

HOOFDSTUK 5: COMPONENTEN VAN EEN FOTOVOLTAÏSCH SYSTEEM

5.1. BATTERIJEN	105
5.1.1. Inleiding.....	105
5.1.2. Terminologie	105
5.1.3. Vergelijking tussen verschillende energie-opslag technologieën	107
5.1.4. Loodzuur batterijen.....	110
5.1.4.1. Materialen	110
5.1.4.2. Spanningskarakteristiek	110
5.1.4.3. Soortelijk gewicht van het elektrolyt.....	110
5.1.4.4. Sulfatatie	111
5.1.4.5. Constructie van de elektrode-platen	111
5.1.4.6. Soorten batterijen	112
5.1.5. Beschrijving van het gedrag van een loodzuurbatterij	115
5.1.6. Nikkelcadmium batterijen.....	117
5.1.6.1. Beluchte nikkelcadmium batterijen.....	117
5.1.6.2. Gesloten nikkelcadmium cellen	117
5.1.6.3. Opladen van nikkelcadmium batterijen.....	118
5.1.6.4. Nikkelcadmium batterijen voor fotovoltaïsche toepassing.....	118
5.2. LAADREGELSYSTEMEN.....	119
5.2.1. Inleiding.....	119
5.2.2. Zelfregulerend systeem met blokkeerdiode	119
5.2.3. Parallelregelaar	120
5.2.4. Serieregelaar	121
5.2.5. Sequentiële regelaars	122
5.2.6. Geavanceerde regeleenheden.....	123
5.3. INVERTOREN.....	125
5.3.1. Inleiding.....	125
5.3.2. Vereisten van netgekoppelde invertoren	125
5.3.2.1. Maximale vermogen punt werking.....	125
5.3.2.2. DC-beveiligingen	127
5.3.2.3. Rendement van de omzetting	127
5.3.2.4. Power Quality	128
5.3.2.5. AC-beveiliging.....	129
5.3.2.6. Gebruiksvriendelijkheid	131
5.3.3. Indeling van invertoren naar grootte	131
5.3.4. Indeling van invertoren naar werkingsprincipe.....	132
5.3.4.1. Lijngecommuteerde invertoren	132
5.3.4.2. Zelfgecommuteerde invertoren	133
5.3.4.3. Nieuwe technieken.....	136
5.3.5. Verliezen in invertoren	137
5.3.5.1. Nullastverliezen	137
5.3.5.2. Spanningval-verliezen.....	138
5.3.5.3. Weerstandsverliezen	138
5.3.6. Kenmerken van onafhankelijke invertoren	138

HOOFDSTUK 5: COMPONENTEN VAN EEN FOTOVOLTAÏSCH SYSTEEM

5.1. BATTERIJEN

5.1.1. Inleiding

Onafhankelijke fotonvoltaïsche systemen hebben vaak een vorm van energiestockage nodig om in periodes met weinig of geen zonne-instraling, een belasting in werking te houden. In systemen waar een elektrische energieopslag vereist is, zal de klassieke elektro-chemische accumulatorbatterij vaak de beste en eenvoudigste optie bieden. Vooral omdat, zoals beschreven in hoofdstuk 4, de karakteristiek van een batterij de rechtstreekse koppeling met een fotonvoltaïsch module toelaat, zonder dat het hierbij noodzakelijk is enige conversie of transformatie uit te voeren.

Spijtig genoeg blijkt in de meeste onafhankelijke fotonvoltaïsche systemen de batterij nog steeds de zwakste schakel te zijn. De levensduur van de batterij in het systeem is vaak een factor 2 tot 3 lager dan die van de modules. Verder wordt deze levensduur sterk bepaald door de manier waarop men de batterij behandelt en hoe ze zich gedraagt in het systeem. Daarom zullen we in deze paragraaf dieper ingaan op deze problematiek.

5.1.2. Terminologie

Batterijcapaciteit

De batterijcapaciteit is een maat voor de hoeveelheid energie of lading die kan opgeslagen worden in een batterij. De capaciteit is bepaald door de hoeveelheid actief materiaal dat in contact kan komen met het elektrolyt. De capaciteit wordt uitgedrukt in Ampère-uren [Ah], dit is de tijd dat een bepaalde stroomintensiteit door de batterij geleverd kan worden voor ze ontladen is. Af en toe wordt de batterijcapaciteit ook uitgedrukt in Watt-uren [Wh]; via de batterijspanning zijn beiden met mekaar verbonden.

Standaard batterijcapaciteit

Dit is de capaciteit van een batterij onder bepaalde standaard condities. Gebruikelijk wordt de standaard batterijcapaciteit gedefinieerd bij 20°C en met een constante ontladingsstroom waardoor de batterij ontladend in 10 uren. Men spreekt dan van een batterijcapaciteit bij C/10 of C₁₀. Voor batterijen die speciaal voor fotonvoltaïsche toepassingen gebruikt worden gaat de fabrikant ook vaak de ontladcapaciteit over 100 uren of C/100 vermelden. Typisch zal de capaciteit bij C/100 30% hoger zijn dan

bij C/10 omdat bij een grotere ontladingsstroom de serieweerstandsverliezen toenemen.

Ladingstoestand of SOC

De ogenblikkelijke ladingstoestand (SOC "State of charge") is de resterende hoeveelheid lading die gebruikt kan worden in vergelijking met de volgeladen capaciteit. De ladingstoestand wordt uitgedrukt als een percentage, dus 100% voor een volgeladen cel.

Cyclusdiepte

De opeenvolging van een ontlading en een lading tot de oorspronkelijke ladingstoestand wordt een cyclus genoemd. De diepte van ontlading binnen één cyclus is afhankelijk van het gebruik van de batterij en zal zeker niet steeds tot een lege ladingstoestand zijn. In een kleine cyclus zal een batterij slechts enkele procenten ontladen worden alvorens opnieuw geladen te worden. In een diepe cyclus zal men tot 50% of meer ontladen.

Levensduur van een batterijcel

De levensduur van een batterijcel wordt gedefinieerd als de termijn waarop de volgeladen batterijcapaciteit verminderd is tot 80% van zijn oorspronkelijke waarde. Tijdens een batterijcyclus komen telkens kleine hoeveelheden actief materiaal los van de elektrodes en zinken naar de bodem van de container. Dit materiaal draagt dan niet meer bij tot het proces en vermindert hierdoor de batterijcapaciteit. Het aantal cycli dat kan uitgevoerd worden voordat de batterijcapaciteit gedaald is tot 80% wordt de cycluslevensduur genoemd en is afhankelijk van de cyclusdiepte, de ontladingsstroom en de temperatuur.

In sommige toepassingen zal er praktisch geen cyclus optreden, bijvoorbeeld in batterijen voor UPS (Uninterrupted Power Supply) systemen die opgeladen blijven tot in noodgeval. De batterijcapaciteit zal dan toch afnemen en dit door veroudering. Men spreekt dan van de kalender levensduur van een batterij. Deze wordt uitgedrukt in jaren en is afhankelijk van de temperatuur van de cellen.

Nominale en bruikbare batterijcapaciteit

Sommige types batterijen zullen enkel een aanzienlijke levensduur bereiken wanneer de cyclusdiepte zeer klein gehouden wordt. Omdat de volledige batterijcapaciteit dan nooit zal gebruikt worden spreekt men dan over de nominale batterijcapaciteit. De capaciteit die effectief kan gebruikt worden om de vereiste levensduur te halen wordt dan de bruikbare batterijcapaciteit genoemd.

Maximale laadspanning en vergassingsspanning

De maximale laadspanning is de drempelspanning die een batterij mag bereiken tijdens zijn ladingstoestand. De maximale laadspanning moet steeds lager zijn dan de vergassingsspanning. De vergassingsspanning is het spanningsniveau waarbij gas geproduceerd wordt in de batterij.

Dit fenomeen treedt op wanneer de batterijcel volledig opgeladen is. De ontladen toestand van het actief materiaal is dan niet meer aanwezig waardoor er andere chemische reacties gaan plaatsvinden wanneer er verder geladen wordt. Eén van deze reacties is de elektrolyse van water. Zuurstofbellen en waterstofbellen zullen gevormd worden aan respectievelijk de positieve en de negatieve elektrode.

Een lichte vorm van vergassing is niet schadelijk voor de batterij omdat de bellen die gevormd worden, het elektrolyt mengen waardoor concentratieverschillen in het elektrolyt tegengegaan worden. Bij voortdurende vergassing zal het elektrolyt echter meer geconcentreerd worden en zal water moeten toegevoegd worden indien het niveau van het elektrolyt te laag komt.

Ontlaad-drempelspanning

Dit is het minimale spanningsniveau waaronder een batterij niet mag dalen om schade te vermijden. Dit niveau is afhankelijk van de grootte van de ontladingsstroom.

Laadrendement

Het laadrendement van een batterij wordt bepaald door de hoeveelheid lading die verbruikt is door de belasting te vergelijken met de hoeveelheid lading die nodig om de batterij opnieuw in zijn oorspronkelijke ladingstoestand te brengen. Wanneer geladen wordt tot een ladingstoestand van 80% zal het laadrendement tot 90% bedragen voor de meeste types van batterijen. Wanneer de volle ladingstoestand bereikt wordt zal het laadrendement snel afnemen ten gevolge van vergassing.

Bij opmeting van het laadrendement dient men in acht te nemen dat wanneer men dit doet door de ingaande en uitgaande ladingsstroom te integreren [Ah], men een hoger rendement verkrijgt dan wanneer men uitgaat van geleverde en opgenomen energie [Wh], de batterijspanning bij lading is immers altijd hoger dan bij ontlading.

Zelfontlading

Alle batterijen gaan ontladen wanneer zij niet gebruikt worden. De snelheid van zelfontlading wordt gespecificeerd als het maandelijkse ladingsverlies, uitgedrukt als een percentage van de capaciteit.

5.1.3. Vergelijking tussen verschillende energie-opslag technologieën

De tabel 5.1 geeft een overzicht van de technische karakteristieken van de meest gebruikte batterij-types (loodzuur en nikkelcadmium) met alternatieve energie-opslagmethodes: oplaadbare lithium batterijen, een typische primaire cel (wegwerp droge-cel batterij) en de brandstoftank van een wagen. De parameters van de brandstoftank zijn berekend vanuit de veronderstelling dat een typische verbrandingsmotor een thermisch rendement van 20% bezit.

Karakteristieke grootheid	Loodzuur	NiCd	Primaire cel	Lithium cel	Brandstof tank
Energiedichtheid: [Wh/kg]	35	40	95	150	2.000
[Wh/liter]	100	90	210	200	2.500
Vermogendichtheid [W/kg]	100	700	50	70	10.000
[W/liter]	200	1.500	90	90	10.000
Energierendement [%]	70-80	60-70	-	-	20
Zelfontlading [%/maand]	5-30	10-20	1	10	0
Minimale laadtijd [h]	3	1	-	3	1min
Temperatuursbereik [°C]	20	-40 / +50	-20 / +50	150	-40 / +50
Levensduur [# cycli]	1.000	1.000	1	200	1.000
Specifieke kost [BEF/kWh]	6.000	14.000	14.000	14.000	12

Tabel 5.1 Karakteristieken van verschillende energiestockage technologieën.

Alhoewel de vermelde waarden slechts indicatief zijn, kunnen de volgende conclusies getrokken worden uit deze tabel:

- Wat betreft energie- en vermogendichtheid kan geen van de voorgestelde elektrische stockage technologieën concurreren met de conventionele brandstoftank. Ook de vultijd van een tank is veel korter dan de laadtijd van batterijen.
- Van de voorgestelde batterijstockage technologieën bezit de lithium cel de hoogste energie- en vermogendichtheid, de levensduur ligt echter nog zeer laag, de benodigde temperatuur is hoog en de technologie is nog niet rijp voor commercialisatie.
- De levensduur van zowel de loodzuur als de nikkelcadmium batterijen zijn relatief laag: een levensduur van 1.000 cycli betekent dat een batterij in een fotovoltaïsch systeem (365 dagen/jaar) slechts 3 jaar zal meegaan.

Uit de vergelijking tussen de loodzuur en de nikkelcadmium batterij kan het volgende besloten worden:

- De loodzuur batterij zal over het algemeen een hoger ladingsrendement hebben dan de nikkelcadmium batterij.
- De loodzuur batterij zal in de meeste toepassingen de meest kosteffectieve oplossing zijn.

De meerkost van een nikkelcadmium batterij zal enkel verrechtvaardigd kunnen worden wanneer de batterij zal blootgesteld worden aan extreme werkingsomstandigheden zoals:

- zeer lage temperaturen, de performantie van loodzuur batterijen is dan zeer slecht
- wanneer een hoge vermogendichtheid van belang is, bijvoorbeeld indien hoge piekstromen nodig zijn en toch een bepaalde cyclusdiepte vereist is.

- wanneer er regelmatig overladen of zwaar ontladen wordt.

Nikkelcadmium batterijen hebben echter ook nog een aantal specifieke nadelen:

- nikkelcadmium batterijen zijn onderhevig aan een geheugeneffect. Wanneer de batterij gedurende lange tijd een kleine cyclusdiepte heeft ondergaan, zal de beschikbare capaciteit van de batterij dalen. Daarom is het belangrijk nikkelcadmium batterijen regelmatig volledig te ontladen en te laden.
- nikkelcadmium batterijen hebben een lagere energierendement.
- het is moeilijk om met lage ladingsstromen (<30% van de nominale capaciteit) een nikkelcadmium batterij volledig op te laden.

5.1.4. Loodzuur batterijen

5.1.4.1. Materialen

De materialen die in het elektro-chemisch proces van een loodzuur cel tussenkomen, zijn weergegeven in tabel 5.2.

Onderdelen	Materialen	
	Geladen	Ontladen
actief materiaal op positieve elektrode	PbO ₂	PbSO ₄
actief materiaal op negatieve elektrode	Pb	PbSO ₄
elektrolyt	H ₂ SO ₄	H ₂ SO ₄ lagere concentratie

Tabel 5.2 De materialen in een loodzuur batterij.

5.1.4.2. Spanningskarakteristiek

De meeste loodzuurbatterijen bestaan uit een groep van 6 cellen die samen de typische 12 V batterij vormen die gebruikt wordt in wagens. De spanningskarakteristiek wordt gegeven in tabel 5.3 voor individuele cellen van 2 V en voor 12 V batterijen. De vergassingsspanning is de maximale spanning die de batterij mag bereiken tijdens lading. De stand-by spanning is de laadspanning die aangehouden moet worden om de batterij in geladen toestand te houden.

Spanningskarakteristiek	Spanningen bij 20°C	
	Enkele cel	6 cellen
Nominale spanning	2 V	12 V
Vergassingsspanning	2,3-2,5 V	14,0-15,0 V
Stand-by spanning	2,2-2,3 V	13,0-14,0 V
Ontlaad-drempelspanning	1,8-1,9 V	10,8-11,4 V
Temperatuursvariatie	-5 mV/°C	-33 mV/°C

Tabel 5.3 De spanningskarakteristieken van loodzuur batterijen.

5.1.4.3. Soortelijk gewicht van het elektrolyt

Tijdens het ontladen daalt de concentratie van zwavelzuur van het elektrolyt doordat lood en looddioxide in zwavelzuur omgezet wordt in loodsulfaat en water. Hierdoor wijzigt de spanning aan de contacten van de cel evenals het soortelijk gewicht van het elektrolyt. Het soortelijk gewicht van het elektrolyt van een volgeladen batterij

varieert tussen 1.240 en 1.280 g/cm³ naargelang het type van batterij. Bij de ontlad-drempelspanning bedraagt het soortelijk gewicht van het elektrolyt ongeveer 1.100 g/cm³. Bij verdere ontlading wordt het sulfaat volledig omgezet en daalt het soortelijk gewicht tot 1.000 g/cm³.

De meting van het soortelijk gewicht van het elektrolyt in de batterij laat toe een absolute waarde van de ladingstoestand van de batterij te bepalen. Het soortelijk gewicht kan bepaald worden met behulp van een hydrometer.

5.1.4.4. Sulfatatie

Een typisch probleem van loodzuur batterijen is sulfatatie. Bij sulfatatie treedt een permanent verlies van capaciteit op en daarom moeten maatregelen getroffen worden om dit te vermijden.

Onder normale omstandigheden is de laag loodsulfaat die gevormd worden tijdens ontlading fijnkorrelig, waardoor tussen elke korrel voldoende plaats is waar het elektrolyt het actieve lood of loodsulfaat kan bereiken. Gradueel verbinden deze kleine korrels zich tijdens ontlading en vormen grote korrels die zich veel moeilijker opnieuw omvormen tot looddioxide en lood tijdens een laadfase.

Sulfatatie zal vooral optreden onder de volgende omstandigheden:

- wanneer de cel voor een lange periode in ontladen toestand blijft.
- werkomstandigheden boven 45°C.
- wanneer door vergassing het elektrolyt sterk geconcentreerd is.

Sulfatatie kan vastgesteld worden wanneer de batterij snel tot hoge spanningen laadt terwijl een meting van het soortelijk gewicht aangeeft dat de ladingstoestand nog laag is. Oplading van de batterij met een kleine stroom kan de opgelopen schade ten dele verhelpen. Bij werking op hoge temperaturen zal men de concentratie van het elektrolyt laag houden om sulfatatie tegen te gaan.

5.1.4.5. Constructie van de elektrode-platen

Op de positieve elektrodeplaten zit het actieve materiaal, namelijk looddioxide dat reageert tot loodsulfaat tijdens ontlading. Omdat looddioxide een zacht materiaal is en lood sulfaat een lage dichtheid heeft, bestaat het gevaar dat tijdens ontlading de positieve platen afgebroken worden wanneer lood sulfaat wordt gevormd. Wanneer actief materiaal afbreekt van de elektrode zal de capaciteit van de cel sterk dalen.

Voor de positieve elektrode worden vaak 3 verschillende vormen gebruikt:

- vlakke platen waarbij het loden gedeelte een raster is waarvan de holtes gevuld worden met een pasta van actief materiaal
- buisvormige platen waarbij loden staven worden samengebracht aan de contactzijde en het actief materiaal rond elk van de staven zit. Deze constructie is robuust.
- Planté platen waarbij dikke loden gegroefde platen gebruikt worden waarop de pasta van actief materiaal is aangebracht. Wanneer actief materiaal

wegvalt, blijft een voldoende dikke loden laag over die onmiddellijk weer lood dioxide vormt.

Omdat lood een zacht materiaal is, wordt vaak antimoon toegevoegd om de platen te verstevigen en ook de fabricage te vereenvoudigen. Bij toevoeging van antimoon zal echter een verhoogde neiging tot vergassing optreden. Alternatieven voor antimoon zijn calcium, selenium, tin, arseen of zilver maar deze materialen hebben niet dezelfde positieve eigenschappen bij diepe ontlading van de cel.

Voor de negatieve elektrode wordt steeds een raster van zuiver lood zonder antimoon gebruikt. Het actieve materiaal op deze elektrode is immers ook lood waardoor de structuur voldoende robuust is.

Voor de meeste industriële toepassingen van zonne-energie waar batterijen met een hoge levensduur vereist zijn, gebruikt men loodzuurbatterijen met positieve tubulaire platen waar het antimoongehalte is teruggebracht van 3% naar 1,7% voor een kleinere zelfontlading en minder waterverlies.

5.1.4.6. Soorten batterijen

Loodzuur batterijen worden voor de meest uiteenlopende toepassingen gebruikt. Ze kunnen onderverdeeld worden naar de duur van hun ontladingstoestand als volgt:

- ontlading van enkele seconden (startbatterijen van wagens);
- ontlading van 5 minuten tot 1 uur (noodvoedingen);
- ontlading van 3 tot 10 uur (tractiebatterijen voor elektrische voertuigen);
- ontlading van meer dan 10 uur (zonne-energiebatterijen, signalisatiebatterijen).

Startbatterijen voor wagens

Deze batterijen moeten korte stroompieken kunnen leveren tijdens het starten van de motor maar blijven verder volledig opgeladen (geen cyclusdiepte). De batterijen kunnen sterk overladen worden bij grote afstanden met de wagen en zijn verder ontworpen als standaardproducten die geoptimaliseerd zijn voor deze werking en voor een lage kostprijs in grote series vervaardigd worden. De alternator laadt de batterijen constant bij zodat diepe ontladingen niet voorkomen. Ze verdragen echter geen diepe ontladingen.

UPS-batterijen

Batterijen voor noodvoedingen zijn ontworpen om voortdurend bij de stand-by spanning opgeladen te blijven en zeer zelden een cyclus van 1 tot 3 uur moeten doorstaan waarbij de ontladingsstroom 3 tot 10 maal groter is dan de gestandaardiseerde batterijstroom bij C/10. De batterijen zijn ontworpen voor een lange levensduur.

Tractiebatterijen

Deze batterijen zijn ontworpen voor het gebruik in elektrische voertuigen en geoptimaliseerd voor de volgende werkomstandigheden:

- diepe cyclussen (dagelijks 70%)
- snelle heroplading (3 - 5 uren)

- middelmatige ontladingsstromen (1 tot 3 maal de gestandaardiseerde C/10 batterijstroom)
- redelijk hoge levensduur (1.000 cycli)

Voor tractiebatterijen worden buisvormige en vlakke platen gebruikt. Voor een goede weerstand tegen diepe ontladingen en een goede mechanische schokvastheid bevatten de positieve elektroden ongeveer 10% antimoon. Dit verhoogt daarentegen sterk het waterverbruik en de zelfontlading maar dit is geen grote handicap voor dit soort toepassingen.

Stationaire industriële batterijen

Deze batterijen zijn ontworpen om te werken onder de volgende omstandigheden:

- lage laad- en ontladingsstromen
- langdurige (meer dan 5 uren) en diepe (<70%) cycli
- lange levensduur (typisch meer dan 1.500 cycli).

Onderhoudsvrije batterijen met een gel-elektrolyt

Dit type batterijen wordt meer en meer toegepast voor verschillende toepassingen omwille van het eenvoudig gebruik en het feit dat ze onderhoudsvrij zijn. Zowel voor UPS systemen als voor startbatterijen worden zij reeds gebruikt. Gebruik voor fotovoltaïsche toepassingen heeft tot nu toe geleerd dat bij diepe cycli deze batterijen maar een lage levensduur hebben.

Batterijen voor fotovoltaïsche toepassingen

Batterijen voor fotovoltaïsche toepassingen werken typisch onder de volgende omstandigheden:

- lage laad- en ontladingsstromen, typisch 0,1 tot 0,5 maal de gestandaardiseerde C/10 ontladingsstroom.
- zeer lange (vaak meer dan 20 uren) en diepe (70%) cycli
- onregelmatige en sterk variërende laad- en ontladcycli
- lange levensduur (typisch meer dan 1.500 diepe cycli)

Er kan ook gesteld worden dat de batterijen een lage zelfontlading moeten hebben. Er wordt echter wel verondersteld dat de batterijen dagelijks, op zijn minst gedeeltelijk, worden bijgeladen. Een relatief hoge zelfontladingssnelheid van 10% per maand zou de globale energiebalans maar beïnvloeden met minder dan 1%.

De specifieke vereisten van batterijen voor fotovoltaïsche toepassingen stellen eisen aan de vorm van de gebruikte elektrodes en de toegevoegde stoffen aan de lood elektrodes. De verschillende vereisten maken echter dat wat een oplossing biedt voor het ene een nadeel is ten opzichte van de andere vereiste.

Hieronder zijn drie prioriteiten vooropgesteld waaraan een batterij voor fotovoltaïsche toepassing zeker moet voldoen:

1. **Hoog energierendement** : verlies van fotovoltaïsche energie is duur.
2. **Grote bruikbare capaciteit** : batterijen van fotovoltaïsche systemen kunnen af en toe zeer diep ontladen worden
3. **Lange levensduur** : een cyclus levensduur van 700 nominale cycli wordt aangeraden, hierdoor zal de batterij tot 2.000 cycli van een diepte van 35% kunnen ondergaan, wat overeenkomt met 5 tot 6 jaar. Dit terwijl de typische levensduur van een onafhankelijk fotovoltaïsch systeem meer dan 10 jaar bedraagt, typisch zelfs groter dan 20 jaar.

Hieruit blijkt dat stationaire industriële batterijen, alhoewel ze een hoge investeringskost hebben, op lange termijn de meest kost-effectieve keuze zijn omdat ze het meest geschikt zijn voor fotovoltaïsche toepassing.

Startbatterijen zullen in eerste instantie ook afdoende resultaten geven, maar zullen reeds na enkele maanden falen omdat ze geen diepe cycli kunnen weerstaan. Het gebruik van deze batterijen wordt dan ook sterk afgeraden.

Tabel 5.4 geeft een overzicht van de voor- en nadelen van de verschillende loodzuurbatterijen voor gebruik voor fotovoltaïsche systemen.

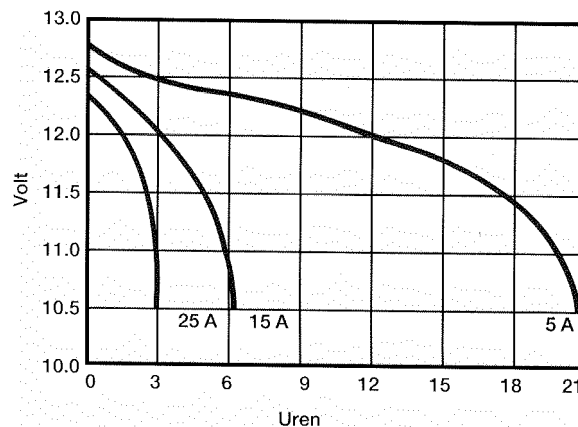
	Levensduur	Zelfontlading	Onderhoud	Kostprijs
Startbatterij	--	-	-	++
Tractiebatterij	-	--	--	--
Halftractie	-	-	-	+
PbCa onderhoudsvrije batterij	-	+	++	-
Stationaire batterij	++	+	+	-

Tabel 5.4 De voor- en nadelen van de verschillende types loodzuurbatterijen worden geduid voor gebruik in fotovoltaïsche systemen.

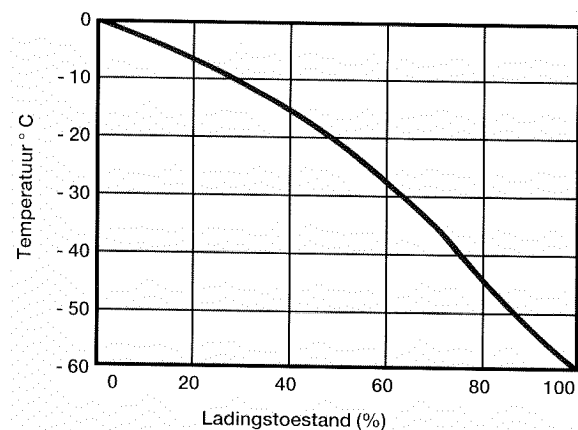
5.1.5. Beschrijving van het gedrag van een loodzuurbatterij

In deze paragraaf worden typische karakteristieken gegeven van een loodzuurbatterij die zowel voor fotovoltaïsche als andere stationaire toepassingen gebruikt wordt. De capaciteit van de batterij wordt opgegeven als 115 Ah bij C/100 (25°C) en 105 Ah bij C/20 (25°C). De zelfontladingsgraad bedraagt 4 Ah/maand bij 27°C.

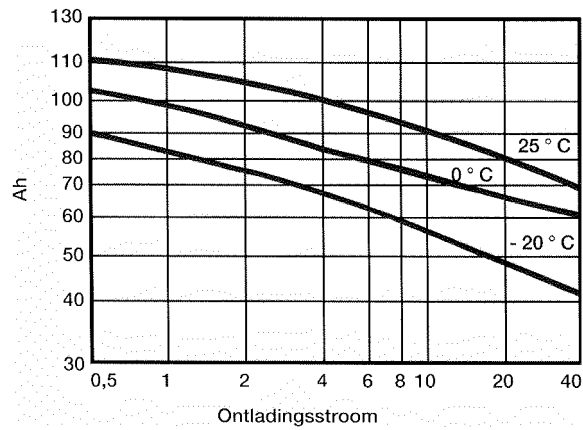
Figuur 5.1 geeft het verloop van de batterijspanning weer bij verschillende ontladingsstromen. Figuur 5.2 toont dat het vriespunt van een batterij omgekeerd evenredig is met de ladingstoestand. Figuur 5.3 geeft de capaciteit van de batterij weer in functie van de ontladingsstroom voor verschillende temperaturen. Figuur 5.4 geeft aan hoe bij normale werkingstemperatuur de ladingstoestand kan bepaald worden aan de hand van een meting van de openketen spanning. Figuur 5.5 toont de afhankelijkheid van de zelfontlading van de werkingstemperatuur.



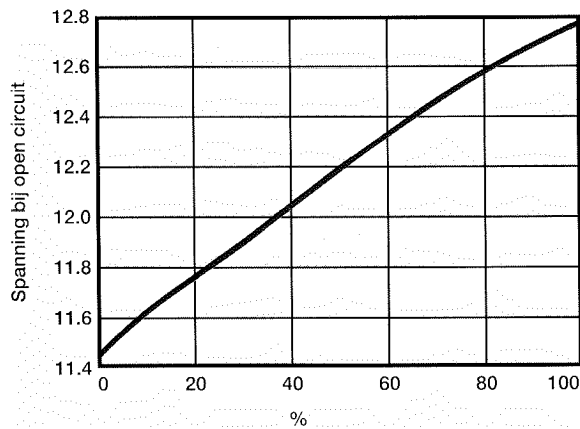
Figuur 5.1. Het verloop van de batterijspanning wordt gegeven voor verschillende ontladingsstromen.



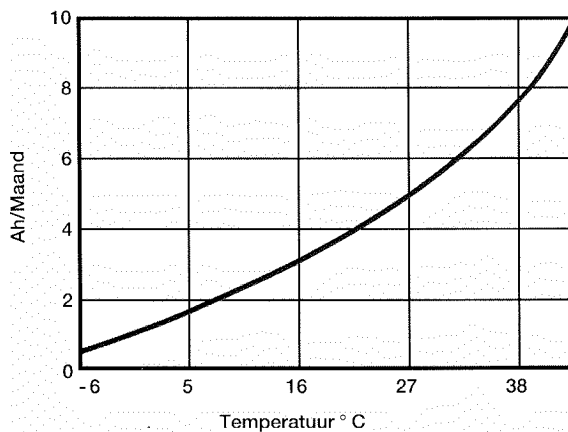
Figuur 5.2. Het vriespunt van een loodzuurbatterij wordt gegeven in functie van de ladingstoestand.



Figuur 5.3. De capaciteit van de batterij wordt gegeven in functie van de ontladingsstroom voor verschillende temperaturen.



Figuur 5.4. Bepaling van de ladingstoestand aan de hand van de openketen spanning.



Figuur 5.5. De afhankelijkheid van de zelfontlading van de werkingstemperatuur.

5.1.6. Nikkelcadmium batterijen

De gebruikte materialen in nikkelcadmium cellen worden gegeven in tabel 5.5. De spanningskarakteristiek wordt gegeven in tabel 5.6.

Onderdelen	Materialen	
	Geladen	Ontladen
actief materiaal op positieve elektrode	Ni(III)(OH) ₃	Ni(II)(OH) ₂
actief materiaal op negatieve elektrode	Cd	Cd(OH) ₂
elektrolyt	KOH	KOH meer basisch

Tabel 5.5 De materialen in een nikkelcadmium batterij.

Spanningskarakteristiek	Spanningen bij 20°C	
	Enkele cel	10 cellen
Nominale spanning	1,25 V	12 V
Maximale laadspanning voor belucht type	1,5 - 1,65 V	15,0 - 16,5 V
Stand-by spanning	1,40 - 1,45 V	14,0 - 14,5 V
Ontlaad-drempelspanning	0,9 V	9 V

Tabel 5.6 De spanningskarakteristieken van nikkelcadmiumbatterijen.

5.1.6.1. Beluchte nikkelcadmium batterijen

De elektrode van beluchte nikkelcadmium batterijen is vervaardigd uit laag koolstofhoudend staal waarin gaten gemaakt zijn van 0,2 mm diameter waarop een nikkellaag elektrolytisch is aangebracht. Waterstof en zuurstof die tijdens het vergassen worden geproduceerd kunnen de cel verlaten via een één-richtingsklep waarlangs tevens gedistilleerd water kan worden bijgevoegd. De één-richtingsklep verhindert dat koolstofdioxide uit de lucht binnendringt in de cel en wordt geabsorbeerd door het elektrolyt.

5.1.6.2. Gesloten nikkelcadmium cellen

In gesloten nikkelcadmium cellen is er slechts één elektrodeplaat voor iedere polariteit. De twee platen zijn in een spiraal gewonden tot een compacte rol en zijn van elkaar gescheiden door een poreus materiaal. De verpakking van de cel is van vernikkeld staal en dit is verbonden met de negatieve elektrode.

De cellen worden afgesloten en daarom moet vergassing op een andere manier opgelost worden. Daarom wordt de negatieve elektrode overgedimensioneerd zodat de capaciteit positief gelimiteerd is. Zuurstof die aan de positieve elektrode wordt aangemaakt kan doordringen tot de negatieve elektrode. Hier wordt de zuurstof geabsorbeerd in de negatieve elektrode en vormt er cadmiumhydroxide. Wanneer de overladingsstroom te groot is, zal de geproduceerde zuurstof niet snel genoeg kunnen geabsorbeerd worden waardoor ook waterstof kan vrijkomen. Een overdrukventiel aan de bovenzijde van de cel opent wanneer de inwendige druk te hoog wordt.

5.1.6.3. Opladen van nikkelcadmium batterijen

Gesloten cellen zouden bij een constante stroom moeten opgeladen worden. Opladen met behulp van een spanningsbron is enkel toepasbaar voor beluchte cellen die andere spanningskarakteristieken hebben. Gesloten cellen mogen ook niet in parallel opgeladen worden vanuit één stroombron zonder dat er een regelaar op elke serieschakeling zit.

De aangeraden ladingsstroom is typisch de standaard C/10 ladingsstroom. Voor 1,2 Ah cellen is dit dan 0,12 A. Volledig ontladen cellen moeten 14 tot 16 uur geladen worden om opnieuw volgeladen te zijn. Wanneer gesloten cellen worden opgeladen met een stroom lager dan C/10 zal het ladingsrendement sterk dalen, voor een ladingsstroom van C/40 zal er zelfs helemaal niet geladen worden. Verder neemt ook de cyclus levensduur af bij lading bij lage stromen.

5.1.6.4. Nikkelcadmium batterijen voor fotovoltaïsche toepassing

Nikkelcadmium cellen kunnen zeer goed toegepast worden in fotovoltaïsche systemen omdat er geen problemen optreden bij diepe cycli. De kostprijs van de batterijen ligt zeer hoog ten opzichte van loodzuurbatterijen maar wanneer deze kost wordt uitgerekend over hun volledige levensduur, zijn ze vaak zeer competitief. Speciaal voor draagbare toepassingen bieden gesloten cellen veel voordelen.

Een nadeel van nikkelcadmium cellen is dat er geen eenvoudige manier bestaat om de ladingstoestand van de cel te bepalen waardoor het niet mogelijk is de gebruiker te verwittigen wanneer ontlading wordt bereikt. Er treden slechts kleine verschillen op in de spanning of het specifiek gewicht van het elektrolyt bij ontlading.

5.2. LAADREGELSYSTEMEN

5.2.1. Inleiding

Laadregelsystemen zijn elementen van een fotovoltaïsch systeem (zie hoofdstuk 4) die tot doel hebben het laden en ontladen van een batterij te controleren om de levensduur ervan te maximaliseren. De meest courante onafhankelijke fotovoltaïsche systemen zijn nu nog uitgerust met een loodzuur batterij; vandaar dat in deze paragraaf enkel wordt ingegaan op laadregelsystemen voor dergelijke configuraties. Op basis van de eigenschappen van alternatieve batterijsoorten kunnen gelijkaardige regelsystemen ontwikkeld worden.

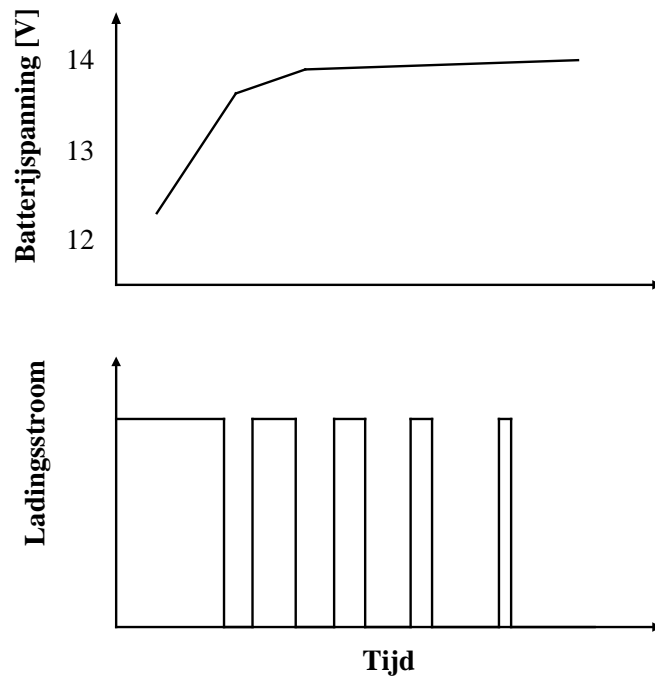
De levensduur van de batterij wordt aanzienlijk verlengd wanneer men zware overladingen en diepe ontladingen zoveel mogelijk vermijdt. Dit kan gebeuren door de spanning per batterij element te houden tussen 1,83 V en 2,4 V ofwel tussen de 11 V en 14,4 V voor een 12 V batterij. De verschillende soorten regelaars onderscheiden zich in hoofdzaak door de manier waarop overlading wordt vermeden.

5.2.2. Zelfregulerend systeem met blokkeerdiode

De meest eenvoudige methode om zware overlading te voorkomen is door de fotovoltaïsche module zo te ontwerpen dat naarmate de batterij verder geladen wordt, het werkingpunt zich verplaatst naar lagere ladingsstromen (zie paragraaf 4.1). Een blokkeringsdiode wordt in serie geplaatst om te vermijden dat gedurende de nacht stroom vanuit de batterij naar de module zou vloeien.

In de praktijk zal men om het bovenvernoemde zelfregulerende effect bereiken een kleiner aantal cellen in serie plaatsen in een module, typisch 32 cellen per module. Dit systeem is natuurlijk niet feilloos omdat de I-V curve zal variëren met de werkingstemperatuur van de zonnecellen. Deze werkingstemperatuur is afhankelijk van de omgevingstemperatuur maar ook van de bezonning zodat een goede functionering al op zijn minst sterk plaatsafhankelijk is.

Een bijkomend nadeel is dat diepe ontladingen hier niet mee vermeden kunnen worden.

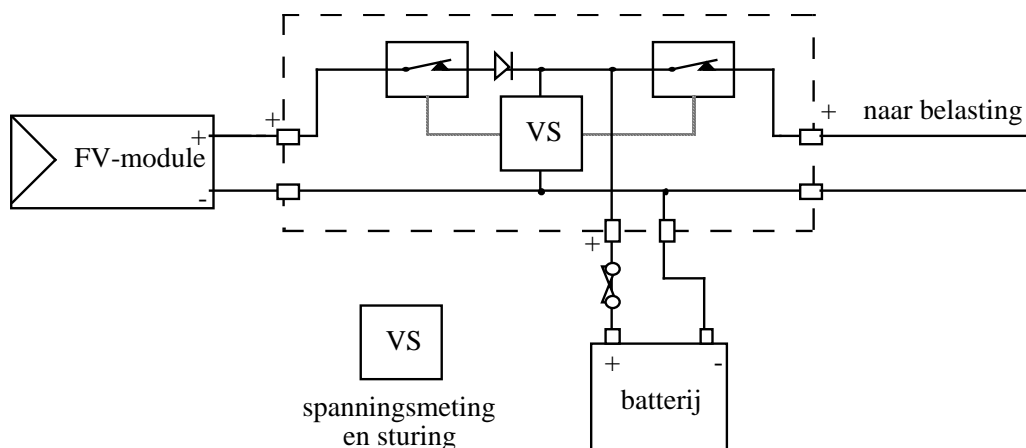


Figuur 5.7 Het verloop van de batterijspanning en ladingsstroom wordt gegeven voor een parallelregelaar tijdens volladen.

Het terug toelaten van de ladingsstroom naar de batterij (na een periode van volgeladen toestand van de batterij) gebeurt meestal bij ongeveer 12,5 V. Het terug inschakelen van de belasting in de kring gebeurt rond de 12 V. Al deze niveaus kunnen temperatuurgecompenseerd worden door een temperatuursensor te bevestigen op een pool van de batterij omdat de laad- en ontladcontrole ook exact zou gebeuren bij variërende batterijtemperatuur. Deze regelaar wordt vooral toegepast in kleinere installaties. Tijdens de kortsluiting van de modules wordt in de halfgeleiderschakelaar immers heel wat energie gedissipeerd, wat de toepassing bij grotere vermogens minder interessant maakt.

5.2.4. Serieregelaar

Het prinsipeschema van de serieregelaar is voorgesteld in figuur 5.8.



Figuur 5.8 Schematische voorstelling van een fotonvoltaïsch systeem met een serieregelaar.

Hier gebeurt de afschakeling van de modules door het openen van een relais in serie zodat er geen vermogen gedissipeerd wordt. Een bijkomend voordeel is dat er geen spanningsverlies optreedt ten gevolge van een blokkeerdiode.

Het aan- en afschakelen via meting van de batterijspanning gebeurt zoals bij de parallelregelaar. Druppelsgewijze lading is hier niet mogelijk maar wordt bij grotere regelaars opgevangen door de sequentiële regelaars.

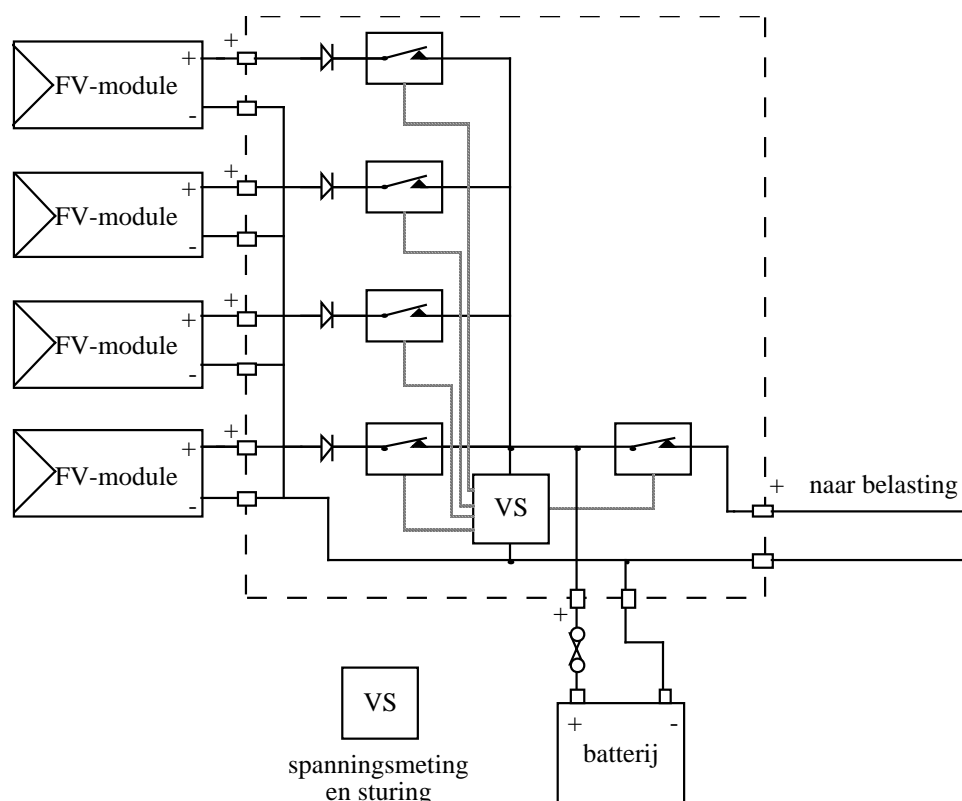
Temperatuurscompensatie van alle niveaus is hier ook mogelijk.

5.2.5. Sequentiële regelaars

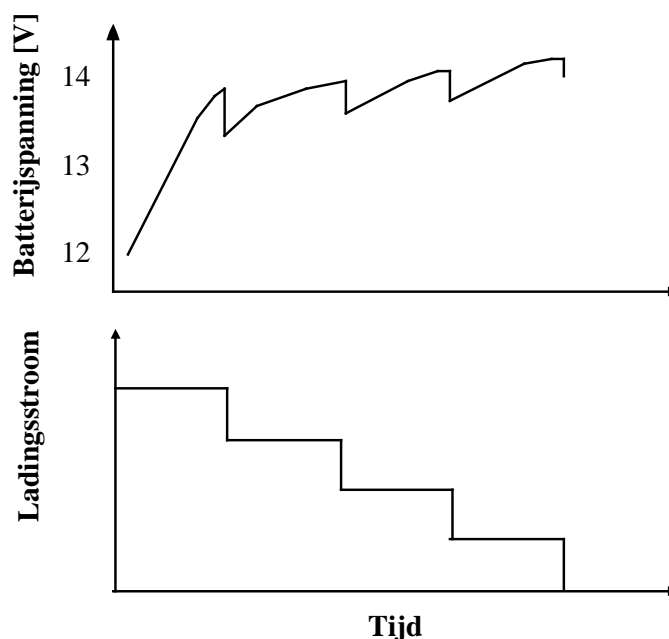
Het principe van de sequentiële regelaar met 4 ingangen is weergegeven in figuur 5.9.

Laadregelaars voor grote fotovoltaïsche systemen waar de batterij geladen wordt met grote stromen (100 - 150 A) worden aan de ingang opgesplitst in verschillende ingangskringen. Daarom moet het fotovoltaïsche veld ook opgesplitst worden in eenzelfde aantal takken. Elke tak heeft zijn relais dat apart kan worden aangestuurd. De verschillende relais worden sequentieel de een na de andere aan- en uitgeschakeld op niveaus die licht verschillend zijn in stijgende lijn.

Een typische voorstelling van het verloop van spanning en stroom van de batterij tijdens volladen is weergegeven in figuur 5.10. Temperatuurscompensatie van alle niveaus zal hier altijd worden toegepast.



Figuur 5.9 Schematische voorstelling van een fotovoltaïsch systeem met een sequentiële regelaar voor 4 modulevelden.



Figuur 5.10 Het verloop van de batterijspanning en ladingsstroom wordt gegeven voor het volladen van een batterij met een sequentiële regelaar waar 4 modulevelen op aangesloten zijn.

Afschakeling van de uitgang bij diepe ontlading door een relais kan ook ontdubbeld worden wanneer men twee belastingen heeft met verschillende prioriteit. De twee uitgangen worden dan op twee verschillende niveaus geschakeld met de hoogste prioriteit op het laagste niveau.

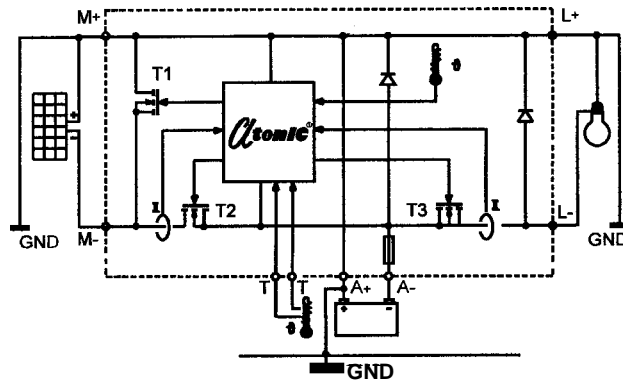
5.2.6. Geavanceerde regeleenheden

In eerste instantie zijn meer geavanceerde regeleenheden ontwikkeld voor het batterijmanagement van zeer grote onafhankelijk fotovoltaïsche eenheden. Door de sterke evolutie en de prijsdaling van de elektronische componenten zijn bepaalde geavanceerde regeleenheden nu reeds beschikbaar voor kleine fotovoltaïsche systemen tegen een geringe meerkost.

Zo bestaan er systemen die het mogelijk maken een serieschakeling van batterijen optimaal te laden. De spanning over elke of enkele cellen wordt apart gemeten en dit bepaalt de ladingsstroom die deze eenheid krijgt. Op deze manier zal men zwakke schakels vermijden wat belangrijk is wanneer veel batterijcellen in serie worden geplaatst.

Een ander type laadregelaar gaat niet schakelen op het niveau van de batterijspanning maar gaat de ladingstoestand van de batterij meten en gebruiken als sturing voor het schakelen. De ladingstoestand van de batterij wordt bepaald met een microcomputer via een speciaal algoritme dat een aantal parameters als batterijspanning, ladingsstroom en ontladingsstroom van de batterij enz... gebruikt. Dit geeft een exacter beeld van de ladingstoestand van de batterij dan alleen maar de spanning want de batterijspanning tijdens de lading is ook functie van de grootte van de

ladingsstroom. Bij de opstart gaat de microcomputer gedurende een paar dagen in zelfleercyclus om de karakteristieken van de batterij op te nemen.



Figuur 5.11 Schematische voorstelling van een batterijregelaar met microcomputer.

5.3. INVERTOREN

5.3.1. Inleiding

In hoofdstuk 4 is reeds ingegaan op de mogelijke manieren waarop een gelijkstroom - wisselstroom (DC/AC) convertor of inverter wordt ingepast in een netgekoppeld of onafhankelijk fotovoltaïsch systeem.

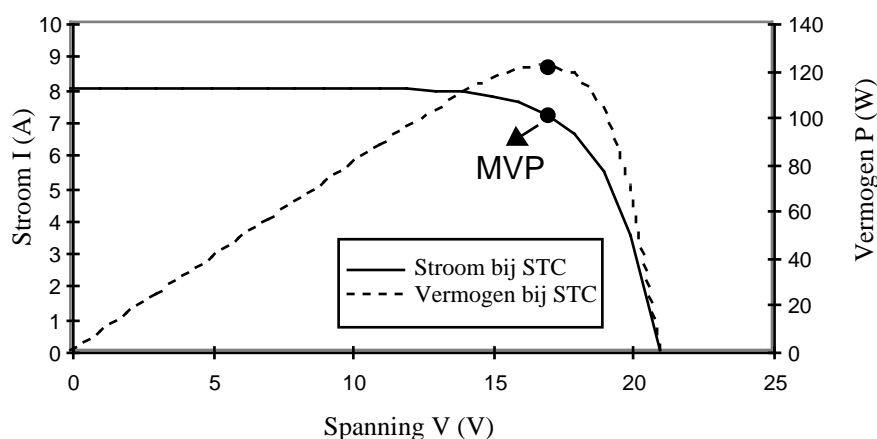
In een netgekoppeld fotovoltaïsch systeem is de inverter werkelijk het hart van het ontwerp. De inverter zet de gelijkstroom om in wisselstroom maar zorgt tegelijkertijd voor een optimaal werkingpunt voor het moduleveld en een volledig compatibele interface met het openbare elektriciteitsnet.

In deze paragraaf wordt ingegaan op de kenmerken van een fotovoltaïsche inverter, verschillende types van invertoren, de verliezen in invertoren en worden kort onafhankelijke invertoren behandeld.

5.3.2. Vereisten van netgekoppelde invertoren

5.3.2.1. Maximale vermogen punt werking

Een eerste vereiste voor een optimale inverterwerking is dat deze automatisch het werkingpunt op de I-V karakteristiek van het moduleveld opzoekt waar dit zijn maximaal vermogen heeft.



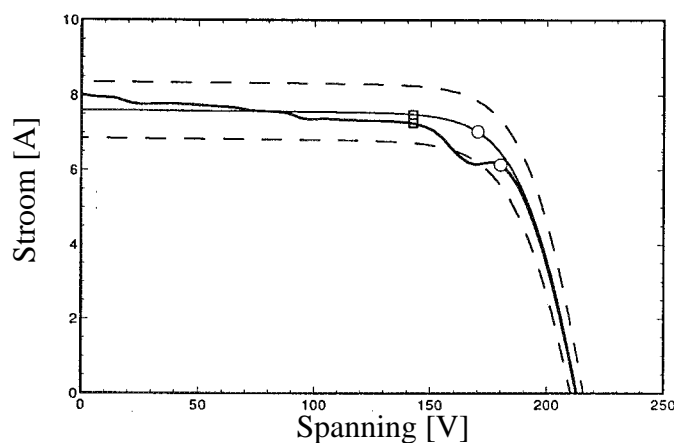
Figuur 5.12 De typische I-V karakteristiek van een moduleveld wordt uitgezet samen met de overeenkomstige vermogencurve.

In figuur 5.12 is een typische I-V karakteristiek van een moduleveld gegeven samen met de vermogencurve. Deze vertoont een vrij scherp maximum, het zogenaamde maximum-vermogen-punt (MVP). Het MVP varieert met de stralingsintensiteit en de temperatuur van de zonnecellen (zie hoofdstuk 3).

De spanning van het MVP (V_{MVP}) blijkt, vanaf een bepaalde stralingsintensiteit, uitsluitend van de temperatuur afhankelijk te zijn: V_{MVP} daalt ongeveer met 0,4% per graad temperatuurstoename. Zelfs bij abrupte veranderingen van de omgevingstemperatuur zal de moduletemperatuur zich relatief traag aanpassen omdat de thermische tijdsconstante (t.g.v. de thermische capaciteit) ongeveer 10 minuten bedraagt. De opvolging van het MVP ten gevolge van veranderingen in de modulekarakteristiek dient hierdoor dus ook niet zeer snel gebeuren. Het maximum vermogen zelf daalt met ongeveer 0,5% per graad temperatuurstoename.

Wanneer de fotonvoltaïsche generator opgebouwd is als een serie- en/of parallelschakeling van fotonvoltaïsche modules zullen er verliezen optreden als de modules niet identiek zijn (zie hoofdstuk 3). Vermits de stroom door alle seriegeschakelde modules en de spanning over alle parallelgeschakelde modules dezelfde is, kan niet elk module in zijn MVP werken. Op een analoge wijze treden er verliezen op bij beschaduwing van de modules. De verliezen kunnen beperkt worden door een zorgvuldige selectie van de modules en het plaatsen van zogenaamde bypass-diodes parallel met de modules. In deze gevallen is het maximum vermogen van de fotonvoltaïsche generator kleiner dan de som van de maximale vermogens van de fotonvoltaïsche modules .

Een complex regelalgoritme in de inverter moet ervoor zorgen dat de fotonvoltaïsche generator steeds in zijn MVP werkt. Deze taak wordt bemoeilijkt door de hogervermelde problemen bij serie- en/of parallelschakeling. Dit blijkt uit de stroom/spanningskarakteristiek van de fotonvoltaïsche generator in het geval van grote koppelverschillen, weergegeven in figuur 5.13.



Figuur 5.13 De I-V karakteristiek wordt gegeven voor een werkelijk moduleveld waarin koppelverschillen optreden.

De rimpel op deze stroom zorgt ervoor dat de vermogencurve verschillende lokale maxima kan vertonen. Het hoeft geen betoog dat de opvolging van het MVP in zo een geval ingewikkeldere algoritmes vereist.

5.3.2.2. DC-beveiligingen

Verder zijn er nog een aantal verschillen met de conventionele generatoren waardoor specifieke beveiligingen noodzakelijk zijn. Een typisch kenmerk van fotovoltaïsche generatoren is dat, in tegenstelling tot draaiende generatoren, het in feite stroombronnen zijn. De kortsluitstroom bedraagt zelden meer dan 1,2 maal de nominale stroom. Daardoor is een fotovoltaïsche generator intrinsiek bestand tegen kortsluiting en bestaat er weinig gevaar op overbelasting van de bekabeling.

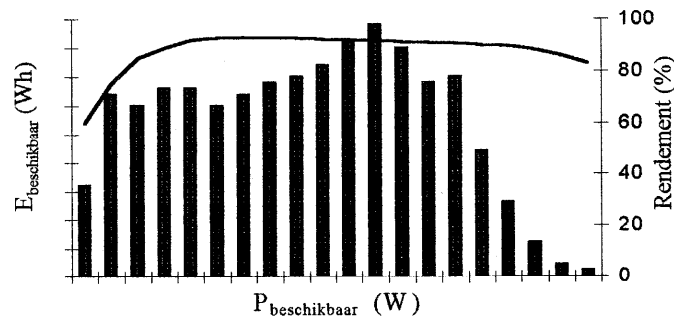
Het betekent echter ook dat de overstroombeveiliging niet zomaar overgenomen mag worden van standaardinstallaties. De gelijkstroom vereist bovendien speciale schakelaars en maatregelen tegen boogvorming.

Een bijkomend probleem is dat fotovoltaïsche generatoren niet eenvoudig kunnen uitgeschakeld worden. Om ze spanningsvrij te maken, moeten ze immers van lichtinval afgeschermd worden.

5.3.2.3. Rendement van de omzetting

Het rendement van de vermogenomzetting is uiteraard zeer belangrijk. Dit is echter niet constant over het hele vermogenbereik. Omdat het systeem dikwijls bij deellast werkt, is niet zozeer het rendement bij vollast van belang, maar moet een optimum gezocht worden over heel het vermogenbereik. Een zinvolle beoordeling is immers slechts mogelijk op basis van de energie-opbrengst over een gans jaar.

Figuur 5.14 geeft een typische rendementscurve van een inverter in functie van de DC spanning aan de inverter samen met de wisselstroomenergie die bij dat vermogen op jaarbasis wordt opgewekt in de Belgische situatie.



Figuur 5.14 Een typische rendementscurve van een inverter in functie van het DC vermogen aan de inverter samen met de wisselstroomenergie die bij dat vermogen op jaarbasis wordt opgewekt in de Belgische situatie.

Daarnaast bezit een inverter nog heel wat regelapparatuur die instaat voor de regeling van de werkingstoestand, en zo een bepalende factor vormt voor de energetische opbrengst van een fotovoltaïsch systeem. De vier voornaamste acties die hierbij van belang zijn:

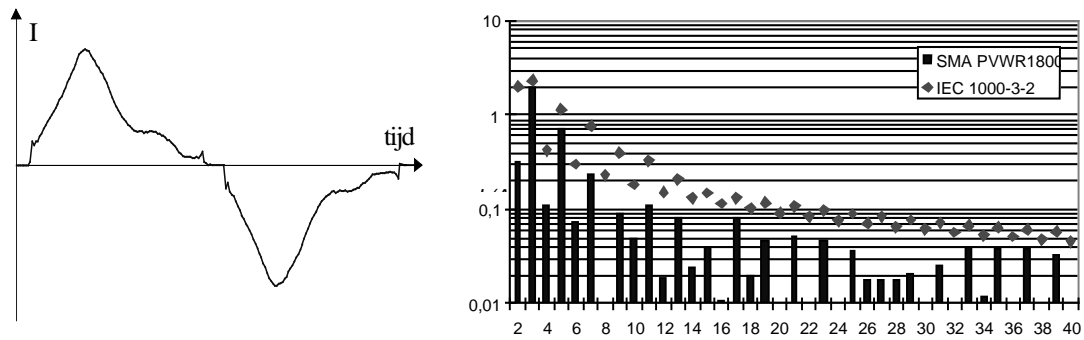
1. **Automatisch opstarten:** de inverter moet 's ochtends aan het net gekoppeld worden van zodra het invallend vermogen voldoende is om een continue energietoevoer aan het net te garanderen. Hierbij moet vermeden worden dat de inverter herhaaldelijk aan- en afslaat, aangezien dit gepaard gaat met verhoogde verliezen en een verlaagde levensduur van de componenten.
2. **MVP-opvolging:** zoals beschreven in de vorige paragraaf is een actieve opvolging van het MVP noodzakelijk voor een optimale benutting van de beschikbare energie.
3. **Werking/gedrag bij een vermogen groter dan het nominaal vermogen:** de inverter wordt vaak ondergedimensioneerd ten opzichte van het piekvermogen van het moduleveld. Hierdoor kan het gelijkstroomvermogen uit het moduleveld in zeer gunstige omstandigheden groter worden dan het nominale vermogen van de omvormer. De inverter mag dan niet afschakelen. Hij moet stroom/vermogen blijven leveren, zij het met een vermogenbegrenzing. Dit kan bijvoorbeeld door het werkingpunt te verschuiven naar een hogere spanning. Een betere oplossing bestaat erin het extra vermogen te gebruiken voor geforceerde koeling.
4. **Voeding van de regelapparatuur vanuit de gelijkstroomzijde:** opdat de regelapparatuur bij onvoldoende instraling geen vermogen van het net zou verbruiken, gebeurt de voeding ervan best vanuit de gelijkstroomzijde.

5.3.2.4. Power Quality

Zonder in te gaan op de definities ter zake, kan men algemeen stellen dat voor een optimale vermogensoverdracht de arbeidsfactor zo dicht mogelijk bij 1 moet liggen.

In grotere installaties kan de producent-verdeler eisen dat de arbeidsfactor een bepaalde grenswaarde overschrijdt. Bij invertoren waarvan het reactief vermogen regelbaar is, zou men er kunnen aan denken de inverter te gebruiken voor de compensatie van het reactief vermogen van bepaalde belastingen. Omdat er in de huishoudelijke installaties waarvoor de hier besproken invertoren ontworpen zijn, zelden compensatie noodzakelijk is, zijn de kosten voor zo'n regeling echter niet verantwoord.

De stroom die door de inverter wordt geleverd is niet perfect sinusvormig. Door Fourier-ontbinding kan de stroom worden ontbonden in een reeks sinusoidale componenten met een frequentie die een positief veelvoud is van de fundamentele frequentie van 50 Hz. Deze componenten worden de harmonischen genoemd. Figuur 5.15 geeft een typische golfvorm van de stroom van een inverter van een vroege generatie samen met de harmonische ontbinding hiervan. Recente invertoren benaderen in het algemeen reeds veel beter de zuivere sinusvormige stroom.



Figuur 5.15 De golfvorm en het harmonische spectrum van de stroom wordt gegeven voor een SMA PVWR 1800 inverter ($P = 1135 \text{ W}$, $V_{DC} = 120 \text{ V}$).

De harmonische inhoud van de wisselstroom moet beperkt zijn. Vermits de netimpedantie niet nul is, gaan harmonische stromen gepaard met harmonische spanningen. Harmonischen kunnen een aantal ongewenste effecten tot gevolg hebben: overbelasting van capaciteitsbanken en transformatoren, ongewenste koppels en bijkomende verliezen in roterende machines, belasting van de nulgeleider, ... De norm IEC1000-3-2 (EN60555) bepaalt de grenswaarden voor stroomharmonischen.

Deze grenswaarden zijn bepaald als absolute waarden van de harmonische stromen voor toestellen met een nominale stroom van minder dan 16 A. In figuur 5.15 zijn deze waarden aangeduid in de grafiek. Doordat deze norm absolute waarden voorschrijft zullen kleinere invertoren hier gemakkelijker kunnen aan voldoen alhoewel ze in het geval van parallelschakeling even grote harmonischen kunnen creëren.

Wat betreft EMC (elektromagnetische compatibiliteit) moeten invertoren voldoen aan de norm EN55011 (voor industriële apparatuur) of de norm EN55014 (voor huishoudelijke toestellen). Dit ligt soms moeilijk omdat de hiervoor vereiste filters de prijs doen stijgen en het rendement verminderen.

5.3.2.5. AC-beveiliging

Wat betreft veiligheidsmaatregelen voor netaansluiting zijn fotovoltaïsche invertoren een zeer specifiek geval. De beveiliging betreffende huishoudelijke en andere toestellen is niet van toepassing omdat het productie-eenheid betreft. De richtlijnen betreffende gedecentraliseerde productie-eenheden zijn vaak niet van toepassing omdat het daar vooral draaiende groepen betreft.

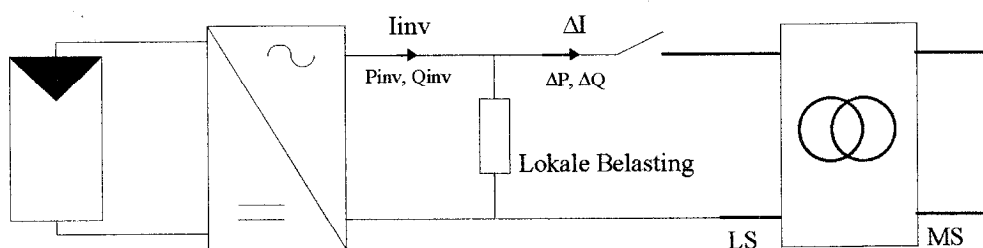
Er bestaat een specifiek Electrabel-lastenboek CCLB06/04.97 dat richtlijnen voor aansluiting van fotovoltaïsche cellen op het laagspanningsnet geeft.

Het meest typische veiligheidsaspect bij netgekoppelde fotovoltaïsche systemen is de beveiliging tegen eilandbedrijf. Een inverter mag immers geen vermogen leveren als het net afgeschakeld is. Dit geldt om twee redenen: personenveiligheid (er mag geen spanning aanwezig zijn wanneer men het net wil repareren) en toestelbeveiliging (er

kan schade optreden aan toestellen). Daarom moet elke inverter het eilandbedrijf herkennen en zichzelf zo snel mogelijk van het net ontkoppelen.

Eilandbedrijf kan optreden wanneer op een bepaalde plaats het elektriciteitsnet wordt onderbroken doch dat lokaal op de plaats waar de inverter op het net is aangesloten de netspanning wordt onderhouden door de inverter. Het geleverd vermogen komt overeen met een lokale verbruiker.

Figuur 5.16 toont een labo-opstelling die het mogelijk maakt een dergelijke situatie te simuleren. De inverter wordt door een DC-voeding gevoed en op het net aangesloten. Met behulp van een regelbare weerstand, capaciteit en spoel wordt de stroom die naar het net gestuurd wordt geminimaliseerd. De netkoppeling wordt dan na deze impedantie onderbroken en men meet hoelang het duurt vooraleer de inverter deze fout ontdekt en afslaat.



Figuur 5.16 De labo-opstelling wordt getoond die het uittesten van de beveiliging van netgekoppelde invertoren tegen eilandbedrijf mogelijk maakt.

De IEC 364 is de internationale standaard voor elektrische installaties in gebouwen en is dus ook van toepassing op de hier besproken fotovoltaïsche systemen. Deze norm vereist o.a. bescherming tegen indirect contact. In sommige gevallen is een galvanische scheiding tussen de fotovoltaïsche generator en het net vereist. Indien de inverter een transformator bevat, kan deze daarvoor gebruikt worden.

Isolatiefouten in fotovoltaïsche systemen zijn over het algemeen het gevolg van een langdurig degradatieproces. Dankzij een speciale beveiliging in de inverter kunnen isolatiefouten dikwijls gedetecteerd worden alvorens ze grote schade veroorzaken.

Als de fotovoltaïsche generator met zwevende potentiaal werkt, kan men isolatiefouten ontdekken door meting van de aardingsweerstand. Als deze kleiner wordt dan een bepaalde waarde onderbreekt de inverter de gelijkstroomketen en meldt dit aan de gebruiker zodat de fout kan hersteld worden.

Daarnaast moeten zowel de ingang als de uitgang van de inverter voldoende bestand zijn tegen overspanningen.

5.3.2.6. Gebruiksvriendelijkheid

Vermits de inverter volautomatisch werkt, is er slechts een ingreep van de gebruiker nodig in abnormale omstandigheden. Daarom moet het steeds duidelijk zichtbaar zijn of de inverter al dan niet normaal werkt. De weergave van een aantal grootheden zoals DC-spanning, DC-stroom of AC-stroom kan hiervoor nuttig zijn. Voor de beoordeling en optimalisatie van een bepaalde installatie is het bovendien wenselijk dat bepaalde gegevens bewaard worden. Sommige invertoren bewaren deze gegevens zelf, bij andere is de nodige hardware voorzien die een gemakkelijke uitlezing met PC mogelijk maakt.

Verder mag een inverter natuurlijk niet teveel lawaai maken. De inverter wordt immers bij voorkeur zo dicht mogelijk bij het fotovoltaïsch veld geplaatst. Een geruisloze inverter kan men plaatsen op een zolder, in een garage, in een bergruimte.

5.3.3. Indeling van invertoren naar grootte

In hoofdstuk 4 (paragraaf 4.2.3.2) is reeds ingegaan op de verschillende manieren waarop invertoren kunnen geplaatst worden in een netgekoppeld systeem. De voor- en nadelen van elk van de systemen zijn besproken. In tabel 5.7 worden nog het typische vermogen- en spanningsbereik voor elk van de types aangegeven.

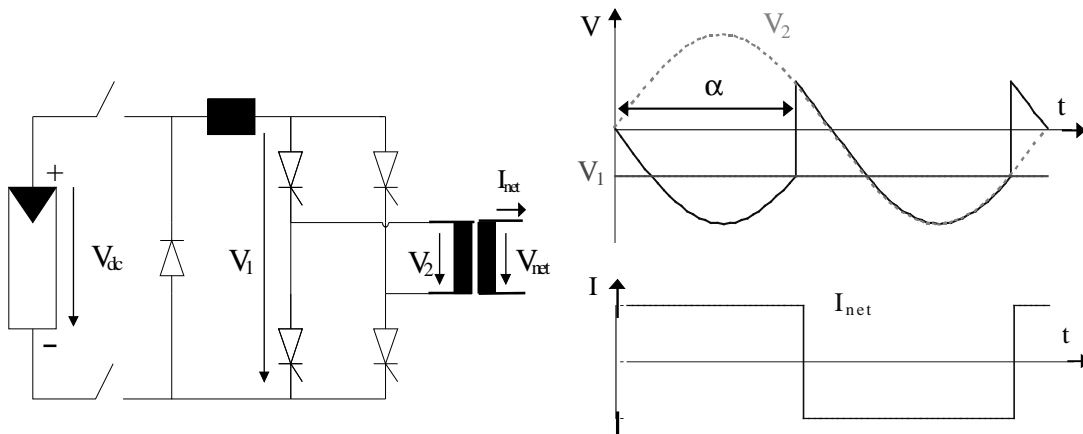
	Centrale inverter	Keten-inverter	AC-module
Vermogen	1 - 50 kW	0,5 - 5 kW	100 - 300 W
DC-spanning	48 - 500 V	100 - 500 V	24 - 48 V

Tabel 5.7 De tabel geeft typische waarden voor de DC-spanning en het vermogen van 3 types van netgekoppelde fotovoltaïsche invertoren.

5.3.4. Indeling van invertoren naar werkingsprincipe

5.3.4.1. Lijngecommuteerde invertoren

Voor grote vermogens (>100 kW) worden hoofdzakelijk lijngecommuteerde invertoren met thyristoren gebruikt. Zij hebben de netspanning nodig voor de commutatie. Meestal werken zij volgens het prinsipeschema aangeduid in figuur 5.17, samen met de overeenkomstige golfvorm.



Figuur 5.17 Het prinsipeschema en de golfvormen van een lijngecommuteerde inverter.

Mits verwaarlozing van de commutatieduur, is het verband tussen de spanningen V_1 en V_2 , aangegeven in figuur 5.17:

$$V_1 = 4/\pi \cdot V_2 \cdot \cos\alpha_1$$

met : V_2 de amplitude van de getransformeerde lijnspanning

α_1 de stuurhoek van de schakelelementen

Vermits V_1 varieert met de spanning van de fotonvoltaïsche generator moet de stuurhoek geregeld worden om de gewenste waarde van V_2 te bereiken. Dit gaat echter gepaard met het verbruik van reactief vermogen, wat in vele gevallen compensatie noodzakelijk maakt.

De stroom is een blok golf en bevat dus veel harmonischen. In driefasige systemen kan men door de combinatie van een aantal bruggen evenwel bepaalde harmonischen elimineren. Een filter blijft noodzakelijk voor de hogere harmonischen.

Het voordeel van dit type invertoren is dat ze door hun eenvoud goedkoop en robuust zijn.

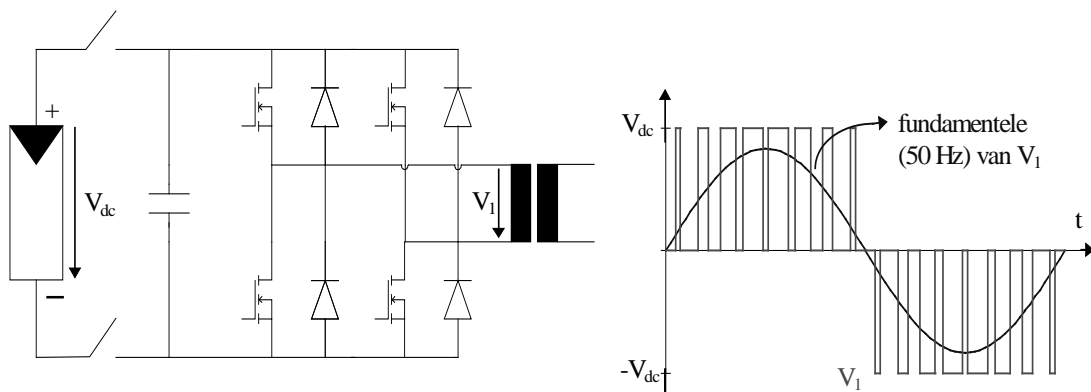
5.3.4.2. Zelfgecommuteerde invertoren

Kleine fotovoltaïsche systemen hebben meestal eenfasige, zelfgecommuteerde, spanningsgestuurde invertoren. Zij hebben de netspanning enkel nodig voor synchronisatie.

Dankzij de pulsbreedte-modulatie (PBM) is er weinig harmonische vervorming. Het reactief vermogen kan onafhankelijk van de spanning geregeld worden. Over het algemeen wordt het reactief vermogen zo klein mogelijk gehouden ($\cos \phi = 1$).

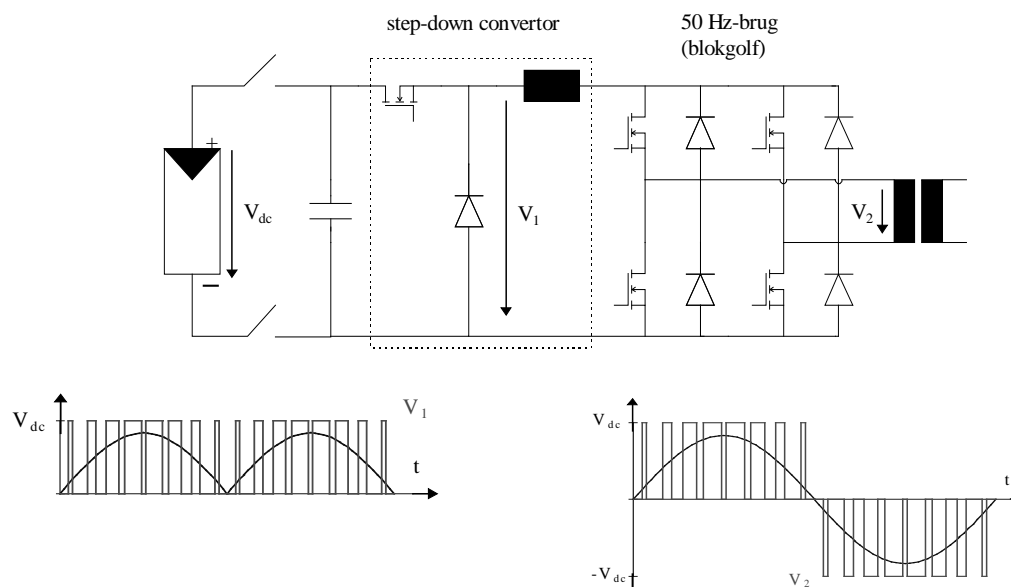
Meestal worden MOSFET's gebruikt als schakelende componenten, hoewel men bij grotere vermogens soms IGBT's gebruikt, omwille van de geleidingsweerstand van MOSFET's. Hoe hoger de schakelfrequentie, hoe zuiverder de sinusvorm wordt. De schakelverliezen nemen dan echter toe. Als compromis is een schakelfrequentie van 20 of 30 kHz gebruikelijk.

De PBM kan op twee manieren uitgevoerd worden. In het eerste geval wordt elke schakelaar van de brug gestuurd volgens het PBM-patroon. Men verkrijgt zo in één stap een sinusvormig gemoduleerde wisselstroom. Dit is weergegeven in figuur 5.18.



Figuur 5.18 Principeschema en golfvorm van een PBM-gestuurde inverter met 50 Hz-transformator.

In figuur 5.19 is een ander concept voorgesteld. Hier zorgt een step-down convertor voor een sinusvormig gemoduleerde gelijkstroom. In een verdere trap wordt dan telkens de tweede halve periode geïnverteerd. De extra vermogentrap heeft een kleine negatieve invloed op het globale rendement.

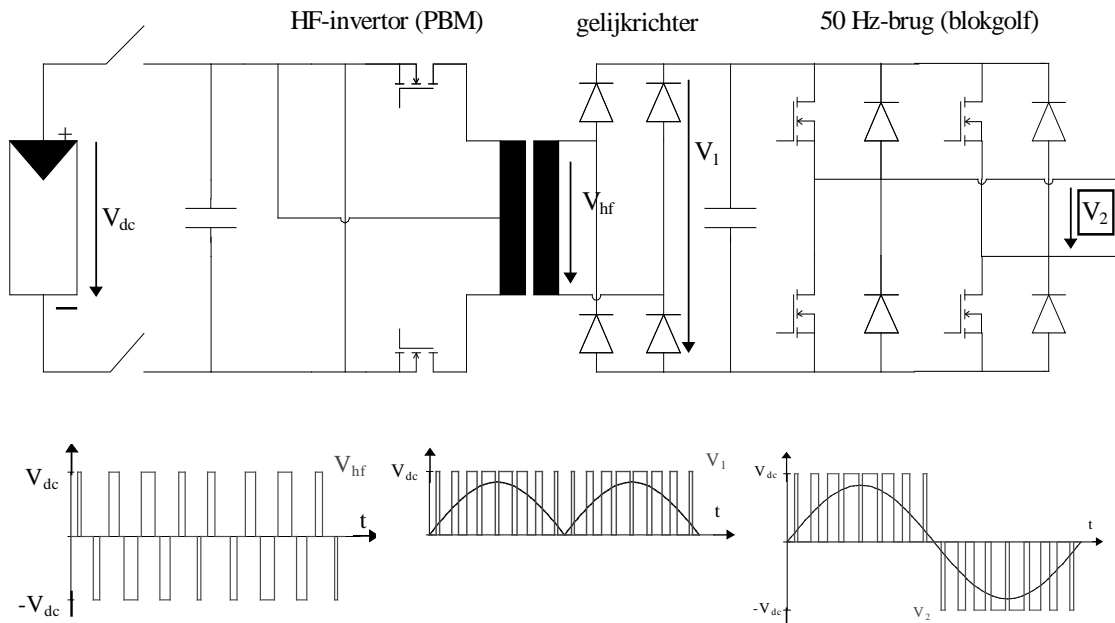


Figuur 5.19 Principeschema en golfvormen van een PBM-gestuurde inverter met step-down convertor en 50 Hz-transformator.

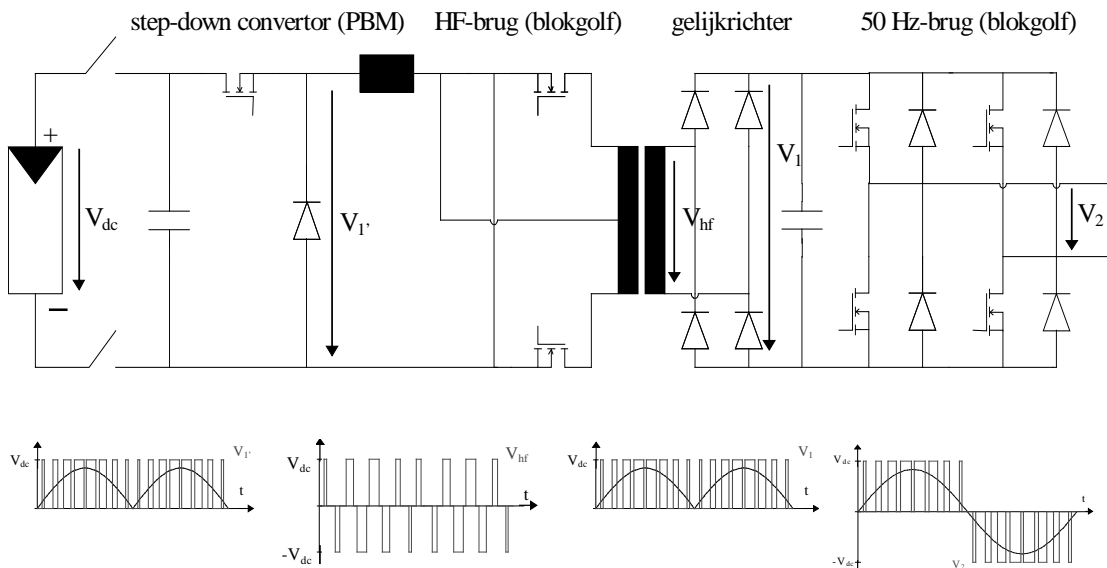
Een ander technologisch verschil betreft de transformator. In de meeste invertoren zorgt een transformator voor een spanningsaanpassing enerzijds en de galvanische scheiding tussen de gelijkstroomzijde en het net anderzijds. De transformator kan zowel laagfrequent (50 Hz) als hoogfrequent zijn. Er zijn ook transformatorloze invertoren, die dan eventueel op een andere manier moeten beveiligd worden.

In de schema's van figuren 5.18 en 5.19 werden laagfrequente transformatoren gebruikt. Dit zijn meestal ringkerntransformatoren waarvan de kern uit blik met een georiënteerde kristalstructuur vervaardigd is.

In toepassingen waarvoor een grote en zware 50 Hz-transformator ongeschikt is, kan een hoogfrequente transformator gebruikt worden. Om de ijzerverliezen bij deze hoge frequenties te beperken worden de kernen in speciale materialen uitgevoerd. Dikwijls zijn dit ferrietten, alhoewel ook amorfe of nanokristallijne legeringen in aanmerking komen. Figuren 5.20 en 5.21 geven de overeenkomstige schema's van figuren 5.18 en 5.19, ditmaal met hoogfrequente transformatoren.



Figuur 5.20 Principeschema en golfvormen van een PBM-gestuurde inverter met hoogfrequent- transformator.



Figuur 5.21 Principeschema en golfvormen van een PBM-gestuurde inverter met step-down convertor en hoogfrequent-transformator.

5.3.4.3. Nieuwe technieken

Het gaat hier om technieken die gekend zijn uit andere domeinen (bv. aandrijvingen) en die men nu tracht toe te passen op fotovoltaïsche invertoren.

Stroomgevoede PBM-invertor (CSI)

Een netgekoppeld fotovoltaïsche systeem met een stroomgevoede PBM-invertor heeft een aantal voordelen t.o.v. die met een spanningsgevoede invertor.

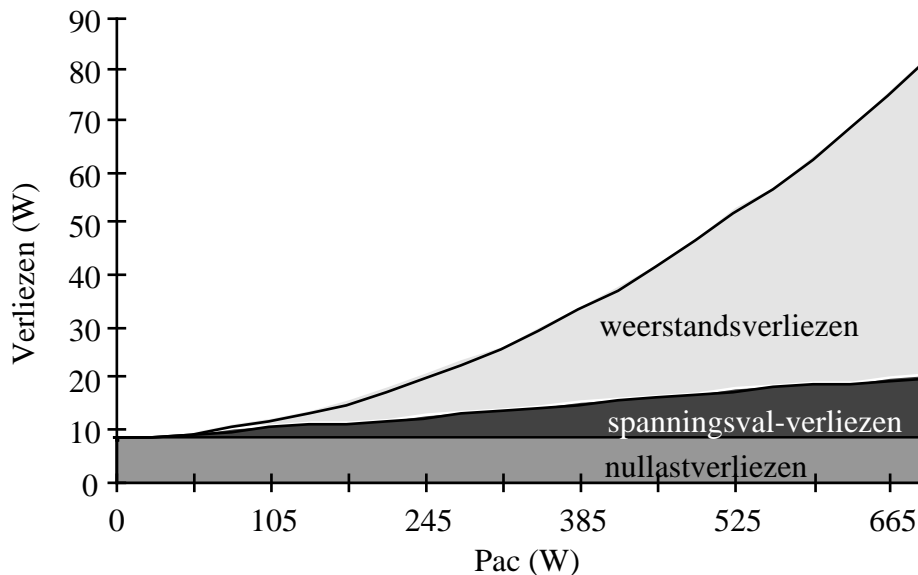
1. De pulsbreedte-modulatie maakt het mogelijk weinig vervormde stroom in het net te injecteren die in fase is met de netspanning ($\cos\phi=1$).
2. De regeling van een stroomgevoede invertor kan eenvoudiger gehouden worden dan die van een spanningsgevoede.
3. de overgangsverschijnselen bij veranderingen van de stralingsintensiteit zijn minder grillig.
4. De stroom bij een kortsluiting blijft tevens beperkt.

Resonante schakeltechnieken (soft switching)

Door te schakelen bij een nuldoorgang van de spanning (zero voltage switching) of de stroom (zero current switching) kunnen schakelverliezen vermeden worden. Dit laat toe de schakelfrequentie op te drijven. Daardoor kunnen de passieve componenten kleiner genomen worden. Bovendien veroorzaken ze minder elektromagnetische interferentie (EMI). Deze techniek is vooral voordelig bij invertoren met laag vermogen omdat de schakelverliezen daar relatief belangrijker zijn.

5.3.5 Verliezen in invertoren

Uitgaande van de rendementscurve kunnen de inverterverliezen in functie van het wisselstroomvermogen berekend worden. Dit is voor de rendementscurve van figuur 5.14 gedaan in figuur 5.22.



Figuur 5.22 Weergave van de verschillende soorten verliezen in een inverter (SMA SWR 700) in functie van het uitgaande vermogen.

Het verloop van de verliezen is ongeveer parabolisch. Vandaar de volgende tweede orde benadering:

$$P_{\text{verl}} = k_0 + k_1 \cdot P_{\text{AC}} + k_2 \cdot P_{\text{AC}}^2$$

De coëfficiënten hebben een fysische betekenis:

- k_0 : nullastverliescoëfficiënt
- k_1 : spanningsval-coëfficiënt
- k_2 : weerstandscoëfficiënt

Omgekeerd kan men ook deze coëfficiënten gebruiken als basis voor de modellering van rendementscurven.

5.3.5.1 Nullastverliezen

Dit is het intern verbruik van de inverter wanneer hij energie aan het net kan leveren. Hier moet wel opgemerkt worden dat niet de volledige nullastverliezen permanent aanwezig zijn, maar enkel het verbruik van (een deel van) de regelapparatuur.

Een belangrijk deel van de nullastverliezen zijn de ijzerverliezen van de transformator. Deze bestaan uit hysteresisverliezen en wervelstroomverliezen. Een empirische formule voor deze verliezen per volume-eenheid wordt gegeven in:

$$p_{\text{verl}} = k_{\text{Fe}} \cdot B_{\text{max}}^a \cdot f^b$$

met k_{Fe} , a , b : materiaalafhankelijke parameters.

De ijzerverliezen nemen dus toe met de frequentie. Daarom wordt bij invertoren met een hoogfrequent-transformator de kern uit speciale materialen vervaardigd. Een aantal recent ontwikkelde metallische, zacht-magnetische materialen vertonen bij hoge frequenties minder verliezen en gaan ook minder snel in verzadiging in vergelijking met ferrieten. Hierdoor kan de kern vaak aanzienlijk verkleind worden.

Ook de schakelverliezen van de vermogenelektronische componenten worden als eerste benadering constant verondersteld. Deze zijn immers vooral afhankelijk van de schakelfrequentie.

Het verbruik van de regelapparatuur en relais behoren ook tot de nullastverliezen. Het deel van de regelapparatuur dat permanent werkt, wordt best vanuit de gelijkstroomzijde gevoed. Zo worden verliezen vermeden bij onvoldoende stralingsintensiteit.

5.3.5.2. Spanningval-verliezen

Deze verliezen nemen evenredig toe met het vermogen. De geleidingsverliezen van de vrijloopdiodes behoren tot deze categorie. Als transistoren of IGBT's gebruikt worden als schakelende componenten moeten ook de geleidingsverliezen daarvan meegerekend worden.

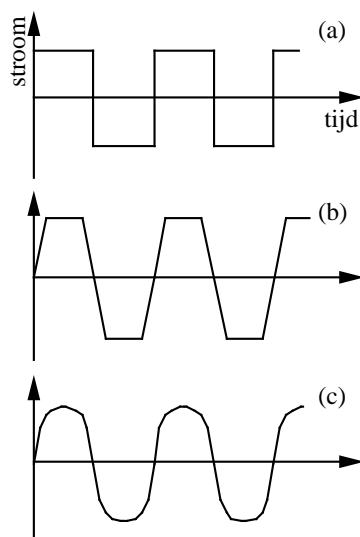
5.3.5.3. Weerstandsverliezen

Alle ohmse verliezen nemen kwadratisch toe met de stroom en dus met het wisselstroomvermogen. De koperverliezen van de transformator vormen een aanzienlijk deel van de weerstandsverliezen. Wanneer met MOSFET's geschakeld wordt, nemen de geleidingsverliezen kwadratisch toe met het vermogen. Tijdens de "aan"-toestand heeft een MOSFET immers een ohmse weerstand. De overige verliezen zitten in de bedrading, de spoelen, enz.

5.3.6. Kenmerken van onafhankelijke invertoren

Invertoren die gebruikt worden in onafhankelijke fofovoltaïsche systemen moeten voldoen aan bepaalde zeer typische eisen. Zo zal in een typische opstelling de verhouding tussen het gevraagde piekvermogen en het gemiddelde vermogen een factor 10 tot 20 bedragen. Daarom is het belangrijk dat de invertoren een hoog rendement halen bij deellast, 5 tot 10% van het nominale vermogen.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen onafhankelijke invertoren met een rechthoekige, een trapezoidale of quasi-sinusoidale en een echte sinusvormige uitgangsstroom. Figuur 5.23 geeft een voorstelling van de typische uitgangstromen. Een inverter met rechthoekige uitgangsstroom zal goedkoper in aankoop zijn, alhoewel met de huidige stand van de technologie sinusvormige invertoren aan gunstige prijzen worden verkocht.



Figuur 5.23 Een rechthoekige (a) , trapezoidale (b) en sinusvormige (c) uitgangsstroom van een onafhankelijke fotovoltaïsche inverter.

Bovendien kunnen allerlei problemen optreden wanneer conventionele elektrische apparatuur wordt aangesloten op een inverter met rechthoekige uitgangsspanning:

- omdat het spanningsniveau bij nuldoorgang niet duidelijk bepaald is kan de werking van bepaalde elektronische controle-apparatuur (bijvoorbeeld moderne wasmachines) aangetast worden.
- door de grote spanningsgradiënten kunnen weerstanden in RC-circuits kapot gaan omwille van overbelasting (bijvoorbeeld in diepvriezers).
- de spanningsgradiënt resulteert in een verhoogde geluids- en warmtegeneratie in transformatoren en motoren. Het rendement van dergelijke toestellen daalt typisch met 10%.

Op basis hiervan zijn hieronder de belangrijkste vereisten opgegeven waaraan een onafhankelijke inverter moet voldoen:

- uitgangsspanning zo sinusoidaal mogelijk
- kleine fluctuaties op uitgangsspanning en -frequentie
- hoog rendement bij deellast: ten minste 90% bij 10% van het nominale vermogen
- de capaciteit om gedurende korte tijd een stroompiek te leveren om te voldoen aan de startcondities van bepaalde toestellen (ijskast, wasmachine)
- mogelijkheid tot werking met de halve golfvorm, typisch voor vermogenreductie door diodes, bijvoorbeeld bij haardrogers.
- robuustheid in geval van kortsluiting
- laag verbruik bij nullast.