansluiting hoeft de netbeheerder niet rekening te houden met dubbele vermogens op hun schakelstations want wanneer de zon schijnt is er geen wind en wanneer er wind is zal er geen zon zijn. Gemiddeld zal er maar 6% van het jaar een overlap van wind en zon zijn. Ongeveer 1 kilometer vanaf het zonnepark is een windpark gevestigd. Door in gesprek te gaan met deze producent kan dit financiële voordelen geven voor beide producten en zal het elektriciteitsnet van de netbeheerder minder zwaar belast worden echter zullen er wel duidelijk afspraken gemaakt moeten worden wie energie levert wanneer er wind en zon overlap is. Het tweede punt is wanneer congestiemanagement toegepast wordt het overtollige energie op te slaan of om te zetten in een andere energiebron en wordt aanbevolen deze marktontwikkelingen nauwkeurig in de gaten te houden om tot efficiënte systemen te komen.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, „Voorstel voor het Klimaatplan,” Rijksoverheid, Den Haag, 2019.
- [2] Kadaster, „Perceel grenzen,” Kadaster, 27 Maart 2009. [Online]. Available: <https://kadastralekaart.com/kaart/perceel/NDP02/A/2527>. [Geopend 16 Maart 2020].
- [3] Actueel Hoogtebestand Nederland, „Hoogteprofiel Nederland,” Esri Nederland, [Online]. Available: <http://ahn.arcgisonline.nl/hoogteprofiel/>. [Geopend 16 Maart 2020].
- [4] Provincie Noord-Holland, „Kwaliteitsimpuls Zonneparken Inpassing van zonneparken in het Noord-Hollandse landschap,” Juli, Haarlem, 2019.
- [5] Technische Universiteit Delft, „The Working Principle of a Solar Cell”.
- [6] Energysage, „Types of solar panels,” Energysage, 21 Januari 2020. [Online]. Available: <https://www.energysage.com/solar/101/types-solar-panels/>. [Geopend 18 Maart 2020].
- [7] Huawei Solar, „Smart string inverter SUN2000-100KTL-H1,” Maart, 24, 2019.
- [8] SunEarthTools, „Sun Position,” SunEarthTools, [Online]. Available: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=en. [Geopend 20 Maart 2020].
- [9] Jinko Solar, „Datasheet Cheetah JKM315-335M-60-V 315-335W,” Jinko Solar, Shanghai, China, 2020.
- [10] LONGi Solar, „Datasheet LR4-60HPH 350~380M,” LONGi Solar, Shanghai, China, 2020.
- [11] JA Solar, „Datasheet JAM60S09 310-330/PR,” JA Solar, Peking, China, 2020.
- [12] P. Grana, „Understanding DC/AC ratio,” Folsom Labs, San Francisco, 2019.
- [13] P. Grana, „A Deep-Dive into the Top Three PV Design,” Folsom Labs, San Francisco, 2016.
- [14] L. Trepezanovski en D. Dimitrov, „Determination of Optimal Modules Number in Photovoltaic Strings for Inverter Power Maximization,” iCEST Universiteit, Niš, Servië, 2016.
- [15] C. Bouwmeester, „Electrical requirements for solar farms to be constructed in the Netherlands, version 1.5,” ENGIE Generation Europe, Zwolle, 2019.
- [16] R. Mayfield, P. Gibbs en P. Grana, „Reassessing DC Volta convetions,” SolarPro, Ashland, USA, 2015.
- [17] Nederlandse Norm, „NEN1010 Elektrische installaties voor laagspanning,” Delft, 2015.
- [18] Nederlandse Norm, „NPR5310 Nederlandse praktijkrichtlijn bij NEN1010,” Delft, 2017.
- [19] Nederlandse Norm, „NEN3140 Bedrijfsvoering van elektrische installaties - laagspanning,” Delft, 2018.

- [20] Nederlandse Norm, „NEN8012 Keuze van het leidingtype met als doel het beperken van schade als gevolg van brand van en via elektrische leidingen,” Delft, 2015.
- [21] Hager group, „Referentieprojecten utiliteit,” Hager Nederland, 13 Augustus 2018. [Online]. Available: <https://www.hager.nl/oplossingen/utiliteit/referentieprojecten-utiliteit/hager-project-pv-park-lelystad/188471.htm>. [Geopend 4 Mei 2020].
- [22] SUNGROW Power, „PV-inverter products,” [Online]. Available: <https://www.sungrowpower.com/en/node/17>. [Geopend 4 Mei 2020].
- [23] Phase to Phase, „Netten voor distributie van elektriciteit,” Phase to Phase, Arnhem, 2011.
- [24] Netbeheer Nederland, „Tarievencode elektriciteit,” 2 Februari 2019. [Online]. Available: https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/E01_-_Tarievencode_Elektriciteit_15.pdf. [Geopend 5 Mei 2020].
- [25] Netbeheer Nederland, „Betrouwbaarheid elektriciteitsnetten in Nederland,” 12 April 2019. [Online]. Available: https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Betrouwbaarheid_elektriciteitsnetten_in_Nederland_2018_150.pdf. [Geopend 5 Mei 2020].
- [26] TKF, „Twenpower kabels,” [Online]. Available: <https://www.tkf.nl/files/content/twenpower-nederlands-2015.09.09.115800.pdf>. [Geopend 5 Mei 2020].
- [27] G. Scharrenberg, „Betrouwbaarheid van distributienetten,” in *Hogeschool Windesheim*, Zwolle, 2019.
- [28] Eaton, „Eaton Xiria,” [Online]. Available: <http://www.eaton.nl/nederland/Productenoplossingen/Electrical/ProductenServices/Energiedistributie/MVS/Ringkabelstations/Xiria/index.htm>. [Geopend 5 Mei 2020].
- [29] N. H. Reich, B. Mueller, A. Armbruster, W. v. Sark, K. Kiefer en C. Reise, „Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic?,” Wiley online library, Hamburg, Duitsland, 2012.
- [30] Alliander N.V., „Transportcapaciteit Noord-Holland,” 20 April 2020. [Online]. Available: <https://www.liander.nl/transportcapaciteit/noord-holland?ref=21173>. [Geopend 6 Mei 2020].
- [31] A. v. Ofwegen, „Power & Utilities Seminar energie-opslag,” Vattenfal, Amsterdam, 2016.
- [32] J. P. O'Connor, Off Grid Solar Book, Second Edition, ISBN 978-0578546193, 2017, pp. 100-200.
- [33] Alfen Nederland N.V., „Alfen Energieopslag TheBattery,” [Online]. Available: <https://alfen.com/nl/energieopslag/thebattery-specificaties>. [Geopend 7 Mei 2020].
- [34] J. Adolf, C. Balzer, J. Louis en U. Schabla, „Shell hydrogen study,” Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg, 2017.
- [35] Hydrogenics, „Energy Storage & Fueling Solutions Power-To-Gas,” [Online]. Available: <https://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/energy-storage-fueling-solutions/power-to-gas/>. [Geopend 7 Mei 2020].

6 BIJLAGEN

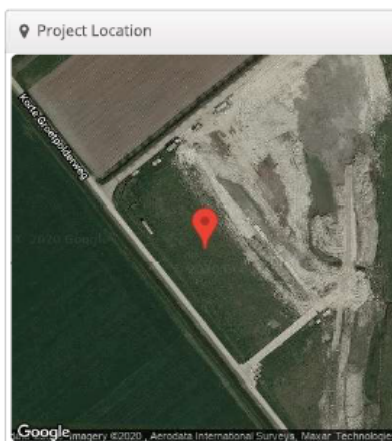
6.1 JAARLIJKSE PRODUCTIERAPPORT OPTIMAAL SYSTEEM

Annual Production Report produced by Roy Kamper

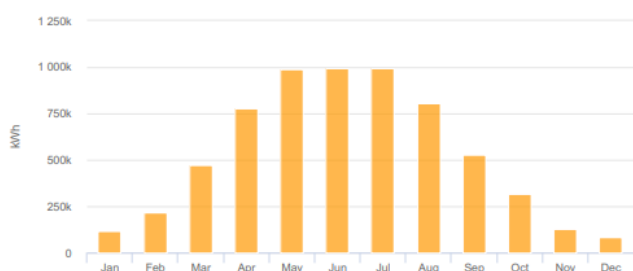
00 V2 DO LONGi 10-OW Sungrow NDP02-A-2527 Roy, Korte groetpolderweg 0

Report	
Project Name	NDP02-A-2527 Roy
Project Address	Korte groetpolderweg 0
Prepared By	

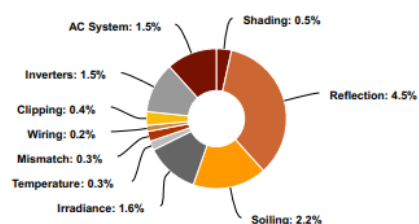
System Metrics	
Design	00 V2 DO LONGi 10-OW Sungrow
Module DC Nameplate	6.82 MW
Inverter AC Nameplate	4.78 MW Load Ratio: 1.43
Annual Production	6,449 GWh
Performance Ratio	88.9%
kWh/kWp	945.6
Weather Dataset	TMY, 10km Grid, meteonorm (meteonorm)
Simulator Version	ce5e6a071e-6c018f100a-6e3ef66567-3ed7ff2eed



Monthly Production



Sources of System Loss

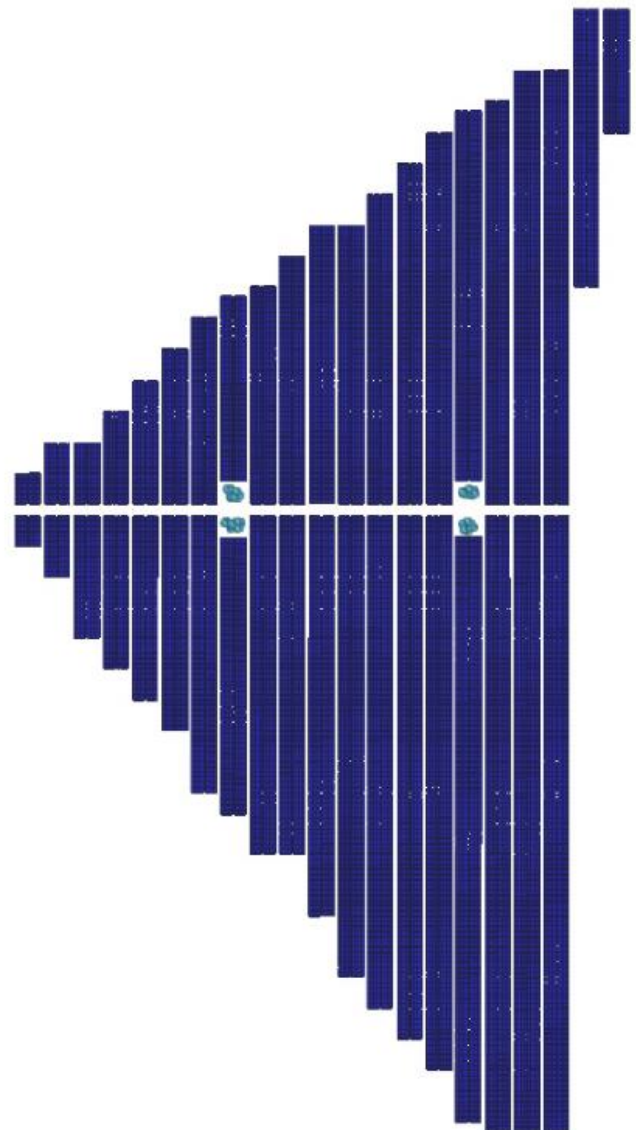


Annual Production

	Description	Output	% Delta
Irradiance (kWh/m ²)	Annual Global Horizontal Irradiance	1,066.9	
	POA Irradiance	1,063.7	-0.3%
	Shaded Irradiance	1,058.9	-0.5%
	Irradiance after Reflection	1,011.3	-4.5%
	Irradiance after Soiling	989.1	-2.2%
	Total Collector Irradiance	989.1	0.0%
Energy (kWh)	Nameplate	6,798,719.8	
	Output at Irradiance Levels	6,691,008.1	-1.6%
	Output at Cell Temperature Derate	6,672,808.5	-0.3%
	Output After Mismatch	6,652,935.0	-0.3%
	Optimal DC Output	6,641,008.7	-0.2%
	Constrained DC Output	6,613,870.0	-0.4%
	Inverter Output	6,513,790.0	-1.5%
	Energy to Grid	6,416,080.0	-1.5%
Temperature Metrics			
	Avg. Operating Ambient Temp		12.6 °C
	Avg. Operating Cell Temp		17.7 °C
Simulation Metrics			
	Operating Hours	4579	
	Solved Hours	4579	

Condition Set												
Description	Condition Set 2											
Weather Dataset	TMY, 10km Grid, meteonorm (meteonorm)											
Solar Angle Location	Meteo Lat/Lng											
Transposition Model	Perez Model											
Temperature Model	Sandia Model											
Temperature Model Parameters	Rack Type	a	b	Temperature Delta								
	Fixed Tilt	-3.56	-0.075	3°C								
	Flush Mount	-2.81	-0.0455	0°C								
	East-West	-3.56	-0.075	3°C								
	Carport	-3.56	-0.075	3°C								
Soiling (%)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
Irradiation Variance	1%											
Cell Temperature Spread	4° C											
Module Binning Range	0% to 1.5%											
AC System Derate	1.00%											
Module Characterizations	Module	Uploaded By		Characterization								
	LR4-60HPH-370M (Longi Solar)	Folsom Labs		Spec Sheet Characterization, PAN								
Component Characterizations	Device	Uploaded By		Characterization								
	SG50CX (Sungrow)	Folsom Labs		Spec Sheet								
	SG33CX (Sungrow)	Folsom Labs		Spec Sheet								
	SG110CX (Sungrow)	Folsom Labs		Spec Sheet								

Components		
Component	Name	Count
Inverters	SG50CX (Sungrow)	4 (200.0 kW)
Inverters	SG33CX (Sungrow)	2 (66.0 kW)
Inverters	SG110CX (Sungrow)	41 (4.51 MW)
Strings	6 mm2 (Copper)	768 (35,795.2 m)
Module	Longi Solar, LR4-60HPH-370M (370W)	18,432 (6.82 MW)



6.2 KABELBEREKENING OMVORMER LAAGSPANNINGSZIJDE

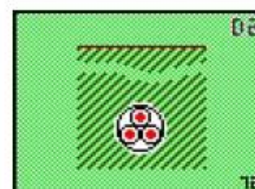
ENGIE Services

Project	=	inteleczone-akker winkel.nen
Verdeler	=	->04=SG33CX
Kabel	=	N04:Kabel->SG33CX
User	=	RK\Roy Kamper
Datum	=	12-05-2020 NEN-1010 2015

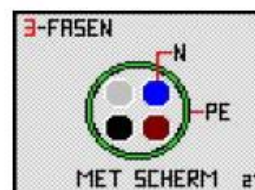


installatie methode : D2 / 72: kabel direct in de grond zonder aanvullende bescherming

kabels onderling	=	aantal stroomketens = 6 / afstand=1 x De
kabel-configuratie	=	n.v.t.
aantal belaste aders	=	3 / aders totaal=4 Koper
Cosinus-phi	=	0.950 Frequentie=50 Hz
Spannings configuratie	op eindpunt	= 3x403.7/233.1 UVmax=3.0% Fase= L123
stelsel	=	TN-S
aantal kabels parallel	=	1 lengtefactor=1.00
grond temperatuur	T [°C]	= 20.0
specifieke warmteweerstand	Q (K.m/W)	= 0.8



kabel type	=	YMvKas 4x16 mm2 Cu, Dca
max. toelaatbare stroom	IZ [A]	= 72.1 IZc=84.0 A
vermogen	S [kVA]	= 36.0 P=34.2 kW / Reserve=8.0 kVA (18.3%)
gelijktijdigheid	GLT (x)	= 1.00 <- overall
ontwerpstroom	IB [A]	= 51.5
veiligheid	IN [A]	= 63 Type=gG63
Tabel waarde 53.H.1	IZ>[A]	= 69.5
max. lengte kabel	LM [m]	= 95.4 LK = 113.5 m/ aanraakspanning Ok
max. spanningsverlies	UM [V]	= 12.1 (2.85%) UMf=7.0 V / 95.4 m
lengte kabel	LE [m]	= 20.0
spanningsverlies	UV [V]	= 2.54 (0.62%) UVf=1.47 V / 20.0 m
totaal wattverlies	PL [W]	= 233.3 4.67 Eurocent/uur (1 kWh=0.200 Euro)
kortsluitstroom	IK [A]	= 282.4 bij 113.5 m / Netconstante=0.80
temperatuur normaal	Tn [°C]	= 90.0 <- max.temperatuur geleider
max. temperatuur / kortsluiting	Tm [°C]	= 100.0 bij 95.4 m / K-factor=143.1
gem. temperatuur / kortsluiting	Tk [°C]	= 95.0 bij 95.4 m
gelijkstroom weerstand	Rdc [ohm/km]	= 1.15000 Rpe=1.15000 (20 °C)
specifieke weerstand	Rn [ohm.mm2/m]	= 0.02346 Zn=0.02351 / normaal
specifieke weerstand	Rk [ohm.mm2/m]	= 0.02383 Zk=0.02388 / kortsluiting (95m)
specifieke reactantie	X [ohm.mm2/m]	= 0.00156 R (20 °C) = 0.01840 [ohm.mm2/m]
uitgangspunt v/d berekening	=	veiligheid IN=63 A
aderconfiguratie	=	3-Fasen, Nul, Scherm
reductie a.g.v. temperatuur	=	1.000
reductie a.g.v. warmteweerstand	=	1.620
reductie a.g.v. meerdere kabels (ketens=6)	=	0.530
reductie a.g.v. hogere harmonischen (3e)	=	1.000
reductie a.g.v. mineraal zonder Pvc-mantel	=	1.000
totale reductie factor IZx	=	0.859
reductie a.g.v. gereduceerde PEN/N	=	1.000
reductie a.g.v. gereduceerd aardscherm/PE	=	1.000 Scherm/PE = 16.0 mm2 Cu
totale reductie factor LKx	=	1.000
NEN 1010 tabeller	=	52.B.5k8/52.B.15+16/52.B.18/53.F.4



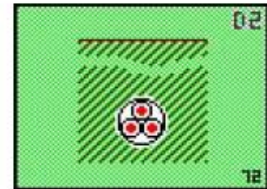
Voor de Cumulatieve Verliezen / kA-waarde / Selectiviteit => IS-KabelNet + NEN-1010 versie 6.0A d.d.:24-01-2020

Project = intelec/zonne-akker winkel.nen
 Verdelers = ->03=SG50CX
 Kabel = N03:Kabel->SG50CX
 User = RK\Roy Kamper
 Datum = 12-05-2020 NEN-1010 2015

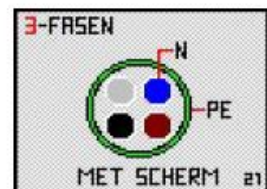


installatie methode : D2 / 72: kabel direct in de grond zonder aanvullende bescherming

kabels onderling = aantal stroomketens = 6 / afstand=1 x De
 kabel-configuratie = n.v.t.
 aantal belaste aders = 3 / aders totaal=4 Koper
 Cosinus-phi = 0.950 Frequentie=50 Hz
 Spannings configuratie op eindpunt = 3x404.4/233.5 UVmax=3.0% Fase= L123
 stelsel = TN-S
 aantal kabels parallel = 1 lengtefactor=1.00
 grond temperatuur T [°C] = 20.0
 specifieke warmteweerstand Q (K.m/W) = 0.8



kabel type = YMVkas 4x35 mm2 Cu, Dca
 max. toelaatbare stroom IZ [A] = 110.8 IZ=129.0 A
 vermogen S [kVA] = 55.0 P=52.3 kW / Reserve=15.0 kVA (21.4%)
 gelijktijdigheid GLT (x) = 1.00 <-- overall
 ontwerpstroom IB [A] = 78.6
 veiligheid IN [A] = 100 Type=gG100
 Tabel waarde 53.H.1 IZ>[A] = 110.0
 max. lengte kabel LM [m] = 83.4 LK = 83.4 m / aanraakspanning OK
 max. spanningsverlies UM [V] = 7.6 (1.81%) UMf=4.4 V / 83.4 m
 lengte kabel LE [m] = 20.0
 spanningsverlies UV [V] = 1.81 (0.45%) UVf=1.05 V / 20.0 m
 totaal wattverlies PL [W] = 247.7 4.95 Eurocent/uur (1 kWh=0.200 Euro)
 kortsluitstroom IK [A] = 530.3 bij 83.4 m / Netconstante=0.80
 temperatuur normaal Tn [°C] = 90.0 <- max.temperatuur geleider
 max. temperatuur / kortsluiting Tm [°C] = 97.4 bij 83.4 m / K-factor=143.1
 gem. temperatuur / kortsluiting Tk [°C] = 93.7 bij 83.4 m
 gelijkstroom weerstand Rdc [ohm/km] = 0.52400 Rpe=1.15000 (20 °C)
 specifieke weerstand Rn [ohm.mm2/m] = 0.02339 Zn=0.02365 / normaal
 specifieke weerstand Rk [ohm.mm2/m] = 0.02365 Zk=0.02391 / kortsluiting (83m)
 specifieke reactantie X [ohm.mm2/m] = 0.00352 R (20 °C) = 0.01834 [ohm.mm2/m]
 uitgangspunt v/d berekening = veiligheid IN=100 A
 aders configuratie = 3-Fasen, Nul, Scherm
 reductie a.g.v. temperatuur = 1.000
 reductie a.g.v. warmteweerstand = 1.620
 reductie a.g.v. meerdere kabels (ketens=6) = 0.530
 reductie a.g.v. hogere harmonischen (3e) = 1.000
 reductie a.g.v. mineraal zonder Pvc-mantel = 1.000
 totale reductie factor IZx = 0.859
 reductie a.g.v. gereduceerde PEN/N = 1.000
 reductie a.g.v. gereduceerd aardscherm/PE = 0.627 Scherm/PE = 16.0 mm2 Cu
 totale reductie factor LKx = 0.627
 NEN 1010 labeller = 52.B.5k8/52.B.15+16/52.B.18/53.F.4



Voor de Cumulatieve Verliezen / kA-waarde / Selectiviteit => IS-KabelNet + NEN-1010 versie 6.0A d.d.:24-01-2020

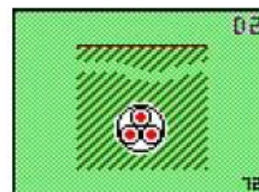
ENGIE Services

Project	=	intelec\zonne-akker winkel.nen
Verdeler	=	->02=SG110CX
Kabel	=	N02:Kabel->SG110CX
User	=	RK\Roy Kamper
Datum	=	12-05-2020 NEN-1010 2015

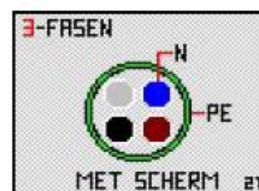


installatie methode : D2 / 72: kabel direct in de grond zonder aanvullende bescherming

kabels onderling	=	aantal stroomketens = 6 / afstand=1 x De
kabel-configuratie	=	n.v.t.
aantal belaste aders	=	3 / aders totaal=4 Koper
Cosinus-phi	=	0.950 Frequentie=50 Hz
Spannings configuratie	op eindpunt	= 3x405.3/234.0 UVmax=3.0% Fase= L123
stelsel	=	TN-S
aantal kabels parallel	=	1 lengtefactor=1.00
grond temperatuur	T [°C]	= 20.0
specifieke warmteweerstand	Q (K.m/W)	= 0.8



kabel type	=	YMKas 4x150 mm2 Cu, Dca
max. toelaatbare stroom	IZ [A]	= 246.4 IZc=287.0 A
vermogen	S [kVA]	= 110.0 P=104.5 kW / Reserve=30.4 kVA (21.7%)
gelijktijdigheid	GLT (x)	= 1.00 <-- overall
ontwerpstroom	IB [A]	= 156.7
veiligheid	IN [A]	= 200 Type=gG200
Tabel waarde 53.H.1	IZ>[A]	= 221.0
max. lengte kabel	LM [m]	= 134.3 LK = 134.3 m / aanraakspanning Ok
max. spanningsverlies	UM [V]	= 6.2 (1.49%) UMf=3.6 V / 134.3 m
lengte kabel	LE [m]	= 20.0
spanningsverlies	UV [V]	= 0.92 (0.23%) UVf=0.53 V / 20.0 m
totaal wattverlies	PL [W]	= 232.9 4.66 Eurocent/uur (1 kWh=0.200 Euro)
kortsluitstroom	IK [A]	= 1194.6 bij 134.3 m / Netconstante=0.80
temperatuur normaal	Tn [°C]	= 90.0 <- max.temperatuur geleider
max. temperatuur / kortsluiting	Tm [°C]	= 92.0 bij 134.3 m / K-factor=143.1
gem. temperatuur / kortsluiting	Tk [°C]	= 91.0 bij 134.3 m
gelijkstroom weerstand	Rdc [ohm/km]	= 0.12400 Rpe=0.24600 (20 °C)
specifieke weerstand	Rn [ohm.mm2/m]	= 0.02372 Zn=0.02552 / normaal
specifieke weerstand	Rk [ohm.mm2/m]	= 0.02379 Zk=0.02559 / kortsluiting (134m)
specifieke reactantie	X [ohm.mm2/m]	= 0.00942 R (20 °C) = 0.01860 [ohm.mm2/m]
uitgangspunt v/d berekening	=	veiligheid IN=200 A
aderconfiguratie	=	3-Fasen, Nul, Scherm
reductie a.g.v. temperatuur	=	1.000
reductie a.g.v. warmteweerstand	=	1.620
reductie a.g.v. meerdere kabels (ketens=6)	=	0.530
reductie a.g.v. hogere harmonischen (3e)	=	1.000
reductie a.g.v. mineraal zonder Pvc-mantel	=	1.000
totale reductie factor IZx	=	0.859
reductie a.g.v. gereduceerde PEN/N	=	1.000
reductie a.g.v. gereduceerd aardscherm/PE	=	0.667 Scherm/PE = 75.0 mm2 Cu
totale reductie factor LKx	=	0.667
NEN 1010 tabellen	=	52.B.5k8/52.B.15+16/52.B.18/53.F.4



Voor de Cumulatieve Verliezen / kA-waarde / Selectiviteit => IS-KabelNet + NEN-1010 versie 6.0A d.d.:24-01-2020

6.3 CONCEPT TEKENING PV-SYSTEEM

Bijlage 6.3 Concept tekening PV-systeem

Ontwerpdatum: 29-04-2020
Schaal: 1:550
Aantal tekeningen: 1 van 1
Papier formaat: A0-HOR

Onderwerp:

Elektrische installatie
Layout tekening en single line diagram

Tekeningnummer:

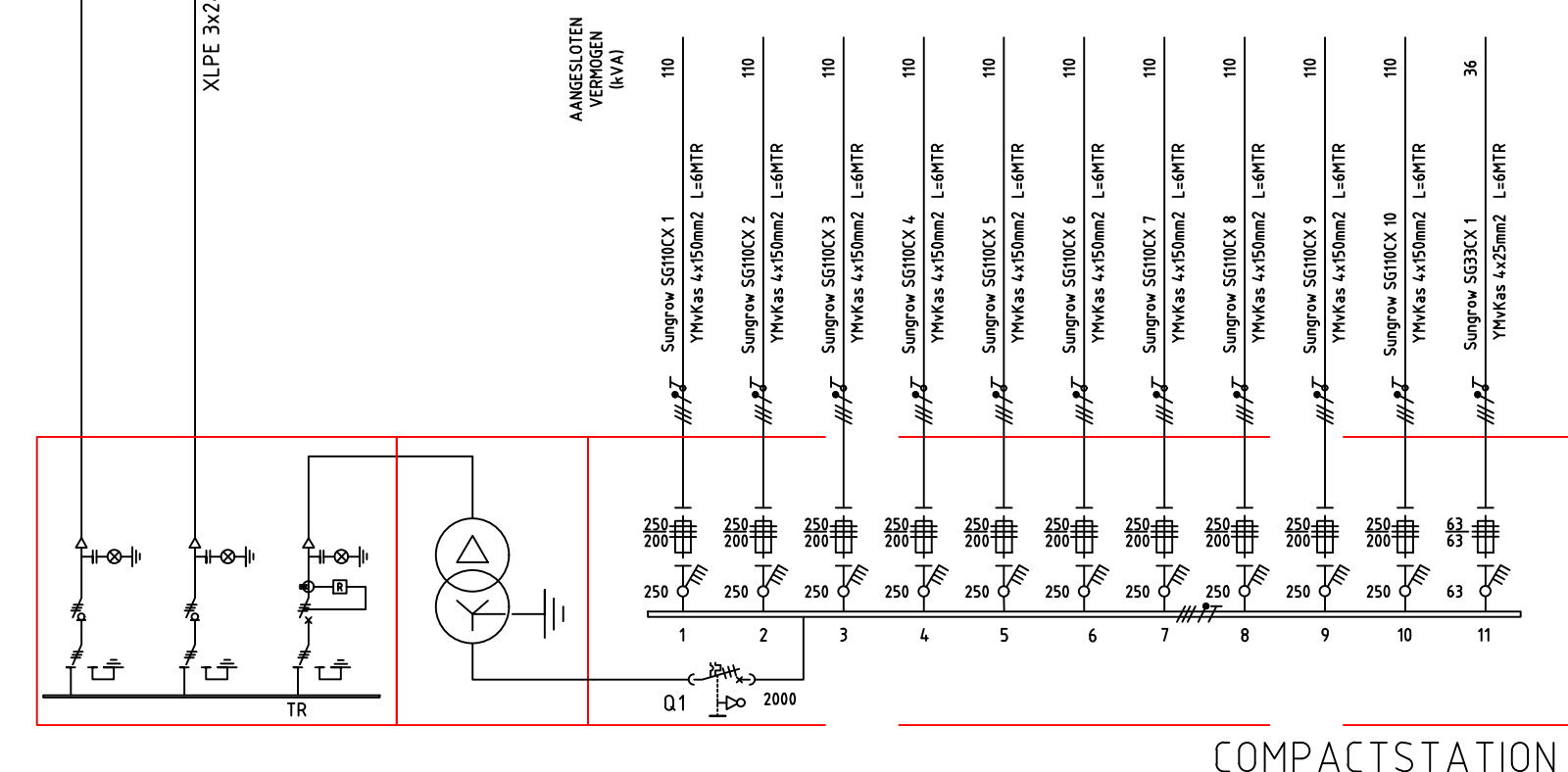
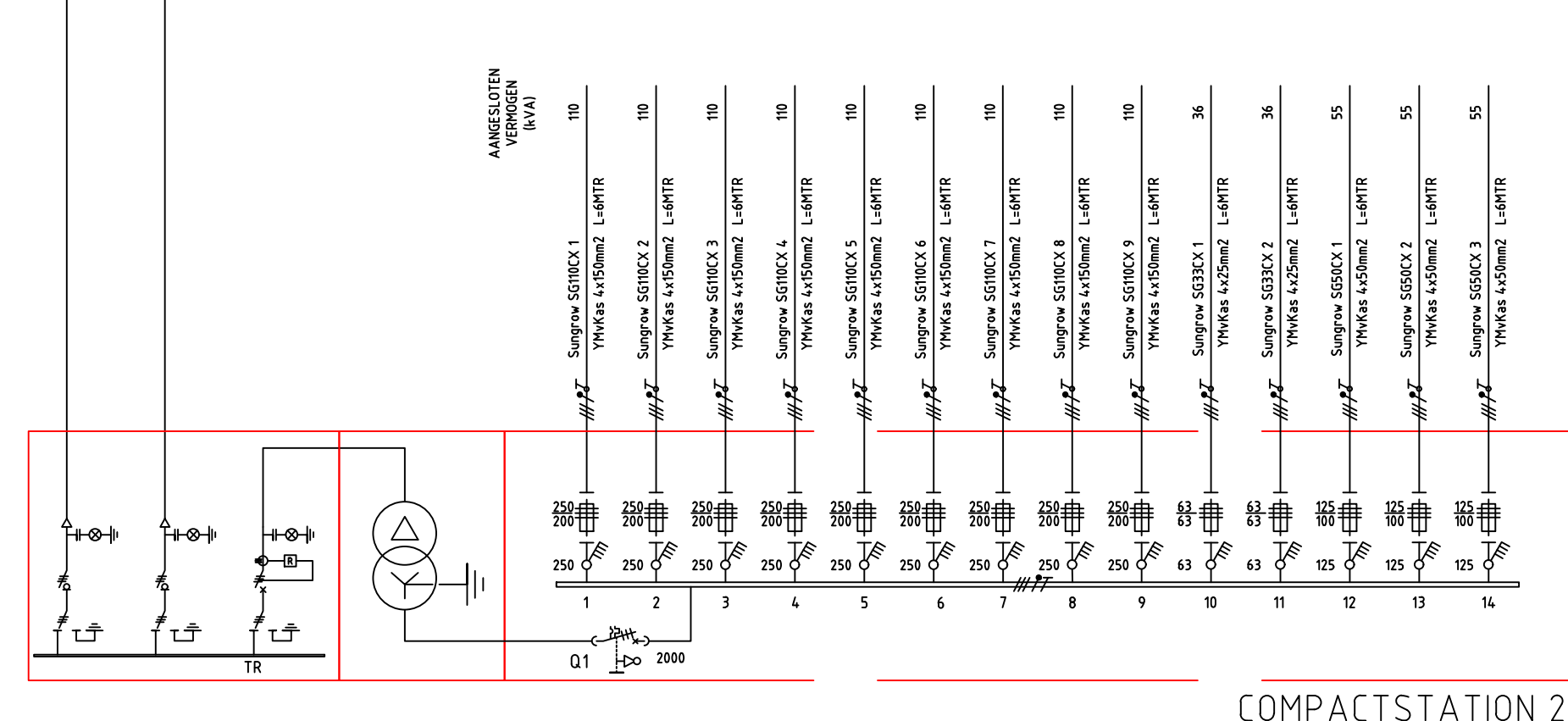
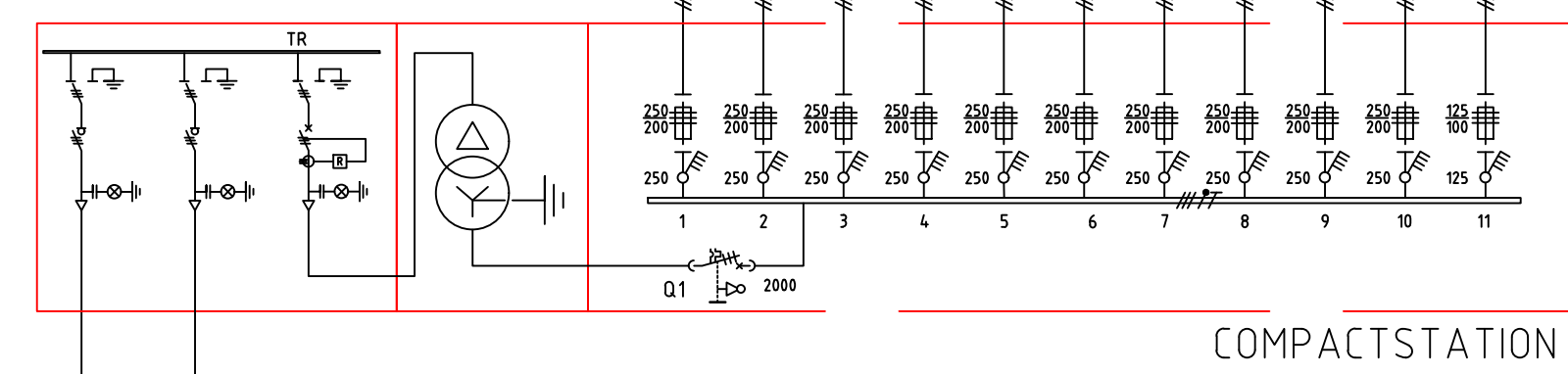
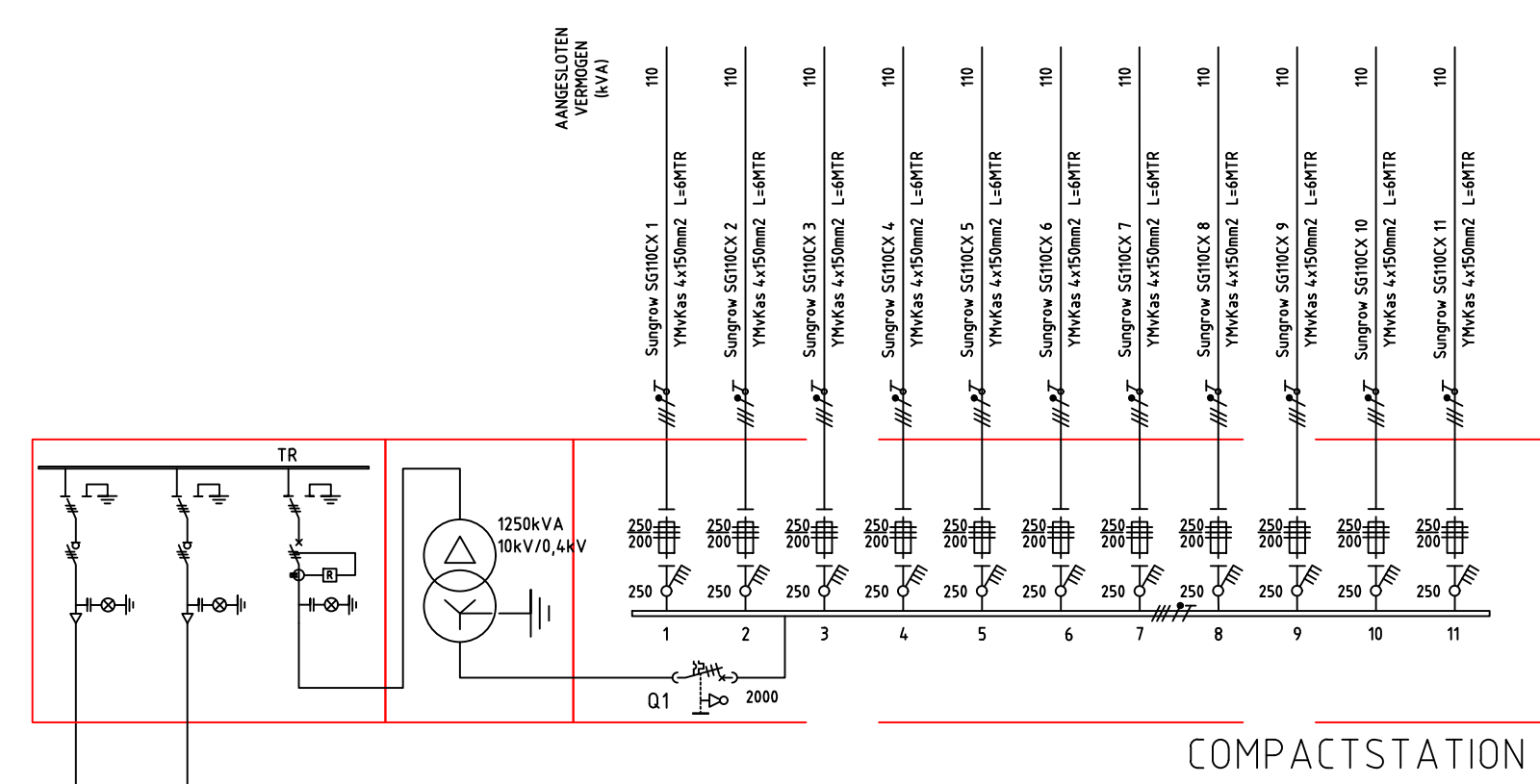
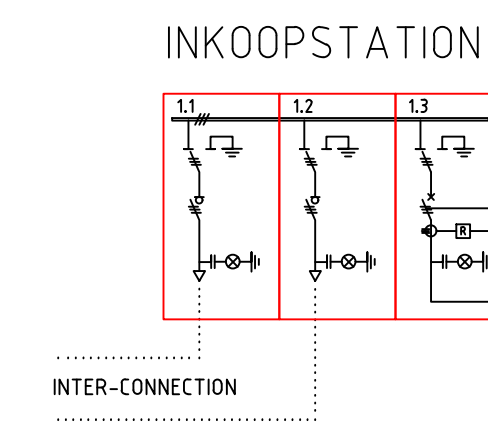
1731NN-60-00-201

Documentnaam:

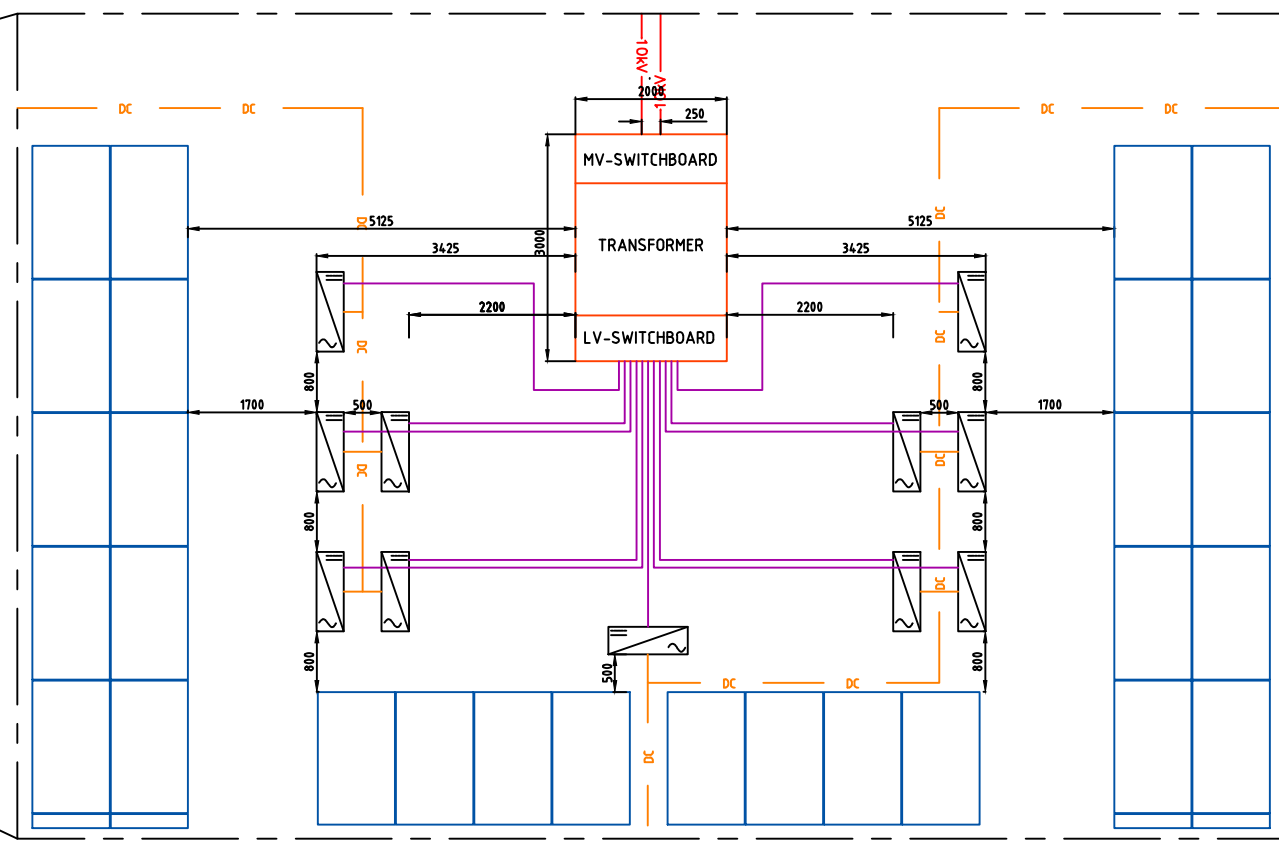
1731NN-60-00-201.dwg



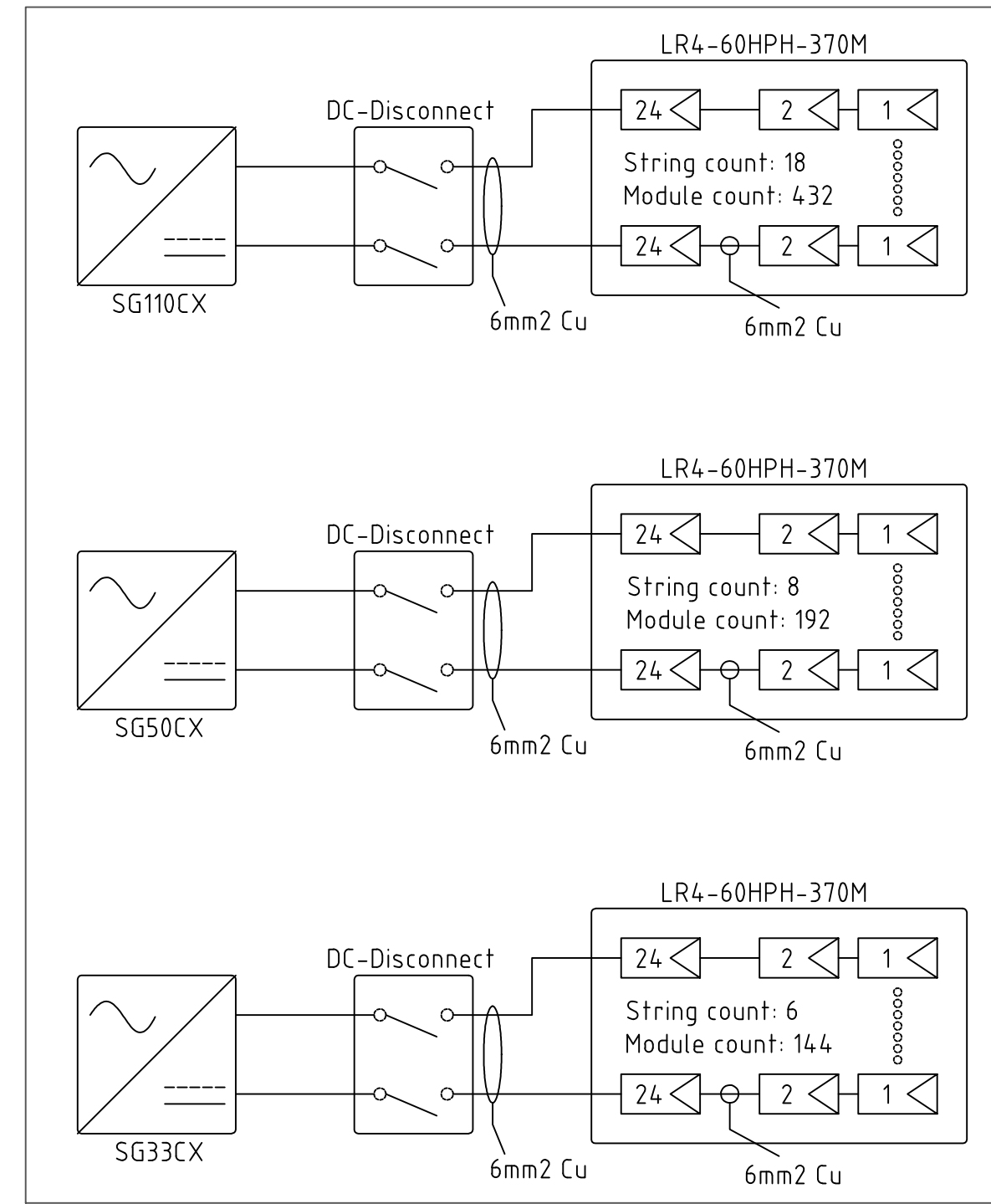
Single line diagram



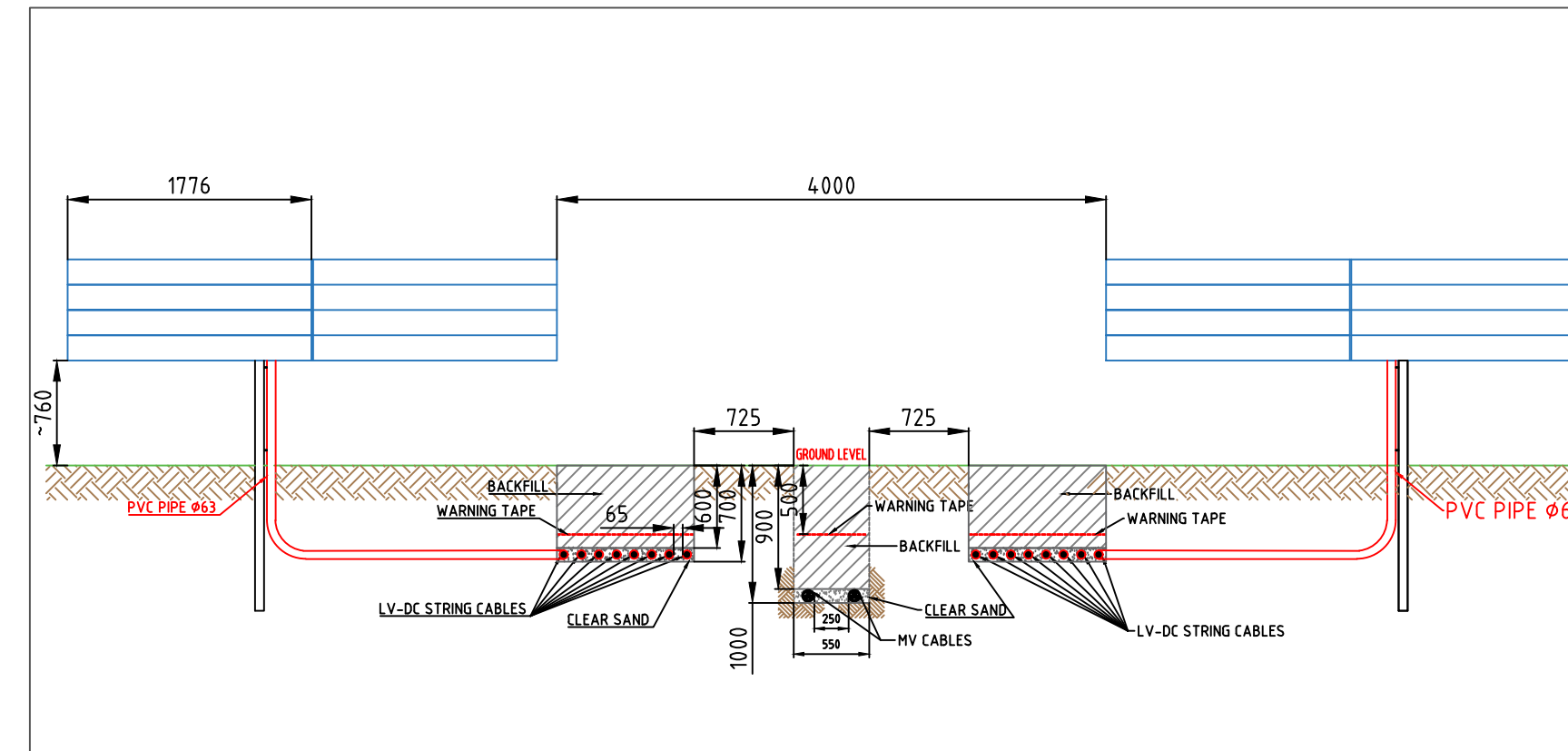
Top view inverter setup scale 1:100



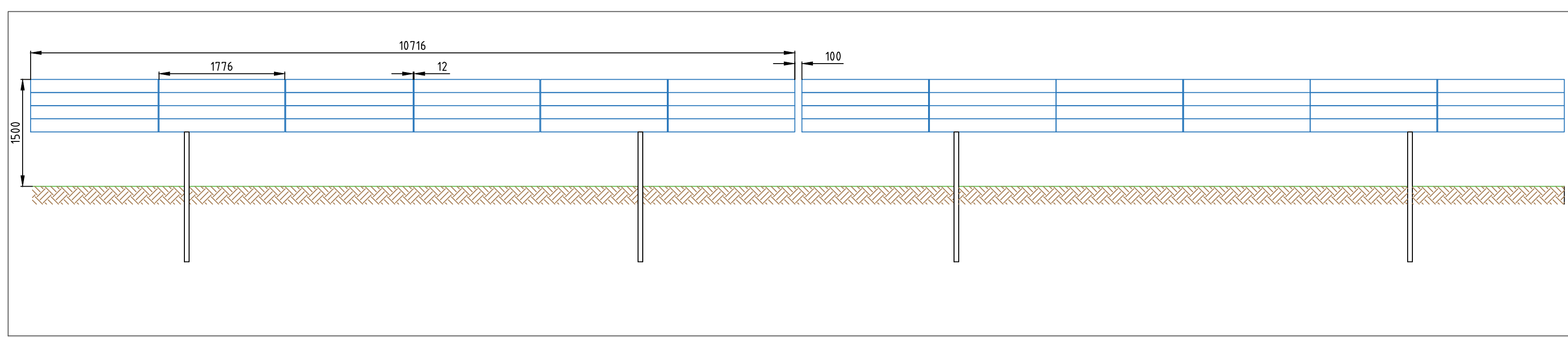
Inverter stringing



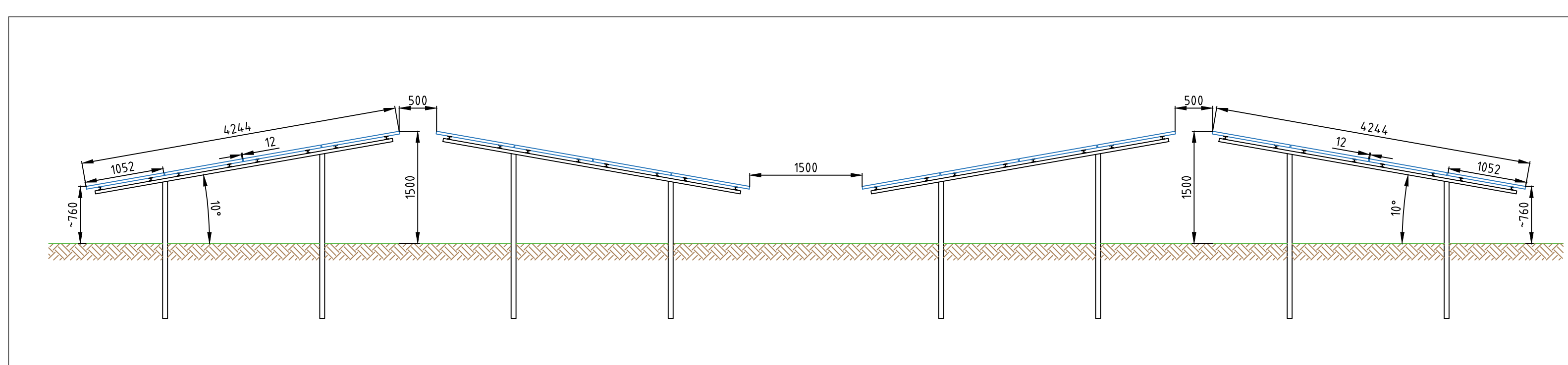
Front view cable trench scale 1:50



Frame front view scale 1:50



Frame side view scale 1:50



MAIN EQUIPMENT:			
GRID-INTERCONNECTION:			
ITEM	NAME	UNITS	QUANTITY
1	EATON XIRIA M	PCS	1
2	XLPE 3x240mm ² Al Kudi 6/10	MTR	395
10kV/0.4kV SUB-STATIONS:			
3	EATON XIRIA E	PCS	4
4	10kV R1, diff RELAY	PCS	4
5	1250kVA TRANSFORMER	PCS	4
6	HAGER UNIMES RACK 2000A	PCS	4
7	VO-YMKas 4x150mm ² DCA	MTR	240
8	VO-YMKas 4x150mm ² DCA	MTR	24
9	VO-YMKas 4x25mm ² DCA	MTR	12
SOLAR EQUIPMENT:			
10	LONGI SOLAR LR4-60HPH-370M	PCS	18432
11	SUNGROW SG10CX	PCS	4.1
12	SUNGROW SG33CX	PCS	4
13	SUNGROW SG33CX	PCS	2
14	1x65mm ² 1%VDC SOLAR	MTR	168257

PROJECT SUMMARY:	
TOTAL OF PV-MODULES:	18432
MODULE:	LONGI SOLAR LR4-60HPH-370M
PEAK POWER PV-PLANT:	6.82MWp



CONCEPT DESIGN			
Rev	Description of changes	Drawn	Checked
1	SOLAR FARM	N.V.T.	Approved
2	KORTE GROETPOLDERWEG 3	N.V.T.	Approved
3	WINKEL	N.V.T.	Approved
4	ELECTRICAL EQUIPMENT	N.V.T.	Approved
5	LAYOUT DRAWING	N.V.T.	Approved
6	1000	N.V.T.	Approved
7	113000-40-40-201.dwg	N.V.T.	Approved
8	1731NN-60-00-201	N.V.T.	Approved