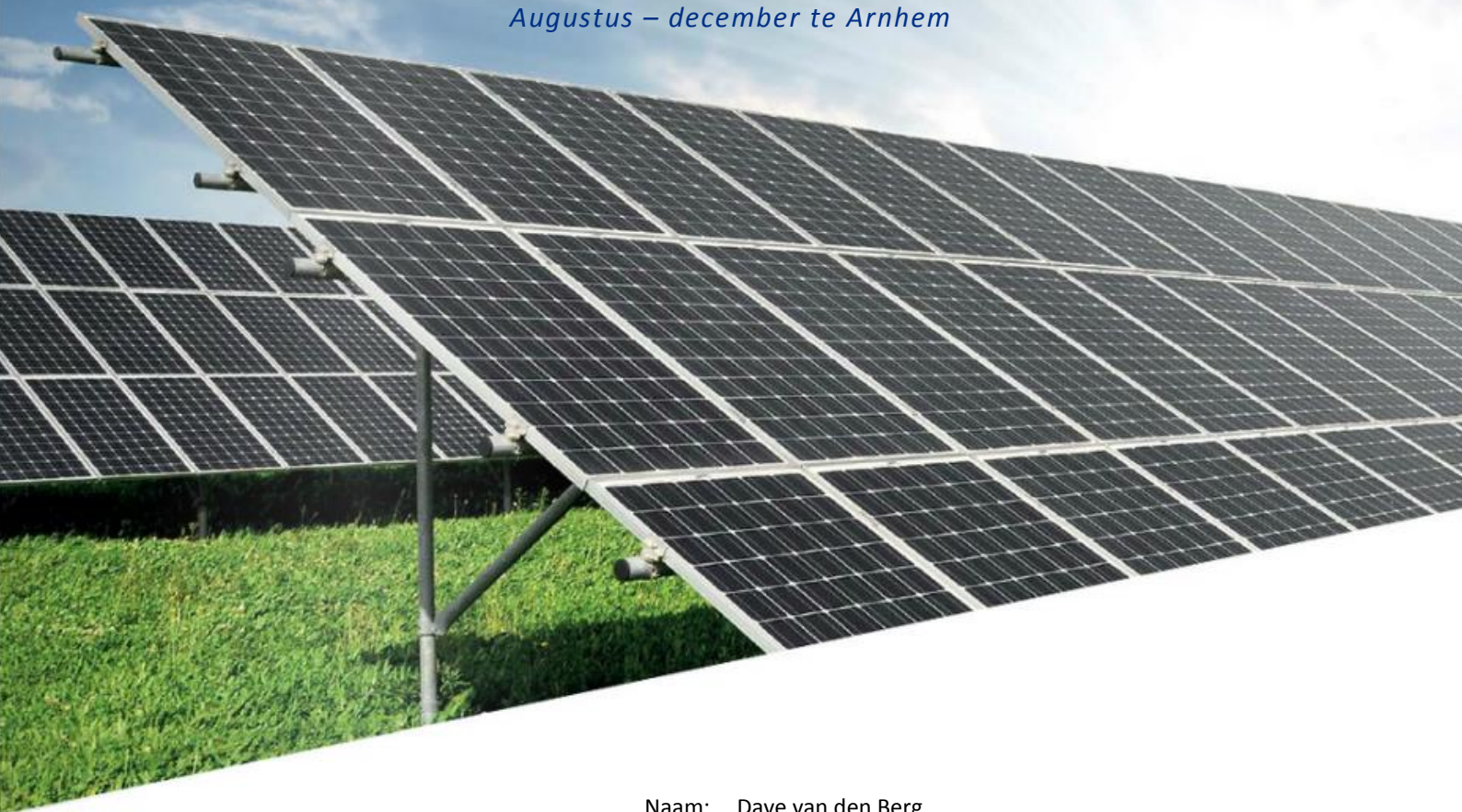


Welke invloed heeft de in Nederland opgewekte zonne-energie op de landelijke balanshandhaving van TenneT?

*Afstuderen
Augustus – december te Arnhem*



Naam: Dave van den Berg
Studentnummer: 11069600
Hogeschool: Haagse Hogeschool te Delft
Opleiding: Elektrotechniek
Periode: Shift 1 2014-2015
Afstudeerbegeleider: Johan Woudstra
Afstudeerbedrijf: TenneT TSO B.V.
Bedrijfsbegeleiders: Ing. Henrie Mathijssen
Ing. Freddy van Halm
Datum: 17 december 2014

Welke invloed heeft de in Nederland opgewekte zonne-energie op de landelijke balanshandhaving van TenneT?

Afstuderen

Augustus – december te Arnhem

Student: Dave van den Berg
11069600
Bergmolen 12
2665 SL Bleiswijk
Dave.vanden.berg@tennet.eu
06 30 73 16 28

Hogeschool: Haagse Hogeschool
Locatie Delft
Rotterdamseweg 137
2628 AL Delft
015 260 6200

Begeleider school: Johan Woudstra
Rotterdamseweg 137
2628 AL Delft
J.B.Woudstra@hhs.nl
015 260 6318

Afstudeerbedrijf: TenneT TSO B.V.
Utrechtseweg 310
6812 AR Arnhem
026 373 1111

1^e Begeleider bedrijf: Ing. Henrie Mathijssen
Utrechtseweg 310
6812 AR Arnhem
Henrie.Mathijssen@tennet.eu
026 373 1111

2^e Begeleider bedrijf: Ing. Freddy van Halm
Utrechtseweg 310
6812 AR Arnhem
Fred.van.Halm@tennet.eu
026 373 1225

Samenvatting

Door de groei van de hoeveelheid geïnstalleerde zonnepanelen, welke aangesloten zijn op de nationale elektriciteitsvoorziening, is TenneT benieuwd wat de invloed van zonne-energie is op de balanshandhaving. TenneT wil een beter inzicht krijgen van de invloed van zonne-energie op de balanshandhaving van de nationale elektriciteitsvoorziening. Hiervoor is een literatuuronderzoek gedaan naar de invloed van zonne-energie op de balanshandhaving. Met het onderzoek is gekeken naar de eigenschappen van zonnepanelen en welke invloed de zonne-energie heeft op de balanshandhaving van TenneT.

Op termijn zal er meer schommeling ontstaan in de balans tussen vraag en aanbod. Meer schommelingen leid tot meer onbalans. De onbalans wordt momenteel beperkt door de balanshandhaving met het gebruik van:

- Het primaire reservevermogen
- Het secundaire reservevermogen
- Het tertiaire reservevermogen

Wanneer het geïnstalleerde vermogen aan zonnepanelen blijft toenemen, zal er een situatie ontstaan waarbij de huidige vorm van regelvermogen niet meer toerijkbaar is voor de balanshandhaving.

Het Nederlandse primaire reservevermogen levert nu een bijdrage aan het synchrone gebied, wanneer er een frequentieafwijking ontstaat. Bij een overschot aan energie op gewekt door niet regelbaar vermogen, is het voor Nederland niet meer mogelijk om een bijdrage te leveren aan de frequentie ondersteuning. Door de groei van de hoeveelheid geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen is er juist meer behoefte aan primair reservevermogen door het verminderen van de inertie.

Het inzetten van het secundaire reservevermogen gebeurt automatisch met de frequentie vermogensregeling. De opgewekte energie uit zonnepanelen zorgt mede voor onbalans. In huidige situatie is het inzetten van secundaire en tertiaire reservevermogen voldoende.

Echter door de toename van de hoeveelheid geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen komt er een moment aan dat de huidige inzet van het secundaire en tertiaire reservevermogen niet meer voldoende is. Door betere en meer gegevens te vergaren van zonne-energie, kunnen tijdig toekomstige problemen in kaart gebracht worden. Om de problemen voor te zijn, is het voor TenneT van belang om de komende tijd de ontwikkelingen van zonne-energie te volgen om te bepalen of het secundaire en tertiaire reservevermogen voldoende is voor situaties in de toekomst.

Voorwoord

In 2011 ben ik begonnen aan mijn studie Elektrotechniek op de Haagse Hogeschool te Delft. Ik zit momenteel in mijn vierde studiejaar en ben bezig met het afronden van mijn studie. Het laatste onderdeel is het laten zien dat ik de juiste competenties en vaardigheden bezit om de opleiding af te ronden. Dit doe ik door een onderzoek te doen bij TenneT TSO B.V. (verder te noemen als TenneT).

Via de Power Minor ben ik in contact gekomen met TenneT. De Power Minor is een keuze module over hoogspanning en paste het beste bij mijn interesses. Tijdens de Power Minor ben ik enthousiaster geworden voor de energietechniek en heb TenneT benaderd voor een afstudeeropdracht. Na een gesprek zijn we tot een onderwerp gekomen. De onderzoeksvraag heb ik mogen opzetten in een periode van twee dagen waarbij ik mee mocht lopen op de afdeling. Dit was erg fijn, want nu kon er gelijk duidelijk invulling worden gegeven aan de onderzoeksvraag.

Ik heb het erg naar mijn zin gehad bij TenneT en wil in het bijzonder Henrie Mathijssen en Freddy van Halm bedanken voor de begeleiding tijdens mijn afstuderen. Ze waren altijd bereid om mijn vragen te beantwoorden en mij verder te helpen. Ook wil ik de collega's bij TenneT bedanken voor de prettige werksfeer en degene bedanken bij wie ik met mijn vragen terecht kon. Tevens wil ik mijn afstudeercoach Johan Woudstra bedanken voor zijn begeleiding tijdens vanuit school.

Bleiswijk, december 2014

Dave van den Berg

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Voorwoord	4
Figurenlijst.....	7
Lijst met afkortingen en begrippen	8
1. Inleiding.....	10
1.1. De onderzoeksvraag	11
1.2. Werkwijze	11
2. Balanshandhaving	12
2.1. Voorbereiding op de operationele dag.....	12
2.2. Balanshandhaving tijdens de operationele dag.....	13
2.3. Ontstaan van onbalans	14
2.4. Inzet van het primaire reservevermogen	15
2.5. Onwillekeurige uitwisseling met het buitenland	16
2.6. Inzet biedladder.....	18
2.7. De werking van de biedladder	19
2.8. Passieve bijdrage	20
3. Zonne-energie en de balanshandhaving	22
4. Invloed van zonne-energie op de balanshandhaving.....	26
4.1. Sterke fluctuatie in de zonne-energie.....	26
4.1.1. Gevolgen van sterke fluctuatie.....	27
4.2. Inzet regelvermogen.....	28
4.2.1. Conclusie fluctuaties	30
4.3. Verkeerde prognose zonne-energie	31
4.3.1. Problemen prognose zonne-energie	31
4.3.2. Mogelijke afwijkingen in de prognose van zonne-energie.....	32
4.3.3. Conclusie verkeerde prognose	33
4.4. Overschot aan opgewekte energie	34
4.4.1. Conclusie meer energie dan vraag	37
5. Algemene conclusie.....	38
6. Aanbevelingen.....	39

7.	Literatuurlijst	40
8.	Bijlagen I	43
8.1.	Geschiedenis	43
8.2.	Taken en verplichtingen	44
8.3.	Netbeheer	44
8.4.	Systeembeheer	45
8.4.1.	Transportdienst	45
8.4.2.	Systeemdiensten	45
9.	Bijlage II	47
9.1.	Zonne-energie	47
9.1.1.	Energie omzetten	47
10.	Bijlage III	49
	Meetgegevens van 11 willekeurige installaties	49

Figurenlijst

Figuur 0-1 Voorkant	1
Figuur 1-1 Schematische weergave elektriciteitsvoorziening	10
Figuur 2-1 Synchrone gebieden Europa	13
Figuur 2-2 Principe generator met belasting.....	14
Figuur 2-3 Overzicht FVR	17
Figuur 2-4 Biedprijssladder secundaire reservevermogen	19
Figuur 3-1 Overzicht grensverbindingen	22
Figuur 3-2 Weergave van de marktonbalans (rood) op een willekeurige dag	23
Figuur 3-3 Locaties van PV-installaties	24
Figuur 4-1 Wolkenvelden	26
Figuur 4-2 Woestijnstof in de atmosfeer	32
Figuur 4-3 Regelen van opwek	36
Figuur 4-4 Regelen van vraag	36
Figuur 2-1 Atoom verbindingen	47
Figuur 2-2 Werking zonnepaneel	48
Grafiek 4-1 Gemiddelde verandering.....	27
Grafiek 4-2 Uitwerking secundaire reservevermogen bij een verstoring.....	29
Grafiek 4-3 Hypothetisch vooruitzicht.....	34
Grafiek 4-4 Hypothetische productie.....	35

Lijst met afkortingen en begrippen

Aangeslotene	Een ieder, die beschikt over een aansluiting op een net, dan wel degene die om een aansluiting heeft verzocht. ¹
ACM	Autoriteit Consument & Markt.
Afregelen	Afregelen is het omlaag laten regelen van het productievermogen door een productie-eenheid van een elektriciteitscentrale en het opregelen van de elektriciteitsvraag. ²
Control Area's	Een gebied waar één TSO voor verantwoordelijk is.
Control Blocks	Een gebied waar één of meerdere TSO's onder vallen en die komt meestal overeen met de landgrenzen.
Delta-setpoints	Waardes die naar leveranciers van regelvermogen worden gestuurd zodat de productie-eenheid wordt bij geregeld.
E-Programma Energieprogramma	Door een programmaverantwoordelijke opgesteld programma dat bij de netbeheerder van het landelijk hoogspanningsnet ingediend moet worden voor elke programmatijdseenheid van het volgende etmaal en bevat: (1) het saldo van de transporten over alle aansluitingen waarvoor hij programma-verantwoordelijke is, (2) de netto-omvang van alle energietransacties met andere programmaverantwoordelijken, (3) de omvang van elke import- en exporttransactie. ¹
EOM Energy Only Market	Een energiemarkt waar alleen betaald wordt voor de elektrische energie welke ook geleverd is.
ENTSO-e	European Network of Transmission System Operators for electricity.
FVR	Frequentie Vermogensregeling.
HZ	Hertz.
IGCC	International Grid Control Cooperation.
Inertie	De weerstand wat een bewegend object biedt wanneer er een kracht optreedt wat de richting en/of de snelheid van het bewegend object wil veranderen.
Klokkwartier	Een kwartier van een uur beginnend op het hele uur of de 15 ^{de} , 30 ^{ste} of 45 ^{ste} minuut van een klokuur.
kV	Kilovolt.
kW	Kilowatt.
kWh	Kilowattuur.
kWp	Kilowattpiek.
Landelijk hoogspanningsnet	De netten die bestemd zijn voor transport van elektriciteit op een spanningsniveau van 110 kV of hoger en die als zodanig worden bedreven, evenals de landsgrensoverschrijdende netten op een spanningsniveau van 500V of hoger. ¹
Leverancier	Een organisatorische eenheid die zich bezighoudt met het leveren van elektriciteit. ¹
Mvar	Megavolt-ampère reactief.
MW	Megawatt.

¹ Begrippenlijst ACM [37]

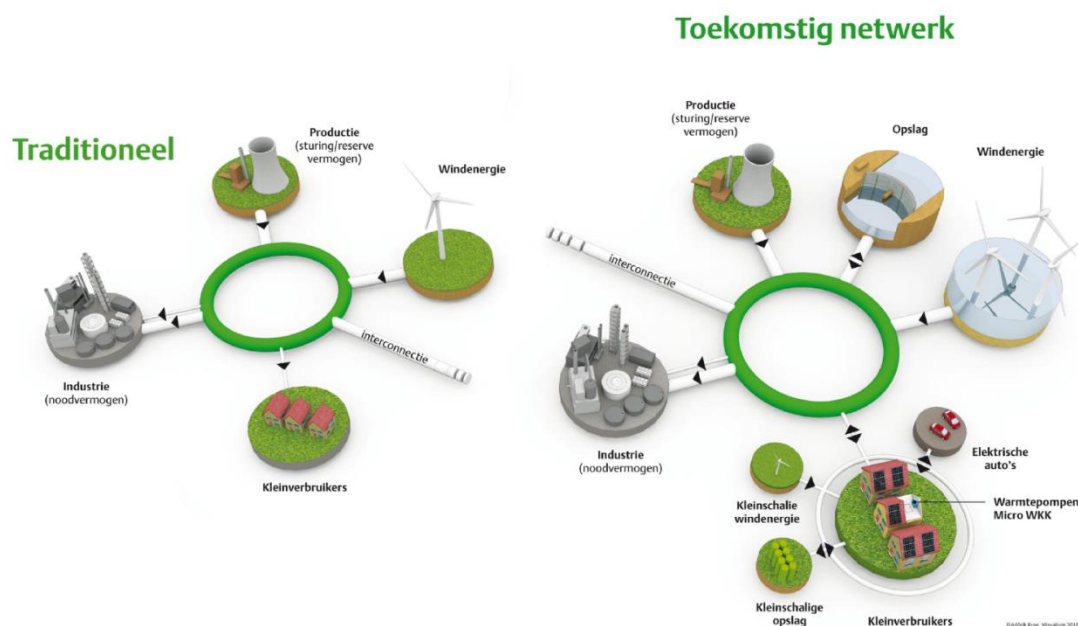
MWh	Megawattuur.
Onbalansprijsystematiek	De onbalanssystematiek is de door de landelijke netbeheerder beheerde systematiek voor het handhaven van de nationale systeembalans van de elektriciteitsvoorziening en voor het verrekenen van de onbalans kosten. ²
Onwillekeurige uitwisseling met het buitenland	Onwillekeurige uitwisseling is de afwijking in de uitwisseling van elektrische energie met het buitenland ten opzichte van de vastgelegde internationale uitwisselingsprogramma's. ²
Opregelen	Opregelen is het laten verhogen van het ingezette vermogen door een productie-eenheid van een elektriciteitscentrale door een marktpartij. ²
Primair reservevermogen	Het vermogen wat onder regie van de primaire regeling wordt geactiveerd ¹ .
Producent	Een organisatorische eenheid die zich bezighoudt met het opwekken van elektriciteit. ¹
PV programmaverantwoordelijke	Een marktpartij die door de System Operator als programmaverantwoordelijke erkend is en daarmee de programmaverantwoordelijkheid daadwerkelijk mag uitvoeren. ¹
PTE	Programmatijdseenheid.
Pump storage	Het opslaan van energie door middel van water pompen in een opslag om er later met waterkracht elektriciteit mee op te wekken.
Secundair reservevermogen	Het vermogen wat direct aangestuurd wordt door de FVR
security of supply	Het vermogen van een net om elektriciteit te leveren aan afnemers. ¹
SEP	Samenwerkende Elektriciteitsproductiebedrijven.
Single buyer market	Een markt waarbij er verschillende aanbieders zijn, maar er is maar één koper op die markt.
SO	System Operator.
Tertiair reservevermogen	Vermogen wat niet direct door de FVR wordt aangestuurd maar wel afgeroepen kan worden door de balanshandhaving
TSO Transmission System Operator	De Transmission System Operator is de beheerder van het landelijke hoogspanningsnet met de taken zoals deze gedefinieerd zijn in artikel 16 van de Elektriciteitswet 1998. ²
VT	Virtual Tie line.
WON	Wet Onafhankelijke Netbeheerder.
Zonne-energie	Elektriciteit welke opgewekt is door zonnepanelen.

² Begrippenlijst TenneT

1. Inleiding

TenneT is Transmission System Operator (TSO) van Nederland en is verantwoordelijk voor het landelijke hoogspanningsnet. Ook is TenneT verantwoordelijk voor de ondersteunende diensten voor de security of supply van de nationale elektriciteitsvoorziening. Om de security of supply te waarborgen wordt door TenneT de onbalans tussen vraag en aanbod van elektrische energie zo veel mogelijk beperkt. TenneT probeert de betrokken partijen zoveel mogelijk te stimuleren om te zorgen dat er zo min mogelijk onbalans is om zo de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland te beperken.

Tegenwoordig worden steeds meer zonnepanelen aangesloten op de nationale elektriciteitsvoorziening en ontstaat er een verandering in het aanbod van elektrische energie. Het aanbod van elektrische energie krijgt een decentraal karakter zoals is weergegeven in *Figuur 1-1 Schematische weergave elektriciteitsvoorziening* [1]. De opgewekte energie uit zonnepanelen valt buiten de stimulatie van TenneT en het vermogen is niet regelbaar uitgevoerd. Hierdoor heeft TenneT geen invloed op het aanbod van de energie welke geleverd wordt door zonnepanelen. In het buitenland ondervinden ze verschillende problemen door de geleverde energie van zonnepanelen. TenneT wil duidelijkheid over mogelijke problemen die kunnen ontstaan bij de balanshandhaving door de geleverde energie uit zonnepanelen.



Figuur 1-1 Schematische weergave elektriciteitsvoorziening

Het onderzoek heeft alleen betrekking op de zonne-energie welke in Nederland wordt geproduceerd. In het onderzoek wordt gekeken naar de invloed op de balanshandhaving van TenneT in Nederland. Er is nu nog niet veel bekend over invloed van zonne-energie op de balanshandhaving van TenneT.

1.1. De onderzoeksvraag

De onderzoeksvraag is:

Welke invloed heeft de in Nederland opgewekte zonne-energie op de landelijke balanshandhaving van TenneT?

Het onderzoek is opgedeeld in de volgende deelvragen:

- Wat is er bekend over het omgaan met zonne-energie op de balanshandhaving?
- Welke invloed heeft de verandering van de zon intensiteit op de balanshandhaving door zonne-energie?
- Welke invloed heeft zonne-energie op de onbalansprijsystematiek?
- Zijn de marktprikkels die nu toegepast worden, ook goed toepasbaar met een groter aandeel zonne-energie?
- Bij welk opgesteld vermogen aan zonnepanelen welke aangesloten is op de nationale elektriciteitsvoorziening zal het merkbaar worden voor de balanshandhaving?

1.2. Werkwijze

Als eerste is een literatuurstudie gedaan om een zo goed mogelijk beeld te krijgen van de eigenschappen van zonne-energie en hoe de balanshandhaving werkt bij TenneT. Vervolgens zijn er met de informatie enkele scenario's uitgewerkt om zo een beeld te creëren van wat de invloed is van zonne-energie op de balanshandhaving van TenneT.

In hoofdstuk 2 wordt de balanshandhaving uitgelegd. In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe de balanshandhaving is ingevuld door TenneT. In hoofdstuk 3 worden de eigenschappen van zonne-energie uitgelegd welke van belang zijn voor de balanshandhaving. In hoofdstuk 4 worden drie scenario's uitgelegd en met een onderbouwing van de invloed van zonne-energie op de balanshandhaving. Het eerste scenario gaat in op de snelle veranderingen in de balans door zonne-energie. Het tweede scenario gaat in op bijzondere omstandigheden welke voor kunnen komen. Bij het derde scenario wordt gekeken wat er gebeurt als er teveel elektriciteit energie door zonnepanelen wordt geproduceerd. Hoofdstuk 5 bestaat uit een algemeen conclusie en hoofdstuk staan de aanbevelingen vermeld.

2. Balanshandhaving

TenneT probeert een goede balans te handhaven tussen vraag en aanbod van elektrische energie op de nationale elektriciteitsvoorziening. De balans wordt zoveel mogelijk gehandhaafd door alle partijen op de juiste manier te stimuleren om positief mee te werken. De huidige manier van levering van elektrische energie uit zonne-energie is niet gevoelig voor de stimulaties van TenneT, maar beïnvloedt wel indirect het systeem van de balanshandhaving. Om juiste uitspraken te doen over de invloed van zonne-energie op de balanshandhaving, is het van belang om de werking van de systematiek te begrijpen. De werking wordt in dit hoofdstuk behandeld.

2.1. Voorbereiding op de operationele dag

Balanshandhaving begint al bij het verhandelen van elektrische energie. De Nederlandse energiemarkt voor elektriciteit is als een Energy Only Market (EOM) opgezet om leveranciers en afnemers bij elkaar te brengen. Leveranciers worden alleen betaald voor de energie die geleverd wordt. Dit zorgt ervoor dat vraag en aanbod van elektrische energie op elkaar afgestemd wordt. Mocht er structureel te weinig aanbod zijn, dan wordt de prijs per MWh hoger. Wanneer het aanbod van elektrische energie structureel groter is dan de vraag zakt de prijs per MWh. Hierdoor wordt er gestimuleerd om te investeren in het aanbod dat past bij de vraag.

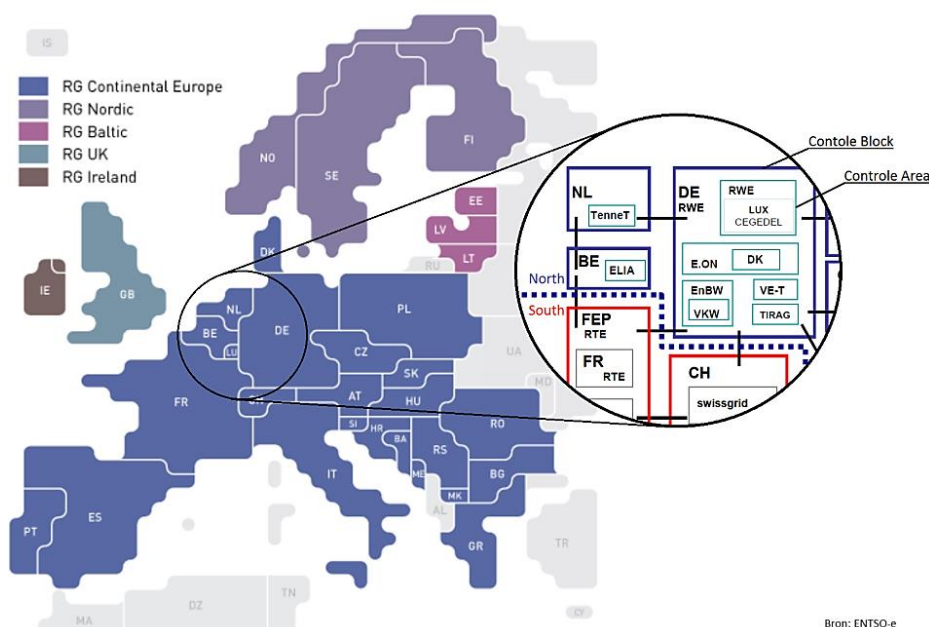
Leveranciers bieden de energie aan welke opgewekt kan worden en verschillende afnemers kopen de energie in. De benodigde energie wordt van te voren geschat. Iedereen die aangesloten is op het openbare elektriciteitsnet in Nederland (ook wel aangeslotene genoemd) is verplicht om aan TenneT door te geven welke hoeveelheden energie ze de volgende dag gaan onttrekken van en/of leveren aan de nationale elektriciteitsvoorziening. Kleinverbruikers hebben niet de verplichting om dit aan te geven. Voor kleinverbruikers zijn leveranciers verantwoordelijk om dit door te geven. Daarnaast moeten ook de voorgenomen handelstransacties doorgegeven worden van de volgende dag. De gegevens moeten op kwartierbasis worden geleverd en wordt het Energieprogramma (E-Programma) genoemd. De verplichting tot het goed aanleveren van de juiste gegevens wordt programmaverantwoordelijkheid genoemd. De programmaverantwoordelijkheid wordt gedragen door een programmaverantwoordelijke (PV). Een partij (natuurlijke of rechtspersoon) kan PV worden door aan de gestelde eisen [2] te voldoen en een overeenkomst te sluiten met TenneT. Een aangeslotene kan de programmaverantwoordelijkheid ook uitbesteden waardoor verschillende aangeslotene onder één PV worden ondergebracht. De E-Programma's worden via elektronische berichten verstuurd naar TenneT. Een PV dient ervoor te zorgen dat alle opgegeven energie een oorsprong en een bestemming heeft. TenneT controleert de E-programma's om te bepalen of er een evenwicht is tussen de opgegeven levering en afname van energie.

Ondanks alle voorbereidingen voor een goede balans tussen vraag en aanbod kan er op de dag zelf een verstoring voordoen van de balans. Om ervoor te zorgen dat PV's zich houden aan de E-Programma's is in de systeemcode [2] het artikel *prijs van onbalans* opgenomen. Hierin staat beschreven wat de gevolgen zijn

van het niet volgen van het E-Programma. De partij die de onbalans veroorzaakt zal ook de kosten hiervoor moeten dragen. Dit wordt ook wel de onbalansprijsystematiek genoemd en TenneT ziet er op toe dat de verrekening op de juiste manier gebeurt. Door de onbalansprijsystematiek werken alle PV's collectief mee om de onbalans te beperken. Niet alle onbalans is te voorkomen en wanneer de onbalans te groot wordt grijpt TenneT in om de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland te beperken.

2.2. Balanshandhaving tijdens de operationele dag

Het landelijke hoogspanningsnet van TenneT maakt deel uit van een groot gekoppeld systeem en is onderverdeeld in verschillende gebieden. De gebieden worden gescheiden doordat er geen elektrische verbinding is of doordat er geen wisselstroom verbinding is met het andere gebied. Hierdoor ontstaan frequentie synchrone gebieden zoals te zien in Figuur 2-1 Synchrone gebieden Europa[3].



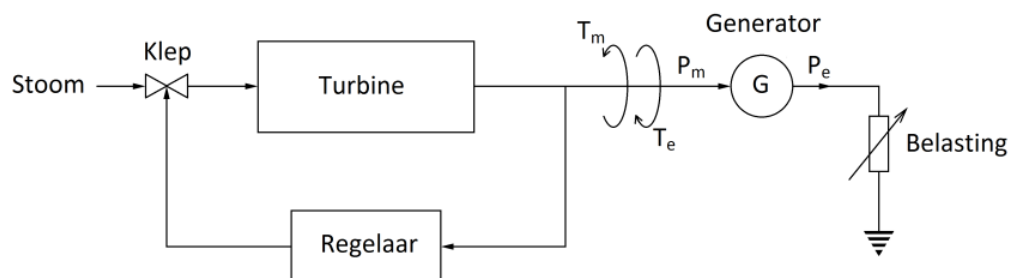
Figuur 2-1 Synchrone gebieden Europa

Het synchrone gebied is weer onderverdeeld in twee gebieden, noord en zuid. De twee gebieden zijn weer onderverdeeld in Control Blocks met één of meerdere Control Area's. Voor Nederland is de Control Block en de Control Area eenzelfde gebied. Binnen een Control Block kunnen meerdere Transmission System Operators (TSO's) actief zijn. De TSO's in het synchrone gebied zijn een samenwerkingsverband aangegaan onder de naam European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-e). De TSO's hebben afspraken met elkaar gemaakt. Deze afspraken zijn opgenomen in de ENTSO-e Policy [4]. Eén van die afspraken is het handhaven van een frequentie van 50Hz [5]. Elke TSO dient dit te handhaven in zijn eigen net. Er mag alleen afgeweken worden van de 50Hz als het aangegeven wordt door de Europese frequentie coördinator. Verschillende klokken gebruiken de 50Hz als referentie. Wijkt de waarde af, dan lopen de klokken niet meer gelijk. Om dit te compenseren kan er afgeweken worden van de 50Hz met +/- 0,01 Hz. De 50Hz met de eventuele aanpassing van de Europese coördinator is de richtfrequentie.

Alle andere afwijkingen moeten weggeregeld worden. Daarbij is de regelzone gesteld op minimaal 49,8Hz en maximaal 50,2Hz. Wanneer de frequentie buiten de regelzone komt moet hier snel op gereageerd worden, want bij een te grote afwijking wordt er ingegrepen door automatische beveiligingen en schakelen af. Naast het belang dat de frequentie niet te ver afwijkt van de 50Hz, is het ook van belang om de frequentie constant te houden. Verandering in de frequentie geeft een verandering in het magnetisch veld van inductiemotoren en transformatoren [6]. Dit kan resulteren in kortstondige grote stromen in de inductiemotoren en transformatoren welke nadelig is voor de levensduur van de machines.

2.3. Ontstaan van onbalans

Het grootste deel van de elektriciteit die opgewekt wordt is afkomstig van grote generatoren. Alle eenheden in een synchroon gebied staan aan elkaar gekoppeld en hebben dezelfde frequentie [7]. Wanneer alle generatoren gezien worden als één grote draaiende massa, ontstaat er één massa die een kracht levert door de roterende snelheid (koppel). De massa wordt mechanisch aangedreven door bijvoorbeeld een turbine die het aandrijfkoppel levert. De draaisnelheid van de massa wordt in tegengestelde richting beïnvloed door het remmend koppel van het elektromagnetisch veld in de generator. Het principe is weergegeven met *Figuur 2-2 Principe generator met belasting* [6]. De snelheid van de as wordt direct vertaald naar de frequentie van de opgewekte stroom.



T_m = Mechanisch Koppel (aandrijfkoppel) P_m = Mechanisch vermogen
 T_e = Elektrisch koppel (remmend koppel) P_e = Elektrisch vermogen

Bron: P.Kundur

Figuur 2-2 Principe generator met belasting

Wanneer de twee koppels aan elkaar gelijk zijn, houdt de massa een constante snelheid. Het evenwicht tussen de koppels kan verstoord worden door een verandering van één van de twee koppels. Het koppel dat geleverd wordt door de turbine wordt geregeld door de centrale zelf en zal in normale omstandigheden niet afwijken. Het remmend koppel dat geleverd wordt door het magnetisch veld van de generator is afhankelijk van de elektrische belasting welke is aangesloten aan de generator. Verandert de belasting dan verandert ook het remmend koppel. Wanneer er bijvoorbeeld een deel van de belasting afgeschakeld wordt, gaat er minder stroom door de wikkelingen van de generator. Het magnetisch veld neemt af en zo ook het remmend koppel. De aandrijfkoppel wat de turbine levert is dan groter dan het remmend koppel waardoor de draaisnelheid van de as toeneemt. De regeling van de turbine past het aandrijfkoppel direct aan om te zorgen dat de draaisnelheid van de as niet afwijkt en de frequentie van het draaiveld 50Hz blijft.

Wanneer we dit vertalen naar de verschillende generatoren in het net, volgt elke generator de frequentie van het net waarop de generator is aangesloten. Alle generatoren draaien synchroon en de netfrequentie is nu medebepalend voor het toerental van de generator. De generatoren proberen een constante frequentie aan te houden van 50Hz, en synchrone te blijven met de netfrequentie. Begint de netfrequentie te veel af te wijken van de 50Hz dan zal het toerental van de generator aangepast moeten worden om synchrone te blijven met de netfrequentie.

2.4. Inzet van het primaire reservevermogen

Bij kleine verstoringen zal de netfrequentie niet direct afwijken. De verstoring wordt opgevangen door alle producerende eenheden in het synchrone gebied. De invloed is per eenheid minimaal. Bij grote verstoringen, bijvoorbeeld het geval van afschakelen van een grote belasting, zal het remmend koppel afnemen en zal de netfrequentie iets verhogen. Alle generatoren volgen de netfrequentie om synchroon te blijven. Om de frequentieverandering te stoppen zijn bepaalde generatoren uitgerust met een extra regeling. De extra regeling is lokaal uitgevoerd. De generatoren worden automatisch in tegenovergestelde richting bij geregeld om snel de frequentie verandering te stoppen en niet de netfrequentie te volgen. De generatoren met de extra regeling worden het primaire reservevermogen genoemd. Door de grote massa traagheid van het hele synchrone gebied (ook wel inertie genoemd) en het grote aandeel van het primaire reservevermogen zorgt ervoor dat de frequentie minimaal afwijkt van de 50Hz.

Het primaire reservevermogen is bedoeld om een gegarandeerde reactie te krijgen op een frequentie verstoring. Om de snelheid te garanderen moet het primaire reservevermogen aan bepaalde eisen voldoen, welke zijn vastgelegd in de systeemcode [2]. Zo moet het beschikbaar gestelde vermogen binnen dertig seconden 100% zijn ingezet. Om de beschikbaarheid te garanderen maakt TenneT gebruik van biedingen. Het vermogen dat de partijen beschikbaar stellen wordt aangeboden door middel van biedingen. Alle partijen die aan de geldende eisen voldoen mogen primaire reservevermogen aanbieden. Vanuit de biedingen worden de eenheden geselecteerd die het primaire reservevermogen voor de gunstigste prijs aanbieden en worden dan ook verplicht om te leveren bij een frequentieverstoring.

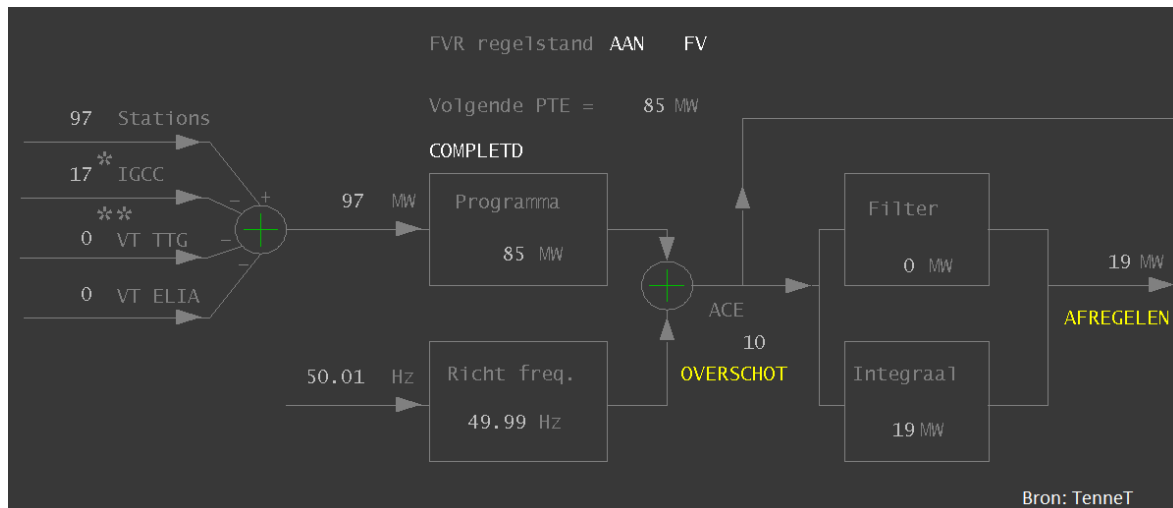
TenneT is, net als andere TSO's in het synchrone gebied, verplicht om een bepaald vermogen gegarandeerd beschikbaar te hebben bij een verstoring om zo mee te helpen aan een Europees stabiel net. Het aandeel van TenneT wordt elk jaar bepaald door ENTSO-e en staat voor 2014 op 101 MW [8]. In het synchrone gebied wordt rekening gehouden met een uitval van 3000MW om te bepalen hoeveel beschikbaar vermogen nodig is. Afwijkingen tussen vraag en aanbod van elektrische energie welke kleiner zijn dan 3000MW in 30 seconden kunnen altijd opgevangen worden door het primaire reservevermogen.

2.5. Onwillekeurige uitwisseling met het buitenland

De inzet van het primaire reservevermogen gebeurt automatisch en is verspreid over het synchrone gebied. Door de invloed van het ingezette primaire reservevermogen en de directe opvang van een verstoring door alle eenheden in het synchrone gebied, ontstaat er onwillekeurige uitwisseling met het buitenland. Elke Controle Area is verantwoordelijk om een verstoring in dat gebied te corrigeren en zo het primaire reservevermogen weer vrij te maken en de frequentie weer naar 50Hz te brengen.

Om te kunnen bepalen welke reactie vanuit Nederland gewenst is, en te bepalen of Nederland (mede)verantwoordelijk is voor de frequentieafwijking, maakt TenneT gebruik van een Frequentie Vermogen Regeling (FVR). De FVR wordt beïnvloed door de elektrische energie uitwisseling met het buitenland en de gemeten frequentie. Het systeem kijkt naar het verschil tussen de uitwisseling volgens de E-Programma's en de gemeten uitwisseling met het buitenland. Op alle aansluitingen met het buitenland worden metingen verricht om de hoeveelheid energie te meten die over de grens gaat. De momentane waarde wordt vergeleken met het vooraf opgestelde programma van Nederland, is er een afwijking dan wordt er door de FVR corrigerend gereageerd. Om ervoor te zorgen dat de invloed van de FVR niet nadelig werkt ten opzichte van de frequentie-afwijking, wordt ook de frequentie in de gaten gehouden. De frequentie voor de FVR wordt elke seconde gemeten op drie locaties in Nederland. Eén locatie wordt als referentie gebruikt en de andere twee locaties dienen als back-up. De FVR stuurt dan nieuwe setpoints naar de direct aangeslotene om de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland te minimaliseren en het primaire reservevermogen weer vrij te maken voor een eventuele volgende verstoring. Het kan bijvoorbeeld zijn dat het vermogen dat een generator levert bijgesteld wordt of dat er belasting in- of afgeschakeld wordt.

Voordat de output van de FVR aangepast wordt, wordt er gekeken of de fout weggeregeld kan worden met de buurlanden. TenneT maakt hiervoor gebruik van de International Grid Control Cooperation (IGCC). Dit is een samenwerking met verschillende TSO's van andere landen waaronder België, Denemarken en Duitsland. De TSO's welke aangesloten zijn bij IGCC kijken of het onderlinge verschillen in vermogen tegen elkaar weggestreept kunnen worden. Bijvoorbeeld: België produceert te weinig en Nederland produceert te veel. In plaats van dat België zijn fout weg regelt door vermogen op te regelen en Nederland precies het tegenovergestelde doet, wordt het overschot van België met Nederland administratief verwerkt. In *Figuur 2-3 Overzicht FVR* is een schema weergegeven van de FVR. Aan de linkerkant is de input te zien zoals hiervoor besproken is. Naast de metingen van het daadwerkelijke grensoverschrijdende getransporteerde vermogen en het vermogen dat via IGCC verrekend kan worden, staan er ook Virtual Tie lines (VT) als invoer bij. De VT werkt hetzelfde de IGCC alleen dan met de directe buurlanden Duitsland en België.



Figuur 2-3 Overzicht FVR

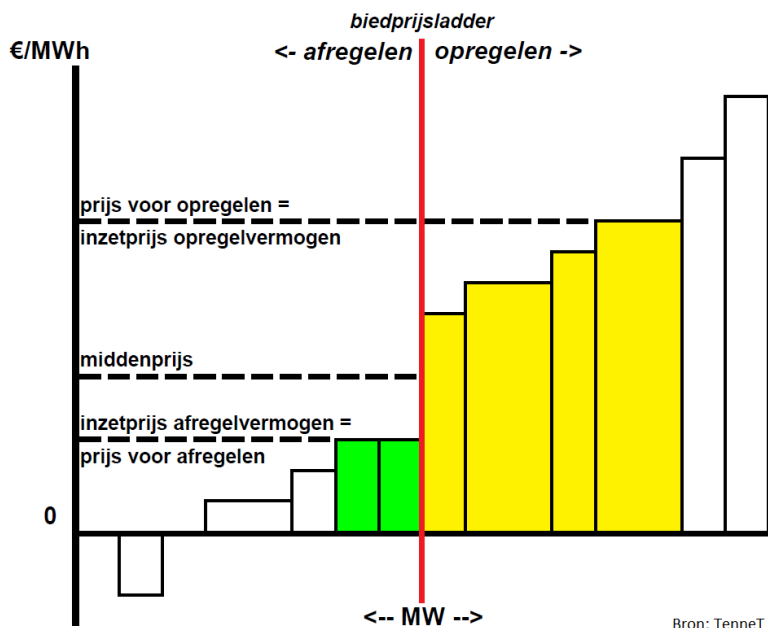
Alle invoerende vermogens worden bij elkaar opgeteld en vergeleken met de geldende programmatijdseenheid (PTE). Een PTE is een kwartier. Uit de vergelijking kan een verschil komen dat is ontstaan doordat partijen zich niet aan het afgesproken E-Programma hebben gehouden. De vermogensafwijking wordt vervolgens opgeteld bij de afwijking van de gemeten frequentie ten opzichte van de richtfrequentie wat vertaald is naar een verschil in vermogen. Vervolgens berekend de regelaar de gewenste reactie die nodig is om de momentane onbalans te corrigeren en de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland binnen de PTE te beperken. De uitwerking van de FVR wordt voortdurend gemonitord om zo nodig de instellingen van de parameters aan te passen om ervoor te zorgen dat de regelaar het maximale gewenste resultaat geeft. De output van de FVR wordt delta-setpoints genoemd en deze worden elke vier seconden ververs. [9]

2.6. Inzet biedladder

Uit de FVR komt een delta-setpoint die aangeeft welk vermogen nodig is om de frequentie weer op de richtfrequentie te krijgen en om de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland te beperken. TenneT heeft bepaalde middelen ter beschikking om in te zetten en wordt het secundaire en het tertiaire reservevermogen genoemd. Het secundaire en tertiaire reservevermogen bestaat:

- Het secundaire reservevermogen:
Het secundaire reservevermogen is het vermogen dat ingezet kan worden vanaf 30 seconden na een verstoring en het moet binnen 15 minuten volledig zijn ingezet. Het secundaire reservevermogen zorgt voor een snelle reactie en wordt direct aangestuurd de FVR. [9] Met het inzetten van het secundaire reserve vermogen wordt het primaire reservevermogen weer vrijgemaakt.
- Het tertiaire reservevermogen:
 - Het tertiaire reservevermogen is vermogen dat wordt ingezet voor toekomstige balansproblemen. Wordt er geconstateerd dat de verstoring aanhoudt of dat er een verstoring gaat optreden die langer aanhoudt, dan kan er voor een bepaalde periode het tertiaire reservevermogen ingezet worden. [9] Dit is vermogen wat binnen 15 min ingezet kan worden (maar kan niet direct door de FVR aangestuurd kan worden) tot vermogen wat dagen nodig heeft om op te starten. Met het inzetten van het tertiaire reserve vermogen wordt het secundaire reservevermogen weer vrijgemaakt.
 - Het noodvermogen is een bijzondere vorm van het tertiaire reservevermogen en dient als extra voorzorgsmaatregel. Het noodvermogen wordt ingezet wanneer het inzetten van de secundaire en het gewone tertiaire reservevermogen mogelijk niet voldoende is. Dit kan zich voordoen bij een uitval van een grote energie productie centrale of een uitval van een verbinden met het buitenland. [10] Noodvermogen is altijd gegarandeerd na 15 minuten inzetbaar terwijl dit niet zo hoeft te zijn bij gewone tertiaire reservevermogen.

Om ervoor te zorgen dat het secundaire en het tertiaire reservevermogen beschikbaar is en dat het vermogen dat ingezet wordt ook het prijs gunstigste is, maakt TenneT gebruik van een biedladder. Partijen met een opgesteld vermogen van 60 MW of meer zijn verplicht het vermogen aan te bieden welke ze buiten het E-Programma extra kunnen produceren of verbruiken. Andere partijen kunnen vrijwillig vermogen aanbieden [11]. TenneT is de enige afnemer van de biedingen waardoor er een single buyer market ontstaat. Door gebruik te maken van een biedladder heeft TenneT inzicht in de prijs en de hoeveelheid van het beschikbare vermogen. TenneT is verplicht vanuit de ENTSO-e om te garanderen dat er een bepaald vermogen beschikbaar is. Het verplichte beschikbare secundaire regelvermogen voor Nederland is 300MW voor zowel opregelen als afregelen. De biedingen worden een dag van tevoren aangeboden bij TenneT, waarna TenneT ze controleert. Is de bieding in orde, dan wordt de partij verplicht om een bijdrage te leveren, wanneer TenneT hierom vraagt. De biedladder heeft twee kanten. Zoals te zien in *Figuur 2-4 Biedprijsladder secundaire reservevermogen* [12]. Enerzijds de kant van het opregelen, en anderzijds de kant van het afregelen. Om mee te mogen bieden moet de installatie aan verschillende eisen voldoen.



Figuur 2-4 Biedprijsladder secundaire reservevermogen

2.7. De werking van de biedladder

De werking is als volgt. Er is een verstoring en er ontstaat onwillekeurige uitwisseling met het buitenland. In dit geval is er te weinig productie ten opzichte van de afname in Nederland. Er moet opgeregeld worden. Dit is de opregelzijde in *Figuur 2-4 Biedprijsladder secundaire reservevermogen*. Een oplossing kan zijn om eenheden meer te laten produceren of om verbruikers minder te laten afnemen. Doordat bijvoorbeeld een eenheid meer produceert dan hij officieel zou moeten doen volgens zijn E-Programma, brengt dit kosten met zich mee voor de producent. Deze kosten worden vergoed door TenneT. TenneT koopt de extra geleverde energie van de producent.

De kosten voor de geleverde MWh zijn afhankelijk van de geldende prijzen in de biedladder. Meestal zijn de biedingen per 5MW. Mocht er bijvoorbeeld 20MW ingezet moeten worden, dan krijgen alle producenten tot de 20MW bieding de opdracht om bij te regelen en worden dan gecompenseerd met het hoogste bod. In dit geval het bod van 20MW en is met geel aangegeven in *Figuur 2-4 Biedprijsladder secundaire reservevermogen*. Door de biedingen parallel in te zetten kan er sneller gereageerd worden op de verstoring. Naarmate de biedingen van de middenprijs afgaan, des te hoger wordt de prijs per MWh bij opregelen. De hoogste bieding die ingezet is in een PTE bepaald de verrekenprijs voor die PTE en heet de onbalansprijs.

Wanneer de verstoring veroorzaakt wordt door een partij die zijn E-programma niet volgt, moet de verantwoordelijke partij een bedrag aan TenneT betalen. De hoeveelheid energie die de versturende partij afwijkt, moet worden gekocht van TenneT. De hoogte van het bedrag is de dan geldende onbalansprijs met een vermeerdering van de prikkelcomponent. De prikkelcomponent is een maatregel die dient als extra

stimulans om grote verstoringen te voorkomen. Bij verstoringen die leiden tot een onwillekeurige uitwisseling met het buitenland die groter zijn dan 300MW voor langer dan 5 minuten per week [13], of de gemiddelde afwijking over 5 minuten is groter dan 20MW, zal de hoogte van de prikkelcomponent toenemen. Verder geldt er dat de hoogte van de prikkelcomponent afneemt naarmate de verstoringen, zoals hiervoor genoemd, zich niet voor doen. De afwijkingen zijn al langere tijd niet boven de gestelde eisen gekomen wat er toe geleid heeft dat de prikkelcomponent nu voor langere tijd op nul staat.

2.8. Passieve bijdrage

Het inzetten van de biedladder gebeurt automatisch door de FVR. TenneT publiceert de onbalans actueel om zo veel mogelijk markttransparantie te bieden aan de elektriciteitsmarkt. De publicatie is voor iedereen toegankelijk en geeft inzicht aan alle marktpartijen, ook de marktpartijen die niet meedoen met de biedladder, zodat deze marktpartijen ook een bijdrage kunnen leveren bij het herstellen van de balans. Dit is een passieve bijdrage voor het beperken van de onbalans. De marktpartijen die een positieve bijdrage leveren voor het beperken van de onbalans, krijgen betaald voor de extra MWh die zij leveren tegen onbalansprijs. Voor de marktpartijen welke een passieve bijdrage leveren is het belangrijk om bij het benaderen van de balans, het extra vermogen op tijd terug te regelen. Doet een marktpartij dat niet, dan wordt de bijdrage nadelig voor de balans en dit kan desbetreffende marktpartij geld kosten. Een marktpartij welke een passieve bijdrage levert zal dit pas doen bij een grote onbalans en een voor hun gunstige onbalansprijs om de risico's te beperken. Door de passieve bijdrage van marktpartijen is er meer vermogen beschikbaar voor het verhelpen van de onbalans dan de 300MW welke TenneT gegarandeerd beschikbaar moet hebben.

Een marktpartij welke opgenomen is in de biedladder krijgt altijd een gunstige vergoeding voor zijn bijdrage wanneer TenneT om de bijdrage gevraagd heeft. Ook als de gevraagde bijdrage plotseling nadelig is voor de balans. Een marktpartij in de biedladder is wel verplicht om de bijdrage te leveren die door TenneT gevraagd wordt. Doet de partij dat niet dan volgt er een boete.

Wanneer voorzien wordt dat er voor een langere tijd een afwijking ontstaat in de balans, kan de balanshandhaving tertiaire reservevermogen inzetten. Het aanbieden van het tertiaire reservevermogen door marktpartijen gebeurt op dezelfde manier als secundaire reservevermogen, maar dan bestaan de biedingen uit blokken energie. Er wordt voor een bepaalde tijdseenheid (meestal langer dan één PTE) een bepaalde hoeveelheid vermogen aangeboden. Bij afroep van een bieding moet er een hoeveelheid energie gevraagd. De afroep van het tertiaire reservevermogen gebeurt fysiek door TenneT. Het tertiaire reservevermogen wordt vooral gebruikt om het secundaire reservevermogen weer vrij te maken.

Wanneer de inzet van het secundaire en het tertiaire reservevermogen niet voldoende is, kan er gebruikt gemaakt worden van noodvermogen. Noodvermogen is extra vermogen wat altijd en expliciet beschikbaar is voor TenneT. De leveranciers van noodvermogen worden gekozen via een aanbesteding en worden daarna verplicht om te leveren als dit gevraagd wordt. Wanneer noodvermogen gewenst is activeert TenneT het noodvermogen. Bij het inzetten van noodvermogen wordt de onbalansprijs het bedrag van de hoogst ingezette bieding plus 10%.

Uit ervaring blijkt dat een melding van een mogelijke inzet van noodvermogen, als resultaat heeft dat markt partijen extra gaan. Door de aankondiging geeft TenneT aan dat er voor de komende tijd nog een bepaalde onbalans zal blijven bestaan. De marktpartijen welke een passieve bijdrage leveren lopen dan minder risico bij levering en de onbalansprijs is erg gunstig.

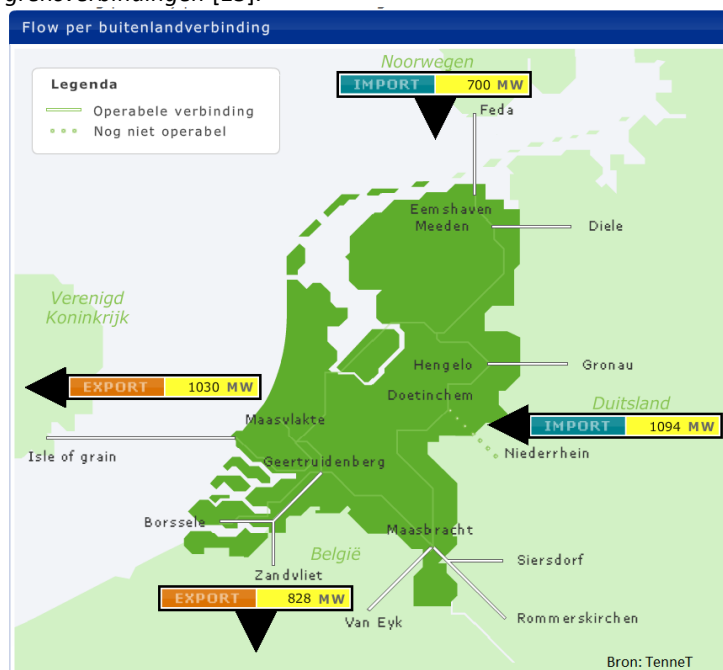
Om inzichtelijk te maken welke partijen wat geleverd hebben worden alle aansluitingen gemeten door aangewezen meetbedrijven. Een partij is zelf verantwoordelijk om via een PV de meetwaardes aan te leveren bij TenneT, waarna TenneT deze verrekenen met het E-programma. De afwijkingen worden in kaart gebracht en de rekening wordt verstuurd naar de PV.

De onbalansprijsystematiek zorgt ervoor dat onbalans veroorzaken nadelig is en het herstellen van de balans beloond wordt. Op deze manier worden goede prognose en kloppende E-programma's afgedwongen, want als vraag en aanbod goed op elkaar afgestemd zijn is er minimaal onbalans. Nog niet alles is perfect regelbaar en voor sommige invloeden is het moeilijk om een prognose op te stellen. Voor TenneT de taak om juist op die situaties goed in te spelen.

3. Zonne-energie en de balanshandhaving

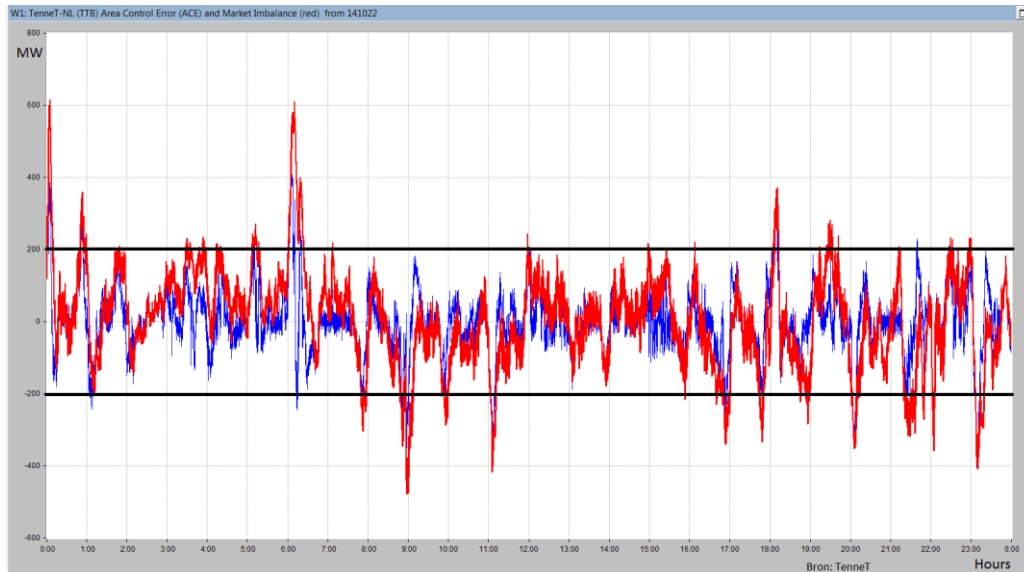
De zon is een erg krachtige energiebron. Per uur ontvangt de aarde genoeg energie van de zon om de jaarlijkse energiebehoefte van de wereldbevolking te voorzien. De energie die Nederland per jaar ontvangt van de zon is zestig maal groter dan het totale jaarlijkse energieverbruik van Nederland [14]. Men al tijden bezig om de energie welke afkomstig is van de zon om te zetten naar elektriciteit. Doordat zonnepanelen een steeds beter rendement krijgen, worden deze steeds vaker toegepast.

Voor de balanshandhaving van de nationale elektriciteitsvoorziening wordt door TenneT alleen naar de grensovergangen gekeken. Met een goede balans wordt er geprobeerd om onwillekeurige uitwisseling met het buitenland te voorkomen en de frequentie stabiel te houden. Voor de balanshandhaving wordt Nederland gezien als één groot geheel ten opzichte van het buitenland zoals te zien in *Figuur 3-1 Overzicht grensverbindingen* [15].



Figuur 3-1 Overzicht grensverbindingen

Wanneer alle PV's de E-programma's goed geprognostiseerd hebben, komt de opgewekte energie overeen met de afgenomen energie. Wanneer de prognoses niet overeen komen met de daadwerkelijke energie uitwisseling, wordt dit opgemerkt als onbalans. Er is immers een verschil tussen vraag en aanbod dan werd verwacht. De grootte van de onbalans is afhankelijk van de verstoring en de snelheid waarmee er op de verstoring gereageerd wordt. Voor het grootste deel zit de onbalans tussen plus en min 200 MW zoals te zien in *Figuur 3-2 Weergave van de marktonbalans (rood) op een willekeurige dag*. In rood is de marktonbalans weergegeven en in blauw de onbalans na de maatregelen van TenneT. Door de werking van de onbalansprijsystematiek zal er door de partijen geprobeerd worden om zo min mogelijk van de prognose af te wijken om zo geen verstoringen te veroorzaken.



Figuur 3-2 Weergave van de marktonbalans (rood) op een willekeurige dag

Door de grote schommelingen in de onbalans vallen kleine verstoringen voor TenneT niet op. Kleine installaties zullen dan ook niet snel een grote bijdrage hebben bij de een onbalans in de Nederlandse elektriciteitsvoorziening. De eerste van installaties met zonnepanelen waren vooral op woningen van particulieren. Het rendement van zonnepanelen en het oppervlakte van het gunstig gelegen dak beperkt het geïnstalleerde vermogen. Het gemiddelde geïnstalleerde vermogen ligt nu rond de 4kWp [16] [17] per woning. De waarde is een benadering die berekend is aan de hand van het gemiddelde beschikbare oppervlakte per huis in Nederland en de gemiddelde opbrengst per vierkante meter over een jaar. Het onverwacht in of uitschakelen van 4kW heeft geen directe invloed op de balanshandhaving.

De laatste jaren is het aantal geïnstalleerde zonnepanelen sterk toegenomen door de stimulatie van de overheid. Dit komt door verschillende subsidies en de mogelijkheid om de energie welke opgewekt wordt door zonnepanelen te salderen. Salderen houdt in dat de energie welke terug geleverd wordt aan het net (een afnemer wordt een producent) in vermindering wordt gebracht op de energierekening van de aansluiting. Een normale producent van elektriciteit krijgt per geleverde kWh ongeveer 7 cent. Een partij welke terug levert (dus produceert) en mag salderen krijgt per kWh ongeveer 23 cent. Per terug geleverde kWh staat dezelfde prijs tegenover als wat een kWh kost om het af te nemen. In de prijs voor de geleverde kWh zit dus ook de toevoegingen zoals aansluitkosten, transportkosten etc. Dit komt niet overeen met de normale vergoeding op de energiemarkt waar een geleverde kWh alleen de marktwaarde oplevert zonder enige toevoeging om de energie af te leveren bij de afnemer. Het salderen is valse concurrentie voor de huidige energiemarkt.

Verschuillende studies zijn bezig met het in kaart brengen van de hoeveelheid geïnstalleerd vermogen wat er in Nederland. Er wordt uit gegaan dat er nu 1000MWp [17] aan geïnstalleerd vermogen ligt in Nederland wat elektriciteit kan leveren. Dit is bijna een verdubbeling ten opzichte van 2012. De verwachting is dat er in 2020 een totaal van 4000MWp [18] geïnstalleerd zal zijn. Wanneer deze hoeveelheid vermogen onverwacht bijkomt of wegvalt, heeft deze wél invloed op de balanshandhaving.

Het totaal geïnstalleerd vermogen is verspreid over Nederland als verschillende kleine installaties zoals te zien op *Figuur 3-3 Locaties van PV-installaties* [19]. Alle installaties hebben afzonderlijk niet veel invloed op de balanshandhaving, maar de installaties wekken alleen elektriciteit op als er licht op valt. Direct zonlicht bestrijkt grote delen van Nederland tegelijk waardoor alle kleine installaties ongeveer tegelijk elektrische energie opwekken. Verdwijnt het zonlicht zoals bij een zonsverduistering, dan stopt ook het opwekken van elektriciteit uit zonnepanelen.



Figuur 3-3 Locaties van PV-installaties

De opgewekte energie uit zonnepanelen is nu nog alleen afhankelijk van de zon en is slecht tot niet regelbaar. Wanneer de opgewekte energie goed voorspeld wordt kan er goed op gereageerd worden. Voor een goede prognose van de opgewekte energie uit zonnepanelen is echter een goede voorspelling van de zon intensiteit nodig. Het weer voorspellen is lastig en niet altijd correct. Zo is de opwek bij bewolkt weer, dus zonder direct zonlicht, nu nog ongeveer 10% [20] van de maximale opwek. Bij directe inval van zonlicht met de juiste hoek kan een paneel de maximale elektriciteit opwekken. De opwek is daarom sterk afhankelijk van de zon. Schuift er een wolk tussen de zon en een zonnepaneel dan neemt de opwekking sterk af. Verdwijnt de wolk dan neemt de opwekking juist sterk toe. Wanneer er geen energie opgewekt wordt door zonnepanelen, maar het wel verwacht was, moet de energie wel gecompenseerd worden. In de huidige situatie wordt dit opgevangen door elektriciteitscentrales die nu aangesloten zijn op het net. Er moet dus altijd een alternatief nodig zijn naast zonnepanelen.

Daarnaast is de verandering in de opgewekte energie uit zonnepanelen sneller dan het huidige systeem kan bijregelen. Installaties om elektriciteit op te wekken met zonnepanelen hebben geen inertie zoals grote generatoren. De fluctuatie van de zonstraling wordt direct vertaald in een fluctuatie in de opgewekte energie. De opwekking uit zonnepanelen kan daardoor sneller veranderen dan de opwekking uit generatoren. Met minder inertie in de opwek is er kans op grotere afwijkingen in de frequentie.

De groei van de hoeveelheid geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen is geen ontwikkeling vanuit de energiemarkt. De aanschafkosten worden nu terugverdiend met subsidies van de overheid. Wanneer de subsidies er niet zouden zijn, weegt de opbrengst in kWh niet op tegen de kosten van aanschaf en de energie die de installatie kan leveren gedurende zijn levensduur.

Onbalans wordt nu opgelost door eenheden die energie beschikbaar stellen op de onbalansmarkt. Dit is energie die een programmaverantwoordelijke (PV) zeker beschikbaar heeft naast het geplande E-Programma. De door zonnepanelen opgewekte energie hoeft niet meer ingekocht te worden van andere partijen en heeft als gevolg dat er minder energie overblijft om te verhandelen voor andere leveranciers. De andere leveranciers kunnen dan niet genoeg energie verkopen om geld te verdienen. Wanneer er geen geld verdiend kan worden met leveren van energie door een eenheid, wordt de eenheid uit bedrijf genomen. Dit kan ook een eenheid zijn die helpt bij onbalans waardoor er een tekort ontstaat aan beschikbaar vermogen voor de onbalans. Een tekort betekent te weinig middelen om onbalans weg te kunnen regelen door de balanshandhaving.

Daarnaast is de energiemarkt gebaseerd op zekerheid. Wordt er voldaan aan de afgesproken levering of vraag, dan volgt er geen boete. Hierdoor is er een aanbod ontstaan dat goed regelbaar is. De huidige installaties met zonnepanelen zijn niet op een voldoende manier regelbaar uitgevoerd om te helpen om vraag en aanbod bij elkaar te brengen bij een verstoring. De installaties met zonnepanelen zijn niet regelbaar uitgevoerd, omdat hier geen vraag naar is. Het toevoegen van extra elektronica en het beperken van de opwek uit zonnepanelen levert nog geen geld op.

4. Invloed van zonne-energie op de balanshandhaving

Met de volgende scenario's wordt geprobeerd om een inzicht te krijgen welke problemen zich voor kunnen doen door de invloed van zonne-energie op de nationale balanshandhaving. Met de uitwerking van de verschillende scenario's wordt antwoord gegeven op de onderzoeksvragen, dan wel aan te geven wat er nog nodig is om de vragen te beantwoorden.

4.1. Sterke fluctuatie in de zonne-energie

De intensiteit van de zon beïnvloedt de opgewekte energie uit zonnepanelen. Wanneer een wolk de straling van de zon op het paneel blokkeert, wordt het geleverde vermogen door het paneel minder. Het geleverde vermogen kan terug zakken naar 10% van de mogelijke maximale levering [20]. Met een installatie van 4kWp kan het vermogen zakken naar 0,4kW. Wanneer er wolkenvelden over Nederland trekken, zoals te zien in *Figuur 4-1 Wolkenvelden* [21], wordt lokaal de zonnestraling tijdelijk geblokkeerd.



Figuur 4-1 Wolkenvelden

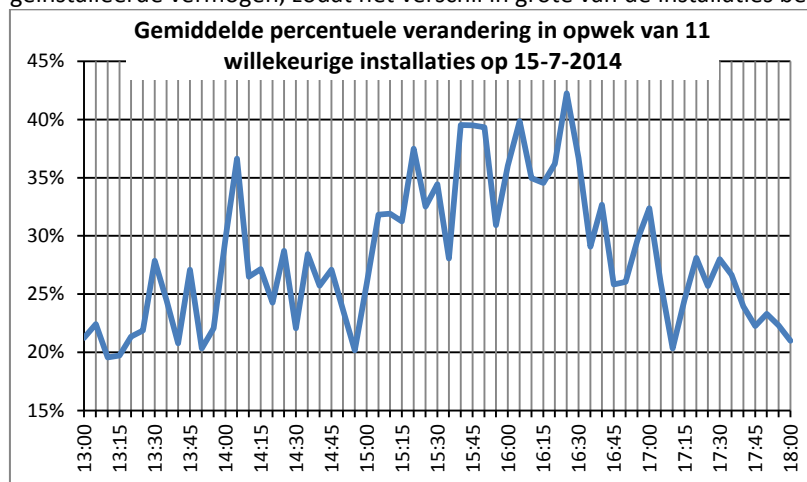
De elektrische energie uit zonnepanelen is afhankelijk van de energie van de zon wat het zonnepaneel bereikt. De hoeveelheid energie van de zon wat het paneel bereikt is afhankelijk van het weer. Wanneer een energievoorziening direct afhankelijk is van het weer, is het van belang om het weer goed te voorspellen. Men tracht al tijden om het weer goed te voorspellen, maar kan alleen een verwachting uitspreken. Als het verloop van de opgewekte en van de verbruikte elektrische energie goed voorspeld wordt, en de voorspelling juist in de prognose wordt meegenomen, is er altijd een goede balans tussen vraag en aanbod. Voor Nederland is er altijd vanuit gegaan dat een kleinverbruik aansluiting alleen energie afneemt. De prognose van de afname wordt gebaseerd op jaarstanden en historische gegevens van kleinverbruikers. In de prognose wordt nog niet meegenomen dat een kleinverbruiker terug levert. Een leverancier registreert nu alleen nog maar dat de afname van energie minder is door een kleingebruiker met zonnepanelen. Indien de energie uit zonnepanelen uiteindelijk wel meegenomen wordt in de prognose van de kleinverbruiker, dan blijft er altijd nog bepaalde onzekerheden in de prognose doordat deze vorm van energievoorziening direct afhankelijk is van het weer.

Het verwachten van wolkenvelden over Nederland is goed voorspelbaar. Het is alleen lastig om het verschil te bepalen in de tijd tussen wel of geen zon op een bepaalde locatie. De verwachting is dan dat de momentane opwek per installatie met zonnepanelen sterk zal fluctueren. De installaties liggen verspreid over Nederland, waardoor ze allemaal op verschillende tijden zullen pieken en dalen. Met een bewolking die hetzelfde verdeeld blijft boven Nederland zal er een gemiddelde ontstaan in de opgewekte zonne-energie. Alle panelen ontvangen evenveel straling van direct zonlicht alleen op ander tijdstip. Bij weer met een gedeeltelijk bewolking komt het bijna nooit voor dat het wolkendek boven land hetzelfde blijft. Door verschillende invloeden zal het wolkendek veranderen. Daardoor ontstaat een verschuiving van de open plekken in de bewolking. Het gevolg hiervan is dat er op een bepaald moment op veel plekken direct zonlicht de zonnepanelen bereikt. Echter de verdeling kan na een paar minuten totaal anders zijn. Hierdoor fluctueert per installatie, met zonnepanelen, het opgewekte vermogen. Door de verandering van de bewolking kan het voorkomen dat het opgewekte vermogen uit zonnepanelen juist de fluctuatie in de opwek van alle installaties samen versterkt.

De snelheid waarmee de opgewekte energie fluctueert, is bijna evenredig met de snelheid van de fluctuatie van de energie uit de zon dat het zonnepaneel bereikt. Een wolk schuift geleidelijk voor de zon. De rand van de wolk laat meer zonlicht door dan het midden van de wolk, maar als een schaduwlijn over een installatie verschuift dan gaat dit al meestal sneller dan één meter per seconde. Bij een installatie met zonnepanelen van een paar meter breed zitten dus enkele seconden tussen minimale en maximale opwek.

4.1.1. Gevolgen van sterke fluctuatie

In *Grafiek 4-1 Gemiddelde verandering* is een verloop weergegeven van elf willekeurige installaties in Nederland³ op 15-7-2014. De meetgegevens zijn opgenomen in de bijlage. De correctheid van de gegevens is niet gecontroleerd en de meetwaarden zijn per vijf minuten waardoor er nog geen sluitende conclusies getrokken kunnen worden, maar dienen als ondersteuning. Met deze gegevens worden verschillende pieken onderscheiden. De meetresultaten zijn ingevoerd als percentages ten opzichte van het geïnstalleerde vermogen, zodat het verschil in grote van de installaties beperkt wordt.



Grafiek 4-1 Gemiddelde verandering

³ De gegevens zijn afkomstig van de site PVoutput.nl en zijn vrij toegankelijk. [26]

Tussen 13:55 en 14:05 is een stijging te zien van bijna 15% met daarop een daling van 10% in de volgende vijf minuten. Beredeneerd met deze gegevens, ontstaat in dit voorbeeld een onverwachte verandering van de opwek met 10% in vijf minuten. In de huidige situatie met een opgesteld vermogen van ongeveer 1000MWp kan dit een verandering zijn van 100MW in vijf minuten. Aangenomen dat alle installaties perfect zijn geïnstalleerd en het volledige opgestelde vermogen ook maximaal elektriciteit levert. Met het vooruitzicht dat het opgestelde vermogen aan zonnepanelen in 2020 naar 4000MWp gaat, wordt de mogelijke verandering 400MW in vijf minuten.

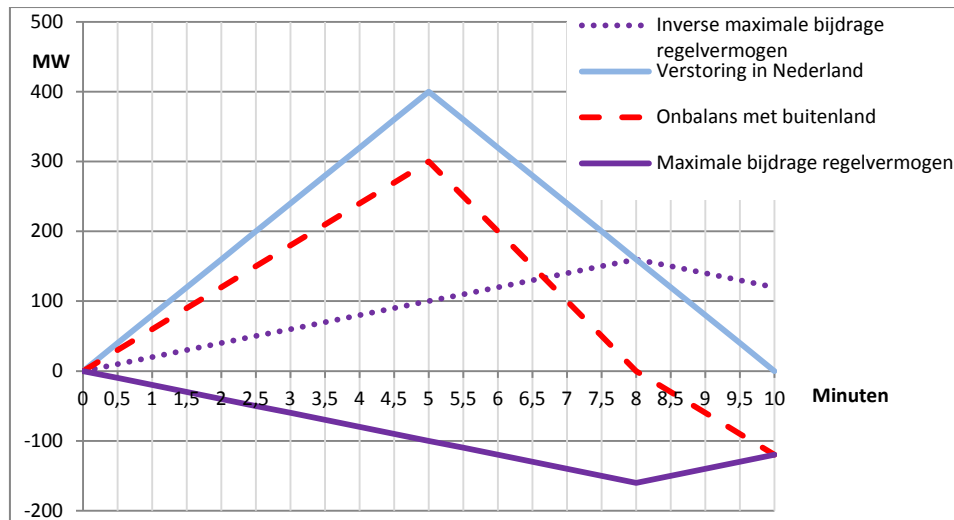
4.2. Inzet regelvermogen

Veroorzaakt de verstoring een frequentieafwijking dan wordt dit direct opgevangen door het primaire reservevermogen. Het primaire reservevermogen zorgt ervoor dat de frequentie zo min mogelijk verandert. Het totale primaire reservevermogen in het synchrone gebied wat gegarandeerd altijd beschikbaar is, heeft een grote van 3000MW en is ruim voldoende om de verandering van 400MW op te vangen. De frequentie zal bijna niet afwijken, maar door de primaire reactie ontstaat en de bijdrage van alle eenheden in het synchrone gebied ontstaat er een afwijking in de energie uitwisseling met het buitenland ten opzichte van het geldende E-Programma.

De afwijking wordt weggeregeld met de Frequentie Vermogen Regeling (FVR) (*2.5. Onwillekeurige uitwisseling met het buitenland*). Met de FVR wordt een reactie gevraagd van het secundaire reservevermogen. TenneT is nu verplicht vanuit de ENTSO-e om circa 300MW als secundaire reservevermogen aan te houden. De verplichting voor het secundaire reservevermogen is dat het minstens regelbaar is met 7% per minuut om in 15 minuten 100% ingezet te kunnen zijn. Deze waarde is zo bepaald om zo efficiënt mogelijk te reageren op verstoringen. Wanneer het secundaire reservevermogen alleen ingezet wordt, geeft dit een maximaal inzet van 300MW na 15 minuten.

Als de verstoring geïsoleerd wordt tot een piek ten opzichte van de balans en de daadwerkelijke regelsnelheid van het secundaire reservevermogen er tegen over zetten, ontstaat er een grafiek zoals is weergegeven in *Grafiek 4-2 Uitwerking secundaire reservevermogen bij een verstoring*. In werkelijkheid zullen meer verstoringen de grafiek beïnvloeden en de reactietijd is buiten beschouwing gelaten. De grafiek toont de maximale bijdrage van het secundaire reservevermogen als reactie op de steeds groter wordende verstoring. Er blijft nog een bepaalde fout over, dit is de onbalans met buitenland. Door de bijdrage van het secundaire reservevermogen wordt de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland beperkt. Er blijft nog wel een hoeveelheid energie over welke zorgt voor onwillekeurige uitwisseling met het buitenland. De FVR reageert op het verschil tussen de E-Programma's en de gemeten uitwisseling. Wordt het verschil kleiner dan zal de gevraagde reactie vanuit de FVR ook afnemen. Deze reactie is niet meegenomen om te zorgen voor eenvoud in de weergave.

Wanneer de inzet van het secundaire reservevermogen als inverse wordt weergegeven, wordt het kantelpunt van de gevraagde inzet zichtbaar. Kort daarna is de verstoring afgenomen naar nul, maar het secundaire reservevermogen levert nog wel waardoor er een onbalans in tegenovergestelde richting wordt gecreëerd. De onbalans wordt negatief en zorgt er in dit geval voor dat de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland voor die PTE nog meer beperkt wordt.



Grafiek 4-2 Uitwerking secundaire reservevermogen bij een verstoring

Het secundaire reservevermogen is niet het enige wat ingezet kan worden om een verschil te compenseren. Wanneer er ruimte is met de IGCC (2.5. *Onwillekeurige uitwisseling met het buitenland*) kan een deel van het verschil direct verrekend worden met het buitenland. De voorwaarden voor de uitwisseling in dit geval is dat het buitenland een tekort aan opwek heeft. Dit geeft geen garantie dat het altijd ingezet kan worden en wordt niet verder meegenomen in de uitwerking.

De verstoring neemt binnen het PTE af waardoor er geen noodzaak is voor het inzetten van het tertiaire reservevermogen en het noodvermogen. De marktpartijen welke niet in de biedladder zijn opgenomen leveren ook een bijdrage. Hierdoor zal de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland verder beperkt worden. In dit geval zal de passieve bijdrage beperkt zijn, omdat er een kans bestaat dat de onbalans plots zal afnemen.

In de huidige balanshandhaving ontstaat fluctuatie in het aanbod van elektrische energie door de opgewekte energie uit zonnepanelen. Hoe groot en wanneer de fluctuaties ontstaan is lastig te bepalen. Op het moment van het voorbeeld van 15-7-2014 was het totale beschikbare productievermogen om 14:00 ongeveer 14,57GW [22] waarvan 0,9GW aan zonnepanelen [17]. Een verstoring zoals beschreven met *Grafiek 4-2 Uitwerking secundaire reservevermogen bij een verstoring* komt nu ook voor in de balans. De FVR geeft hier het gewenste resultaat op. Samen met de passieve bijdrage van aangeslotene wordt met de verstoring de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland voldoende beperkt. Met de groei van de hoeveelheid geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen zal ook het aandeel van regelbaar

productievermogen afnemen. Door de afname van het regelbare productievermogen kan er lastiger op verstoringen gereageerd worden door de beperkte passieve bijdrage van aangeslotene.

Met de beredenering is er nu vanuit gegaan van een enkele verstoring. In werkelijkheid zijn er constant verstoringen in de balans. Er kan bijvoorbeeld een productie eenheid uitvallen of een grote belasting in of uitgeschakeld worden. Voor de balanshandhaving van belang om te bepalen welke verstoringen voor kunnen komen om zo te bepalen of het beschikbaar regelvermogen voldoende is.

Om te bepalen of in de toekomst de gewenste efficiëntie gehaald wordt met de inzet van de FVR, zal er een betere analyse gedaan moeten worden naar het gedrag van het geleverde vermogen van zonnepanelen. Wanneer het gedrag bekend is kan gekeken worden of de werking van de FVR met de invloed van zonne-energie nog de juiste uitwerking heeft.

4.2.1. Conclusie fluctuaties

Hoe de totale fluctuatie in onbalans eruit gaat zien is moeilijk te bepalen. De opgewekte energie uit zonnepanelen is een onderdeel van de totale landelijk opgewekte energie. Verschillende onderdelen in de nationale elektriciteitsvoorziening zorgen voor fluctuatie in de balans. De verschillende fluctuaties hebben verschillende invloeden op elkaar. Met de balanshandhaving wordt er naar Nederland gekeken als een geheel. Alleen de grensovergangen worden in de gaten gehouden voor de balanshandhaving. De pieken in het opgewekte vermogen uit zonnepanelen wordt nu nog niet opgemerkt in de onbalans. Met het vooruitzicht van 4000MWp geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen wordt de verstoring wel opgemerkt.

Om een goed beeld te krijgen wat de fluctuaties van zonne-energie doen op de balanshandhaving van TenneT is het van belang om inzicht te krijgen hoe de opwek van zonnepanelen verloopt. Wanneer er een duidelijk beeld is van de opwek van de energie uit zonnepanelen kan er beter bepaald worden welke snelle veranderingen in de balans veroorzaakt worden door zonne-energie. Door inzichtelijk te maken welke onbalans zich voor kan doen, kan er bijvoorbeeld een simulatie uitgevoerd worden met de FVR. Hiermee kan worden bepaald of het huidige regelgedrag van de FVR ook de gewenste uitwerking heeft bij een groter aandeel van geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen. Wanneer het inzichtelijk is welke onbalans zich voordoet en hoe de FVR hierop reageert, kan bepaald worden of de huidige passieve bijdrage van aangeslotene zich ook op de gewenste manier ontwikkeld om de onbalans te kunnen opvangen in de toekomst.

4.3. Verkeerde prognose zonne-energie

In dit hoofdstuk wordt beschreven welke invloeden de opgewekte elektriciteit uit zonnepanelen heeft wanneer de prognose structureel afwijkt van de daadwerkelijke bijdrage van de levering van energie door zonnepanelen. In Nederland is het aandeel van de door zonnepanelen opgewekte energie nog niet direct te vertalen in de afwijkingen van de balans tussen vraag en aanbod van energie. In het buitenland is de invloed van de energie uit zonnepanelen groter waardoor er duidelijk verschil ontstaat tussen prognose en opwek bij bepaalde omstandigheden.

4.3.1. Problemen prognose zonne-energie

Het weer is van grote invloed op de opgewekte energie uit zonnepanelen. Wanneer de invloed goed voorspeld wordt kan er een juiste prognose opgesteld worden. Veel installaties met zonnepanelen zijn geïnstalleerd bij een kleinverbruiker. De leverancier van de kleinverbruiker geeft aan zijn PV door hoeveel energie de leverancier voor zijn klanten nodig heeft. De leverancier bepaald de verwachte hoeveelheid energie aan de hand van profielen welke nu nog geen rekening houden dat een kleinverbruiker terug levert. De PV van de leverancier probeert om zo min mogelijk de balans te verstoren. De PV probeert zoveel mogelijk zijn programma te laten aansluiten bij de daadwerkelijke elektrische energie uitwisselingen van de marktpartijen waar hij PV van is. Een PV kan tot een uur vooraf de operationele PTE zijn programma aanpassen. Met kleinverbruikers in het programma is het lastig te bepalen wat er per PTE door een klein verbruiker aan energie verbruikt wordt. Dit komt door de beperking in het aantal metingen van het gedrag van de kleinverbruiker. Het wordt nu nog moeilijker doordat het verbruik niet alleen afhankelijk het gedrag van de kleinverbruiker maar ook afhankelijk wordt van de intensiteit van de zon.

Met de huidige vorm van bemetering en verrekening met kleinverbruikers zal de onbalans, welke veroorzaakt wordt door verschillende weersverschijnselen, minimaal meegenomen worden in de prognose. Een PV probeert zo goed mogelijk de onbalans te beperken door op het laatste moment nog de energie te verhandelen. Kleinverbruikers worden door de elektriciteit wet beschermd, waardoor betere bemetering en verrekening wordt belemmerd. PV's en leveranciers zijn er mee bezig om een manier te vinden om een beter en actuelere prognose van zonne-energie op te stellen.

4.3.2. Mogelijke afwijkingen in de prognose van zonne-energie

Wanneer zonne-energie wel in de prognose wordt meegenomen, wordt de prognose bemoeilijkt door bepaalde weersomstandigheden. Bepaalde weersomstandigheden of natuurverschijnselen hebben veel invloed in de hoeveelheid energie die door zonnepanelen worden opgewekt. Het kan voorkomen dat de weersvoorspelling niet overeenkomt met het weer van die dag. Zo zijn er ook andere weersomstandigheden of natuurverschijnselen die invloed hebben op de opgewekte energie uit zonnepanelen zoals:

- Woestijnstof in de atmosfeer,
- Het laat optrekken van mist,
- Sneeuwval of juist het smelten van sneeuw,
- Zonsverduistering.

Dit zijn bijzondere omstandigheden waarvan de uitwerking op de opgewekte energie uit zonnepanelen sterk kan afwijken van de geprognosticeerde opgewekte energie. De zonnestraling wordt geblokkeerd. De tijdstippen waarop de zonnestraling wordt geblokkeerd is niet voor elk verschijnsel precies te voorspellen. In Spanje is het voorgekomen dat door woestijnstof in de atmosfeer de daadwerkelijke opwekking van elektriciteit uit zonnepanelen gedurende de hele dag met 15% afweek ten opzichte van de prognose van die dag [23]. Woestijnstof in de atmosfeer kan ook boven Nederland voorkomen zoals te zien in **Fout! erwijzingsbron niet gevonden.** [24].



Figuur 4-2 Woestijnstof in de atmosfeer

In Nederland is het aandeel opgewekte energie uit zonnepanelen nog niet zo groot ten opzichte van het totale beschikbaar vermogen van Nederland. Hierdoor is de impact van energie uit zonnepanelen nog niet direct merkbaar. Wanneer het geïnstalleerde vermogen aan zonnepanelen groter wordt, wordt de impact van verschillende weersomstandigheden ook groter ten opzichte van de totale opwekking van energie in Nederland.

4.3.3. Conclusie verkeerde prognose

Voor de balanshandhaving is het van belang om te weten hoe groot de mogelijke afwijking van de gezamenlijke prognoses kan zijn. En wanneer er een afwijking is, hoe deze het beste opgelost kan worden, door het inzetten van middelen zoals het secundaire en het tertiaire reservevermogen.

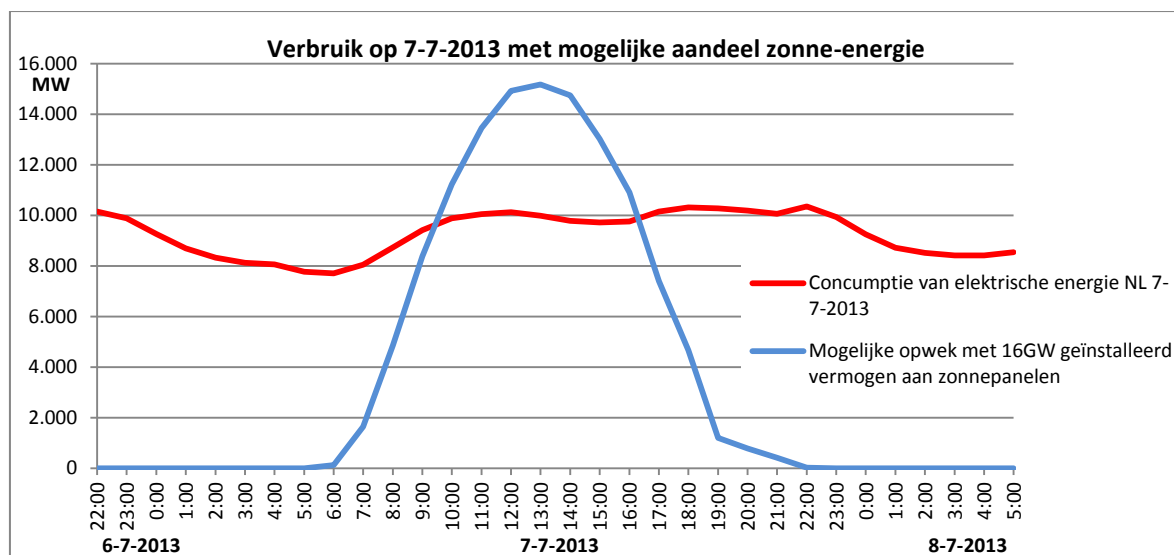
Momenteel is het aandeel opgewekte energie door zonnepanelen beperkt, waardoor het ook maar een kleine onbalans kan veroorzaken.

De gevolgen zijn nog niet direct zichtbaar voor de balanshandhaving. Bepaalde weersomstandigheden en andere natuurverschijnselen gaan meer invloed hebben op de onbalans doordat zonne-energie nu nog niet of nauwelijks in de prognose wordt meegenomen.

4.4. Overschot aan opgewekte energie

Hoe de markt voor de vraag en aanbod van energie ontwikkelt de komende tijd is niet zeker. Wel is zeker dat er een meer vermogen aan zonnepanelen wordt geïnstalleerd. De groei van de hoeveelheid geïnstalleerd zonnepanelen wordt nu gedreven door subsidies van de overheid en niet gedreven door de vraag en aanbod van de energiemarkt. Door subsidies van de overheid wordt geprobeerd om de markt voor zonnepanelen toegankelijker te maken. Hierdoor zakken de kosten voor het aanschaffen van een installatie met zonnepanelen. De subsidies zijn voor een bepaalde tijd en zullen een keer stoppen. Hoe de markt voor het aanschaffen van zonnepanelen daarna verder zal ontwikkelen is niet zeker. Doordat de groei van de hoeveelheid geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen niet gestimuleerd wordt vanuit de energie markt, volgt het aanbod niet de vraag naar elektrische energie. Er wordt meer aanbod gecreëerd dan dat er vraag is naar elektrische energie. Op een zeker moment kan het zijn dat er een overschot ontstaat aan elektrische energie.

Wanneer aangenomen wordt dat het geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen zal blijven toenemen, zal er een moment komen dat de opgewekte energie de vraag naar energie overstijgt. De oorzaak daarvan komt doordat zonne-energie nu niet voldoende regelbaar is uitgevoerd. Behalve door de omvormer met de hand uit te zetten is er voor het grootste deel van het geïnstalleerde vermogen aan zonnepanelen geen manier om het opgewekte vermogen te regelen. Bij een mogelijke geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen van bijvoorbeeld 16GW, vier keer zoveel als verwacht in 2020 [18], kan er een beeld ontstaan zoals in *Grafiek 4-3 Hypothetisch vooruitzicht*. [25] [26]



Grafiek 4-3 Hypothetisch vooruitzicht

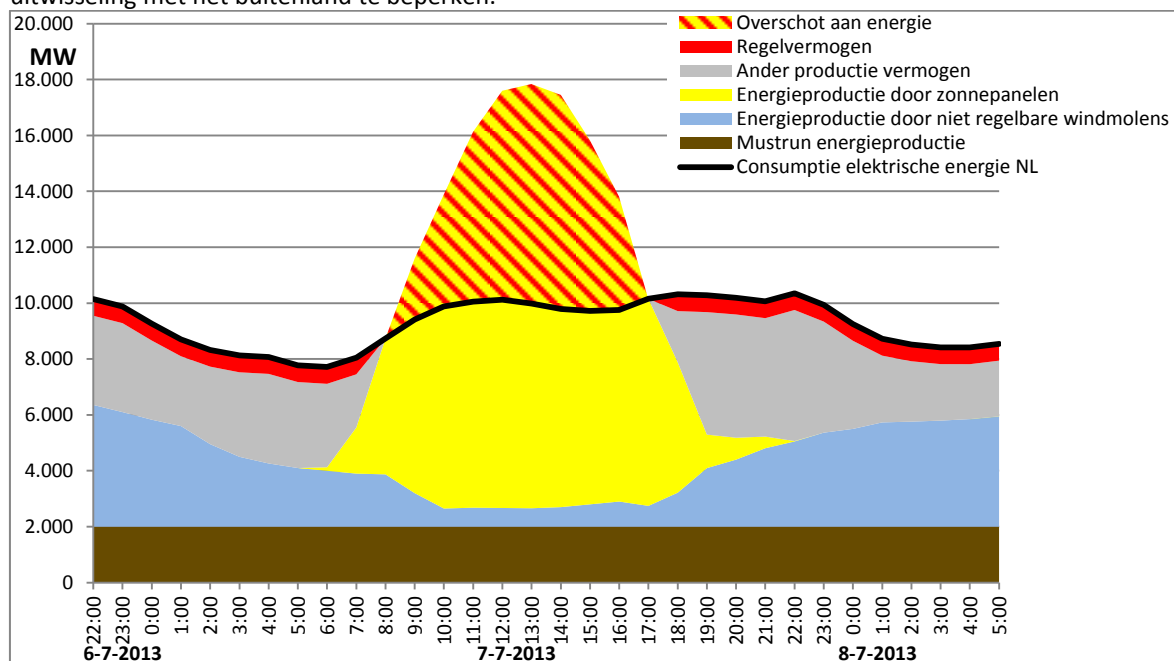
In werkelijkheid zal het probleem al ontstaan bij minder geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen. Het producerend vermogen van elektrische energie bestaat dan uit niet regelbaar geïnstalleerd vermogen aan windmolens en must-run eenheden. Must-run eenheden zijn productie-eenheden die om economische of technische redenen moeten blijven produceren.

Wanneer het geleverde vermogen niet goed geprognostiseerd is, ontstaat er onwillekeurige uitwisseling met het buitenland. Er wordt meer energie in Nederland geproduceerd dan dat er in Nederland wordt geconsumeerd of aan het buitenland is verkocht. Mocht het overschot een frequentieafwijking veroorzaken dan kan Nederland geen bijdrage meer leveren, omdat het primaire reservevermogen niet toerijkbaar is. Ondanks dat Nederland geen primaire reactie kan leveren heeft dit geen gevolgen voor de frequentie. Het Nederlandse deel van het primaire reservevermogen is minimaal ten opzichte van het totale primaire reserve vermogen in het synchrone gebied.

Als eerste wordt geprobeerd om de onwillekeurige uitwisseling te administratief te vereffenen met de IGCC (2.2. *Balanshandhaving tijdens de operationele dag*). De voorwaarde is dat andere landen een tekort moeten hebben en kan dus niet beschouwd worden als een middel wat altijd beschikbaar is en wordt verder buiten beschouwing gelaten.

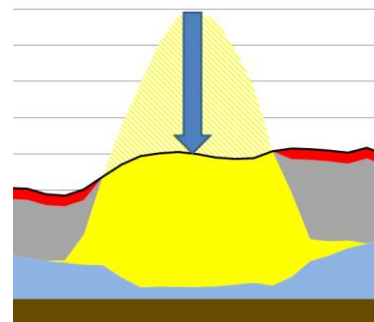
De volgende stap is dat er afgeregeld worden om de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland te beperken. Afregelen wordt op twee manieren geïmplementeerd: een eenheid kan minder vermogen gaan leveren of er kan meer belasting ingeschakeld worden.

Als eerste invulling kan een eenheid alleen minder vermogen gaan leveren wanneer een eenheid al een bepaalde hoeveelheid levert. Het huidige geïnstalleerde vermogen aan zonnepanelen is niet voldoende regelbaar uitgevoerd. Wanneer het aandeel niet regelbare productie te groot wordt, zoals weergegeven in *Grafiek 4-4 Hypothetische productie*, ontstaat er een situatie waarin er geen regelbare productie-eenheden nog elektrische energie leveren. De waarden in de grafiek zijn willekeurig gekozen om een beeld te vormen. Het inzetten van afregelvermogen is dan niet meer mogelijk om de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland te beperken. Er moet dus een andere manier gevonden worden om de onwillekeurige uitwisseling met het buitenland te beperken.



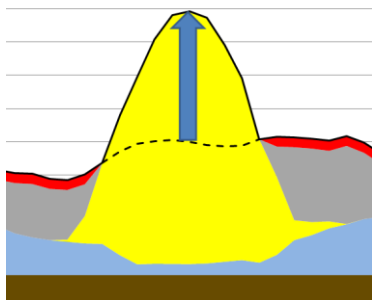
Grafiek 4-4 Hypothetische productie

Het probleem wordt voor de balanshandhaving dat het secundaire en het tertiaire reservevermogen welke nu beschikbaar zijn, niet voldoende zijn bij een groter wordend geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen. Er moet dus voor de tijd dat die situatie zich voordoet een oplossing zijn. Een oplossing is bijvoorbeeld door het producerend vermogen aan zonnepanelen regelbaar te maken. Dit is weergegeven in *Figuur 4-3 Regelen van opwek*. Wanneer de balanshandhaving invloed heeft op het regelbare vermogen aan zonnepanelen dan kan daarmee onwillekeurige uitwisseling met het buitenland beperkt worden. Er worden nu al omvormers voor zonnepanelen uitgebracht welke regelbaar zijn [27]. Een extra module in de omvormer zorgt ervoor dat het opgewekte vermogen beperkt wordt. Wanneer deze module ook extern aangestuurd kan worden is het producerend vermogen van de zonnepanelen goed regelbaar. Op deze manier kan het gebruikt worden als regelvermogen voor de balanshandhaving.



Figuur 4-3 Regelen van opwek

Als tweede invulling kan er belasting worden bijgeschakeld en is weergegeven in *Figuur 4-4 Regelen van vraag*. Dit komt er op neer dat er meer vraag gecreëerd wordt naar energie. Deze optie is nu nog beperkt, omdat er veel tijdsafhankelijke belasting in de elektriciteitsvoorziening aanwezig is. Nu wordt de onwillekeurige uitwisseling vooral beperkt door het regelen van grootschalige productie eenheden welke aangeboden worden als secundaire en tertiaire reservevermogen.



Figuur 4-4 Regelen van vraag

Een manier is om het overschot aan elektrische energie op te slaan zodat het later gebruikt kan worden. Lokaal kan dit bijvoorbeeld door het overschot aan zonne-energie op te slaan in accu's bij de installatie. Een centrale oplossing zou kunnen zijn een groot reservoir vol te pompen wanneer er een overschot aan elektrische energie is. In combinatie met het reservoir kan er een waterkracht centrale gebouwd worden om energie te leveren, wanneer er weer genoeg vraag is en het aanbod minder (dit wordt ook pump storage genoemd).

De middelen welke TenneT tot de beschikking heeft om onwillekeurige uitwisseling te beperken, worden aangeboden door aangeslotene van de nationale elektriciteitsvoorziening. Bij grote afwijkingen in de balans wordt er een grote bijdrage gevraagd. De onbalansprijs zal dan ook meer afwijken van de middenprijs. Hierdoor kan mogelijk aanbod, wat nu nog niet rendabel is om in te zetten als het secundaire en het tertiaire reservevermogen, geschikter worden.

4.4.1. Conclusie meer energie dan vraag

Bij een te groot aandeel van energie welke opgewekt wordt door zonnepanelen wordt het ingezette vermogen voor het oplossen van onbalans beïnvloed. Er komt een moment dat de eenheden welke het afregelvermogen verzorgen dit niet meer kunnen, doordat de eenheden niet meer produceren. De middelen die de balanshandhaving kan inzetten, moeten veranderen als zonne-energie niet regelbaar blijft.

Voor TenneT is het van belang om te weten wanneer het producerende vermogen niet meer regelbaar is. Zodra dit bepaald is, kan gecontroleerd worden of het aanbod regelvermogen op de juiste manier ontwikkeld, zodat Nederland voorbereid is om energie overschotten op te vangen.

5. Algemene conclusie

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat door de invloed van de in Nederland opgewekte zonne-energie er meer fluctuatie ontstaat in de balans van de nationale elektriciteitsvoorziening. De zon intensiteit fluctueert snel, waardoor ook het opgewekte vermogen uit zonnepanelen snel verandert. Door de nu nog relatief kleine hoeveelheid zonnepanelen, welk aangesloten zijn op de elektriciteitsvoorziening, zijn er geen directe gevolgen voor de balanshandhaving.

Op lange termijn zal de elektriciteit, welk opgewekt wordt door zonnepanelen, meer invloed gaan hebben op de balanshandhaving. Er ontstaan meer schommelingen in de balans door de snelheid waarmee de opgewekte elektriciteit uit de zonnepanelen fluctueert. Daarbij komt ook dat een verandering in vraag of aanbod meer invloed gaat hebben op de frequentieverandering door het minder worden van de inertie. Ook zal er op lange termijn de balans meer beïnvloed worden door het weer. Daarvoor is het van belang om de invloed van het opgewekte vermogen uit zonnepanelen bij bijzondere (weers)omstandigheden goed te begrijpen.

TenneT is niet verantwoordelijk om de juiste prognose op te stellen voor de bepaling hoeveel zonne-energie opgewekt gaat worden, maar TenneT is wel verplicht om voldoende productiecapaciteit onder contract te hebben om de security of supply te kunnen waarborgen. Wat er wordt verstaan onder voldoende productiecapaciteit is afhankelijk van de ontwikkeling van de hoeveelheid regelbaar vermogen in de vraag en aanbod van elektrische energie.

6. Aanbevelingen

Mijn aanbeveling aan TenneT is om de volgende punten uit te voeren:

- Meer duidelijkere en betrouwbare gegevens vergaren van het gedrag van de opgewekte energie uit zonnepanelen.
- Het bepalen welke extra middelen geschikt zijn voor de balanshandhaving om de onbalans te beperken.
- Het in kaart brengen wat de consequenties zijn wanneer het hele synchrone gebied een overschot heeft aan opgewekte zonne-energie.

Om toekomstige onderzoeken beter te onderbouwen zijn er betrouwbare gegevens nodig dan wat momenteel beschikbaar is. Wanneer er een goed beeld gevormd is van de veranderingen in het opgewekte vermogen uit zonnepanelen, kan hiermee een simulatie uitgevoerd worden om te kijken of de reactie van de FVR voldoet, bij een groter geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen.

Door de groei van de hoeveelheid geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen wordt de kans groter dat conventionele eenheden, welke nu het regelvermogen verzorgen, dit in de toekomst niet meer kunnen doen. Hoe het regelvermogen er dan uit gaat zien is nog onbekend. Wel is van belang om te weten hoe het regelvermogen zich ontwikkelt in relatie tot niet regelbaar vermogen, om tijdig maatregelen te treffen om de security of supply te kunnen waarborgen.

Als laatste aanbeveling is het bekijken wat de invloed is van zonne-energie op Europees niveau. Nederland loopt nu nog achter ten opzichte van België en Duitsland met het geïnstalleerde vermogen aan zonnepanelen. Wanneer dit aanhoudt in de toekomst kan er zeker gesteld worden, dat wanneer Nederland meer energie produceert door zonnepanelen dan dat er vraag is naar energie, dat er bij de buurlanden hetzelfde voordoet. Hierdoor kan er bij een Nederlands overschot aan energie niet gerekend worden dat het overschot afgenomen wordt door de buurlanden. De situatie kan zich dan voor doen dat er in het hele synchrone gebied een overschot aan opgewekte energie is.

7. Literatuurlijst

- [1] Vorrink, J., *"Introductie studenten/stagiaires"*, (Presentatie), Arnhem: TenneT TSO B.V., 2014.
- [2] Autoriteit Consument & Markt, *"Systeemcode elektriciteit"*, (document), Den Haag, gedownload op 27-8-2014, van <https://www.acm.nl/nl/onderwerpen/energie/codes-energie/overzicht-codes-energie/>.
- [3] ENTSO-e, *"Regional Groups"*, geraadpleegd op 22-11-2014, van <https://www.entsoe.eu/about-entsoe/system-operations/regional-groups/Pages/default.aspx>.
- [4] ENTSO-e, *"Continental Europe Operation Handbook"*, geraadpleegd op 26-8-2014, van <https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/operation-handbook/Pages/default.aspx>.
- [5] ENTSO-e, *"Policy 1: Load-Frequency control and performance"*, gedownload op 26-8-2014, van https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_final.pdf.
- [6] Kundur, P., *"Power system stability and controle"*, McGraw-Hill Inc., 1993.
- [7] Ummels, B.C., *"Wind integration"*, (Proefschrift), 2007.
- [8] TenneT TSO b.v., *"Primaire reserve"*, geraadpleegd op 8-9-2014, van http://www.tennet.org/bedrijfsvoering/Systeemgegevens_voorbereiding/primaire_reserve.aspx.
- [9] TenneT TSO B.V., *"Productinformatie Regelvermogen"*, (document), Arnhem, gedownload op 3-9-2014, van http://www.tennet.org/images/SOC_11-139_Productinformatie_regelvermogen.pdf.
- [10] TenneT TSO B.V., *"Brochure Noodvermogen"*, (brochure), gedownload op 15-12-2014 van <http://www.tennet.eu/nl/nl/over-tennet/nieuws-pers-publicaties/publicaties/technische-publicaties/brochure-noodvermogen.html>.
- [11] TenneT TSO B.V., *"Uitvoerregels met betrekking tot Net- en Systeemcode"*, (document), Arnhem, gedownload op 28-8-2014, van http://www.tennet.org/images/120214%20SO%20SOC%2012-xxx%20Uitvoeringsregels%204%20clean_tcm41-19026.pdf.
- [12] TenneT TSO B.V., *"Onbalansprijsystematiek"*, geraadpleegd op 1-9-2014, van <http://www.tennet.eu/nl/nl/over-tennet/nieuws-pers-publicaties/publicaties/technische-publicaties/onbalansprijsystematiek.html>.
- [13] TenneT TSO B.V., *"Prikkelcomponent 2014"*, geraadpleegd op 28-10-2014, van http://www.tennet.org/bedrijfsvoering/Systeemgegevens_afhandeling/prikkelcomponent/Prikkelcomponent.aspx.
- [14] Solsolutions, *"Opbrengst Zonnepanelen"*, geraadpleegd op 30-10-2014, van <http://www.solsolutions.nl/zonnestroom/opbrengst-zonnestroom/>.
- [15] TenneT TSO B.V., *"Flows per control area"*, geraadpleegd op 24-11-2014, van <http://energieinfo.tennet.org/Connection/CrossBorderFlows.aspx>.
- [16] DNV-GL/ PBL, *"Het potentieel van zonnestroom in de gebouwde omgeving van Nederland"*, (rapport), Arnhem, Gedownload op 10-9-2014, van <http://www.pbl.nl/publicaties/het-potentieel-van-zonnestroom-in-de-gebouwde-omgeving-van-nederland>.

- [17] Stichting Monitoring Zonnestroom, "*Eén gigawatt zonnestroom vermogen*", (rapport), Utrecht, gedownload op 3-10-2014, van <http://www.zonnestroomnl.nl/wp-content/uploads/2014/09/rapport-1GW-mijlpaal-13-september.pdf>.
- [18] TenneT TSO B.V., "*Rapport Monitoring Leveringszekerheid 2013-2029*", (rapport), gedownload op 27-10-2014, van http://www.tennet.eu/nl/fileadmin/downloads/News/Rapport/Rapport_Monitoring_Leveringszekerheid_2013-2029_TenneT.pdf.
- [19] Stichting Monitoring Zonnestroom, "*Tel de zon*", (poster), gedownload op 3-10-2014, van http://www.zonnestroomnl.nl/wp-content/uploads/2014/09/Poster_EUPVSEC29-TelDeZon.pdf.
- [20] Solarmodules, "*Zonne-energie*", geraadpleegd op 10-9-2014, van <http://www.solarmodules.nl/particulier/faq/>.
- [21] TenneT TSO B.V., "*Halfjaarcijfers 2012*", (document), gedownload op 8-12-2014, van http://www.tennet.eu/nl/fileadmin/downloads/Investors/TenneT_Interim_financial_information_2012_web_FINAL_tcm41-20805.PDF.
- [22] TenneT TSO B.V., "*Beschikbaar productievermogen*", geraadpleegd op 11-11-2014, van <http://energieinfo.tennet.org/Production/AvailableCapacity.aspx>.
- [23] Casado, Mayte García, "*Forecasting real time renewables integration in the operation system*", (presentatie), Copenhagen: RED Eléctrica de España, 2014.
- [24] NASA, "*African dust over Europe*", geraadpleegd op 7-10-2014, van <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=57079>.
- [25] TenneT TSO B.V., "*Verwachte en gerealiseerde productie*", geraadpleegd op 11-11-2014, van <http://energieinfo.tennet.org/Production/RealisedProduction.aspx>.
- [26] PV output, "*Live Output*", geraadpleegd op 9-11-2014, van <http://pvoutput.org/liveteam.jsp?tid=426>.
- [27] SMA, "*Dynamische vermogensregeling*", geraadpleegd op 3-12-2014, van http://www.sma-benelux.com/nl_BE/kenniscentrum/before/dynamische-vermogensregeling.html?utm_source=SMA%20BNL%20homepage&utm_medium=small%20banner&utm_campaign=Dynamische%20Vermogensregeling%20banner.
- [28] Hermsen, Rudo, "*125 jaar elektriciteit in Nederland (1886-2011)*", geraadpleegd op 9-10-2014, van <http://www.willemsmithistorie.nl/index.php/historische-nieuwsflits/495-1e-elektrische-centrale-kinderdijk-125-jaar-19-04-1886-19-04-2011>.
- [29] Rijksoverheid, "*Elektriciteitswet 1998*", geraadpleegd op 9-10-2014, van http://wetten.overheid.nl/BWBR0009755/geldigheidsdatum_08-09-2014.
- [30] Autoriteit Consument & Markt, "*Gebiedsindeling Elektriciteit*", gedownload op 4-9-2014, van https://www.acm.nl/download/documenten/nma/gebiedsindeling_per_12_mei_2012.pdf.
- [31] TenneT TSO B.V., "*Historie*", geraadpleegd op 9-10-2014, van <http://www.tennet.eu/nl/nl/over-tennet/organisatie/historie.html>.
- [32] Rijksoverheid, "*Wijzigingswet Elektriciteit 1998*", geraadpleegd op 9-10-2014, van http://wetten.overheid.nl/BWBR0020608/geldigheidsdatum_08-09-2014.

- [33] Bellis, Mary, "*History: Photovoltaics timeline*", geraadpleegd op 9-10-2014, van http://inventors.about.com/od/timelines/a/Photovoltaics_2.htm.
- [34] Berg, Robin van den, "*Halfgeleiders*", geraadpleegd op 5-12-2014, van <http://members.home.nl/robinvandenbergh/electro/halfgeleider.html>.
- [35] TenneT TSO B.V., "*Aangeboden regel- en reservevermogen Balanshandhaving*", geraadpleegd op 27-10-2014, van http://www.tennet.org/bedrijfsvoering/Systeemgegevens_voorbereiding/Aangeboden_regel_en_reservevermogen/index.aspx.
- [36] Zonnegrond B.V., "*Zonnegrond*", geraadpleegd op 3-10-2014, van <https://www.yumpu.com/nl/document/view/19935661/brochure-zonnegrond>.
- [37] Autoriteit Consument & Markt, "*Begrippenlijst elektriciteit*", (document), gedownload op 18-8-2014, van <https://www.acm.nl/download/documenten/acm-energie/begrippenlijst-elektriciteit-1-september-2014.pdf>.
- [38] Metering.com, "*Metering & smart energy international issue 5*", (tijdschrift), gedownload op 17-12-2014 van <http://spintelligentpublishing.com/Digital/Metering-International/issue5-2014/files/20.html>.

8. Bijlagen I

8.1. Geschiedenis

In 1886 is de eerste Nederlandse openbare elektriciteitscentrale [28] opgestart. De centrale stond in Kinderdijk en kon 350 lampen voorzien van elektriciteit. Verschillende gemeentes begonnen met het aanleggen van elektriciteitscentrales en lokale elektriciteitsnetten. Dit was de start om Nederland te voorzien van een elektriciteitsnet.

De jaren erna werden verschillende centrales gebouwd en woonwijken voorzien van elektriciteit. De eerste stap naar een landelijk net werd gezet in 1949. De regionale energiebedrijven begonnen met elkaar een samenwerking om de verschillende netten met elkaar te koppelen. De Samenwerkende Elektriciteitsproductiebedrijven (SEP) was gericht op het verzorgen van extra zekerheid van levering. Door de verschillende centrales met elkaar te koppelen, konden de centrales elkaar ondersteunen bij storingen.

In 1998 werd de Elektriciteitswet 1998 [29] van kracht. De wet moet ervoor zorgen dat de levering van elektriciteit wordt gewaarborgd en is de basis voor de stimulatie van een vrije energiemarkt. De wet wijst TenneT aan als Systeembeheerder (System Operator) en als landelijke netbeheerder van het hoogspanningsnet. TenneT wordt hiermee belast om zorg te dragen voor de nationale balanshandhaving en het Nederlandse hoogspanningsnet welke vastgelegd is in de gebiedsindeling van de ACM [30]. De overheid is de volledige eigenaar.

In 2003 [31] begint TenneT met het overnemen van het eerste hoogspanningsnet met een spanning van 150 kilovolt(kV) in Zuid-Holland. Hiervoor had TenneT alleen de extra hoogspanningsnetten in beheer met spanningen van 220kV en 380kV. Pas in 2008 zullen verdere overnamen volgen van andere hoogspanningsnetten om zo al de transportnetten in Nederland in beheer te krijgen.

Tot 2006 kent Nederland nog geïntegreerde productiebedrijven. De productiebedrijven waren tot die tijd betrokken bij het hele proces van productie tot aflevering. Door aanvulling op de elektriciteitswet, de Wet Onafhankelijke Netbeheerder [32] (WON), werden productiebedrijven verplicht om de productie, transport en distributie te splitsen. De WON is opgezet als versterking van de liberalisering van de energiemarkt. Na de invoering van de WON werd TenneT verantwoordelijk voor alle transportnetten van elektriciteit in Nederland van 110kV en hoger.

Om meer invloed te hebben op een Noordwest Europese elektriciteitsmarkt, heeft TenneT in 2010 een deel van het Duitse transportnet overgenomen. Door de overname heeft TenneT een betere invloed op het verbeteren van het transport in het Noordwest Europese net. Met de overnames is TenneT de eerste grensoverschrijdende netbeheerder van Europa.

8.2. Taken en verplichtingen

Met de invoering van de Elektriciteitswet heeft TenneT verschillende taken en verplichtingen gekregen. Alleen TenneT mag beheerder zijn van het landelijke transportnet in Nederland. Om ervoor te waken dat TenneT geen misbruik maakt van haar monopolie, staan alle taken en verplichtingen omschreven in de Elektriciteitswet. Om ervoor te zorgen dat TenneT ongehinderd haar werk kan doen staat in de wet ook beschreven waar alle betrokken partijen zich aan moeten houden.

Om te controleren dat TenneT alle verplichtingen na komt, en al het vermogen ten goede komt van het net, staat TenneT onder streng toezicht van de Autoriteit Consument & Markt (ACM). De ACM controleert alle plannen en activiteiten van TenneT. De ACM zorgt ervoor dat alle besluiten en investeringen van TenneT ook daadwerkelijk een positief aandeel hebben voor een betrouwbare levering van elektriciteit.

De taken van TenneT staan vastgelegd in de Elektriciteitswet 1998 [29]. Hierin staan de verplichtingen waar elke netbeheerder, dus ook TenneT, aan moet voldoen. De verplichtingen bestaan onder andere uit⁴:

- Het in werking en in onderhoud hebben van het net.
- Het veilig en betrouwbaar leveren van transport.
- Netten aanleggen, herstellen en vernieuwen om aan de capaciteit te voldoen.
- Derden voorzien van een aansluiting en recht geven tot transport.

Naast de standaard verplichtingen als netbeheerder heeft TenneT ook aanvullende taken opgelegd gekregen als systeembeheerder van de landelijke elektriciteitsvoorziening. De taken bestaan onder ander uit⁵:

- Het treffen van technische voorzieningen en het uitvoeren van systeemdiensten die nodig zijn om het transport over de netten op een veilige en doelmatige wijze te waarborgen. Hieronder wordt ook verstaan het aanhouden van voldoende productiereservecapaciteit.
- Het treffen van passende voorzieningen in verband met de leveringszekerheid op korte en de lange termijn.
- Het verschaffen van transparante informatie voor een betrouwbare en efficiënte werking van de energiemarkt.

De taken van TenneT kunnen worden onderverdeeld in twee onderdelen: netbeheer en systeembeheer.

8.3. Netbeheer

Als netbeheerder van het transportnet ligt het voor de hand dat het net ook beheerd wordt. Dit zijn de fysieke componenten van het net zoals de lijnen, de kabels, de transformatoren, schakelinrichtingen, etc. Om een goed transport te waarborgen is het van belang dat het net in goede conditie is en blijft. Als netbeheerder is TenneT verantwoordelijk voor nieuwe aansluitingen wanneer hier om gevraagd wordt en te zorgen dat het net de gevraagde capaciteit aan kan.

⁴ Elektriciteitswet 1998 Artikel 16 lid 1

⁵ Elektriciteitswet 1998 Artikel 16 lid 2

8.4. Systeembeheer

Naast netbeheerder is TenneT ook System Operator (SO) van de Nederlandse elektriciteitsvoorziening. Als SO verleent TenneT diensten ter ondersteuning voor de security of supply. De ondersteuning bestaat onder andere uit een transportdienst en een systeemdienst.

8.4.1. Transportdienst

Transportdienst levert ondersteunde diensten voor het transport van energie. Elke dag wordt er aan TenneT doorgegeven waar en wanneer elektrische energie over het hoogspanningsnet moet worden getransporteerd. Aan de hand van die gegevens wordt een netveiligheidsanalyse uitgevoerd. Uit de analyse komen eventuele problemen naar voren en wordt duidelijk of het landelijke hoogspanningsnet nog redundant is. Het elektriciteitsnet is zo ontworpen dat bij uitval van een belangrijk onderdeel het transport en daarmee de uitwisseling met de aangeslotene op het elektriciteitsnet onverstoord blijft plaatsvinden. Dit wordt ook wel de N-1 criterium genoemd.

Iedereen die aangesloten is op het transportnet is met voldoende capaciteit aangesloten zodat het gewenste vermogen getransporteerd kan worden. Het transportnet heeft ook onderhoud nodig. Bepaalde onderdelen van het net kunnen dan niet gebruikt worden en TenneT is dan nog wel verplicht om te zorgen dat het gevraagde transport plaats kan vinden. Het kan voorkomen dat onderdelen onbedoeld uitvallen. Ook dan wordt er geprobeerd om het gewenste vermogen te blijven transporteren en te voldoen aan de N-1 criterium. Mocht de beschikbaarheid niet voldoende zijn om het gewenste vermogen te transporteren, kan TenneT een partij verplichten om het vermogen bij te stellen om zo grote problemen te voorkomen.

De transportdienst waakt ook over de spanning op het hoogspanningsnet. Het criterium daarvoor is dat de spanning tussen +/- 10% van het afgesproken spanningsniveau blijft. De afwijkingen worden weggeregeld door blind vermogen (Mvar) aan te sturen.

8.4.2. Systeemdiensten

Om ervoor te zorgen dat het transport van elektriciteit altijd en op een juiste manier kan plaatsvinden is niet alleen een goed transportnet nodig. Het is ook van belang dat er een goede balans is tussen vraag en aanbod van elektrische energie. Door het verschil in vraag en aanbod van elektrische energie ontstaat er wordt onwillekeurige uitwisseling van elektrische energie met het buitenland. Daarnaast zijn er Europese afspraken gemaakt om frequentieschommelingen minimaal te houden door frequentie verschillen weg te regelen. De rol van TenneT in de balanshandhaving is reactief. Door alle betrokken partijen op de juiste manier te stimuleren is het de bedoeling dat er een balans ontstaat zonder ingrijpen van TenneT. Zo moeten bijvoorbeeld de betrokken partijen vooraf een sluitend E-Programma inleveren bij TenneT waarin staat hoeveel elektrische energie aan het net geleverd of aan het net onttrokken wordt.

Ondanks de maatregelen om te voorkomen dat er onbalans ontstaat, bestaat er altijd een kans op een verstoring van de balans. Het ingrijpen op de verstoring behoort ook tot de taken van systeemdiensten. De

systeemfrequentie en de energie uitwisseling met het buitenland worden dag en nacht bewaakt. Er wordt gekeken of de maatregelen voor het beperken van de onbalans de juiste uitwerking hebben. Bij te grote verstoringen wordt er bijgestuurd door bijvoorbeeld het aansturen van extra vermogen.

Alle verschillen tussen het E-Programma en gemeten energie van de betrokken partijen worden verrekend met de kosten van de verschillende beheersmaatregelen, welke nodig waren om de verstoring te verhelpen. Om inzichtelijk te maken wie voor onbalans gezorgd heeft, worden meetgegevens met het E-Programma vergeleken. De precieze werking van de aspecten van de balanshandhaving wordt verder uitgelegd in hoofdstuk 2 *Balanshandhaving*.

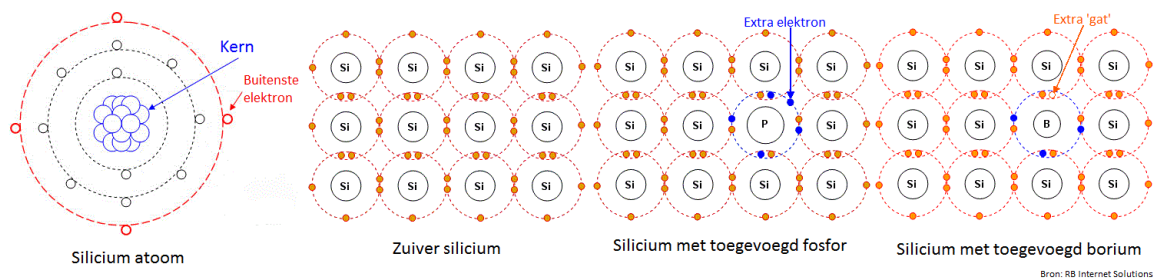
9. Bijlage II

9.1. Zonne-energie

De techniek van licht om te zetten naar elektriciteit bestaat al enige tijd. Eén van de eerste toepassingen was in de ruimtevaart begin jaren zestig [33]. De laatste jaren is de techniek toegankelijker geworden voor consumenten door invloed van de overheid. In het volgende hoofdstuk wordt het omzetten van licht (van de zon) naar elektrische energie behandeld.

9.1.1. Energie omzetten

Een veel gebruikt materiaal om licht om te zetten naar elektriciteit is silicium. Silicium is een halfgeleidend materiaal. Een overeenkomende eigenschap van halfgeleidend materiaal is het aantal elektronen dat in de buitenste schil van het atoom zitten. Voor silicium zijn dat er vier en is weergegeven in *Figuur 9-1 Atoom verbindingen* [34]. Kenmerkend bij vier elektronen in de buitenste schil is dat het materiaal van zichzelf niet geleid, maar ook niet goed isoleert. Door onzuiverheden in het materiaal aan te brengen, worden de eigenschappen van het materiaal beïnvloed.

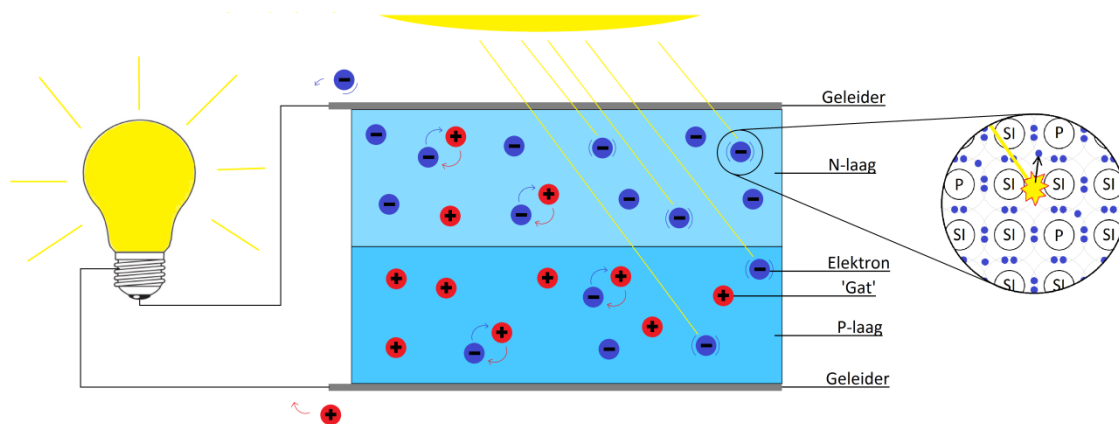


Figuur 9-1 Atoom verbindingen

Wanneer lichtdeeltjes op de elektronen van silicium vallen, kunnen sommige elektronen loskomen van de atoomkern. Door de slechte geleiding van silicium kunnen de vrije elektronen nergens heen. Door bijvoorbeeld het scheikundige element borium toe te voegen aan het silicium ontstaan er extra gaten zoals te zien in *Figuur 9-1 Atoom verbindingen*. Borium heeft een elektron minder in de buitenste schil van het atoom wat ervoor zorgt dat bij binding een plek ontstaat waar een vrije elektron heen kan.

Door borium aan de onderkant van het silicium toe te voegen ontstaat er een kant waar de elektronen makkelijker opgenomen kunnen worden. Aan de bovenkant kan het scheikundige element fosfor toegevoegd worden. Fosfor heeft een elektron meer in de buitenste schil zitten dan silicium. Hierdoor ontstaan er vrije elektronen zoals weergegeven in *Figuur 9-1 Atoom verbindingen*. Dit zijn elektronen die zich niet aangetrokken voelen tot één atoomkern. Hierdoor kunnen de elektronen gemakkelijk bewegen door het materiaal waardoor ze afgegeven kunnen worden aan een aangesloten geleider.

Elke keer als een elektron genoeg energie krijgt om naar een nieuwe plek te 'springen', ontstaat er een gat op de plek van die elektron. Het gat kan op zijn beurt weer gevuld worden door een andere vrije elektron. Het elektron krijgt een steeds hoger energieniveau, waardoor het elektron uiteindelijk los kan komen van het halfgeleidermateriaal. Samen met vele andere elektronen kan er een elektrische stroom ontstaan. Hiervoor moet het paneel wel aangesloten zijn aan een gesloten circuit. Zoals te zien in *Figuur 9-2 Werking zonnepaneel*.



Figuur 9-2 Werking zonnepaneel

De energie uit licht komt van lichtdeeltjes, zogenaamde fotonen. Verschillende spectrums van licht hebben verschillende energieniveaus. Door verschillende laagjes van het halfgeleidingsmateriaal op elkaar te leggen, met elk een andere samenstelling, kan elk laagje afgestemd worden op verschillende spectrums. Door deze laagjes techniek wordt er een breed spectrum van licht opgevangen en omgezet naar elektrische energie.

De snelheid van de verandering in de afgegeven stroom van elektronen van een zonnepaneel is erg snel. Een foton beweegt met de snelheid van het licht. De energie-overdracht aan een elektron gebeurt vrijwel direct waardoor een elektron in beweging komt. Een elektron beweegt zich niet zo snel en kan elke keer maar één plek opschuiven. Zijn oude plek wordt gelijk opgevuld door een ander elektron waardoor er een kettingreactie ontstaat. Elke reactie gebeurt met bijna de snelheid van het licht. Eén reactie ergens in het paneel heeft dus bijna direct het gevolg dat één elektron het paneel kan verlaten. Door de eigenschap van de kettingreactie ontstaat er bijna direct een elektronenstroom uit het paneel wanneer er licht op valt.

De opgewekte elektrische energie uit een zonnepaneel heeft een gelijkspanning. Om het paneel aan te sluiten op het net moet de gelijkspanning omgezet worden naar een wisselspanning welke synchroon is aan de wisselspanning van het aangesloten net. Het omzetten wordt gedaan met een omvormer. Door het aansturen van halfgeleidercomponenten op het juiste moment wordt er aan de hand van pulsen een sinus gemaakt van de gelijkspanning.

10. Bijlage III

Meetgegevens van 11 willekeurige installaties

Tijd	700 (V/W/2 Garadiv 1000VvP)	780 (dabbeelpa 3000VvP)	832 (23aahaco 4000VvP)	880 (Polo-co 3000VvP)	8803 (Hansered 4000VvP)	8703 (Aijldabag 4000VvP)	8246 (Eib-5 PV 2500VvP)	8251 (SunPowerPV 6000VvP)	7341 (vzwappella 8000VvP)	8802 (Blaasard 8000VvP)	8803 (IT7-dak 220 4200VvP)
22:00	0W	0W	0W	0W	0W	0W	0W	0W	0W	0W	0W
21:55	0W	0W	0W	1W	0W	0W	0W	0W	0W	0W	0W
21:50	0W	0W	0W	1W	0W	0W	0W	0W	0W	0W	0W
21:45	0W	0W	0W	1W	0W	0W	0W	0W	0W	0W	0W
21:40	0W	0W	3W	1W	3W	0W	0W	0W	0W	0W	0W
21:35	0W	5W	8W	1W	2W	0W	0W	0W	0W	0W	0W
21:30	43W	2W	8W	23W	8W	0W	0W	0W	0W	0W	0W
21:25	44W	37W	26W	3W	3W	0W	0W	22W	24W	39W	0W
21:20	26W	53W	4W	45W	5W	3W	60W	12W	29W	6W	50W
21:15	29W	64W	43W	64W	58W	26W	34W	20W	58W	0W	0W
21:10	39W	103W	95W	79W	66W	25W	36W	60W	25W	26W	77W
21:05	54W	144W	105W	74W	76W	33W	72W	60W	25W	26W	81W
21:00	77W	168W	127W	77W	82W	49W	102W	60W	64W	39W	91W
20:55	88W	186W	143W	96W	83W	64W	96W	88W	78W	44W	101W
20:50	94W	166W	108W	103W	89W	91W	12W	102W	100W	50W	107W
20:45	100W	76W	324W	10W	18W	103W	12W	168W	100W	53W	111W
20:40	109W	88W	37W	123W	13W	103W	12W	204W	133W	66W	114W
20:35	152W	109W	125W	127W	139W	122W	36W	264W	136W	81W	117W
20:30	172W	124W	127W	139W	135W	0W	12W	324W	130W	94W	118W
20:25	169W	148W	146W	149W	159W	12W	348W	84W	108W	204W	0W
20:20	177W	166W	156W	134W	146W	14W	366W	83W	114W	226W	0W
20:15	183W	222W	159W	137W	231W	14W	48W	492W	57W	116W	232W
20:10	222W	198W	168W	168W	168W	168W	60W	648W	132W	122W	234W
20:05	249W	220W	164W	146W	135W	132W	60W	576W	117W	134W	256W
20:00	274W	257W	141W	142W	153W	120W	84W	528W	159W	164W	267W
19:55	294W	236W	766W	160W	394W	94W	96W	552W	148W	102W	242W
19:50	378W	238W	856W	189W	329W	10W	95W	588W	323W	104W	193W
19:45	328W	268W	936W	188W	58W	208W	240W	660W	336W	60W	188W
19:40	457W	284W	979W	195W	505W	207W	216W	744W	433W	109W	198W
19:35	368W	243W	1033W	207W	333W	244W	192W	684W	663W	222W	398W
19:30	470W	287W	1079W	166W	338W	332W	204W	456W	729W	166W	511W
19:25	544W	339W	1023W	234W	405W	413W	228W	372W	640W	283W	684W
19:20	460W	367W	995W	353W	373W	362W	276W	384W	430W	211W	695W
19:15	1055W	377W	839W	394W	603W	264W	372W	784W	211W	357W	1125W
19:10	659W	476W	1604W	334W	926W	391W	384W	504W	563W	169W	345W
19:05	689W	347W	175W	339W	996W	299W	492W	342W	910W	277W	278W
19:00	646W	413W	187W	273W	980W	308W	540W	384W	761W	333W	291W
18:55	844W	627W	179W	498W	1044W	338W	456W	324W	1047W	233W	397W
18:50	1678W	910W	1010W	377W	859W	442W	804W	300W	734W	300W	584W
18:45	1835W	485W	1000W	377W	495W	620W	708W	468W	757W	164W	500W
18:40	543W	580W	996W	257W	761W	1068W	672W	1033W	101W	303W	101W
18:35	659W	542W	1010W	31W	101W	160W	924W	876W	438W	108W	584W
18:30	1870W	522W	966W	472W	553W	632W	62W	108W	922W	108W	588W
18:25	799W	462W	994W	531W	799W	566W	540W	1296W	161W	267W	959W
18:20	1739W	303W	1044W	357W	642W	668W	720W	132W	410W	678W	960W
18:15	993W	479W	1352W	310W	2049W	520W	1244W	1832W	222W	754W	901W
18:10	926W	429W	2293W	459W	843W	647W	888W	1844W	225W	907W	1022W
18:05	854W	1026W	1026W	374W	829W	660W	828W	152W	78W	550W	926W
18:00	853W	592W	1246W	540W	634W	844W	996W	116W	167W	302W	676W
17:55	827W	499W	1254W	666W	454W	866W	1032W	1044W	183W	305W	116W
17:50	790W	588W	1020W	160W	302W	1226W	696W	804W	166W	484W	966W
17:45	823W	981W	1369W	688W	363W	1295W	864W	936W	363W	388W	781W
17:40	1111W	1061W	1266W	688W	680W	841W	900W	1272W	101W	135W	509W
17:35	920W	684W	1541W	804W	1440W	766W	744W	1028W	70W	760W	405W
17:30	101W	547W	2676W	534W	1033W	625W	588W	972W	503W	887W	358W
17:25	743W	662W	2802W	688W	775W	744W	828W	423W	682W	254W	0W
17:20	775W	496W	2491W	219W	135W	682W	816W	720W	422W	466W	87W
17:15	725W	547W	816W	2274W	769W	1027W	708W	644W	372W	567W	96W
17:10	629W	659W	811W	595W	729W	910W	1212W	768W	335W	492W	169W
17:05	618W	740W	2240W	684W	2228W	895W	804W	696W	348W	501W	228W
17:00	638W	71W	2355W	1006W	24433W	2044W	600W	564W	469W	482W	236W
16:55	688W	618W	2266W	1011W	2842W	628W	648W	564W	527W	592W	167W
16:50	464W	733W	1636W	810W	2999W	1003W	576W	672W	587W	383W	340W
16:45	951W	770W	1399W	609W	29633W	94W	480W	972W	483W	400W	235W
16:40	278W	683W	1038W	526W	2976W	883W	384W	1332W	573W	137W	224W
16:35	1020W	859W	1497W	598W	3883W	680W	336W	1440W	698W	599W	133W
16:30	1044W	916W	316W	812W	3886W	740W	288W	1212W	602W	1029W	374W
16:25	2911W	883W	1161W	1010W	3192W	666W	360W	1260W	2654W	654W	584W
16:20	1927W	766W	1154W	1000W	3200W	584W	432W	1096W	1088W	693W	793W
16:15	1678W	797W	1461W	1267W	2644W	943W	696W	116W	658W	724W	1044W
16:10	1686W	768W	1011W	880W	2332W	971W	924W	1200W	657W	1011W	1631W
16:05	2164W	806W	2111W	974W	101W	622W	1260W	972W	1000W	1698W	953W
16:00	1632W	825W	1626W	765W	2700W	335W	844W	1044W	1020W	893W	160W
15:55	886W	948W	1653W	1228W	161W	356W	972W	1200W	641W	765W	999W
15:50	1000W	1043W	1117W	2821W	446W	900W	1176W	572W	703W	1177W	0W
15:45	3050W	934W	765W	889W	3078W	257W	1684W	1692W	465W	763W	189W
15:40	1167W	1076W	899W	949W	345W	382W	1684W	1044W	787W	445W	2677W
15:35	811W	684W	1088W	956W	957W	324W	1010W	1380W	992W	320W	2523W
15:30	1611W	1111W	737W	1661W	909W	1212W	1644W	611W	611W	972W	0W
15:25	1044W	810W	2777W	882W	967W	243W	1052W	1040W	423W	510W	1063W
15:20	1037W	909W	1671W	3010W	161W	489W	1624W	1668W	410W	785W	865W
15:15	1018W	1057W	1777W	1287W	1640W	428W	1848W	1668W	216W	241W	702W
15:10	1230W	1424W	2165W	1073W	161W	61W	1644W	1608W	227W	263W	672W
15:05	1009W	157W	1633W	298W	1694W	933W	2424W	1487W	708W	0W	0W
15:00	1161W	911W	2500W	269W	1257W	319W	720W	1644W	216W	534W	711W
14:55	1019W	1039W	1010W	500W	842W	319W	341W	162W	319W	341W	507W
14:50	1066W	985W	2089W	702W	927W	501W	480W	1092W	423W	439W	353W
14:45	1044W	1054W	1173W	870W	2450W	625W	624W	936W	295W	489W	55W
14:40	1327W	1277W	1361W	710W	1302W	951W	876W	960W	241W	156W	630W
14:35	1011W	1033W	1080W	1043W	111W	141W	116W	966W	218W	266W	382W
14:30	966W	996W	1002W	924W	376W	101W	586W	972W	203W	333W	426W
14:25	787W	1000W	1020W	868W	264W	112W	564W	112W	564W	2003W	477W
14:20	833W	1202W	1287W	846W	206W	165W	540W	720W	275W	588W	78W
14:15	486W	1044W	1058W	2456W	283W	868W	552W	612W	484W	993W	443W