

Openbaar rapport van het project
EOS DEMO 10013
Subsidie is verleend door RVO.nl in
opdracht van het Ministerie van
Economische Zaken.

Smart FuelCell Network



 **HYGEAR**

 ***Arese Group***

alllander

Uitgangspunten en de doelstelling van het project

Het project Smart Fuel cell Network (SFN) is een samenwerking tussen HyGear Fuel Cell Systems, Arese Software engineering en Alliander. Het doel van het project was het demonstreren van brandstofcellen systemen in een zogenaamd Smart grid configuratie.

Brandstofcellen zijn systemen die vanuit waterstof en omgevingslucht een gecontroleerde chemische reactie laten plaatsvinden tussen waterstof en zuurstof. Door de reactie in een brandstofcel te laten plaatsvinden kan zeer efficiënt elektriciteit geproduceerd worden. Daarnaast wordt ook warmte geproduceerd, die nuttig gebruikt kan worden om water op te warmen voor bijvoorbeeld een huishouden. We spreken in dit geval van een micro warmte-kracht systeem. Dit type systemen wordt als veelbelovend gezien omdat er met hoge efficiëntie warmte en elektriciteit geproduceerd kan worden op kleine schaal voor huishoudelijk en klein-commerciële toepassingen. Wanneer een aantal systemen in een netwerk zijn opgenomen kunnen deze aangestuurd worden door een centraal computersysteem, de "Energie Manager". Deze Energie Manager berekent vanuit de vraag aan energie in bijvoorbeeld een woonwijk en aan de hand van de brandstofcel systeem karakteristieken hoeveel en welke apparaten in het netwerk elektriciteit en warmte moeten produceren om aan de vraag te voldoen. Het "Smart Grid" houdt in dat de Energie manager de systemen zodanig aanstuurt dat de energie productie op de meest efficiënte manier gebeurt.

Het doel van het project was het ontwerpen, bouwen en draaien van 3 brandstofcellen systemen opgenomen in een smart grid. De secundaire doelstellingen waren:

- Het gereed maken van de documentatie om brandstofcellen systemen te bouwen.
- Demonstreren van de betrouwbaarheid van brandstofcel systemen in een duurtest
- Kennis opdoen over het bouwen van een smart grid

Aan het begin van het project in 2010 maakte het bedrijf Exendis deel uit van het SFN consortium. Exendis zou omvormers leveren om de gelijk spanning uit een brandstofcel om te zetten in wisselspanning geschikt om aan het bestaande netwerk terug te leveren. Helaas heeft Exendis het consortium moeten verlaten door een faillissement.

HyGear heeft 4 brandstofcellen systemen opgeleverd, 1 referentie-unit om technologie te ontwikkelen en te testen en 3 systemen om een duurtest mee uit te voeren. Arese Software engineering heeft gewerkt aan het ontwikkelen van de software om de aansturing van de brandstofcel van de brandstofcel systemen uit te lezen, de data te verzamelen in een centrale computer en vervolgens de PLC van de systemen weer opdrachten te geven. Alliander heeft input gegeven over het gebruik van elektriciteit en warmte door consumenten. Deze gegevens werden gebruikt bij het opzetten van de energie manager.

Exendis heeft 4 omvormers geleverd, die geschikt zijn voor de elektrische parameters (voltage, stroomsterkte) uit brandstofcellen. Deze zijn anders dan conventionele omvormers voor PV en wind energie toepassingen (lage V, hoge I).

Uitgangstechnologie: Brandstofcellen en reformers

Bij aanvang van het project was het plan om zogenaamde hoge temperatuur PEM brandstofcellen te gaan gebruiken. Deze cellen zijn werkzaam bij 170 °C en daardoor meer tolerant ten aanzien van de concentratie koolmonoxide (CO) in het waterstofhoudende gas. Dit heeft als voordeel dat de fuel-processor, het apparaat dat aardgas omzet in een waterstof houdend gas, relatief simpel kan zijn. Er is geen diepe CO verwijdering nodig. Deze hoge temperatuur PEM cellen werden in 2009/2010 alleen geproduceerd door het Duitse BASF. Tijdens het eerste jaar van het project stopte BASF met de levering van deze cellen viel deze basis van het SFN systeem weg en is gekozen om een ander type, de lage temperatuur PEM variant te gaan gebruiken. Deze is minder tolerant ten aanzien van CO, slechts 10 -50 ppm is toelaatbaar en vereisen hierdoor een meer complexe gaszuivering. Deze brandstofcellen waren verkrijgbaar bij verschillende commerciële partijen en daarmee was een commerciële beschikbaarheid gegarandeerd.

Een fuel-processor is een apparaat dat koolwaterstoffen samen met stoom omzet in een waterstofrijk gasmengsel dat ook CO, CO₂, stoom en een klein beetje methaan bevat. De reactie (1) , stoom reforming genoemd, is als volgt:



Methaan (CH₄) is het hoofdbestanddeel van aardgas en wanneer het met stoom over een geschikte katalysator van 800 °C gevoerd wordt zal waterstof en CO gevormd worden.

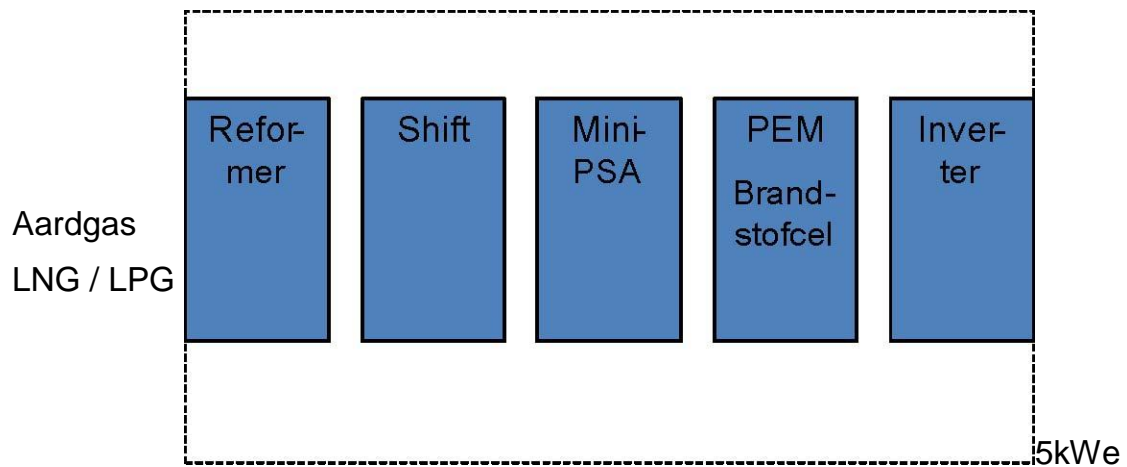
Na de reformer kan het gasmengsel over een andere katalysator (water gas shift) gevoerd worden bij een lagere temperatuur, zodat een deel van de CO reageert met stoom to CO₂ en H₂ waardoor het totaal rendement verhoogd wordt. De CO concentratie na deze reactie is ongeveer 0.5%



Bij het gebruik van HT PEM brandstofcellen kan het gas na de tweede reactie aan de stack geleverd worden. Een stack is een stapel brandstofcellen die geschakeld zijn om samen de gewenste hoeveelheid elektriciteit te leveren.

Bij een LT PEM stack moet de CO verder gereduceerd worden. Dit kan doormiddel van een Pressure Swing Adsorber (PSA). Hierbij wordt onder verhoogde druk (6 bar_a) de waterstof van alle andere moleculen gescheiden en komt er nagenoeg pure waterstof uit het systeem dat gevoed wordt aan de brandstofcel. Een alternatief is dat de 0.5% CO wordt weggereageerd met zuurstof uit de lucht. Dit levert een verdund waterstof rijk gas met nagenoeg geen CO maar wel een hoge concentratie CO₂. Dit zogenaamde reformat kan gebruikt worden in een LT PEM stack maar de stack moet wel groter en duurder zijn. Ook zijn reformat stacks minder goed verkrijgbaar omdat de meeste brandstofcel toepassingen uitgaan van pure waterstof, bv in de automobiel industrie.

Een overzicht van de hoofdmodules van het systeem is weergegeven in Figuur 1. Het SFN systeem bestaat uit een stoomreformer met een geïntegreerde watergas shift stap. De stoomreform reactie is endotherm hetgeen betekent dat er warmte toegevoerd moet worden. Dit gebeurt middels een brander die door warmtewisselaars, de geproduceerde warmte afgeeft aan de reformer katalysator. In het reformer systeem is ook een stoom generator geïntegreerd, die stoom maakt uit water met



Figuur 1: schematisch overzicht van het SFN systeem

gebruik van restwarmte van de brander. Na de reformer is een PSA gebouwd die de waterstof geschikt maakt voor de brandstofcel. Tussen de reformer en de PSA is een warmtewisselaar in gebouwd die het reformaat afkoelt naar PSA temperatuur (= kamertemperatuur). Het schone waterstof wordt geleverd aan de brandstofcel die daarmee elektriciteit levert aan de omvormer die het vervolgens aan het net levert.

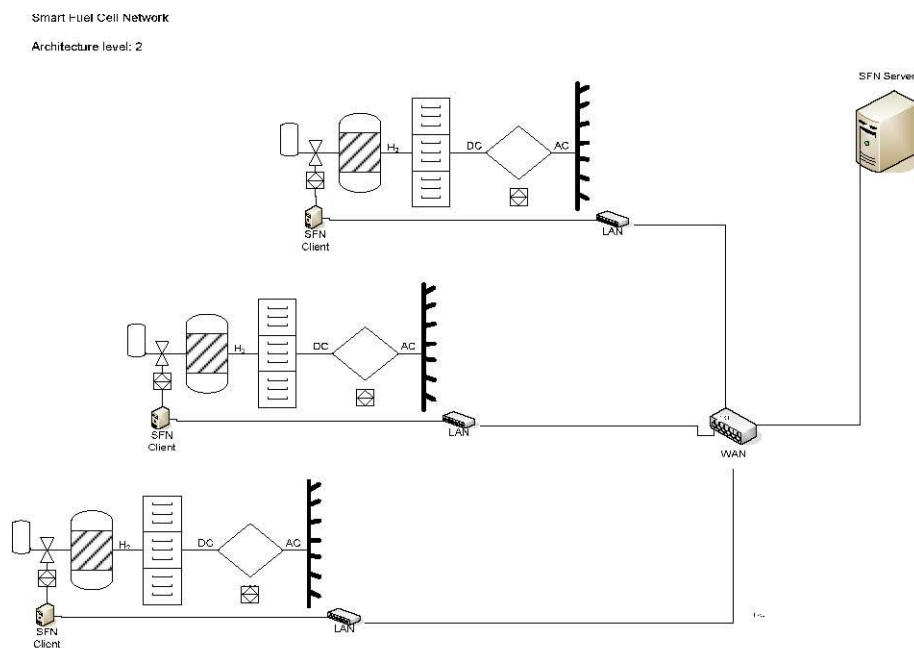
Behaalde resultaten, de knelpunten en perspectief voor toepassing.

In de eerste fase van het project is het design van de systemen vastgesteld en is het documentatiepakket gemaakt dat nodig is voor de bouw van de systemen. Deze documenten zijn nodig om tot een kleine serie van systemen te komen die in de tweede fase gebouwd zullen gaan worden. Het gaat om:

- Piping and instrumentation diagram (P&ID)
- 2D en 3D Bouwtekeningen -Bill of Materials (BOM) -Druk test certificaten van drukdelen
- Certificaten van hoge druk componenten

- Elektrische tekeningen
- Veiligheidsevaluatie (HAZOP)

Er worden de eerste stappen gemaakt om de energie manager te koppelen aan de PLC te zijnen. Deze PLC systeme evalueren de signalen van de energie manager krijgen en data van de systemen terugsturen. Een schematische vorm van zo'n grid van drie systemen is weergegeven in Figuur 2.

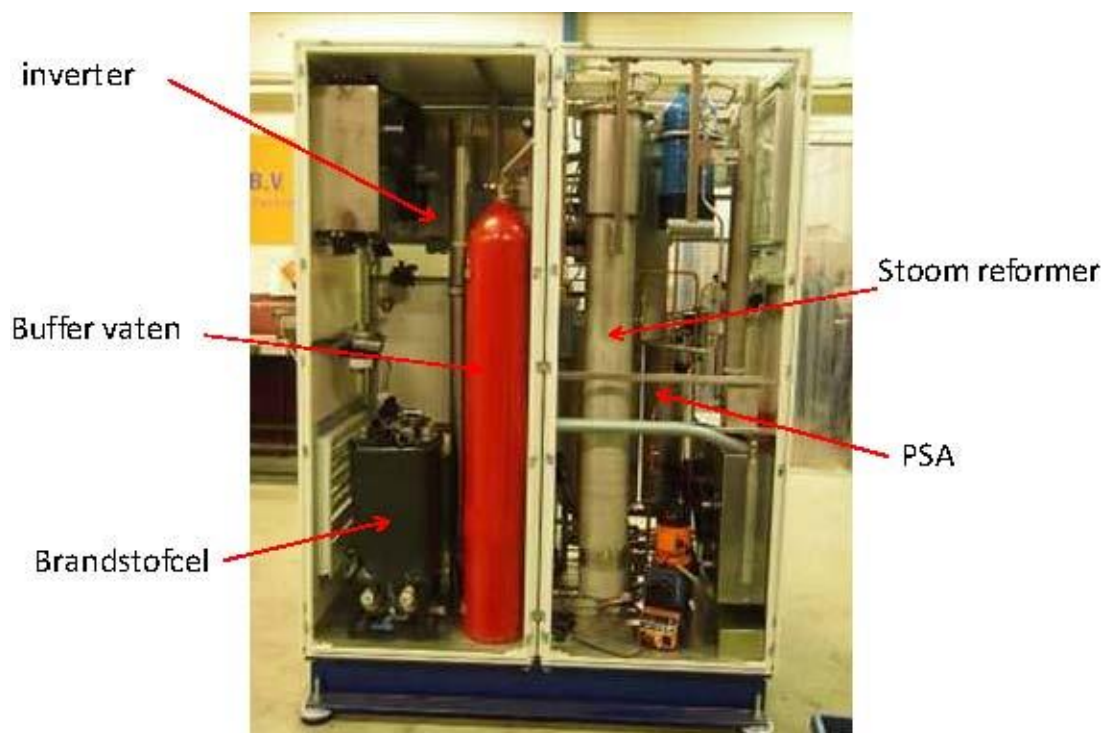


Figuur 2: schematische weergave van het SFN smart grid

In deze eerste fase bleek een eerste knelpunt: de beschikbaarheid van de hoge temperatuur brandstofcellen bleek moeilijk te worden omdat de tot dan toe enige leverancier van deze materialen te stoppen met de productie hiervan. Er is gekozen om systemen met een lage temperatuur PEM stacks te gebruiken. Op dat moment waren voornamelijk puur waterstof stacks commercieel verkrijgbaar. Hierdoor moest de CO verwijderingsstap aangepast worden tot een hoge druk PSA, waardoor tevens de reformer op hoge druk (8 bara) uitgevoerd moest worden.

Doordat er tijd gestoken is in het gereedmaken van de totale documentatie van de systemen, is het vrij makkelijk om in de toekomst nieuwe systemen te bouwen voor dezelfde of andere toepassingen.

De tweede fase van het project behelsde het bouwen van de systemen. Eén systeem is het referentie systeem dat gebruikt werd om technische oplossingen te testen alvorens ze te introduceren in de andere drie systemen, de duurtest systemen. De drukvaten, zoals de reformer en de PSA vaten zijn gemaakt omdat volgens de PED richtlijnen. Alle balance of plant componenten (kleppen, sensoren, etc) zijn besteld en de systemen zijn bij Hygear opgebouwd. De foto in Figuur 3 laat de inhoud van het SFN systeem zien met de belangrijkste componenten. In het werkende systeem is de stoomreformer geïsoleerd om warmte verliezen tegen te gaan.



Figuur 3: Hardware van een SFN systeem (zonder isolatie)

Het uitzoeken en programmeren van software voor de smart grid toepassingen is ook gestart in deze fase. Hier bleek de stabiliteit van sommige software onderdelen te wensen over te laten en nam het ontwikkelen van de software hierdoor meer tijd dan voorzien.

In deze periode van het project ging project partner Exendis failliet, er waren wel 4 omvormers geleverd om ingebouwd te worden in de systemen.

In de derde fase zijn de systemen getest. Hier kwamen een aantal knelpunten samen die het oorspronkelijke plan van smart grid gekoppelde brandstofcellen niet mogelijk maakte. Ten eerste bleken de omvormers niet stabiel en faalden snel bij koppeling in de systemen aan de stacks. Doordat Exendis niet meer beschikbaar was kon de koppeling van de stacks aan het net niet gebeuren. De smart grid koppeling was helaas niet mogelijk omdat de software hiervoor niet in een ver genoeg ontwikkelde staat was om te gebruiken. De gebouwde systemen zijn geïnstalleerd op het testveld van Hygear en de test campagne is van start gegaan met het draaien van de systemen tot en met de productie van pure waterstof die naar de stack zou moeten gaan.

De test fase heeft bijna 1.5 jaar geduurd waarin de systemen samen rond de 6000 draaiuren gemaakt hebben. De systemen worden gevoed met aardgas en gedemineraliseerd water. Tijdens de duurtest is vooral gekeken naar de betrouwbaarheid en degradatie van componenten. Het bleek al snel dat de grootste degradatie van componenten optreedt door het starten en stoppen van de systemen. Wanneer ze continu blijven draaien, zijn de systemen zeer stabiel.

Figuur 4 laat de prestaties van de reformers zien. De belangrijkste parameter is de hoeveelheid methaan die uit de reformer komt. Deze is een maat voor de degradatie van de katalysator. Bij een hogere aardgasvoeding kan er een hoeveelheid methaan door de reformer heen slippen. Een gedeactiveerde katalysator laat meer methaan slippen. Gedurende de looptijd, maar vooral als functie van het aantal starts deactiveert de katalysator. Tijdens het project is gebleken dat een behandeling met stoom op hoge temperatuur de activiteit terug kan brengen. Dit geeft aan dat deze reversibele deactivering een initiële vorm van koolstofvorming op de katalysator is. Deze koolstof reageert met stoom tot CO₂ en het katalysator oppervlak wordt schoon gemaakt. Dit is een belangrijke bevinding die een verdere commercialisatie van deze technologie mogelijk maakt.



Figuur 4: methaan concentratie in het reformaat: een maat voor de prestatie

De maximale waterstof productie van de systemen is $6,5 \text{ m}^3/\text{uur}$. Deze productie wordt gehaald bij een aardgas voeding van $3 \text{ m}^3/\text{uur}$. Deze waarden leveren een reformer efficiëntie van 60%

gebaseerd op de verbrandingsenergieën van aardgas en waterstof. De elektrische efficiëntie van een LT PEM brandstofcel is rond de 50%. De combinatie van deze waarden levert een systeemrendement op van ongeveer 30-35%. Omdat bij kleine warmtekrachtsystemen ook de warmte nuttig te gebruiken is, levert dit vergeleken met centrale elektriciteit en een hoogrendement CV-installatie een CO₂ besparing tussen de 35 en 40% op.

Een van de redenen van uitvallen van de systemen was de veranderingen van gas compositie als functie van de PSA prestaties. Deze problemen zijn opgelost door aanpassen van controls, zowel door het veranderen van de kleppen tussen de PSA en de brander en door de softwarematige aansturing van de kleppen. Ook is er een hardware matige aanpassingen gemaakt waar op het moment een octrooi aanvraag voor loopt.

In fase 4 is gekeken naar de levensduur en degradatie van de modules en componenten in de systemen. De degradatie is te verdelen in twee groepen.

1. Het falen van balance of plant componenten zoals kleppen die niet meer functioneren en sensoren die falen.
2. Het langzaam degraderen van katalysatoren en metaal degradatie als gevolg van hoge temperaturen en gas composities.

De oplossing van de eerste type degradatie is het vervangen van de onderdelen door alternatieven met dezelfde functionaliteit. Soms kunnen ook de controlstrategieën aangepast worden om de faalmechanismen te vermijden.

De degradatie van metalen is in detail bestudeerd door gecorrodeerde metalen onderdelen uit warmtewisselaars te onderzoeken met een electronenmicroscop (Figuur 5). Hierbij zijn de chemisch degradatie mechanismen gedetecteerd.



Figuur 5: gecorrodeerde warmtewisselaar met SEM beeld (rechts)

Uit de analyse blijkt dat het gebruikte staal voor bepaalde hoge temperatuursituaties in de systemen niet geschikt is en er voor een alternatief gekozen moet worden. Binnen het project zijn de alternatieve staalsoorten al gekozen.

Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling

Brandstofcellen systemen voor kleinschalige WKK zijn op het moment nog duur, met name door de kleine aantallen systemen die gemaakt worden. In Japan wordt dit type systemen al in grotere aantallen geïnstalleerd sinds de laatste paar jaar. Dit zijn kleinere 1kWe systemen in plaats van de 5kW systemen die in het huidige project bestudeerd zijn. Dit heeft tot gevolg dat het aantal onderdelen groter is en eerder een kostenreductie op aantallen mogelijk is. In Europa is deze trend ook ingezet en worden kleinschalige systemen gedemonstreerd. Dit heeft voor de energiebesparing zoals berekend in paragraaf 4.1 geen gevolgen.

In de afgelopen jaren tussen de aanvang van het project en nu is er veel meer duidelijkheid geworden over de betrouwbaarheid en de kosten van brandstofcellen systemen en de daarmee gerelateerde kosten. De kosten van het type systeem voor de generatie van 1 kWe moet onder de € 5000 per kWe liggen volgens de analyses van de FCH-JU in Brussel. Studies zoals de huidige laten zien dat de kosten van de brandstofcelstack moet dalen met 80 tot 90% als de systemen commercieel moeten zijn. De huidige prijzen van stacks zijn veelal gebaseerd op handmatige assemblage van de componenten en de stack zelf. Een zeer grote verlaging van de kosten zijn haalbaar zoals de Japanse leveranciers hebben laten zien. De systemen in Japan werden eerst geïnstalleerd met een grote subsidie van de regering, hetgeen de projecten economisch haalbaar maakt en de mogelijkheid van productie opschaling mogelijk maakte. De huidige brandstofcellen worden bijna geheel zonder verdere subsidies verkocht en gebruikt.

De ontwikkeling van micro CHP systemen in de voorbije jaren en de geschatte kosten van de stacks laten zien dat de productie van apparaten economisch haalbaar zou moeten zijn. Deze evaluaties zijn gebaseerd zowel voor HT PEM als SOFC brandstofcellen systemen. De situatie voor LT PEM systemen ligt iets anders daar de koolmonoxide tolerantie van deze stacks laag ligt en de CO verwijdering uit het reformaat een complexe en daardoor dure oplossing geeft. Deze systemen zijn aantrekkelijker bij iets hogere elektriciteitsproducties (5-20kWe).

De referentietechnologie betreft een centrale elektriciteitsgeneratie met transport in combinatie met verwarmingsketels. Voor de eindgebruiker betekent de aanschaf van een kleinschalig WKK systeem op basis van HT PEM brandstofcellen, een onmiddellijke besparing in de aanschaf van een nieuwe ketel. Daarnaast wordt er gedurende de jaren dat het systeem in bezit is aanzienlijk bespaard op de inkoopkosten voor elektrisch vermogen. Deze kosten dienen binnen drie jaar de rest van de kosten te dekken waardoor na drie jaar het break even punt voor de eindgebruiker is gepasseerd.

De belangrijkste innovatieve bijdrage van dit project is op het vlak van controls en kennis over de betrouwbaarheid van componenten en systemen binnen de apparaten. Daar het een demonstratie project betreft is er niet heel veel nieuwe technologie ontwikkeld, maar is de focus geweest op het draaien van de systemen gebaseerd op bestaande en beschikbare technologieën.

Enkele innovatieve ideeën zijn uitgewerkt om te worden geïmplementeerd. Het betreft onder meer twee manieren om de brander van de reformer stabiel te kunnen laten draaien op anode tail gas van de brandstofcel of op off gas van een pressure swing adsorber. Een ander idee is gerelateerd aan de

opbouw van het reformer systeem. Het betreft een methode van reformer opbouwen waardoor gemakkelijk delen te vervangen zijn.

Naast de technologie van het brandstofcellen systemen is er kennis opgedaan tot het ontwikkelen van de software voor een smart grid. Het systeem moet data van de systemen kunnen uitlezen, de optimale configuratie en operationele condities van de systemen berekenen en deze terug sturen naar de apparaten. Dit betekent een uitgebreide integratie van data en data-analyse die innovatieve manieren van back-en forward feed controls en de daarop gebaseerde aansturing van de systemen.

Spin off binnen en buiten de sector

De spin off van de gebruikte technologieën kunnen op tal van applicatie gebruikt worden. In de eerste plaats is stoom reforming een standaard manier om water stof houdende gassen te maken uit koolwaterstoffen. Met de stoom reformer zoals in SFN gebruikt kan een reformaat gemaakt worden voor alle typen brandstofcellen: LT en HT PEM maar ook Solid Oxide fuel cell (SOFC) stacks. Uit reformaat bedoelt voor SOFC systemen hoeft geen CO verwijderd te worden, CO kan als brandstof dienen in deze brandstofcel waar het wordt geoxideerd naar CO₂. Recentelijk is de belangstelling voor brandstofcellen systemen op allerlei vlak weer toegenomen. Naast de automobiel industrie is ook het gebruik van brandstofcellen op schepen en in havens in opmars.

Een tweede spin off zijn apparaten die pure waterstof kunnen maken voor tal van kleinschalige applicaties. Dit kan bijvoorbeeld toegepast worden in de voedingsmiddelen industrie, de metaal industrie, elektronica en glas productie faciliteiten. Een groot voordeel van de stoom reforming is dat de technologie modulair kan worden toegepast. Als grondstoffen kunnen in principe in de huidige reformer elke gasvormige koolwaterstof gebruikt worden. Dit zou dus naast aardgas ook LNG en LPG zijn. Met een kleine aanpassing zijn ook vloeibare koolwaterstoffen omgezet kunnen worden, zoals bio-ethanol en diesel.

De PSA technologie kan ook ingezet worden in een scala aan andere gas scheidingsprocessen. Te denken valt aan het opwaarderen van biogas met verontreinigingen van CO₂ en stikstof naar aardgas kwaliteit om in het aardgas grid te injecteren.

De ontwikkeling van software voor smart grid systemen levert kennis op over de dataverwerking van specifiek brandstofcellen systemen, maar deze kennis kan ook worden gebruikt in het koppelen van andere processen die modulair zijn en in en uit geschakeld kunnen worden om een hoge proces efficiëntie te kunnen bereiken. Het toepassen van smart grids in huishoudelijke WKK systemen is in opkomst maar kan ook bijvoorbeeld op schepen toegepast worden. Hierbij kan dan snel een goede balans gevonden worden tussen de optimalisatie per individuele energiebron en het totale systeem efficiëntie.

Het Smart Fuel Cell Network project heeft geen openbare publicaties opgeleverd. Wel zijn er enkele octrooieerbare ideeën uit het werk voortgekomen. Deze zijn in het proces van het aanvragen van een octrooi.

Een digitale versie van het voorliggende rapport is kosteloos te verkrijgen bij HyGear b.v. Voor deze en verdere informatie kunt u contact opnemen met:

Dick Liefstink HyGear Fuel Cell
Systems Industrial Parc Kleefse
Waard (IPKW) Westervoortsedijk 73
6827 AV Arnhem Telefoon:
088-9494300 E-mail: info@hygear.nl

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken,
innovatieregeling EnergieOnderzoekSubsidie (EOS) Demonstratie, uitgevoerd door Rijksdienst
voor Ondernemend Nederland.