

2014•2015
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterproef

Prijsefficiënte sturing van WKK in functie van energiekost en onbalansmarkt

Promotor :
ir. Geert VANDENSANDE

Promotor :
ing. KRIS LEMKENS
ing. JAN ELSEN

Stef Kerkhofs

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

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2014•2015
Faculteit Industriële
ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterproef

Prijsefficiënte sturing van WKK in functie van
energiekost en onbalansmarkt

Promotor :
ir. Geert VANDENSANDE

Promotor :
ing. KRIS LEMKENS
ing. JAN ELSSEN

Stef Kerkhofs

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

VOORWOORD

Als masterstudent industrieel ingenieur energie/ elektrotechniek heb ik een eindwerk gemaakt wat in de lijn van mijn opleiding ligt. Het eindwerk gaat over het in balans houden van het elektriciteitsnetwerk en hoe men daar zelf aan kan meewerken. Ik heb dit onderwerp gekozen omdat mijn interesse uitgaat naar alles wat te maken heeft met opwekking en transport van elektrische energie. Ook heb ik een grootte interesse in de marktwerking van de elektriciteitshandel.

Graag betuig ik mijn dank aan iedereen die heeft bijgedragen aan de realisatie van deze masterproef. In het bijzonder gaat mijn dank uit naar mijn promotoren: ir. Vandensande Geert, ing. Elsen Jan en ing. Lemkens Kris. Zij hebben mij altijd te woord gestaan indien ik vragen had en hebben meegedacht naar oplossingen indien ik niet meer verder kon.

Inhoudsopgave

Inleiding	15
Situering	17
1.1 i-NET	17
1.2 Doelstellingen.....	17
1.3 Onderzoeksvraag.....	17
Literatuurstudie	19
1 Verantwoordelijkheid behoud evenwicht	19
1.1 Elia	20
1.2 Evenwicht behouden.....	21
2 Verandering in het elektriciteitsnet	25
3 Prijs elektriciteit	27
3.1 Prijsbepaling	27
3.2 Keuze productie-eenheden	29
4 WKK	31
4.1 Werking	31
4.2 Exergie en anergie	31
4.3 Certificaten	32
4.3.1 Certificaten markt	32
4.3.2 Welke en hoeveel certificaten voor een WKK installatie	34
4.4 verschillende types WKK	36
4.4.1 warmtekrachtkoppelinginstallatie met gasturbine	36
4.4.2 warmtekrachtkoppelinginstallatie met zuigermotoren met inwendige verbranding	37
5 WKK in het Belgische elektriciteitsnet	39
5.1 evolutie geïnstalleerd WKK vermogen	39

5.2 WKK geïntegreerd in een smart grid.....	40
6 Warmtebuffering.....	41
7 Methode en resultaten	43
7.1 Prijs efficiënt sturen van de WKK.....	44
7.2 Verbruik UC Leuven-Limburg.....	45
7.3 Opbrengst normaal gebruik WKK.....	47
7.4 Opbrengst WKK piekafsnijding.....	63
7.5 Opbrengst WKK als aggregaat.....	70
7.6 Vergelijking drie mogelijkheden.....	73
8 Besluit	75
Bibliografie.....	77

Lijst van tabellen

Tabel 1 Algemene gegevens gas WKK.....	49
Tabel 2 gemiddeld verbruik op basis van gemiddelde temperatuur en graaddagen.....	51
Tabel 3 aantal dagen van oktober t.e.m. mei	54
Tabel 4 variabele kostprijs gas	54
Tabel 5 variabele kostprijs elektriciteit tijdens piek uren	55
Tabel 6 variabele kostprijs elektriciteit tijdens dal uren	55
Tabel 7 jaarlijkse uitgaven gas en elektriciteit zonder WKK	55
Tabel 8 warmteverdeling	56
Tabel 9 jaarlijks verbruik gas en elektriciteit met gas WKK	57
Tabel 10 Algemene gegevens WKK op PPO	57
Tabel 11 warmtevraag op basis van graaddagen verminderd met 80 kW _{th}	58
Tabel 12 warmteverdeling rekening houdend met gas WKK.....	58
Tabel 13 jaarlijkse jaarlijks verbruik gas en elektriciteit met WKK op PPO.....	59
Tabel 14 tarief €/kW per klant categorie	64
Tabel 15 TOK gas WKK i.f.v. elektrisch en thermisch rendement.....	67
Tabel 16 TOK WKK op PPO i.f.v. elektrisch en thermisch rendement	69
Tabel 17 overzicht opbrengsten WKK in euro.....	73

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1 Geïnstalleerd vermogen in Vlaanderen waarvoor GSC worden toegekend [kWe], per jaar van indienstname.....	15
Figuur 2 ENTSO-E members	19
Figuur 3 bestaande en geplande hoogspanningsverbindingen	20
Figuur 4 Nemo Link	20
Figuur 5 ALEGrO	21
Figuur 6 structuur controleorganen m.b.t. Elia.....	21
Figuur 7 activatiemechanisme reserve	24
Figuur 8 elektriciteitsnet vroeger.....	25
Figuur 9 elektriciteitsnet nu	26
Figuur 10 Prijsbepaling elektriciteit vraag/aanbod	27
Figuur 11 de verschillende soorten markten	27
Figuur 12 Gestileerde weergave van de merit-order.....	30
Figuur 13 werkingsprincipe WKK	31
Figuur 14 principe marktwerking WKC's & GSC's	33
Figuur 15 warmtekrachtkoppelinginstallatie met gasturbine in open cyclus	37
Figuur 16 warmtekrachtkoppelinginstallatie met zuigermotor met inwendige verbranding ..	38
Figuur 17 Het geïnstalleerd elektrisch WKK vermogen in België (2000-2012)	39
Figuur 18 Type WKK geïnstalleerd in Brussel, Wallonië en Vlaanderen (2010).....	40
Figuur 19 Gebruikte brandstof WKK in Vlaanderen, Brussel en Wallonië (2010)	40
Figuur 20 verbruik ifv graaddagen	46
Figuur 21 verbruik ifv buitentemperatuur	47
Figuur 22 gemiddelde jaartemperatuur 1981-2010	50
Figuur 23 vergelijking op basis van gem T of graaddagen	51
Figuur 24 verloop thermisch vermogen gedurende 1 dag.....	53
Figuur 25 verloop rendement gas WKK (1)	65
Figuur 26 verloop rendement gas WKK (2)	66
Figuur 27 onbalansprijzen 29/04/2015	72
Figuur 28 onbalansprijzen 30/04/2015	72

Lijst met afkortingen

ARP	Access responsible party
BRP	Balance responsible party
CIM	Continuous Intra-day Market
DAM	Day-Ahead Market
EEX	European Energy Exchange
GSC	Groenestroomcertificaat
ICE Endex	InterContinental Exchange Endex
IGCC	International Grid Control Cooperation
MDP	Marginal Decremental Price
MIP	Marginal Incremental Price
NRV	Net Regulation Volume
PEB	Primaire energiebesparing
PPO	Puur plantaardige olie
RES	Renuable Energy Sources
TOK	Totale operationele kost
TSO	Transmission System Operator
WKC	Warmtekrachtcertificaat
WKK	Warmtekrachtkoppeling
HVDC	High Voltage Direct Current

Abstract

I-NET te Diepenbeek wil onderzoeken op welke manier ze WKK's kan inzetten om het evenwicht op het transmissienetwerk in balans te houden en of dit economisch rendabel is voor de eigenaar van de WKK. Het doel van de masterproef bestaat uit twee grote delen. In eerste instantie is er een onderzoek gevoerd naar de werking van de onbalansmarkt en welke methodes men kan gebruiken om mee te dingen op deze markt. In tweede instantie wordt dit toegepast op de WKK's van de UC Leuven-Limburg en wordt nagegaan wat de meest efficiënte manier is voor een prijs gedreven aansturing van de WKK.

Het betreft een gas WKK met een thermisch vermogen van $80 \text{ kW}_{\text{th}}$ en een elektrisch vermogen van $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ en een WKK op PPO (puur plantaardige olie) met een thermisch vermogen van $40 \text{ kW}_{\text{th}}$ en een elektrisch vermogen van $25 \text{ kW}_{\text{el}}$. Er zijn 3 mogelijke manieren om deze WKK's in te zetten: de traditionele manier op basis van warmtevraag, gebruik voor piekafsnijding en als onderdeel van een aggregator. Er wordt nagegaan wat de meest economisch rendabele manier is om de WKK's in te zetten.

Uit dit onderzoek blijkt dat het voordelig is de gas WKK in te zetten voor warmtevraag en piekafsnijding. De WKK op PPO is enkel voordelig voor piekafsnijding of als hij wordt aangeboden bij een aggregator.

Het aanbieden van de gas WKK aan een aggregator is het minst rendabel. Het inzetten van de gas WKK op basis van warmtevraag in combinatie met piekafsnijding levert een jaarlijkse besparing op van 16.500 à 17.500 euro. De WKK op PPO inzetten op basis van warmtevraag blijkt verlieslatend te zijn. Het aanbieden van de WKK op PPO voor piekafsnijding levert een besparing op van 650 euro, dit is ongeveer evenveel als men zou krijgen voor het aanbieden van deze WKK bij een aggregator.

Abstract in English

I-NET in Diepenbeek wants to investigate in which way they can use a combined heat and power (CHP) to keep the transmission network in balance and if this is economically profitable for the owner of the CHP. The goal of this masterthesis is first of all investigate the working of the imbalance market and which methods can be used to compete on this market. Secondly, this is being applied an the CHP of the UC Leuven-Limburg. This thesis also examines what the most efficient way is for a quote-driven steering of the CHP.

There are two types of CHP's, a gas CHP with a thermal power of $80 \text{ kW}_{\text{th}}$ and a load of $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ and a CHP on pure plant oil (PPO) with a thermal power of $40 \text{ kW}_{\text{th}}$ and a load of $25 \text{ kW}_{\text{el}}$. There are three different ways to use the CHP: the traditional way based upon heat demand, usage for peak-chamfering and as part of an aggregator. It is examined what the most economic profitable way is to deploy the CHP.

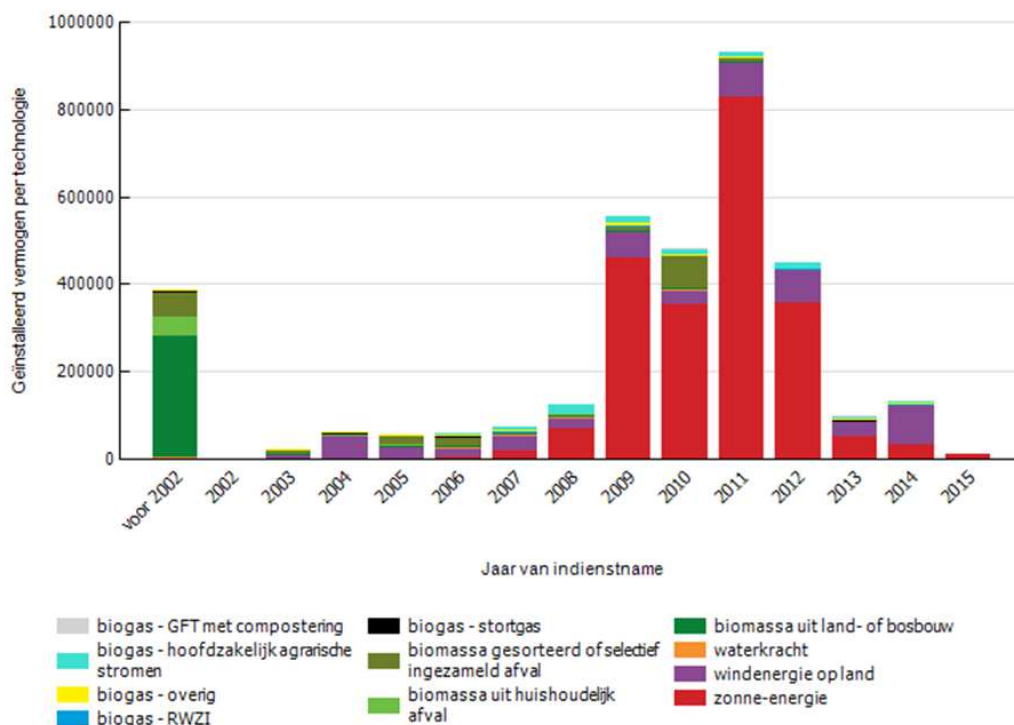
This study shows that it is advantageous to use the gas CHP for heat demand and peak-chamfering. The CHP on PPO is only advantageous for peak-chamfering or when it is provided to an aggregator.

The least profitable choice is offering the gas CHP to an aggregator. The use of the gas CHP based on heat demand combined with peak-chamfering delivers an annual saving of 16.500 to 17.500 euros. The use of the CHP on PPO based on heat demand seems to be loss-making. Offering the CHP on PPO for peak-chamfering brings in a saving of 640 euros, that is about the same as it is part of an aggregator.

Inleiding

Het huidige elektriciteitsnetwerk is de laatste jaren grondig veranderd. Massale plaatsing van zonnepanelen zowel bij particulieren als in grote velden, grote windmolenparken en elektriciteitsproductie doormiddel van WKK's (Warmte Kracht Koppeling) hebben er toe geleid dat het traditioneel elektriciteitsnetwerk een andere functie vervult (de evolutie is weergegeven in Figuur 1).

- Vroeger: Er werd doormiddel van x-aantal grote elektriciteitscentrales elektrische energie geproduceerd en vervolgens via het transmissienetwerk tot aan de klant gebracht.
- Nu: Steeds meer decentrale elektriciteitsproductie doormiddel van zonnepanelen, windmolens, WKK's e.d. die, indien de opgewekte elektrische energie niet lokaal verbruikt wordt, zal de elektrische energie geïnjecteerd worden in het distributienet. Het elektriciteitsnetwerk wordt gebruikt als virtuele buffer. Hierbij moeten injecties en afnames van elektrische energie op het elektriciteitsnetwerk continu in evenwicht zijn. Dit is een van de problemen waar elektriciteitsnetbeheerders de dag van vandaag mee geconfronteerd worden.



Figuur 1 Geïnstalleerd vermogen in Vlaanderen waarvoor GSC worden toegekend [kWe], per jaar van indienname [1]

In België is Elia als transportnetbeheerder verantwoordelijk voor het in evenwicht houden van het elektriciteitsnet. Daar waar vroeger het voor Elia relatief eenvoudig was dit evenwicht te behouden dankzij de duidelijke afbakening van producent en verbruiker, is dat vandaag een stuk ingewikkelder.

De elektriciteitsproductie doormiddel van zonnepanelen en windmolens is afhankelijk van het weer. Deze RES houden geen rekening met de energie-afname op het net. Elia moet nu niet enkel rekening houden met het verbruik, maar ook met de variaties die de wind- en zonne-energie veroorzaken [2]. In een artikel van 27 juni 2014 schreef Frank Brichau, CEO van Essent, het volgende:

-'' Vorige week piekte de energieprijz tot 500 euro per megawatt uur (MWh), meer dan tien keer het gemiddelde.

Hoe kon dat gebeuren? Simpel: er was zoveel wind en zon voorspeld dat de netbeheerders ervan uitgingen dat zon en wind een aanzienlijk deel van de Belgische vraag naar energie zouden kunnen inlossen. Dat lukte ook, tot een donderwolk de output van zonnepanelen deed kelderen. Toen was het alle hens aan dek om een tekort af te wenden, met piekprijzen tot gevolg.'' [3]

Daar waar er vroeger, 15 jaar geleden, enkele tientallen elektriciteitscentrales waren in België, zijn er dat de dag van vandaag meer dan 200 000 (RES inbegrepen) [2]. Dit vraagt naar een andere aanpak van zowel elektriciteitsproductie als verbruik. Een van de mogelijkheden hiervoor is de inzet van decentrale energieproductie zoals WKK's om het elektriciteitsnetwerk te ondersteunen voor het behoud van evenwicht.

Situering

1.1 i-NET

I-NET is het onderzoekscentrum voor Intelligente Nieuwe Energie Technologieën van de UC Leuven-Limburg [4]. De doelstelling van i-NET bestaat erin om via onderzoek en dienstverlening up-to-date te zijn van de nieuwste ontwikkelingen en trends op het gebied van energie. Vervolgens probeert ze om die kennis te verspreiden naar studenten en het werkveld. De activiteiten van i-NET zijn onderzoek naar: koeltechnieken, micro-en SmartGrids, clean energie, waterstof, clean mobility, verwarming en waterstofgas. Prijs gedreven energieproductie door middel van een WKK valt onder het onderzoek in micro- en SmartGrids.

1.2 Doelstellingen

Het doel van deze masterproef bestaat erin een algemene studie voor te leggen die de werking van de onbalansmarkt weergeeft en bovendien de mogelijkheden van aggregator technieken binnen de elektrische installatie van de UC Leuven-Limburg naar voren brengt. Wat volgt zal een uitgebreide situatieschets weergeven van de huidige elektriciteitsmarkt.

Verder zal er een studie volgen over het nut om mee te dingen op de onbalansmarkt en over de manier hoe men dat het best kan realiseren. Als referentie wordt er gebruik gemaakt van de installatie van UC Leuven-Limburg waar zich twee WKK's bevinden.

Bijkomend is het mogelijk een vergoeding te krijgen indien de WKK gebruikt wordt als flexibele productie-eenheid. Het is op deze manier mogelijk piek-verbruiken binnen de UC Leuven-Limburg zelf op te vangen. Op die manier wordt de totale piek verminderd alsook de vergoedingen die men daarvoor moet betalen.

Deze studie zal vervolgens getoetst worden met de praktijk. De WKK zal op basis van prijs-efficiëntie werken en niet op energie-efficiëntie. Hierbij wordt gedacht aan opslag van warmte in een reservoir of leidingen.

1.3 Onderzoeksvraag

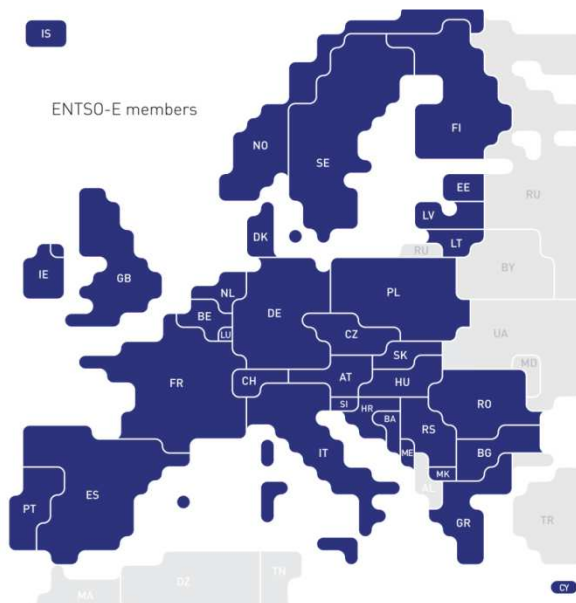
- (1) Hoe werkt de huidige elektriciteitsmarkt
- (2) Is het mogelijk om de WKK op een prijs efficiënte manier te sturen en hoe?
- (3) Op welke manier kan de installatie van de UC Leuven-Limburg meedingen op de elektriciteitsmarkt in samenwerking met een aggregator? Wat zijn hiervoor de vergoedingen?

Literatuurstudie

Hoofdstukken 1 tot en met 6 zijn literatuurstudie.

1 Verantwoordelijkheid behoud evenwicht

Het elektriciteitsnetwerk in België is verbonden met 33 ander landen binnen Europa [5]. Dit elektriciteitsnetwerk heeft een frequentie van 50 Hz. Deze frequentie kan enkel behouden worden indien afname en productie met elkaar in evenwicht zijn. In het kader van de vrijmaking van de elektriciteitsmarkt en het veilig transporteren van elektrische energie doorheen Europa heeft men de ENTSO-E opgericht (European Network of Transport System Operators of Electricity). In de ENTSO-E bevinden zich alle Europese netbeheerders, ook wel TSO's genoemd (Transport System Operator). Er zijn 41 TSO's verdeelt over 34 landen. Figuur 2 toont de huidige situatie van de ENTSO-E leden. België heeft slechts één TSO: Elia. Nederland en andere landen zoals Duitsland hebben meerdere TSO's. De hoofdtak van de ENTSO-E is ervoor zorgen dat elektriciteit veilig en betrouwbaar getransporteerd kan worden over de landsgrenzen heen. Ze legt plannen en doelen op waaraan TSO's moeten voldoen, concrete werkpunten zijn de vlotte integratie van RES (Renueable Energy Sources) en een verbetering van de huidige elektriciteitsmarkt.



Figuur 2 ENTSO-E members [6]

De ENTSO-E en alle andere TSO's stellen een 10 jarig plan over de huidige situatie en hoe het elektriciteitsnetwerk moet evolueren. Dat plan wordt om de 2 jaar herzien en is de basis voor de EU om regels op te stellen met betrekking tot energievoorziening.

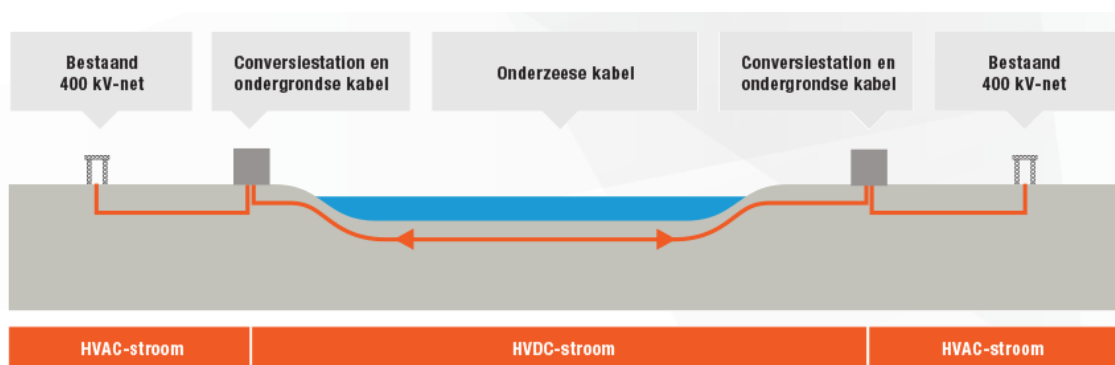
1.1 Elia

Elia is de regionale TSO in België. Alle netten van 30 000 tot 380 000 Volt vallen onder haar verantwoordelijkheid [7]. Het hoogspanningsnet is verspreid over heel België doormiddel van 8 000 km lijnen en ondergrondse kabels. Omwille van de steeds stijgende vraag naar energie moet Elia investeren in het vergroten van de capaciteit van haar netwerk. Elia moet niet enkel het huidige net onderhouden maar is momenteel ook bezig met nieuwe connecties te maken met de buurlanden. Dit moet ze doen om aan de eisen van de ENTSO-E te voldoen. Momenteel is er reeds een connectie met Frankrijk en Nederland (Figuur 3). Een van de nieuwe connecties is een verbinding tussen België en het Verenigd Koninkrijk [8]. Dit project wordt de Nemo Link genoemd en zal bestaan uit een 140 kilometer lange interconnectie die tussen Richborough en Herdersbrug zal lopen (Figuur 4). Het is een HVDC verbinding met een capaciteit van 1.000 MW.

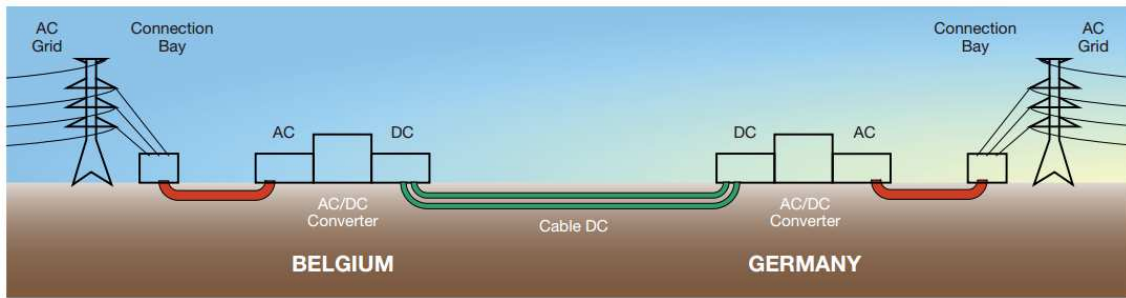
Een andere nieuwe connectie is een verbinding tussen België en Duitsland en wordt het ALEGrO (Aachen Liège Electric Grid Overlay) project genoemd (Figuur 5). Het betreft een 100 kilometer lange verbinding met een capaciteit van 1.000 MW. De planning is dat beide verbindingen operationeel zijn in 2019 [9].



Figuur 3 bestaande en geplande hoogspanningsverbindingen [10]

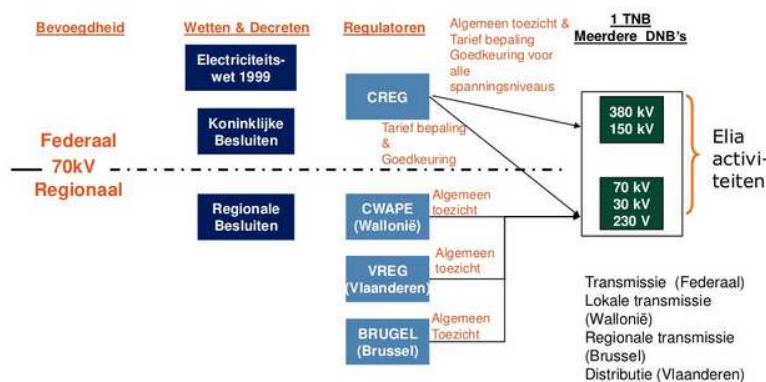


Figuur 4 Nemo Link [8]



Figuur 5 ALEGrO [11]

Elia is de enige beheerder van het hoogspanningsnet in België en bezit een monopoly. Daarom wordt ze gecontroleerd door een regulator. In België gebeurt dat door de CREG, VREG, CWAPE en BRUGEL. Figuur 6 toont een overzicht welk controleorgaan verantwoordelijk is voor welk deel van het elektriciteitsnetwerk op basis van voltage.



Figuur 6 structuur controleorganen m.b.t. Elia

Elia is verantwoordelijk voor het evenwicht van het elektriciteitsnetwerk binnen België maar zij vervult meer een controlerende functie. Zij doet beroep op zogenaamde BRP's, Balance Responsible Party, ook wel ARP genoemd (Access Responsible Party). Indien de BRP's er niet in slagen het evenwicht op kwartierbasis te behouden moet Elia ingrijpen om het evenwicht te herstellen.

1.2 Evenwicht behouden

Op elk toegangspunt van het hoogspanningsnet is er een evenwichtsverantwoordelijken. Zijn taak is het behoud van het evenwicht op kwartierbasis tussen het geheel van afnames en injectie van de netgebruikers waarvoor de BRP verantwoordelijk is. De BRP kan een producent zijn alsook een grote afnemer, stroomleverancier of een *trader* [12] [13].

BRP-contract

De BRP heeft een contract met de netbeheerder Elia en moet ten laatste een dag op voorhand een toegangsprogramma indienen bij Elia. In het toegangsprogramma staat hoeveel injecties en afnames er zullen zijn en op welke tijdstippen, dit noemt men de zogenaamde nominaties. De nominaties bestaan uit de verwachtingen betreffende injecties en afnames (productie en verbruik) en de energie-uitwisselingen tussen BRP's onderling alsook de import en exportnominaties voor de zuidgrens en de noordgrens.

Elia controleert op basis van meetgegevens of de toegangsverantwoordelijken hun plichten in verband met het evenwicht nakomen. Indien Elia op kwartierbasis vaststelt dat er een onevenwicht aanwezig is zal ze ingrijpen. De BRP's die er niet in geslaagd waren hun evenwicht te behouden zullen moeten betalen voor de reserves die Elia heeft moeten inschakelen om het evenwicht te herstellen. De BRP's zullen dan onevenwichtsprijzen moeten betalen. Hoe de onevenwichtsprijzen berekend worden volgt verder [14].

Balancering

Indien er een onevenwicht bestaat tussen productie en verbruik zal Elia gebruik maken van verscheidene *balancing*-mechanismen om het evenwicht te herstellen/behouden. Dit kan Elia via het IGCC (**I**nternational **G**rid **C**ontrol **C**ooperation). Ze kan enerzijds het onevenwicht uitwisselen met buitenlandse netbeheerders of ze kan elektriciteitsvolumes aanwenden die naar boven of naar onder geactiveerd kunnen worden. Dit wordt gerealiseerd via contractuele reserves. De contractuele reserves bestaan uit primaire, secundaire en tertiaire reserve [15] [16].

Primaire reserves (R1)

Deze reserves kunnen AUTOMATISCH frequentieschommelingen detecteren en indien nodig binnen de 30 seconden hun productie aanpassen om het evenwicht te behouden. Deze primaire reserves werken ook grens overschrijdend binnen Europa. De primaire reserves van bv Duitsland kunnen helpen om de frequentie en spanning constant te houden in het Belgische net indien een ernstige onbalans zich voordoet. De grote van het vermogen dat beschikbaar gemaakt moet worden door Elia in primair vermogen is vast gelegd door Europa en moet volstaan om 2 ernstige incidenten (verlies van 2 productie-eenheden van 1.500 MW) op te vangen. De primaire reserves worden enkel gebruikt voor het eerste kwartier na het onevenwicht. Na 15 minuten wordt er een economisch voordeligere productie-eenheid aangeschakeld. Daarenboven moeten deze reserves ook zo snel mogelijk vrij gemaakt worden om eventueel een nieuwe onbalans op te kunnen vangen.

Secundaire reserves (R2)

Deze reserves worden ingeschakeld opdat de primaire reserves terug beschikbaar zijn om een nieuwe onbalans op te vangen. Ze reageren tussen de 30 seconden en 15 minuten en kunnen daarna doorlopend blijven leveren tot er een economischere oplossing gevonden is. Ook deze reserves worden automatisch aangesproken bij een eventuele onbalans en kunnen zowel op- als neerwaarts geregeld worden. Als een bedrijf of producent zijn installatie als secundaire reserve ter beschikking wilt stellen moet hij aan een paar voorwaarden voldoen. Een van deze voorwaarden is dat het bedrijf in real-time moet kunnen communiceren met Elia.

Een andere vorm van secundair reserve is het IGCC platform dat onevenwicht van de verschillende TSO's vergelijkt op Europese schaal en kijkt of ze gecompenseerd kunnen worden zodat geen reserves ingeschakeld moeten worden. De onbalans wordt dan uitgewisseld over de landsgrenzen heen. Hierbij moet wel steeds nagegaan worden of de infrastructuur dit energietransport aan kan. Deze oplossing is economisch zeer voordelig maar de beschikbaarheid is niet gewaarborgd.

De prijs die een producent vraagt voor het ter beschikking stellen is vast en overeengekomen in het contract. De prijs voor het eigenlijke verbruik kan wel veranderen van dag tot dag maar niet *intraday*.

Tertiaire reserves (R3)

Deze reserves zijn economisch voordeliger als de secundaire maar moeten handmatig ingeschakeld worden. De tertiaire reserves worden opgesplitst in productiereserves (injectie van extra vermogen) en afnamereserve (vermindering van de afnames) beiden hebben hetzelfde gevolg. Als Elia vraagt aan een tertiair reserve om aangeschakeld te worden moet dit binnen de 3 minuten gerealiseerd worden.

Deze reserves staan dus steeds ter beschikking tegen een bepaalde prijs die vast is afgesproken in een contract. Een afname reserve is bijvoorbeeld een bedrijf dat in een contract heeft vastgelegd dat het zijn afname van het hoofspanningsnet op elk moment dat ELIA dat vraagt verlaagd tot maximum de *shedding* limit (minimum verbruik dat bedrijf steeds nodig heeft). Hiervoor zal het bedrijf een vergoeding krijgen. Het minimum vermogen dat ter beschikking gesteld moet worden om in aanmerking te komen als tertiair reserve is 5 MW per tariefperiode. Welk tertiair reserve eerst wordt ingeschakeld wordt bepaald op basis van puur economische redenen.

R3 Dynamic profile [17]

Het R3 Dynamic profile reserve is een tertiaire reserve waarbij decentrale energiebronnen gebruikt kunnen worden om het evenwicht te behouden. Netgebruikers die wensen hun vermogen ter beschikking te stellen kunnen dit rechtstreeks via Elia doen of via een derde partij. De derde partij is in de meeste gevallen een partij die verschillende netgebruikers aggregeert. Men noemt deze derde partij daarom de aggregator.

De duur en het aantal activeringen van de ter beschikking gestelde installatie worden op volgende manier gebruikt:

- de activering gebeurt per kwartier
- de installatie wordt maximaal 2 uur lang geactiveerd
- de installatie wordt maximaal 40 keer per jaar geactiveerd
- tussen twee periodes van activering moet er minimaal 12 uur verlopen

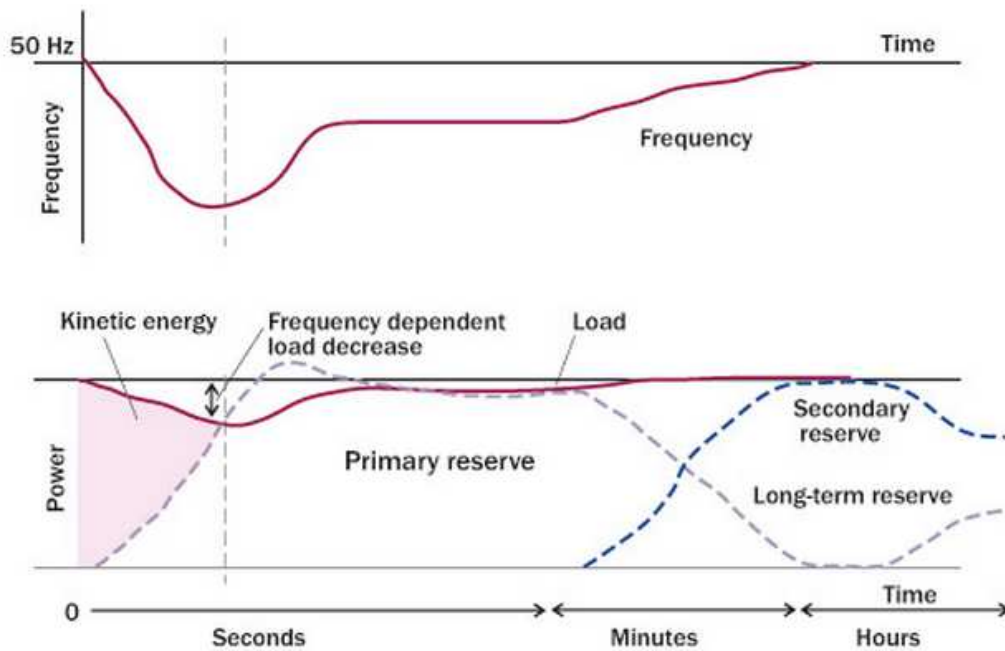
Niet –gecontracteerde reserves

Tot slot kunnen ook nog bedrijven of productie-eenheden zich aanbieden bij Elia. Zij staan niet onder contract en moeten dus niets ter beschikking stellen maar als ze een overschot hebben of afnamen kunnen realiseren kunnen zij zich aanbieden aan Elia. Deze opties zijn meestal economisch voordelig maar zijn niet altijd aanwezig.

Andere

Bovenop deze reserves koopt Elia zelf ook elektriciteit aan om de verliezen op haar net te compenseren en investeert het in Black-start diensten. Dit zijn productie-eenheden die kunnen opstarten zonder eerst stroom van het net te halen. Dit is nodig als er zich een totale black-out zou voordoen waarbij naburige netten niet beschikbaar zijn om start-up energie te leveren aan productie-eenheden.

Figuur 7 geeft een overzicht weer van het activatiemechanisme van de primaire en secundaire reserve.



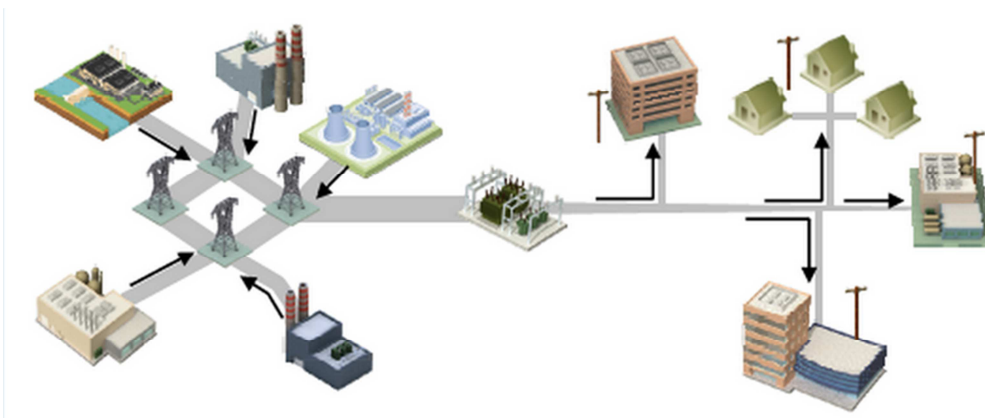
Figuur 7 activatiemechanisme reserve [18]

2 Verandering in het elektriciteitsnet

De wetgeving in België omtrent energieregulering wordt voor een groot deel gebaseerd op het Europese beleid. België, die zelf heeft bijgedragen aan de Europese richtlijnen, moet deze ook omzetten in nationale wetgeving. De liberalisering van de gas- en elektriciteitsmarkt volgens de Europese eisen en principes (in 1996 voor elektriciteit en 1998 voor gas) is daar een voorbeeld van. Europa heeft ook de toon gezet inzake energienormen, toegangsregels tot het net, scheiding tussen netactiviteiten en activiteiten van leveranciers en producenten, nettarieven enz.. Europa legt ook strenge regels op inzake klimaat en luchtverontreiniging wat een niet te onderschatten impact heeft op het energiesysteem en meer bepaald de elektriciteitsproductie [19] .

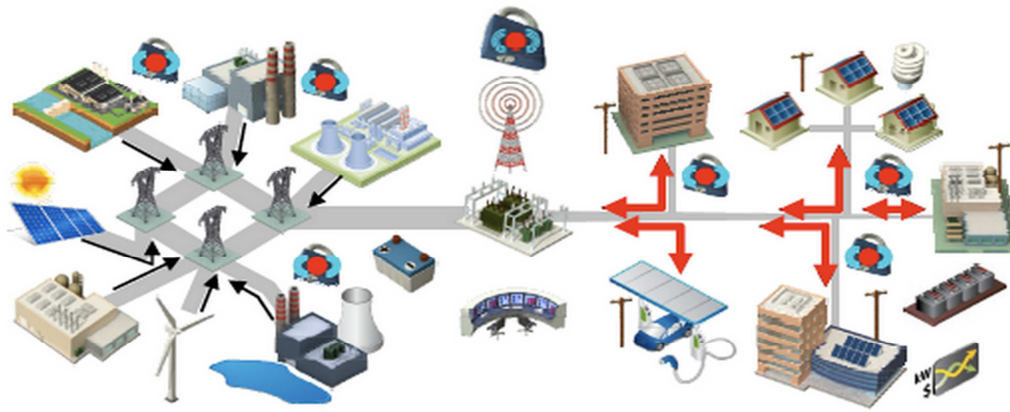
Verandering in het elektriciteitsnet

Vroeger: grote elektriciteitscentrales aangesloten op het transportnet voorzien het hele land van stroom (zie Figuur 8).



Figuur 8 elektriciteitsnet vroeger [20]

Nu: Decentralisatie van elektriciteitsproductie d.m.v. windmolens, zonnepanelen, WKK's. Deze injecteren elektrische energie in het distributienet dat oorspronkelijk ontworpen was om elektriciteit van de gecentraliseerde eenheden naar de verbruikers te brengen (zie Figuur 9).



Figuur 9 elektriciteitsnet net nu [20]

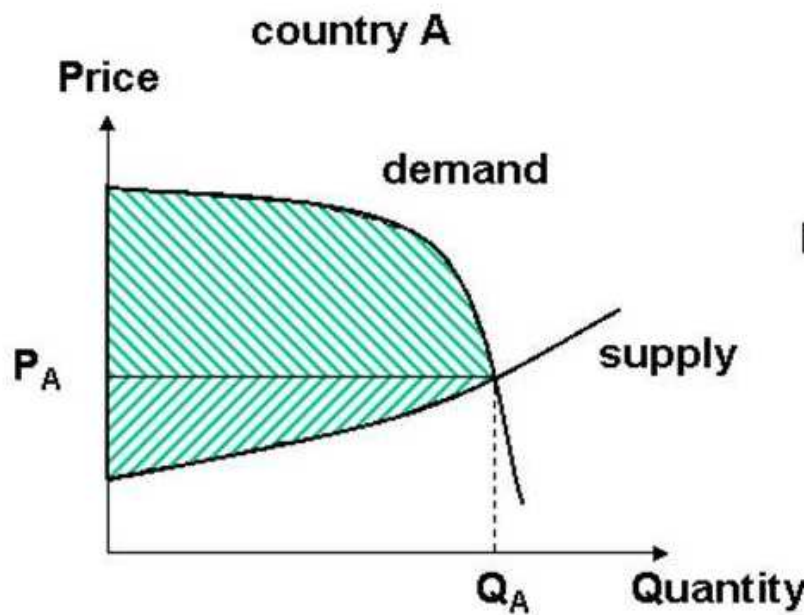
Voor een energie-efficiënter systeem zullen de verbruikers van morgen hun verbruik veel actiever moeten beheren. De dag van vandaag volgt de elektriciteitsproductie de vraag. In de nabije toekomst zal de vraag zich, in hoeverre het mogelijk is, aanpassen aan de elektriciteitsproductie. Elektriciteitsproductie zal groot zijn op momenten dat er veel wind en zon is en zal klein zijn indien er weinig wind en zon is. Het geheel van vraag en aanbod verandert continu en dient actueel op elkaar te worden afgestemd. Om een dergelijk systeem te realiseren moeten energieactoren signalen kunnen uitzenden die de huidige toestand op het net weergeven. Dit dient op 3 niveaus te gebeuren, toestand op het lokale net, op niveau van de lokale, nationale of internationale productie of over de specifieke toestand van een andere speler. Deze signalen, die men ook wel het prijssignaal noemt, worden vervolgens geïnterpreteerd door de verbruiker die op basis daarvan zijn profiel zal aanpassen.

Men kan dit systeem realiseren door middel van de zogenaamde 'slimme meters'. Echter stelt men zich vragen of dit zinvol is voor gezinnen en kmo's vanwege de kostprijs van de slimme meter.

3 Prijs elektriciteit

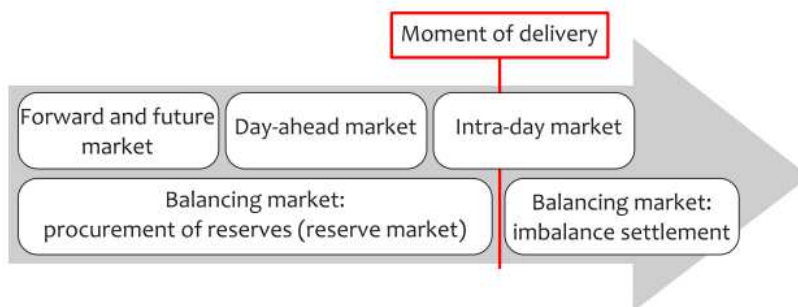
3.1 Prijsbepaling

De elektriciteitsprijs wordt bepaald op basis van vraag en aanbod. De vraagcurve wordt opgesteld aan de hand van hoeveel de gebruiker wilt betalen voor de elektriciteit. De aanbodcurve wordt bepaald aan de hand van hoeveel en welke producenten willen produceren tegen een bepaalde prijs (zie Figuur 10).



Figuur 10 Prijsbepaling elektriciteit vraag/aanbod [21]

In totaal zijn er drie verschillende soorten markten waarop elektriciteit verhandeld wordt [22]. De markten *Forward and future market*, *day-ahead market* en de *balancing market* werken op basis van vraag en aanbod. De *intra-day market* en de *imbalance market* werken op een ander principe. Figuur 11 geeft een overzicht van wanneer welke markt in werking treedt met als referentie het moment dat de elektrische energie geleverd wordt.



Figuur 11 de verschillende soorten markten [22]

Forward and future market

Op deze markt wordt elektriciteit verhandeld van jaren op voorhand tot de dag voor de levering.

De *future* (ook wel termijncontract) is een gestandaardiseerd contract tussen verbruiker en producent die overeenkomen om op een bepaald tijdstip een bepaalde hoeveelheid elektrische energie te leveren tegen een prijs die op voorhand bepaald is. De producent stelt zich op deze manier veilig tegen eventueel een dalende elektriciteitsprijs en de verbruiker stelt zich veilig tegen eventueel een stijgende elektriciteitsprijs. De termijncontracten kunnen verhandeld worden op de ICE Endex en de European Energy Exchange (EEX). De Forwards zijn niet gestandaardiseerde contracten tussen verbruiker en producent en worden in de meeste gevallen niet verder verhandeld.

Indien er elektriciteit verhandeld wordt tussen 2 verschillende zones moet er rekening gehouden worden met de capaciteit van de leidingen die de 2 zones met elkaar verbind. Voor de reservering van de capaciteit moet ook een vergoeding betaald worden. De marktpartijen zullen eerst capaciteit inkopen vooraleer ze elektriciteit gaan verkopen. Het verhandelen van de capaciteiten in centraal west Europa wordt georganiseerd door CASC.EU.

Day-ahead market

Op deze markt wordt elektriciteit verhandeld één dag voor de levering. Op het einde van de *day-ahead market* moet elke zone in evenwicht zijn. De *day-ahead market* voor België is de Belpex Day-Ahead Market (DAM). Het slot van de DAM sluit om 00u00 de dag op voorhand. Op de Belpex DAM worden energie en transmissiecapaciteit samen verhandeld. Momenteel is de Belpex DAM gekoppeld met Nederland, Luxemburg, Groot-Brittannië, Duitsland / Oostenrijk, Frankrijk, Noorwegen, Zweden, Finland, Denemarken, Estland, Polen, Portugal, Spanje, Letland, Estland en Litouwen.

Op het einde van de *day-ahead market* moet iedere BRP zijn portfolio voorleggen (ook wel nominaties genoemd) aan de regionale TSO (in België Elia). Dit moet de BRP doen voor 02u00 de dag op voorhand.

Intra-day market

Op deze markt wordt elektriciteit verhandeld op de dag van levering. Elke BRP kan *intra-day* nominaties op kwartierbasis indienen bij de regionale TSO van 15u30 de dag op voorhand tot 14u00 de dag na levering. Dankzij deze markt kunnen deelnemers wijzigingen aan *intra-day-ahead* nominaties aanbrengen. Wijzigingen kunnen zich voordoen door betere weersverwachtingen (meer zon, wind), het uitvallen van een grote verbruiker, enz..

Elektriciteit op de *intra-day market* wordt verhandeld op de Belpex Continuous Intra-day Market (CIM). De Belpex CIM is impliciet gekoppeld aan de Nederlandse *intra-day market* en expliciet met de Franse *intra-day market*. Een portfolio van een BRP kan na de *intra-day market*, in tegenstelling tot de *day-ahead market*, in onbalans zijn. Onevenwichten van dit portfolio worden behandeld in de *balancing market*.

Balancing market

Onevenwichten van BRP's is het netto verschil op kwartierbasis tussen de totale injecties en afnames. Omdat er een onbalans bestaat zal de regionale TSO reserves activeren. De hoeveelheid aan reserves geactiveerd door de TSO noemt men *Net Regulation Volume* (NRV), deze kan positief of negatief zijn. Bij een positieve NRV wordt er meer afgenomen dan er wordt geïnjecteerd. De TSO zal opwaartse reserves moeten aanspreken, d.w.z. meer injecteren of minder afnemen. Bij een negatieve NRV zullen er neerwaartse reserves worden aangesproken, d.w.z. minder injecteren of meer afnemen.

De *balancing market* bestaat uit een deel waar de reserves worden geactiveerd door de TSO en een deel waar de verrekening gebeurt. De verrekening van de onevenwichten wordt gebaseerd op twee prijzen: De "*Marginal Incremental Price*" (MIP) en de "*Marginal Decremental Price*" (MDP). De MIP is de hoogste prijs die de TSO heeft moeten betalen voor het opwaarts regelen van een kwartier. De MDP is de laagste prijs die de TSO heeft moeten betalen voor een neerwaartse regeling van een kwartier.

In het geval van een positieve NRV zal de TSO reserves aanspreken voor een opwaartse regeling. De duurste unit die Elia moet betalen voor een opwaartse regeling is de MIP.

In het geval van een negatieve NRV zal de TSO reserves aanspreken voor een neerwaartse regeling. In dit geval zijn er twee mogelijkheden:

- De TSO ontvangt een bepaald bedrag van een reserve die zijn productie wil verminderen (omdat ook de generatie kosten verminderen) of van reserve die hun verbruik willen vergroten.
- De TSO moet een bepaald bedrag betalen aan een reserve die zijn productie wil verminderen (omwille van een shut-down kost)

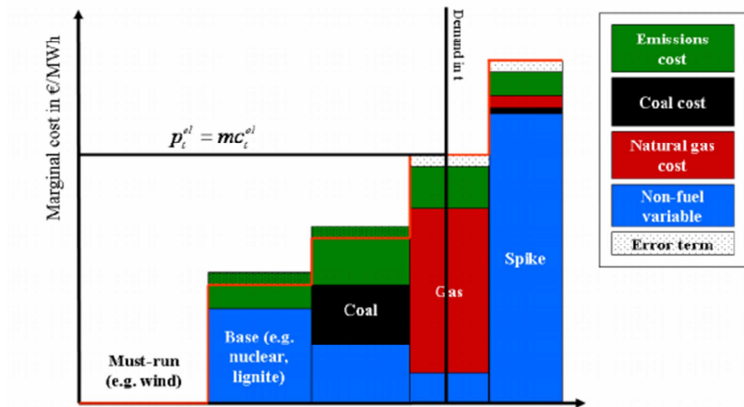
3.2 Keuze productie-eenheden

In de huidige, vrije elektriciteitsmarkt bepaalt de aanbodcurve welke elektriciteitsproductie eenheden zullen produceren. Er zijn 3 gevallen mogelijk:

- De verkoopprijs van de elektriciteit is hoger dan de variabele kosten van de productie-eenheid: De productie-eenheid maakt winst.
- De verkoopprijs van de elektriciteit is lager dan de variabele kosten van de productie-eenheid: De productie-eenheid draait op verlies.
- De verkoopprijs van de elektriciteit is gelijk aan de variabele kosten van de productie-eenheid: De productie-eenheid draait op *break-even*.

Het is mogelijk om de verscheidene productie-eenheden te rangschikken volgens variabele kosten. Op die manier is het mogelijk om het elektriciteitsproductieaanbod in functie van de elektriciteitsprijs uit te zetten. Zo weet men hoeveel vermogen men beschikbaar heeft voor een bepaalde prijs. Dit indien men ervan uitgaat dat men een productie-eenheid niet op verlies zal laten draaien.

Op Figuur 12 is te zien hoe de indeling in principe verloopt. Bij wind- en zonne-energie durft men stellen dat de variabele kost nul bedraagt. Dit is niet volledig correct aangezien de installaties slijtage oplopen bij gebruik. Wanneer er een evenwicht tussen vraag en aanbod is kan men de prijs bepalen. Des te groter het verschil tussen variabele kost en prijs per MWh des te groter de marge is om de vaste kosten van de productie-eenheid geheel of gedeeltelijk te dekken. En indien de marge groot genoeg is zelfs winst te maken [19].

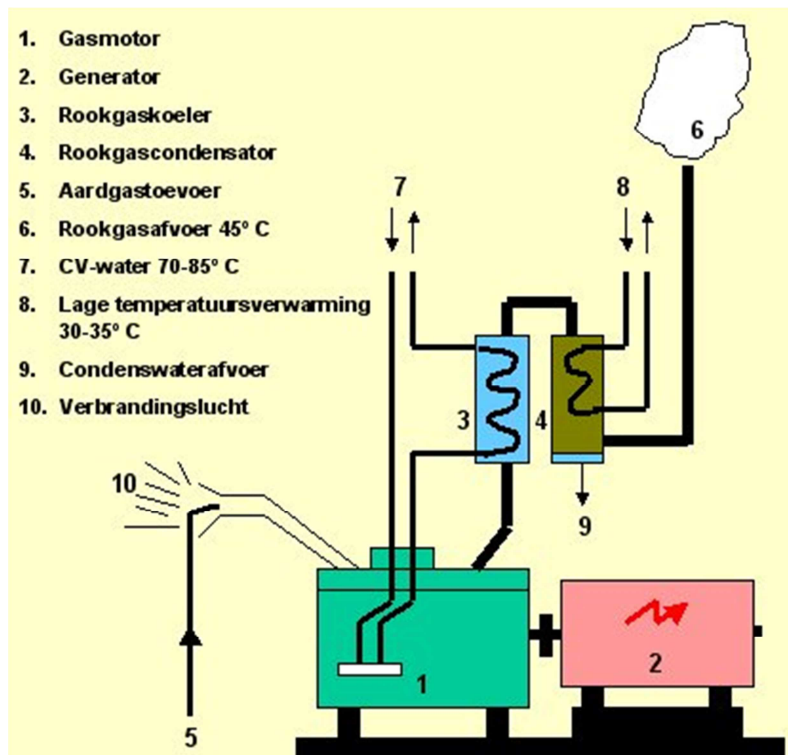


Figuur 12 Gestileerde weergave van de merit-order [23].

4 WKK

4.1 Werking

Een WKK of warmtekrachtkoppeling produceert gelijktijdig warmte en elektriciteit [24]. Aangezien warmte moeilijk te transporteren is zal de WKK installatie altijd bij de gebruiker geïnstalleerd staan. Bij het verbranden van brandstof komt er hoogwaardige warmte (+- 1200°C) vrij. Deze warmte wordt eerst gebruikt voor het produceren van mechanische energie. Deze mechanische energie wordt omgezet in elektriciteit via een alternator. Na deze omzetting blijft er laagwaardige restwarmte over. De laagwaardige restwarmte bevindt zich op een temperatuur tussen 80°C en 500 °C afhankelijk van de installatie. Deze restwarmte wordt gebruikt om te voldoen aan de warmtevraag. Dit kan zijn: verwarming, warm water, productie van stoom,....



Figuur 13 werkingsprincipe WKK [25]

4.2 Exergie en anergie

Een WKK wordt gedimensioneerd op warmtevraag [24]. De reden hiervoor is dat warmte niet gelijkwaardig is aan elektriciteit als energie. Er dient rekening gehouden te worden met de omzetbaarheid naar een andere vorm van energie. Dit duidt men aan met ‘exergie’ en ‘anergie’.

Exergie is het gedeelte energie dat volledig kan worden omgezet in een andere vorm van energie. Anergie is het gedeelte energie dat niet (meer) kan worden omgezet in een andere vorm van energie.

Elektriciteit bestaat volledig uit exergie. Ze kan dus volledig worden omgezet in andere vormen van energie zoals bv: warmte, mechanische energie,...

Warmte bestaat uit zowel exergie als anergie. Bij dalende temperatuur neemt het percentage anergie toe. Men kan deze warmte dus nog maar beperkt gebruiken. Dat is de reden waarom men een WKK op warmte dimensioneert. De warmte moet meteen nuttig gebruikt worden terwijl de elektriciteit terug op het net gestuurd kan worden.

4.3 Certificaten

4.3.1 Certificaten markt

Als eigenaar van een warmtekrachtkoppelinginstallatie ontvangt men warmtekrachtcertificaten en indien men gebruik maakt van hernieuwbare brandstof ook groene stroomcertificaten [26]. Deze certificaten kan men verkopen aan de energieleverancier tegen een prijs bepaald door de vrije markt. Om het bestaan van deze markt te ondersteunen worden energieleveranciers verplicht een bepaald aantal certificaten op te kopen. Indien er veel certificaten zijn uitgereikt aan eigenaars van WKK installaties zou door de marktwerking de prijs van de certificaten dalen. Dit zou een rechtstreekse invloed hebben op de economische rendabiliteit van de installaties. Om dit te voorkomen is er een minimumprijs vastgelegd door de overheid. De eigenaar kan zijn certificaten altijd verkopen aan de netbeheerder voor de minimumprijs. Zo is men instaat een economische rendabiliteitsplan te maken voor de WKK met een zekerheid voor de opbrengsten aan certificaten. Figuur 14 toont het principe van de marktwerking.



Figuur 14 principe marktwerking WKC's & GSC's [26]

4.3.2 Welke en hoeveel certificaten voor een WKK installatie

Bij een WKK installatie zijn er 2 mogelijke certificaten die men kan aanvragen afhankelijk van de gebruikte brandstof. Indien de WKK werkt op biogas of biodiesel kan men groenestroomcertificaat (GSC) en warmtekrachtcertificaat (WKC) aanvragen. Wanneer de WKK niet op biogas of biodiesel werkt kan men enkel de WKC aanvragen omdat er dan geen sprake is van groene stroom [27].

Voor WKK-installaties is volgende minimumsteun van toepassing (waarneming op 20/04/2015):

- 93 euro per GSC
- 27 euro per WKC

Tot het jaar 2013 kreeg men voor elke MWh_{el} die men produceerde 1 WKC. Sinds 1 januari 2013 zal het aantal WKC's die men krijgt afhangen van een bandingfactor.

$$\#WKC's = \text{bandingfactor} * \text{primaire energiebesparing (MWh)}$$

Bandingfactor

De bandingfactor is afhankelijk van het type WKK en de grootte van die WKK. Deze factor wordt als volgt berekend:

$$\text{bandingfactor} = \frac{\text{onrendabele top}}{\text{bandingdeler}}$$

- Onrendabele top geeft aan hoeveel euro per MWh_{el} nodig is om de geïnstalleerde installatie rendabel te maken over de geplande levensduur. Op dit moment zijn er 8 categorieën vastgelegd. Deze categorieën verschillen op basis van vermogen en technologie.
- De bandingdeler komt overeen met de verwachte marktwaarde van een certificaat. Voor een WKC is dit 27 euro en voor een GSC is dit 93 euro (waarneming op 20/04/2015).

De bandingfactor zal nooit meer als 1 bedragen. Dit wil zeggen dat er dus nooit meer als 1 certificaat kan worden toegekend per MWh_{el} primaire energiebesparing. Het Vlaamse Energieagentschap zal de bandingfactoren berekenen en zo wordt bepaald hoeveel certificaten de beheerder van de WKK ontvangt.

Primaire energiebesparing

Om te weten hoeveel financiële steun wordt gegeven door de overheid is het nodig om het aantal certificaten te kennen [28]. Om dit aantal te weten is het nodig om de absolute primaire energiebesparing van een installatie te berekenen. De formule om deze primaire energiebesparing over een maand te bepalen is de volgende [29]:

$$PEB = E * \left(\frac{1}{\eta_{refE}} + \frac{\eta_Q}{\eta_E * \eta_{refQ}} - \frac{1}{\eta_E} \right)$$

Hierbij is (waarneming 20 mei 2015):

- E de hoeveelheid elektriciteit (MWh_{el}) die op jaarbasis door de WKK-installatie wordt geproduceerd
- η_Q is het thermisch rendement van de WKK-installatie
- η_{refQ} is het thermisch rendement van de referentieketel
 - o 90% voor stoom en warm water
 - o 93% voor warme lucht
 - o 500% voor productie van koude lucht
- η_E is het elektrisch rendement van de WKK-installatie
- η_{refE} is het elektrisch rendement van de referentiecentrale
 - o 55% voor HS
 - o 50% voor LS
 - o Indien er gebruikt wordt gemaakt van RES:
 - 42,7% voor vloeibare biobrandstoffen zoals PPO
 - 42% voor biogas
 - 34% voor hout en houtafval

4.4 verschillende types WKK

Onafhankelijk van de soort brandstof zijn er acht grote types WKK installatietjes [30]:

- Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met stoomturbines
- Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met gasturbines
- Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met zuigermotoren met inwendige verbranding
- Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met gecombineerde cyclus
- Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met brandstofcellen
- Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met stirlingmotoren
- Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met microturbines
- Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met Organic Rankine Cycle

De grotere WKK's die in België het meest voorkomen zijn de warmtekrachtkoppelingsinstallaties met stoomturbines, gasturbines, gecombineerde cyclus en zuigermotoren met inwendige verbranding [26]. De twee WKK's geïnstalleerd op de UC Leuven-Limburg zijn een WKK met gasturbine en een WKK met een verbrandingsmotor. Deze twee WKK's worden verder bestudeerd.

4.4.1 warmtekrachtkoppelingsinstallatie met gasturbine

De warmtekrachtkoppelingsinstallatie met gasturbine bestaat uit een compressor, een verbrandingskamer, een gas turbine en een boiler voor warmterecuperatie.

Werkingsprincipe:

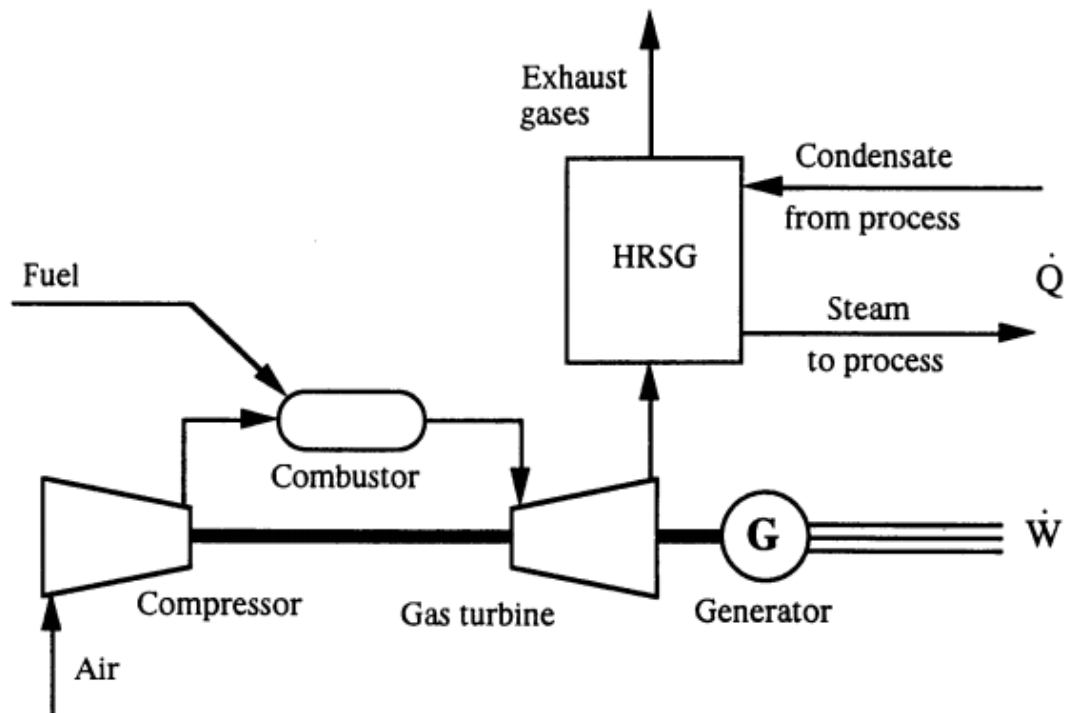
Lucht wordt samengedrukt doormiddel van een compressor en naar de verbrandingskamer geleid (Figuur 15). In de verbrandingskamer wordt brandstof geïnjecteerd waar ze op constante druk verbrand wordt. De hete gassen worden naar de gasturbine geleid waar de thermische energie wordt omgezet in mechanische energie. Deze mechanische energie wordt gebruikt voor het aandrijven van een compressor en een generator. De generator zet vervolgens de mechanische energie om in elektrische energie. De uitlaatgassen verlaten de gasturbine op een temperatuur van ongeveer 450 tot 600°C. Bij deze temperaturen is het mogelijk om warmterecuperatie te doen. De warmterecuperatie gebeurt door middel van een boiler (HRSG, Heat Recovery Steam Generator op Figuur 15).

Eigenschappen:

- Maximale temperatuur bedraagt ongeveer 1300°C
- Uitgaand vermogen meestal van 2 MW tot 100 MW
- Installatieperiode voor gasturbines met een vermogen tot 7MW_{el} ongeveer 9-14 maanden
- Levensduur van de installatie sterk afhankelijk van kwaliteit van de brandstof en onderhoud.

Voordelen:

- hoge beschikbaarheid
- mogelijkheid tot gebruik van verschillende brandstoffen
- hoge kwaliteit van warmte
- snel en goedkoop onderhoud
- lage installatiekost
- groot rendement bij grote afmetingen



Figuur 15 warmtekrachtkoppelingsinstallatie met gasturbine in open cyclus [30]

4.4.2 warmtekrachtkoppelingsinstallatie met zuigermotoren met inwendige verbranding

De warmtekrachtkoppelingsinstallatie met zuigermotoren met inwendige verbranding bestaat uit een verbrandingsmotor en een warmterecuperatie mechanisme. Men kan deze het best vergelijken met een motor van een auto waarbij de warmte nuttig gebruikt wordt.

Werkingsprincipe:

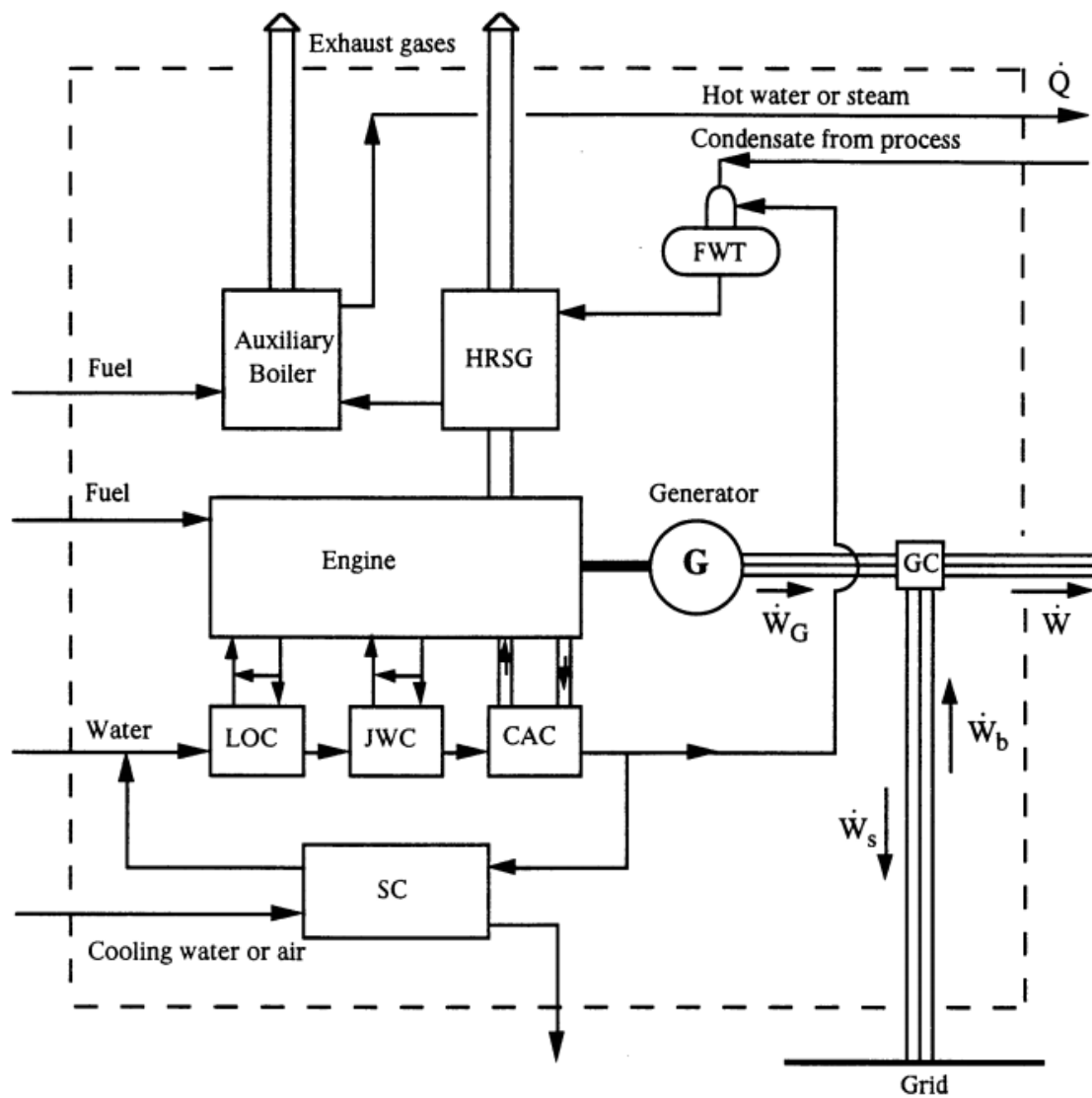
Deze cyclus baseert zich op het principe van de Otto cyclus of Diesel cyclus. De Ottomotoren kunnen werken met een groot aantal verschillende brandstoffen: benzine, aardgas, biogas, methaan,.... Deze motoren worden vaak 'gasmotoren genoemd'. De dieselmotoren werken op hogere drukken en hogere temperaturen. Bij deze motoren worden daarom zwaardere brandstoffen gebruikt: diesel, olie, fuel olie en residuele fuel bij tweetaktmotoren.

Eigenschappen:

- vermogen gebied: 75kW tot 50 MW
- beschikbaarheid 80-90%

Nadelen:

- uitstoot NO_x & SO_x
- veel lawaai
- hoge onderhoudskosten



LOC: lubricating oil cooler
 JWC: jacket water cooler
 CAC: charge air cooler

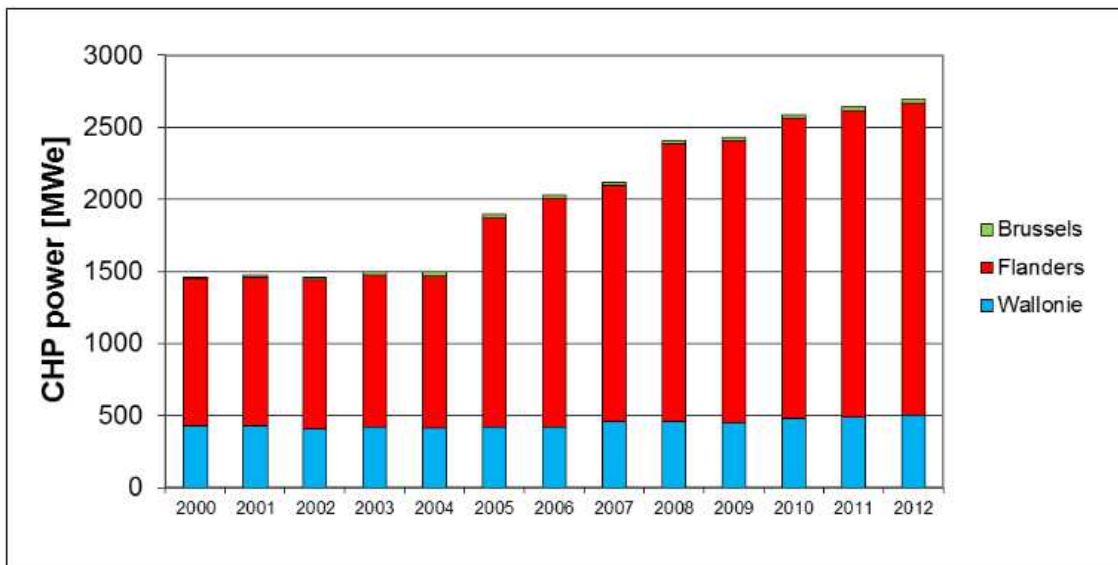
SC : supplementary cooler
 FWT : feedwater tank
 GC : grid connection

Figuur 16 warmtekrachtkoppelinginstallatie met zuigermotor met inwendige verbranding [30]

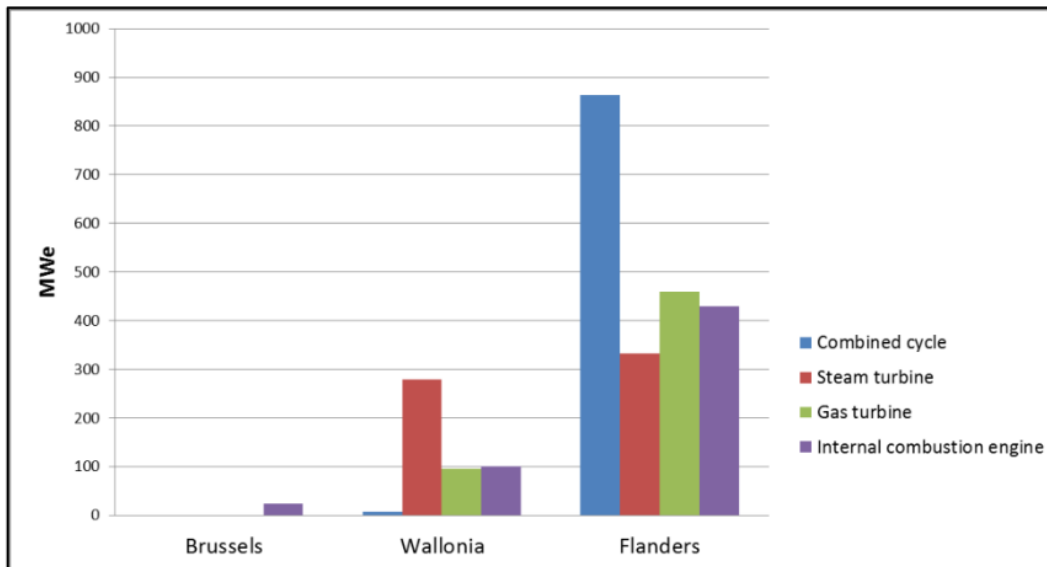
5 WKK in het Belgische elektriciteitsnet

5.1 evolutie geïnstalleerd WKK vermogen

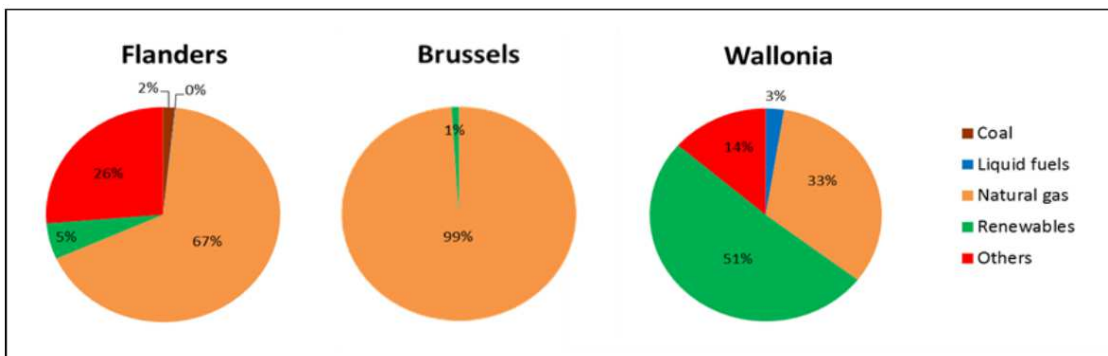
Figuur 17 geeft de evolutie weer van het geïnstalleerd elektrisch WKK vermogen in België [26]. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de drie regio's in België, namelijk: Brussel, Vlaanderen en Wallonië. Sinds 2005 is er in Vlaanderen een merkbare stijging van het geïnstalleerd vermogen. Dit valt te verklaren doordat er in 2005 de WKC's werden ingevoerd. Dit heeft geleid tot een groei van het geïnstalleerd elektrisch vermogen geleverd door WKK's tot 2700 MW in 2012. Figuur 18 geeft weer welk type WKK er respectievelijk geïnstalleerd is in Brussel, Wallonië en Vlaanderen. Figuur 19 geeft weer welke brandstof er respectievelijk gebruikt wordt in Vlaanderen Brussel en Wallonië voor de werking van de WKK.



Figuur 17 Het geïnstalleerd elektrisch WKK vermogen in België (2000-2012) [26]



Figuur 18 Type WKK geïnstalleerd in Brussel, Wallonië en Vlaanderen (2010) [26]



Figuur 19 Gebruikte brandstof WKK in Vlaanderen, Brussel en Wallonië (2010) [26]

Wat opvalt uit deze grafieken is dat er in Vlaanderen het merendeel aan elektrisch vermogen door WKK's geïnstalleerd is t.o.v. Brussel en Wallonië. Het grootste deel van de WKK's werken op aardgas. Wat verder opvalt is dat er in Wallonië het meest gebruik gemaakt wordt van hernieuwbare energiebronnen voor het functioneren van de WKK's.

5.2 WKK geïntegreerd in een smart grid

WKK's hebben een aantal voordelen indien ze verbonden worden met een elektriciteitsnet. Ze werken synchroon met elektriciteitsvraag en warmtevraag [26]. Indien er een buffertank voor de warmteproductie geïnstalleerd is zijn ze zeer flexibel. Ze werken complementair met pv-panelen en wind energie. Echter op deze vlakken, de integratie van de WKK in een SmartGrid, dient er nog verder onderzoek te gebeuren.

Warmtekrachtkoppelingen worden reeds gebruikt voor flexibele productie van stroom. WKK installaties met een buffering capaciteit voor de warmte zijn in staat de elektriciteitsprijs te volgen. Ze produceren bij hoge elektriciteitsprijs, dus bij grote vraag naar elektrische energie. Het is op deze manier dat WKK's een belangrijke rol kunnen spelen bij de virtuele elektriciteitscentrales. Op kleinere schaal zou men doormiddel van *smart metering* binnen een *smart grid* de WKK's kunnen gebruiken om aan de elektriciteitsvraag te voldoen.

6 Warmtebuffering

Warmtebuffering kan men realiseren doormiddel van een warmtebuffer. Een voorbeeld van een warmtebuffer is een vat gevuld met water. Men kan een warmtebuffer installeren om verscheidene redenen zoals:

- het combineren van hoge en lage temperatuur circuits
- het opslaan van warmte
- ...

De theoretisch hoeveelheid energie die men kan opslaan in een warmtebuffer op water is afhankelijk van het volume water. Zuiver water heeft een soortelijke warmte van $4190 \frac{J}{kg \cdot K}$.

Indien men 1 kg zuiver water met 1 kelvin wil doen toenemen is daarvoor 4190 Joule aan energie nodig. De dichtheid is afhankelijk van de temperatuur maar in de berekeningen wordt voor de eenvoud aangenomen dat deze $1000 \frac{kg}{m^3}$ bedraagt. Omdat men vaak met kWh rekent is het interessant om te bepalen hoeveel kWh men nu kan opslaan. Hiervoor dient men eerst te berekenen hoeveel Joule 1 kWh is.

$$1 kWh = 1000 \frac{J}{s} * 1h$$

$$1000 \frac{J}{s} * 3600 s = 3\,600\,000 J$$

$$1 kWh = 3\,600\,000 J$$

Indien men 1 kWh energie wil opslaan in de buffer zal dit een temperatuursverhoging van het water in de buffer tot gevolg hebben. Hoeveel de temperatuur zal stijgen is afhankelijk van de hoeveelheid water. Volgens een afgeleide van de eerste hoofdwet van de thermodynamica geldt:

$$Q = m * C * \Delta T$$

Waarbij:

- Q = hoeveelheid warmte in J
- m = massa vloeistof in kg
- C = warmtecapaciteit in J/(kg*K)
- ΔT = temperatuurverschil in K

Een voorbeeld:

Indien we 1 kWh warmte willen opslaan in een buffer van 1000 liter dat zich op 30°C bevindt, hoeveel zal de temperatuur dan stijgen?

$$Q = m * C * \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{Q}{m * C}$$

$$\Delta T = \frac{3\,600\,000 J}{1000 kg * 4190 \frac{J}{kg * K}} = 0,86 K$$

De temperatuur van het water zal stijgen met 0,86 K. Het water zal zich na het toevoegen van 1 kWh energie op een temperatuur van 30,86 °C bevinden.

7 Methode en resultaten

De WKK's die gebruikt worden zijn uitgerust met sensoren om onderzoek naar de WKK te kunnen doen in verschillende situaties. Zo zijn we instaat volgende parameters continu te meten:

- Gasdebiet
- Waterdebiet
- Watertemperatuur aan de ingang
- Watertemperatuur aan de uitgang
- Temperatuur van de vlam
- Elektriciteitsproductie

Aangezien de energie-inhoud van het gas gekend is, is het mogelijk met behulp van het gasdebiet de energie input te berekenen.

$$\text{gasdebiet} \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \text{energieinhoud gas} \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3} = \text{energie inpput} \frac{\text{Wh}}{\text{h}} = P_{gas} W$$

Met behulp van de watertemperatuur aan de in- en uitgang en het waterdebiet wordt de hoeveelheid nuttig toegevoerde warmte berekend.

$$P_{th} = \frac{Q}{\Delta t}$$

$$Q = m * C * \Delta T$$

$$P_{th} = \frac{m * C * \Delta T}{\Delta t}$$

Waarbij:

- P_{th} = vermogen aan geproduceerde nuttige warmte in W
- Q = de warmte hoeveelheid in J
- C = warmtecapaciteit van water in $\frac{J}{\text{kg} * K}$
- ΔT = temperatuurverschil van het water tussen in- en uitgangstemperatuur in °C of K
- m = massa water in kg
- Δt = tijdseenheid in s
- $m/\Delta t$ = massadebiet water in kg/s

Met de elektriciteitsproductie en bovenstaande gegevens gekend is het mogelijk de verschillende rendementen van de WKK te bepalen.

Het thermisch rendement wordt bepaalt door:

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_{gas}}$$

Het elektrisch rendement wordt bepaald door:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{gas}}$$

Het totale rendement wordt bepaald door:

$$\eta_{WKK} = \eta_{th} + \eta_{el}$$

7.1 Prijs efficiënt sturen van de WKK

De gas WKK die op i-NET geïnstalleerd staat kan op drie manieren worden ingezet om de totale elektriciteitsfactuur te doen dalen. Een eerste manier is om de WKK te laten functioneren indien er een warmtevraag is. De WKK produceert zowel warmte als stroom. Hierdoor wordt de totale hoeveelheid aan elektriciteit die aangekocht wordt teruggebracht evenredig met de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit. Het resultaat is dat men minder elektriciteit aankoopt en zo minder moet betalen. Dit is hoe momenteel de WKK's in gebruik worden genomen.

Een tweede manier is om de WKK niet enkel te gebruiken bij warmtevraag maar ook om het piekverbruik te verminderen. Concreet wil dit zeggen dat de WKK zal functioneren wanneer er een relatief groot elektriciteitsverbruik is ongeacht er een warmtevraag aanwezig is. Indien er geen warmtevraag is zal het retourwater dat de WKK verwarmt een hogere temperatuur bezitten. Het gevolg hiervan is dat het rendement van de WKK zal dalen. Hierbij moet men onderzoeken welke temperatuur het water mag bezitten opdat het nog rendabel is de WKK te gebruiken voor stroomproductie.

Een derde manier is de WKK in te zetten om het net in evenwicht te houden. Dit kan gerealiseerd worden door de WKK aan te bieden aan een aggregator. De aggregator zal op zijn beurt verschillende stroomaggregaten samennemen en het gecombineerde vermogen beschikbaar stellen aan Elia. De eigenaar van de WKK krijgt op zijn beurt een *stand-by* vergoeding. Belangrijk bij deze manier van werken is dat men het vermogen ook effectief beschikbaar moet kunnen stellen indien men daar om vraagt. Concreet betekent dit dat indien de WKK in *stand-by* modus staat ze in geen geval mag functioneren, er zal dus geen stroomproductie plaatsvinden in de *stand-by* modus. Hierbij moet worden onderzocht of het economisch verlies aan niet geproduceerde stroom gecompenseerd kan worden door de vergoeding die men verkrijgt.

Er wordt telkens uitgegaan van het feit dat er een WKK ter beschikking is. Vervolgens wordt beredeneert wat de economisch voordeligste manier is om de WKK in te zetten. De aankoop prijs van de WKK heeft hierbij dus geen belang, aangezien deze reeds aanwezig is.

7.2 Verbruik UC Leuven-Limburg

In eerste instantie is het noodzakelijk een analyse te maken van het huidige verbruik. Hierbij dient men rekening te houden dat zowel het elektriciteitsverbruik als het gasverbruik van jaar tot jaar verschilt. De reden hiervoor is dat het verbruik weersafhankelijk is. Een jaar waarin zich een strenge winter heeft voorgedaan zal een hoger verbruik als resultaat hebben dan wanneer er zich een zachte winter voordoet. Echter om een WKK te dimensioneren en het aantal draaiuren te bepalen moet men zich kunnen baseren op het verbruik van voorgaande jaren.

De overdracht van warmte door geleiding wordt beschreven volgens de Wet van Fourier.

$$\frac{J_x}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

Waarbij:

- J_x = de warmtestroom volgens de x-richting uitgedrukt (W)
- S = oppervlakte (m^2)
- λ = warmtegeleidingscoëfficiënt ($\frac{W}{m \cdot K}$)
- $\frac{dT}{dx}$ = temperatuurgradiënt ($\frac{K}{m}$)

Indien er geen aanpassingen aan het gebouw worden uitgevoerd zoals plaatsten van isolatie e.d. dan kan men stellen dat zowel de oppervlakte als de warmtegeleidingscoëfficiënt niet zal veranderen. De grootte van de warmtestroom door geleiding wordt zo enkel bepaald door het temperatuurverschil. Hieruit kan men besluiten dat het temperatuurverschil de drijvende kracht is achter het verlies van warmte door geleiding in een gebouw.

Het gebouw van de UC Leuven-Limburg wordt verwarmt doormiddel van gas. Een manier om het warmteverbruik in te schatten is dit verbruik te linken aan de graaddagen van een maand.

Graaddagen zijn een maat voor de koude in een periode [31]. Algemeen wordt hierbij veronderstelt dat men begint te verwarmen indien de gemiddelde dagtemperatuur lager is dan $16,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Indien de gemiddelde dagtemperatuur hoger dan $16,5 \text{ }^\circ\text{C}$ bedraagt wordt de graaddag gelijk gesteld aan 0.

$$GD = 16,5 - T_{gem}$$

GD = graaddagen

T_{gem} = gemiddelde dag temperatuur

Omdat een gebouw thermische inertie bezit wordt er rekening gehouden met de temperatuur van de twee voorgaande dagen. Dit wordt de equivalente graaddag genoemd.

$$GD_{eq} = 0,6 * GD_D + 0,3 * GD_{D-1} + 0,1 * GD_{D-2}$$

GD_{eq} = equivalente graaddag

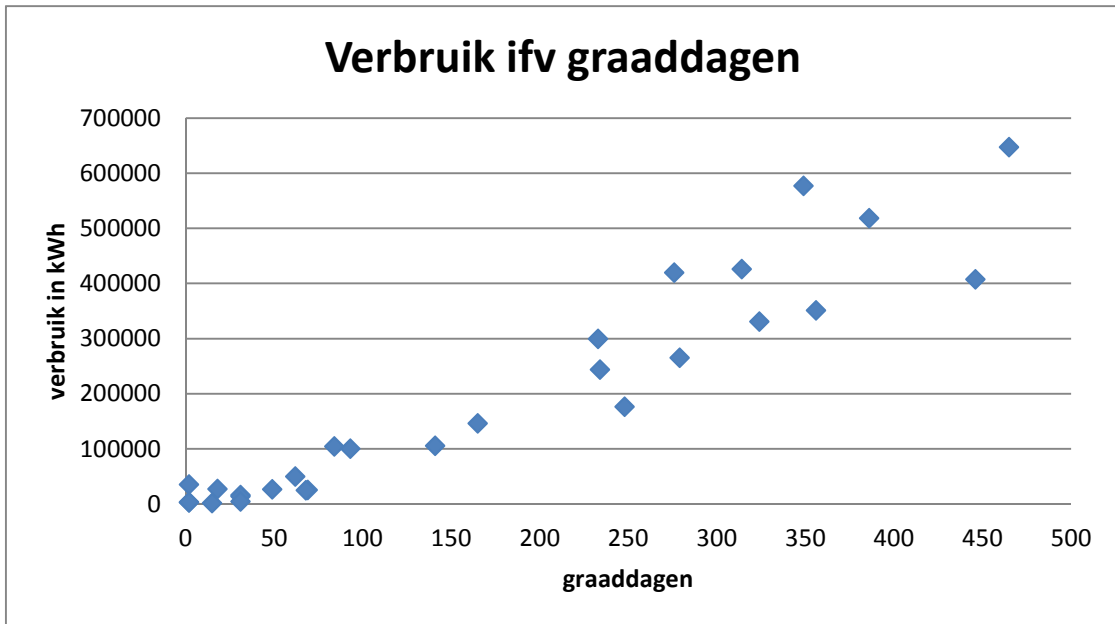
GD_D = graaddag van de dag zelf

GD_{D-1} = graaddag van de dag ervoor

GD_{D-2} = graaddag van 2 dagen ervoor

De equivalente graaddagen voor een maand bekomt men door de equivalente graaddagen van elke maand op te tellen.

Het verbruik van de UC Leuven-Limburg in correlatie met de graaddagen levert Figuur 20.



Figuur 20 verbruik ifv graaddagen

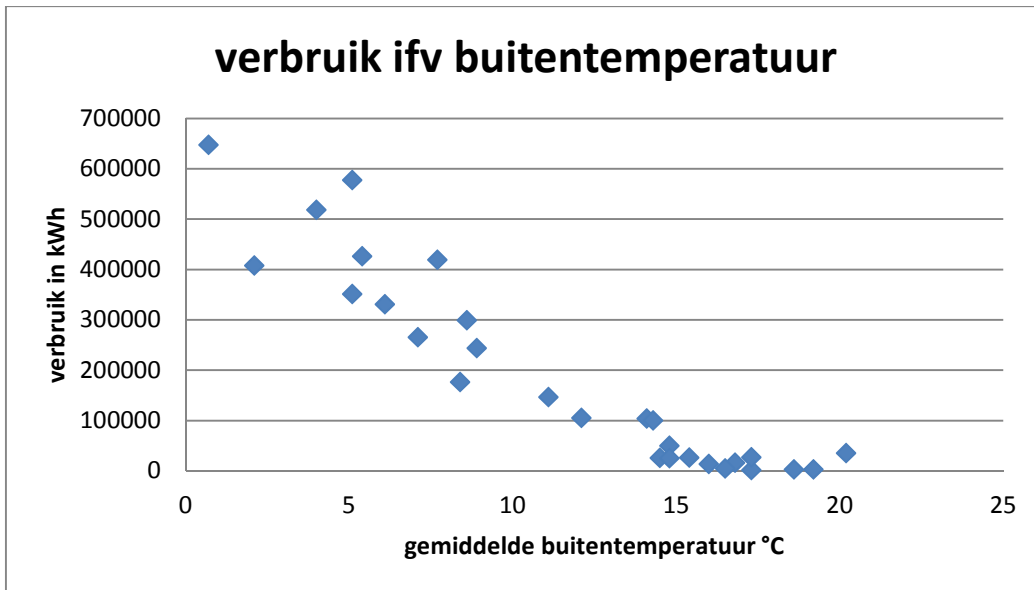
In Figuur 20 kan men het lineair verband opmerken tussen het verbruik en de graaddagen. Lineaire regressie toegepast op deze gegevens leert het volgende verband tussen verbruik en graaddagen:

$$W = 1256,4 * GD - 23086$$

Waarbij:

- W = verbruik in kWh
- GD = het aantal graaddagen

Een andere benadering om het verbruik te schatten is op basis van de buitentemperatuur. Toegepast op de UC Leuven-Limburg geeft dit Figuur 21.



Figuur 21 verbruik ifv buitentemperatuur

Lineaire regressie hierop toegepast levert volgende formule:

$$W = -\frac{10^5}{3} * T + 554167$$

waarbij:

- T = buitentemperatuur in °C
- W = verbruik in kWh

Wat uit Figuur 21 ook opgemerkt kan worden is dat het verbruik nagenoeg 0 bedraagt bij 16,5 °C. Dit is hetgeen werd verondersteld bij het gebruik van de graaddagen.

7.3 Opbrengst normaal gebruik WKK

Met behulp van de formule voor het verbruik is het mogelijk het verbruik te voorspellen op basis van de gemiddelde graaddagen. Op deze manier is het mogelijk een WKK te dimensioneren alsook de draaiuren te voorspellen. Op basis van het gevraagd thermisch vermogen en het thermisch vermogen van de WKK zijn er drie mogelijke scenario's:

Scenario1: Het gevraagde thermisch vermogen is kleiner dan het thermisch vermogen van de WKK. In dit geval is de WKK altijd in staat de hoeveelheid gevraagde warmte te leveren. De WKK zal echter niet continu draaien. Immers, indien de WKK continu zou draaien dan wordt er meer thermische energie toegevoerd dan er gevraagd is en zal de temperatuur in het gebouw groter worden dan de gevraagde temperatuur. Opdat de toegevoerde energie gelijk zou zijn aan de gevraagde energie moet volgende vergelijking gelden:

$$P_{gevr} * t_{gevr} = P_{gel} * t_{gel}$$

Met:

- P_{gevr} = het gemiddelde gevraagde thermisch vermogen in Watt
- t_{gevr} = de tijdspanne waarover het gemiddelde vermogen gevraagd werd in seconden
- P_{gel} = het thermisch vermogen van de WKK in Watt
- t_{gel} = het aantal draaiuren van de WKK in seconden

Het aantal draaiuren van de WKK kan dan bepaald worden met volgende formule:

$$t_{gel} = \frac{P_{gevr} * t_{gevr}}{P_{gel}}$$

Scenario2: Het gevraagde thermisch vermogen is gelijk aan het thermisch vermogen van de WKK. In dit geval zal de WKK continu draaien. Er heerst een evenwicht tussen het gevraagde thermisch vermogen en het geleverde thermisch vermogen. In dit geval zal er geen extra cv-ketel moeten bijschakelen om de temperatuur in het gebouw te behouden. Hier geldt:

$$t_{gev} = t_{gel}$$

Scenario3: Het gevraagde thermisch vermogen is groter dan het thermisch vermogen van de WKK. In dit geval zal de WKK continu draaien. Echter aangezien het geleverde thermisch vermogen van de WKK kleiner is dan het gevraagde thermisch vermogen zal de temperatuur in het gebouw niet behouden kunnen blijven en dalen. Indien men de temperatuur constant wil houden is het noodzakelijk de een extra warmtebron te voorzien. Dit kan men op verschillende manieren realiseren. Hetgeen men bij de UC Leuven-Limburg heeft voorzien zijn cv-ketels die in cascade staan. Indien de WKK niet instaat is om voldoende thermische energie te leveren worden deze ketels aangestuurd zodat de totale hoeveelheid geleverde thermische energie gelijk is aan de totale gevraagde hoeveelheid thermische energie.

Gas WKK UC Leuven-Limburg

De gegevens van de gas WKK op de UC Leuven-Limburg zijn weergegeven in Tabel 1.

Algemene gegevens gas WKK		
P_{th}	80	kW
P_{el}	50	kW
η_{th}	54,1	%
η_{el}	33,8	%
draaiuren	6.904	uur/jaar
Brandstofverbruik	148	kWh/h
Brandstofprijs	0,05	€/kWh
elektriciteitsprijs	0,20	€/kWh
onderhoud	1	€/uur

Tabel 1 Algemene gegevens gas WKK

De algemene gegevens van de gas WKK zijn opgegeven door de fabrikant. De onderhoudskost is een richtwaarde en kan variëren afhankelijk van het onderhoudscontract [32].

Het aantal draaiuren wordt bepaald door het thermisch vermogen van de WKK en de gemiddelde buitentemperatuur. In eerste instantie zal er gebruik gemaakt worden van de graaddagen.

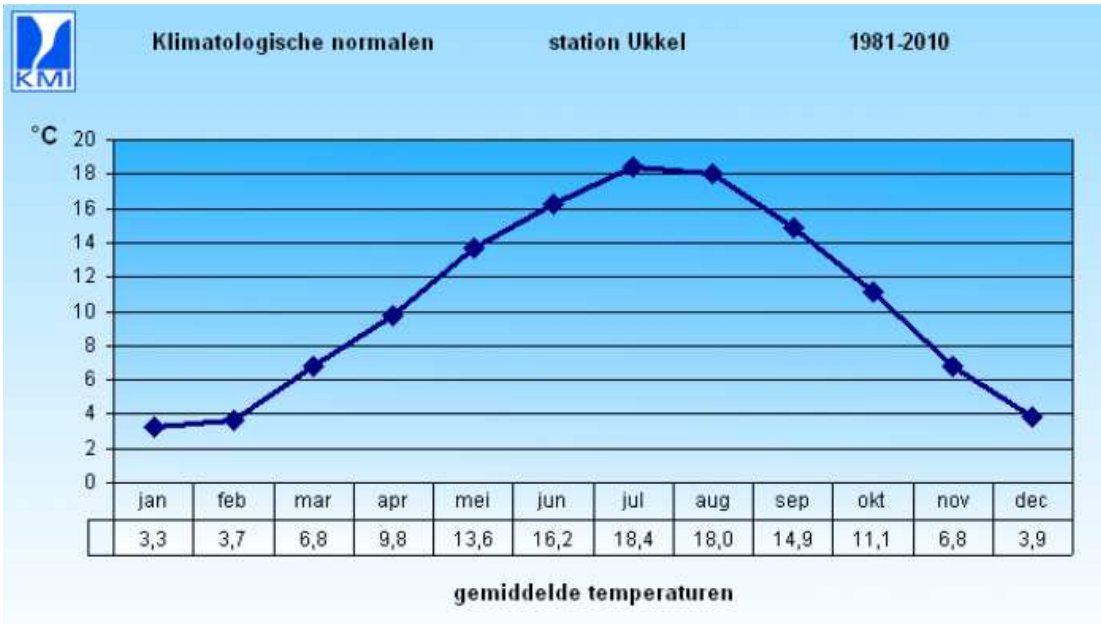
Het gemiddeld aantal graaddagen (GD) per maand zijn terug te vinden via de aardgasconfederatie [31]. Dit zijn de gemiddelde normale equivalente graaddagen van de jaren 1981-2010. Het gemiddeld verbruik in kWh wordt berekend met volgende formule:

$$\text{gem kWh} = 1256,4 * \text{GD} - 23086$$

Hieruit wordt het gemiddeld gevraagd vermogen berekend in kW.

$$\text{gem kW} = \frac{\text{gem kWh}}{\text{aantal dagen} * 24 \text{ h}}$$

Hetzelfde wordt gedaan maar dan in functie van de gemiddelde buitentemperatuur per maand. De gemiddelde buitentemperatuur per maand is beschikbaar op de site van het KMI.



Figuur 22 gemiddelde jaartemperatuur 1981-2010 [33]

De klimatologische normalen voor gemiddelde temperaturen worden gebruikt voor de berekening van de draaiuren van de WKK. De berekening van het gemiddelde verbruik op basis van de gemiddelde temperatuur wordt bekomen met volgende formule:

$$W = -\frac{10^5}{3} * T + 537167$$

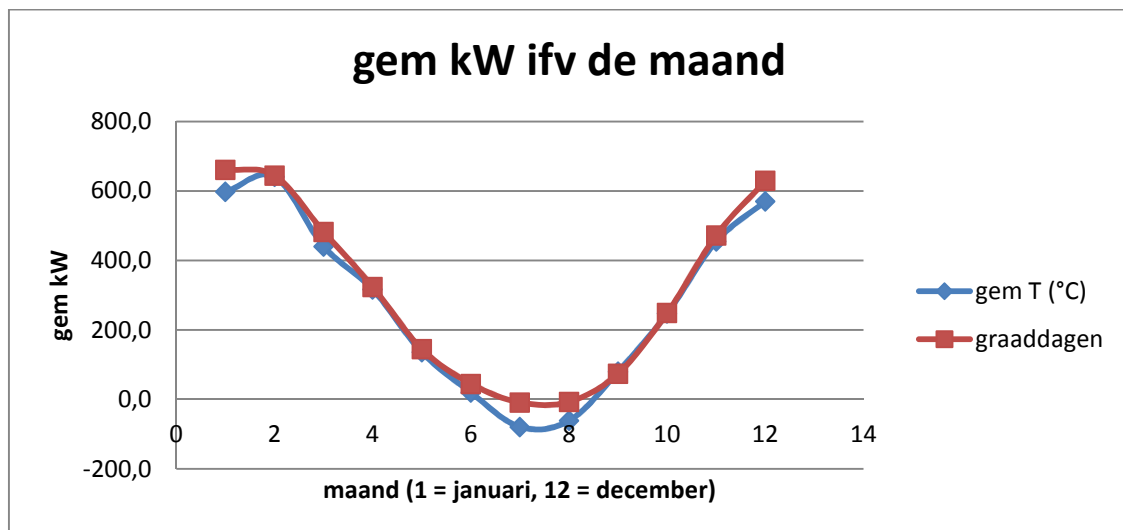
Met:

- W = gevraagd thermisch vermogen (kW_{th})
- T = buitentemperatuur (°C)

Verder wordt er een vergelijking gemaakt tussen de twee methodes. Het resultaat is terug te vinden in Tabel 2 en Figuur 23.

maand	op basis van gem T			op basis van graaddagen		
	gem T (°C)	gem kWh	gem kW	graaddagen	gem kWh	gem kW
januari	3,3	444167,0	597,0	410	492038	661,3
februari	3,7	430833,7	641,1	363	432987,2	644,3
maart	6,8	327500,3	440,2	304	358859,6	482,3
april	9,8	227500,3	316,0	204	233219,6	323,9
mei	13,6	100833,7	135,5	104	107579,6	144,6
juni	16,2	14167,0	19,7	44	32195,6	44,7
juli	18,4	-59166,3	-79,5	13	-6752,8	-9,1
augustus	18,0	-45833,0	-61,6	14	-5496,4	-7,4
september	14,9	57500,3	79,9	61	53554,4	74,4
oktober	11,1	184167,0	247,5	166	185476,4	249,3
november	6,8	327500,3	454,9	289	340013,6	472,2
december	3,9	424167,0	570,1	391	468166,4	629,3

Tabel 2 gemiddeld verbruik op basis van gemiddelde temperatuur en graaddagen



Figuur 23 vergelijking op basis van gem T of graaddagen

Met:

- Gem T: dit is de klimatologisch gemiddelde maandtemperatuur in °C
- graaddagen: het aantal graaddagen van de betreffende maand
- gem kWh: dit is de verwachte warmtevraag bij de klimatologisch gemiddelde maandtemperatuur in kWh
- gem kW: dit is het verwachte gemiddelde vermogen gedurende de overeenkomstige maand

Wat opvalt in Tabel 2 is dat in de maanden juli en augustus het vermogen negatief is. Dit komt in de werkelijkheid overeen met het afvoeren van warmte uit het gebouw. Juli en augustus zijn relatief warme maanden en de warmte die zal worden toegevoerd deze maanden zal relatief klein zijn. Voor verdere berekeningen beschouwen we dat de WKK gedurende deze maanden niet zal draaien.

In Figuur 23 ziet men dat de twee manieren van benadering nagenoeg hetzelfde resultaat levert. Desalniettemin kan geconcludeerd worden dat het verbruik op basis van graaddagen meer overeenstemt met de realiteit dan op basis van de gemiddelde temperatuur. Dit omdat negatief vermogen in de maanden juli en augustus niet correct is. Verdere berekeningen zullen bijgevolg gebruik maken van de resultaten op basis van de graaddagen.

Gas WKK

Gedurende de maanden juni en september is het gevraagde vermogen kleiner dan het thermisch vermogen van de WKK (WKK: 80 kW_{th}). In dit geval is de WKK in staat de gevraagde warmte volledig zelf te leveren. Het aantal draaiuren van de WKK zal berekend worden met de formule:

$$t_{gel} = \frac{P_{gevr} * t_{gevr}}{P_{gel}}$$

Met:

- t_{gel} = het aantal draaiuren van de WKK
- P_{gevr} = het gevraagde thermisch vermogen (kW_{th})
- t_{gevr} = de periode waarvoor het gevraagde thermisch vermogen geldig is (u)
- P_{gel} = het geleverde vermogen van de WKK (kW_{th})

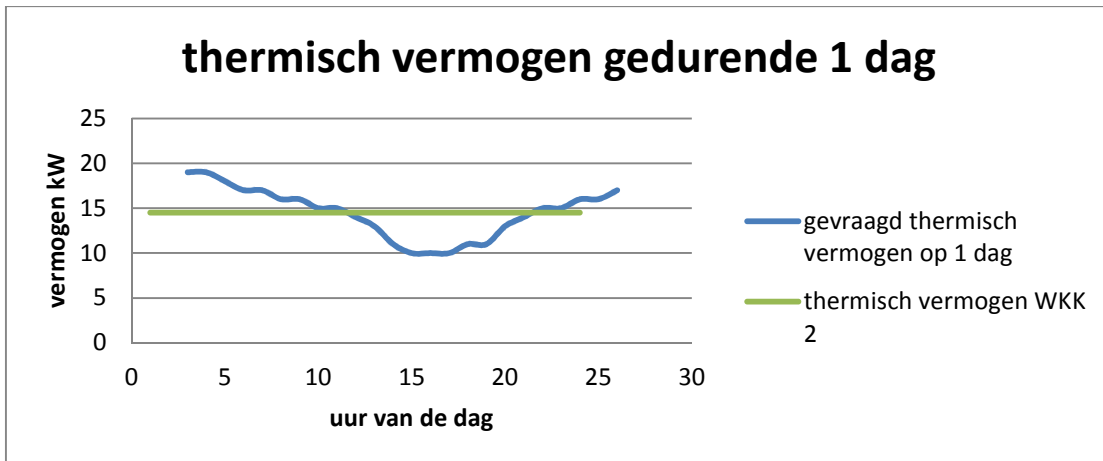
Voor de maand juni:

$$t_{gel} = \frac{44,7 * 24 * 30}{80} = 402 \text{ h}$$

Voor de maand september:

$$t_{gel} = \frac{74,4 * 24 * 30}{80} = 670 \text{ h}$$

Het is in deze maanden dat men de warmtebuffer zal gebruiken. Het gevraagde thermische vermogen gedurende 1 dag is niet constant. Een voorbeeld van hoe het thermisch gevraagde vermogen er gedurende 1 dag kan uitzien vindt men terug in Figuur 24.



Figuur 24 verloop thermisch vermogen gedurende 1 dag

Gedurende de nacht levert de WKK niet voldoende thermische energie om het gebouw op temperatuur te houden. Gedurende de dag levert de WKK meer thermische energie dan gevraagd. Het is gedurende deze maanden dat de WKK thermische energie moet opslaan in het buffervat.

Het buffervat op de UC Leuven-Limburg bedraagt 5000 liter. Indien men de temperatuur laat variëren van 50 °C tot 90 °C levert dit een buffercapaciteit op van:

$$Q = 5000 * 4190 * 40 = 838\,000\,000\,J$$

$$1\,kWh = 3\,600\,000\,J$$

$$\frac{838\,000\,000}{3\,600\,000} = 232,8\,kWh_{th}$$

De WKK heeft een thermisch vermogen van 80 kW_{th}. Indien de thermische vraag 120 kW zou bedragen is er een tekort van (120 - 80) 40 kW_{th}. Indien het water in het buffervat opgewaard is tot 90 °C en ze kan afgekoeld worden tot 50 °C bezit ze een energieinhoud van 232,8 kWh_{th}. Ze kan dus $\frac{232,8\,kWh_{th}}{40\,kW_{th}} = 5,8\,h$ of 5 uur en 49 min lang 40 kW leveren. Op die manier wordt er toch aan de warmtevraag voldaan en is het niet nodig een cv-ketel extra op te starten.

Gedurende de periode van oktober tot en met mei zal de WKK in principe continu functioneren. Het totaal aantal uren bedraagt:

maand	aantal dagen
oktober	31
november	30
december	31
januari	31
februari	28
maart	31
april	30
mei	31
totaal	243

Tabel 3 aantal dagen van oktober t.e.m. mei

Het totaal aantal theoretische draaiuren voor deze periode bedraagt: $243 \cdot 24 = 5.832$ uren. Deze uren opgeteld bij de uren dat de WKK zal draaien in de maanden juni en september levert:

$$5.832 + 402 + 670 = 6.904 \text{ uren}$$

Met bovenstaand informatie is het mogelijk de besparing op de elektriciteitsfactuur te bepalen. Aangezien de vaste vergoedingen voor de elektriciteits- en brandstofprijzen gelijk blijven voor de UC Leuven-Limburg zal er enkel rekening gehouden worden met de variabele prijs. De variabele prijs voor gas is gebaseerd op de gasfactuur van oktober 2014. In Tabel 4 vindt men terug dat de variabele kostprijs 31,58 €/MWh bedraagt en dat deze is opgebouwd uit drie onderdelen: het verbruik op zich (29,926 €/MWh), bijdrage op de energie (0,989 €/MWh) en de federale bijdrage (0,666 €/MWh).

	€/MWh
verbruik	29,926
bijdrage op de energie	0,989
federale bijdrage	0,666
totaal	31,581

Tabel 4 variabele kostprijs gas

De elektriciteitsprijs is afhankelijk van het moment dat de stroom verbruikt wordt. Enerzijds is er het verbruik tijdens de piek uren (verbruik-piek) en anderzijds is er het verbruik tijdens de dal uren (verbruik-dal). Het verbruik tijdens de piekuren wordt opgemeten door de dagteller en het verbruik tijdens de daluren wordt opgemeten met de nachtteller. Vaak wordt ook gesproken over dag- en nachttarief. Het dagtarief is geldig op de weekdays (maandag tot en met vrijdag) van 7u00 tot 22u00 en het nachttarief is geldig op de weekdays van 22u00 tot 7u00. In het weekend (vrijdag tot en met zondag) is het nachttarief geldig van 22u00 op vrijdag tot 7u00 op maandag.

De variabele kostprijs van elektriciteit volgens dagtarief vind men terug in Tabel 5.

verbruik piek		
	€/kWh excl. BTW	€/kWh incl. BTW
Piek	0,066049	0,07991929
groene stroom	0,01619	0,0195899
GSC offshore	0,004	0,00484
fed bijdrage	0,000026	0,000026
totaal		0,10437519

Tabel 5 variabele kostprijs elektriciteit tijdens piek uren

Op de federale bijdrage wordt geen BTW betaald.

De variabele kostprijs van elektriciteit volgens dagtarief vind men terug in Tabel 6.

verbruik dal		
	€/kWh excl. BTW	€/kWh incl. BTW
dal	0,041985	0,05080185
groene stroom	0,01619	0,0195899
GSC offshore	0,004	0,00484
fed bijdrage	0,000026	0,000026
totaal		0,07525775

Tabel 6 variabele kostprijs elektriciteit tijdens dal uren

Omdat de WKK geen rekening houdt met dag en nachttarief is het mogelijk een vereenvoudiging toe te passen in verband met de elektriciteitsprijs. Het dagtarief is 5 dagen per week geldig gedurende 15 uur per dag. Dit is op weekbasis $15 * 5 = 75$ uur. Een week bevat $24 * 7 = 168$ uren. Dit betekent dat 45% ($75/168$) van de tijd de dagteller in gebruik is en 55% de nachtteller. Dit betekent dat 45% van het dag tarief geldig is en 55% van het nachttarief. Zo wordt de nieuwe prijs bekomen van:

$$0,45 * 0,10438 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 0,55 * 0,07526 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 0,08836 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Tabel 7 geeft de jaarlijkse uitgaven weer aan gas en elektriciteit zonder de WKK.

Zonder WKK						
eenheidsprijs		hoeveelheid		totaal		
brandstof	elektriciteit	brandstof	elektriciteit	brandstof	elektriciteit	totaal
€/kWh	€/kWh	kWh _{th}	kWh _{el}	€	€	€
0,0316	0,088	2.055.000	780.000	64.899	68.921,3	133.820,2

Tabel 7 jaarlijkse uitgaven gas en elektriciteit zonder WKK

Het jaarlijks verbruik aan gas bedraagt gemiddeld gezien 2.055.000 kWh_{th}. Dit komt neer op een bedrag van $0,0316 * 2.055.000 = \text{€}64.899$.

Het jaarlijkse verbruik van elektriciteit bedraagt gemiddeld gezien 780.000 kWh_{el}. Dit komt neer op een bedrag van: $780.000 * 0,0883 = \text{€}68.921$. De totale prijs zonder WKK bedraagt $64.899 + 68.921 = \text{€}133.820$.

Met de WKK is het mogelijk de elektriciteitsfactuur te doen dalen, echter verbruikt de WKK gas en zal de gasfactuur stijgen. In Tabel 8 vindt men de warmteverdeling terug. De totaal gemiddelde warmtevraag blijft gelijk en bedraagt 2.055.000 kWh_{th}. Echter wordt er nu een deel door de WKK geproduceerd:

$$DU * \eta_{th} * BV = 6.904 * 0,541 * 148 = 552.789 \text{ kWh}_{th}$$

Met:

- DU = aantal draaiuren van de WKK (u)
- η_{th} = het thermisch rendement van de WKK
- BV = het brandstofverbruik van de WKK (kWh/h)

Het andere deel van de warmte wordt geproduceerd door de cv-ketel en bedraagt: 2.055.000 – 552.789 = 1.502.211 kWh_{th}.

Warmteverdeling		
Gemiddelde warmtevraag op 1 jaar	2055000	kWh _{th}
Warmteproductie door WKK	552789	kWh _{th}
Warmteproductie door cv ketel	1502211	kWh _{th}

Tabel 8 warmteverdeling

Tabel 9 geeft de situatie weer met de gas WKK en hoeveel de totale kostprijs voor gas en elektriciteit zal bedragen.

De totale hoeveelheid verbruik aan gas is gestegen van 2.055.000 kWh_{th} naar 2.524.003 kWh_{th}. Immers is er het gedeelte dat de cv ketel verbruikt (1.502.211 kWh_{th}) en het gedeelte dat de WKK verbruikt (DU*BV = 6.904 * 148) 1.021.792 kWh_{th}. Omdat de WKK in werking is gedurende 6.904 uren zal de totale hoeveelheid elektriciteitsverbruik dalen. De hoeveelheid geproduceerde elektriciteit bedraagt 45.366 kWh_{el}.

$$DU * \eta_{el} * BV = 6.904 * 0,338 * 148 = 45.366 \text{ kWh}_{el}$$

Er zal bijgevolg nog (780.000-45.366) 734.634 kWh_{el} moeten worden aangekocht. Rekening houdend met de extra kosten van het onderhoud voor de WKK ($1 \frac{\text{€}}{DU} * 6.904$) zal de gas WKK zorgen voor een jaarlijkse besparing van (133.820 – 125.020) 8.800 euro. Daarbovenop kan men ook nog WKC's verkrijgen. Het aantal WKC's dat men verkrijgt is het product van de bandingfactor met de PEB. Voor de gas WKK bedraagt de bandingfactor 1 en de PEB:

$$PEB = E * \left(\frac{1}{\eta_{refE}} + \frac{\eta_Q}{\eta_E * \eta_{refQ}} - \frac{1}{\eta_E} \right) = 345,366 * \left(\frac{1}{0,50} + \frac{0,541}{0,338 * 0,9} - \frac{1}{0,338} \right) = 283,15$$

Het aantal WKC's bedraagt dus 283 stuks waarvan elke WKC een minimum waarde van 27 euro heeft. In totaal zal men na 1 jaar voor (283,15*27) 7.645 euro aan WKC's ontvangen. De totale jaarlijkse besparing met de gas WKK bedraagt (133.820 – 117.375) 16.445 euro.

met gas WKK								
eenheidsprijs		hoeveelheid		totaal				
brandstof	elektriciteit	brandstof	elektriciteit	brandstof	elektriciteit	onderhoud	WKC's	totaal
€/kWh	€/kWh	kWh _{th}	kWh _{el}	€	€	€	€	€
0,03	0,09	2.524.003	434.634,304	79.711	38.405	6.904	7.645	117.375

Tabel 9 jaarlijks verbruik gas en elektriciteit met gas WKK

WKK op PPO UC Leuven-Limburg

De gegevens van de WKK op PPO (puur plantaardige olie) op de UC Leuven-Limburg zijn weergegeven in Tabel 10:

Algemene gegevens WKK op PPO		
P_{th}	41	kW
P_{el}	25	kW
η_{th}	55,6	%
η_{el}	31,6	%
draaiuren	5.832	uur/jaar
Brandstofverbruik	76	kWh/h
Brandstofprijs	0,07	€/kWh
elektriciteitsprijs	0,09	€/kWh
onderhoud	0,8	€/uur

Tabel 10 Algemene gegevens WKK op PPO

De algemene gegevens van de WKK op PPO zijn opgegeven door de fabrikant. De onderhoudskost is een richtwaarde en kan variëren afhankelijk van het onderhoudscontract [32]. Het brandstofverbruik van de WKK op PPO bedraagt 8,3 l/h. De gemiddelde energie-inhoud van PPO bedraagt 9,2 kWh/l [34]. Het brandstofverbruik van de WKK op PPO bedraagt dus $(9,2 * 8,3)$ 76 kWh/h. De prijs van PPO per liter is tijdsafhankelijk en afhankelijk van de leverancier.

Het thermisch vermogen van de WKK op PPO bedraagt 41 kW_{th}. Op basis van Tabel 2 kan men zien dat het gevraagde thermische vermogen gedurende de periode van september tot en met juni groter is dan 41 kW_{th}. Dit betekent dat de WKK gedurende die maanden continu zal kunnen draaien. Gedurende de maanden juli en augustus wordt aangenomen dat de WKK niet zal functioneren.

Omdat de operationele kost van de WKK op PPO duurder is dan deze van de gas WKK (zie verder) zal ervoor gekozen worden in eerste instantie de gas WKK te gebruiken bij warmtevraag. De totale warmtevraag zal dus verminderd worden met het thermisch vermogen van de gas WKK. Tabel 11 geeft de warmtevraag weer verminderd met 80 kW_{th} om rekening te houden met de gas WKK.

maand	op basis van graaddagen		
	graaddagen	gem kWh	gem kW
januari	410	492038	581,3
februari	363	432987,2	564,3
maart	304	358859,6	402,3
april	204	233219,6	243,9
mei	104	107579,6	64,6
juni	44	32195,6	-35,3
juli	13	-6752,8	-89,1
augustus	14	-5496,4	-87,4
september	61	53554,4	-5,6
oktober	166	185476,4	169,3
november	289	340013,6	392,2
december	391	468166,4	549,3

Tabel 11 warmtevraag op basis van graaddagen verminderd met 80 kW_{th}

Van oktober tot en met mei zal de WKK op PPO continu kunnen functioneren. Dit komt neer op 243 dagen en dat komt overeen met $243 \cdot 24 = 5.832$ uren. De WKK op PPO zal voldoen aan de warmtevraag waaraan de gas WKK niet kan voldoen. De nieuwe warmteverdeling wordt weergegeven in Tabel 12. De oorspronkelijke gemiddelde warmtevraag op 1 jaar was 2.055.000 kWh_{th}. De gas WKK heeft een warmteproductie van 552.789 kWh_{th}. De nieuwe warmtevraag op 1 jaar wordt zo gelijk aan $(2.055.000 - 552.789) 1.502.211$ kWh_{th}. De WKK op PPO zal naar verwachting 5.832 uren functioneren wat neerkomt op een warmteproductie van 246.437 kWh_{th}.

$$DU * \eta_{th} * BV = 5.832 * 0,556 * 76 = 246.437 \text{ kWh}_{th}$$

De resterende warmtevraag wordt geproduceerd door de cv-ketel en bedraagt $(1.502.211 - 246.437) 1.255.774$ kWh_{th}. De WKK op PPO zal na 5.832 uren een elektriciteitsproductie gehad hebben van 140.061,3 kWh_{el}.

$$DU * \eta_{el} * BV = 5.832 * 0,316 * 76 = 140.061,3 \text{ kWh}_{el}$$

Een overzicht van de nieuwe warmteverdeling vindt men terug in Tabel 12.

Warmteverdeling		
Gemiddelde warmtevraag op 1 jaar	1.502.211	kWh _{th}
Warmteproductie door WKK op PPO	246.437	kWh _{th}
Warmteproductie door cv ketel	1.255.774	kWh _{th}

Tabel 12 warmteverdeling rekening houdend met gas WKK

Tabel 13 geeft de situatie weer met de gas WKK en de WKK op PPO in bedrijf gedurende 1 jaar. Het aantal GSC dat men ontvangt is gelijk aan het aantal WKC's. Voor de WKK op PPO betekend dit:

$$PEB = E * \left(\frac{1}{\eta_{refE}} + \frac{\eta_Q}{\eta_E * \eta_{refQ}} - \frac{1}{\eta_E} \right) = 140,061 * \left(\frac{1}{0,427} + \frac{0,556}{0,316 * 0,9} - \frac{1}{0,316} \right) = 158,6$$

Het aantal WKC's en GSC's bedraagt dus 158,6 stuks waarvan elke WKC een minimum waarde van 27 euro heeft en elk GSC een minimum waarde van 93 euro. In totaal zal men na 1 jaar voor $(158,6 * (93+27))$ 19.031 euro aan WKC's en GSC's ontvangen.

met WKK op PPO								
hoeveelheid			totaal					
brandstof		elektriciteit (kWh _{el})	brandstof		elektriciteit (€)	onderhoud (€)	WKC + GSC (€)	totaal (€)
gas (kWh _{th})	PPO (kWh _{th})		gas (€)	PPO (€)				
2.277.566	443.232	294.573	71.927,8	31.026,2	26.028,7	4.665,6	19.031,9	113.875,4

Tabel 13 jaarlijkse jaarlijks verbruik gas en elektriciteit met WKK op PPO

In Tabel 13 kan men terugvinden dat de totale afrekening van brandstof, elektriciteit en onderhoud 113.875 euro bedraagt. Dit is een besparing van $(117.375 - 113.875)$ 3.500 euro. Het totaal bedrag houdt ook rekening met de WKC's en onderhoudskost van de gas WKK.

Totaal:

$$\begin{aligned} \text{Totaal} &= 71.927,8 + 31.026,2 + 26.028,7 + 4.665,6 - 19.031,9 + (6.904 - 7.645) \\ &= 113.875,4 \text{ euro} \end{aligned}$$

Bovenstaande manier is goed om een totaal beeld te verkrijgen van de besparingen/kosten op jaarbasis die de WKK's kunnen realiseren en wat men effectief zal terugvinden op de facturen. Echter om WKK's met elkaar te vergelijken is het eenvoudiger om een beeld te krijgen van hoeveel ze opbrengen per uur dat ze functioneren. Om dit te realiseren wordt de TOK (totale operationele kost) van elke WKK berekend. De totale operationele kost van de WKK in €/h is hoeveel het kost om de WKK te laten draaien. Dit is de operationele kost verminderd met de opbrengst aan warmte en elektriciteit.

De kost van de WKK/h wordt berekend op basis van het brandstofverbruik, de brandstofprijs, het onderhoud en de subsidies.

- TOK = totale operationele kost verminderd met de elektriciteits- en warmteopbrengst (€/h)
- VK_{WKK} = variabele kost van de WKK per uur (€/h)
- OE = elektriciteitsopbrengst van de WKK (€/h)
- OW = warmteopbrengst van de WKK (€/h)
- BV = het brandstofverbruik van de WKK (kWh/h)
- BP = de brandstofprijs (€/kWh)
- OH = de onderhoudskost (€/h)
- S = de ontvangen subsidies in (€/h * η_{el})
- QW = nuttig geproduceerde warmte door de WKK (kWh_{th}/h)
- GP = gasprijs (€/kWh_h)
- EP = elektriciteitsprijs (€/kWh_e)
- E = geproduceerde elektriciteit (kWh_{el}/h)

$$TOK = VK_{WKK} - OW - OE$$

Waarbij:

$$VK_{WKK} = BV * BP + OH - S$$

$$OW = QW * GP$$

$$QW = BV * \eta_{th}$$

$$OE = E * EP$$

$$E = BV * \eta_{el}$$

Alles invullen geeft:

$$TOK = VK_{WKK} - OW - OE$$

$$TOK = BV * BP + OH - S - QW * GP - E * EP$$

$$TOK = BV * BP + OH - S - BV * \eta_{th} * GP - BV * \eta_{el} * EP$$

Op jaarbasis wordt het aantal WKC's en GSC's dat men verkrijgt berekend op basis van de primaire energiebesparing (PEB) en de bandingfactor. De bandingfactor bedroeg 1 op 5 april 2015.

$$\#certificaten = bandingfactor * PEB$$

$$PEB = E * \left(\frac{1}{\eta_{refE}} + \frac{\eta_Q}{\eta_E * \eta_{refQ}} - \frac{1}{\eta_E} \right)$$

Om te weten hoeveel de WKK aan subsidies oplevert per draaiuur dient de PEB gedeeld te worden door het aantal draaiuren.

$$E = \eta_E * BV * DU$$

Met:

- E = geproduceerde elektriciteit op 1 jaar (kWh)
- BV = brandstofverbruik WKK (kWh/h)
- DU = het aantal draaiuren van de WKK (u)

De PEB/DU wordt dan berekend op:

$$\frac{PEB}{DU} = \eta_E * BV * \left(\frac{1}{\eta_{refE}} + \frac{\eta_Q}{\eta_E * \eta_{refQ}} - \frac{1}{\eta_E} \right)$$

Bovenstaande formule mag men zo gebruiken indien het effectieve elektrische rendement niet veranderd. Echter indien het elektrisch rendement veranderd zal ook de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit op 1 jaar veranderen. Om uit te drukken hoeveel subsidies men ontvangt per draaiuur per rendement is het noodzakelijk bovenstaande formule te delen door het elektrisch rendement.

$$\#certificaten = \frac{PEB}{DU * \eta_{El}} = BV * \left(\frac{1}{\eta_{refEl}} + \frac{\eta_Q}{\eta_{El} * \eta_{refQ}} - \frac{1}{\eta_{El}} \right)$$

Met:

- S = de ontvangen subsidies per draaiuur voor een bepaald elektrisch rendement ($\text{€}/(\text{h} \cdot \eta_{el})$)
- S = # certificaten * waarde van de certificaten

Voor de gas WKK komt dit neer op:

$$S = \frac{PEB}{DU * \eta_E} * 27 = \frac{283,15}{6904 * 0,338} * 27 = 3,28 \frac{\text{€}}{\text{h} * \eta_{el}}$$

- BV = 148 kWh/h
- BP = 0,032 €/kWh
- OH = 1 €/h
- EP = 0,088 €/kWh_{el}
- GP = 0,032 €/kWh_{th}
- η_{th} = 54,1 %
- η_{el} = 33,8 %

De TOK van de gas WKK bij deze waarde wordt dan:

$$TOK = BV * BP + OH - S - BV * \eta_{th} * GP - BV * \eta_{el} * EP$$

$$TOK = 148 * 0,032 + 1 - 3,28 * 0,338 - 148 * 0,541 * 0,032 - 148 * 0,338 * 0,088 = -2,38$$

Een TOK van -2,38 duidt erop dat per uur dat de gas WKK in bedrijf is ze 2,38 euro netto oplevert. Indien de gas WKK 6.904 uren op jaarbasis draait zal ze $(2,38 * 6.904)$ 16.446 euro opbrengen.

Voor de WKK op PPO komt dit neer op:

$$S = \frac{PEB}{DU * \eta_E} * 120 = \frac{158,6}{5.832 * 0,316} * 120 = 10,33 \frac{\text{€}}{h * \eta_{el}}$$

- BV = 76 kWh/h
- BP = 0,07 €/kWh
- OH = 0,8 €/h
- EP = 0,088 €/kWh_{el}
- GP = 0,032 €/kWh_{th}
- η_{th} = 55,6 %
- η_{el} = 31,6%

De TOK van de WKK op PPO bij deze waarde wordt dan:

$$\begin{aligned} TOK &= 76 * 0,07 + 0,8 - 10,33 * 0,316 - 76 * 0,556 * 0,032 - 76 * 0,316 * 0,088 \\ &= -0,61 \end{aligned}$$

Een Tok van -061 duidt erop dat per uur dat de WKK op PPO in bedrijf is ze 0,61 euro netto oplevert. Indien de WKK op PPO 5.832 uren op jaarbasis draait zal ze (0,61*5.832) 3.557,5 euro opbrengen.

Voorgaande berekeningen zijn uitgegaan van de gegevens van de fabrikant. Uit analyse van de gas WKK is gebleken dat het verbruik gemiddeld 155 kWh/h bedroeg i.p.v. 148 kWh/h. Het elektrisch rendement bedraagt 32,6 % en het thermisch rendement 53%. Dit komt neer op een TOK van -2,23. Na 6.904 uren zal de gas WKK dus 15.396 euro opgebracht hebben.

Uit analyse van de WKK op PPO is gebleken dat het elektrisch rendement 25,6 % bedraagt en het thermisch rendement gemiddeld 58% bedraagt. Dit komt overeen met een TOK van 0,37. Indien de WKK op PPO gedurende 5.832 uren in bedrijf is geweest zal dit een opbrengst van (0,37*5.832) 2.157,8 euro met zich meebrengen.

7.4 Opbrengst WKK piekafsnijding

Een bedrijf/school/instelling met een groot elektriciteitsverbruik wordt vaak geconfronteerd met het feit dat zij moeten betalen voor hun piekverbruik. Het piekverbruik is het grootste gevraagde vermogen binnen een periode. Algemeen wordt het verbruik op kwartierbasis gemeten. De gebruiker betaalt voor het grootste piekvermogen dat hij in de voorgaande 12 maanden nodig heeft gehad.

Indien de WKK inschakelt vanaf het moment dat er een piekverbruik zich zou voordoen is de gebruiker instaat de piek af te snijden. Echter werkt een WKK in normale omstandigheden op warmtevraag. Wanneer er een piekverbruik van elektriciteit is en er is geen warmtevraag zal de WKK in normale omstandigheden niet inschakelen. De piek wordt op dat moment niet afgesneden wat tot gevolg heeft dat de 12 maanden die daarop volgen men een vergoeding moet betalen voor die piek.

Wanneer men ervoor kiest, ondanks het gebrek aan een warmtevraag, toch de WKK in te schakelen, zal het rendement van de WKK dalen. De vraag die hierbij gesteld moet worden is of het voordelig is de WKK in te schakelen bij dit lagere rendement.

De TOK houdt enkel rekening met de operationele kosten en de opbrengsten. Bij piekafsnijding dient men ook rekening te houden met de besparing opdat men de piek niet vraagt. Afhankelijk van de regio en over welke aansluiting men bezit gelden er andere tarieven [35]. Er zijn vier soorten klant categorieën waartoe men kan behoren:

1. TRANS HS: professionele verbruiker rechtstreeks aangesloten op hoogspanning >26kV
2. 26-1 kV: professionele verbruiker aangesloten op middenspanning (1-26 kV)
3. TRANS LS: professionele verbruiker aangesloten op netcabine
4. LS: professionele of huishoudelijke verbruiker aangesloten op laagspanning (230 V)

De tarieven voor respectievelijk elke klant categorie vind men terug in Tabel 14 (tarieven 2015).

categorie	€/kW
TRANS HS	0,2764466
26 - 1 kV	2,5059611
TRANS LS	2,1283071
LS	6,2474702

Tabel 14 tarief €/kW per klant categorie

UC Leuven-Limburg behoort tot de categorie TRANS LS. Aangezien de verbruiker 12 maanden moet betalen voor de piek betekent dit een totale vergoeding van $2,128 * 12 = 25,5$ €/kW

Concreet betekend dit dat de TOK vermenigvuldigd met de duur van de piek kleiner moet zijn dan 25,5 keer het elektrisch vermogen.

Situatie voor de gas WKK van de UC Leuven-Limburg

De fabrikant geeft een gemiddeld verbruik op van 148 kWh/h. Uit metingen is echter gebleken dat het gemiddelde gasdebiet van de WKK $12,9 \text{ m}^3/\text{h}$ bedraagt. De energie-inhoud van het gas bedraagt gemiddeld $11,95 \text{ kWh}/\text{m}^3$.

$$12,9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 11,95 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 155 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$$

De gas WKK heeft effectief dus een gemiddeld gasverbruik van 155 kWh/h.

$$TOK = BV * BP + OH - S - BV * \eta_{th} * GP - BV * \eta_{el} * EP$$

Zoals eerder vermeld moet de TOK vermenigvuldigd met de duur van de piek kleiner zijn dan 25,5 keer het elektrisch vermogen.

$$TOK * h \leq 25,5 * 50$$

$$TOK * h \leq 1.275$$

Uit analyse van het piekverbruik is gebleken dat op 1 december 2014 omstreeks 12u15 de grootste piek plaatsvond. Deze piek bedroeg $278,5 \text{ kW}_{el}$. Indien er vanuit wordt gegaan dat het verbruik gedurende 12 maanden niet groter dan $278,5 \text{ kW}_{el}$ zal bedragen is men instaat om te berekenen hoeveel men bespaard met het verminderen van deze piek.

Aangezien de WKK een elektrisch vermogen heeft van $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ is het kleinste verbruik dat men kan bereiken $(278,5 - 50) = 228,5 \text{ kW}_{\text{el}}$. Indien men ervoor zorgt dat de WKK draait wanneer het elektriciteitsverbruik groter of gelijk aan $228,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ dreigt te worden, zal men 1.275 euro minder moeten betalen voor het piekverbruik. De twee grote variabelen van de TOK zijn het thermisch en elektrisch rendement. Hoewel men redeneert dat bij een temperatuursverhoging het thermisch rendement daalt zal dit bij het verwarmingssysteem slechts beperkte invloed hebben.

Het maximale rendement volgens Carnot wordt bepaald door:

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

De temperatuur van de vlam bedraagt $680 \text{ }^\circ\text{C}$ indien het retourwater $30 \text{ }^\circ\text{C}$ zou zijn is het maximale rendement:

$$\eta = 1 - \frac{303 \text{ K}}{953 \text{ K}} = 0,68$$

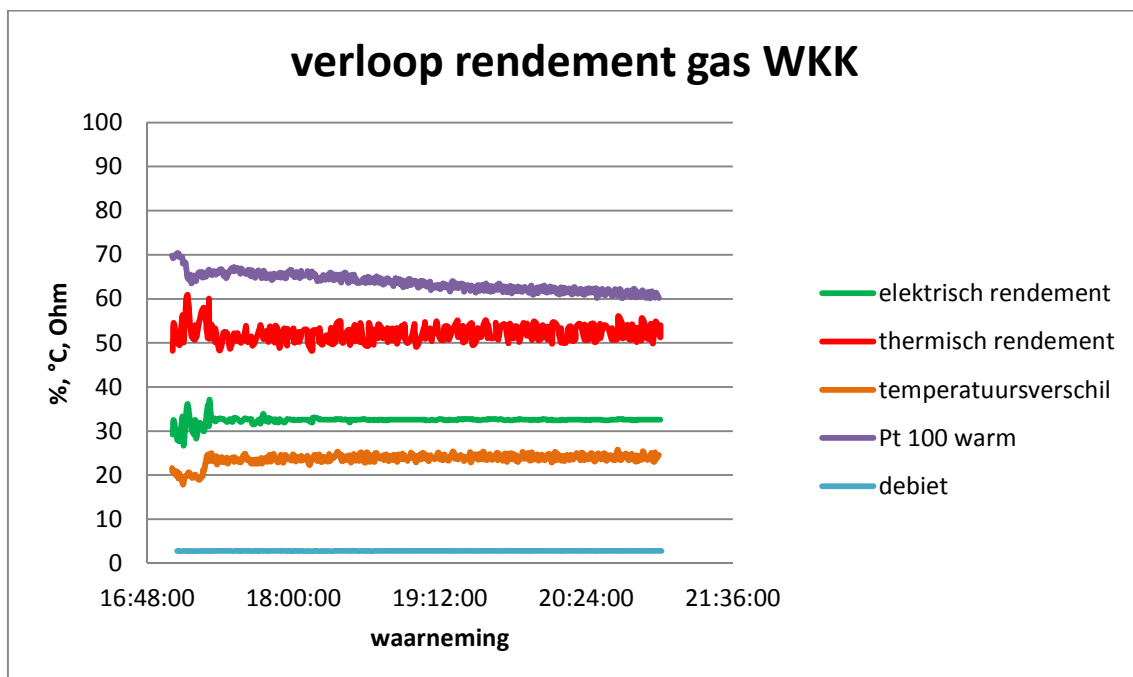
Het maximale rendement zou dan 68% bedragen.

Indien het retourwater een waarde van $60 \text{ }^\circ\text{C}$ zou hebben dan is het maximale rendement

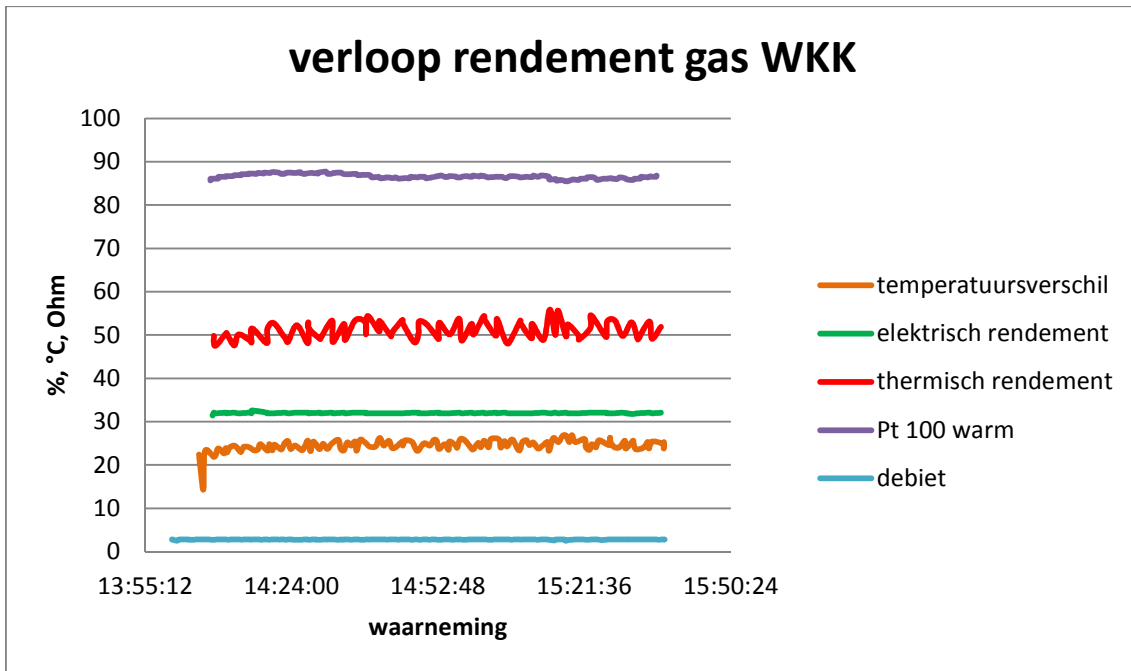
$$\eta = 1 - \frac{333 \text{ K}}{953 \text{ K}} = 0,65$$

Dit is slechts een daling 3 %, men kan dus veronderstellen dat het thermisch rendement niet in aanzienlijke mate wijzigt met de verandering van het retourwater.

Dit blijkt ook uit de meetgegevens die zijn weergegeven in Figuur 25 en Figuur 26



Figuur 25 verloop rendement gas WKK (1)



Figuur 26 verloop rendement gas WKK (2)

In Figuur 26 is het retourwater warmer dan in Figuur 25. Echter het thermisch en elektrisch rendement veranderen niet noemenswaardig.

De TOK van de gas WKK bij een thermisch rendement van 50% en een elektrisch rendement van 30% bedraagt -1,64. Dit betekent dat de WKK 1,64 euro/uur opbrengt in deze situatie. Tabel 15 geeft weer hoe de TOK verandert in functie van het elektrisch en thermisch rendement.

		elektrisch rendement															
thermisch rendement		0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
		0	5,90	5,41	5,16	4,92	4,67	4,43	4,18	3,94	3,69	3,45	3,20	2,96	2,71	2,47	2,22
	0,1	4,20	3,71	3,46	3,22	2,97	2,73	2,48	2,24	2,00	1,75	1,51	1,26	1,02	0,77	0,53	0,28
	0,12	3,86	3,37	3,12	2,88	2,63	2,39	2,15	1,90	1,66	1,41	1,17	0,92	0,68	0,43	0,19	-0,06
	0,14	3,52	3,03	2,78	2,54	2,30	2,05	1,81	1,56	1,32	1,07	0,83	0,58	0,34	0,09	-0,15	-0,40
	0,16	3,18	2,69	2,45	2,20	1,96	1,71	1,47	1,22	0,98	0,73	0,49	0,24	0,00	-0,25	-0,49	-0,74
	0,18	2,84	2,35	2,11	1,86	1,62	1,37	1,13	0,88	0,64	0,39	0,15	-0,10	-0,34	-0,59	-0,83	-1,08
	0,2	2,50	2,01	1,77	1,52	1,28	1,03	0,79	0,54	0,30	0,05	-0,19	-0,44	-0,68	-0,93	-1,17	-1,42
	0,22	2,16	1,67	1,43	1,18	0,94	0,69	0,45	0,20	-0,04	-0,29	-0,53	-0,78	-1,02	-1,27	-1,51	
	0,24	1,82	1,33	1,09	0,84	0,60	0,35	0,11	-0,14	-0,38	-0,63	-0,87	-1,12	-1,36	-1,60	-1,85	
	0,26	1,48	0,99	0,75	0,50	0,26	0,01	-0,23	-0,48	-0,72	-0,97	-1,21	-1,45	-1,70	-1,94		
	0,28	1,14	0,65	0,41	0,16	-0,08	-0,33	-0,57	-0,82	-1,06	-1,30	-1,55	-1,79	-2,04	-2,28		
	0,3	0,80	0,31	0,07	-0,18	-0,42	-0,67	-0,91	-1,15	-1,40	-1,64	-1,89	-2,13	-2,38	-2,62		
	0,32	0,46	-0,03	-0,27	-0,52	-0,76	-1,00	-1,25	-1,49	-1,74	-1,98	-2,23	-2,47	-2,72			
	0,34	0,12	-0,36	-0,61	-0,85	-1,10	-1,34	-1,59	-1,83	-2,08	-2,32	-2,57	-2,81	-3,06			

Tabel 15 TOK gas WKK i.f.v. elektrisch en thermisch rendement

In het groene gedeelte van de tabel is het altijd gunstig om de WKK te laten functioneren. Wat opvalt is dat de rendementen relatief laag moeten zijn vooraleer men moet uitkijken of het nog voordelig is om de WKK te laten functioneren.

Aangezien het zeer onwaarschijnlijk is dat de gas WKK dit lage rendement zal bereiken kan men veronderstellen dat het altijd voordelig is de WKK te gebruiken voor piek-afsnijding. Met het gebruik van piek-afsnijding is het mogelijk de piek te doen dalen met 50 kW. Dit levert jaarlijks een besparing van 1.275 euro op.

Situatie voor de WKK op PPO van de UC Leuven-Limburg

De berekening van de TOK is analoog aan deze van de gas WKK. Het enige verschil is dat de subsidies bij de WKK op PPO groter zijn dan deze van de gas WKK. Daar waar de subsidies voor de gas WKK $3,28 \text{ €}/(\text{h} \cdot \eta_{\text{el}})$ bedraagt is dat voor de WKK op PPO $10,33 \text{ €}/(\text{h} \cdot \eta_{\text{el}})$. Dit mede omdat de WKK op PPO ook GSC ontvangt ter waarde van 93 euro en het elektrisch referentierendement 42,7 % bedraagt. Ondanks de GSC's blijkt dat de WKK op PPO minder winstgevend zal zijn dan de WKK op gas. Tabel 16 geeft weer hoe de TOK verandert i.f.v. het thermisch en elektrisch rendement.

		elektrisch rendement															
thermisch rendement		0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,56	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
	0	6,12	5,88	5,76	5,64	5,52	5,40	5,28	5,16	5,04	4,92	4,78	4,68	4,56	4,44	4,32	4,20
0,1	4,42	4,18	4,06	3,94	3,82	3,70	3,58	3,46	3,34	3,22	3,07	2,98	2,86	2,74	2,62	2,50	
0,12	4,07	3,83	3,71	3,59	3,47	3,35	3,23	3,11	2,99	2,87	2,73	2,63	2,51	2,39	2,27	2,15	
0,14	3,73	3,49	3,37	3,25	3,13	3,01	2,89	2,77	2,65	2,53	2,39	2,29	2,17	2,05	1,93	1,81	
0,16	3,39	3,15	3,03	2,91	2,79	2,67	2,55	2,43	2,31	2,19	2,05	1,95	1,83	1,71	1,59	1,47	
0,18	3,05	2,81	2,69	2,57	2,45	2,33	2,21	2,09	1,97	1,85	1,71	1,61	1,49	1,37	1,25	1,13	
0,2	2,71	2,47	2,35	2,23	2,11	1,99	1,87	1,75	1,63	1,51	1,37	1,27	1,15	1,03	0,91	0,79	
0,22	2,37	2,13	2,01	1,89	1,77	1,65	1,53	1,41	1,29	1,17	1,03	0,93	0,81	0,69	0,57		
0,256	1,76	1,52	1,40	1,28	1,16	1,04	0,92	0,80	0,68	0,56	0,41	0,32	0,20	0,08	-0,04		
0,26	1,69	1,45	1,33	1,21	1,09	0,97	0,85	0,73	0,61	0,49	0,34	0,25	0,13	0,01			
0,28	1,35	1,11	0,99	0,87	0,75	0,63	0,51	0,39	0,27	0,15	0,00	-0,09	-0,21	-0,33			
0,3	1,01	0,77	0,65	0,53	0,41	0,29	0,17	0,05	-0,07	-0,19	-0,34	-0,43	-0,55	-0,67			
0,32	0,67	0,43	0,31	0,19	0,07	-0,05	-0,17	-0,29	-0,41	-0,53	-0,68	-0,77	-0,89				
0,34	0,33	0,09	-0,03	-0,15	-0,27	-0,39	-0,51	-0,63	-0,75	-0,87	-1,02	-1,11	-1,23				

Tabel 16 TOK WKK op PPO i.f.v. elektrisch en thermisch rendement

Zoals eerder vermeld moet de TOK vermenigvuldigd met de duur van de piek kleiner zijn dan 25,5 keer het elektrisch vermogen.

$$TOK * h \leq 25,5 * 25$$

$$TOK * h \leq 637,5$$

Uit analyse van de WKK op PPO is gebleken dat het elektrisch rendement constant blijft, 26%, ongeacht de verandering van de temperatuur van het retourwater. Het thermisch rendement daarentegen varieert tussen de 56% en 60%. In Tabel 16 kan men terugvinden dat er bij deze rendement altijd een positieve TOK heerst. In de meest ongunstige situatie zal het thermische rendement 56% bedragen en het elektrisch rendement 26%. Dit komt overeen met een TOK van 0,34.

Piekafsnijding doet zich slechts 1 a 2 keer voor per jaar. Indien de WKK op PPO 4 maal wordt ingezet om een piekafsnijding te realiseren resulteert dit in een totaal van 1u (4* 15 min). Dit betekent een kost van $0,34 * 1h = 0,34$ euro. Daartegenover staat een besparing van 637,5 euro op jaarbasis omwille van het lagere piekverbruik.

Samen met de WKK op gas is het mogelijk een besparing van $1.275 + 637,5 = 1.912$ euro te realiseren door piekafsnijding.

7.5 Opbrengst WKK als aggregaat

In de zomermaanden, wanneer het warm is, is er algemeen minder warmtevraag en elektriciteitsverbruik dan in de wintermaanden. De WKK wordt optimaal gedimensioneerd en in veel gevallen betekent dat dat de WKK continu draait in de koude maanden en slechts gedeeltelijk in de zomermaanden. Het is in de zomermaanden dat de WKK niet draait dat men de productiecapaciteit voor elektriciteit kan aanbieden aan derden. Een derde partij zou bijvoorbeeld een aggregator kunnen zijn. In België zijn er anno 2015 drie aggregatoren die een samenwerkingscontract met Elia hebben. Het type reserve waartoe de WKK behoort is R3 DP. Het is een tertiaire reserve met een dynamisch profiel.

Indien men ervoor kiest om de WKK aan te bieden aan een aggregator zal men maximaal 40 keer per jaar aangesproken worden en dat voor maximaal 2 uur lang. Echter indien men een WKK aanbied aan een aggregator moet men er zich bewust van zijn dat de WKK niet mag functioneren op de momenten dat men *stand-by* staat. Indien de WKK zou functioneren levert zij reeds elektrisch vermogen aan het net. Indien een aggregator dan zou vragen om bij te produceren is men daartoe niet instaat en zal men een boete krijgen. Alsook kan men dan bestempeld worden als onbetrouwbare partner en mogelijk volgt er een stopzetting aan de samenwerking.

Vergoedingen

De vergoedingen voor het R3 DP zijn op voorhand vastgelegd. De vergoeding die men krijgt hangt af van het vermogen dat men aanbied alsook de duur dat men het vermogen aanbied op jaarbasis. Elia publiceert de gemiddelde vergoedingen die men betaalt per MW per uur beschikbaarheid op haar site. Men krijgt enkel een wachtvergoeding en geen activeringsvergoeding.

Tarieven

In oktober 2013 werd de vergoeding voor het R3 DP vastgelegd voor het jaar 2014. Deze vergoeding bedroeg toen gemiddeld: $3,38 \frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{h}}$.

In december 2014 werd de vergoeding vastgelegd voor het R3 DP voor het jaar 2015. Deze vergoeding bedroeg toen gemiddeld: $3,07 \frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{h}}$.

Aangezien het R3 DP profiel nog niet lang bestaat, beschikken we slechts over twee tarieven. Voor de verdere berekeningen zal er dus een veronderstelling moeten gemaakt worden.

Hiervoor kiezen we het minst gunstige tarief en dat bedroeg $3,07 \frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{h}}$.

Dit betekend dat indien men 1 MW gedurende 1 jaar ter beschikking stelt men

$$3,07 \frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{h}} * 1 \text{ MW} * 365 \text{ dagen} * 24 \frac{\text{h}}{\text{dag}} = \text{€}26.893,2$$

26.893,2 euro aan vergoeding zou krijgen.

UC Leuven-Limburg

In de UC Leuven-Limburg beschikt men over een WKK op gas van 50 kW_{el} en een WKK op PPO van 25 kW_{el}. De WKK op PPO behaalt echter nooit zijn nominale waarde van 25 kW_{el}. De WKK op PPO behaalt slechts een vermogen van 20 kW_{el}. Indien de UC Leuven-Limburg deze gedurende 1 jaar ter beschikking zou stellen betekent dit dat er een vergoeding van 2.017 euro uitbetaald zal worden.

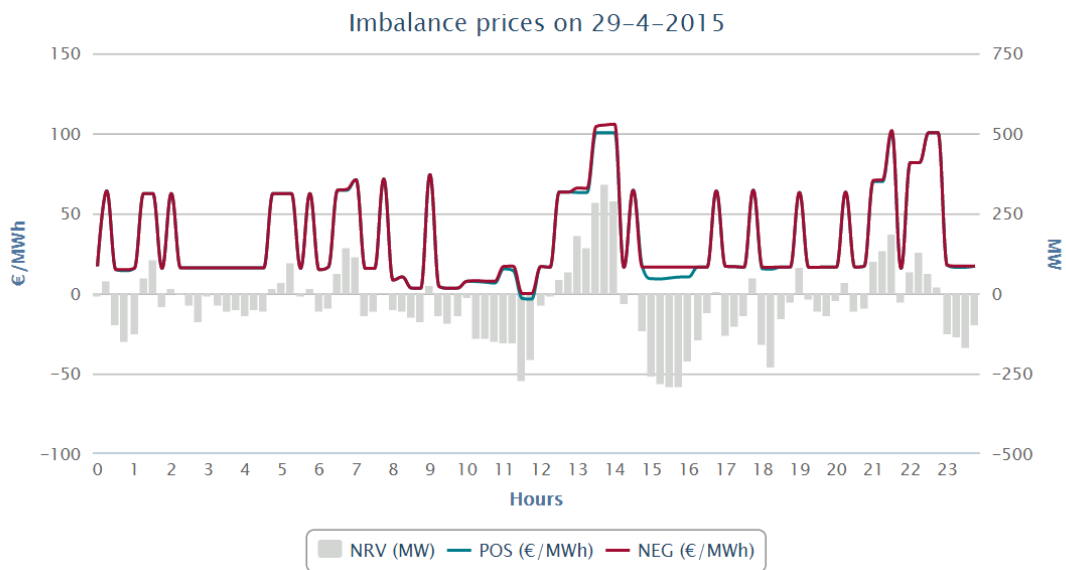
$$0,070 \text{ MW} * 3,07 \frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{h}} * 365 \text{ dagen} * 24 \frac{\text{h}}{\text{dag}} = 2.017$$

Indien de WKK's geactiveerd worden zal er een vergoeding betaald worden voor het geleverde vermogen. De vergoeding wordt bepaald door de onevenwichtsprijs. Deze onevenwichtsprijzen zijn afhankelijk van het moment zelf en men weet op voorhand niet wat het bedrag zal zijn dat men hiervoor krijgt.

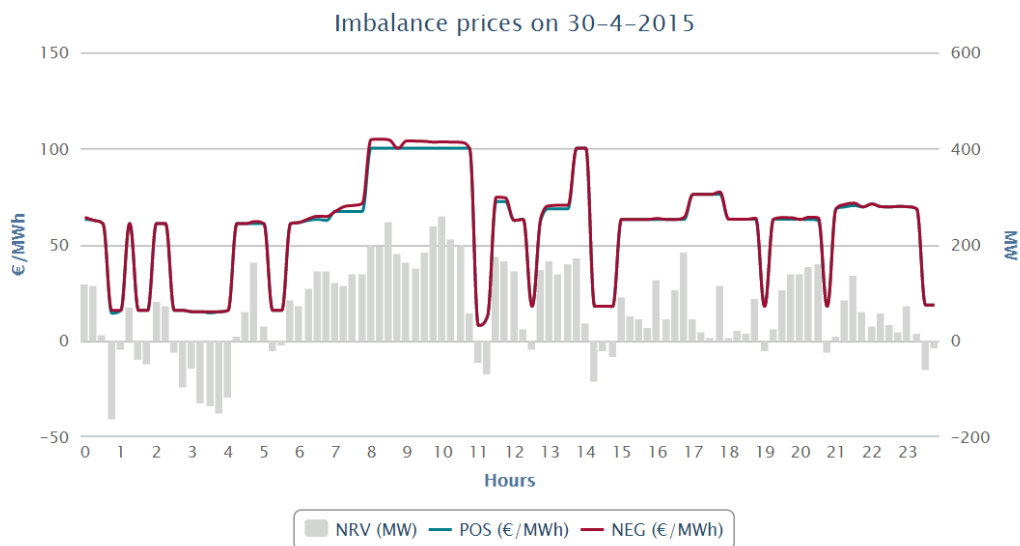
De maximale opbrengst die de WKK kan opbrengen is het maximaal aantal uren dat ze kan functioneren. Het maximaal aantal activeringen per jaar bedraagt 40 en de maximale duur 2u, dit komt dus neer op (40*2u) 80 uren. De gas WKK heeft een elektrisch vermogen van 50 kW_{el}, ze zal dus maximaal (50 kW_{el}*80u) 4000 kWh_{el} produceren. De prijs die betaald wordt voor de elektriciteit is de onbalansprijs. In de formule van de TOK wijzigt dit de parameter van de elektriciteitsprijs.

$$TOK = BV * BP + OH - S - BV * \eta_{th} * GP - BV * \eta_{el} * EP$$

Figuur 27 en Figuur 28 geven het verloop weer van de onbalansprijzen op woensdag 29 april 2015 en donderdag 30 april 2015. De onbalansprijzen variëren hier van 0 tot 0,100 €/kWh_{el}.



Figuur 27 onbalansprijzen 29/04/2015 [36]



Figuur 28 onbalansprijzen 30/04/2015 [36]

Bij een vergoeding van 0,100 €/kWh_{el} wordt de TOK van de gas WKK -2,94.

$$TOK = BV * BP + OH - S - BV * \eta_{th} * GP - BV * \eta_{el} * EP$$

$$TOK = 148 * 0,032 + 1 - 3,28 * 0,338 - 148 * 0,541 * 0,032 - 148 * 0,338 * 0,1 = -2,94$$

Met een maximaal van 40 activeringen gedurende 2u betekent dit een opbrengst bovenop de wachtvergoeding van $80 * 2,94 = 235,2$ euro.

Bij een vergoeding van 0,100 €/kWh_{el} wordt de TOK van de WKK op PPO

$$TOK = 76 * 0,07 + 0,8 - 10,33 * 0,316 - 76 * 0,556 * 0,032 - 76 * 0,316 * 0,1 = -0,9$$

Met een maximaal van 40 activeringen gedurende 2u betekend dit een opbrengst bovenop de wachtvergoeding van $80 \cdot 0,9 = 72$ euro.

Indien men ervoor kiest de WKK's enkel ter beschikking te stellen gedurende de 2 zomermaanden krijgt men een *standby*-vergoeding van 320 euro.

$$0,07 \text{ MW} * 3,07 \frac{\text{€}}{\text{MW} * \text{h}} * 62 \text{ dagen} * 24 \frac{\text{h}}{\text{dag}} = 320$$

Een extra kost die bij het aanbieden van de WKK aan een aggregator erbij komt is het realiseren van de communicatie. De aggregator moet immers van op afstand de WKK kunnen aansturen.

7.6 Vergelijking drie mogelijkheden

De opbrengsten per WKK en op basis van de manier waarop ze worden ingezet vindt men terug in Tabel 17.

	Inzet		
WKK		gas	PPO
	warmtevraag	€ 15.400	€ -2.157
	piekafsnijding	€ 1.275 – TOK*h	€ 637,5 – TOK*h
	aggregator	€ 1.344 + E	€ 538 + E

Tabel 17 overzicht opbrengsten WKK in euro

gas WKK

De gas WKK brengt het meeste op indien hij wordt ingezet op basis van warmtevraag. Dan brengt de WKK op jaarbasis netto +- 15.400 euro op. Indien de gas WKK wordt ingezet puur op piekafsnijding zal ze 1.275 euro opbrengen verminderd met de TOK vermenigvuldigd met het aantal draaiuren. Wanneer de gas WKK wordt aangeboden aan de aggregator gedurende 1 jaar brengt ze 1.344 euro op aan wachtvergoedingen vermeerderd met de vergoeding voor de geproduceerde elektriciteit. De vergoeding die men verkrijgt is afhankelijk van de onbalansprijs en wordt achteraf pas toegekend.

De vraag naar elektriciteit piekt in de winter en aangezien de gas WKK gedurende de winterperiode continu in bedrijf is, is het mogelijk de WKK op basis van warmtevraag en op basis van piekafsnijding te combineren. Dit resulteert in een totale besparing van +- 16.700 euro op jaarbasis.

WKK op PPO

De WKK op PPO is niet rendabel indien deze wordt ingezet op basis van warmtevraag. De WKK zal op jaarbasis een verlies van 2.160 euro realiseren. Indien de WKK op PPO wordt ingezet op basis van piekafsnijding kan ze een besparing realiseren van 637 euro. Wanneer ze wordt aangeboden aan een aggregator kan ze een besparing van 538 euro realiseren. Daarbovenop verkrijgt men ook een vergoeding voor de geproduceerde elektriciteit die afhankelijk is van de onbalansprijs.

8 Besluit

Uit de literatuurstudie is gebleken dat de handel van elektriciteit niet enkel op één markt gebeurt maar op verschillende markten en beurzen. Een deel van de markten worden gedomineerd door het vrije handels principe en strekt zich uit over het Europees transmissienetwerk. Een ander deel van de markten richt zich op het in balans houden van dit transmissienetwerk. Finaal is het de bedoeling dat het transmissienetwerk altijd een frequentie van 50 Hz bezit. Iedere TSO moet ervoor zorgen dat de injecties en afnames binnen zijn gebied in evenwicht zijn. Dit realiseert zij door BRP's aan te stellen en reserves aan te leggen. Indien er desondanks zich toch onevenwichten voordoen zal de regionale TSO ingrijpen. Hiervoor beschikt de TSO aan een waaier van reserves. Eén van deze reserves is het R3 DP reserve. Dit zijn decentrale productie-eenheden die op- en neerwaarts geactiveerd kunnen worden om zo het evenwicht te herstellen/behouden. Een WKK is zo een decentrale productie-eenheid. Van twee types WKK (één op gas en één op PPO) is er onderzocht wat de meest economisch rendabele inzet is op basis van energiekost en *stand-by* vergoedingen.

De WKK op gas is het meest rendabel indien ze wordt ingezet op basis van warmtevraag in combinatie met piek-afsnijding. De WKK inzetten als flexibele decentrale productie-eenheid met als doel het evenwicht op het elektriciteitsnet te herstellen/behouden blijkt allerminst rendabel.

De WKK op PPO is het meest rendabel indien ze ingezet wordt voor piek-afsnijding. Indien de WKK wordt ingezet op basis van warmtevraag is ze verlieslatend. De WKK inzetten als flexibele decentrale productie-eenheid met als doel het evenwicht op het elektriciteitsnet te herstellen/behouden is minder rendabel dan wanneer ze ingezet wordt voor piek-afsnijding. De vergoeding die men verkrijgt komt overeen met de besparing van piek-afsnijding. Echter dient er rekening gehouden te worden met een extra installatie kost om de communicatie te verwezenlijken tussen de WKK en de aggregator.

Bibliografie

- [1] VREG, „groene-stroom,” 04 05 2015. [Online]. Available: <http://www.vreg.be/nl/groene-stroom>. [Geopend 20 05 2015].
- [2] Linear, „Hoe werkt het elektriciteitsnet,” 26 08 2013. [Online]. Available: <http://www.linear-smartgrid.be/?q=en/node/360>. [Geopend 16 11 2014].
- [3] Knack, „Energiebevoorrading: Hoog tijd voor een generatie-overschrijdend energiepact,” 27 06 2014. [Online]. Available: <http://www.knack.be/nieuws/belgie/energiebevoorrading-hoog-tijd-voor-een-generatie-overschrijdend-energiepact/article-opinion-261279.html>. [Geopend 16 11 2014].
- [4] i-NET, „khlm-inet/#activiteiten,” i-NET, 2013. [Online]. Available: <http://www.khlm-inet.be/#activiteiten>. [Geopend 20 12 2014].
- [5] ENTSO-E, „ENTSO-E members,” ENTSO-E, 2014. [Online]. Available: <https://www.entsoe.eu/about-entso-e/inside-entso-e/member-companies/Pages/default.aspx>. [Geopend 20 04 2015].
- [6] *ENTSO-E members*. [Art]. ENTSO-E, 2015.
- [7] Elia, „Wie zijn wij,” Elia, [Online]. Available: <http://www.elia.be/nl/over-elia/wie-zijn-wij>. [Geopend 16 11 2014].
- [8] Nemo-link, „nemo-link,” nemo-link, 2015. [Online]. Available: <http://www.nemo-link.com/nl/>. [Geopend 20 04 2015].
- [9] S. Gäthke, „AMP_14_002_ALEGrO_EN_141024,” 09 2014. [Online]. Available: http://www.amprion.net/sites/default/files/AMP_14_002_ALEGrO_EN_141024.pdf. [Geopend 20 05 2015].
- [10] modernpowersystems, Artist, *the proposed Nemo link*. [Art]. modernpowersystems, 2015.
- [11] C. Vandenborre, „ALEGrO_Elia-Groups-expertise_3,” 01 2013. [Online]. Available: http://www.eliagroup.eu/~/_media/files/EliaGroup/activities/business-development/ALEGrO_Elia-Groups-expertise_3.pdf. [Geopend 20 05 2015].
- [12] Elia, „Evenwicht,” Elia, [Online]. Available: <http://www.elia.be/nl/producten-en-diensten/evenwicht>. [Geopend 16 11 2014].
- [13] Elia, „Lijst van ARP's,” Elia, [Online]. Available: <http://www.elia.be/nl/grid-data/lijsten-en-codes/lijst-van-arps>. [Geopend 16 11 2014].
- [14] Elia, „ARP-Contract,” Elia, [Online]. Available: <http://www.elia.be/nl/producten-en-diensten/arp-contract>. [Geopend 16 11 2014].

- diensten/evenwicht/arp-contract. [Geopend 16 11 2014].
- [15] Elia, „balancingmechanisme,” Elia, [Online]. Available: <http://www.elia.be/nl/producten-en-diensten/evenwicht/balancingmechanisme>. [Geopend 16 11 2014].
- [16] Elia, „ondersteunende diensten,” Elia, [Online]. Available: <http://www.elia.be/nl/producten-en-diensten/ondersteunende-diensten>. [Geopend 16 11 2014].
- [17] Elia, „www.elia.be,” 02 14 2012. [Online]. Available: http://www.elia.be/~media/files/Elia/Products-and-services/ProductSheets/S-Ondersteuning-net/S_Grid%20support_Nl.pdf. [Geopend 15 03 2015].
- [18] wind-energy the facts, „appendix H,” wind-energy, 2015. [Online]. Available: <http://www.wind-energy-the-facts.org/appendix-h.html>. [Geopend 20 05 2015].
- [19] VBO, „omwenteling van het energiemodel,” *REFLECT ENERGIE = ECONOMIE*, vol. herfst 2014, nr. 5, pp. 7-14, 2014.
- [20] climateprogress, „thinkprogress.org,” 26 05 2011. [Online]. Available: <http://thinkprogress.org/climate/2011/05/26/208179/epri-smart-grid-benefits-vastly-exceed-costs-enable-sharp-cuts-in-co2-by-2030/>. [Geopend 16 11 2014].
- [21] Autoriteit Consument & Markt, „www.acm.nl,” [Online]. Available: <https://www.acm.nl/nl/onderwerpen/energie/elektriciteit/groothandelsmarkt/werking-marktkoppeling-elektriciteitsmarkt/>. [Geopend 16 11 2014].
- [22] KU Leuven Energy Institute, „The current electricity market design in Europe,” 01 2015. [Online]. Available: https://set.kuleuven.be/ei/images/EI_factsheet8_eng.pdf/at_download/file. [Geopend 20 04 2015].
- [23] CREG, „www.creg.info,” 8 09 2011. [Online]. Available: <http://www.creg.info/pdf/Studies/F1100NL.pdf>. [Geopend 16 11 2014].
- [24] cogenvlaanderen, „Wat is WKK?,” 2014. [Online]. Available: http://www.cogenvlaanderen.be/subpage-8/Wat_is_WKK_.php. [Geopend 16 11 2014].
- [25] stroomvrienden, „www.stroomvrienden.nl,” [Online]. Available: <http://www.stroomvrienden.nl/inhoud/wkk.htm>. [Geopend 16 11 2014].
- [26] CODE2, „CODE2 Roadmap Belgium,” 09 2014. [Online]. Available: <http://www.code2-project.eu/wp-content/uploads/CODE2-Roadmap-Belgium.pdf>. [Geopend 20 12 2014].
- [27] cogenvlaanderen, „warmtekrachtcertificaten,” 2014. [Online]. Available: http://www.cogenvlaanderen.be/subsubpage.php?subsubpage_id=8. [Geopend 16 11

2014].

- [28] Agentschap ondernemen, „bijlage_wkk-certificaten_0,” 15 07 2013. [Online]. Available: http://www.agentschapondernemen.be/sites/default/files/measure/bijlage_wkk-certificaten_0.pdf. [Geopend 20 04 2015].
- [29] agentschapondernemen, „www.agentschapondernemen.be,” 03 2014. [Online]. Available: http://www.agentschapondernemen.be/sites/default/files/measure/bijlage_wkk-certificaten_maart_2014.pdf. [Geopend 16 11 2014].
- [30] COGEN vlaanderen, „handboekcogenvlaanderen,” 2006. [Online]. Available: <http://www.cogenvlaanderen.be/beheer/uploads/handboekcogenvlaanderenvolledig.pdf>. [Geopend 20 12 2014].
- [31] aardgasfederatie, „graaddagen,” aardgasfederatie, 2015. [Online]. Available: <http://www.aardgas.be/consumenten/de-aardgasfederatie/nieuws-en-publicaties/graaddagen>. [Geopend 15 04 2015].
- [32] COGEN Vlaanderen, „COGENscan,” 2015. [Online]. Available: http://www.cogenvlaanderen.be/subsubpage.php?subsubpage_id=13. [Geopend 20 04 2015].
- [33] KMI, Artist, *Klimatologische normalen station Ukkel 1981-2010*. [Art]. KMI, 2015.
- [34] H. V. -. e.-h. architectuur, „eco-housing/nieuwsbrief4,” 10 09 2011. [Online]. Available: <http://www.eco-housing.be/nieuwsbrief4.pdf>. [Geopend 20 04 2015].
- [35] infrax, „tarieven-elektriciteit/distributienettarief,” 2015. [Online]. Available: <http://www.infrax.be/nl/Elektriciteit/tarieven-elektriciteit/distributienettarief>. [Geopend 16 04 2015].
- [36] Elia, „imbalance-prices,” Elia, 29 04 2015. [Online]. Available: <http://www.elia.be/en/grid-data/balancing/imbalance-prices>. [Geopend 01 05 2015].
- [37] J. JMesserly, „wikipedia,” 26 12 2008. [Online]. Available: http://nl.wikipedia.org/wiki/Elektriciteitsnet#mediaviewer/File:Electricity_grid_simple_North_America.svg. [Geopend 16 11 2014].
- [38] R. D. J. V. E. W. D. J. Zapata Riveros, 17 10 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414008772>. [Geopend 21 12 2014].
- [39] A. A. M. C. S. J. D. J. G. R. M. A. S. Y. R. E. J. Lasseter Robert, „escholarship,” 04 2002. [Online]. Available: <http://escholarship.org/uc/item/9w88z7z1>. [Geopend 21 12 2014].
- [40] C. Tim, „Integratie van een WKK met warmtebuffer binnen de gerenoveerde stookplaats

PIH-PTI,” 2007-2008.

[41] Elia, „www.elia.be,” 15 11 2007. [Online]. Available: http://www.elia.be/nl/producten-en-diensten/~media/files/Elia/Products-and-services/ProductSheets/S-Ondersteuning-net/S4_F_INTERRUPTION.pdf. [Geopend 15 03 2015].

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Prijsefficiënte sturing van WKK in functie van energiekost en onbalansmarkt

Richting: **master in de industriële wetenschappen: energie-elektrotechniek**
Jaar: **2015**

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

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

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

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

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

Voor akkoord,

Kerkhofs, Stef

Datum: **1/06/2015**